

**CAROLINA PIMENTA MOTA**

**SISTEMA GUIADO SEM FIO PARA SOLDAGEM  
MECANIZADA SUPERVISIONADA COM USO DE  
ILUMINAÇÃO POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2016**

**CAROLINA PIMENTA MOTA**

**SISTEMA GUIADO SEM FIO PARA SOLDAGEM  
MECANIZADA SUPERVISIONADA COM USO DE  
ILUMINAÇÃO POR INFRAVERMELHO PRÓXIMO**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Coorientador: Prof. Dr. Roberto M. Finzi Neto

**UBERLÂNDIA - MG**

**2016**



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

---

M917s  
2016 Mota, Carolina Pimenta, 1986-  
Sistema guiado sem fio para soldagem mecanizada supervisionada  
com uso de iluminação por infravermelho próximo / Carolina Pimenta  
Mota. - 2016.  
223 f. : il.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.  
Coorientador: Roberto Mendes Finzi Neto.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - 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 sobrinhos Mateus, Rafaela  
e Ana Clara, que me trouxeram a  
felicidade e a energia necessárias  
para minha dedicação a esse  
trabalho.

## AGRADECIMENTOS

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

Ao IFG Campus Itumbiara e ao IFTM Campus Ituiutaba, pela flexibilização de minha carga horaria como docente e por meu tempo de afastamento que possibilitaram a continuidade de minha qualificação.

À FAPEMIG, à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro e o 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.

Aos meus colegas e ex-colegas de laboratório: Diandro, Thonson, Victor, Marcus Vinícius, Luiz, Lucas, Fernando e todos que eu possa ter esquecido-me de citar, pela amizade, disponibilidade de ajudar, pelas conversas dentro e fora do contexto do trabalho, cafés, idas ao R.U. e churrascos.

Ao grupo LAPROSOLDA, pela disponibilidade de todos os recursos necessários para a conclusão desse trabalho, mas principalmente pelos princípios pessoais e profissionais que aprendi ao longo desses dez anos.

MOTA, C. P. **Sistema Guiado Sem Fio Para Soldagem Mecanizada Supervisionada Com Uso De Iluminação Por Infravermelho Próximo**. 2016. 223 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

Nos processos de soldagem, a visão pode fornecer dados desde a 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 sua visualização. Em trabalhos anteriores, foi desenvolvido um sistema de visão para monitoramento dos processos de soldagem, “ViaSolda”, de baixo custo e alta flexibilidade, com o uso de iluminação através do acionamento pulsado de diodos laser de alta potência no infravermelho próximo. Baseado na possibilidade de visualização da região do arco de soldagem sem interferência da luz deste arco, tem-se como o objetivo principal deste trabalho desenvolver um sistema sem fio para soldagem mecanizada, com disponibilização de um sistema supervisor com auxílio visual pelo uso de iluminação no infravermelho próximo, de uma câmera com baixo tempo de exposição, 1,25  $\mu$ s (SI-M330), e controle remoto de posicionamento da tocha de soldagem, com aplicação focada em soldagens de tubulações. Os resultados obtidos possibilitaram a validação do novo protótipo ViaSolda em soldagens TIG, TIG Pulsado, MIG/MAG com transferência por curto-circuito, curto-circuito controlado (STT, RMD e CMT), em voo livre (globular, goticular e com alongamento), com valores de tensão de até 33 V e correntes de até 310 A, gases CO<sub>2</sub> puro, Ar + 25% CO<sub>2</sub>, Ar + 8% CO<sub>2</sub> e Ar + 5% O<sub>2</sub>, em filmagens de baixa (30 FPS) e alta velocidades (300 FPS). Utilizando-se de um MCU como dispositivo mestre, um codificador IP, o protótipo ViaSolda com iluminação por fibra óptica, possibilitou visualizar a região da poça fundida e controlar o movimento da tocha por WiFi, em soldagens MIG/MAG por curto-circuito e globular, comprovando o sucesso da aplicabilidade de sistemas sem fio em soldagens.

**Palavras-Chave:** Visão; Supervisão; Sem Fio, Soldagem, Diodos Laser.

MOTA, C. P. Wireless Guided System for Supervised Mechanized Welding With Near-Infrared Illumination. 2016. 223 f. Dr. Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

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. A welding low cost and high flexibility monitoring vision system, called "ViaSolda", was created in previous works, driving pulsed high power near infrared laser diodes. Thus, the main purpose of this work is the assessment and development of a wireless guided system for mechanized welding, providing a visual-added supervisory system, by the use of near infrared illumination and a low shutter time camera, 1.25  $\mu$ s (SI-M330), and a welding torch's positioning remote control, focused in pipe welding. Obtained results made possible ViaSolda's new prototype validation in GTAW, Pulsed GTAW, GMAW with short circuit transference and its derivatives (STT, RMD and CMT), with globular and spray transference, in voltages up to 33 V and currents up to 310 A, pure CO<sub>2</sub>, Argon + 25% CO<sub>2</sub>, Argon + 8% CO<sub>2</sub> and Argon + 5% O<sub>2</sub> gases, in low (30 FPS) or high (300 FPS) speed imaging. The use of a MCU as master device, an encoder IP, the ViaSolda prototype with illumination by optical fiber made possible to visualize the melted pool and its surroundings, wireless control the torch movement, in GMAW welding with short circuit and globular transferences, proving the success of applying wireless systems in welding processes.

**Keywords:** Vision; Supervision; Wireless, Welding, Laser Diodes.

## LISTA DE SÍMBOLOS

A/D	Conversor Analógico Digital
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
C	Capacitor (capacitivo)
CA	Corrente Alternada
CAD	Projeto Assistido por Computador
CC	Corrente Constante
CCD	Dispositivo de Carga Acoplada
CI	Circuito Integrado
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CPU	Unidade de Processamento Central
CSS	Folha de Estilo em Cascata
DBCP	Distância bico de contato peça
DEP	Distância Eletrodo Peça
DHCP	Protocolo de configuração dinâmica de máquina
DMA	Acesso direto à memória
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
EMI	Interferência Eletromagnética
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FPS	<i>Frames per Second</i> (Quadros por Segundo)
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HTML	Linguagem de Marcação de Hipertexto
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto
ICSP	Programação Serial <i>In Circuit</i>
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
IHM	Interface Homem-Máquina
IP	Protocolo de Internet
L	Indutor (indutivo)
LED	Diodo emissor de luz
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MCLR	Master Clear
MCU	Microcontrolador
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MIPS	Milhões de Instruções por Segundo
MOSFETs	Transistor de Efeito de Campo Metal - Óxido – Semiconductor

NIR	Infravermelho próximo
NPN	Lógica negativa
PCB	Placa de circuito impressa
PN	Positiva-Negativa
PNP	Lógica positiva
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (policloreto de polivinila)
PWM	Modulação por largura de pulso
R	Resistor (resistivo)
RAM	Memória de acesso randômico
RF	Radio Frequência
RMD	<i>Regulated Metal Deposition</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
ROM	Memória de somente leitura
RPM	Rotações por Minuto
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TTL	Transistor-Transistor Logic
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	Ultravioleta

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO .....	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 VISÃO EM PROCESSOS DE SOLDAGEM .....	6
2.2 SISTEMAS EMBARCADOS E COMUNICAÇÃO SEM FIO .....	14
2.3 CIRCUITOS ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA .....	19
2.3.1 <i>Circuitos Ressonantes</i> .....	20
2.3.1.1 <i>Circuito Ressonante em série</i> .....	21
2.3.1.2 <i>Circuito Ressonante em paralelo</i> .....	23
2.3.2 <i>Conversores de Pulso Ressonantes</i> .....	23
2.3.3 <i>Interferência Eletromagnética em Circuitos Eletrônicos</i> .....	24
2.4 MOTORES DE PASSO .....	25
2.5 TÓPICOS EM DESENVOLVIMENTO WEB .....	27
2.5.1 <i>HTML e CSS</i> .....	27
2.5.2 <i>Bootstrap</i> .....	29
METODOLOGIA .....	33
3.1 DIODO LASER DE ALTA POTÊNCIA .....	34
3.2 CÂMERA DE BAIXO TEMPO DE EXPOSIÇÃO .....	36
3.3 VISÃO GERAL DO TRABALHO .....	37
ENSAIOS PRELIMINARES .....	38
4.1 ADAPTAÇÃO DO SISTEMA RESSONANTE .....	38
4.2 VALIDAÇÃO EM SOLDAGEM .....	42
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
PROTÓTIPO DO SISTEMA DE VISÃO – VIASOLDA PULSO QUADRADO .....	47
5.1 PROJETO DO PROTÓTIPO DE PULSO QUADRADO – VIASOLDA .....	47
5.1.1 <i>Topologia de Pulso Quadrado - ViaSolda</i> .....	49
5.1.2 <i>ViaSolda – Alta Frequência</i> .....	65
5.1.3 <i>ViaSolda – Fibra Óptica</i> .....	75



5.1.4	<i>ViaSolda – Protótipo Final</i> .....	79
5.2	VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO VIASOLDA .....	81
5.2.1	<i>Soldagens Convencionais Deposição sobre Chapa</i> .....	82
5.2.1.1	TIG e TIG Pulsado .....	83
5.2.1.2	MIG/MAG .....	85
5.2.2	<i>Soldagens com Transferência por Curto-Circuito Controlado e Convencional</i> .....	87
5.2.3	<i>Soldagens com o Uso de Filmagem em Alta Frequência</i> .....	96
5.2.3.1	Transferência por Curto-Circuito .....	98
5.2.3.2	Transferência em Voo Livre .....	106
5.2.4	<i>Soldagens com o Uso de Fibra Óptica</i> .....	111
5.2.4.1	Transferência por Curto Circuito .....	111
5.2.4.2	Transferência Voo Livre .....	119
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
	PROJETO DO SISTEMA GUIADO SEM FIO – VIASOLDA WEB.....	126
6.1	REQUISITOS DO SISTEMA .....	126
6.2	VIASOLDA WEB – DISPOSITIVO MESTRE.....	128
6.2.1	<i>Hardware de Controle Sem fio</i> .....	129
6.2.2	<i>Interface Homem-Máquina (IHM)</i> .....	134
6.2.2.1	IHM Webserver .....	134
6.2.2.2	IHM Integrada ao Sistema Embarcado .....	139
6.2.3	<i>Firmware de Controle – ViaSolda WiFi</i> .....	141
6.3	TOPOLOGIA DE PULSO RESSONANTE .....	147
6.3.1	<i>Circuito Modular de Topologia Resonante</i> .....	147
6.3.2	<i>Circuito de Controle e Lógica Digital</i> .....	156
6.3.3	<i>Circuito de Diodos Laser</i> .....	159
6.3.4	<i>Protótipo Ressonante e medidas de Proteção</i> .....	162
6.4	VALIDAÇÃO DO VIASOLDA WEB.....	164
6.4.1	<i>Soldagens MIG/MAG</i> .....	164
6.4.2	<i>Avaliação Subjetiva de Usuários</i> .....	169
	CONCLUSÕES .....	172
	TRABALHOS FUTUROS .....	175
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	177
	APÊNDICE I .....	188

APÊNDICE II .....	190
APÊNDICE III .....	192
APÊNDICE IV .....	197
APÊNDICE V .....	200
APÊNDICE VI .....	201
APÊNDICE VII .....	203
APÊNDICE VIII .....	207
APÊNDICE IX .....	208
APÊNDICE X .....	223

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 Motivação do Trabalho**

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. Um soldador experiente utiliza de sua percepção visual para monitorar, por exemplo, o formato da 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.

Apesar da grande tendência em utilizar-se de máquinas programáveis nos ambientes industriais, onde a receptibilidade e a produtividade são fatores chave na produção em massa, a capacidade de se adaptar às mudanças do ambiente, normalmente imprevisíveis, podem transformá-las em uma ferramenta ineficaz. 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, ilustrado na Figura 1.1.

O monitoramento direto por parte do operador sobre o processo também traz seus inconvenientes. O processo gera grandes fluxos de radiação UV (ultravioleta), altas temperaturas e emissão de fumos (gases nocivos e fuligem) e, ainda ergonomicamente desfavorável para o operador, sendo prejudicial a curto e longo prazo à sua saúde. Ainda, em casos específicos, uma máquina, se devidamente projetada, tem capacidade de exercer trabalhos em ambientes radioativos, com temperaturas extremas ou sujeita a grandes pressões. Mas ambientes como esses não são adequados para a permanência do operador.

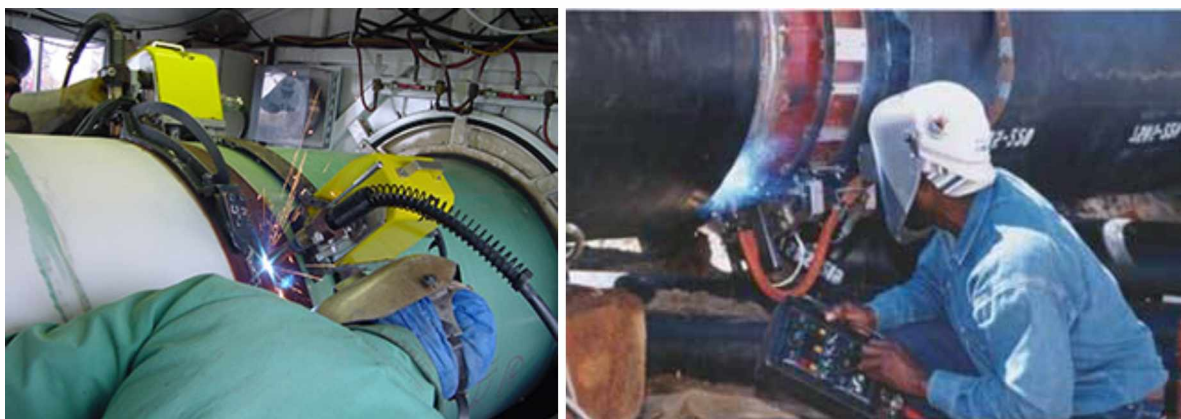


Figura 1.1 - Monitoramento visual de soldagens automatizadas em tubulações.

O controle teleguiado, ou sistema supervisório com auxílio visual, consiste em disponibilizar ao operador uma imagem em tempo real do ambiente em que a máquina está trabalhando, possibilitando ao mesmo um controle manual das operações a serem efetuadas. Mesmo que a operação em sua base seja programada na unidade de processamento da máquina, o operador tem a liberdade de ajustar parâmetros durante a realização do processo quando existir a necessidade (MOTA, 2008). Exemplos de produtos comerciais que buscam a qualidade da solda através do auxílio visual são mostrados na Figura 1.2.



Figura 1.2 – Produtos encontrados na FABTECH 2011/2014 que envolvem o uso de auxílio visual em soldagens.

Com base no estudo de trabalhos na área de visão aplicada à processos de soldagem, desenvolveu-se um protótipo de um sistema de visão com uso de iluminação no infravermelho próximo (chamado de ViaSolda), de baixo custo e flexível (MOTA, 2011). Isso foi possível através do uso de uma câmera USB (*Universal Serial Bus*), modelo PL-B76U, com alguma resposta no espectro infravermelho e tempo de abertura de 100  $\mu$ s (PIXELINK)

e de diodos laser de alta potência (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2006) como fonte de iluminação.

Exemplos dos quadros obtidos durante o uso do ViaSolda na soldagens TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) são mostrados na Figura 1.3. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do eletrodo de 2,4 mm e o diâmetro do arame de 1,2 mm.

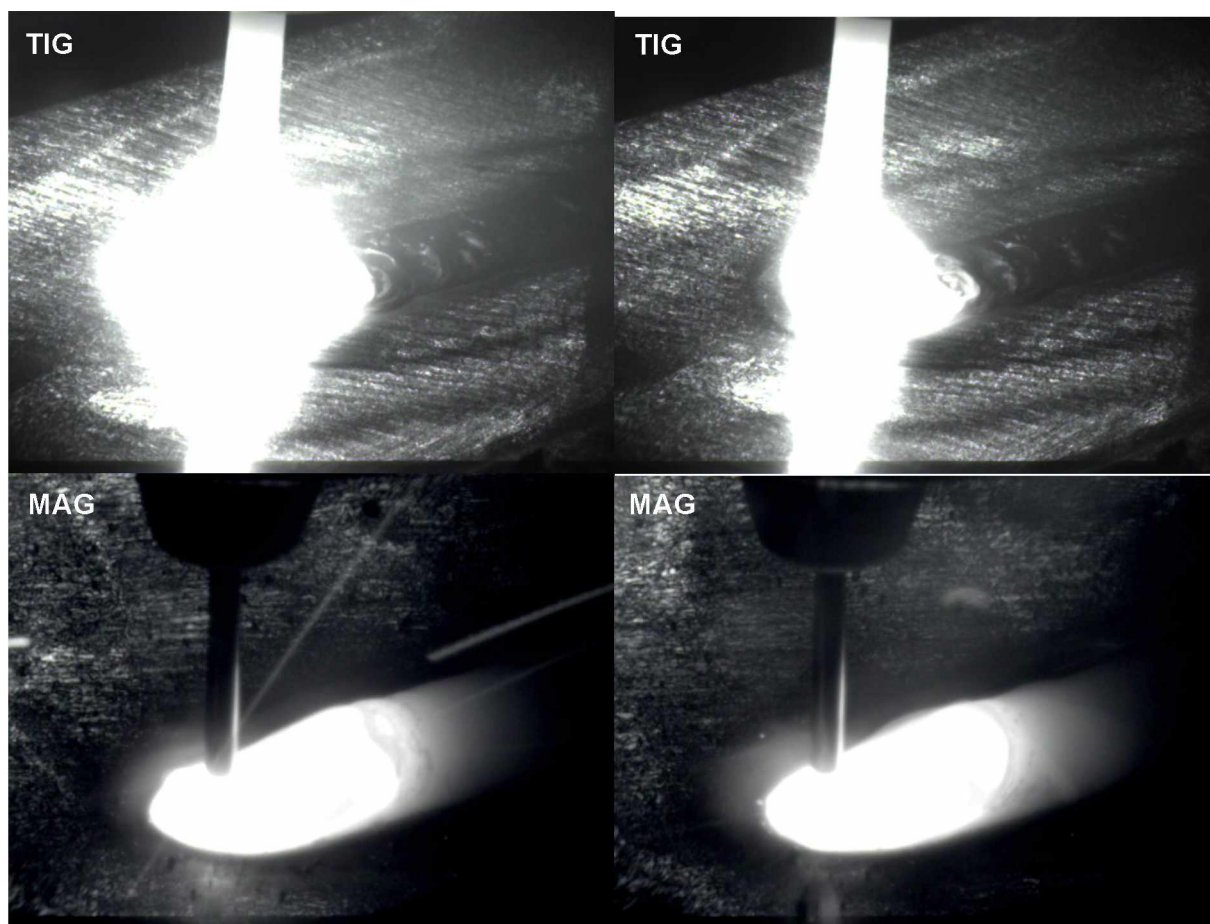


Figura 1.3 - Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens TIG (100 A, Ar puro – como escala adotar diâmetro do eletrodo igual a 2,4 mm) e MAG (100 A, CO<sub>2</sub> puro – como escala adotar diâmetro do arame igual a 1,2 mm) (MOTA, 2011).

## 1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um sistema sem fio para soldagem mecanizada, com disponibilização de um sistema supervisorío com auxílio visual pelo uso de iluminação no infravermelho próximo e controle remoto de posicionamento da tocha de soldagem, com aplicação focada em soldagens de tubulações.

Tendo em vista o alcance do trabalho desenvolvido por Mota (2011), onde foi possível iluminar de forma inicial a poça de soldagem, pretende-se dar prosseguimento ao tema de pesquisa através da otimização do sistema de visão desenvolvido em um novo sistema para acompanhamento supervisorio de processos de soldagem a arco.

Como objetivos específicos do trabalho, tem-se:

- Introdução de uma câmera com baixo tempo de abertura ao sistema de visão ViaSolda;
- Otimização da topologia de acionamento dos diodos laser de alta potência e construção de um protótipo com melhor capacidade de iluminação e robustez;
- Realização de experimentos de bancada para determinação dos limites alcançáveis do protótipo e do diodo laser, em termos de intensidade e densidade luminosa e velocidade de aquisição de imagens;
- Validação do protótipo desenvolvido em Soldagem diversas, levando-se em consideração as condições normais e extremas de densidade luminosa e velocidade;
- Estabelecimento dos requisitos e objetivos do sistema guiado sem fio para soldagem mecanizada de acordo com os resultados obtidos no protótipo anterior;
- Projeto, desenvolvimento e validação de um sistema guiado sem fio para soldagens mecanizadas com uso de iluminação no infravermelho próximo.

### **1.3 Organização da Tese**

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

No Capítulo II é realizada uma revisão bibliográfica dos tópicos teóricos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho como um todo: visão em soldagem, sistema embarcado e comunicação sem fio, uma introdução aos circuitos de potência e, por fim, tópicos de desenvolvimento web.

No Capítulo III é apresentada uma visão geral do trabalho, assim como os componentes chaves (diodo laser e câmera) para e um escopo inicial para o desenvolvimento do projeto do sistema guiado sem fio para soldagens mecanizadas.

No Capítulo IV tem-se a descrição do estudo preliminar realizado em soldagens TIG e MIG/MAG, com o uso da câmera analógica de baixo tempo de exposição em conjunto com o ViaSolda Ressonante obtida em trabalho anterior para tomada de decisões.

No Capítulo V é realizado o desenvolvimento do projeto de um novo protótipo do sistema de visão por diodos laser no infravermelho próximo para monitoramento por auxílio visual em processos de soldagem, desde sua simulação computacional a testes experimentais de bancada, com o intuito de também descobrir os limites de acionamento do diodo laser. Diversas validações são realizadas com esse sistema de visão, com estudo de baixa e alta velocidade e diversos parâmetros de processos de soldagem.

No Capítulo VI é realizado o projeto e desenvolvimento do sistema guiado sem fio para soldagem mecanizadas, desde determinação de requisitos, projeto de topologia de acionamento de diodos laser, itens componentes do hardware, firmware, IHMs e, por fim a validação do sistema em soldagens 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 os algoritmos implementados para a obtenção do controle de acionamento dos diodos laser, e informações adicionais que foram consideradas relevantes para o entendimento aprofundando do trabalho como um todo.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Visão em Processos de Soldagem**

A experiência visual é a principal forma que os seres humanos usam para se comunicar com o 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 para um ser humano comum, porém, esta simplicidade é equivocada e consequência de sua complexidade estar 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 um grande estímulo para o desenvolvimento de técnicas e de dispositivos tecnológicos que a reproduzam em 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.

A soldagem é um dos principais processos de fabricação utilizados na indústria para a união de materiais, principalmente nos metais, sendo cada vez mais necessária e mais empregada. Tendo isto em vista a necessidade da garantia de qualidade e produtividade dos processos envolvidos esta 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.

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 discontinuidades e defeitos. Um soldador experiente utiliza de sua percepção visual para monitorar, por exemplo, o formato da poça fundida, a DBCP e, através desses dados visuais, corrigir o que for necessário para se obter um cordão de solda de maior qualidade.

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; JIALEI *et al.*, 2014), 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.

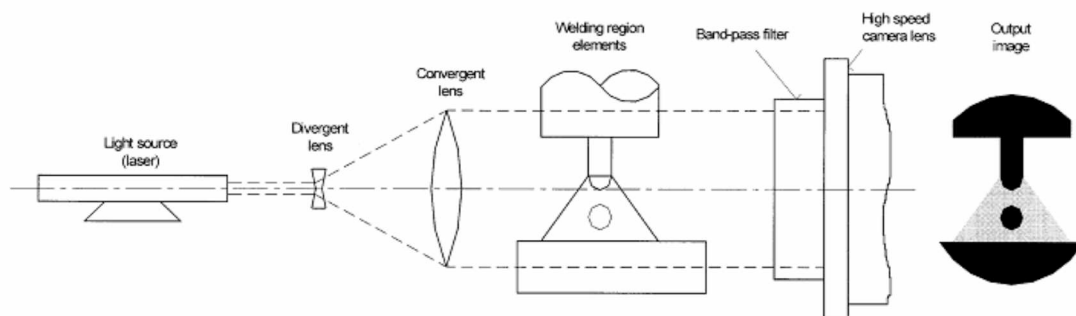


Figura 2.1 – Visualização da transferência metálica por perfilografia (BÁLSAMO *et al.*, 2000).

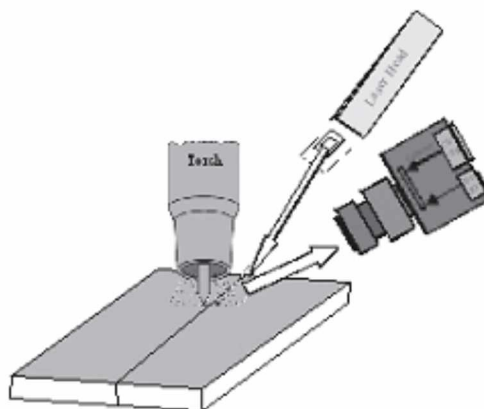


Figura 2.2 – Visualização do metal fundido por iluminação indireta (HOUGHTON *et al.*, 2007).

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 (*Metal Inert Gas*) (Figura 2.3) e estudo do comportamento da poça para soldagens TIG. O uso de sistemas passivos de visão, que tentam se aproveitar da luz proveniente do arco para visualização da poça vem sendo utilizados até o dias atuais (JINCHAO LIU *et al.*, 2015), aproveitando a simplicidade e flexibilidade de uso apenas de uma câmera em conjunto com técnica modernas de processamento de imagens.

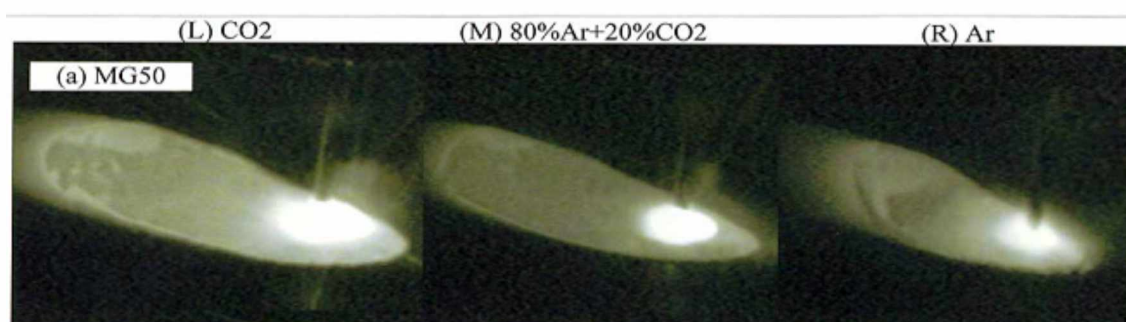


Figura 2.3 – Imagens obtidas com filtro em 950 nm no estudo do processo MIG (OGAWA e MORITA, 1999).

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 (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, como pode ser visto na Figura 2.4. WU *et al.* (2010) utiliza a técnica de sincronia com o momento de arco apagado para o estudo do processo MIG.

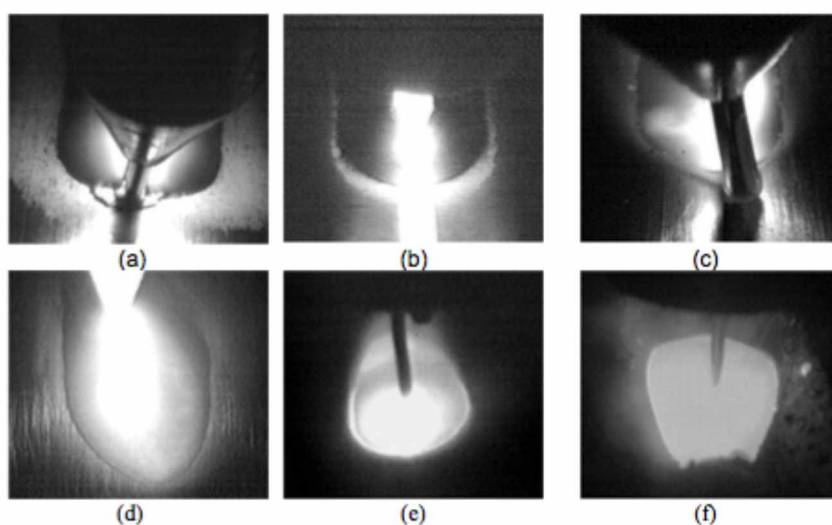


Figura 2.4 – Imagens obtidas em soldagens: (a) TIG com alimentação de arame em Alumínio, (b) TIG sem alimentação (c) TIG DC com alimentação em arame em Aço Inoxidável, (d) TIG DC sem alimentação, (e) MIG em aço carbono, (f) MIG em Aço carbono com junta em V (SMITH *et al.*, 2004)

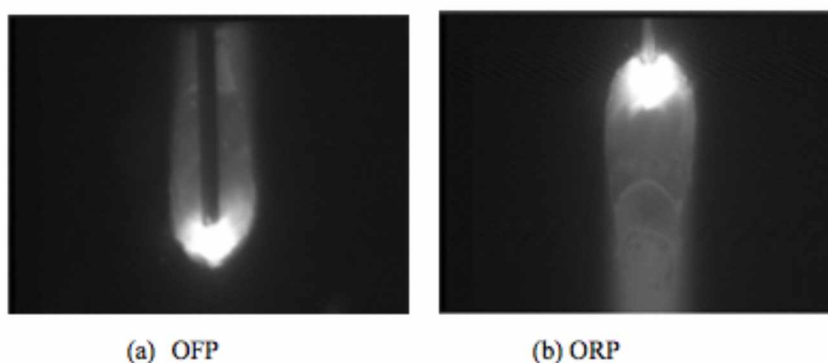


Figura 2.5 - Imagens sincronizadas com o momento do curto em MIGMAG (DBCP 19 mm, 138 A a 400 mm/min): (a) vista a frente da poça, (b) vista anterior a poça fundida (WU *et al.*, 2010)

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; LI e ZHANG, 2008; MAO e KATSUKI, 2008; ONISHI *et al.*, 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 como: 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). Ainda, pode-se citar: determinação da distribuição de temperatura na poça fundida para TIG e MIG curto-circuito (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).

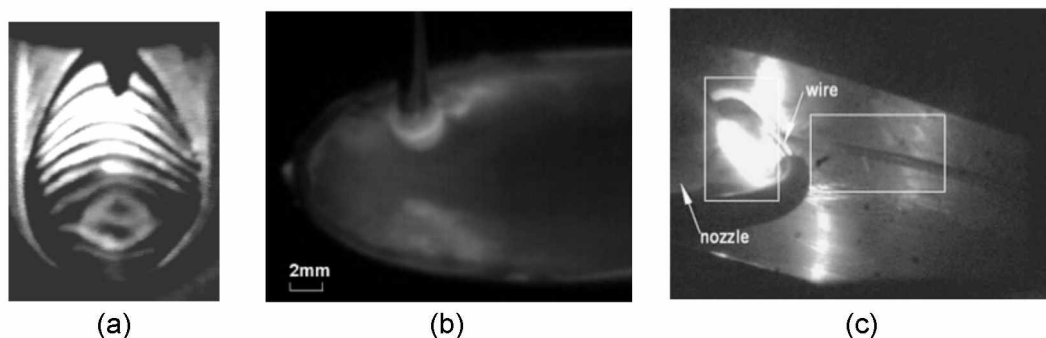


Figura 2.6 - Exemplos de imagens em Soldagem para diferentes aplicações: (a) Observação da superfície da poça com uso de laser (ZHANG, Y. M. *et al.*, 2006), (b) Observação da temperatura na poça fundida por pirometria (YAMAZAKI *et al.*, 2010) e (c) Monitoramento e controle de penetração em malha fechada (CHEN *et al.*, 2009)

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 2.7 ilustra os princípios dos dois tipos de seguidores de juntas.

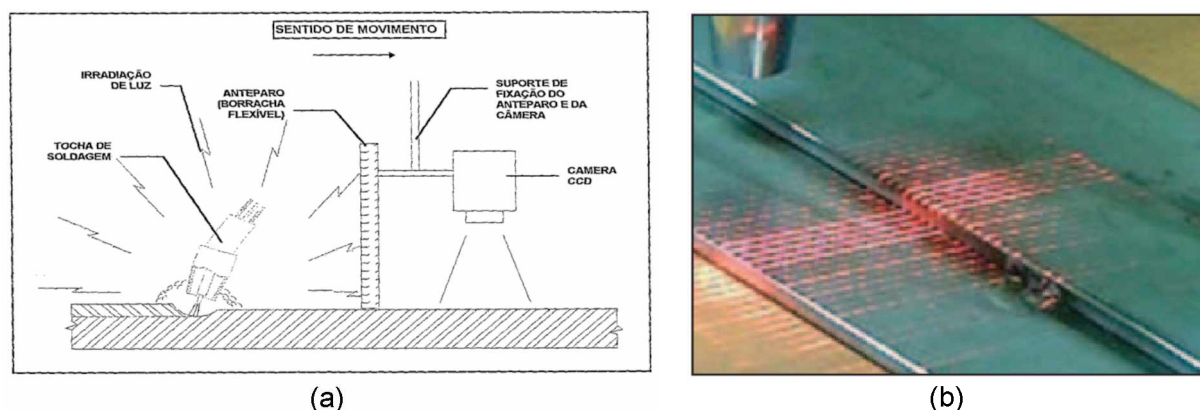


Figura 2.7 – Seguidores de junta: (a) para controle de soldagens multipasses (SILVA, 1997) e (b) com uso de laser (SUNG *et al.*, 2009).

Com o objetivo de melhoria da qualidade dos processos, estudos realizados por vários autores (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, o comprimento de onda em 1,46  $\mu\text{m}$  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 onda 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 2.8.

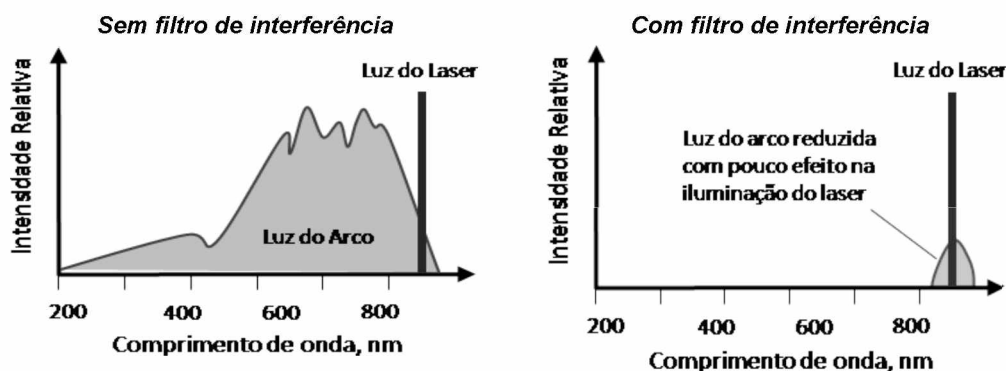


Figura 2.8 – Princípio da Filtragem do Espectro (HOUGHTON *et al.*, 2007)

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 sistema de iluminação dentro de cada tempo de abertura faz com que uma potência mínima seja necessária para que a luz se sobreponha à radiação do arco, desde que o pulso da iluminação tenha sincronia com o tempo de abertura da câmera a cada quadro adquirido, como pode ser visto na Figura 2.9.

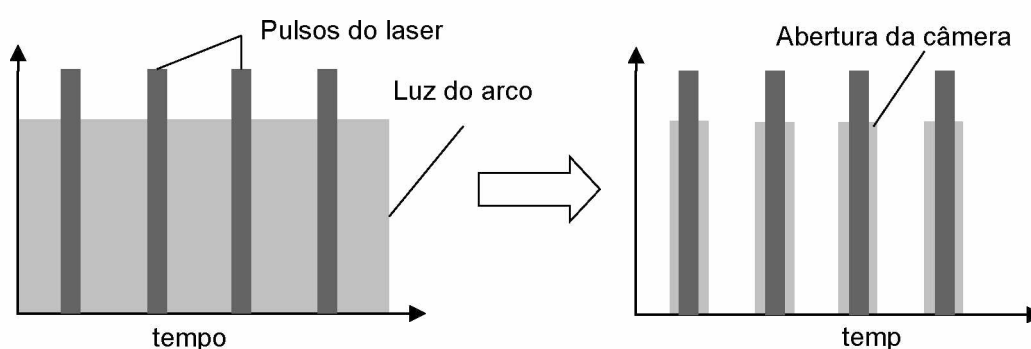


Figura 2.9 – Ajuste do tempo de abertura da câmera para minimização da potência aplicada ao laser pulsado em comparação à natureza contínua da radiação do arco .

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 emissores de luz (LEAL *et al.*) e diodos laser (Figura 2.10). 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 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 utilizado em conjunto, como pode ser visto na Tabela 2.1.

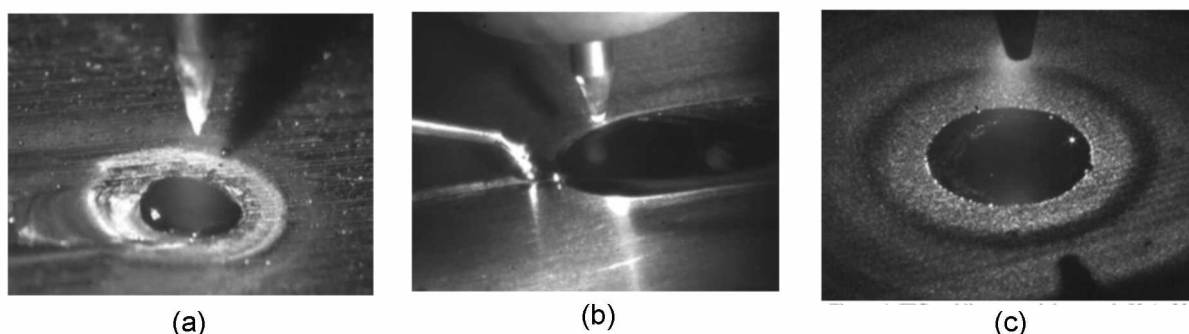


Figura 2.10 - Uso da técnica de filtragem de espectro e comparação de fontes de iluminação em soldagens TIG: (a) Laser Pulsado em 532 nm, (b) Laser Contínuo em 1064 nm e (c) Diodos Laser em 808 nm (ABDULLAH *et al.*, 2008)

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

Característica	Diodos LED	Diodos Laser
Corrente	50 a 100 mA	5 a 40 A
Potência	Menos de 1 W	50 a 250 W
Ângulo de abertura	Maior que 40°	10° a 25°
Comprimento de Onda Disponível	0,66 a 1,65 $\mu\text{m}$	0,78 a 1,65 $\mu\text{m}$
Largura do Espectro	Larga (40-190 nm FWHM)	Estreita (7-10 nm FWHM)
Custo	Menos de £2	£15 a £400
Largura do Pulso	Maior que 100 $\mu\text{s}$	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 (NIR) 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 2.11 ilustra resultados obtidos neste tipo de técnica de iluminação.

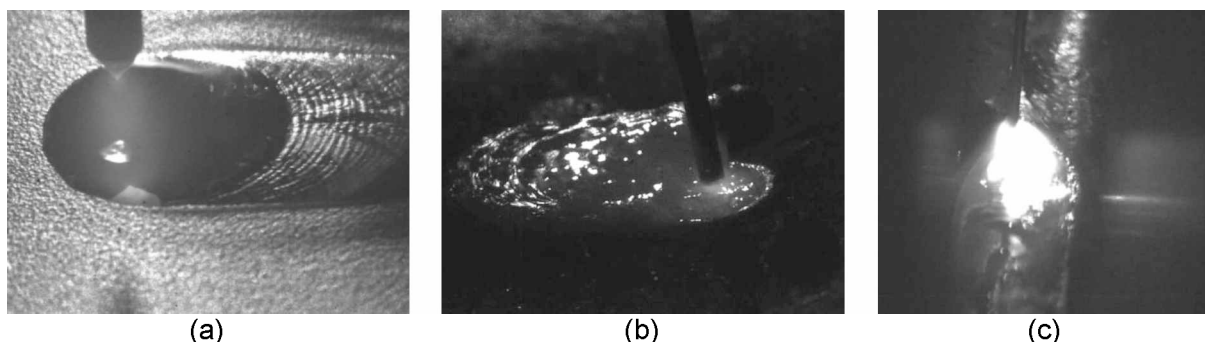


Figura 2.11 – Exemplos de imagens obtidas com sistema de visão com diodos laser de alta potência no infravermelho próximo para (a) TIG, (b) e (c) MIG/MAG (VILARINHO *et al.*, 2009; VILARINHO *et al.*, 2010).

## 2.2 Sistemas Embarcados e Comunicação Sem Fio

Sistema embarcado é um termo pouco usual no vocabulário coloquial ou mesmo técnico, porém a existência de dispositivos que levam o conceito é determinante na base da vida moderna, como videogames, decodificadores de TV, aparelhos de DVD, aparelhos de GPS, computador de bordo de automóveis, celulares, entre outros.

Segundo (CUNHA, 2007), um sistema embarcado é: “Colocar capacidade computacional dentro de um circuito integrado, equipamento ou sistema”. Desta forma, é um sistema que deve ser mais do que um simples computador, ou seja, é um sistema completo e independente, mas preparado para realizar apenas uma determinada tarefa. Autores (OLIVEIRA e ANDRADE, 2006) complementam a ideia: “... podem ser definidos como sistemas que possuem capacidade de processamento de informações vinda de um *software* que está sendo processado dentro desta unidade”.

A gama de dispositivos que podem ser definidos como um sistema embarcado gera a necessidade de subdividi-los em classes de acordo com a sua aplicação – sistemas de comunicação ou de processamento de dados, por exemplo -, o seu modo de controle – em tempo real ou reativo a eventos externos – e o tipo de interação com o usuário, a IHM (Interface Homem-Máquina) – que pode ser desde nenhuma, passando por botões e LEDs e chegando a telas gráficas ou interfaces web. Além disso, fatores como tamanho, peso, consumo de energia e robustez devem ser levados em consideração em um projeto de um sistema como este.

Independentemente do tipo de sistema embarcado a ser utilizado, seu projeto normalmente segue uma sequência definida de passos. Na metodologia de



desenvolvimento conhecida como projeto *top-down* (WOLF, 2001), o projeto é dividido na sequência das seguintes tarefas abstratas: Requisitos, Especificação, Arquitetura, Componente e Integração.

Descreve-se como o sistema deve se comportar (não como é construído), desenvolve-se a arquitetura do sistema, relacionando sua estrutura em termos de grandes componentes, identifica-se os módulos de *software* e os componentes específicos de *hardware*. Com base na identificação de todos os componentes, pode-se construir o sistema completo. Por fim, realiza-se uma integração e teste dos componentes de *hardware* e dos componentes de *software* (fase de descoberta e correção de *bugs*). Quando se conhece o funcionamento e as propriedades de alguns dos componentes antes do próprio projeto, como quanta memória necessária ou tempo de execução, utiliza-se a metodologia inversa, chamada de *bottom-up* (WOLF, 2001).

A arquitetura do sistema embarcado normalmente está intrinsicamente relacionada à organização e arquitetura de computadores. Necessita-se de uma unidade central de processamento (CPU) capaz de realizar a tarefa necessária, um ou mais dispositivos de interface com o mundo externo, em forma de sinais analógicos ou digitais e, se julgar necessário, um tipo de interface com o usuário. Dependendo do propósito de aplicação de um sistema embarcado, pode-se utilizar todos os recursos apresentados ou apenas alguns deles, não sendo esta uma organização única e obrigatória a todos. A Figura 2.12 ilustra uma possível organização de um sistema embarcado.

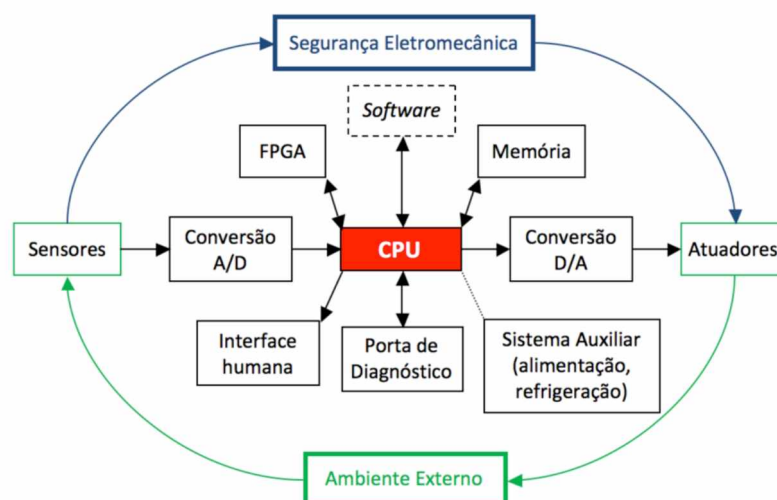


Figura 2.12 – Arquitetura de um sistema embarcado (KOOPMAN JR., 1996).

Há uma tendência moderna de se implantar cada vez mais as redes sem fio em detrimento de redes com fio, por aspectos da inviabilidade da instalação de redes com fio

em certos lugares, como pelo barateamento dos equipamentos sem fio e da interoperabilidade oferecida pela tecnologia *Wireless*. Com a expansão e banalização dos dispositivos como *tablets*, *smartphones* e TV inteligentes, o usuário tem em suas mãos habitualmente equipamentos de alto poder de processamento que podem ser usados em conjunto com equipamentos embarcados ou industriais, e todos eles possuem algum tipo de comunicação sem fio.

Em plantas industriais, vários são os benefícios agregados à adoção de transmissão sem fio. O principal deles é a ausência de cabos para prover a comunicação entre as estações, diminuindo custos com instalação e manutenção, além de eliminar possíveis pontos de falha difíceis de serem localizados. O emprego de redes de sensores e equipamentos monitorados e controlados sem fio em plantas industriais, especialmente na indústria de processos tem se apresentado como uma boa solução, podendo ser usada de várias maneiras (WILLIG, 2005):

- Implementação de sistemas de monitoramento e controle distribuído em áreas perigosas e/ou de difícil acesso;
- Fácil reconfiguração de leiaute da planta industrial, já que poucos cabos precisam ser remontados;
- Sistemas móveis de diagnósticos da planta e estações sem fio para programação e configuração.

Existem diversos tipos de transmissores sem o uso de fios comercialmente disponíveis, sendo eles por infravermelho ou por radiofrequência, cada um deles com suas vantagens e limitações, Figura 2.13.

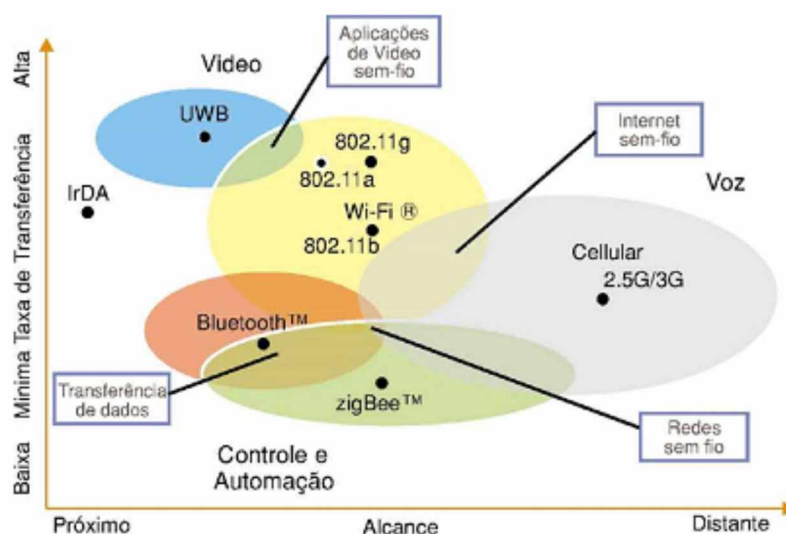


Figura 2.13 – Comparativo entre formas de comunicação de dados sem fio (OLIVEIRA FILHO, 2010).

Nas comunicações por radiofrequência, as bandas regulamentadas ISM – *Industrial, Scientific and Medical* – (ITU - International Telecommunication Union, 2008) se popularizaram na aplicação de redes sem fio, tais como Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1) e ZigBee (IEEE 802.15.4). A Tabela 2.2 contém as principais características destes três padrões, relacionando a velocidades de transmissão de dados, quantidade de equipamentos interligados, alcance de funcionamento, consumo de energia e tempo de resposta (latência).

Tabela 2.2 – Características dos principais padrões de rede sem fio (GALEV, 2004; NASCIMENTO, 2008; OLIVEIRA FILHO, 2010; Wi-Fi Alliance, 2011).

Característica	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Taxa de transferência	1 a 450 Mbps	1 a 3 Mbps	20 a 250 kbps
Número de nós	Mais de 100	Até 8	Até 65535
Alcance	100 m	100 m	100 m
Corrente de consumo	400 mA TX standby 20 mA	40 mA TX standby 0,2 mA	30 mA TX standby 0,3 mA
Vida útil da bateria	1 a 3 horas	1 a 7 dias	Até 2 anos
Latência	~3 s	~10 s	~30 ms

O *ZigBee* é um dos mais antigos protocolos de rede sem fio, desenvolvido pela *ZigBee Alliance*, direcionado para aplicações de automação e controle remoto, tentando prover baixo custo e baixo consumo para conectar equipamentos que necessitam de bateria duradoura mas não requerem altas taxas de transferência de dados (OLIVEIRA FILHO, 2010). Em equipamentos de processamento de dados portáteis (*notebooks*, *smartphones* e computadores de mão) este tipo de comunicação não é comercialmente embarcado.

Bluetooth é uma tecnologia de baixo custo para a comunicação sem fio entre dispositivos eletrônicos à pequenas distâncias. Com o Bluetooth o usuário pode detectar e conectar o seu aparelho de forma rápida a outros dispositivos que tenham a mesma tecnologia (Bluetooth SIG, Inc, 2011). Ele é usado para comunicação entre pequenos dispositivos de uso pessoal, como PDAs, telefones celulares, fones auriculares (*headsets*), computadores portáteis, comandos de consoles, mas também é utilizado para a comunicação de periféricos, como impressoras, scanners, mouses e teclados comandos remotos, e qualquer dispositivo dotado de um chip Bluetooth.

A tecnologia *Wi-Fi*, que na verdade é uma marca registrada da *Wi-Fi Alliance*, refere-se aos dispositivos de rede local sem fios (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.11. O termo Wi-Fi é usado frequentemente como sinônimo para a tecnologia IEEE 802.11, apesar de não o ser. O padrão IEEE 802.11 provê segurança, confiabilidade e conexão sem fio rápida. Uma rede Wi-Fi pode ser usada para conectar dispositivos eletrônicos uns com os

outros, com a Internet, e com redes cabeadas que usam tecnologia Ethernet, já que todos compartilham a mesma pilha de comunicação (Figura 2.14). Atualmente, praticamente todos os dispositivos de alta tecnologia como computadores portáteis, celulares, TVs vêm de fábrica com dispositivos para rede sem fio no padrão Wi-Fi (802.11 a/b/g/n).

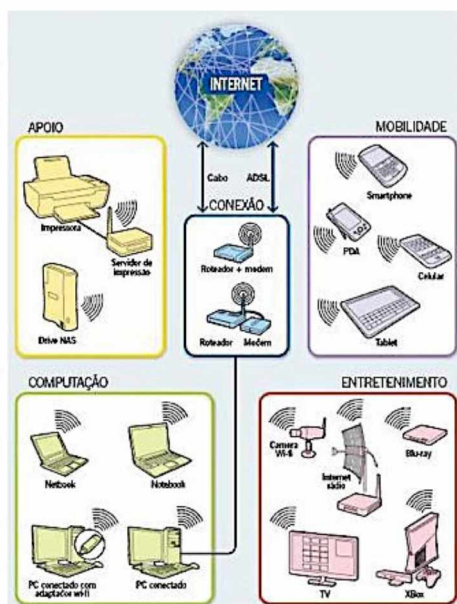


Figura 2.14 – Exemplos de comunicação por Wi-Fi. Adaptada de (Portal Hands: awesome mobile, MACHADO *et al.*, 2010b).

De uma forma resumida, na Tabela 2.3, tem-se as características, vantagens e desvantagens das principais tecnologias de comunicação sem fio aplicáveis a ambientes fabris.

Tabela 2.3 – Tabela de comparação das tecnologias sem fio em relação a comunicação e aplicação (GALEV, 2004).

Padrão	Pilha de Protocolo	Ponto Forte	Aplicações
Wi-Fi	~100 kB	Alta taxa de dados, Interoperabilidade	Internet, redes de computadores, transferência de dados
Bluetooth	> 100 kB	Interoperabilidade, substitui o cabo	USB sem fio, fones, mouses
ZigBee	4 - 32 kB	Baixo custo, vida longa da bateria	Controle remoto, produtos gerenciados por bateria, sensores

O ZigBee é um protocolo muito útil para aplicações de controle automação com baixa taxa de transmissão, sendo aplicado em ambientes industriais em sensoriamento de estados (0 ou 1). Porém, em aplicações com maior transferência de dados, este protocolo não é recomendado pela baixa transferência de dados. A necessidade de incorporação do módulo de comunicação por ZigBee ao dispositivo de visualização dos dados, sendo ele um computador, ou qualquer dispositivo móvel, acarretaria em uma perda considerável de flexibilidade do sistema.

A tecnologia Bluetooth, por outro lado, possui maior taxa de transferência de dados e, atualmente, está disponível em praticamente todos os dispositivos móveis e computadores, se caracterizando como uma possível escolha para o monitoramento dos sinais de soldagem.

O padrão Wi-Fi possui maior taxa de comunicação de dados, se comparado a ambas as tecnologias anteriores, maior flexibilidade de uso e interoperabilidade que a tecnologia Bluetooth, aliada a grande disponibilidade de informações sobre o desenvolvimento de produtos e maior disponibilidade comercial com menores custos. A escolha da comunicação Wi-Fi possibilita uma fácil inserção do monitoramento dos processos de soldagem em uma rede comum de computadores com o uso de vários sistemas de monitoramento sem fio em um mesmo ambiente fabril e possibilitando o acesso às informações de diferentes dispositivos (MACHADO, 2011).

Existem diversos dispositivos comercialmente disponíveis para o uso de comunicação Wi-Fi em sistemas embarcados. O módulo do fabricante ConnectOne (Connect One - The Device Networking Authority, 2011) , por exemplo, é padrão IEEE 802.11b/g, com taxa de transferência de dados em até 3 Mbps, em uma construção embarcada para uso do Wi-Fi em sistemas próprios, como substituição de cabos e compatibilidade com boa parte dos protocolos de Internet (UDP, TCP, etc). Outro exemplo, o módulo WiFly GSX Breakout (Sparkfun Eletronics, 2011), apresenta características do anterior, porém com taxa de transferência limitada em 1 Mbps.

## **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 (resistor), C (capacitor), e L (indutor) que possui uma resposta em frequência característica, como ilustrado na Figura 2.15.

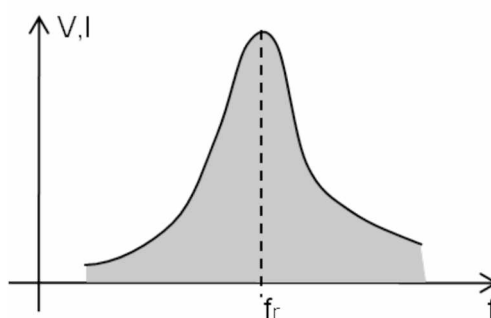


Figura 2.15 – Curva de Ressonância.

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 capacitância. 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 apropriada, 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 2.16.

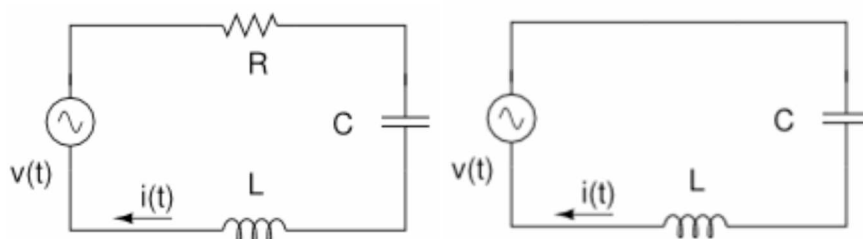


Figura 2.16 –Circuito ressonante em série: RLC (esquerda) e LC (direita).

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

$$X_L = X_C \quad (1.1)$$

Sabe-se, pela teoria de circuitos que:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad e \quad X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (1.2)$$

Substituindo as relações da Eq. (1.2) na Eq. (1.1) e isolando-se do termo da frequência (f), pode-se concluir que a frequência de ressonância  $f_r$  é:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (1.3)$$

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:

$$V(t) = R \cdot i(t) + V_c(t) + L_r \cdot \frac{d[i(t)]}{dt} \quad (1.4)$$

Aplicando a transformada de Laplace na Eq. (1.4):

$$V(s) = R \cdot I(s) + V_c(s) + L_r [s \cdot I(s) - I(0)] \quad (1.5)$$

Sabe-se que:

$$I(s) = C \cdot [s \cdot V_c(s) - V_c(0)] \quad (1.6)$$

Aplica-se a Eq. (1.6) na Eq. (1.5) e considerando as condições iniciais nulas, tem-se a seguinte equação da corrente:

$$I(s) = \frac{s \cdot V(s)}{Z_r \cdot \left( s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC} \right)} \quad (1.7)$$

E, para o circuito ressonante em série LC:

$$I(s) = \frac{s \cdot V(s)}{Z_r \cdot \left( s^2 + \frac{1}{LC} \right)} \quad (1.8)$$

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.



$$i(t)_{RLC} = \frac{V_{DC}}{Z_r} \cdot \text{sen}(2\pi f_r) \quad \text{e} \quad i(t)_{LC} = \frac{V_{DC}}{Z_r} \cdot \text{sen}(2\pi f_r) \quad (1.9)$$

### 2.3.1.2 Circuito Ressonante em paralelo

A configuração básica para um circuito ressonante em paralelo é mostrada na Figura 2.17.

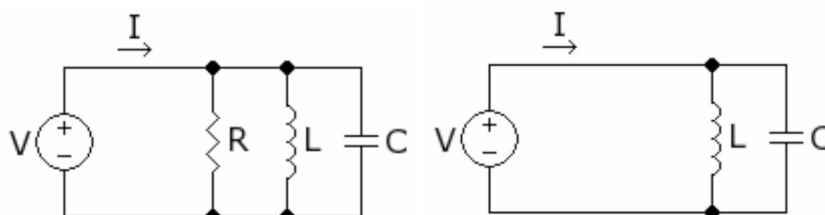


Figura 2.17 –Circuito ressonante em paralelo: RLC (esquerda) e LC (direita).

Assim como o circuito ressonante em série, a frequência de ressonância para o circuito ressonante em paralelo é obtida quando as reatâncias indutiva e capacitiva se igualam. Sendo assim, a frequência de ressonância para o circuito em paralelo é definida pela Eq. (1.3).

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, estes possuem altos  $di/dt$  e 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.

### 2.3.3 *Interferência Eletromagnética em Circuitos Eletrônicos*

À medida que o volume e a importância da eletrônica embarcada aumenta nos equipamentos, os problemas de interferência eletromagnética se tornam mais presentes na vida dos projetistas. Com a diminuição dos níveis de potência, dos níveis lógicos e o aumento da velocidade de *clock* dos sistemas digitais há o aumento da vulnerabilidade à Interferência Magnética, transformando tudo na placa de circuito impresso em uma antena de transmissão e recepção de ruídos (SANCHES, 2010).

Define-se como ruído elétrico qualquer sinal elétrico que esteja presente em um circuito mas que não seja desejado. O nome genérico dado a toda energia eletromagnética que cause resposta indesejável em um sistema é Interferência Eletromagnética, ou EMI, que pode ser gerada dentro ou fora do sistema, em frequências de 3 kHz a 30 GHz.

Para que ocorra um problema de EMI, deve haver: [1] uma fonte de rádio frequência (RF), tal como um circuito que gere uma onda quadrada, [2] um caminho de acoplamento ou “linha de transmissão” e [3] uma estrutura irradiante ou “antena” (KRAUSS, 1999). Portanto, existem basicamente três maneiras de prevenir a interferência:

- Suprimir a emissão na fonte.
- Fazer com que o caminho de propagação seja tão ineficiente quanto for possível.
- Fazer com que o receptor seja menos susceptível à emissão.

Para reduzir susceptibilidade em um sistema ao EMI, podem-se utilizar duas técnicas distintas: preventiva e corretiva. A técnica preventiva consiste em conhecer as não-idealidades dos componentes inseridos no circuito eletrônico e o uso de técnicas no projeto da placa de circuito impresso, PCB.

Em sistemas eletrônicos que utilizem elementos em alta frequência, como chaves, *drivers*, relés ou fontes chaveadas, o projeto do leiaute da PCB deve considerar as seguintes aspectos práticos, a fim de evitar a susceptibilidade a EMI (CAPELLI, 2001):

- utilização de trilhas diretas entre o controle e o drive, evitando ao máximo curvas, pois estas geram atraso na resposta dinâmica do circuito;
- evitar conexões (terminais e conectores internos) pois estas agregam significativas resistência e indutância parasitas ao circuito;
- distribuição do terminal de terra da placa através de trilhas grossas (maior área), pela periferia da placa. Isto propicia uma gaiola de Faraday, minimizando as EMI produzidas e recebidas.

Como forma de técnica corretiva, tem-se os filtros de EMI. Os filtros operam criando uma descontinuidade na impedância “vista” por um sinal viajando em um condutor, ou seja, o filtro gera um descasamento de impedância. Os filtros simples, tipo “R” ou tipo “L”, criam uma impedância série elevada e são utilizados onde a impedância dos sinais indesejados for baixa. Os filtros simples tipo “C” criam uma impedância em derivação baixa e são aplicados onde a impedância do sinal indesejado é alta. Os filtros RC são os mais previsíveis de todos os filtros utilizados em EMI porque eles não entram em ressonância com muita intensidade. Valores elevados de “R” são preferidos (tipicamente, de 1 a 10k $\Omega$ ) com baixos valores de “C” (tipicamente,  $C \leq 3$  nF).

## 2.4 Motores de Passo

O motor elétrico é um dispositivo que transforma energia elétrica em energia mecânica, em geral, a presença de uma corrente elétrica (seja contínua ou alternada) garante o movimento rotacional de um eixo. O acionamento de máquinas e equipamentos por motores é, estimado, a causa de 70 a 80% do consumo da energia elétrica na indústrias (FRANCHI, 2008).

A necessidade de um equipamento para posicionamento angular com melhor precisão que os sistemas com retroalimentação, principalmente em indústrias com maior evolução tecnológica, foi a maior motivação para a criação de motores de passo (CARVALHO, 2011). O posicionamento de motores de corrente contínua exige sistemas eletrônicos sofisticados e, com o advento dos motores de passo, realizar o posicionamento angular é a tarefa menos complicada.

Os motores de passo podem ser de ímã permanente, relutância variável ou híbridos. Considerando o motor de passo de ímã permanente como exemplo, pode-se entender como o controle de posição, e por consequência, de velocidade do motor de passo é dado com precisão. Este motor de passo tem seu rotor constituído por um ímã permanente de alta qualidade e um estator de aço silício laminado onde as bobinas estão instaladas, como ilustrado na Figura 2.18.

A intenção primária é energizar as bobinas uma a uma de modo que elas atraiam o rotor e, a energização de uma e somente uma bobina de cada vez produz neste um pequeno deslocamento. Este deslocamento ocorre simplesmente pelo fato de o rotor ser magneticamente ativo e a energização das bobinas criar um campo magnético intenso que atua no sentido de se alinhar com as pás do rotor.

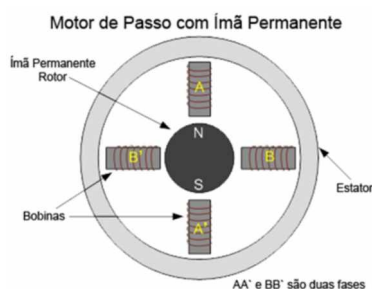


Figura 2.18 - Motor considerar o diâmetro do eletrodo de 2,4 mm e o diâmetro do arame de 1,2 mm.

de Passo de Ímã Permanente de Duas Fases (Fonte: <http://www.feis.unesp.br>)

Dessa forma, polarizando de forma adequada os bobinas, podemos movimentar o rotor somente entre as bobinas (passo inteiro), ou entre as bobinas e alinhadas com as mesmas (meio passo), como ilustra a Figura 2.19.

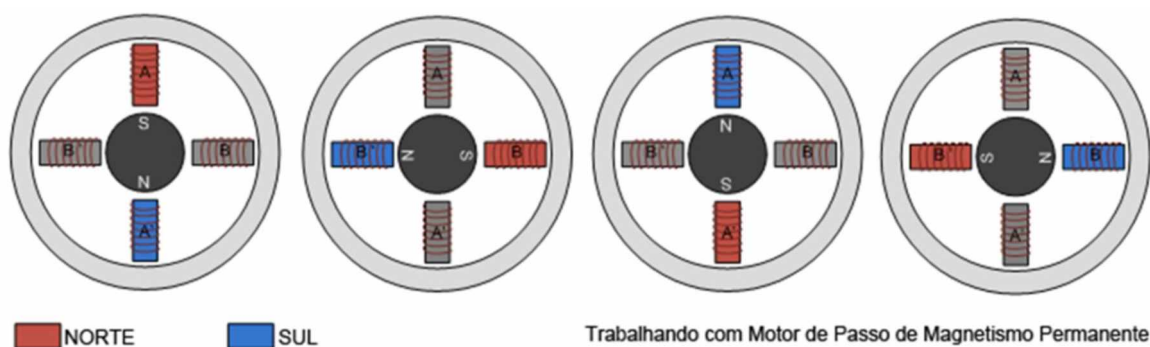


Figura 2.19 - Princípio de Funcionamento do Motor de Passo ( Fonte: <http://www.feis.unesp.br>)

Essencialmente, portanto, o controle de posição e, por consequência, de velocidade do motor de passo pode ser realizado através de sinais digitais, onde um nível alto (1) é responsável pela energização de determinada bobina e o nível baixo (0) mantém a bobina desenraizada.

Um circuito amplificador de saída, então, transforma o controle digital em níveis de tensão e corrente adequados ao motor (por exemplo, 30 V e correntes acima de 2 A). O circuito que recebe os trens de pulso do controlador e realiza o chaveamento dos componentes de potência de alta corrente, normalmente dado por MOSFETs (transistor de efeito de campo metal - óxido – semicondutor), para fornecer a corrente necessária ao movimento do motor de passo, comumente conhecidos como *driver*, pode ser encontrado em variadas especificações, fabricantes e custo.

Independente do tipo de motor de passo, estes possuem os seguintes aspectos em comum:

- O passo angular determina a precisão de deslocamento do motor, ou seja, o ângulo de deslocamento provocado por um único pulso aplicado ao motor.
- A velocidade de deslocamento é proporcional à frequência aplicada aos pulsos lógicos de controle.
- O motor pode girar em baixa velocidade mesmo com carga e normalmente se mantém inerte sem necessidade de freio.

No mercado podem ser encontrados motores de passo com valores, por exemplo, 72, 144, 180, 200 e 500 passos por volta. Um motor de 200 passos por volta, ou 1,8 graus de ângulo de passo, como exemplo, necessita de 200 impulsos em suas bobinas para que o eixo deste motor gire em um ângulo de 360 graus e, se receber pulsos em uma frequência de 200 Hz será responsável pela velocidade angular de 60 RPM (rotações por minuto).

## 2.5 Tópicos em Desenvolvimento Web

### 2.5.1 HTML e CSS

HTML (*HyperText Markup Language* ou em português Linguagem de Marcação de Hipertexto,) é a linguagem para descrever a estrutura de páginas da web. O HTML foi criado originalmente por um físico britânico chamado Tim Berners-Lee, e usado para desenvolvimento NeXTSTEP. No começo a linguagem HTML foi definida como regras sintáticas flexíveis, possibilitando pessoas com pouco entendimento a publicarem na internet. Atualmente, tudo o que é produzido na web leva a linguagem HTML em sua produção.

Ao contrário das linguagem de programação aplicadas a computadores e microprocessadores, como o C, o HTML é uma linguagem declarativa, não possuindo comando de decisão, repetição e declaração de variáveis. A finalidade da linguagem é apenas definir a estrutura de um arquivo (texto) a ser interpretada pelo navegador de internet. A estrutura básica de uma página HTML é composta pelos elementos: Doctype, HTML, HEAD, e BODY (Figura 2.20). Os blocos de elementos são incitados pelas *tags* <elemento> e finalizados com a *tag* </elemento>.

É possível compreender o documento em HTML de uma maneira muito simples, através de uma divisão de blocos das tags essenciais, conforme a seguinte estrutura: Definição do documento (doctype), Cabeça (head) e Corpo (body). O doctype não é uma *tag* HTML, mas uma instrução para o navegador, porem obrigatório na primeira linha de seu documento. O bloco HEAD contém informações que não são transpostas visivelmente para

o usuário/leitor do documento, dados implícitos como vinculação com outros arquivos ou aplicação de lógica de programação. O bloco BODY contém a informação legível, ou seja, todo e qualquer texto que se deseja apresentar.

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="pt-br">
  <head>
    <title>Título da página</title>
    <meta charset="utf-8">
  </head>
  <body>
    Aqui vai o código HTML que fará seu site aparecer.
  </body>
</html>
```

Figura 2.20 - Estrutura básica de uma página HTML (Fonte: <http://tableless.github.io>)

Dentro do elemento BODY terá os elementos semânticos da construção da sua página, onde serão declarados e identificados cabeçalhos, rodapé, conteúdo principal, etc. A linguagem HTML trabalha com o uso de *tags* na forma <tag>Conteúdo da tag</tag>, e toda a estrutura de do corpo da página será escrita obedecendo-se a regra e podendo-se dispor de diferentes tags, como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Exemplos de Tags utilizadas em linguagem HTML.

Tag	Descrição
<h1></h1>	Título de relevância 1
<p></p>	Definição de Parágrafo
<span></span>	Marcar trecho de texto para personalização
<strong></strong>	Negrito
 	Quebra de linha
<a></a>	Link para páginas ou arquivos
<div></div>	Bloco para elementos semelhantes

Além dos elementos *tags*, uma página em HTML possui outros elementos e tributos que definem sua estrutura como um todo. As IDs são atributos de identificação, únicos, que podem ser correlacionados a qualquer *tag* presente no corpo da página. Uma CLASS é uma tribute que agrupa elementos semelhantes, como por exemplo botões. Através da classificação dos seus elementos em classes, pode-se personalizar a aparência de uma página HTML com maior facilidade.

A sigla CSS é a abreviação para os termos em inglês *Cacading Style Sheet*, em português Folha de Estilo em Cascata. Folha de Estilo em Cascata é uma linguagem de

programação simples para adicionar estilos, por exemplo: background (estilo do plano de fundo), cores, espaçamentos, fontes e tamanho, a linguagem da web (Figura 2.21).



Figura 2.21 - Exemplo de HTML (esquerda) e aparência com diferentes estilos (direita).

A separação da estrutura (HTML) do estilo (CSS) de uma página possibilita de forma facilitada a manter sites, compartilhar folhas de estilos através das páginas e a criação de páginas em diferentes ambientes. Essa separação é referida como separação de estrutura da apresentação.

### 2.5.2 Bootstrap

Bootstrap é um *framework* de código aberto criado em meados do ano de 2010 por desenvolvedores da rede social Twitter. A intenção era criar e disponibilizar uma solução para otimizar a produção de layouts responsivos para web. O projeto era utilizado internamente no Twitter, mas sua *open source* (código aberto) estava disponibilizado na rede, e a popularidade é tão grande que hoje é praticamente inviável um desenvolvedor web não saber o utilizar (RENE, 2015).

Um layout web com arquitetura responsiva (*responsive design*) é aquele que tem em suas linhas de código, parâmetros para melhorar a forma como o layout vai ser exibido em diferentes resoluções de tela, como é ilustrado na Figura 2.22.

Em uma realidade onde o uso de aparelhos conectados à Internet expandiu-se apenas de computadores para todos os tipos de dispositivos móveis e outros *gadgets* tecnológicos, os desenvolvedores tentaram criar uma forma de um layout ser compatível com tamanhos e formas diferentes de telas, sem perder a sua integridade.

O Bootstrap tem um mecanismo de grades (Grid System) para calcular as posições dos itens na tela. Esse *grid system* é responsivo, *mobile first* (móvel primeiro) e flexível. Ele pode aumentar (ou diminuir) conforme a tela muda. *Mobile first* é a característica do framework que assume, inicialmente, que a tela é de um dispositivo móvel, com tamanho pequeno. Assim, ele adapta todos os conteúdos para o tamanho menor e depois, ele verifica



o tamanho real da tela e vai ajustando os itens para que fiquem posicionados corretamente, conforme o tamanho e a resolução (CARVALHO).



Figura 2.22 - Exemplo de design responsivo. (Fonte: <http://comelite.net>)

O *Grid System* funciona como uma espécie de tabela abstrata e o padrão do Bootstrap utiliza 12 colunas para criar o container, ou seja, o conteúdo principal do website, como pode ser visto na Figura 2.23. Cada linha é uma *row*, ou seja um elemento DIV com a identificação `class="row"` e cada item dentro das rows é uma *column*. Para adaptar o design, deve-se dividir o projeto em 12 partes iguais verticalmente e, depois, ajustar a estrutura para encaixar no grid.

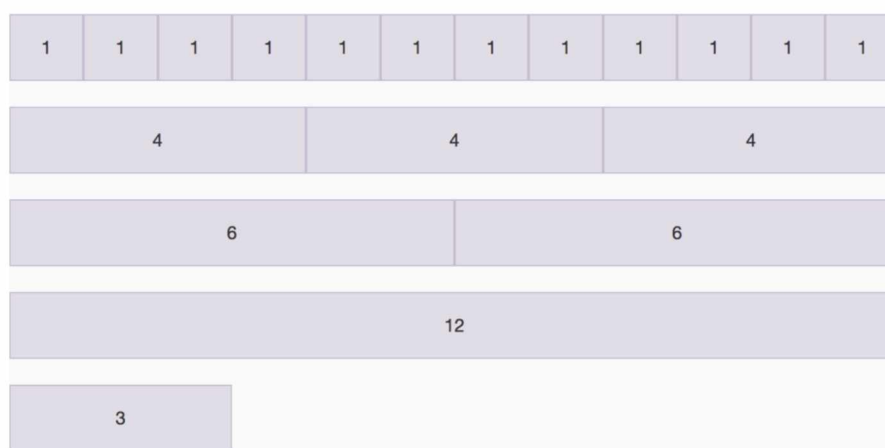


Figura 2.23 - Exemplo de Grid do Bootstrap (Fonte: <http://webdevacademy.com.br/>)

Algumas premissas que devem ser respeitadas ao utilizar a Grid:

- Toda linha deve estar dentro de um *container* ou *container-fluid*. A diferença entre as duas classes é que a primeira é *boxed*, tem limite para a medida das laterais, e a segunda ocupa todo espaço da tela sem margens laterais.



- Toda coluna deve estar dentro de uma linha. As colunas agrupam conteúdo, então devem ser os únicos elementos filho dentro de uma *row*.
- A soma dos tamanhos das colunas deve ser sempre igual a doze.
- Para criar o *container*, as colunas e as linhas, existem classes CSS pré-definidas; geralmente utilizadas no elemento *DIV*, como as classes *.container* ou *.container-fluid*, *.row* e *.columns*.
- Existem espaçamentos entre as colunas, e entre o conteúdo dentro de uma coluna.
- Para determinar qual o espaço ocupado por uma coluna, dentro do limite de 12 colunas, utiliza-se uma classe como *.col-xs-12*, que determina que aquela coluna vai ocupar o espaço de 12 colunas só pra ela, em dispositivos de tela pequena (smartphones).
- Existem classes especiais para determinar qual o espaço que determinada coluna vai ter em diferentes tamanhos de tela. A classe que indica o espaço ocupado é composta por três itens: *col*, *xs* e um número de 0 a 12, dependendo do seu limite de colunas. O parâmetro *xs* indica que essa coluna vai ocupar 12 colunas em telas pequenas.
- Além da medida *xs* utilizada para telas com até 768px de largura, também tem-se as medidas *sm*, para telas com até 991px de largura, *md* para telas até 1199px, e a *lg* para telas com no mínimo 1200px de largura (Figura 2.24).
- Qualquer medida acima de 1200px assume ainda a configuração da medida *lg*.

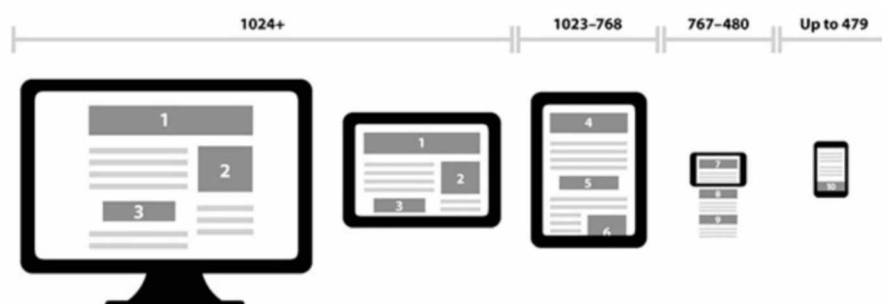


Figura 2.24 – Exemplo de limites de resoluções para dispositivos em design responsivo (A Book Apart, MARCOTTER, 2011)

Além das funcionalidades de design responsivo, o Bootstrap conta com uma biblioteca de classes e propriedades CSS para todos os tipos de elementos utilizados em páginas HTML. Suas propriedades, por exemplo, podem modificar o tamanho dos botões para se adaptador aos diferentes dispositivos ou a aparência destes (cor de fundo, etc.) para situações de perigo, sucesso, ou informação, ilustrado na Figura 2.25.



Figura 2.25 - Estilos de botões embutidos no CSS Bootstrap (Fonte: <http://getbootstrap.com/css/#code>)

Outra característica marcante na biblioteca disponível do Bootstrap é a possibilidade de criação de barra de navegações de forma simplificada. As barras de navegação, ou navbar, embutidas na framework disponibilizam recursos de uso de botões *dropdown*, *tabs*, barra de navegação fixa ou flutuante no topo do conteúdo, entre outras, apenas com a utilização das classes previamente embutidas, como ilustra a Figura 2.26.

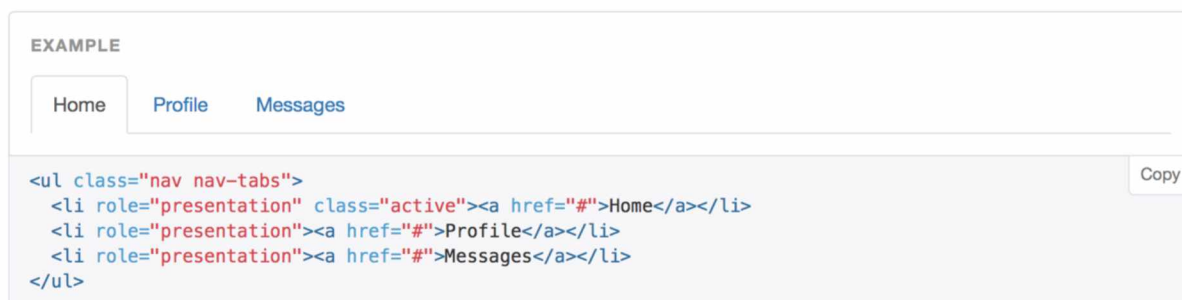


Figura 2.26 - Modelo de barra de navegação (cima) do Bootstrap e código correspondente (baixo) (Fonte: <http://getbootstrap.com/components/#navbar-default>)

Por fim, por se tratar de um conjunto de propriedades CSS e funções JavaScript, o Bootstrap é compatível com grande parte dos navegadores de internet comercialmente disponíveis, como resumido na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Navegadores compatíveis com o Bootstrap (Fonte: <http://getbootstrap.com.br>)

	Chrome	Firefox	Internet Explorer	Opera	Safari
Android	✓ Suportado	✓ Suportado	N/A	✗ Não Suportado	N/A
iOS	✓ Suportado	N/A		✗ Não Suportado	✓ Suportado
Mac OS X	✓ Suportado	✓ Suportado		✓ Suportado	✓ Suportado
Windows	✓ Suportado	✓ Suportado	✓ Suportado	✓ Suportado	✗ Não Suportado

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGIA**

O objetivo principal deste trabalho é, dados os resultados do trabalho concebido anteriormente no tema por MOTA (2011), desenvolver um sistema sem fio para soldagem mecanizada, com disponibilização de um sistema supervisor com auxílio visual pelo uso de iluminação no infravermelho próximo e controle remoto de posicionamento da tocha de soldagem, com aplicação focada em soldagens de tubulações.

Como o próprio nome sugere, um sistema guiado sem fio não é apenas um sistema de visão aplicado a processos de soldagem. Este sistema deve, sim, proporcionar uma imagem clara da junta e seus arredores, como forma de auxílio visual ao operador, mas também prover informações e controle ao processo que está sendo visualizado. Desta forma, além do sistema de visão em si, deve-se interligar as funcionalidades de controle da movimentação da tocha, aquisição de sinais elétricos e, por fim, prover toda essa informação de forma sem fio ao operador, que poderá tomar as decisões de intervenção no processo, caso considere necessário.

A Figura 3.1 resume de forma esquemática a idealização inicial para um sistema guiado sem fio, com um dispositivo mestre interligando as funcionalidades (diodos, câmera, movimentação e sinais) e comunicando-se de forma remota com um dispositivo de controle que estará disponível ao operador.

Como atribuiu-se a principal limitação dos resultados do sistema de visão anterior ao uso de uma câmera com tempo de abertura (10  $\mu$ s) muito superior ao tempo de acionamento dos diodos laser (1,6  $\mu$ s) tem-se como etapa inicial a escolha uma nova câmera para o uso em conjunto com a topologia ressonante do sistema de visão. Este equipamento deve ter, principalmente, um baixo tempo de abertura (na ordem de 1  $\mu$ s) para que o sistema seja capaz de acionar os diodos laser de alta potência durante todo o tempo

de abertura da câmera, sem que haja riscos a estes. Deve-se ainda levar em consideração o baixo custo desejado no projeto.

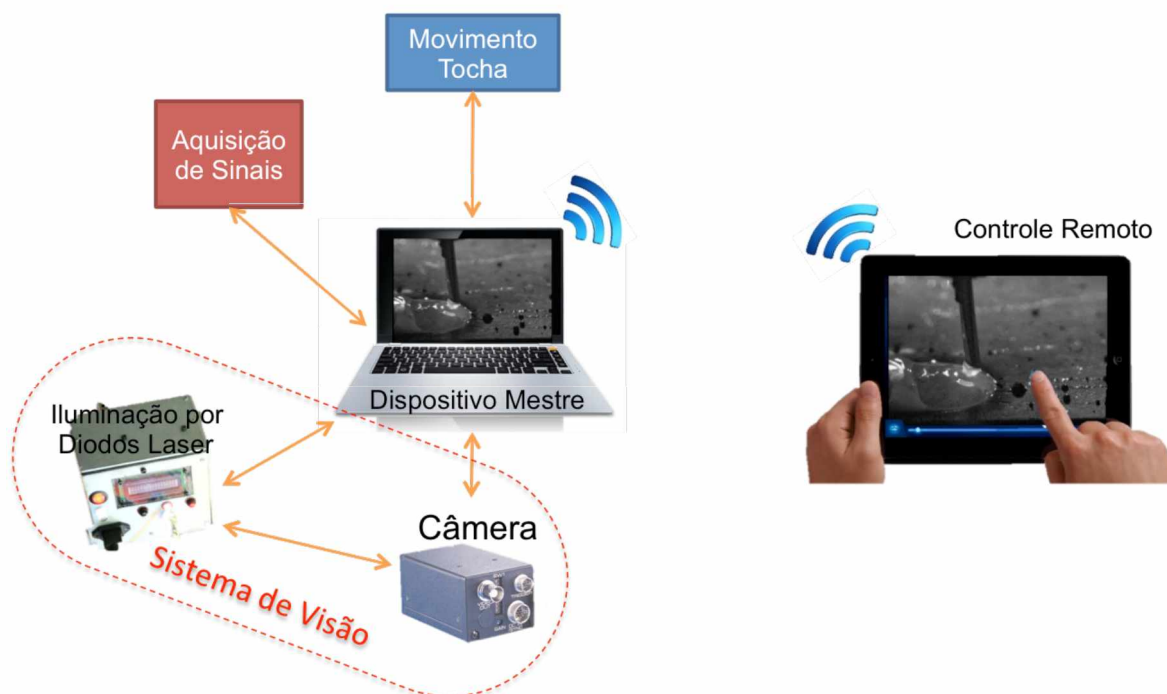


Figura 3.1 – Idealização inicial do Sistema Guiado Sem Fio.

Com a escolha da câmera com baixo tempo de exposição, o próximo passo lógico é a adaptação do sistema de visão desenvolvido (ViaSolda) para a sua sincronização com o tempo de abertura desta nova câmera. Com a sincronia dos pulsos no diodo laser com a formação da imagem, pode-se então, validar a nova combinação em soldagens TIG e MIG/MAG. Com base nesses resultados, deve-se então estimar os requisitos de um novo protótipo de visão e, com o desenvolvimento deste, deve-se estabelecer os requisitos e passos para o desenvolvimento do sistema guiado sem fio para soldagens mecanizadas, que é o verdadeiro objetivo deste trabalho.

### 3.1 Diodo Laser de Alta Potência

Tendo em vista as imagens obtidas em soldagens no trabalho desenvolvido (ViaSolda), que apesar de não sobrepor a luz proveniente do arco de soldagem, teve resultados promissores na busca por um sistema de visão de qualidade, mantém-se a componente base para a fonte de iluminação como o diodo laser, de modelo SPL PL90\_3 (Figura 3.2), do fabricante OSRAM® como diodo laser de alta potência para a iluminação.



Figura 3.2 - 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

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 aqui que, apesar do fabricante recomendar uma largura de pulso máxima de 100 ns, os limites deste componente que está disponibilizado há pouco tempo comercialmente são certamente desconhecidos. Durante o desenvolvimento anterior, provou-se que uma largura de pulso de 800 ns com correntes de pico de 30 A e uma frequência de 30 Hz não prejudicou o funcionamento e eficiência de emissão de luz do diodo laser, mesmo com testes de *stress* e longa duração.

Desta forma, pretende-se ainda aumentar a eficiência da iluminação, seja pelo tempo de pulso ou pela intensidade luminosa (corrente direta), para se obter resultados melhores em termos de visão. Com o intuito de manter a integridade do semiconductor, entretanto, espera-se sempre respeitar o parâmetro de corrente eficaz, levando-se em consideração, portanto, a frequência de pulso e a corrente de pico, além da própria largura de pulso.

Um ponto fundamental a ser destacado é que a utilização destes diodos laser requer o uso de EPI (Equipamento de Proteção Individual) específico. 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, serão utilizados óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline ou modelo similar.

### 3.2 Câmera de Baixo Tempo de Exposição

A escolha da câmera com baixo tempo de exposição é um processo que envolve diversas variáveis, como o grande número de fabricantes, formas de comunicação e sincronização e faixa de preços. Com o intuito de se construir um sistema de visão de baixo custo, tem-se a decisão inicial de descartar câmeras de alta velocidade do conjunto de produtos comercialmente disponíveis. Câmeras de alta velocidade têm, facilmente, tempos de exposição na casa de microssegundos, mas a limitação imposta pelo ciclo de trabalho dos diodos laser (0,1%) permite apenas filmagens de baixa velocidade, o que diminui suas vantagens de altos índices de quadros por segundo.

Algumas considerações iniciais são úteis para a escolha da câmera com baixo tempo de exposição. Além da óbvia restrição do tempo de exposição na casa de 1  $\mu$ s, pode-se adotar que a câmera escolhida deve ser facilmente “controlável”, possuindo a capacidade de responder à um sinal de *trigger* externo e de forma conhecida para sua sincronização com o pulso luminoso do diodo laser. Seu controle deve ser de fácil intercomunicação com um sistema de acionamento embarcado (como um microprocessador) e suas imagens devem ser de fácil interpretação para um computador. Por fim, não é necessária uma alta resolução de imagem, pois apenas a visualização do processo é uma prioridade, e não algum tipo de processamento.

Desta forma, escolheu-se a câmera SI-M331 da fabricante Costar, ilustrada na Figura 3.3 uma câmera analógica monocromática com sensor CCD (dispositivo de carga acoplada), resolução de 768x494 pixels e tempo mínimo de abertura de 1,25  $\mu$ s (Costar Video Systems). Sua natureza flexível permite diferentes tipos de configuração do *trigger* eletrônico, assim como sincronia com o pulso de iluminação através de um sinal de saída de *shutter*. Esta câmera é dotada de uma cabeça remota de 12,5 mm de diâmetro e cabo de 2 m de comprimento, permitindo a sua adaptação em pequenos espaços e possibilidade de movimentação em conjunto com a tocha de soldagem.



Figura 3.3 - Câmera Costar SI-M331 (Costar Video Systems).



### 3.3 Visão Geral do Trabalho

Tendo em vista todas as características apresentadas neste capítulo sobre os componentes-base (diodo laser e câmera) e a idealização inicial do sistema guiado sem fio de soldagens mecanizadas, tem-se a seguinte ordem para o desenvolvimento deste trabalho, conforme esquematizado na Figura 3.4.

- Introdução de uma câmera com baixo tempo de abertura ao sistema de visão ViaSolda desenvolvido e validação em soldagens;
- Otimização da topologia de acionamento dos diodos laser de alta potência e construção de um protótipo com melhor capacidade de iluminação e robustez;
- Validação do protótipo desenvolvido em soldagens diversas, levando-se em consideração as condições normais e extremas de densidade luminosa e velocidade;
- Estabelecimento dos requisitos e objetivos do sistema guiado sem fio para soldagem mecanizada de acordo com os resultados obtidos no protótipo anterior;
- Projeto, desenvolvimento e validação de um sistema guiado sem fio para soldagens mecanizadas com uso de iluminação no infravermelho próximo.

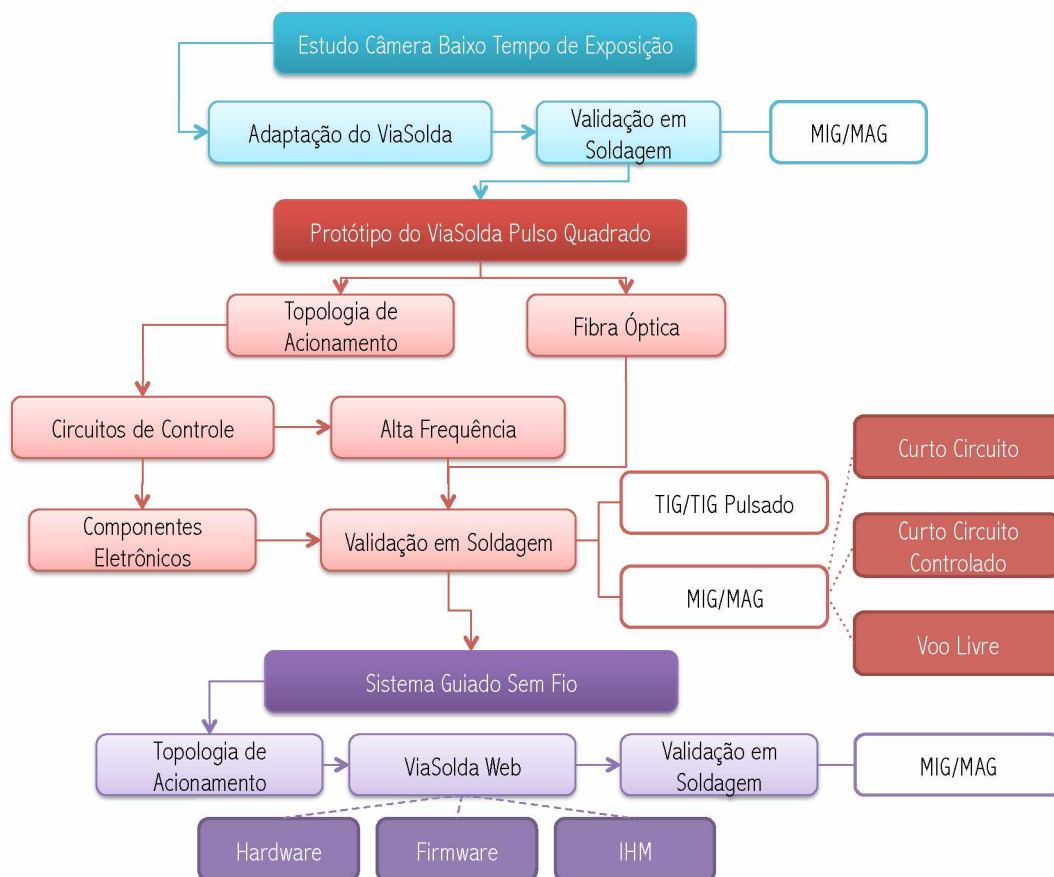


Figura 3.4 - Representação esquemática da metodologia de trabalho.

## CAPÍTULO IV

### ENSAIOS PRELIMINARES

Como passo inicial do projeto tem-se o estudo da aplicação do protótipo anterior do sistema de visão à câmera escolhida. Portanto, deve-se, obviamente, manter a topologia ressonante de acionamento dos diodos laser de alta potência e compatibilizá-la com as peculiaridades da câmera de baixo tempo de exposição escolhida (SI-M330), e, posteriormente, validar a nova combinação em soldagens. Os resultados da validação serão o ponto de partida para a formulação de novos requisitos e demandas de melhoria para o novo protótipo de visão e, posteriormente, o sistema guiado sem fio.

#### 4.1 Adaptação do Sistema Ressonante

Através do uso da teoria de circuitos ressonantes (BOYLESTAD, 2004), foi possível construir uma topologia capaz de acionar os diodos laser com alta eficiência energética. Nesta topologia, ocorre a ressonância no período determinado (800 ns), onde a energia oscila entre um elemento e o outro durante a comutação das chaves MOSFETs (transistor de efeito de campo de semiconductor de óxido metálico) presentes no circuito.

O funcionamento topologia ressonante é apresentada na Figura 4.1, onde o circuito ressonante é representado pelos componentes C2 e L2. De forma simplificada, durante o período cuja primeira chave (Mmais) é fechada, há passagem de corrente pelo conjunto de diodos LedMais (8 diodos) e, quando chave Mmais é aberta e a segunda chave (Mmenos) é fechada há passagem de corrente pelo conjunto de diodos laser LedMenos (11 diodos).

Desta forma tem-se um conjunto de 19 diodos laser como fontes de iluminação por um período de 1,6  $\mu$ s. Mesmo com o uso de um pico máximo de corrente em 30 A, com um ciclo de trabalho bem abaixo de 0,1% (em 30 FPS), mantêm-se os valores médio e eficaz de trabalho abaixo do recomendado pelo fabricante, mantendo a integridade da junção PN e sem degeneração de sua vida útil.



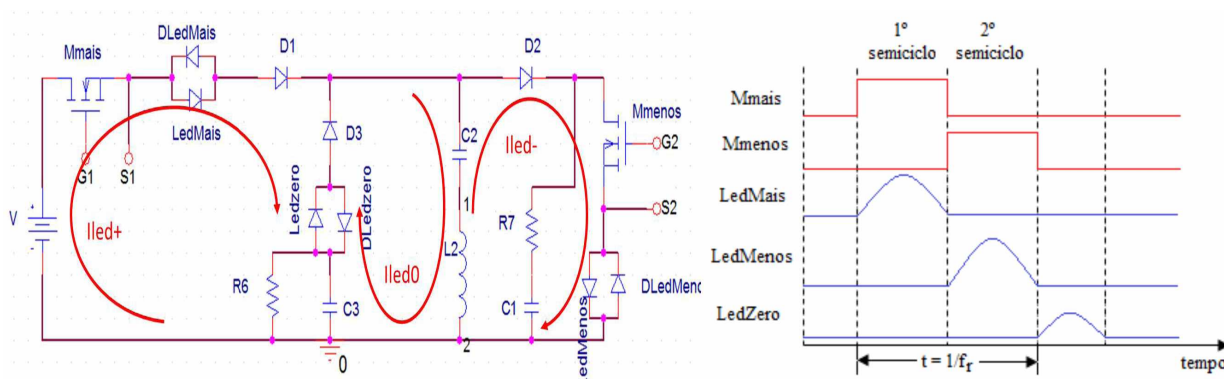


Figura 4.1 - Topologia ressonante de acionamento dos diodos laser (MOTA *et al.*, 2013).

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. Para altas frequências (pulsos de 800 ns), 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 4.2.

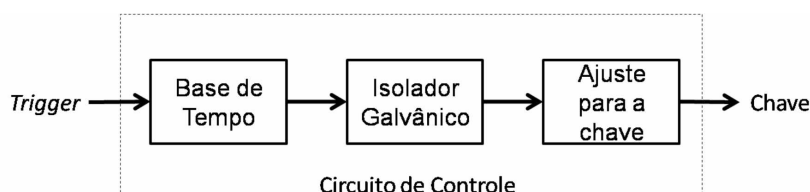


Figura 4.2 - Circuitos auxiliares para a comutação das chaves semicondutoras.

Um circuito isolador galvânico (HCPL2601) protege o circuito de controle do circuito de alta potência que é controlado e, um circuito ICL7667, ajusta os valores de tensão e corrente para uma melhor comutação da chave semicondutora escolhida (MOTA, 2011). Para a adaptação do protótipo ressonante com a câmera de baixo tempo de exposição, não há necessidade de mudança destes.

A sincronização dos pulsos emitidos pelos diodos laser e do tempo de abertura da câmera é crucial para o sucesso do uso do protótipo com a câmera de baixo tempo de exposição. Existem diferentes soluções para que haja a sincronização do sistema de iluminação com o de visão, ilustrados na Figura 4.3, 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 pelo sinal de saída da câmera, ou ainda, um

sistema onde o *trigger* gerado para os pulsos dos diodos laser acione a captura de quadros da câmera.

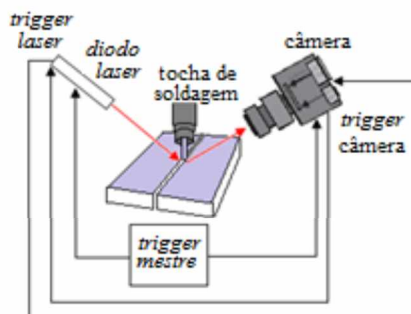


Figura 4.3 – Formas de sincronia: *trigger* mestre, pela câmera e laser (MOTA et al., 2010).

O sinal de *trigger* dos circuitos auxiliares é a entrada do circuito de controle, geralmente indicando o momento onde a comutação da chave semicondutora deve ser realizado e, foi adaptado para o sinal de saída do tempo de exposição (*shutter*) da câmera. A necessidade do uso de *trigger* pela câmera, ao contrário do *trigger* mestre utilizado anteriormente, vem de uma característica específica desta câmera analógica: resposta assíncrona quando utilizado no modo de controle externo.

Quando a SI-M331 é configurada para resposta a um controle externo com tempo de exposição fixo em alta velocidade (*Random Trigger Mode – 1*), a câmera começa um tempo exposição após uma borda de descida em seu sinal de controle e, este é terminado após o tempo do *shutter* determinado (Costar Video Systems). Porém, o intervalo de tempo cuja câmera recebe esta borda de descida e efetivamente inicia o processo de exposição não é preciso. Testes experimentais determinaram uma variação entre 50 e 150  $\mu$ s de atraso entre os sinais, o que tornaria a sincronização de 1,25  $\mu$ s uma tarefa impossível.

A base de tempo é responsável em transformar o pulso de *trigger* em dois pulsos subsequentes de acionamento das chaves dos circuitos ressonante, com período de 800 ns cada. Através de um microprocessador (MCU) PIC16F877A, já disponível no sistema de controle do protótipo, disponibilizou-se um algoritmo que recebe o sinal de *shutter* da câmera e o transforma nos pulsos de acionamento dos diodos laser.

De forma simplificada, o algoritmo aguarda a conexão da câmera e um sinal de disparo vindo do usuário (através de um botão) para, à borda de descida do *shutter*, enviar dois pulsos subsequentes de 800 ns para ambas as chaves do circuito ressonante. O fluxograma do programa embutido ao MCU está ilustrado na Figura 4.4 e seu código-fonte se encontra no APÊNDICE I.

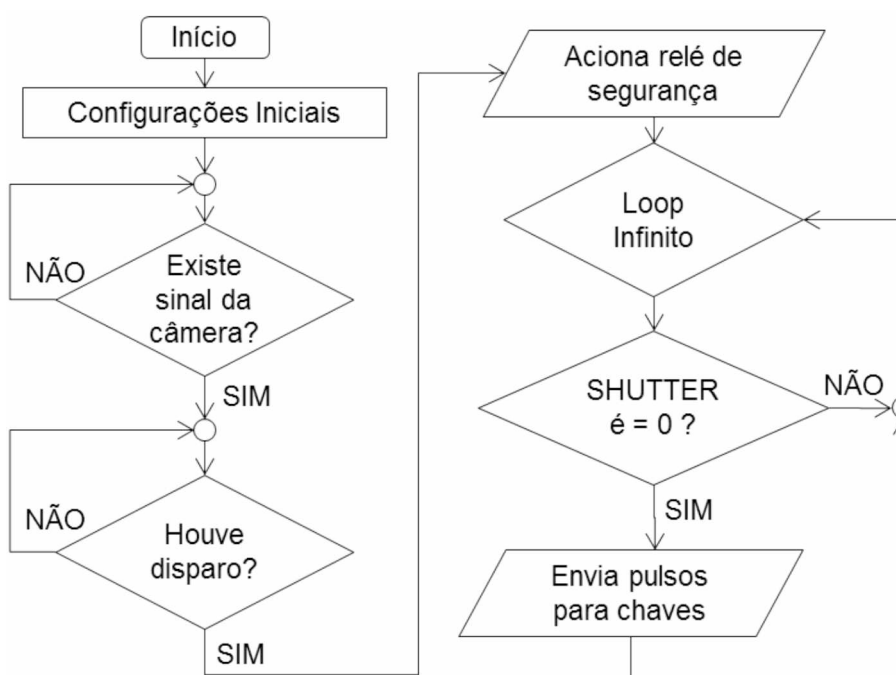


Figura 4.4 – Fluxograma do algoritmo de sincronização entre pulsos ressonantes e câmera SI-M331 “ViaSolda\_CAM”.

Mesmo que esta configuração e algoritmo seja uma resposta ao comportamento assíncrono da câmera, o uso do tempo de resposta do MCU gera novas dificuldades de sincronia. De uma forma resumida, o MCU trabalha em resposta a uma frequência que é imposta a ele pelo circuito oscilador (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2003b). No caso específico deste projeto, o MCU tem como tempo de execução de uma instrução 200 ns, o que, para fins gerais, é um tempo satisfatório. Porém, a sincronia em questão é de dois sinais de 1,25 (de exposição) e 1,6  $\mu$ s (de iluminação) e um ciclo de instrução pode fazer a diferença entre o sucesso ou fracasso de sincronia em um quadro.

Desta forma, diferentes algoritmos foram implementados, experimentados e comparados entre si. A forma como o sinal de *shutter* da câmera é “lido” pelo algoritmo pode trazer um atraso de resposta do MCU de 400 ns a 6  $\mu$ s, podendo ser este tempo também assíncrono, dificultado a sincronia entre os sinais. O algoritmo apresentado foi o que mostrou melhor sincronia entre os sinais, mesmo tendo um comportamento assíncrono embutido no laço de repetição de leitura do *shutter*.

Além da compatibilização do circuito de controle, pequenas modificações foram realizadas como: a criação do cabo de alimentação da câmera, e do cabo de conexão ViaSolda/SI-M331 e SI-M331/Computador e a construção do adaptador da cabeça remota ao tripé. Vale ressaltar que, por se tratar de uma câmera analógica, foi necessário o uso de uma placa digitalizadora USB e um software de aquisição das imagens.

## 4.2 Validação em Soldagem

Para o teste do protótipo do sistema de visão com a câmera de baixo tempo de exposição, procurou-se inicialmente, reproduzir o uso do sistema em soldagens MIG/MAG do trabalho anterior, com possibilidade de comparação com as imagens obtidas (Figura 1.3). Os parâmetros selecionados para o processo de soldagem e a configuração do sistema de visão são listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros ajustados para o teste inicial do sistema de visão em soldagem MIG/MAG com a câmera de baixo tempo de exposição.

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Soldagem	Gás de Proteção	CO <sub>2</sub> puro	---
	Vazão de Gás	13	l/min
	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	60	FPS
	Tempo de pulso	1,6	µs
	Tempo de Exposição ( <i>shutter</i> )	1,25	µs
	Seleção de <i>Trigger</i> (SW1-4)	Normal Shutter	
	Acumulo do CCD (SW1-5)	Field Accumulation	
	Correção de Gama (SW1-7)	0.45	

O par câmera-*driver* são dispostos de forma antissimétrica em relação à tocha de soldagem, com ângulos simétricos de inclinação de 27° e distâncias de 300 mm da região de interesse (tocha, poça e seus arredores) para facilitar uma melhor visualização do processo. Um filtro de interferência é utilizado na obtenção das imagens para que apenas o espectro de emissão dos diodos laser (905 nm) seja capturado pelo CCD. A Figura 4.5 ilustra a montagem experimental.

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

- Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
- Câmera Costar SI-M331;
- Fonte ESAB U5000IW com 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

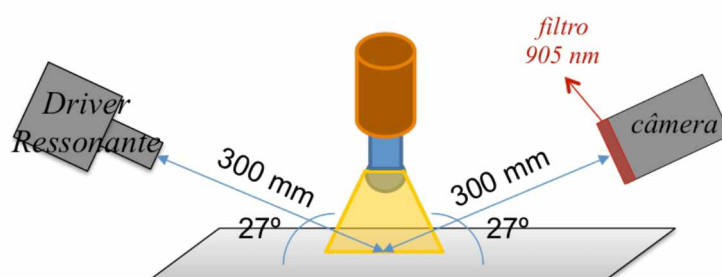


Figura 4.5 – Esquema de montagem experimental para testes de câmera SI-M330 com circuito ressonante.

Exemplos dos quadros obtidos durante o uso do sistema de visão na soldagem MIG/MAG são mostrados na Figura 4.6. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm.

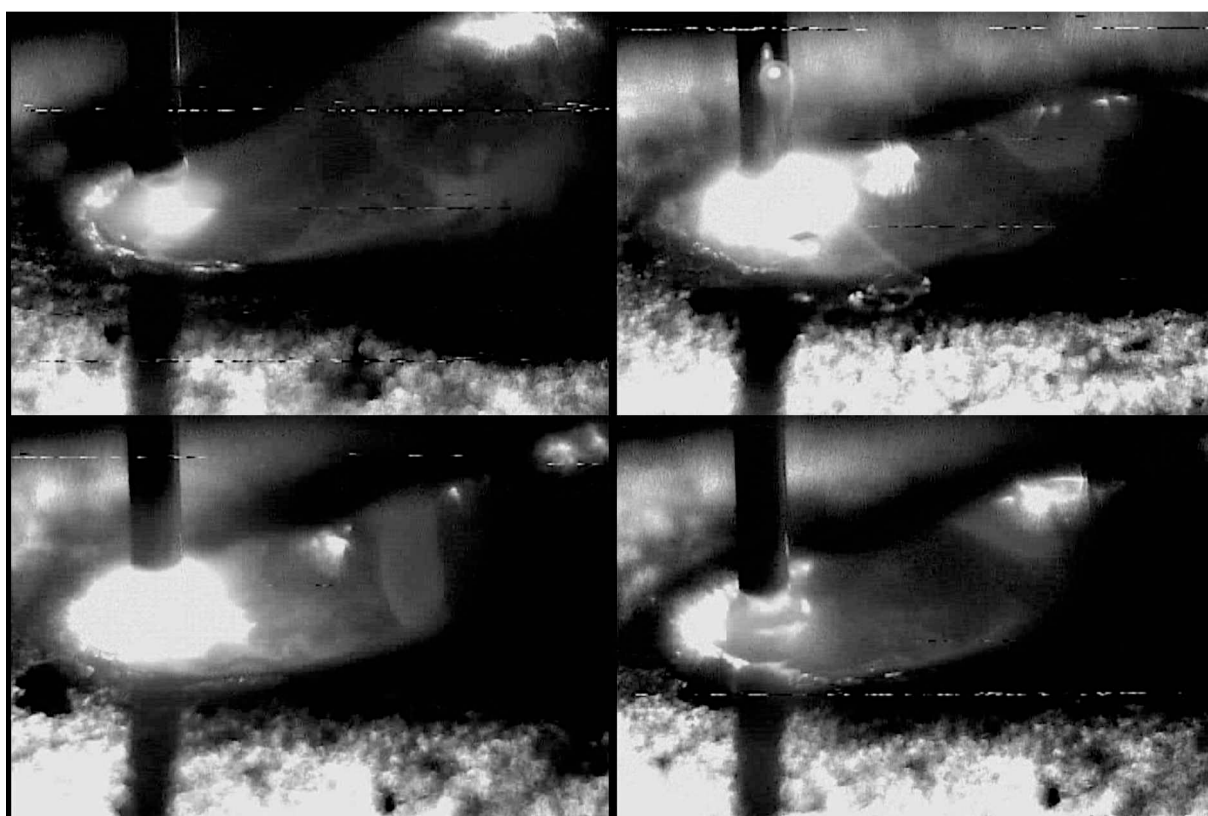


Figura 4.6 - Imagens obtidas pelo sistema ressonante e câmera de baixo tempo de exposição em soldagem MAG (100 A, CO<sub>2</sub> puro – como escala adotar diâmetro do arame igual a 1,2 mm)

Inicialmente, é possível observar que a qualidade da imagem obtida com a câmera de baixo tempo de exposição, em relação à nitidez e ruídos, é inferior à câmera USB utilizada nos testes anteriores. Esse comportamento inferior, porém, deve ser esperado por



se tratar de uma câmera analógica. O sinal analógico, ou seja, a imagem, é transmitido da câmera para a placa digitalizadora por um cabo blindado o que deixa o sinal menos susceptível a ruídos. Porém, a natureza inversora dos motores da mesa de movimentação e o próprio ruído eletromagnético da máquina de soldagem podem ser a causa do ruído presente nas imagens. É importante ressaltar que a qualidade da placa digitalizadora e do *software* de aquisição de imagens refletem, também, na qualidade das imagens obtidas.

Entretanto, no ponto de vista de visão em soldagem, o sistema com uso da câmera SI-M331 mostrou uma melhora acentuada em relação ao sistema anterior, com boa iluminação nas regiões ao redor da poça fundida e, principalmente, com maior atenuação, mesmo a sobreposição em determinados instantes, da luminosidade proveniente do arco de solda (Figura 4.7). A melhor compatibilidade entre o tempo de exposição e acionamento dos diodos laser é, provavelmente, a principal causa dessas melhorias.

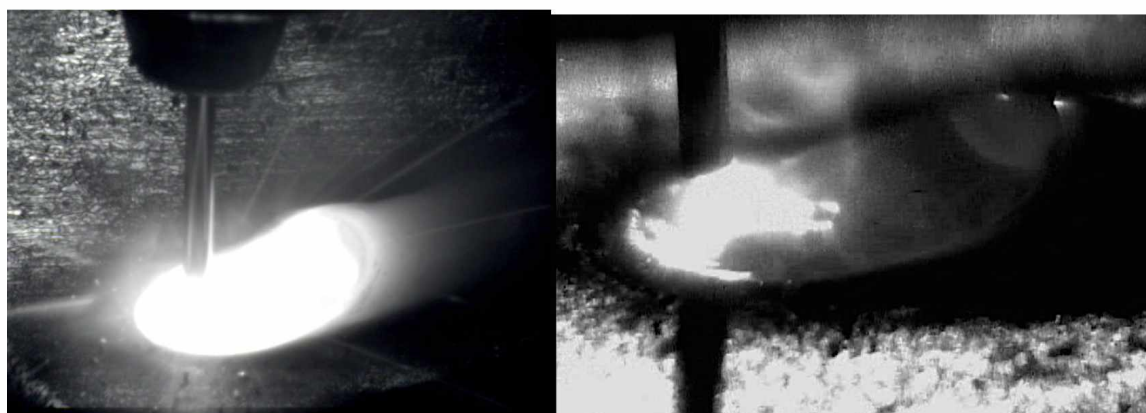


Figura 4.7 - Comparativo de imagens em soldagem MAG: Câmera USB 10  $\mu$ s (esquerda) e Câmera Analógica 1,25  $\mu$ s (direita)

Na tentativa de verificar a possibilidade de uso do sistema atual de visão em soldagens com maior intensidade luminosa, determinou-se o teste de validação em uma soldagem MIG com transferência metálica por voo livre. Por demandar uma maior corrente e um maior nível de tensão, o arco emitirá maior intensidade de luz, também no infravermelho próximo. A troca da proteção gasosa de CO<sub>2</sub> puro para a mistura Argônio + 8% de CO<sub>2</sub>, também acarretará em maior dificuldade de sobreposição do arco por parte dos sistema de visão, já que o Argônio possui emissão de seu átomo excitado (Ar I) de intensidade em torno do espectro de interesse, 905 nm (MOTA *et al.*, 2011).

A Tabela 4.2 resume os parâmetros de soldagem para a validação com maior intensidade luminosa do arco. Deve-se considerar os parâmetros do Sistema de visão encontrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.2 - Parâmetros para o teste inicial do sistema de visão em soldagem MIG/MAG spray com a câmera de baixo tempo de exposição.

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Soldagem	Gás de Proteção	Ar + 8%CO <sub>2</sub>	---
	Vazão de Gás	13	l/min
	Corrente	260	A
	Tensão	28,5	V
	Velocidade de Alimentação	8	m/min
	Velocidade de Soldagem	30	cm/min
	DBCP	18	mm

Exemplos dos quadros obtidos durante o uso do sistema de visão na soldagem MIG/MAG com transferência goticular são mostrados na Figura 4.8. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm. O sistema de visão não foi capaz de sobrepor a grande luminosidade emitida pelo arco, sendo difícil a distinção até mesmo da região ao redor da poça fundida.

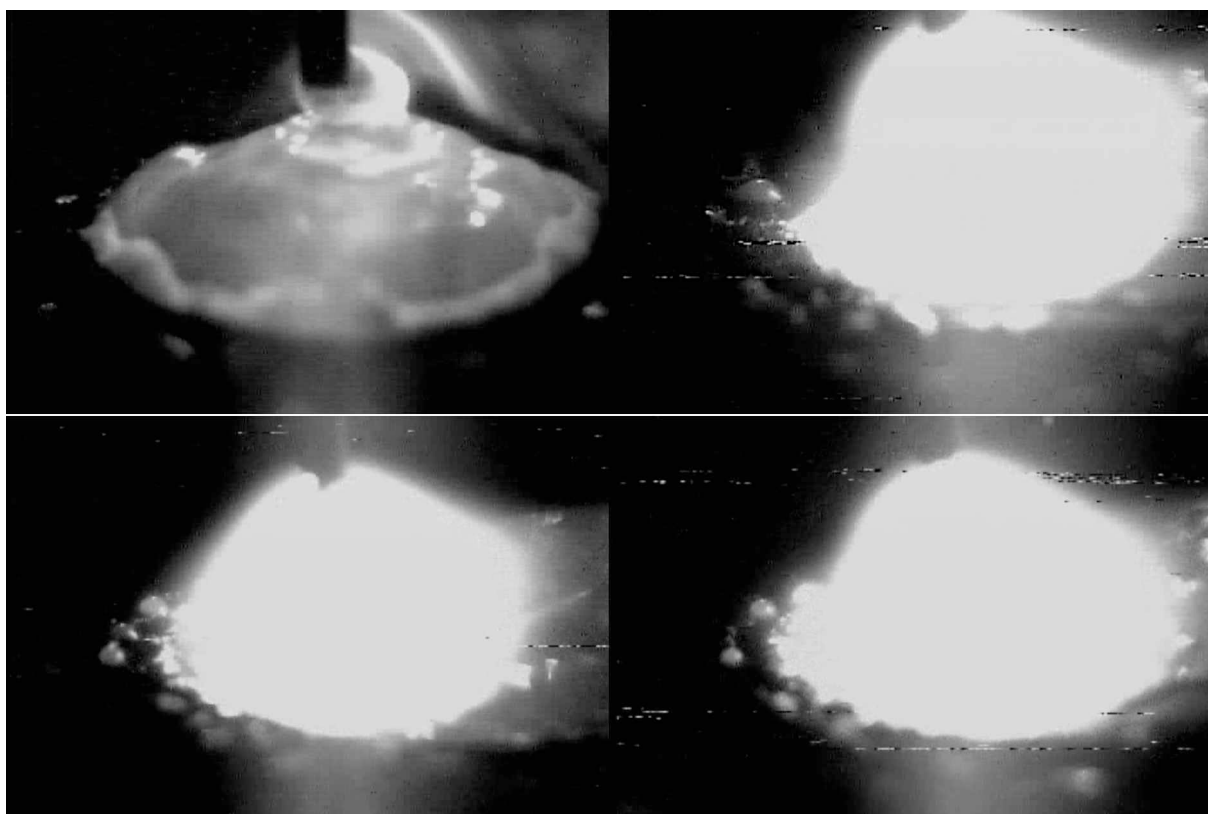


Figura 4.8 - Imagens obtidas pelo sistema ressonante e câmera de baixo tempo de exposição em soldagem MIG (260 A, Ar + 8% CO<sub>2</sub> – como escala adotar diâmetro do arame igual a 1,2 mm)

### 4.3 Considerações Finais

Este estudo inicial tinha como objetivo primário a avaliação da câmera de baixo tempo de exposição SI-M330 no uso em conjunto com uma iluminação no infravermelho próximo (905 nm) para sistema de visão em processo de soldagem. Para isso, adaptou-se o protótipo desenvolvido em trabalho anterior, ressonante, e validou-se o novo conjunto em soldagens MIG/MAG.

Algumas considerações e conclusões foram obtidas, como segue:

- A qualidade da imagem de uma câmera analógica é, sem dúvida, inferior a imagem obtida por uma câmera USB, e depende intrinsecamente, neste modelo, do arranjo dos *switches* internos nas placas de circuito desta;
- Deve-se levar em conta que esta qualidade depende também do cabo de transmissão da imagem, da placa e do *software* de captura utilizados e da interferência eletromagnética que podem ser geradas nas fontes de soldagem;
- Entende-se, portanto que se faz necessário o estudo do funcionamento da câmera analógica (assim como seus periféricos) a fim de se obter uma imagem com a melhor qualidade possível na situação;
- As imagens em soldagens com baixa intensidade luminosa (transferência por curto-circuito) mostram que a inserção de uma câmera de baixo tempo de exposição é uma solução promissora para a melhoria do sistema de visão por infravermelho próximo nos processos de soldagem;
- A utilização do protótipo de topologia ressonante mostrou, porém, que há necessidade do aumento da intensidade luminosa dos diodos laser durante o tempo de abertura da câmera, principalmente quando se observa soldagens com maior nível de intensidade luminosa;
- Essas melhorias podem envolver uma mudança da topologia de acionamento dos diodos laser, um aumento do pico de corrente sobre os mesmos, um aumento da densidade luminosa ou mesmo uma melhoria na sincronia entre o tempo de abertura e o pulso de iluminação.



## **CAPÍTULO V**

### **PROTÓTIPO DO SISTEMA DE VISÃO – VIASOLDA PULSO QUADRADO**

Neste capítulo, descrevem-se todas as etapas desenvolvidas para a construção de um novo protótipo de sistema de visão aplicados a processo de soldagem, aqui chamado de ViaSolda Pulso Quadrado, ou simplesmente ViaSolda. Deve-se levar em consideração que os resultados iniciais mostraram que o uso da câmera com baixo tempo de exposição tem potencial para melhorar a sobreposição do arco em imagens.

Na tentativa de se obter um maior nível de intensidade luminosa, o desenvolvimento do acionamento dos diodos laser tenderá a levar o componente semicondutor ao seu limite, e além dele. Experimentos de bancada provarão a possibilidade do uso do protótipo em baixa e altas velocidades e colocará em discussão o uso de fibras ópticas para o aumento da densidade luminosa.

Deve-se ressaltar, por fim, que o protótipo descrito neste capítulo é o resultado final de um processo de desenvolvimento eletrônico-computacional amplo e laborioso, envolvendo extensivos processos de simulação e experimentação de bancada, assim como mudanças importantes como componentes semicondutores, leiaute de placas de circuito impressos e até mesmo do próprio MCU. Afinal, um processo de desenvolvimento e otimização de um produto pode ser, caso a intenção seja a busca pela excelência, um trabalho sem fim.

#### **5.1 Projeto do Protótipo de Pulso Quadrado – ViaSolda**

A topologia de acionamento dos diodos laser de alta potência é de fundamental importância na eficácia do sistema de visão como um todo. A forma e intensidade com que os diodos laser são acionados determinam, por consequência, a quantidade de luz infravermelha emitida pelo canhão de iluminação e, em conjunto com o sistema ótico que a

distribui, determina se a densidade luminosa é capaz de sobrepor a luminosidade proveniente do arco de solda. Portanto, sua otimização é determinante na eficiência nos limites de utilização do ViaSolda.

O diodo laser de alta potência é um semiconductor com características únicas que devem ser respeitadas para seu bom uso. Sua corrente máxima de pico é de 40 A com um tempo de pulso de 100 ns e, principalmente, um ciclo de trabalho de 0,1%.

A primeira topologia de acionamento criada era do tipo ressonante, dividindo a iluminação em dois pulsos de características senoidais subsequentes e respeitando os limites de corrente média e eficaz, além do ciclo de trabalho dos diodos laser. Testes de longa duração e estresse provaram que a topologia não prejudicava o tempo de vida dos diodos laser, uma precaução necessária para o projeto, já que estes semicondutores são de difícil acesso. Porém, a incapacidade de sobreposição do arco por esta topologia ressonante cria a necessidade de mudanças.

A primeira decisão quando a mudanças do sistema é, de certa forma, de censo comum. Uma opção para o aumento da intensidade luminosa do arco, de fácil adaptação, é utilizar os 19 diodos laser como fonte de iluminação única ao invés da distribuição destes em dois ciclos. Desta forma, os dois conjuntos de diodos laser serão acionados, na nova topologia, em série e por um tempo maior (para iluminar durante todos os 1,25  $\mu$ s de exposição da câmera). A placa contendo os dois conjuntos de diodos laser foi mantida (Figura 5.1), apenas, no circuito de acionamento, colocando as duas sequências em séries.

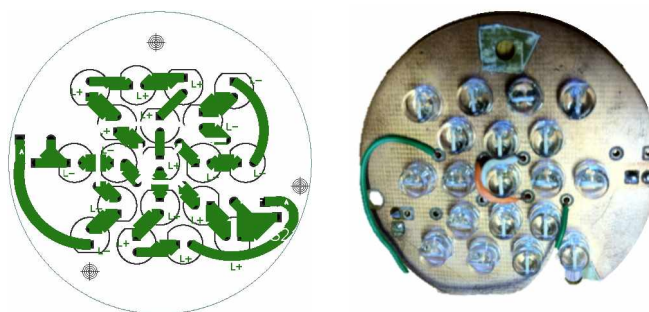


Figura 5.1 – *Leiaute* de ligação em série dos diodos laser (esquerda) e placa real (direita).

Neste ponto, é possível divergir a mudança da topologia de acionamento dos diodos laser em duas vertentes distintas do ponto de vista da eletrônica: uma topologia conservadora e de projeto mais complexo, um sistema ressonante para o acionamento dos 19 diodos laser por um maior período e com maior pico de corrente e, do outro lado, uma topologia simples e “arriscada”, criando uma topologia do tipo liga/desliga (*chooper*) para os mesmos, com pico de corrente e tempo de acionamento adequados.

### 5.1.1 Topologia de Pulso Quadrado - ViaSolda

Uma solução encontrada para o aumento da luminosidade do diodo laser é a mudança do formato do pulso de acionamento de ressonante para um pulso quadrado. Seu formato é, por sua natureza, mais prejudicial à junção dos diodos laser, mas o ganho de quantidade de carga passante pelos semicondutores, e por consequência, a energia luminosa emitida pelo sistema é suficiente para uma melhoria considerável na capacidade de iluminação dos diodos laser, como pode ser observado na Figura 5.2.

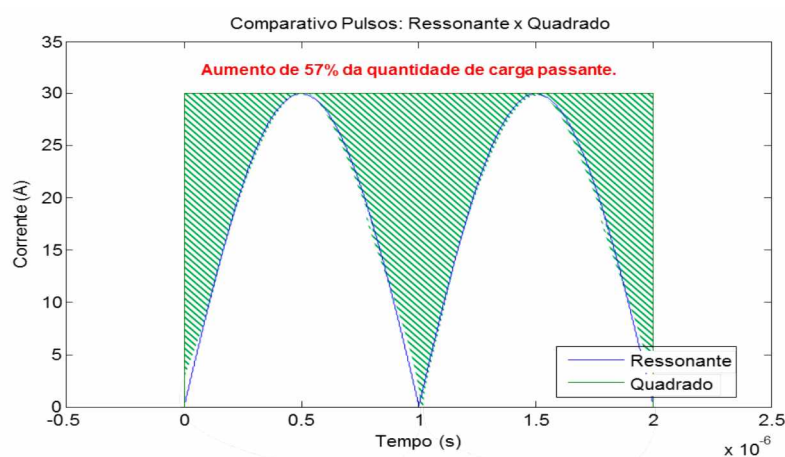


Figura 5.2 - Comparativo entre topologias de acionamento do diodo laser.

Sendo assim, criou-se uma topologia de acionamento dos diodos laser de alta potência por pulso quadrado, onde os dois conjuntos de diodos laser (19 diodos) são acionados ao mesmo tempo, Figura 5.3.

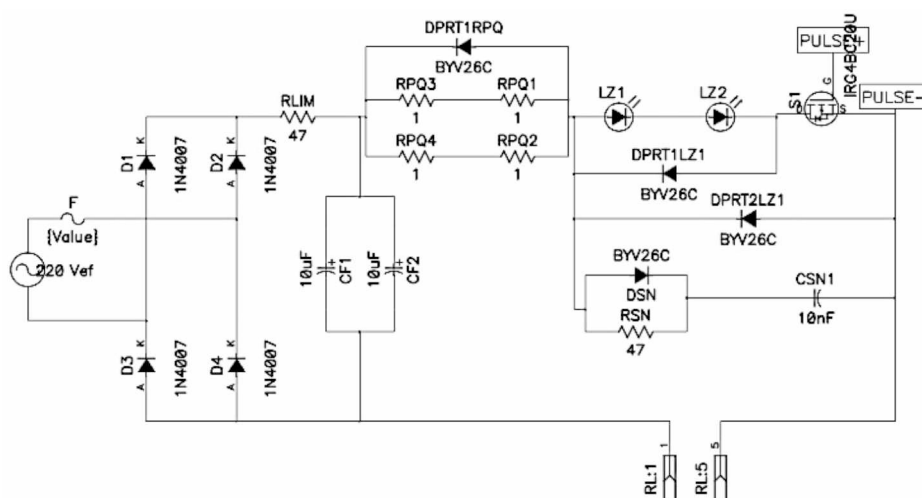


Figura 5.3 - Esquemático de topologia de acionamento por pulso quadrado.

O funcionamento desta topologia é, do ponto de vista eletrônico, simples. A tensão da rede (220 Vac) é retificada, pela ponte completa dos diodos retificadores (D1 a D4) para a entrada de uma tensão contínua de aproximadamente 311 V. Esta tensão carrega os dois capacitores (CF1 e CF2) que, por sua vez, se comportam como a fonte para os picos de corrente do circuito de acionamento dos diodos laser.

Quando o circuito de controle comuta a chave S1, esta entra em condução, permitindo passagem de corrente pelos conjuntos de diodos laser (LZ1 e LZ2) ao mesmo tempo. Após o tempo de pulso, o circuito de controle comuta novamente a chave S1 e, esta impede a passagem de corrente pelos diodos laser. A corrente que passa pelos diodos é limitada apenas por uma resistência em série à alimentação (a resistência equivalente de RPQ1 a RPQ4), à queda de tensão sobre os diodos laser e às características dissipativas presentes no circuito *snubber*.

Dois diodos são colocados em antiparalelo com o conjunto de diodos laser e o circuito em série chave-diodos laser. Desta forma, esses diodos funcionam como diodos de “roda-livre”, responsáveis pela proteção contra tensões e correntes reversas que possam aparecer sobre os semicondutores principais do circuito, principalmente no instante de saída de condução. Os componentes Csn, Dsn e Rsn formam um circuito *snubber* e auxiliam a comutação da chave e o componente RL é um relé de proteção auxiliar inserido em série ao circuito.

A chave semicondutora é o principal componente a ser escolhido no projeto deste tipo de topologia. Suas características podem determinar a capacidade máxima de circulação de corrente e o máximo de tensão direta e reversa permitidas no circuito como um todo. Inicialmente, utilizou-se o MOSFET IFR740, semelhante ao componente escolhido na topologia ressonante. Porém, com o aumento exigência de funcionamento do circuito (como aumento de corrente e frequência), a chave semicondutora apresentou comportamento instável, principalmente nos momentos de saída de condução, provocando superaquecimento e queima de componentes. Os requisitos da topologia de pulso quadrado provaram-se muito próximos dos limites de funcionamento do MOSFET, sendo necessária a sua troca para uma chave semicondutora mais robusta.

Portanto, a chave semicondutora foi substituída por um IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada). O IGBT alia as características de chaveamento dos transistores bipolares com a alta impedância dos MOSFETS, com baixa tensão de saturação e alta capacidade de corrente. Em um comparativo direto entre o MOSFET e o IGBT, ilustrado na Tabela 5.1, pode-se concluir que o IGBT ultra rápido selecionado, IRG4BC20U, suporta maiores valores de corrente e tensão, por outro lado, ambos podem ser acionadas com os mesmos valores de tensão. O IGBT possui menor capacitância tanto na entrada como na saída do circuito,

diminuindo as capacitâncias parasitas, porém com um tempo de subida de corrente maior quando comparado ao MOSFET, o que certamente poderá causar algum prejuízo na sincronia de iluminação.

Tabela 5.1 – Comparativo entre chaves semicondutoras MOSFET e IGBT (ST MICROELECTRONICS, 1998; International Rectifier, 2000).

	IRF740	IRG4BC20U	Unidade
Tensão Máxima (coletor-emissor ou dreno-source)	400	600	V
Corrente Máxima Contínua	10	10	A
Corrente Máxima Pulsada	40	52	A
Tensão de Gate	±20	±20	V
Atraso de Ligação	15	20	ns
Atraso no Desligamento	52	86	ns
Capacitância de Entrada	1250	530	pF
Capacitância de Saída	300	39	pF

Determinou-se um pulso com corrente de pico de 40 A e duração de pulso de aproximadamente 2  $\mu$ s à uma frequência de 30 Hz. O pulso extrapola o tempo de abertura da câmera (1,25  $\mu$ s) por questões de segurança, ou seja, mesmo que a câmera tenha um pequeno atraso na abertura de seu diafragma, a luminosidade do ViaSolda estará presente durante todo o tempo de abertura da câmera.

Acredita-se que essa configuração, apesar de ultrapassar o tempo de pulso recomendado pelo fabricante (100 ns), respeita as outras limitações do diodo laser, como ciclo de trabalho e corrente eficaz e média na junção e, como na topologia ressonante, não será prejudicial à vida útil dos diodos laser. A Tabela 5.2 mostra o comparativo entre acionamento dos diodos laser recomendado pelo fabricante e a topologia de pulso quadrado e o cálculo da corrente eficaz se encontra no APÊNDICE II.

Tabela 5.2 – Comparativo entre acionamento dos diodos laser recomendado pelo fabricante (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS, 2006) e a topologia de pulso quadrado.

	Fabricante	Pulso Quadrado	Unidade
Frequência de Pulso	1000	30	Hz
Corrente de Pico	40	40	A
Largura do Pulso	100	2000	ns
Ciclo de Trabalho	0,01	0,006	%
Corrente Eficaz	0,4	0,31	A

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 5.4.

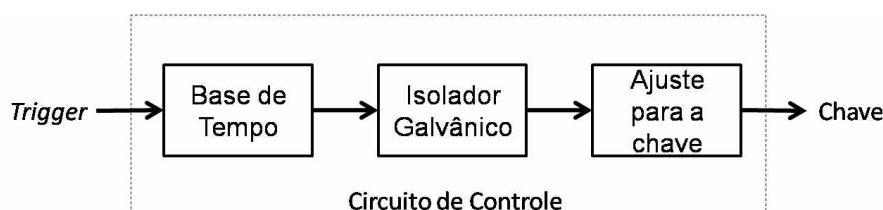


Figura 5.4 - Circuitos auxiliares para a comutação de um chave semicondutora.

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.

Nesta topologia, as referências dos circuitos – controle e potência – estão interligadas, não havendo necessidade de isolamento galvânico. Desta forma, é possível retirar o circuito isolador sem a alteração do funcionamento correto da topologia. Com o intuito de, principalmente, diminuir o número de fonte necessárias dentro do sistema, e simplificar a fabricação da PCB, não há utilização do isolamento galvânico nesta topologia. Porém, deve-se ressaltar, que seu suprimento gera riscos que devem ser levados em consideração na montagem do sistema de visão, já que a referência do controle (GND), que é comum à câmera analógica e à placa de captura entrará em contato elétrico com a retificação das fases do 220 V.

A abertura da chave é controlada pelo circuito integrado ICL7667 (INTERSIL CORPORATION, 2010) que recebe um sinal de pulso digital e o transforma em níveis de tensão adequados para a chave de potência utilizada (FINZI NETO, 2003). Ilustrado na Figura 5.5, o circuito impõe tensões negativas ( $\sim -3$  V) para manter a chave fechada e tensões positivas ( $\sim 10$  V) para a condução desta. Deve-se ressaltar que o ICL7667 trabalha com lógica invertida, ou seja, transforma um pulso negativo (PNP) em pulso positivo (NPN).

Deve-se ressaltar que este circuito de ajuste caberia para acionamento de diversas chaves semicondutoras, incluindo MOSFETs e IGBTs.

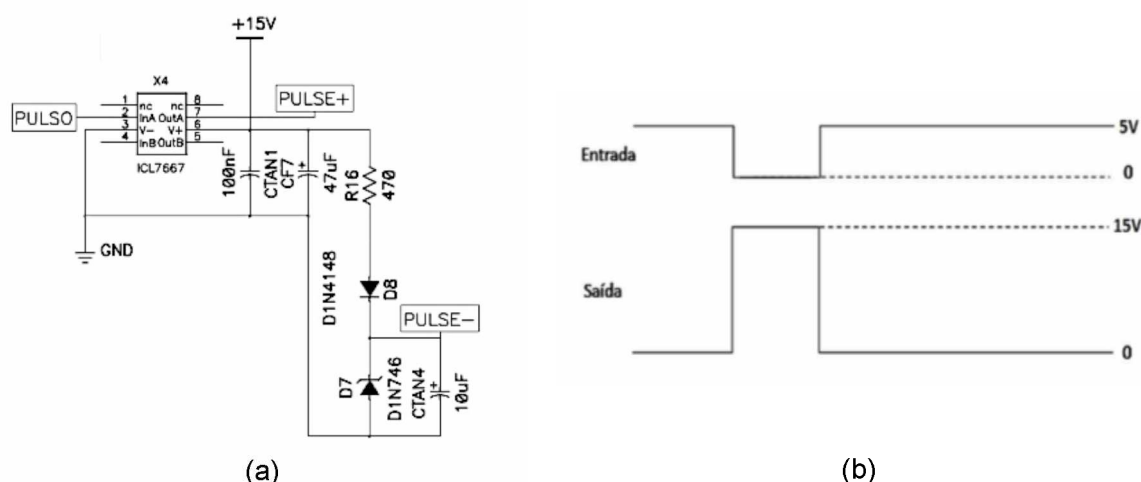


Figura 5.5 – Ajuste para a chave: (a) circuito e (b) níveis de entrada/saída pulsos.

Para a criação da base de tempo, em busca de maior flexibilidade aliada à imunidade a ruídos eletromagnéticos, optou-se pelo uso de um microcontrolador. O MCU de 8 bits PIC18F4553 (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2009) com encapsulamento de 28, 40 ou 44 pinos possui grande capacidade de execução com frequências de até 48 MHz e ciclos de instrução de 80 ns. Suas principais funcionalidades envolvem 256 bytes de memória programável EEPROM e 2048 bytes de RAM, comunicação USB V2.0, 35 pinos digitais programáveis de entrada e saída, 3 pinos de interrupção externa, 4 módulos temporizadores, 13 canais de conversores analógicos digital (A/D) de 12 bits, 5 V de alimentação para Programação Serial *In-Circuit* (ICSP), entre outras. Estas funcionalidades o tornam ideal para aplicações avançadas de controle, A/D nos setores automotivo, industrial e para consumidores finais.

Através de um timer de 16 bits disponível e um *clock* externo adequado, o microprocessador é capaz de “contar” tempos variados, sendo assim, possível a criação do *trigger* interno em baixa frequência necessária para o acionamento das chaves comutadoras. O tempo de instrução de 80 ns permite a criação dos pulso na base de tempo para a chave. O circuito simplificado de *trigger* e base de tempo, utilizando-se o MCU PIC18F4553, é ilustrado na Figura 5.13.

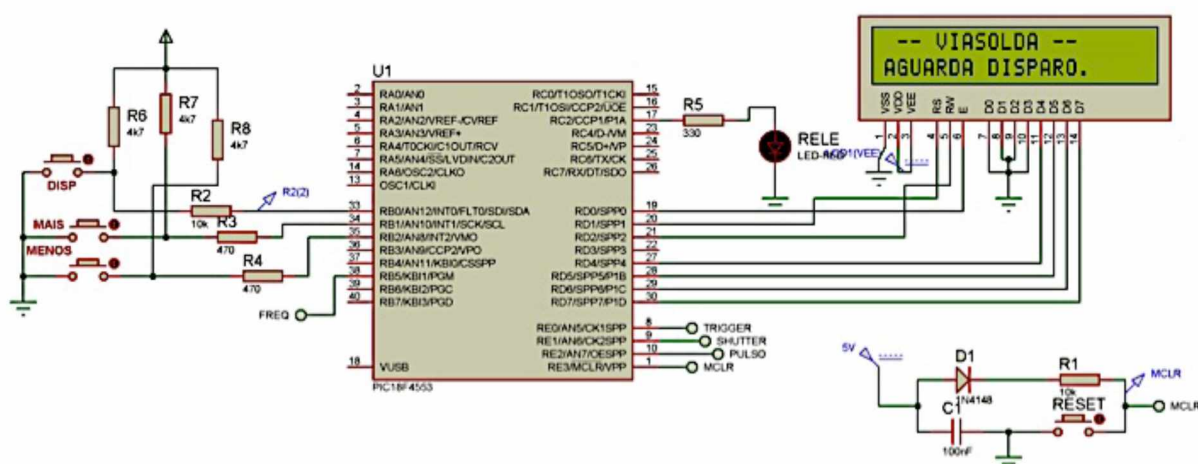


Figura 5.6 – Circuito de Controle através da MCU PIC18F4553.

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 0), e, quando esta variável atinge o valor máximo possível, dependendo do número de bits, ocorre uma interrupção, ilustrado na Figura 5.7. A frequência em que esta interrupção ocorre (Freq) é dada em função da frequência de execução de instruções (Fosc), da configuração de bits do timer (BITS), da pré-escola utilizada, PS, e do valor inicial atribuído ao TMR, como mostra a Eq. (5.1).

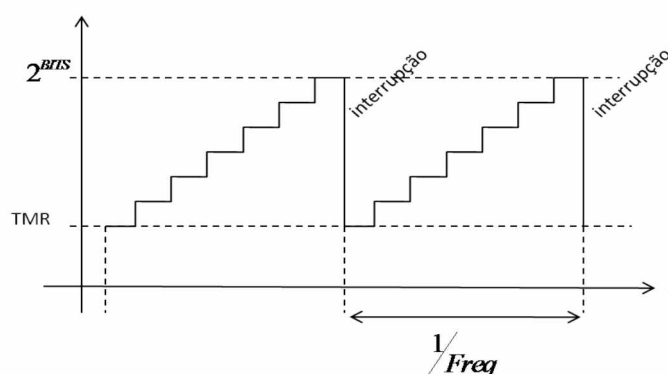


Figura 5.7 - Esquema de interrupção por timer.

$$TMR = 2^{BITS} - \left( \frac{Fosc}{4 \times PS \times Freq} \right) \quad (5.1)$$



controle do início do tempo de abertura da 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 5.3.

Tabela 5.3 – Descritivo dos pinos de interface MCU / SI-M331 / Topologia de Pulso  
Quadrado

Pino	Função	Saída / Entrada
B0	Habilita/desabilita acionamento (DISPERATI)	Entrada
B1	Função Mais (MAIS)	Entrada
B2	Função Menos (MENOS)	Entrada
B5	Frequencímetro	Saída
C2	Habilita/desabilita Relé-LED de Proteção	Saída
E0	Envio de sinal de <i>trigger</i> para a câmera	Saída
E1	Entrada de sinal de <i>shutter</i> da câmera	Saída
E2	Pulso de acionamento dos diodos laser	Saída
Dx	Comunicação com LCD	Entrada / Saída

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, após as configurações iniciais de configuração de *clock*, entradas e saídas e interrupções, o usuário pode, pelo botão “DISP”, dar início ou parar a contagem e interrupção pelo temporizador Timer 0. Os botões adicionais, “MAIS” e “MENOS” foram inseridos para, caso se mostre necessário, flexibilizar a comunicação com o usuário. O LCD dá ao usuário informações como mensagens iniciais da versão do firmware e, mais importante, o estado de acionamento dos diodos laser – “Aguarda Disparo”, para quando o sistema de iluminação está desativado, ou “Enviando Pulsos”, para a iluminação em funcionamento.

No momento de interrupção do Timer 0 (fixado em uma frequência de 30 Hz) é que realmente ocorre o acionamento dos diodos laser em sincronia com a câmera. O MCU envia um pulso para a câmera pela saída de *trigger* e aguarda a borda de descida do sinal de *shutter* através de um laço de repetição (*while*). Assim que o MCU detecta o sinal de *shutter*, um pulso de 1,7  $\mu$ s é enviado para a saída responsável da comutação das chaves (Pino E0). Desta forma, é possível controlar o momento da aquisição da imagem pelo MCU e, ainda, manter a sincronia pela resposta assíncrona da câmera SI-331 no modo de controle externo.

Seguem, da Figura 5.8 a Figura 5.10, os fluxogramas de toda a rotina de programação inserida no MCU para todo o circuito de trigger e base de tempo com frequência fixa em 30 Hz. O código-fonte completo do algoritmo pode ser encontrando no APÊNDICE I.

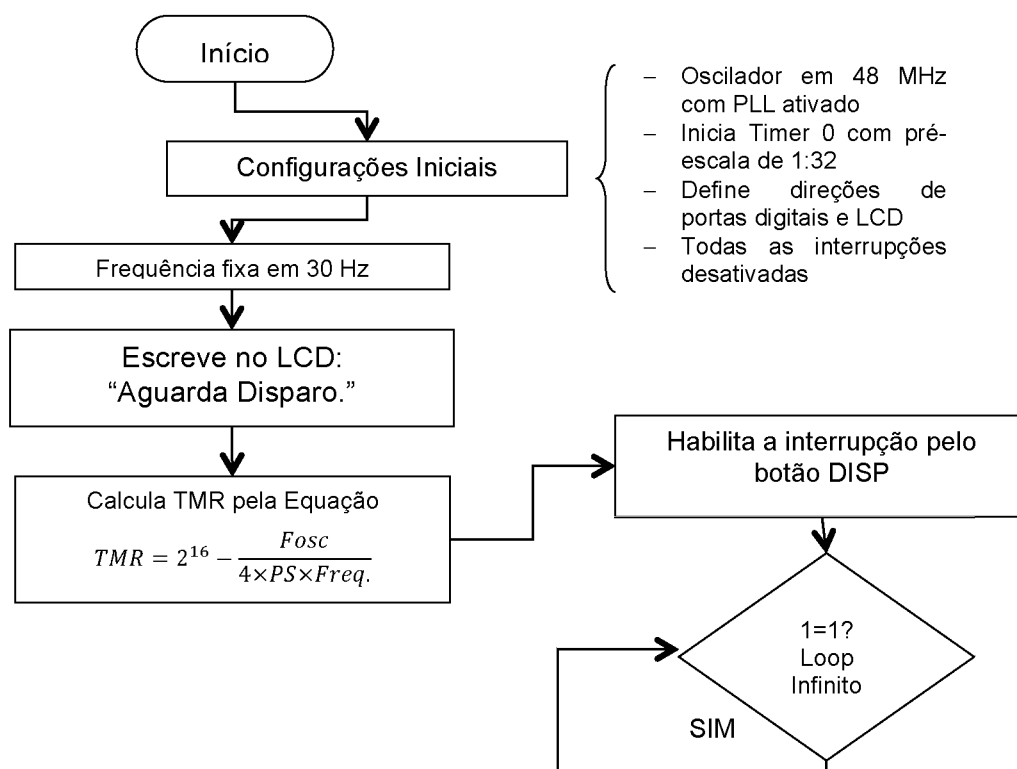


Figura 5.8 – Fluxograma da função principal do algoritmo “ViaSolda\_NOVAPLACA”.

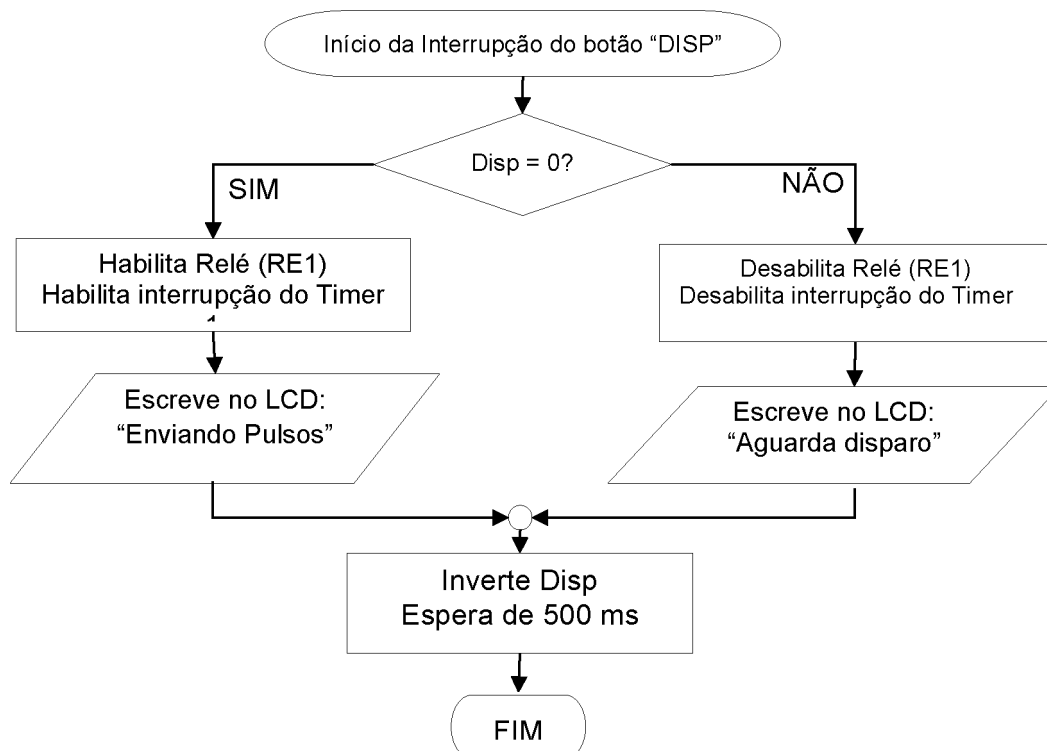


Figura 5.9 – Fluxograma de interrupção do botão DISP do algoritmo “ViaSolda\_NOVAPLACA”.

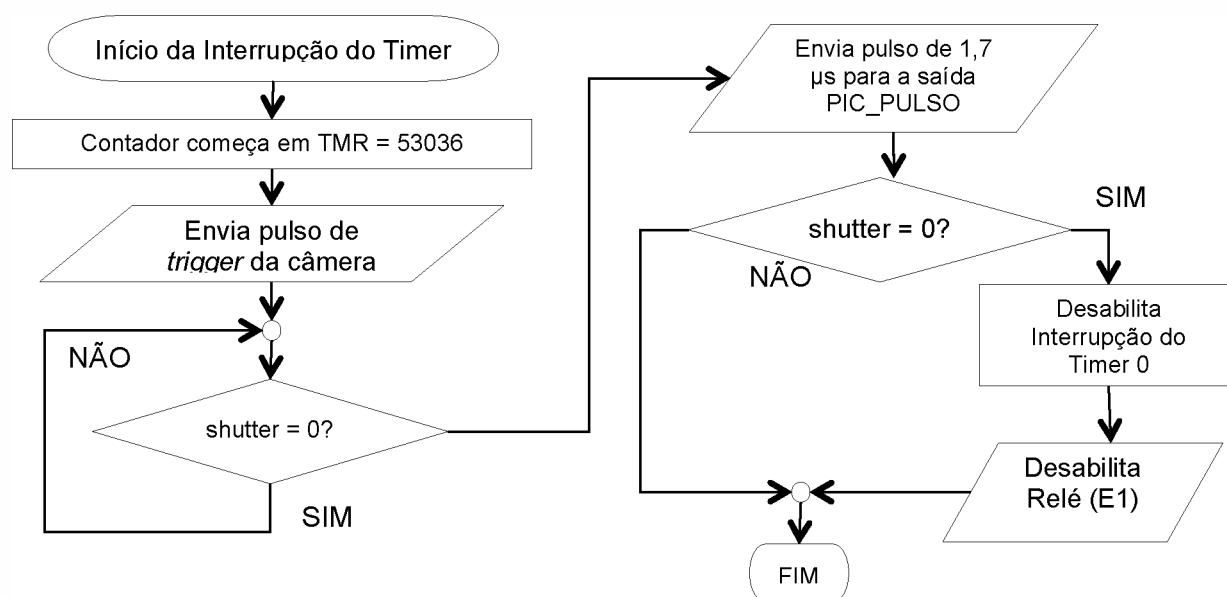


Figura 5.10 – Fluxograma de interrupção do temporizador Timer do algoritmo “ViaSolda\_NOVAPLACA”.

A natureza programável do MCU pode ser aproveitada ao máximo quando o circuito integrado é programado diretamente na placa de circuito impresso. Uma das técnicas utilizadas para tal é a Gravação Serial *In-Circuit* (ICSP). A gravação *in circuit* é, basicamente, um protocolo de comunicação que permite o envio da programação do chip através de uma interface serial, utilizando-se de apenas dois pinos de entrada e saída digitais forma pouco intrusiva na operação normal do MCU (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2003a). Portanto, foram inseridos no PCB um conector de gravação *in circuit* e o circuito de apartação necessário para o botão de RESET, como mostra a Figura 5.12.

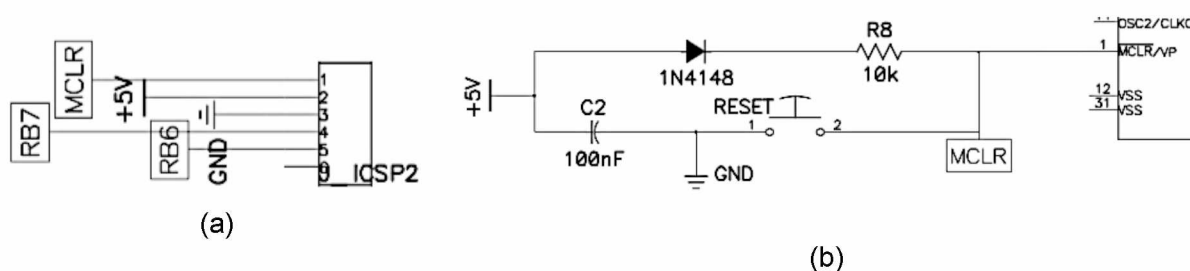


Figura 5.11 – Esquemático de gravação ICSP: (a) detalhe de ligação do conector de 6 vias e (b) circuito de adaptação do botão RESET.

Para o alcance de uma boa sincronia entre pulso de acionamento e tempo de exposição da câmera, sem, entretanto, correr risco de prejudicar os diodos laser por falhas de conexão ou da câmera, o MCU comunica-se com a SI-M331 por duas vias: através de

um envio de *trigger* e pela leitura do sinal de *shutter* desta. As conexões SI-M330/MCU seguem ilustradas na Figura 5.12.

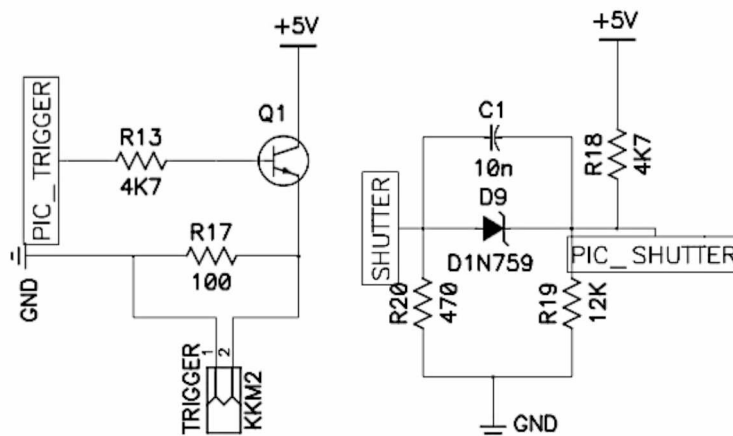


Figura 5.12 – Circuitos de conexão MCU/SI-M331: TRIGGER (esquerda) e SHUTTER (direita).

O pino de saída do MCU é colocado na base de um transistor PNP para ganho de corrente no controle da câmera e tem um resistor para drenagem de cargas em ligação positivo/GND, para obtenção de nível baixo de tensão (0 V) com maior facilidade. Os componentes que interligam a entrada do *shutter* com o restante do circuito formam um circuito de proteção contra entrada flutuante da câmera, além da adequação dos níveis de tensão para comunicação em TTL e proteção contra retorno de corrente à câmera.

O pulso digital de entrada do circuito de controle da chave (Figura 5.5) é composto por uma combinação lógica digital entre o pulso de acionamento da câmera PIC\_TRIGGER, o pulso de *shutter* da câmera (PIC\_SHUTTER) e um pulso de controle de uma saída digital do MCU (PIC\_PULSO). Isso faz com que o pulso de acionamento dos diodos laser ocorra apenas quando houver “permissão” do usuário através do algoritmo de controle programado no MCU, aumentando o nível de proteção dos diodos laser contra anomalias no funcionamento do sistema. A lógica de controle de acionamento digital é exemplificada na Figura 5.13.

O pulso de entrada do circuito de ajuste para a chave deve ocorrer se, e somente se, o MCU estiver enviando um pulso de TRIGGER para a câmera, a câmera estiver respondendo com o seu sinal de SHUTTER e o MCU tiver recebido e lido esse sinal da câmera e respondido corretamente com um pulso de 1,7  $\mu$ s (PIC\_PULSO). Para que não haja grandes atrasos em relação ao tempo de abertura da câmera, o pulso deve se iniciar em conjunto com o sinal de *shutter* e finalizar com o sinal de controle do MCU.

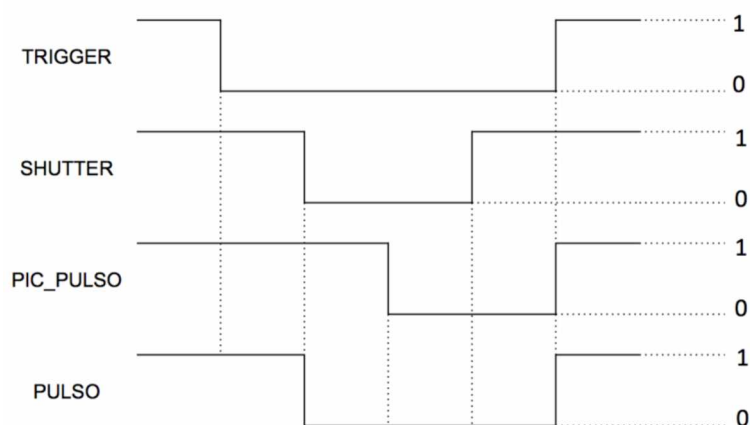


Figura 5.13 – Lógica de controle de acionamento digital.

Deve-se levar em consideração que a câmera trabalha com a lógica PNP, ou seja, tanto o acionamento pelo sinal de *trigger* quanto a resposta indicando o momento da abertura pelo sinal de *shutter* é de nível baixo (0), enquanto o nível alto (1) indica os momentos de espera (não acionamento).

A tabela verdade da lógica de controle é apresentada na Figura 5.14. Utilizando-se, dos conceitos de simplificação de álgebra booleana através do Mapa de Karnaugh, a expressão lógica equivalente para o controle do acionamento da chave semicondutora é:

$$PULSO = PIC\_TRIGGER + (PIC\_SHUTTER \cdot PIC\_PULSO) \quad (5.2)$$

TRIGGER	SHUTTER	PIC_PULSO	PULSO
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

		TS			
		00	01	11	10
P	0	0	0	1	1
	1	0	1	1	1

Figura 5.14 – Tabela verdade (esquerda) e mapa de Karnaugh (direita) de lógica digital de pulso.

Desta forma, o pulso de entrada do circuito de ajuste para a chave somente terá nível alto, quando sua entrada (PULSO) estiver em nível baixo e, por consequência, este apenas será nível baixo quando o sinal de *trigger* estiver baixo e o sinal de *shutter* da câmera ou o sinal de pulso do PIC estiverem também em nível baixo. O circuito completo, entre os três sinais e a saída digital PULSO está ilustrado na Figura 5.15. Observa-se que

todos os sinais foram ligados à entrada de sua respectiva porta lógica com um circuito de “pull-up”, que garante o nível alto quando a entrada estiver flutuante.

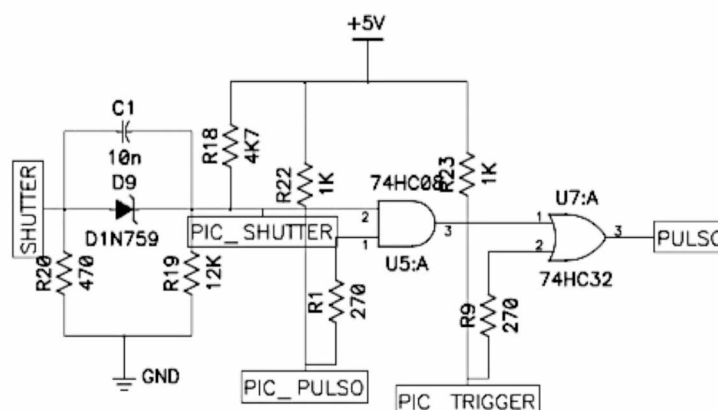


Figura 5.15 – Circuito lógico de controle do acionamento da chave.

Para o melhor entendimento do funcionamento do controle da câmera analógica SI-M330 em seu modo de controle por *trigger* externo e, tendo em vista que todo e qualquer tempo de atraso é relevante em um tempo de abertura de  $1,25\ \mu\text{s}$ , as formas de onda dos sinais de controle foram observadas através de um osciloscópio (ver APÊNDICE IV). Algumas considerações sobre os tempos de atraso e sincronia de acionamento dos diodos laser e o tempo de exposição da câmera são descritas abaixo :

- O tempo de ciclo de instrução para o PIC18F4553 com oscilador de 48 MHz e configuração de PLL (multiplicador) é de 80 ns;
- A câmera analógica SI-M330 possui um tempo de resposta assíncrono entre a entrada do sinal de *trigger* e o início do tempo de abertura que varia entre 100 a 150  $\mu\text{s}$ ;
- Pelo algoritmo descrito, há um atraso (assíncrono), devido à natureza do laço de repetição, entre a borda de descida do *shutter* e o envio de pulso pela saída PIC\_PULSO de aproximadamente 400 ns;
- A inserção de um circuito lógico causou um atraso menor que 60 ns entre seus sinais de entrada e saída;
- O circuito de disparo ICL7667 gera um atraso de aproximadamente 10 ns entre seus sinais de entrada e saída;
- O atraso total medido experimentalmente entre borda de descida do *shutter* e borda de subida do *gate* da chave é de aproximadamente 100 ns, como ilustra a Figura 5.16.

- O tempo total de acionamento da chave de potência varia de aproximadamente 2 a 2,4  $\mu\text{s}$ , devido à combinação de atrasos e assíncronas entre o circuito de controle.

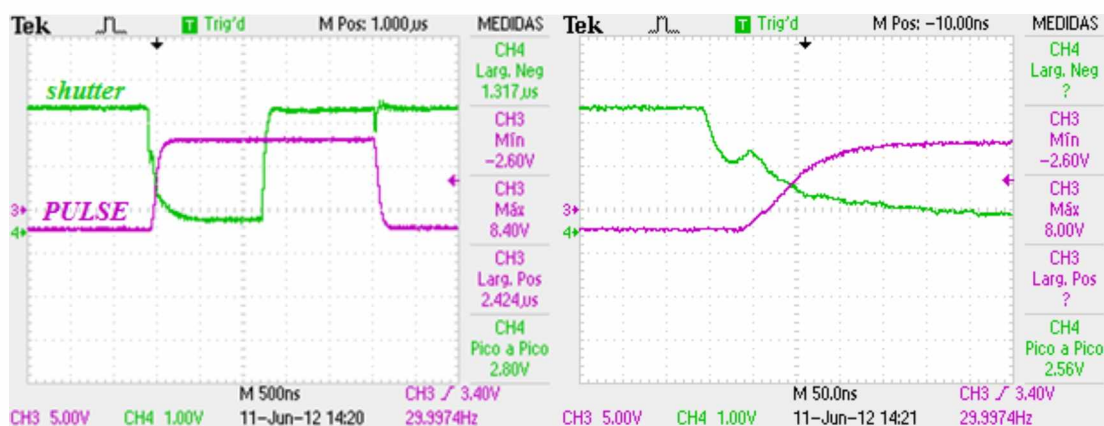


Figura 5.16 – Atraso total entre *shutter* (magenta) e momento de acionamento da chave (verde)

A topologia por pulso quadrado foi desenvolvida através de simulação computacional, construída e testada experimentalmente para a verificação de seu funcionamento. Considera-se importante para a análise deste circuito as seguintes formas de onda: tensão entre os terminais coletor-emissor e gate-emissor da chave comutadora S1, e seus valores de máximo, e corrente sobre os conjuntos de diodos laser, LZ1 e LZ2.

A simulação foi realizada através do *software* OrCAD®, onde é possível verificar aproximadamente as formas de onda esperadas de tensão e corrente sobre os componentes semicondutores, além de inserir propositalmente indutâncias de trilha para verificar a resposta do circuito em uma condição extrema em inserção de ruídos. O esquemático de simulação e os resultados obtidos são ilustrados a seguir (Figura 5.17 e Figura 5.18).

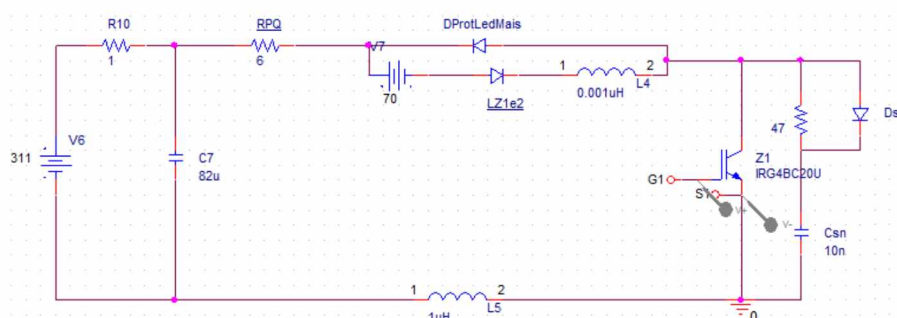


Figura 5.17 - Esquemático de simulação ViaSolda Pulso Quadrado

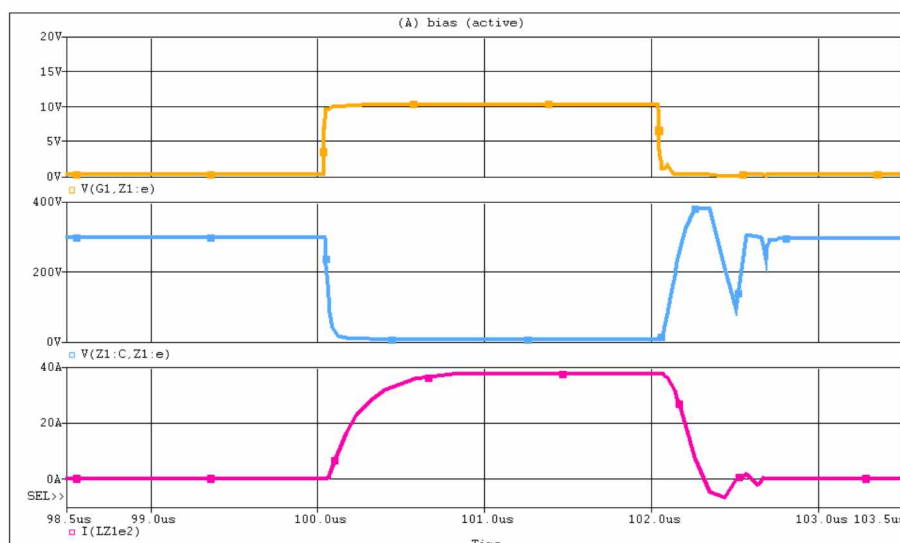


Figura 5.18 - Principais forma de Onda em simulação ViaSolda Pulso Quadrado

Durante os experimentos de bancada com a placa de circuito impresso já construída deve-se considerar que algumas etapas foram estabelecidas, para garantir a segurança e robustez da topologia com o aumento da demanda do circuito (tensão e correntes sobre os componentes), para, assim inserir os diodos laser no circuito (APÊNDICE V):

- Inserção de um *autotrafo* variável (Varivolt) na entrada do circuito, anterior à ponte retificadora, para aumento gradual da tensão alternada de entrada (Vac);
- Substituição dos diodos laser por um diodo ultrarrápido BYV26C (PHILIPS SEMICONDUCTORS, 1994) para simulação do bloqueio de passagem de corrente reversa e medição das principais formas de onda do circuito, sabendo que a queda de tensão sobre o diodo será menor que quando inseridos os 19 diodos laser em série (limite de tensão de entrada alternada em 100 Vac);
- Substituição do diodo ultra rápido por um diodo laser de alta potência, repetindo as etapa de inserção do varivolt, considerando ainda que a queda de apenas um diodo laser será menor que quando inseridos os 19 diodos laser em série (limite de tensão de entrada alternada em 100 Vac);
- Testes de sincronia de imagens e de observação das formas de onda em funcionamento de longa duração, com o diodo laser sendo monitorado pela própria câmera;
- Inserção do conjunto de 19 diodos laser e medição das principais formas de onda no circuito com o controle da tensão alternada de entrada pelo uso do varivolt, com testes de sincronia de imagens;



- Retirada do Varivolt e teste do circuito com a tensão de entrada variável da rede (220 V) com retirada das formas de onda com testes de sincronia de imagens;

Utilizando-se do osciloscópio digital Tektronix® TPS2014, com quatro canais isolados e armazenamento em um cartão (TEKTRONIX, 2009), adquiriu-se as formas de onda: tensão entre os terminais emissor-coletor e gate-coletor da chave IGBT S1, e corrente sobre os conjuntos de diodos laser LZ1 e LZ2. Através um multímetro *true rms* controlou-se a tensão alternada de entrada.

Deve-se ressaltar 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.

A Figura 5.19 mostra as principais formas de onda do circuito de pulso quadrado com os 19 diodos laser e com controle da tensão alternada de entrada. A Tabela 5.4 resume os principais valores elétricos medidos: FPS (Hz) – frequência de acionamento, Vac (V) – tensão alternada de entrada, Vce (V) – tensão média sobre o coletor-emissor da chave no momento de não chaveamento, Vge (V) – tensão média sobre o gate-emissor da chave, Idl (A) – corrente máxima sobre os diodos laser, tpulso ( $\mu$ s) – tempo entre bordas de subida e descida do sinal Idl, Duty Cicle (%) – proporção percentual do tempo de pulso e período de acionamento, Ief (A) – cálculo do valor eficaz (RMS) da corrente sobre os diodos laser. O algoritmo utilizado para de obtenção das formas de onda e cálculo dos valores de todas as medições pelo osciloscópio TPS2014 segue no APÊNDICE VI.

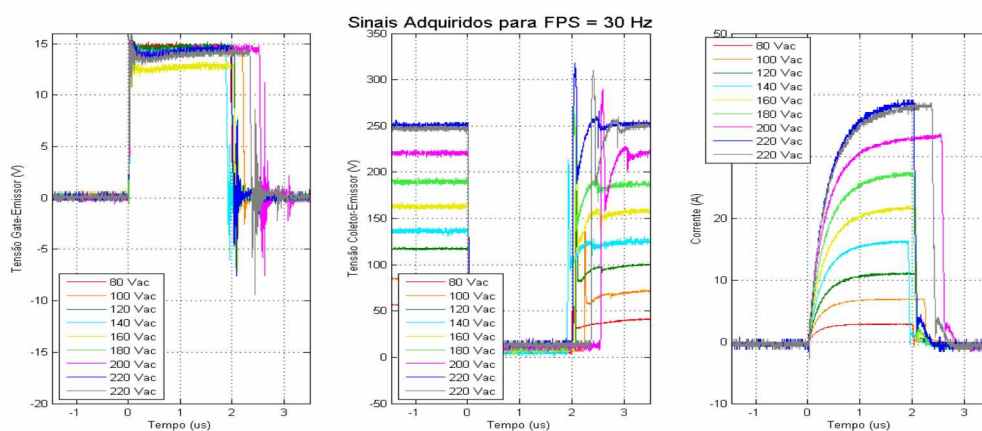


Figura 5.19 – Principais formas de onda de topologia de pulso quadrado com 19 diodos laser em série com entrada de tensão controlada por Varivolt.

Tabela 5.4 – Cálculo dos principais valores elétricos da topologia de pulso quadrado.

FPS (Hz)	Vac (V)	Vce (V)	Vge (V)	Idl (A)	tpulso (us)	Duty Cycle (%)	Ief (A)
30	80	56.67	14.66	2.90	2.02	0.0061	0.02
30	100	84.81	14.23	6.96	2.24	0.0067	0.05
30	120	117.09	14.59	11.30	2.08	0.0062	0.08
30	140	136.33	14.27	16.40	1.93	0.0058	0.11
30	160	163.04	12.70	22.00	2.08	0.0062	0.15
30	180	189.87	13.99	27.60	2.00	0.0060	0.18
30	200	220.48	14.24	33.80	2.57	0.0077	0.26
30	220	247.28	13.86	38.80	2.39	0.0072	0.28
30	220	250.93	14.21	39.20	2.04	0.0061	0.26

Portanto, a topologia final de pulso quadrado com o uso de 19 diodos laser em série, quando ligado na tensão da rede de 220 V apresenta uma corrente de aproximadamente 39 A com um pulso de duração, em média de 2,2  $\mu$ s, condizente com o esperado em simulação. As principais formas de onda composição final da topologia são mostradas na Figura 5.20.

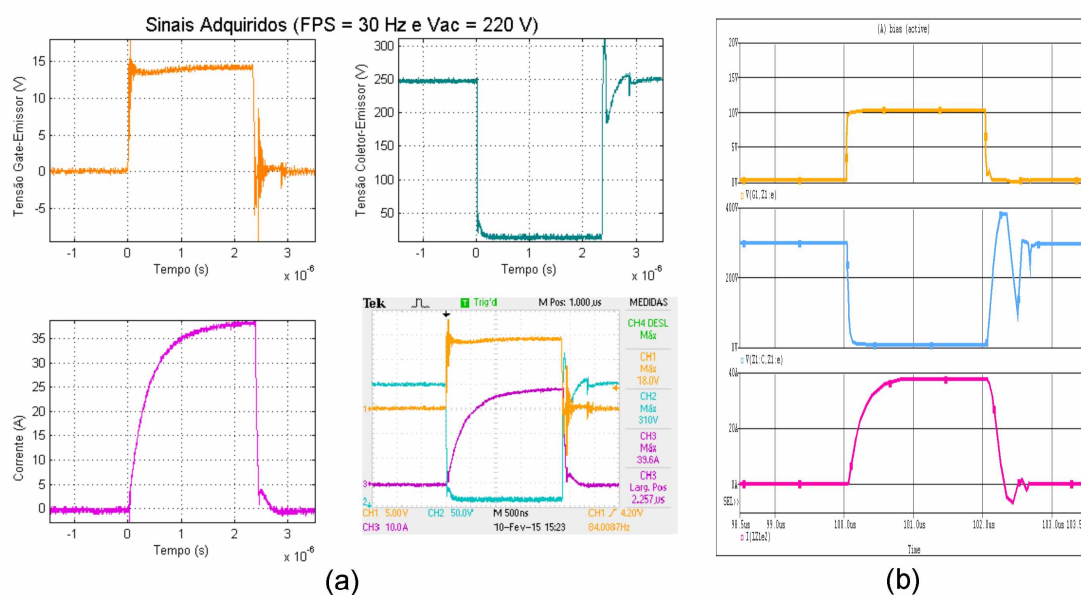


Figura 5.20 – Principais formas de onda de topologia de pulso quadrado com 19 diodos laser em série: (a) teste de bancada e (b) simulação.

A tensão gate-emissor da chave IGBT tem um valor médio adequado ( $\sim 14$  V) para o chaveamento e não ultrapassa valores que colocariam em risco a integridade do componente. A tensão coletor-emissor média (250 V) e máxima (300 V) estão em níveis muito abaixo do suportado pelo IGBT, garantindo um funcionamento sem inconvenientes. O momento de saída de condução provoca estresse e ruído sobre a chave, porém este não é suficiente para denegrir o funcionamento do circuito, não sendo observados acionamentos

além do previsto ou qualquer aquecimento dos semicondutores. A forma de onda da corrente tem um formato arredondado devido à natureza tardia de chaveamento do IGBT, porém esta se mostra com um bom valor de máximo e sem nenhum comportamento que possa se tornar prejudicial ao diodo laser.

Acredita-se, portanto, que a topologia de acionamento dos diodos laser de alta potência aqui apresenta é responsável pela obtenção da energia luminosa máxima possível, quando se utiliza 19 diodos laser em série, tempo de acionamento de 2  $\mu$ s e a câmera com tempo de abertura de 1,25  $\mu$ s. O aumento da luminosidade, a partir deste ponto, se daria apenas por modificações extremas como o uso de um maior número de diodos laser, aumento da tensão de entrada por um conversor CC-CC, ou a transmissão da energia luminosa de forma mais eficiente, seja por um sistema ótico otimizado ou utilização de meios de transmissão da luz com menores perdas, como as fibras óticas.

#### 5.1.2 *ViaSolda – Alta Frequência*

A demanda por estudos visuais do comportamento da poça fundida (e seus arredores) em outros projetos em desenvolvimento no laboratório como, por exemplo, o estudo da transferência metálica sem o uso de projeção de sombras ou em soldagem com comprimento de arco muito pequenos, ou o estudo da variação de parâmetros de solda durante o tecimento, entre outros, trouxe a tona uma nova necessidade de melhoria do sistema de visão: filmagens em alta velocidade.

Mesmo que, pelo escopo deste trabalho, a filmagem em alta velocidade não seja uma ferramenta necessária (afinal, o auxílio visual não teria eficácia alguma acima de 60 Hz), a utilização do auxílio visual como instrumento de estudo dos processos de soldagem ainda tem seu apelo tecnológico e, com toda certeza, é um próximo passo para o desenvolvimento dos sistemas de visão com uso de diodos laser (substituindo os lasers convencionais).

Como objetivo final desta etapa, tem-se a determinação da viabilidade do uso do sistema de visão ViaSolda para o uso de filmagens em alta velocidade definindo, ao longo de sua execução, seus limites de uso e aplicabilidades em estudos de processos de soldagem. Determinou-se como intenção o auxílio visual no estudo do comportamento da poça fundida em taxas de 1000 quadros por segundo.

Algumas considerações podem ser prontamente apontadas a partir do objetivo estabelecido e segue uma descrição sucinta destas:

- O diodo laser de alta potência é o fator limitante do uso de alta frequência de acionamento, pelo seu pequeno fator de trabalho (0,01%) e tempo de pulso (100 ns). Considerando-se os parâmetros recomendados pelo fabricante

( $I_{pico} = 40 \text{ A}$ ,  $t_{pulso} = 100 \text{ ns}$  e  $f = 1000 \text{ Hz}$ ), pode-se estabelecer um “acionamento limite” destes componentes com uma corrente eficaz de  $I_{ef} = 0,4 \text{ A}$  (Tabela 5.5) e um ciclo de trabalho de 0,01%.

- A topologia atual, de pulso quadrado em 30 Hz, respeita ambas as características do diodo laser, apesar de extrapolar (e muito) ao tempo de pulso. Acredita-se que, desta forma, a integridade da junção PN do diodo laser foi mantida e sua vida útil, se deteriorada, com efeito desprezível sobre a eficiência de iluminação.
- O aumento da frequência de acionamento, mantendo-se todas as outras características da topologia de pulso quadrado, gera, portanto, um aumento do ciclo de trabalho e da corrente eficaz passante sobre e os semicondutores. Portanto, segue aqui questionamentos importantes: deve-se respeitar, prioritariamente, o ciclo de trabalho ou a corrente eficaz sobre os diodos laser? E, ainda, o uso da alta frequência, sem respeito aos limites do semiconductor vai gerar que tipo de deterioração: queima, aquecimento (temporários) ou perda de vida útil?

A Tabela 5.5 resume os cálculos para diferentes situações de acionamento em alta frequência. As primeiras linhas indicam o cálculo para o sistema atual em diferentes frequências as linhas seguintes indicam a corrente máxima sobre os diodos laser respeitando a corrente eficaz. Observa-se que, para o respeito à corrente eficaz ao ciclo de trabalho, tem-se uma limitação máxima de 50 Hz com corrente de pico de 40 A e, mesmo apenas com uma queda substantiva da corrente pode-se chegar a valores acima dos 100 Hz (Figura 2.21).

Tabela 5.5 – Cálculos de características do diodo laser para diferentes situações.

Corrente de Pico (A)	Tempo de pulso ( $\mu\text{s}$ )	FPS (Hz)	Corrente Eficaz (A)	Ciclo de Trabalho (%)
40	2,0	100	0.57	0.020
		500	1.26	0.100
		1000	1.79	0.200
		50	0.40	0.013
28,28		100		0.020
12,65		500	0,40	0.100
8,94		1000		0.200

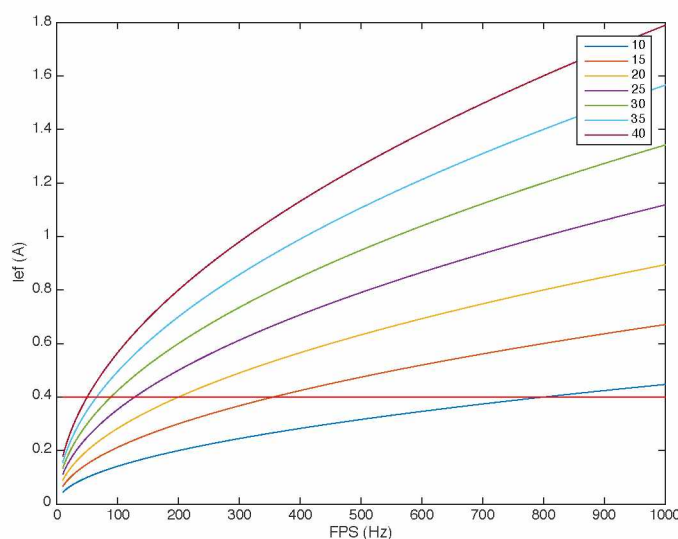


Figura 5.21 - Corrente Eficaz para aumento da frequência de acionamento, para diferentes corrente de pico.

Acredita-se que estas questões podem ser respondidas, com precisão, apenas pelos especialistas de diodos laser de alta potência ou pelo próprio fabricante. Como o comportamento do diodo laser é, neste ponto, desconhecido, a melhor forma de estabelecer seus limites de funcionamento, é, portanto, pelo “bom e velho” teste experimental.

Inicialmente, tem-se necessidade da substituição da câmera SI-M330 por um que responda a altas taxas de quadros. Neste caso, a câmera de alta velocidade também deve ter um tempo de exposição baixo e alguma resposta no infravermelho próximo. Sendo assim, selecionou-se a câmera Hispec 5 Digital Motion Analysis Recorder (Portal Hands: awesome mobile, MACHADO *et al.*, 2010a), já disponível no laboratório, com capacidade de aquisição de até 298 mil quadros por segundo, tempo de exposição mínimo de 2  $\mu$ s, resolução máxima de 1696x1710 pixels e bateria recarregável embutida.

Para trabalhar com a sincronia iluminação/exposição, a câmera HiSpec 5 contém dois conectores: *Sync In* e *Sync Out*. Eles funcionam, similarmente às conexões de *trigger* e *shutter* da câmera SI-M331, ou seja, um sinal enviado ao *sync in* controla o a aquisição de imagens e o sinal de saída *sync out* indica o tempo de exposição. A única diferença está na polaridade do pulso de *shutter* (ou *sync out*): a câmera possui pulso de polaridade positiva (nível alto para exposição) enquanto a câmera anterior, e o sistema de controle, trabalham com polaridade negativa.

Desta forma, inseriu-se uma chave seletora de polaridade que, quando indicada em polaridade positiva, passa o sinal de *shutter* por um circuito lógico inversor (74LS04), como mostra a Figura 5.22.

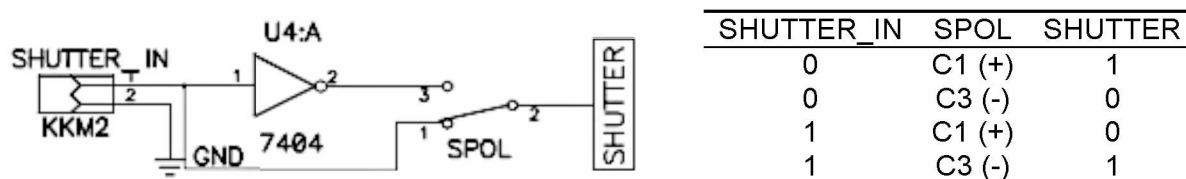


Figura 5.22 – Circuito de seleção de polaridade do *shutter* e sua tabela verdade.

Para possibilitar o aumento da frequência de acionamento dos diodos laser, modificou-se o algoritmo da MCU de controle em, principalmente, dois pontos. O programa principal inicia-se com a demanda de escolha da frequência pelo usuário, pelos botões MAIS e MENOS. Feita esta escolha, o algoritmo calcula o valor inicial da contagem do temporizador Timer 0 e habilita as rotinas de interrupção externa, como mostra a Figura 5.23.

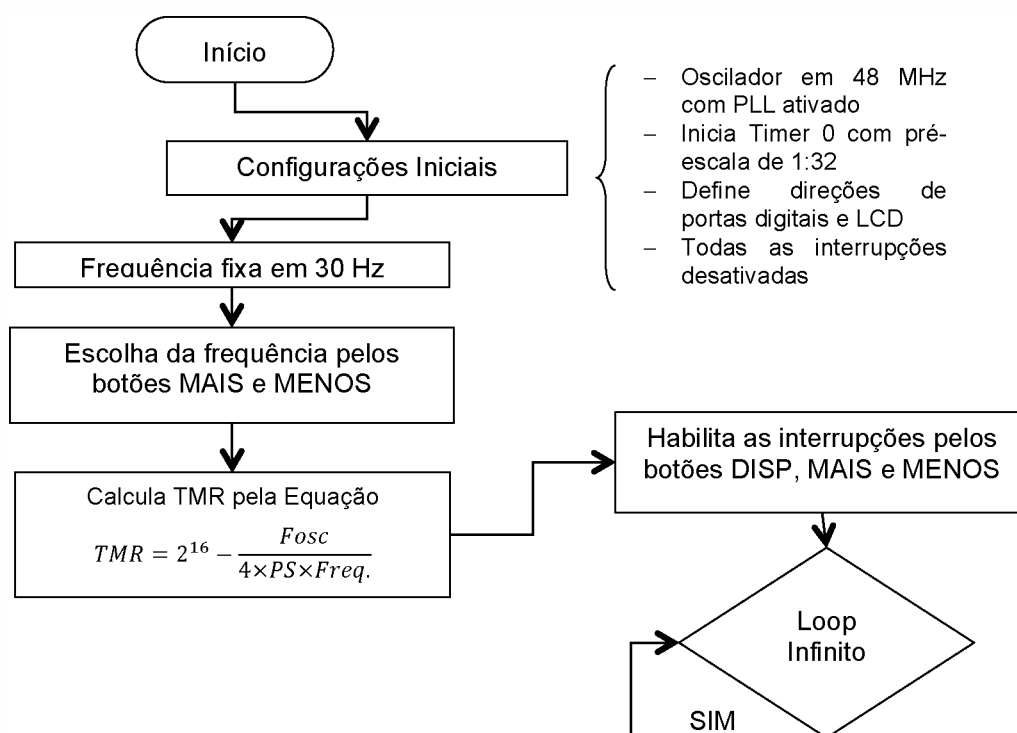


Figura 5.23 – Fluxograma da função principal do algoritmo com FPS variável.

A partir deste ponto, os botões DISP e MAIS, se pressionados, geram as rotinas de interrupção de habilita/desabilita o envio dos pulsos pela interrupção do Timer 0 (ver Figura 5.9 e Figura 5.10) ou habilita/desabilita o envio da FPS fixa em 30 Hz (Figura 5.24), respectivamente. A nova rotina de interrupção pelo botão MAIS possibilita ao usuário utilizar uma menor frequência de acionamento dos diodos (menor estresse do sistema) em tarefas de alinhamento e montagem.

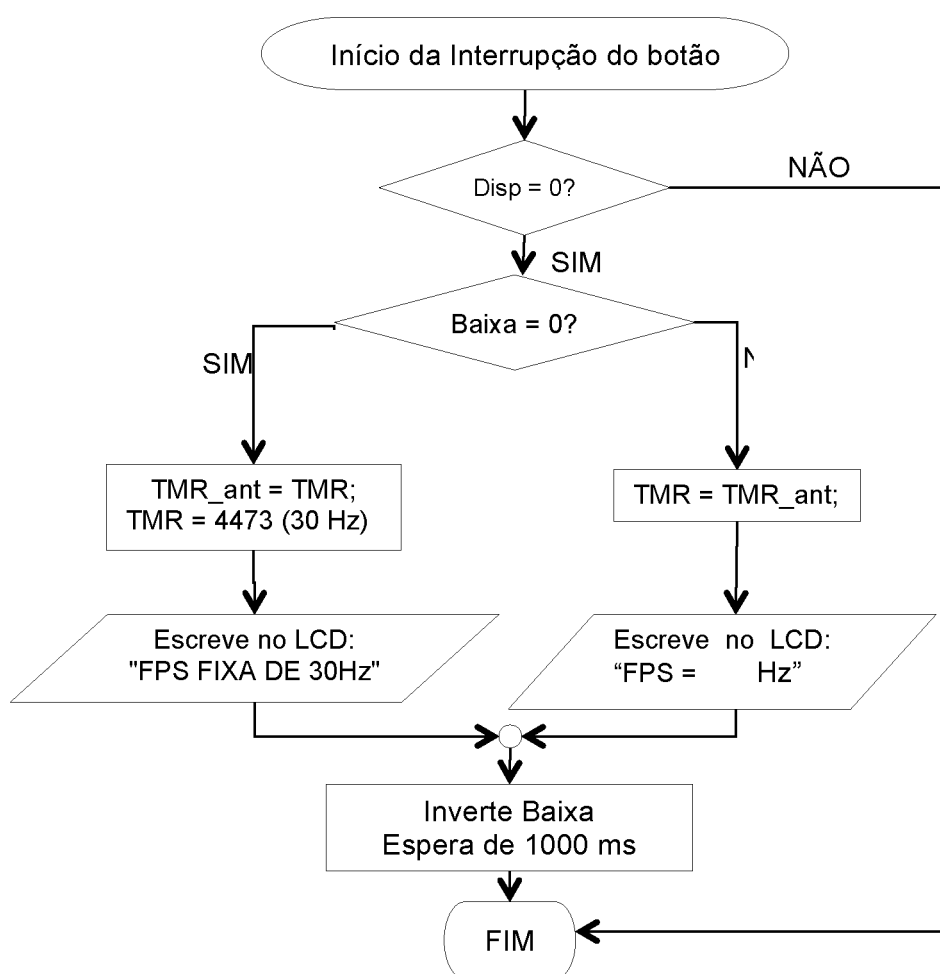


Figura 5.24 – Fluxograma de interrupção do botão MAIS algoritmo com FPS variável.

O aumento da frequência gera consequências negativas também no circuito de potência e no circuito de controle da chave. Após exaustivos testes de bancada, algumas modificações no circuito foram necessárias para adequação e melhor funcionamento do sistema em altas taxas de chaveamento, principalmente envolvendo trocas de elementos resistivos e capacitivos, inserção de proteção em diodo de rola livre, entre outros. O circuito final utilizado na topologia de alta frequência foi apresentado na Figura 5.3.

Para os testes do circuito modificado em bancada, os diodos laser foram retirados e curto-circuitados. Utilizou-se de um *varivolt* na entrada de tensão AC do circuito para limitação da tensão de entrada e, em consequência, da corrente em simulação da queda de tensão gerada pelos diodos laser. A tensão máxima de entrada foi, portanto, de 100 Vac e variou-se a frequência de 30 a 1000 Hz. Os sinais elétricos do circuito foram adquiridos por um osciloscópio isolado de modelo TP2004 com ponteira de corrente DC e a temperatura do circuito aferida por um pirômetro com câmera térmica.

A Figura 5.25 mostra os sinais adquiridos na situação com máxima tensão de entrada e seus extremos de frequência: para a chave Tensão *Gate-emissor* e *coletor*-



*emissor* e corrente circulante. A imagem trata-se da tela do osciloscópio no momento da aquisição.

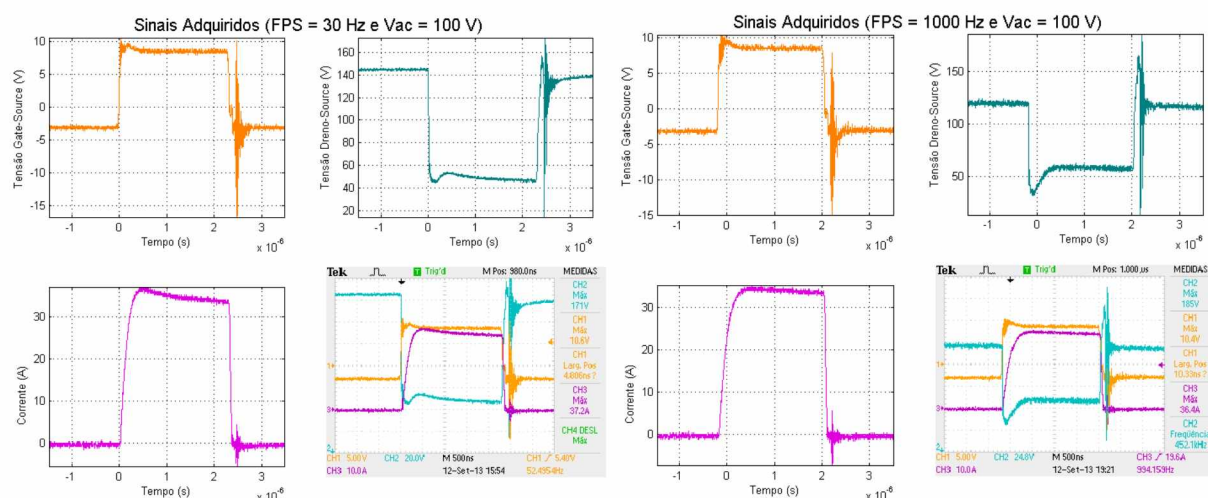


Figura 5.25 – Sinais adquiridos para tensão máxima em 30 e 1000 Hz.

Observa-se que ambas as situações apresentam comportamento de entrada e saída de comutação semelhantes, provando que a topologia é capaz de suportar chaveamentos em maiores frequências. A frequência máxima ocasionou em um aumento do “ruído” sobre o *gate* da chave principalmente durante a saída de comutação, indicando maior *stress* do circuito de controle para manter a tensão negativa sobre a chave, e um maior pico de tensão direta sobre a chave. A corrente apresenta comportamento semelhante.

Sabendo-se que, na verdade, o diodo laser será o componente restritivo da frequência de acionamento da topologia, deve-se portanto, determinar seus limites de funcionamento. Inicialmente, propõe-se um teste de *burn out*, ou teste de queima do componente por estresse. A ideia deste experimento é determinar qual é a frequência máxima nos requisitos de funcionamento nominal da topologia que o diodo laser suporta sem que haja queima.

Para isto, utilizou-se o varivolt para limitar a tensão alternada de entrada e, conseqüentemente, a corrente passante por um diodo laser. Com o auxílio da câmera de alta velocidade, colocada em frente ao diodo, do osciloscópio medindo as principais formas de onda do circuito, acionou-se o diodo laser com a corrente nominal, 39 A, durante um (1) minuto com frequências crescentes de 30 a 1000 Hz. O perfil de intensidade luminosa do diodo foi capturado utilizando-se de um programa de captura de imagens, selecionado para tirar uma foto no início e ao final de 60 segundos. Um intervalo entre testes permite que o diodo laser volte a sua eficiência de emissão mesmo se houver aquecimento da junção PN por efeito joule.



Exemplos das imagens finais obtidas estão ilustradas na Figura 5.26. O teste inicial provou que o diodo laser, apesar de apresentar queda substancial de sua intensidade luminosa com o aumento da frequência (provavelmente em detrimento do aquecimento gerado em sua junção PN), principalmente a partir de 400 Hz, não sofreu queima sob estresse mesmo com a frequência de acionamento mais alta.

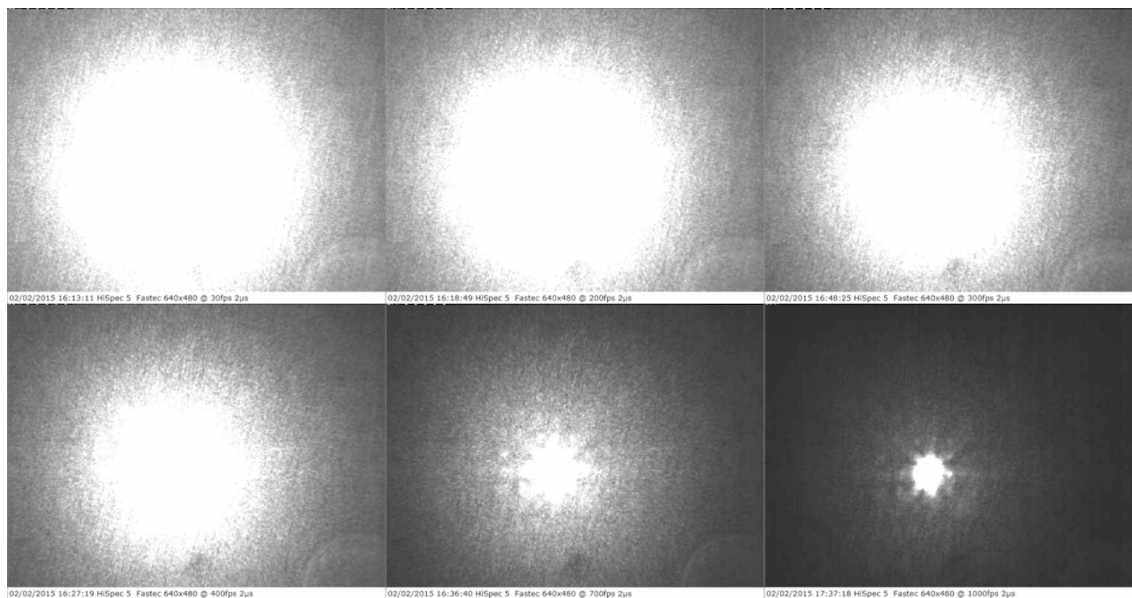


Figura 5.26 – Perfil de intensidade luminosa do diodo laser em testes de *burn out*: 30, 200, 300, 400, 700 e 1000 Hz.

Para entender melhor como o diodo laser perde sua intensidade luminosa ao longo do tempo, e determinar o quanto dessa queda de emissão é substancial em termos de densidade luminosa (capacidade de iluminação da junta), o diodo laser foi novamente submetido a um teste de um minuto sob as condições nominais e seu perfil luminoso, assim como suas principais formas de onda, foram adquiridos. O perfil luminoso foi obtido a cada 1 segundo durante os mesmos 60 segundos de teste, novamente variando a frequência de 30 a 1000 Hz.

Para quantificar a queda de densidade luminosa, um algoritmo no MATLAB, foi criado para o tratamento das imagens de perfil de intensidade luminosa. Para possibilitar uma comparação simples, o algoritmo considera todos os pixels acima de 70% do nível máximo de branco como *threshold* e faz o somatório destes. Quando mais pixels claros, maior é a área de emissão do diodo laser e, também, maior é a sua intensidade luminosa. A Figura 5.27 resume os perfis de densidade de luz. Todos os resultados foram colocados relativo ao valor obtido com a primeira imagem de cada frequência.

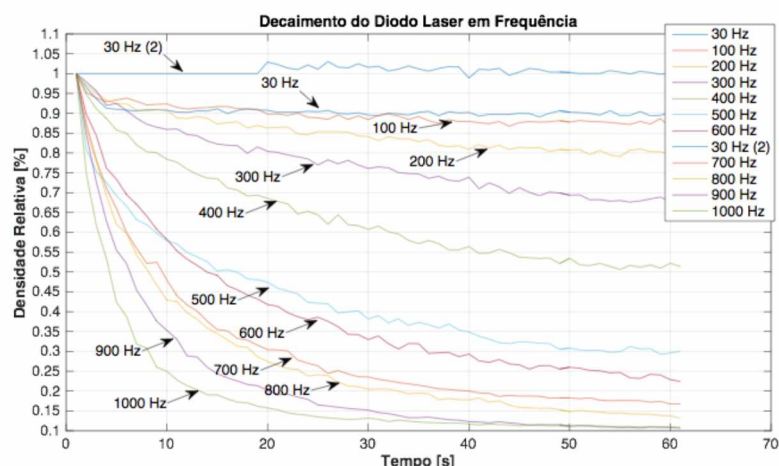


Figura 5.27 - Resultados dos testes de levantamento do perfil luminoso ao longo do tempo.

Como se era esperado, pelo teste de *burn out* anterior, a área de iluminação do diodo laser tem um queda considerável a partir de 400 Hz, com perda de 40% dentro de um minuto de acionamento, chegando a perdas de 90% para a frequência de 1000 Hz. Desta forma, frequências acima de 400 Hz já podem ser descartadas como viáveis para o uso do diodo laser. Já as frequências imediatamente abaixo, 200 e 300 Hz, apresentam perdas relativamente pequenas, de 20 a 30% e, observando-se ambos os testes em detalhe (Figura 5.28), é possível concluir que ambas as frequências tem resultados promissores para determinar o limite de funcionamento do diodo laser.

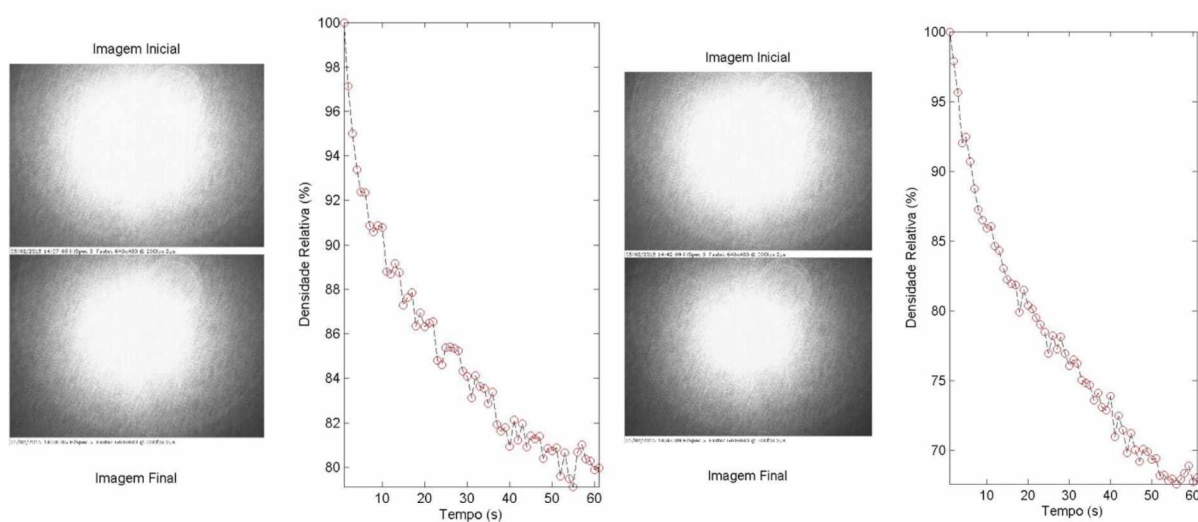


Figura 5.28 - Evolução do perfil de intensidade luminosa em teste para 200 (esquerda) e 300 (direita) Hz.

Apesar de, claramente, a frequência de acionamento de 200 Hz possuir um perfil de intensidade luminosa mais uniforme ao longo do tempo, há um aspecto atrativo em se

conseguir acionar os diodos laser em 300 Hz. Além do aumento em frequência de observação em dez vezes, seguindo a teoria de Nyquist (OGATA, 2002), uma aquisição de imagens em 300 Hz seria capaz de observar fenômenos de até 150 Hz, o que incluiria boa parte dos fenômenos envolvidos na soldagem, incluindo a maioria das transferências metálicas por curto circuito, que não ultrapassa valores de 200 Hz (Artliber, SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Sendo assim, o diodo laser foi submetido a um último teste para determinação de sua frequência limite entre 200 e 300 Hz: o teste de *stress*. Utilizando-se da mesma metodologia apresentada, acionou-se o diodo laser por um tempo de 30 minutos ininterruptamente, com obtenção do perfil de intensidade luminosa a cada 20 segundos. As Figura 5.29 e Figura 5.30 mostram o resultado destes testes.

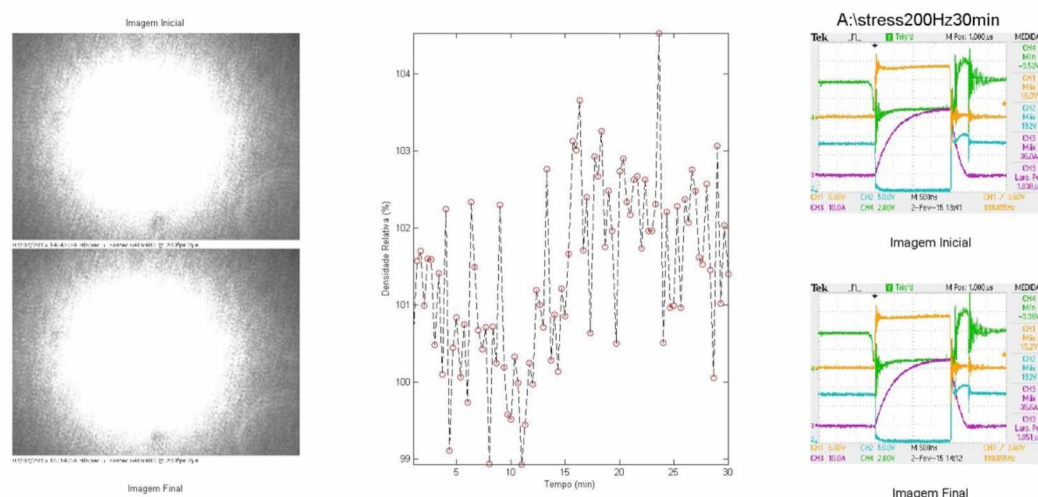


Figura 5.29 - Teste de stress para 200 Hz: imagens inicial e final (esquerda), perfil de luminosidade (centro) e sinais elétricos inicial e final (direita).

No teste de longa duração em 200 Hz, o diodo laser apresenta um comportamento inicial de queda da intensidade luminosa. Porém, essa queda é drasticamente extinta após um intervalo de tempo, voltando o perfil luminoso ao próximo do início do acionamento. Desta forma, pode-se concluir que uma frequência de acionamento em 200 pode ser utilizada sem deterioração da capacidade luminosa do sistema de visão. Já no teste de longa duração em 300 Hz, o diodo laser possui um comportamento esperado de queda contínua da capacidade luminosa, ao longo do tempo. Porém, pode-se considerar que é uma queda branda, não ultrapassando o valor de 30% mesmo após 30 minutos de duração.

Considerando que um tempo de 30 minutos com o sistema ligado em total funcionamento, devido a natureza de proteção dos diodos laser (necessidade de cuidado

como uso de EPI, é muito superior ao esperado de utilização do sistema, pode-se concluir que a frequência de 300 Hz é o limite de utilização do ViaSolda para altas velocidades.

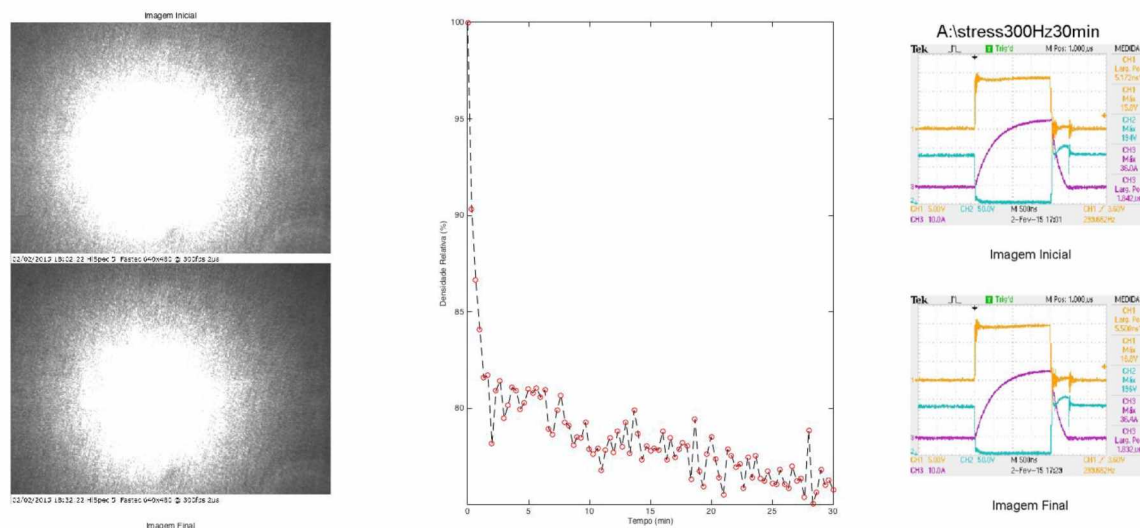


Figura 5.30 - Teste de stress para 300 Hz: imagens inicial e final (esquerda), perfil de luminosidade (centro) e sinais elétricos inicial e final (direita).

Por fim, a topologia original foi retomada, com inserção do conjunto de 19 diodos laser para um último teste de bancada. As principais formas de onda foram adquiridas com o aumento da frequência e com o sistema ligado na tensão de entrada da rede. Os resultados, ilustrados na Figura 5.31 e Tabela 5.6 mostram que o sistema de visão, do ponto de vista elétrico, se comporta de forma uniforme e robusta mesmo com as frequências mais altas.

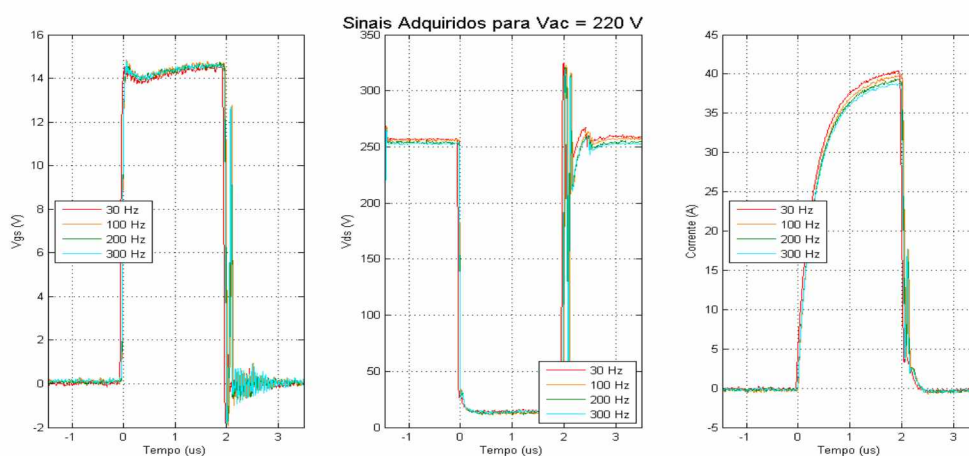


Figura 5.31 - Principais formas de onda para 19 diodos laser com variação de FPS.



Tabela 5.6 – Resultados de valores elétricos para um diodo laser com variação de FPS.

FPS (Hz)	Vac (V)	Vce (V)	Vge (V)	Idl (A)	tpulso (us)	Duty Cycle (%)	Ief (A)
30	220	247.17	14.24	40.80	2.04	0.0061	0.27
100	220	252.05	14.40	40.80	2.08	0.0208	0.49
200	220	249.59	14.36	40.00	2.04	0.0408	0.68
300	220	248.48	14.38	40.00	2.04	0.0613	0.82

### 5.1.3 ViaSolda – Fibra Óptica

A fim de aumentar a densidade luminosa da luz proveniente dos diodos laser e, por consequência, a capacidade de sobreposição do arco do ViaSolda, propõe-se um novo sistema de visão, com duas características específicas: a utilização de um número maior de diodos laser e a transmissão de sua luz no infravermelho próximo através de uma fibra óptica.

O uso de uma fibra óptica para a transmissão da luz permite duas vantagens distintas e igualmente importantes. A primeira delas é a flexibilização da fonte de iluminação para adaptação em sistemas móveis (como máquinas de soldagens automatizadas em tubulações), o que é certamente dificultado com o uso do sistema óptico atual. A segunda vantagem é a garantia de aumento da densidade luminosa da iluminação no infravermelho próximo, onde há a diminuição da área de iluminação no plano de interesse simultaneamente a um aumento da capacidade de emissores de luz em número.

O aumento do número de diodos laser é, por consequência, também um aumento da intensidade luminosa gerada pelo sistema de visão (considerando uma mesma passagem de corrente). Levando-se em consideração uma área de iluminação de aproximadamente 1" de diâmetro e o uso de fibra óptica, pretende-se criar o sistema guiado sem fio com 50 diodos laser para obtenção de um “canhão” de luz, como segue ilustrado na Figura 5.32.

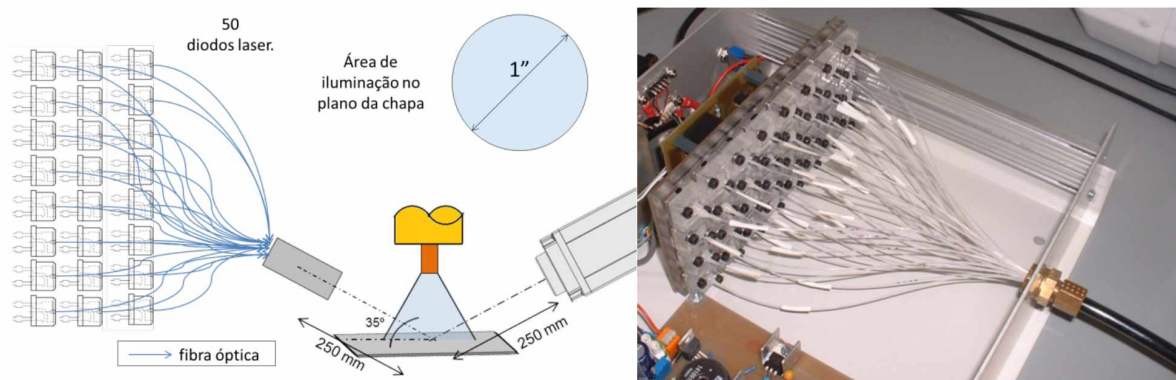


Figura 5.32 – Esquema de proposição de sistema com 50 diodos laser e fibra óptica (esquerda) e *benchmarking* (direita – Univ. de Liverpool).

Nesta proposição de sistema, cada diodo laser é faceado (frente a frente) com a entrada de um cabo de fibra óptica e esta, em conjunto com as outras, convergem para uma única saída de luz. Anteriormente ao projeto da fibra óptica, porém, era necessário ter em mãos características dimensionais da emissão de luz do diodo laser, afinal o alinhamento entre a junção emissora e a entrada da fibra óptica é essencial para a eficiência de transmissão de luz.

Desta forma, o diodo laser e, especificamente, a posição de sua junção emissora de luz, foram medidos através de um microscópio óptico, como mostra a Figura 5.33.

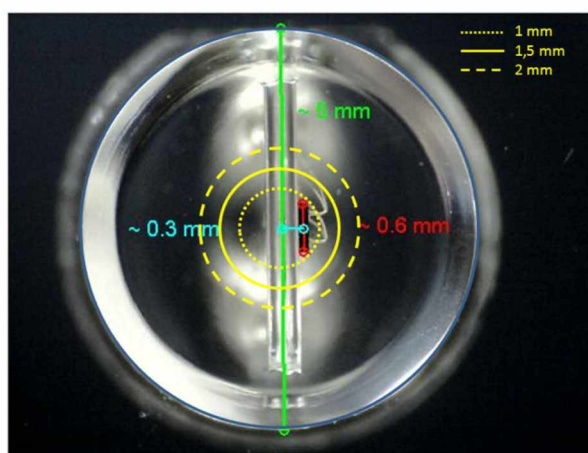


Figura 5.33 – Medidas do diodo laser obtidas em microscópio e proposição de alinhamento com fibras ópticas de diferentes diâmetros.

Determinou-se que a junção emissora tem um corpo esbelto de aproximadamente 0,6 mm com excentricidade em seu posicionamento em relação ao centro do encapsulamento do diodo de aproximadamente 0,3 mm. Para um bom aproveitamento do feixe de luz do diodo laser e, considerando pequenos erros de desalinhamento na construção da estrutura de união diodo laser/fibra óptica, considera-se uma fibra óptica de diâmetro de 1,5 mm ideal para o projeto.

Sendo assim, construiu-se um cabo de fibra óptica (Figura 5.34) com a seguinte descrição: “cabo de fibra óptica revestido de proteção em PVC (policloreto de polivinila) na cor verde, formado por 25 (vinte e cinco) pares medindo dois metros de comprimento cada um. Cada cabo possui em sua extremidade de interação com o lado diodos laser um tubo de aço inoxidável de 20 mm de comprimento por 1,5 mm de diâmetro interno e 2,5 mm de diâmetro externo. No lado de interação com o arco, os 25 (vinte e cinco) pares convergem para um terminal confeccionado em aço inoxidável, medindo 20 mm de comprimento por 11,5 mm de diâmetro interno e 12,7 mm externo”.



Figura 5.34 – Imagens da fibra óptica construída para o ViaSolda: lado diodos laser (esquerda) e lado soldagem (direita)

Ainda, para se obter um melhor aproveitamento da fibra óptica, é necessário o conhecimento da localização de cada extremidade de entrada da fonte de luz no lado dos diodos laser em sua convecção na extremidade de soldagem. Com este tipo de informação pode-se, por exemplo, distribuir a intensidade luminosa de forma proporcional sobre a área de iluminação (caso seja diferente para os conjuntos de diodos laser).

Para isto, utilizou-se de uma câmera alinhada com o lado de soldagem e iluminou-se, com uma fonte de luz visível, cada uma das entradas dos diodos laser (que foram, previamente, numeradas com anilhas numéricas de 1 a 50). Através do conjunto de imagens obtidas e de um algoritmo de processamento destas (que pode ser visto no APÊNDICE VIII) criou-se um mapeamento das fibras no lado da soldagem, como é mostrado na Figura 5.35(a).

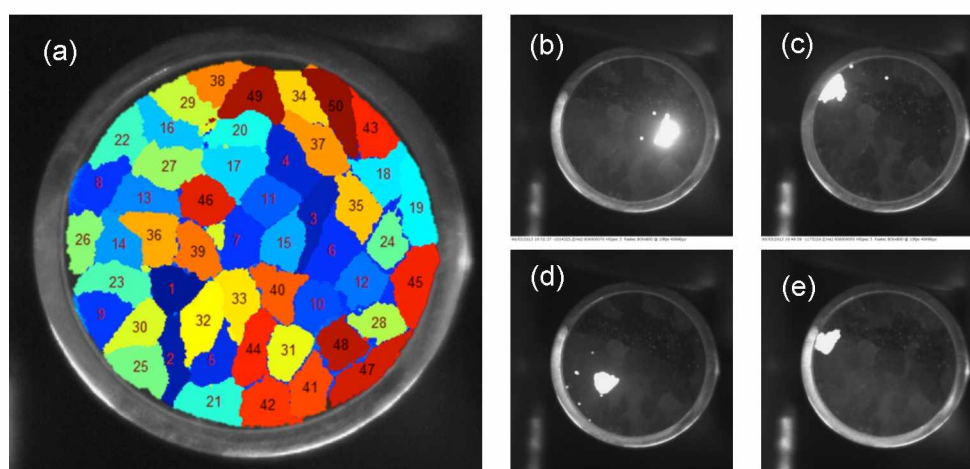


Figura 5.35 – Mapeamento final das fibras no lado da soldagem (a) e exemplo de imagens utilizadas no processamento (b, c, d, e).



Com o intuito de possibilitar o uso da fibra óptica com o protótipo de pulso quadrado de 19 diodos laser, para testes de aumento da densidade luminosa e aferição da eficiência desta, projetou-se um adaptador, de formato cilíndrico, que possui de um lado, furos de diâmetro e comprimento para encaixe na PCB dos diodos laser (5 e 4 mm respectivamente) e, na outra extremidade, furos passantes centralizados com os diodos laser com diâmetro e comprimento para encaixe da fibra óptica com interferência. A Figura 5.36 ilustra o projeto do componente em SolidWorks e sua fabricação foi através de prototipagem rápida em impressora 3D, com ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) como material.

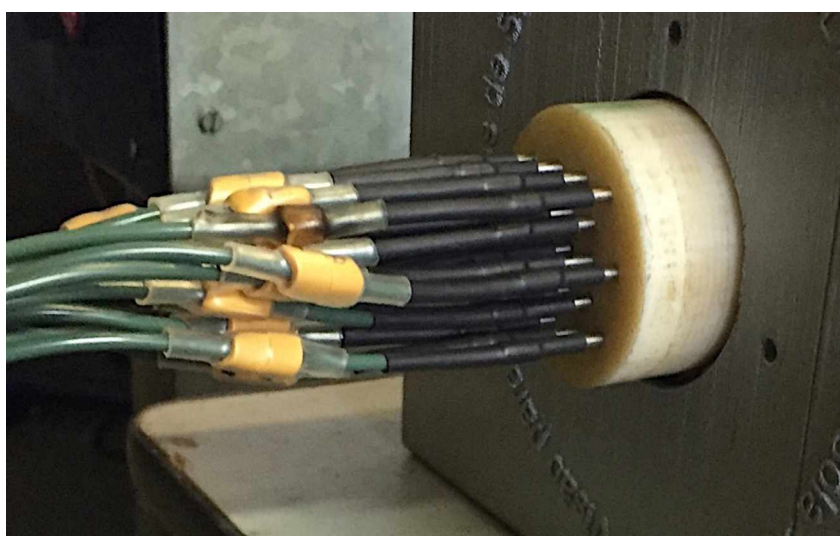


Figura 5.36 - Adaptador em ABS 19 Diodos Laser/Fibra Óptica

Para a extremidade da soldagem, fabricaram-se duas peças distintas: um adaptador para fixar a fibra óptica no suporte de braço telescópico e permitir o uso do sistema de lentes desenvolvido para focalização da fonte de luz sobre a região de interesse (MOTA, 2011) - Figura 5.37, e adaptador para fixar a fibra óptica no suporte de braço telescópico, utilizado para alinhamentos do sistema de visão em validações - Figura 5.38. Ambos foram fabricados em alumínio, para reduzir o peso do conjunto sobre o braço telescópico.

Por fim, testes experimentais utilizando-se o protótipo de 19 diodos laser e a fibra óptica foram realizados. Determinou-se, através de montagem em bancada de validação em soldagem e projeção da luz da fibra óptica sobre uma chapa escovada (similar ao utilizado nas validações), que o uso da fibra em conjunto com um lente convergente (distância focal de 250 mm) resulta na maior concentração luminosa possível, dentro dos recursos já encontrados em laboratório.



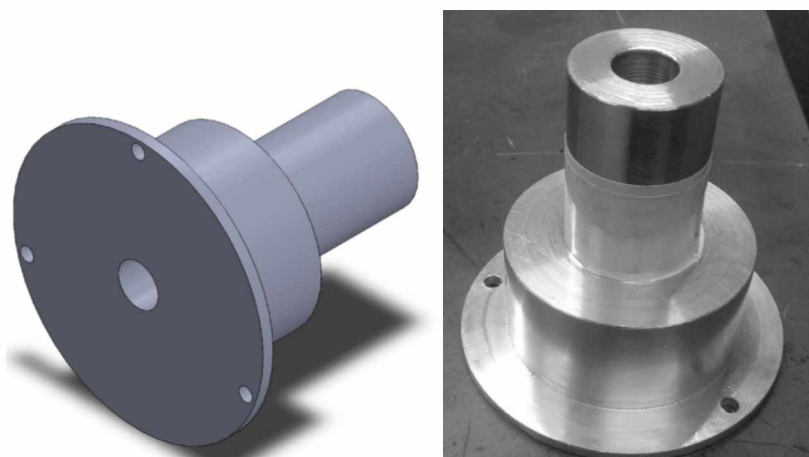


Figura 5.37 – Suporte para adaptação da fibra óptica em conjunto de lentes e suporte de braço telescópico: projeto (esquerda) e fabricação em alumínio (direita).

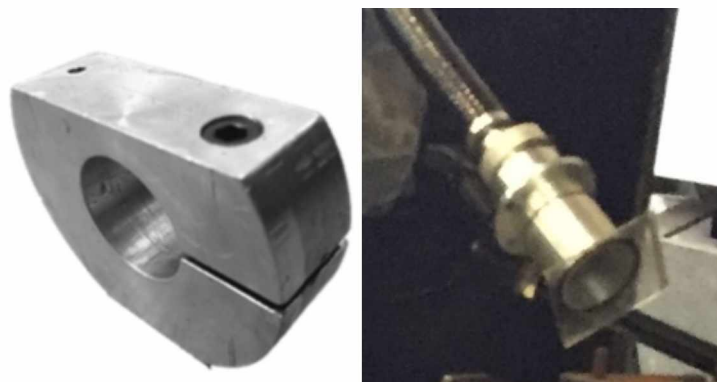


Figura 5.38 - Suporte fibra óptica/braço telescópico (esquerda) e montagem final (direita);

Deve-se ressaltar que, tanto para o uso da fibra óptica quanto para o uso dos diodos laser, o sistema óptico pode provocar melhorias e prejuízos sobre a densidade e intensidade luminoso projetada sobre a região de interesse, dependendo de seu projeto. Por se tratar de um estudo extenso na área de óptica, resumiu-se em aproveitar da melhor forma os recursos ópticos já existentes, considerando que a melhoria da intensidade luminosa pode ainda ser alcançada com um projeto mais adequado a cada situação de iluminação.

#### 5.1.4 ViaSolda – Protótipo Final

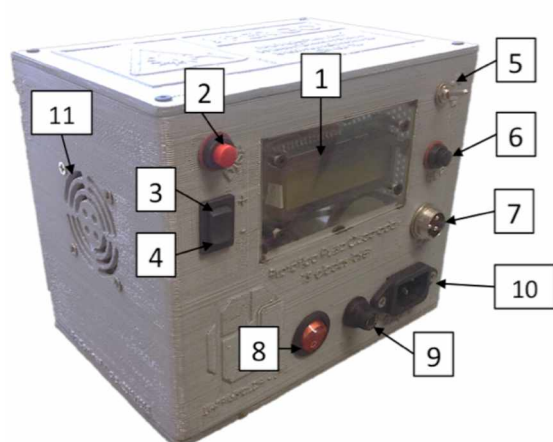
O protótipo final do ViaSolda Pulso Quadrado, como já descrito detalhadamente nos itens anteriores, é constituído de uma topologia de acionamento por pulso quadrado e uso de IGBT, de 19 diodos laser em série, controle através de um MCU PIC18F4553 com interface amigável ao usuário, escolha da FPS, e circuitos auxiliares de adaptação de níveis de tensão, segurança, alimentação, refrigeração e lógica digital de controle.

Para a montagem de todos os componentes eletrônicos inseridos neste protótipo, projetou-se uma carcaça personalizada em ambiente SolidWorks, para fabricação por prototipagem rápida por impressão 3D, considerando a inserção de todos os componentes de interface com o meio externo (plugues de alimentação, conectores, botões, chaves seletoras, cooler de refrigeração, etc.). A Figura 5.39 ilustra a montagem final do protótipo ainda em ambiente de CAD (projeto assistido por computador).



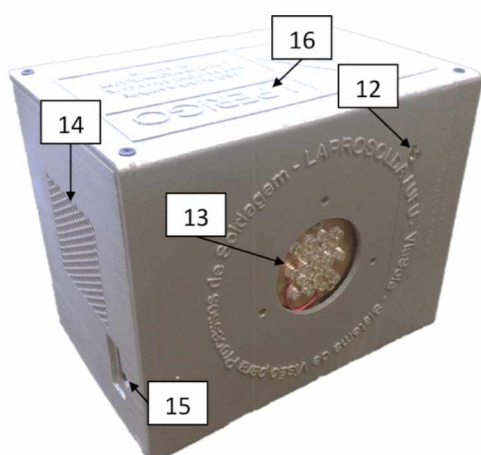
Figura 5.39 - Projeto de caixa em ABS do Protótipo Pulso Quadrado

Imagens reais do protótipo construído, assim como a identificação de todos os componentes externos que o compõem, são mostradas na Figura 5.40 e Figura 5.41.



1. LCD – Display de Cristal Líquido
2. Botão DISP (disparo)
3. Botão MAIS (+)
4. Botão MENOS (-)
5. Chave Seletora de Polaridade da Câmera
6. Botão RESET
7. Conector CAMERA
8. Botão Liga/Desliga
9. Porta Fusível
10. Entrada de Tensão 220 V
11. Cooler de Refrigeração

Figura 5.40 - Protótipo ViaSolda: vista do painel de controle;



- 12. LED de Segurança
- 13. Conjunto de Diodos Laser
- 14. Entrada de Ar
- 15. Entrada do Programador PiCkit3
- 16. Aviso de Segurança – Classe 3B

Figura 5.41- Protótipo ViaSolda: vista frontal.

O LED (12) e o Aviso de Segurança (16) compõem os itens de segurança ao usuário. Por se tratar de um diodo laser de Classe 3B, deve-se evitar contato visual direto com o feixe de luz. O aviso de segurança encontrado no sistema é uma tradução livre direta do aviso de proteção ilustrado na Figura 5.42. Nele, é impresso a seguinte mensagem: “PERIGO! Radiação Invisível. Evitar contato visual. Laser Semicondutor Classe 3B.”



Figura 5.42 - Aviso de Proteção para o uso de laser Classe 3B.

Para maiores informações sobre o uso do protótipo, elaborou-se um Manual do Usuário, com detalhamento do uso de suportes, montagem do sistema de visão, informações de captura de imagens com diferentes câmeras, e, por fim, um guia passo-a-passo de uso do *software*. Pode-se encontrar o manual completo no APÊNDICE IX.

## 5.2 Validação do Protótipo ViaSolda

Neste item serão descrito os diversos testes em validação em Soldagens realizados com o uso do ViaSolda Pulso Quadrado. A escolha dos processos de soldagem e, por

consequência, dos parâmetros ajustados não seguiram nenhuma metodologia fixa, já que a aplicação de sistemas de visão deve se estender a todos os processos de soldagem a arco.

Cada validação apresentada neste ponto são resposta a demandas de estudo encontradas em laboratório, como a visualização do comportamento das máquinas de soldagem com transferência por curto circuito controlado, ou de tentativas de estimar os limites de utilização do sistema, como testes em baixa e alta velocidade para soldagens com transferência por voo livre.

Deve-se ressaltar que cada item de validação foi realizada em um instante de tempo diferente durante o desenvolvimento do protótipo aqui apresentado, justificando a este respeito, as variações de resultados. As imagens foram obtidas em distintos momentos de níveis de corrente (otimização da topologia), alinhamento entre iluminação e câmera (que influenciam tanto quando a própria eficiência da topologia), placas e programas de captura das imagens.

#### 5.2.1 Soldagens Convencionais - Deposição sobre Chapa

Para a validação inicial do sistema de visão para monitoramento dos processos de soldagem, com topologia de acionamento de diodos laser por pulso quadrado, foram realizadas soldagens TIG e TIG pulsado e MIG/MAG com transferência por curto circuito e globular.

Tanto a iluminação quanto a filmagem, utilizando-se a câmera com baixo tempo de exposição SI-M330, foram realizadas a uma distância de aproximadamente 300 mm da região de interesse (poça fundida e seus arredores), com um ângulo de inclinação em relação ao horizonte de aproximadamente 35°, como pode ser visto na Figura 5.43. Foi utilizada a técnica de iluminação direta, ou seja, a iluminação e filmagem em posições simétricas à região de interesse.

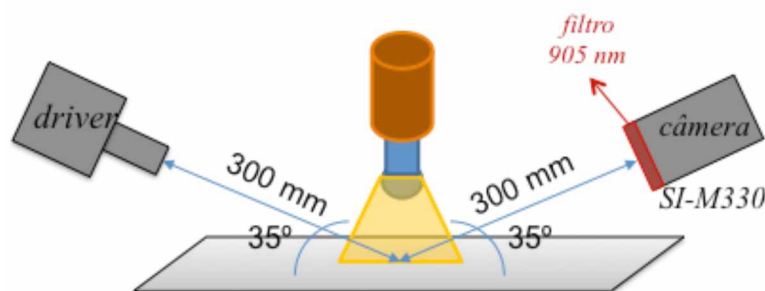


Figura 5.43 – Esquemático de montagem experimental para validação soldagens convencionais com deposição sobre a chapa.

A Tabela 5.8 resume os parâmetros ajustados no ViaSolda (driver de diodos laser e câmera) comuns a todos os testes de validação aqui descritos.

Tabela 5.7 - Parâmetros do ViaSolda comuns a validação de soldagens convencionais com deposição o sobre a chapa.

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Sistema de Visão	Frequência de Acionamento	60	FPS
	Tempo de pulso	1,6	µs
	Tempo de Exposição ( <i>shutter</i> )	1,25	µs
	Seleção de <i>Trigger</i> (SW1-4)	Normal Shutter	
	Acumulo do CCD (SW1-5)	Field Accumulation	
	Correção de Gama (SW1-7)	0.45	

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

- Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
- Câmera Costar SI-M331;
- Mesa movimentadora XZ;
- Fonte Miller PipePro 450 RFC para processo MIG/MAG;
- Arame ER70S6 com diâmetro de 1,2 mm para processo MIG/MAG
- Fonte IMC Digitec 300 para processo TIG e TIG Pulsado;
- Eletrodo EWTh-2 com diâmetro de 2,4 mm para processo TIG e TIG Pulsado;
- Chapas de aço ao carbono lixadas com espessura de ½”.
- Óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.

#### 5.2.1.1 TIG e TIG Pulsado

Os parâmetros ajustados e medidos para o processo de soldagem TIG e TIG pulsado são listados na Tabela 5.8.

Exemplos dos quadros obtidos durante o uso do sistema de visão na soldagem TIG e TIG pulsado são mostrados na Figura 5.44. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do eletrodo de 2,4 mm e deve-se considerar a utilização de intensidades de corrente de 100 a 250 A. Cada quadro foi retirado de uma soldagem diferente, com variação na intensidade de corrente, DEP, tensão e diâmetro da abertura mecânica do diafragma.

Tabela 5.8 - Parâmetros para a validação em soldagens TIG com a câmera SI-M330.

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Soldagem TIG	Gás de Proteção	Ar puro	---
	Velocidade de Alimentação	2	m/min
	Velocidade de Soldagem	20	cm/min
	Corrente	120	A
	Tensão	13,7	V
	DEP (DEP Pulsado)	3 (4 e 5)	mm
	Corrente de Base (pulsado)	100	A
	Corrente de Pico (pulsado)	200	A
	Tempo de Correntes	0,5	s

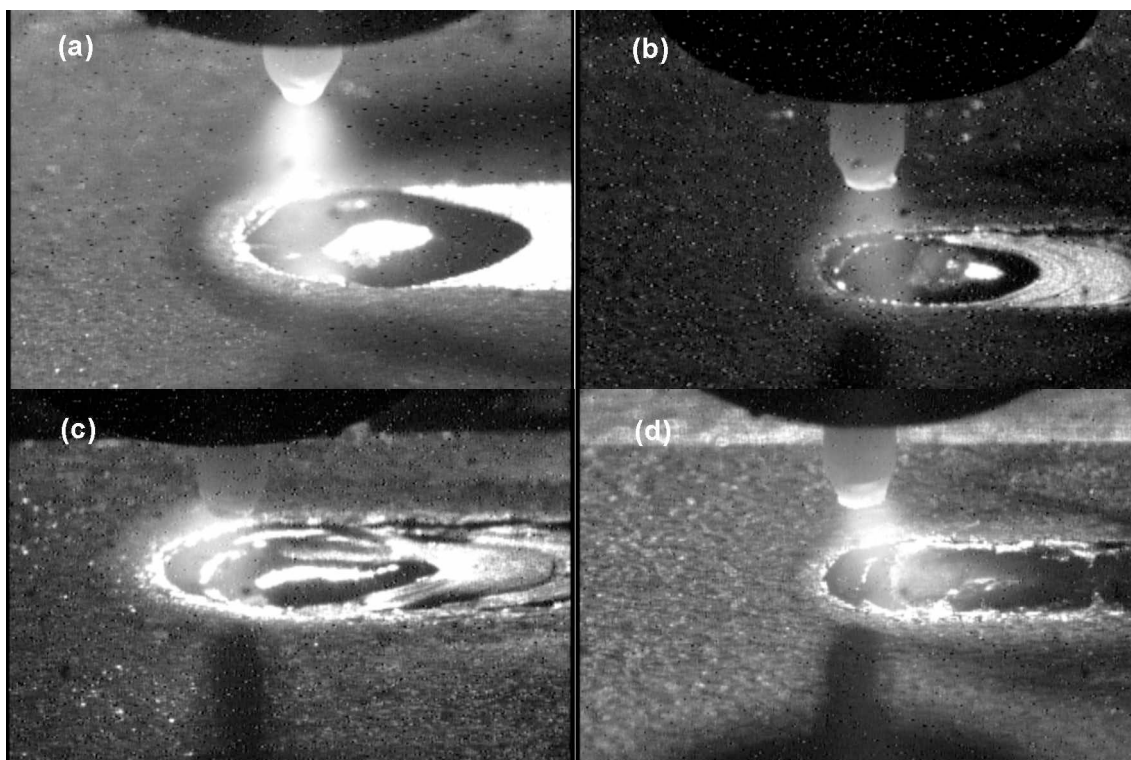


Figura 5.44 - Imagens obtidas pelo “ViaSolda” de pulso quadrado em soldagens TIG (a) e TIG pulsado (b, c, d).

Inicialmente é possível concluir que a luz proveniente do sistema de visão sobrepõe quase que completamente a luminosidade do arco, mesmo quando a abertura mecânica do diafragma está próxima de sua abertura total (Figura 5.44(a)). Com menor entrada de luminosidade (diafragma mais fechado - Figura 5.44 (b) e (c)), ainda é possível visualizar os arredores da poça fundida com pouca ou nenhuma influência da luz do arco, mesmo para intensidades de corrente ao nível de 250 A.

Os quadros apresentam excelente contraste e nitidez, principalmente tratando-se de uma câmera analógica com certa sensibilidade aos ruídos eletromagnéticos provenientes da fonte de soldagem (IMC Digitec 300). A luz proveniente dos diodos laser é tão intensa que, dependendo da concavidade e altura da poça fundida, boa parte da imagem é saturada devido à reflexão direta da superfície fundida espelhada.

Observando-se os quadros obtidos em diferentes instantes de um mesmo vídeo, 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. A sua iluminação provou-se, também, homogênea ao longo da área de projeção da luz no plano da chapa, iluminando perfeitamente a região da junta, da poça fundida, do eletrodo e a chapa ao redor da soldagem. É possível observar que a iluminação extrapola a área de interesse, iluminando também os arredores da chapa e sistema de movimentação.

#### 5.2.1.2 MIG/MAG

Os parâmetros ajustados e medidos para o processo de soldagem MIG/MAG são listados na Tabela 5.8.

Tabela 5.9 - Parâmetros para a validação em soldagens MIG/MAG com a câmera SI-M330.

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Soldagem MIG/MAG	Gás de Proteção	CO <sub>2</sub> Puro/ Ar + 8% CO <sub>2</sub>	
	Velocidade de Alimentação	2/8	m/min
	Velocidade de Soldagem	20/30	cm/min
	Corrente	100/260	A
	Tensão	17,5/28,5	V
	DBCP	12/18	mm

Exemplos dos quadros obtidos durante o uso do sistema de visão na soldagem MIG/MAG são mostrados na Figura 5.45. A título de obtenção de escala, considerar que o diâmetro do arame de 1,2 mm e deve-se considerar a utilização de intensidades de corrente para a obtenção de transferências por curto circuito e globular. Cada quadro foi retirado de uma soldagem diferente, com variação na intensidade de corrente, DBCP, tensão e diâmetro da abertura mecânica do diafragma.



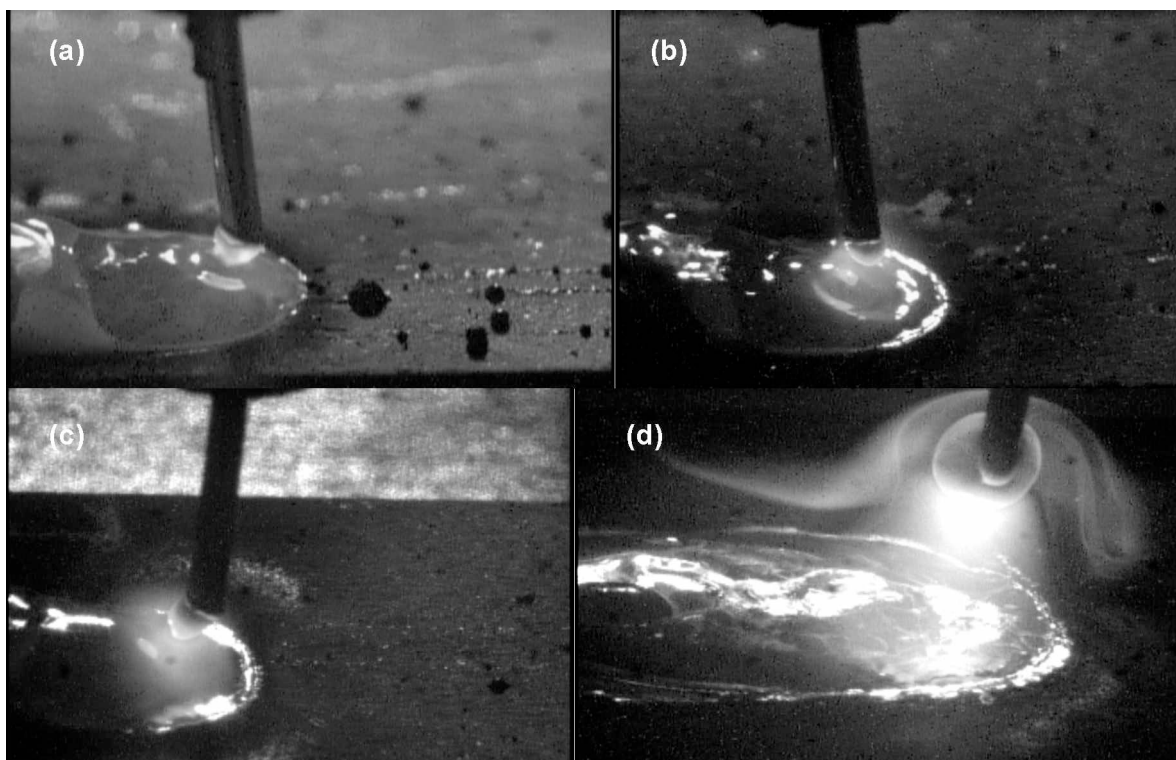


Figura 5.45 - Imagens obtidas pelo sistema de visão “Viasolda” de pulso quadrado em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (a, b, c) e globular (d).

Inicialmente é possível concluir que a luz proveniente do sistema de visão sobrepõe boa parte da luminosidade do arco voltaico, mesmo na transferência globular (maior corrente) ou quando a abertura mecânica do diafragma está próxima de sua abertura total. Para a transferência por curto circuito, nos momentos de extinção do arco ou antecedentes a ele (menor corrente) a iluminação do sistema de visão provém imagens com alta qualidade, sendo possível discernir detalhes da superfície da poça, da gota em transferência e mesmo da chapa (ou junta, caso houvesse). Para a transferência globular, mesmo que haja luz do arco presente na imagem, ainda é possível observar o redor da região de interesse e detalhes como a transferência da gota e a fluidez da poça fundida.

Os quadros apresentam excelente contraste e nitidez, e observou-se que não houve nenhum tipo de influência ruído eletromagnético da fonte de soldagem (Miller PipePro 450 RFC) na sequência de quadros obtidos, resultando em uma imagem (e vídeo) de excelente qualidade. A luz proveniente dos diodos laser é tão intensa que boa parte da imagem é saturada e, em alguns pontos dos vídeos, é possível discernir o próprio conjunto de 19 diodos laser refletidos diretamente na superfície fundida espelhada.

Assim como o observado na soldagem TIG, não há oscilação do perfil de iluminação da área da junta, indicando uma boa sincronização entre a emissão dos pulsos dos diodos laser e a abertura do *shutter* e, sua iluminação provou-se, também, homogênea ao longo da



área de projeção da luz no plano da chapa, iluminando perfeitamente a região da junta, da poça fundida, do eletrodo e a chapa ao redor da soldagem. É possível observar, nestas imagens também, que a iluminação extrapola a área de interesse, iluminando também os arredores da chapa e sistema de movimentação.

### 5.2.2 Soldagens com Transferência por Curto-Circuito Controlado e Convencional

Os processos derivativos MIG/MAG com transferência por curto-circuito são uma resposta à demanda de ganho de produtividade e qualidade no setor de soldagem (COSTA *et al.*, 2012). Definidos pelo controle eletrônico e/ou mecânico da intensidade da corrente durante a transferência metálica, é possível o ajuste da forma de onda da corrente de soldagem em resposta às oscilações do processo (SILVA, 2005), possibilitando a integração das vantagens da transferência metálica por curto-circuito convencional (como o pequeno aporte térmico) com a atenuação de algumas de suas desvantagens (como a alta geração de respingos ou sua irregularidade de transferência metálica) (KVASOV, 2000; LINCOLN, 2010).

Dentre os processos derivativos comerciais, tem-se o CMT® (*Cold Metal Transfer*) fabricado pela Fronius, o RMD® (*Regulated Metal Deposition*) pela Miller e o STT® (*Surface Tension Transfer*) pela Lincoln. De uma forma resumida, nos processos derivativos STT e RMD, a fonte de soldagem controla a subida de corrente no momento de contato da gota com a poça de fusão e, antes da separação da gota, o controle reduz a corrente de modo que o destacamento da gota seja suave e com pouco respingo. No processo CMT, a transferência metálica é controlada eletrônica e mecanicamente, na qual há a descida de corrente para anular a ação do efeito *Pinch* e a tocha recua o arame para proporcionar o rompimento da gota de forma extremamente suave (COSTA *et al.*, 2012).

Desta forma, apresenta-se o estudo da viabilidade e aplicabilidade do monitoramento visual no infravermelho próximo de soldagens MIG/MAG com transferência por curto-circuito controlado em comparação ao processo com transferência por curto-circuito convencional. Acredita-se que a obtenção de imagens do comportamento da poça e seus arredores pode auxiliar ao melhor entendimento destes novos processos tecnológicos, levando a um melhor aproveitamento de suas vantagens e limitações.

Procurou-se, como base de comparação, manter a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda em todos os experimentos (COSTA *et al.*, 2012). Os parâmetros regulados em cada processo é comum a todos os processos estão listados nas Tabela 5.10 e Tabela 5.11.

Tabela 5.10 – Parâmetros ajustados para o teste ViaSolda Pulso Quadrado e MIG/MAG com transferência por curto circuito (comum a todos os processos).

	Parâmetro	Valor Médio	Unidade
Soldagem	Gás de Proteção	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	---
	Vazão do Gás de Proteção	15	l/min
	Velocidade de Soldagem	18	cm/min
	DBCP	14	mm
Sistema de Visão	Frequência de Acionamento	30	FPS
	Tempo de pulso	2	µs
	Tempo de Exposição ( <i>shutter</i> )	1,25	µs
	Seleção de <i>Trigger</i> (SW1-4)	Ext. Trigger Shutter	
	Acumulo do CCD (SW1-5)	Field Accumulation	
	Correção de Gama (SW1-7)	0.45	

Tabela 5.11 - Parâmetros regulados específicos dos processos (COSTA *et al.*, 2012).

Processo	Parâmetro	Valor
Convencional	Velocidade de alimentação	2,3 m/min
	Tensão	18 V
RMD	Velocidade de alimentação	2,3 m/min
	TRIM	80
	Arc Cont	50
STT	Velocidade de alimentação	2,3 m/min
	Corrente de base	100 A
	Corrente de pico	320 A
	TAILOUT	10
CMT	Velocidade de Alimentação	4,2 m/min
	COMP ARCO	10

O par câmera-*driver* está disposto de forma antissimétrica em relação à tocha de soldagem, com ângulos simétricos de inclinação, 25°, e distâncias de 240 mm da região de interesse (tocha, poça e seus arredores). Para estas filmagens, especificamente, o par câmera-*driver* foi posicionado longitudinalmente à junta de soldagem, para a observação do comportamento no chanfro. A figura abaixo ilustra a montagem experimental.

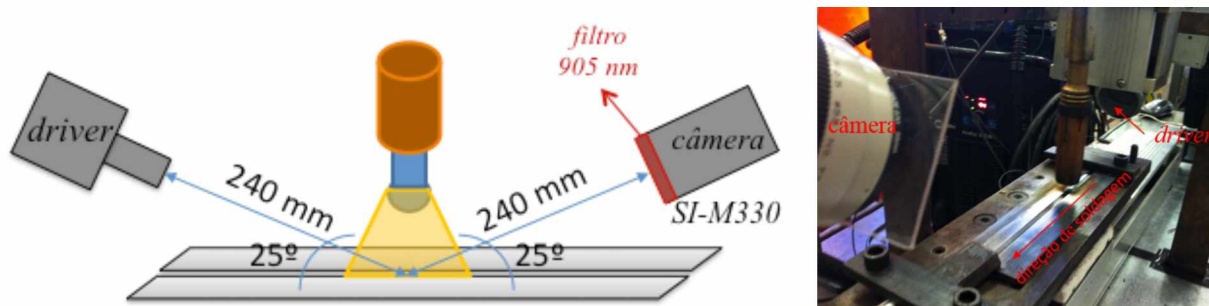


Figura 5.46 - Montagem experimental: (a) disposição esquemática do sistema, (b) disposição real

Segue lista dos equipamentos e consumíveis utilizados durante a realização dos testes.

- Óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.
- Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
- Câmera Costar SI-M331;
- Mesa movimentadora XZ;
- Protótipo do sistema de visão ViaSolda;
- Fonte Miller PipePro 450 RFC, para processo RMD e convencional;
- Fonte Lincoln Eletric Power Wave 450/STT, para processo STT;
- Fonte Fronius TPS 3200 / 4000 / 5000 CMT, para processo CMT;
- Arame ER70S6 com diâmetro de 1,2 mm
- Chapas de aço ao carbono de espessura ½” com junta em V.

Deve-se ressaltar que todos os experimentos foram realizados em sequência para que o alinhamento e disposição do sistema tocha-*driver*-câmera não se alterasse de um experimento para o outro e não houve qualquer tipo de sincronia entre o processo de soldagem em si e a aquisição de imagens. Os sinais elétricos de tensão e corrente médios foram observados para cada experimento e são resumidos na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Valores médios dos sinais elétricos observado para cada processo.

Processo	Corrente (A)	Tensão (V)
Convencional	113	17,7
RMD	123	16,8
STT	121	19,4
CMT	124	16,7

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito convencional, para diferentes instantes e situações de luminosidade são mostrados na Figura 5.47. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm.

Inicialmente, é possível observar que o sistema de visão foi capaz de sobrepor o arco de solda em boa parte das situações de luminosidade para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito convencional. A disposição longitudinal em relação à junta é desfavorável à iluminação, já que a tocha é uma obstrução física e acaba impedindo que parte da luz proveniente dos diodos laser alcance o CCD da câmera. Entretanto, as imagens mostram homogeneidade de iluminação, indicando boa sincronia entre os momentos de acionamento dos diodos laser e a abertura da câmera, e luminosidade suficiente em toda a

área de interesse, sendo possível discernir detalhes como a frente de solidificação, o preenchimento da junta, o formato da poça fundida, entre outros.

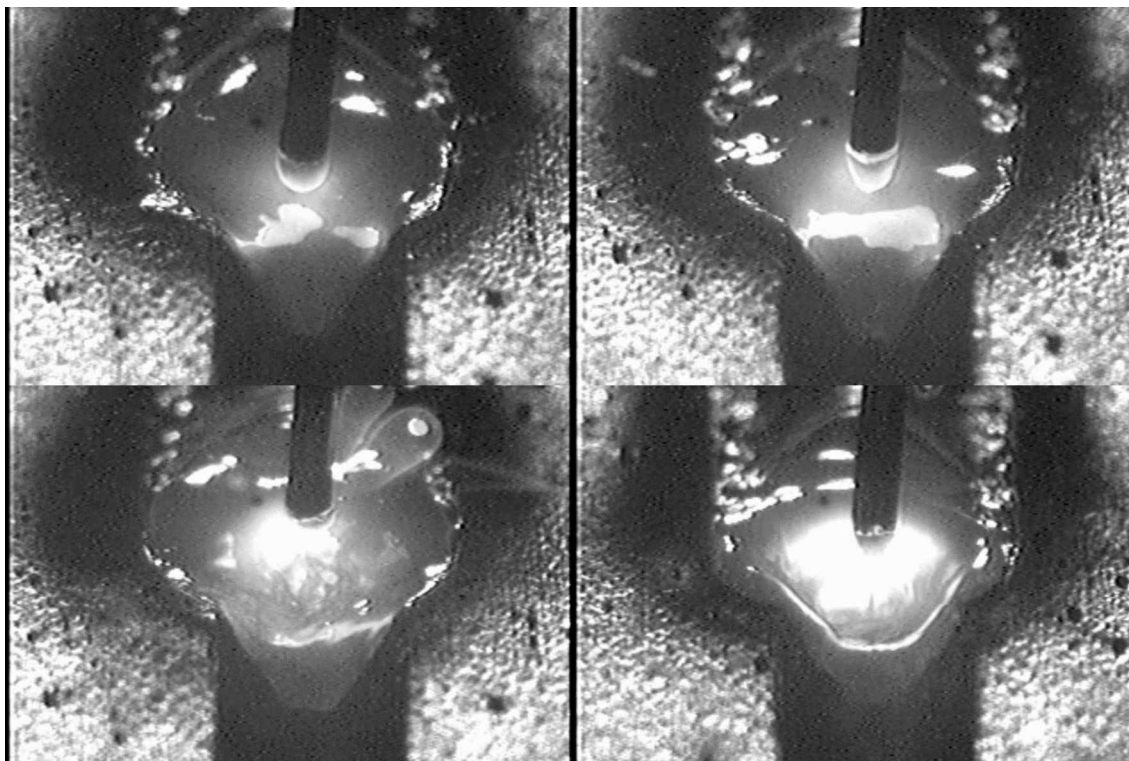


Figura 5.47 - Imagens obtidas para o processo convencional (113 A) em diferentes instantes e situações de luminosidade.

No ponto de vista da transferência metálica, o sistema de visão não é capaz de capturar com amostragem suficiente as principais etapas físicas do curto-circuito convencional. Para que isto fosse possível, seria necessária a utilização de filmagem em alta velocidade. Porém, a aquisição de imagens a 30 quadros por segundo dá indicativos da física envolvente desta transferência, mostrando, por exemplo, momentos do crescimento da gota e a instabilidade criada nos momentos de reignição do arco com a formação de respingos.

Em relação ao comportamento da poça fundida, pode-se observar ao longo das imagens que o curto-circuito convencional, nestes parâmetros, resultaram em uma poça com formato de gota. A irregularidade de formação desta poça fica evidente pela sequência de imagens, principalmente com a oscilação da largura e reforço do cordão de solda em formação.

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito controlado do tipo RMD, para diferentes instantes e situações

de luminosidade são mostrados na Figura 5.48. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm.

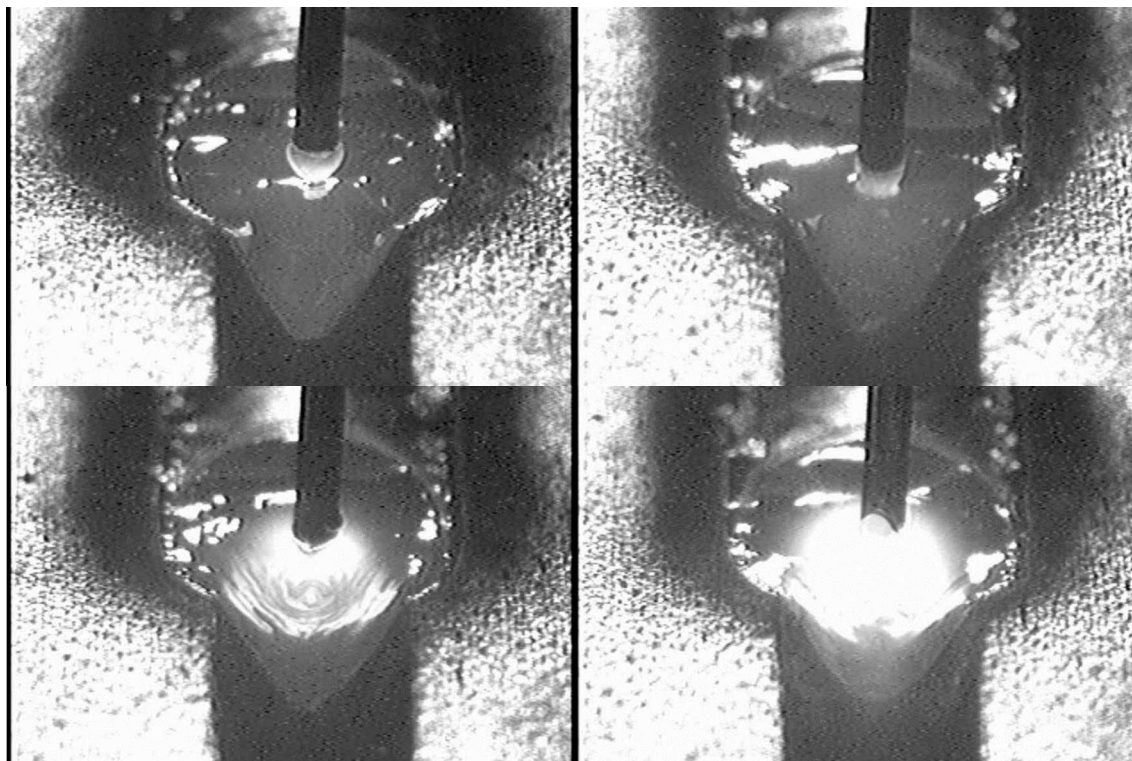


Figura 5.48 - Imagens obtidas para o processo RMD (123 A) em diferentes instantes e situações de luminosidade.

Da mesma forma que o observado nas imagens do curto-circuito convencional, o sistema de visão foi capaz de obter imagens com sobreposição do arco de solda em momentos de menor intensidade luminosa (corrente) e boa iluminação da região de interesse (poça, junta e seus arredores) com sincronia entre os momentos de captura da imagem e acionamento dos diodos laser, mesmo com a obstrução de parte da luz pela tocha. As imagens para ambos experimentos são nítidas, indicando que a fonte de soldagem não é capaz de interferir a transmissão das imagens da câmera analógica.

As imagens obtidas para o processo por curto-circuito controlado RMD, para os parâmetros regulados, mostram um formato de poça mais arredondando quando comparado ao processo convencional. Observa-se, também uma maior regularidade da formação da poça fundida, indicando um cordão de solda em formação com maior regularidade se comparado ao processo convencional.

As nuances da transferência metálica não podem ser observadas apenas pela aquisição em baixa velocidade, como ocorre no processo convencional, porém é possível observar ao longo da sequência de imagens que a formação da gota e seu destacamento

ocorre de forma mais suave, com presença mais evidente da transferência por tensão superficial e menos pelo estrangulamento da gota devido as forças magnéticas.

As imagens obtidas pelo sistema ViaSolda para o processo STT tem sua nitidez prejudicada pela presença de um ruído do tipo *salt and pepper* (sal e pimenta, em inglês), o que pode ser observado na Figura 5.49(a). Este tipo de ruído é característico de erros de transmissão e pode ser descrito principalmente pela presença de pixels corrompidos, alterados em seu valor para o máximo branco (1), ou para o mínimo preto (0) (PEDRINI e SCHWARTZ, 2007). Acredita-se que a causa deste é decorrente da interferência eletromagnética da fonte de soldagem (Lincoln Electric Power Wave 450/STT) na transmissão da imagem obtida pela câmera analógica até sua placa digitalizadora.

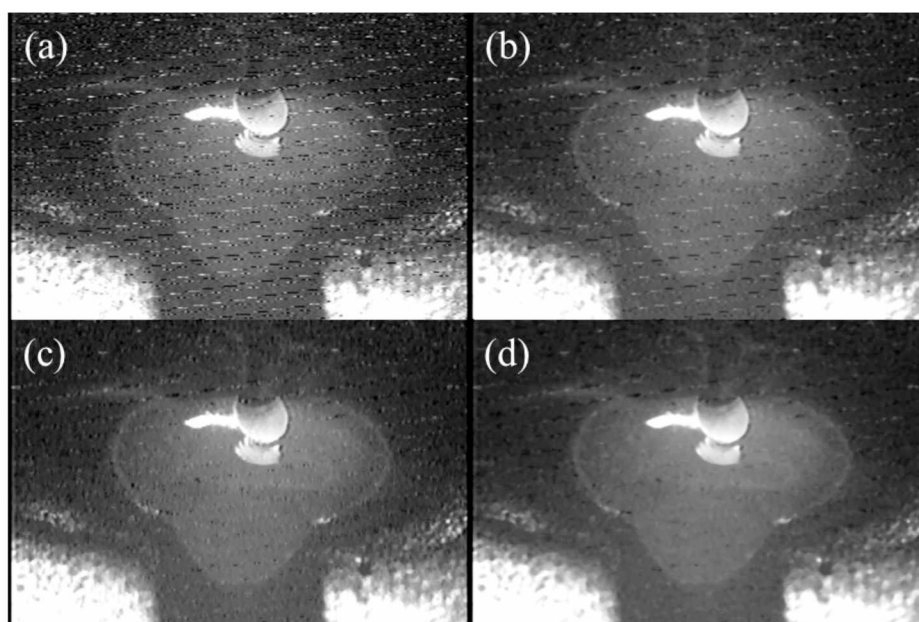


Figura 5.49 - Imagens obtidas para o processo STT: (a) imagem com ruído da interferência eletromagnética da fonte de soldagem; imagens pós-processadas com filtros de mediana de vizinhança, (b) 5x5, (c) 7x1 e (d) 7x7.

Uma operação não-linear aplicada usualmente para correção de imagens com ruído de tipo *salt and pepper* é o uso de um filtro digital da mediana. Este filtro da mediana é mais efetivo que uma simples convolução quando o objetivo é simultaneamente reduzir o ruído com a preservação das bordas da imagem. De uma forma simplificada, o pixel da imagem resultante é obtido pelo valor mediado da vizinhança (uma matriz de tamanho imposto  $[m \times n]$ ) ao redor do pixel da imagem de origem.

Exemplos das imagens resultantes deste filtro de mediana para diferentes matrizes de vizinhança são mostrados na Figura 5.49 (b) (c) e (d). Todo o processamento das



imagens foi realizado em ambiente MatLab® através da função *medfilt2* (ver APÊNDICE X) e, acredita-se que uma vizinha 7x1, resultou em uma imagem com ruído suficientemente suavizado sem que houvesse grande perda em sua nitidez. Desta forma, todas as imagens obtidas para o processo STT foram pós-processadas com este filtro.

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito controlado do tipo STT e posteriormente filtradas para diferentes instantes e situações de luminosidade são mostrados na Figura 5.50. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm.

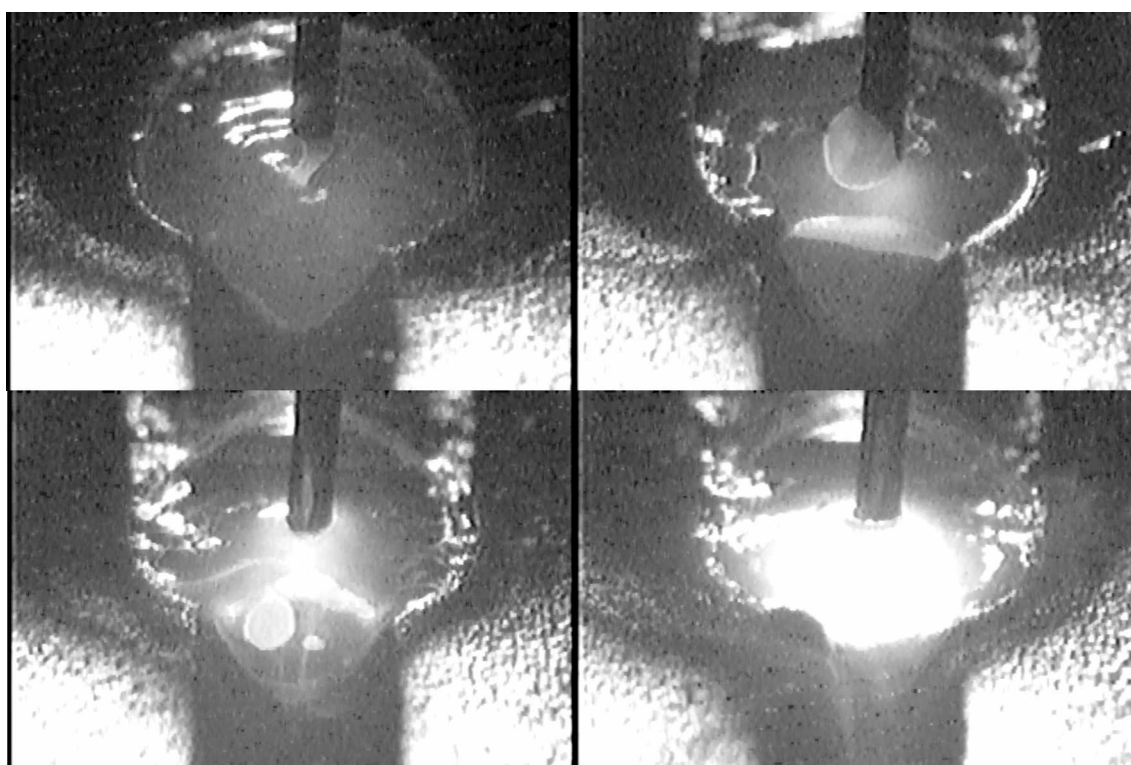


Figura 5.50 -. Imagens obtidas para o processo STT (121 A) em diferentes instantes e situações de luminosidade.

O sistema de visão foi capaz de obter imagens com sobreposição do arco de solda em momentos de menor intensidade luminosa (corrente) e boa iluminação da região de interesse (poça, junta e seus arredores) com sincronia entre os momentos de captura da imagem e acionamento dos diodos laser, mesmo com a obstrução de parte da luz pela tocha. Observa-se a formação maior de fuligem ao redor do cordão de solda, sendo a região escurecida (menos reflexiva) prejudicial à luminosidade presente na imagem como um todo, sem maior influência, porém, na região de interesse.

As imagens obtidas para o processo por curto-circuito controlado STT, similares as observadas no RMD, mostram um formato de poça mais arredondando e também uma

maior regularidade da formação da poça fundida, indicando um cordão de solda em formação com maior regularidade se comparado ao processo convencional. Visualmente nota-se também, uma escavação mais nítida da poça sobre as bordas da junta.

É possível observar de forma evidente a formação suave das gotas (maiores quando comparadas aos outros processos) e a transferência destas por tensão superficial. Visualmente é evidente a formação e presença de respingos, porém de forma menos intensa do que observa-se no processo convencional. A luminosidade do arco apresenta-se, neste processo, mais baixa durante a formação da gota, evidenciado também pela corrente mais baixa para a mesma taxa de deposição do material, quando comparado aos outros materiais.

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito controlado do tipo CMT para diferentes instantes e situações de luminosidade são mostrados na Figura 5.51. A título de obtenção de escala, considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm.

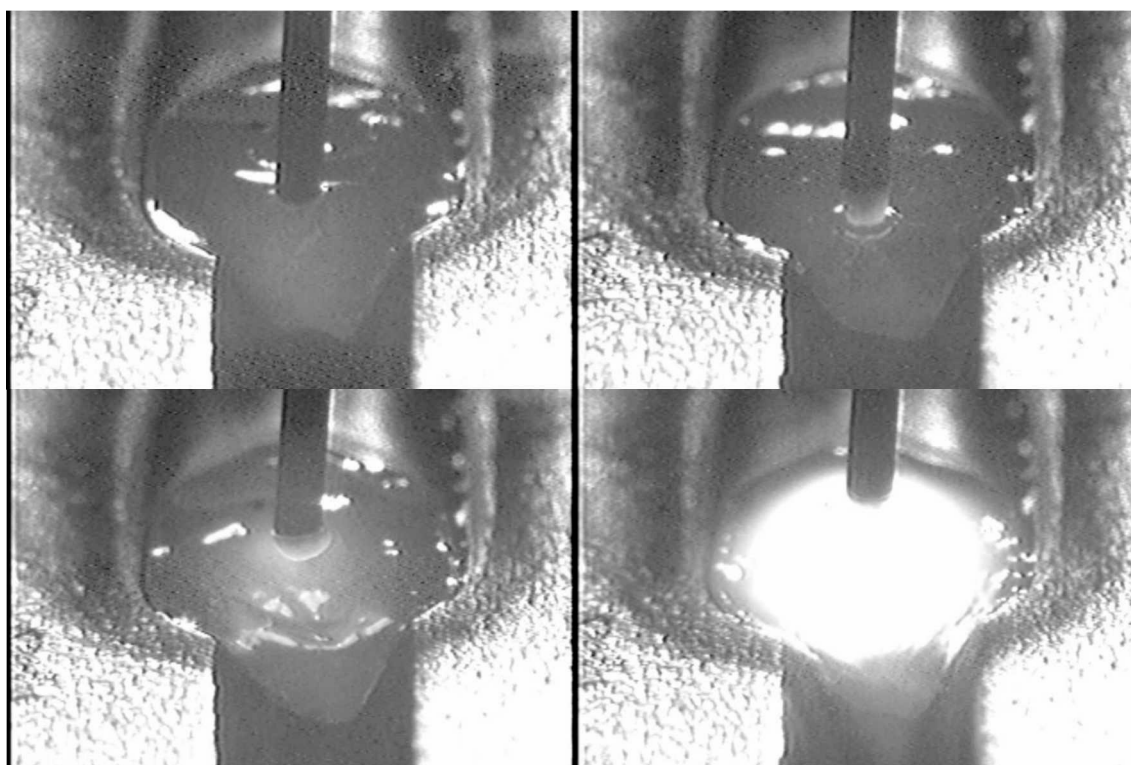


Figura 5.51 - Imagens obtidas para o processo CMT (124 A) em diferentes instantes e situações de luminosidade.

As imagens obtidas com o sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito CMT mostram, como observado nos outros experimentos, uma boa sincronia entre o acionamento dos diodos laser e o tempo de abertura da câmera,



e iluminação de toda a região de interesse, mesmo com a obstrução por parte da luz pela tocha de soldagem. As imagens apresentam um pequeno ruído de transmissão do tipo *salt and pepper* que, entretanto, não prejudicam a nitidez e a qualidade das imagens.

Os resultados obtidos para este experimento indicam, visualmente, que o curto-circuito CMT tem uma poça fundida com maior regularidade e formato arredondado, com pouca escavação nas bordas da junta de soldagem, evidenciado principalmente pela observação da superfície uniforme do cordão em formação. A sequência de imagens evidencia o movimento de avanço e recuo do arame nos momentos de curto-circuito e rompimento da gota. A luminosidade do arco é mais intensa nos momentos de abertura, proporcionado pelo aumento do comprimento do arco pelo recuo do arame, entretanto mantém-se uniforme durante toda a sequência de imagens. Não há evidência visual de presença de respingos. Visualmente, portanto, o processo CMT produz um cordão de solda de maior regularidade e com formação e destacamento da gota mais controlado quando comparado aos outros processos.

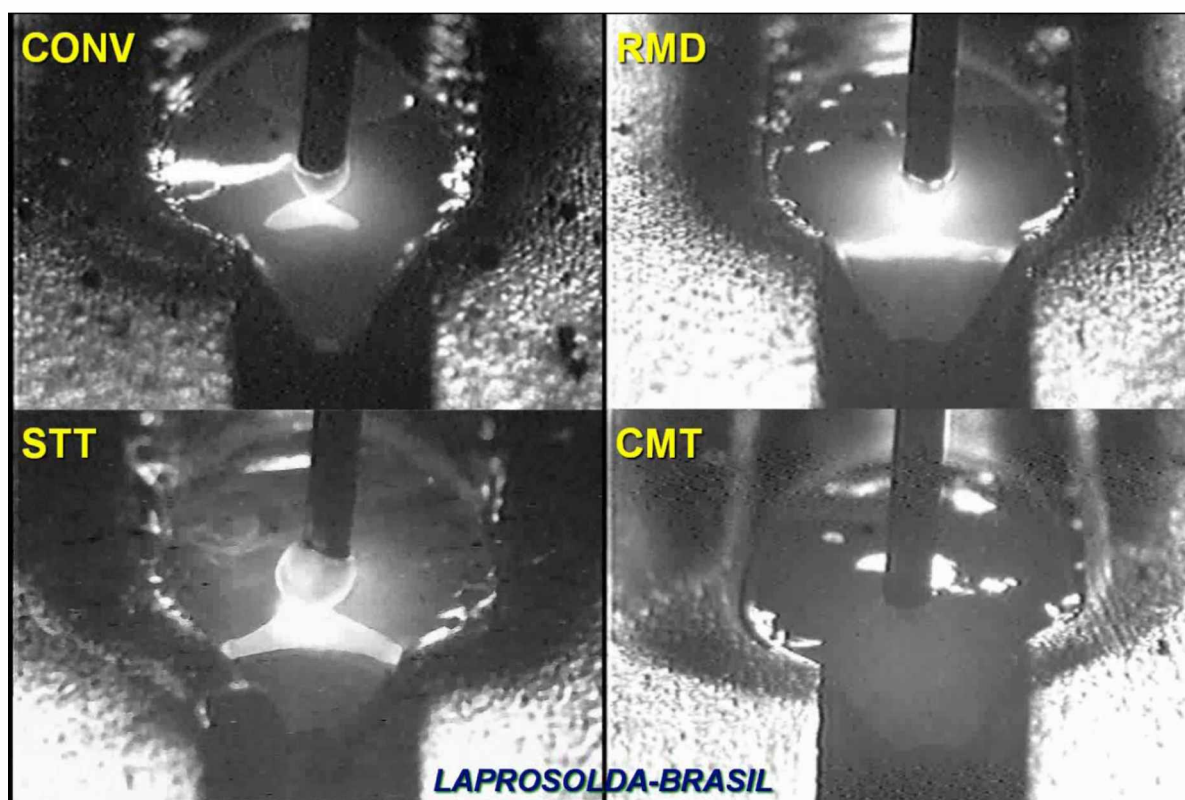


Figura 5.52 - Imagens obtidas pelo sistema de visão “Viasolda” de pulso quadrado em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito controlado.

De uma forma geral, o sistema de visão provou ser uma ferramenta promissora nos estudos dos processos tecnológicos de controle eletrônico para MIG/MAG com transferência por curto-circuito. As imagens apresentam boa sincronia luminosa e nitidez, sendo possível discernir pequenos detalhes da física de cada tipo de processo. A baixa velocidade de aquisição das imagens (30 quadros por segundo) não resulta em uma amostragem suficiente para o estudo da transferência metálica em nenhum dos processos, porém fornece indicações de seu comportamento em momentos distintos da aquisição. A ferramenta fornece, porém, uma boa base de estudo para o comportamento da poça fundida e da formação do cordão.

### 5.2.3 Soldagens com o Uso de Filmagem em Alta Frequência

Tendo estabelecido o limite de velocidade máxima para o acionamento dos diodos laser em 300 Hz e, entendendo a importância de estudos em processos de soldagem com maior taxa de amostragem de imagens, estabeleceu-se duas grandes etapas de validação do ViaSolda com o uso de filmagem em alta frequência: um comparativo entre alta e baixa velocidade e, posteriormente, o comparativo com alta e baixa velocidade utilizando-se da fibra óptica para aumento da densidade luminosa. Este item detalhará os resultados obtidos com a primeira etapa.

Determinou-se o uso do sistema de visão nas taxas de quadros máxima – 300 FPS – e nominal – 30 FPS, para a verificação da capacidade de sobreposição do arco mesmo com queda de eficiência de iluminação e parâmetros para soldagens com transferência por curto circuito e voo livre.

Em uma varredura dos modos de transferência metálica nas soldagens MIG/MAG, espera-se visualizar quatro condições diferentes na transferência por curto circuito, em especial observação à frequência média de curtos e as três principais transferências por voo livre: globular, goticular e com alongamento. Desta forma será possível observar o funcionamento do ViaSolda em diferentes condições de emissão luminosa do arco de solda, e verificar a viabilidade do estudo de alta velocidade em todo o escopo operacional.

Os parâmetros regulados comum a todos os experimentos e específico a cada condição de soldagem estão listados nas Tabela 5.13 e Tabela 5.14.

Tabela 5.13 – Parâmetros ajustados para o teste ViaSolda Pulso Quadrado em alta frequência (comum a todos os processos).

	Parâmetro	Curto Circuito Valor Médio	Voo Livre	Unidade
Sistema de Soldagem	Gás de Proteção	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	Ar + 5% O <sub>2</sub>	---
	Vazão do Gás de Proteção	14	14	l/min
	DBCP	12	18	mm
Sistema de Visão	Frequência de Acionamento	30 e 300		FPS
	Tempo de pulso	2,2		µs
	Tempo de Exposição ( <i>shutter</i> )	2		µs
	<i>Enable Sync In</i>	Borda de descida (↓)		
	Chave Seletora de Polaridade	Lógica Positiva ( _Π_ )		

Tabela 5.14 - Parâmetros regulados específicos dos processos.

Transferência	Parâmetro	Conjunto de Parâmetros				Unidade
		1	2	3	4	
Curto Circuito	Tensão	20				V
	Velocidade de Alimentação	2,1	2,6	3,6	5,0	m/min
	Velocidade de Soldagem	21	26	36	50	cm/min
Voo Livre	Tensão	31	31	33,5	-	V
	Velocidade de Alimentação	3,6	7,0	8,6	-	m/min
	Velocidade de Soldagem	36	70	85	-	cm/min

O par câmera-*driver* foram dispostos de forma antissimétrica em relação à tocha de soldagem, com ângulos de 29° e há distâncias de 250 mm da região de interesse. Para estas filmagens, especificamente, o par câmera-*driver* foi posicionado longitudinalmente a direção da velocidade de soldagem. A Figura 5.53 ilustra a montagem experimental.

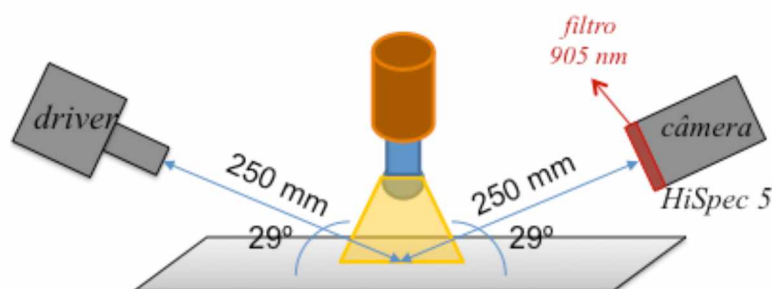


Figura 5.53 – Disposição de montagem pra câmera driver para testes em alta velocidade.

Segue lista dos equipamentos e consumíveis utilizados durante a realização dos testes.

- Óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.
- Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
- Câmera HiSpec 5 de alta velocidade
- Mesa movimentadora XZ;
- Protótipo do sistema de visão ViaSolda;
- Fonte IMC Digiplus ( $K_s = K_d = 100$ );
- Arame ER70S6 com diâmetro de 1,2 mm
- Chapas de aço ao carbono de espessura  $\frac{1}{4}$ " de dimensões 30 x 2".

Deve-se ressaltar que todos os experimentos foram realizados em sequência para que o alinhamento e disposição do sistema tocha-*driver*-câmera não tivesse alterações relevantes entre uma aquisição de imagens e outra.

#### 5.2.3.1 Transferência por Curto-Circuito

Os sinais elétricos de tensão e corrente médios foram observados para cada experimento de soldagens MIG/MAG convencional com transferência por curto circuito, assim como os valores calculados de índice de regularidade ( $IV_{cc}$ ) e frequência média de curto circuito ( $F_{cc}$ ), para filmagens em baixa e alta velocidade. Estes são resumidos na Tabela 5.15. Todas as imagens obtidas neste ponto foram obtidas com o diafragma mecânico na mesma abertura ( $f/2.5$ ).

Tabela 5.15. Valores médios dos sinais elétricos observados nos processos com transferência por curto circuito com filmagem em alta frequência.

Parâmetros	FPS (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	Valim (m/min)	$IV_{cc}$	$F_{cc}$ (Hz)
CC1	30	89	17,8	1,9	0,613	21,94
	300	90	17,9	1,9	0,447	21,63
CC2	30	128	17,3	2,5	0,443	51,09
	300	122	17,4	2,5	0,563	51,17
CC3	30	159	16,8	3,4	0,679	81,37
	300	157	16,9	3,4	0,661	80,70
CC4	30	208	16,2	4,9	0,353	97,32
	300	207	16,2	5	0,406	96,01

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito, para velocidade nominal e máxima em todas as quatro

condições de soldagem, são mostradas na Figura 5.54 à Figura 5.57. A título de obtenção de escala, sempre considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm.

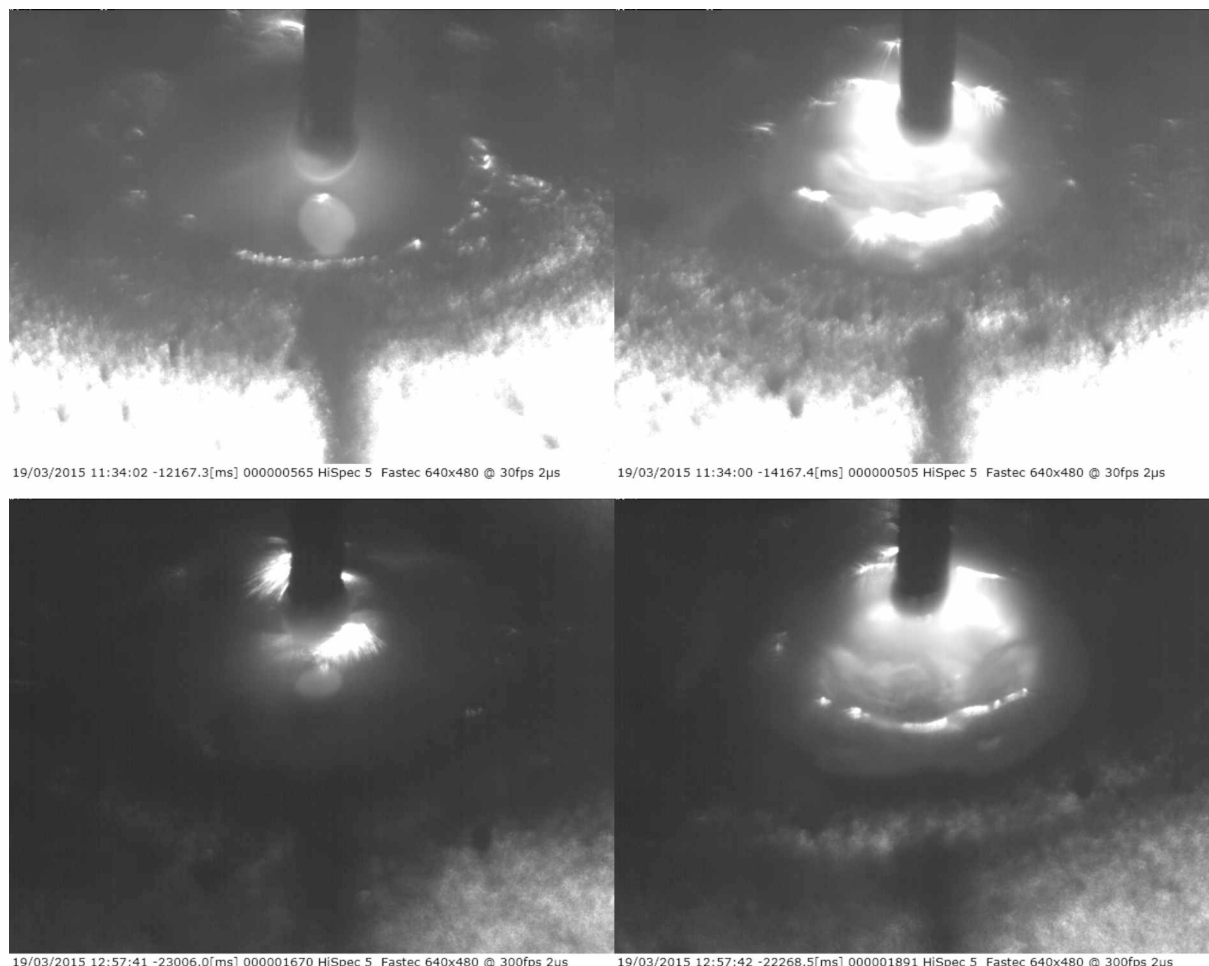


Figura 5.54 – Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (89 A, 22 Hz) em 30 (cima) e (90 A, 22 Hz) 300 (baixo) FPS.

Inicialmente, é possível observar que o sistema de visão foi capaz de sobrepor a luz do arco em sua maioria, com exceção dos momentos de pico de corrente durante a reignição do arco. Durante todas as condições de transferência por curto-circuito, principalmente nas filmagens em velocidade nominal, é possível discernir com facilidade a região da poça fundida e seus arredores, produzindo uma imagem de excelente qualidade para o auxílio visual de um operador/soldador.

O aumento da velocidade de alimentação do arame e, por consequência o aumento da corrente mantendo-se uma mesma tensão, não foi capaz de prejudicar o funcionamento do sistema de visão de uma forma geral. Comparando-se as filmagens em velocidade nominal, é possível ainda atribuir uma melhora na qualidade da imagem, principalmente em relação ao contraste observado, com a região a frente da poça fundida sendo facilmente



discernida para tomada de decisões. O processo com maior corrente também apresentou menor formação de fuligem ao redor do cordão de solda, o que mantém uma maior superfície reflexiva (chapa escovada) e, conseqüentemente, melhora a qualidade da imagem como um todo.

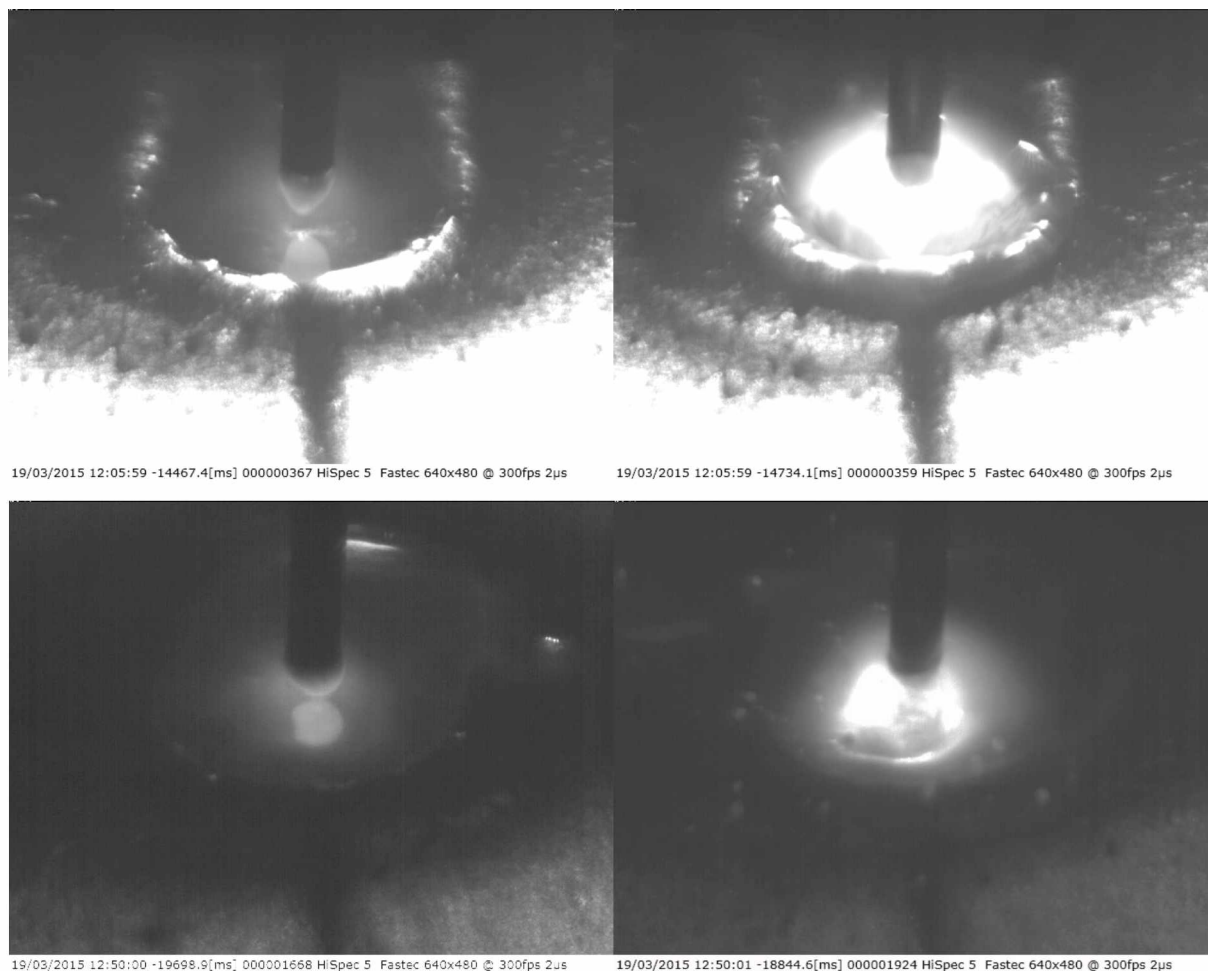


Figura 5.55 - Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (128 A, 51 Hz) em 30 (cima) e (122 A, 51 Hz) 300 (baixo) FPS.

Comparando-se as imagens obtidas em velocidades alta e nominal, é possível observar que a queda de eficiência de emissão do diodo laser pelo stress de acionamento é refletido no brilho da imagem. Todas as imagens em alta velocidade, considerando uma mesma abertura de diafragma se mostraram mais escuras, principalmente nos arredores do cordão de solda. Porém, ao observar a região do arco de solda em si, vê-se pouca diferença em relação ao obtidos em velocidade nominal, confirmando que a perda de iluminação ocorre apenas na “periferia” da região de interesse.

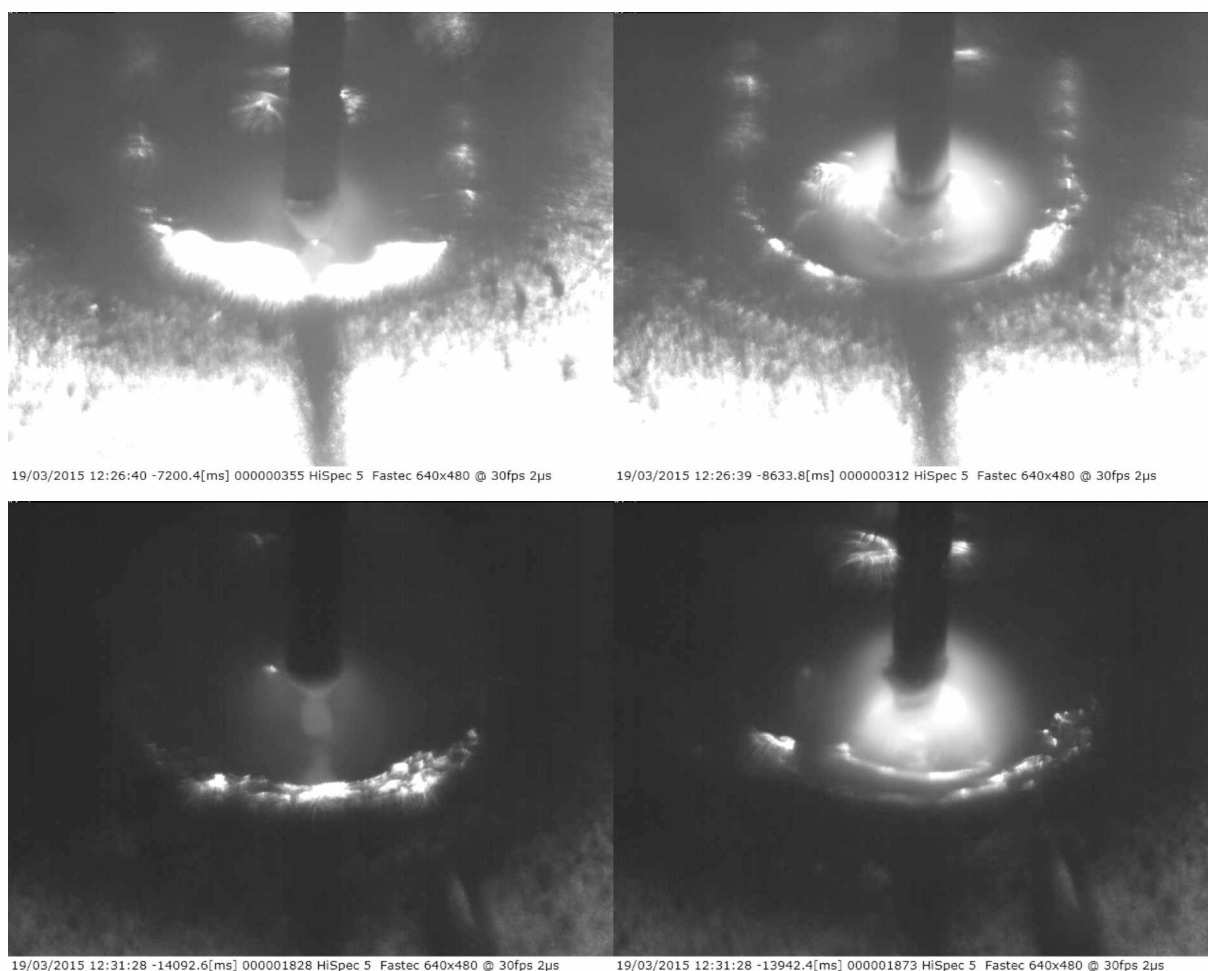


Figura 5.56 –Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (159 A, 81 Hz) em 30 (cima) e (157 A, 80 Hz) 300 (baixo) FPS.

Semelhante ao observado na velocidade nominal de filmagem, o aumento da velocidade de alimentação provou-se, ao contrário do esperado, benéfico para a qualidade da imagem, aumentando seu contraste sem perda de brilho. Uma conclusão importante pode ser tirada dessa informação: a câmera de alta velocidade tem uma resposta baixa ao infravermelho próximo, necessitando de uma abertura do diafragma maior para obter imagens claras. De certa forma, o aumento da luz emitida pelo arco auxilia a visualização dos arredores da poça fundida e a formação de imagem no CCD da câmera é favorecida com menores diferenças entre as regiões claras e escuras.

Por fim, a reflexão exagerada da luz do diodo laser nas soldagens em velocidade nominal poderia ser diminuído e, em consequência, gerar melhoria da qualidade da imagem com a diminuição da abertura do diafragma da lente para o valor imediatamente acima ( $f/4$ ).



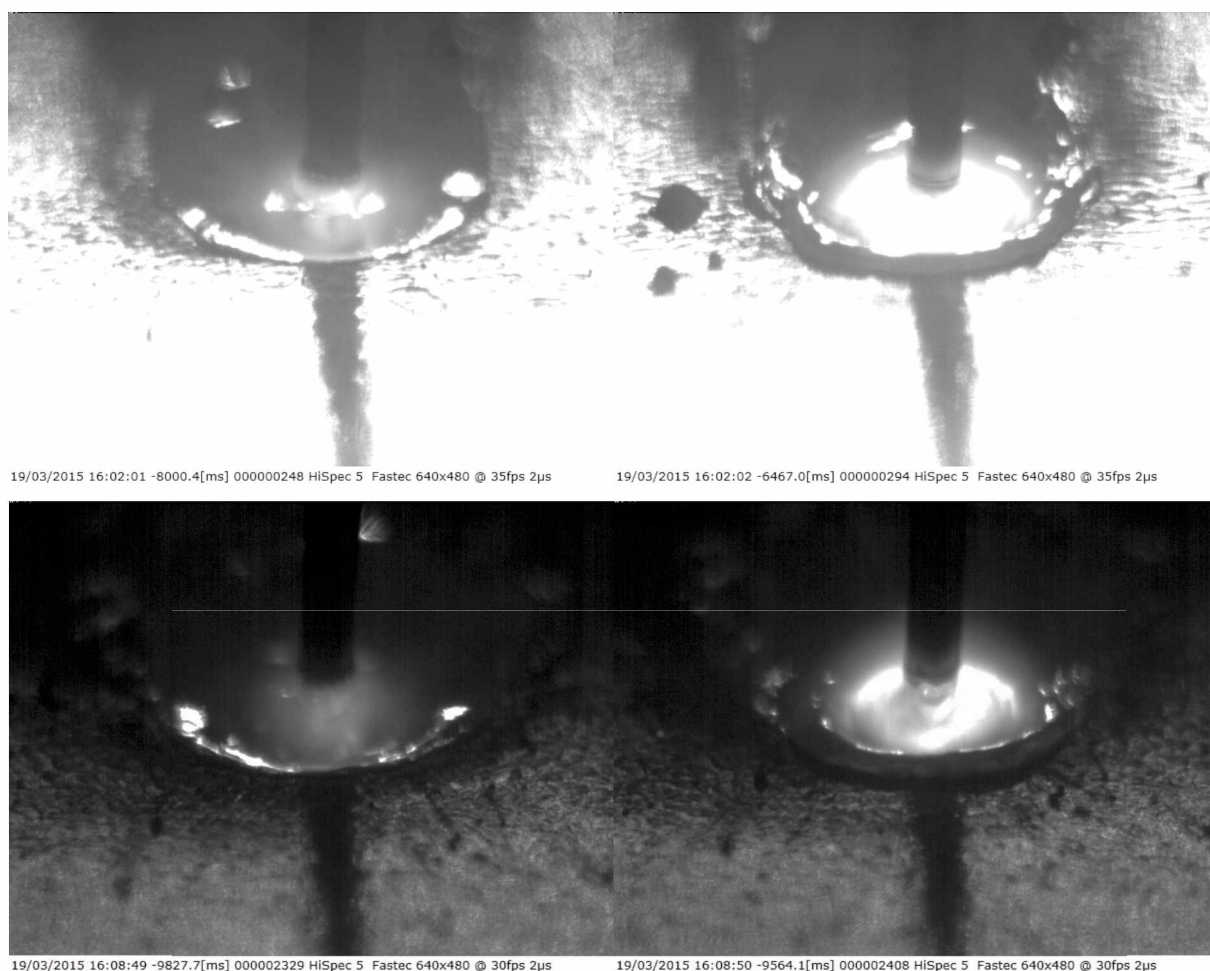


Figura 5.57 – Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (208 A, 97 Hz) em 30 (cima) e (207 A, 96 Hz) 300 (baixo) FPS.

Para observar a viabilidade do uso de filmagem em alta velocidade para soldagens com transferência por curto circuito, imagens subsequentes retiradas de cada condição são apresentadas na Figura 5.58 à Figura 5.61. Como escala de tempo deve-se considerar que entre quadros há uma diferença de 3,33 ms e, portanto, a sequência de imagens mostradas ocorre em um intervalo de tempo de 16,67 ms.

Considerando que, em média, o período em que o arco alterna entre seu estado aberto e entra no momento de curto circuito, para as condições apresentadas, é de aproximadamente 45, 19, 12 e 10 ms, respectivamente, pode-se concluir que o uso da câmera de alta velocidade com o ViaSolda em 300 FPS permite, no mínimo a observação do fenômeno de curto circuito e abertura do arco (gota toca ou não na poça de fusão).

Porém, quanto menor a frequência de curto circuito, melhor a possibilidade de observar em detalhe a transferência metálica. Nas condições de menor frequência é possível distinguir com facilidade momento de toque e de destacamento da gota pelo efeito

da tensão superficial. Já na condição de maior frequência, o que se observa é apenas a distinção do momento de arco aberto com o momento do curto.

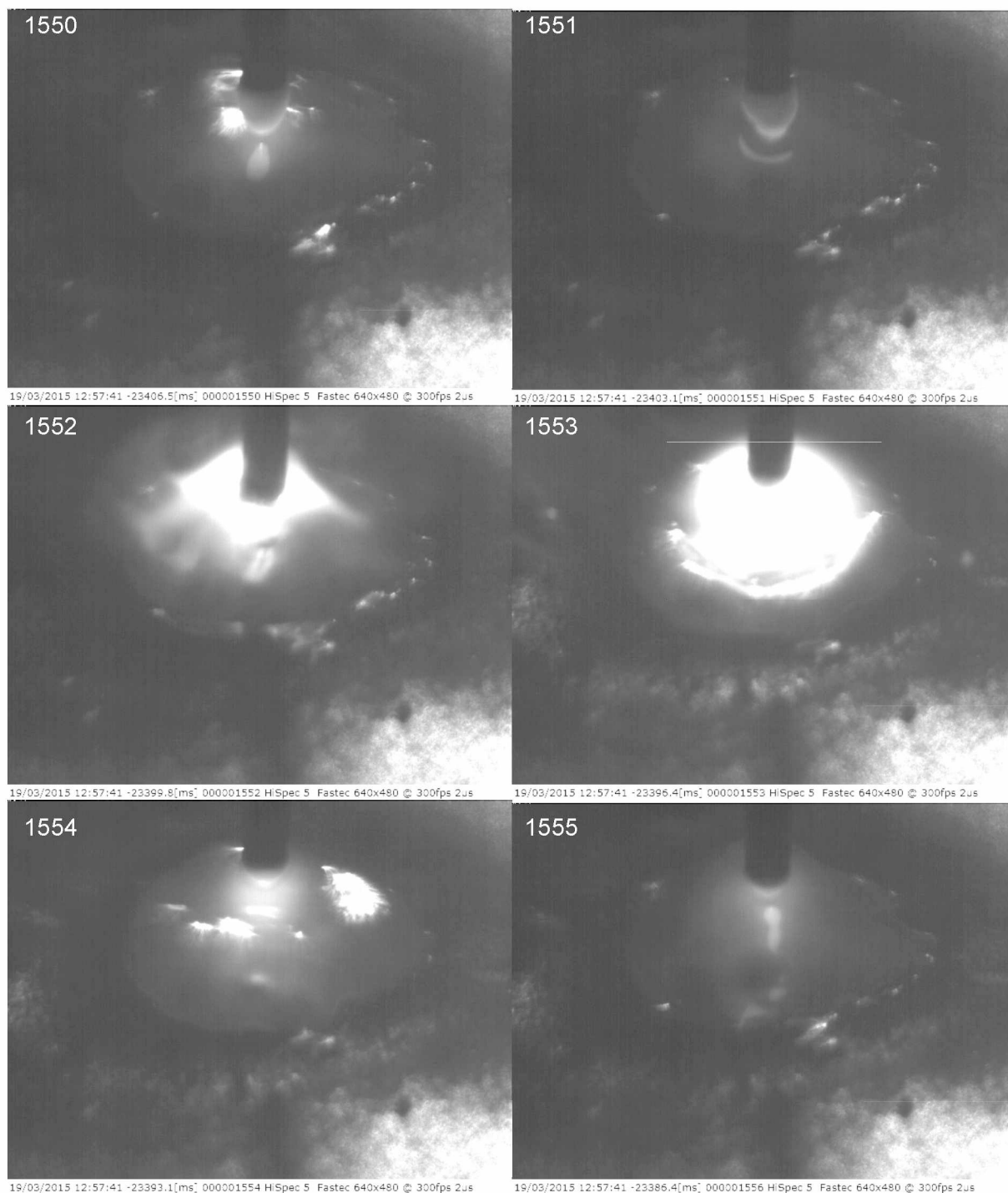


Figura 5.58- Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (90 A, 22 Hz) em 300 FPS.

Para um melhor entendimento da limitação e do alcance de observação do ViaSolda nos estudo da transferência metálica, é necessário a sincronização das imagens com os

oscilogramas de tensão e corrente, possibilitando, assim, conclusões mais aprofundadas sobre o assunto.

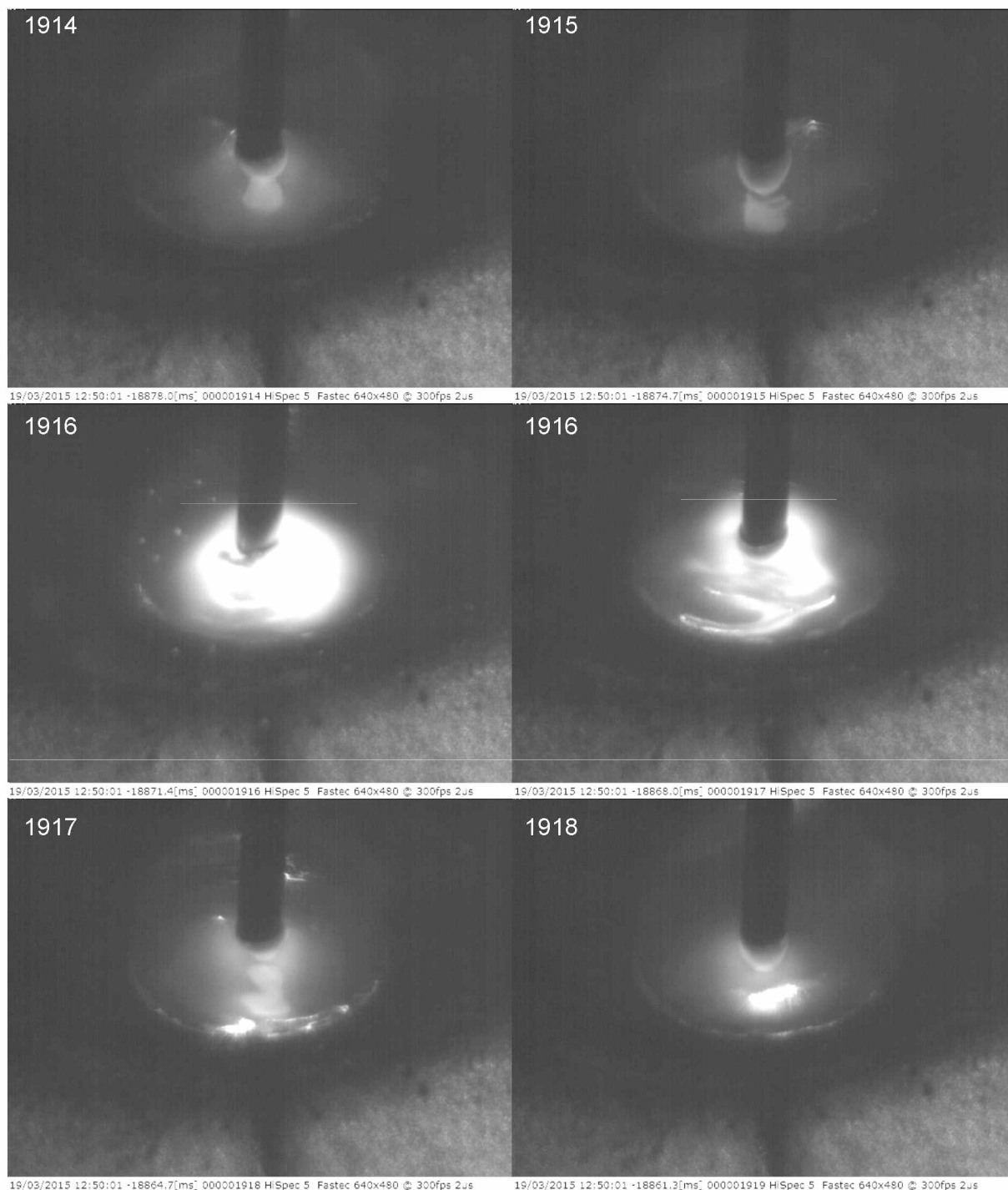


Figura 5.59 – Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (122 A, 51 Hz) em 300 FPS.

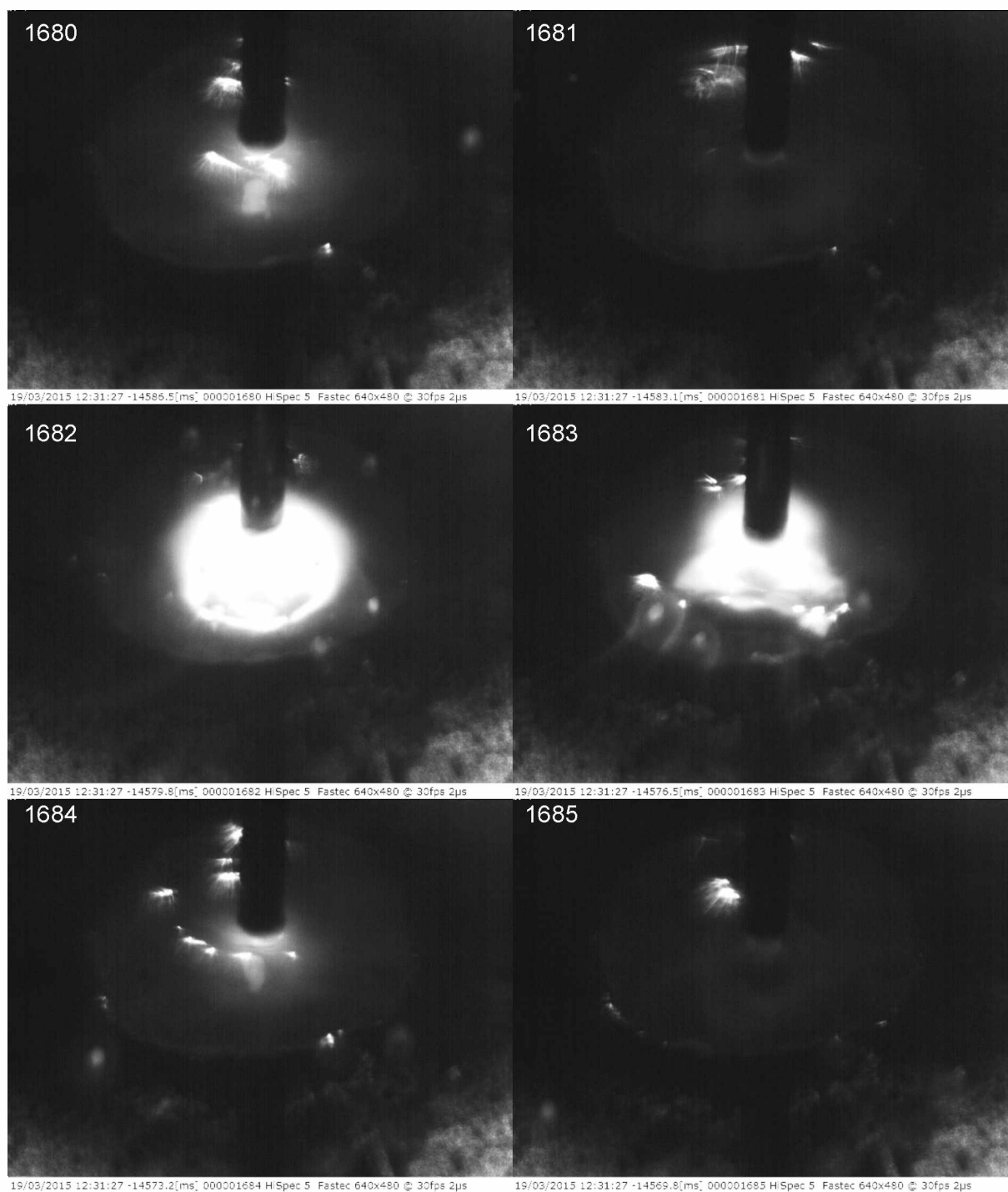


Figura 5.60 – Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (157 A, 80 Hz) em 300 FPS.

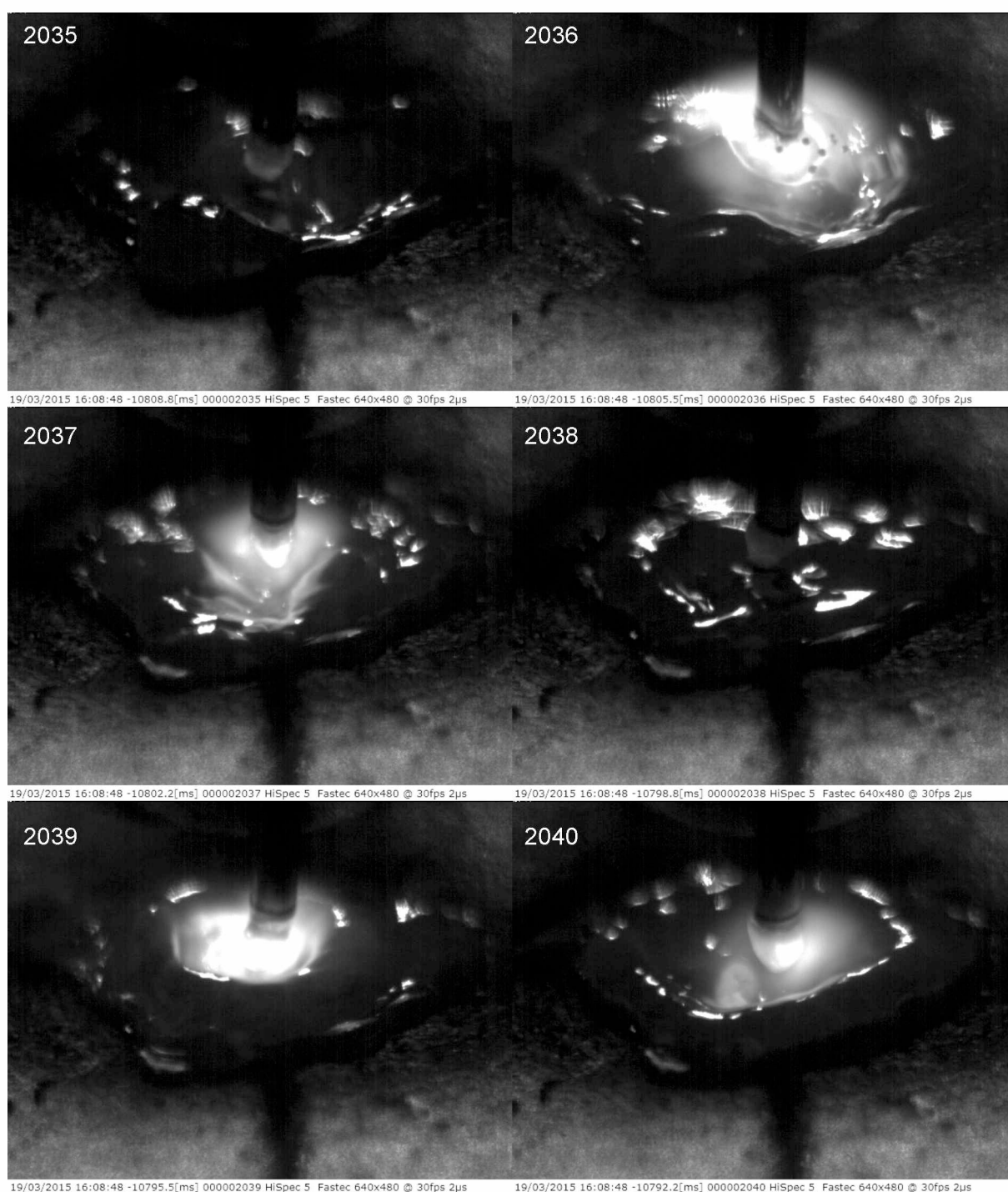


Figura 5.61 – Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (207 A, 96 Hz) em 300 FPS.

### 5.2.3.2 *Transferência em Voo Livre*

Os valores elétricos de tensão, corrente e velocidade de alimentação médios, assim como a caracterização do tipo de transferência em cada experimento para soldagens MIG/MAG convencional com transferência em voo livre em filmagens em baixa e alta velocidade e são resumidos na Tabela 5.16.

Tabela 5.16. Valores médios dos sinais elétricos observados nos processos com transferência em voo livre com filmagem em alta frequência.

Parâmetros	Transferência	FPS (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	Valim (m/min)
VL1	Globular	30	168	28,5	3,6
		300	170	28,5	3,6
VL2	Goticular	30	250	26,8	6,9
		300	256	26,6	7
VL3	Com alongamento	30	306	30,2	8,75
		300	307	30,3	8,72

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por voo livre, para velocidade nominal e máxima, são mostradas na Figura 5.62 à Figura 5.64. A título de obtenção de escala, sempre considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm. As condições VL1 e VL2 foram realizadas com diafragma em 2,5 a VL3 em f/5,6.

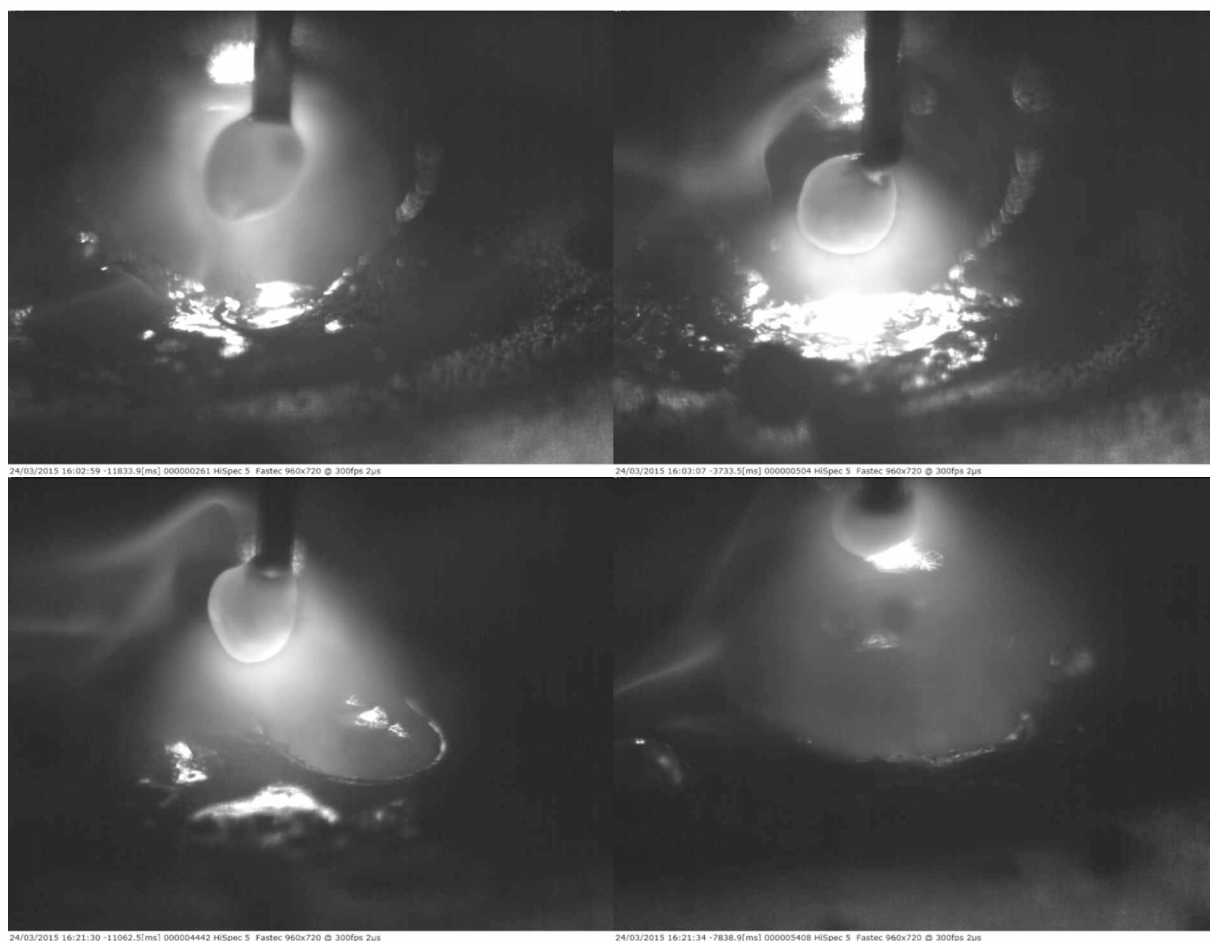


Figura 5.62 - Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por voo livre globular (28,5 V, 168 A) em 30 (cima) e (28,5 V, 170 A) 300 (baixo) FPS.



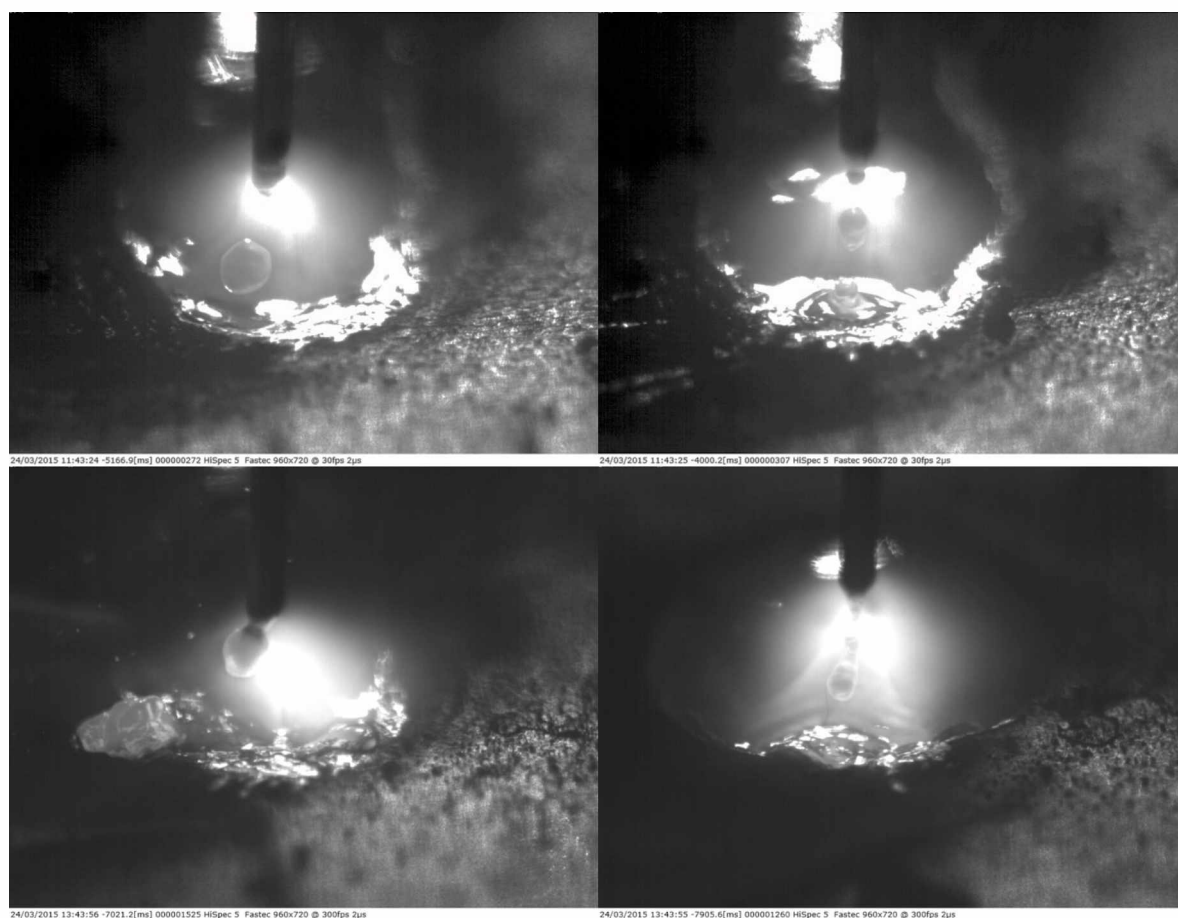


Figura 5.63 – Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por voo livre goticular (26,8 V 250 A) em 30 (cima) e (26,8 V 256 A) 300 (baixo) FPS.

Para observar a viabilidade do uso de filmagem em alta velocidade para soldagens com transferência por voo livre globular, imagens subsequentes retiradas de condição são apresentadas na . Como escala de tempo deve-se considerar que, entre quadros há uma diferença de 6,67 ms e, portanto, a sequência de imagens mostradas ocorre em um intervalo de tempo de 46,67 ms.



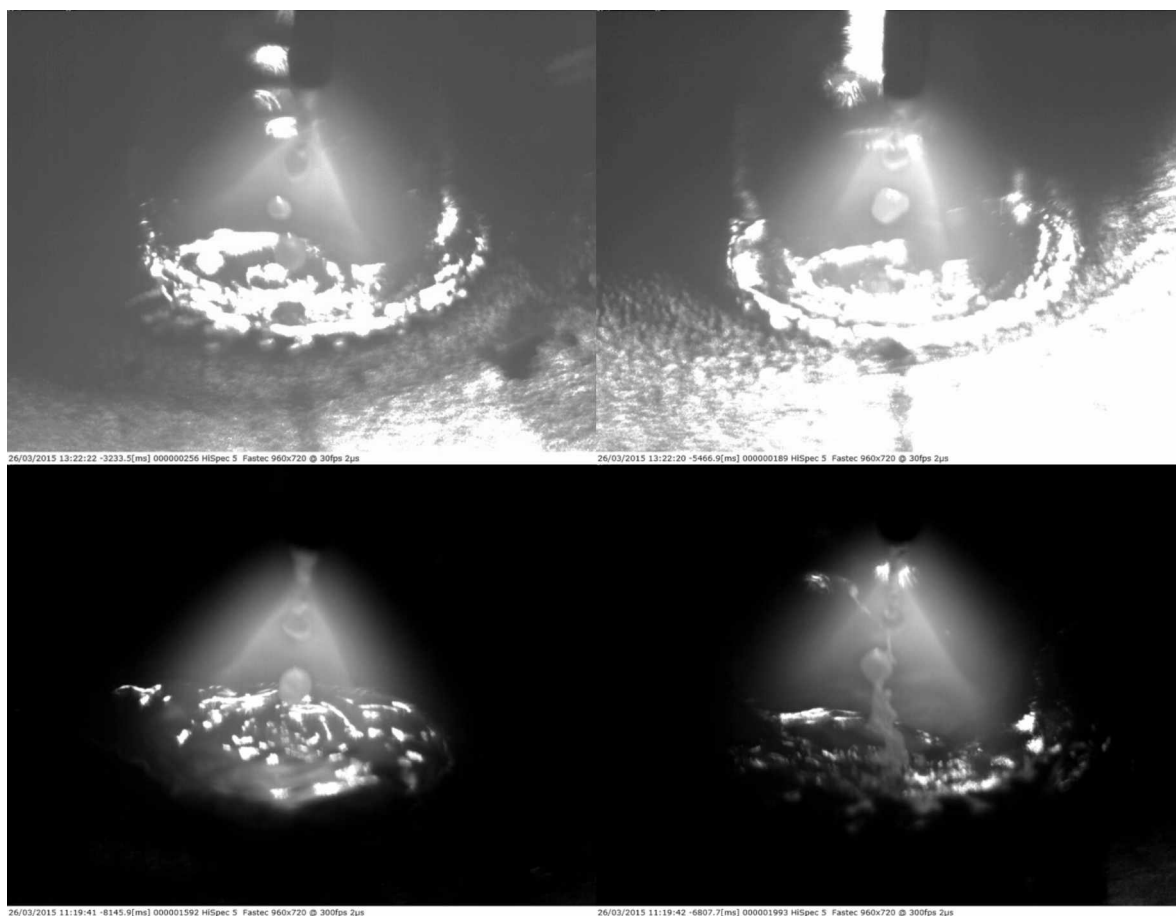


Figura 5.64 – Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por voo livre goticular com alongamento (305 A) em 30 (cima) e 300 (baixo) FPS.

Como a formação e destacamento da gota na transferência globular é um processo lento, é possível observar com a taxa de imagens em 300 FPS o fenômeno de transferência metálica com grande detalhamento, como o crescimento gradual e a repulsão da gota (neste caso muito maior que o eletrodo) pelas forças eletromagneticamente induzidas do plasmas, e sua instabilidade de transferência e trajetória para a poça de fusão.

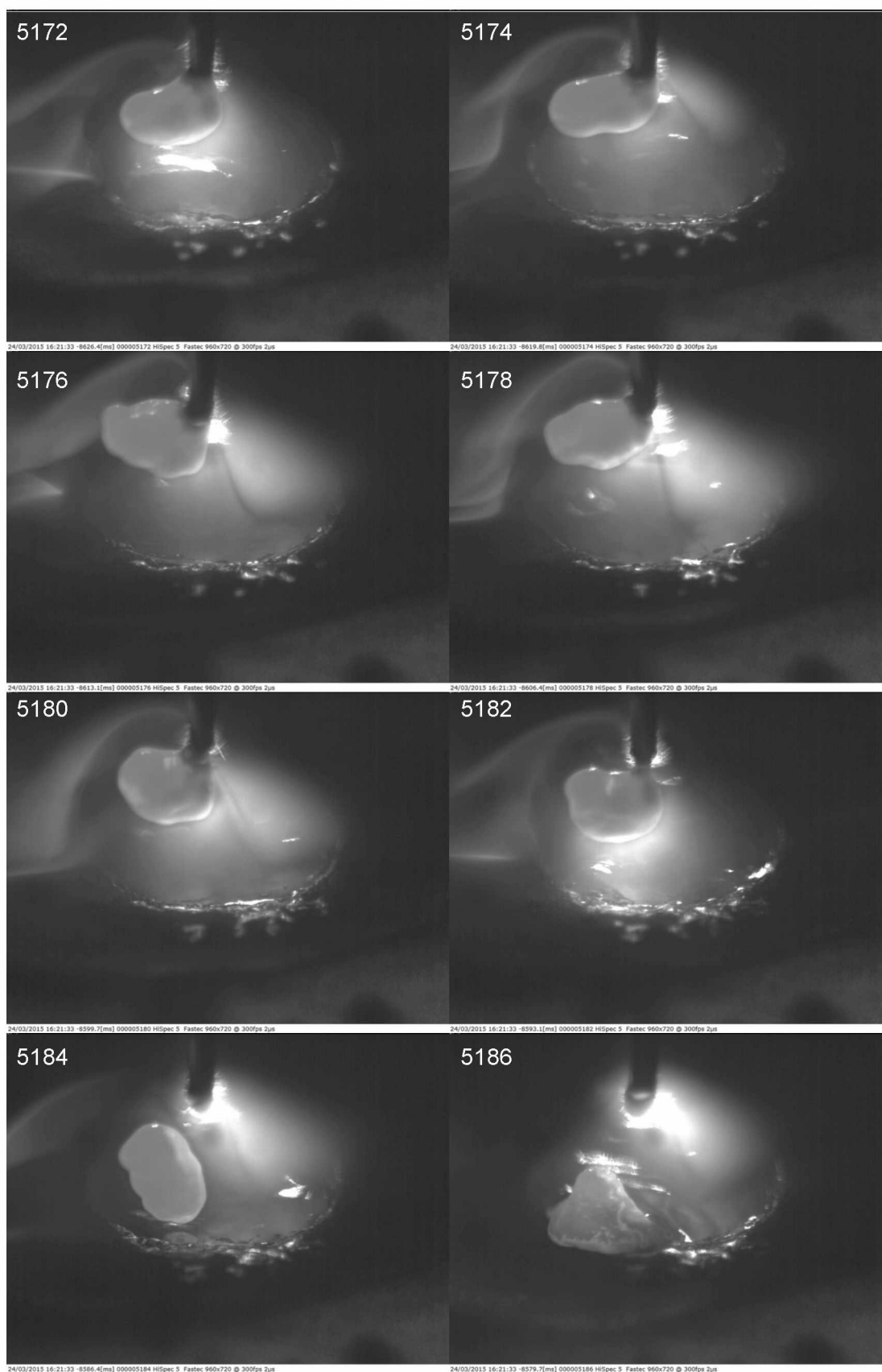


Figura 5.65 - Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência globular (28,5 V, 170 A) em 300 FPS.

#### 5.2.4 Soldagens com o Uso de Fibra Óptica

Como citado no item anterior, os testes com o uso de fibra óptica foram realizados como uma etapa subsequente da validação do ViaSolda em soldagens com filmagens em velocidade nominal e alta (300 Hz). Desta forma, substitui-se a emissão direta da iluminação no NIR e pelo uso da fibra óptica para tal. Mantiveram-se os mesmos parâmetros de soldagem, de montagem experimental e de ajustados do sistema de visão, realizando também filmagens em duas velocidades.

##### 5.2.4.1 Transferência por Curto Circuito

Os valores elétricos de tensão e corrente médios foram observados para cada experimento de soldagens MIG/MAG convencional com transferência por curto circuito, assim como os valores calculados de índice de regularidade (IVcc) e frequência média de curto circuito (Fcc) para filmagens em baixa e alta velocidade com o uso de fibra óptica são resumidos na Tabela 5.17.

Tabela 5.17. Valores médios dos sinais elétricos observados nos processos com transferência por curto circuito com o uso de fibra óptica.

Parâmetros	FPS (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	Valim (m/min)	IVcc	Fcc (Hz)
CC1	30	90	17,9	1,94	0,577	20,92
	300	91	17,9	1,94	0,534	21,95
CC2	30	127	17,2	2,67	0,437	53,49
	300	127	17,2	2,69	0,331	52,99
CC3	30	160	16,8	3,52	0,735	83,44
	300	160	16,8	3,52	0,701	83,71
CC4	30	204	16,1	4,98	0,681	100,95
	300	199	16,2	4,96	0,897	96,96

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência por curto circuito, para velocidade nominal e máxima com o uso de fibra óptica, são mostradas na Figura 5.66 à Figura 5.69. A título de obtenção de escala, sempre considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm. Todas as imagens obtidas neste ponto foram obtidas com o diafragma na mesma abertura (f/4).

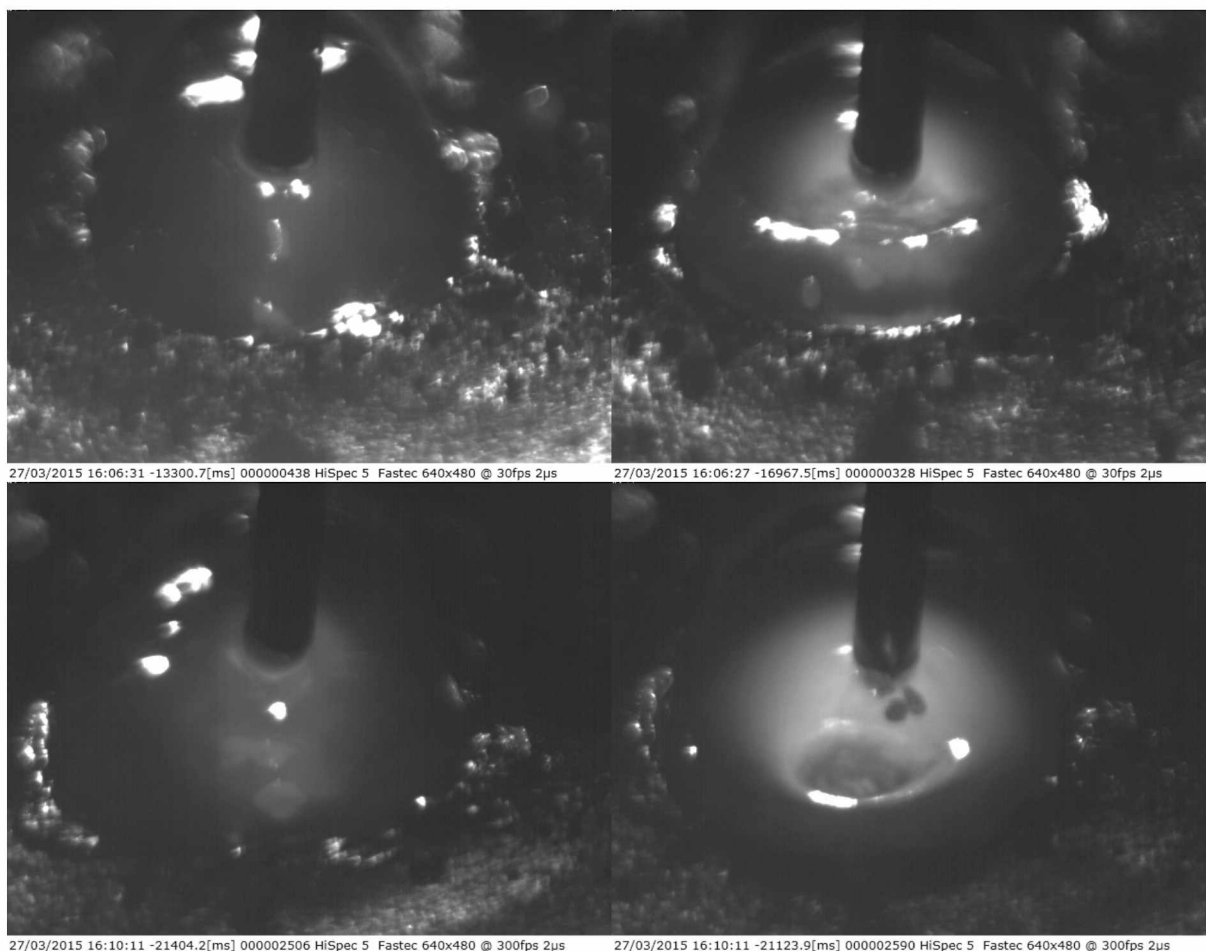


Figura 5.66 - Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (90 A, 21 Hz) em 30 (cima) e (91 A, 22 Hz) 300 (baixo) FPS.

Inicialmente, é possível observar que a fibra óptica, como esperado, aumentou a densidade luminosa sobre a região de interesse, resultando em imagens com maior clareza, nitidez e contraste, para todas as condições aqui apresentadas.

Nos experimentos de velocidade nominal, a intensidade luminosa mostrou-se forte o suficiente para saturar os pixels no CCD da câmera à frente da chapa e certos pontos da superfície reflexiva da poça fundida onde o diodo é refletido de forma máxima. Nesse caso, a imagem seria adquirida com maior qualidade ainda se diminuísse a abertura mecânica do diafragma (por exemplo, para 5,6). Nos experimentos de velocidade alta (300 FPS), as imagens se tornaram mais claras e mais adequadas ao uso posterior.

Todas as imagens foram consideradas com homogeneidade, qualidade e nitidez adequadas para a visualização e o estudo do processo. O teste com corrente mediana, 127 A, mostrou-se com a melhor qualidade para as imagens de baixa velocidade com essa configuração do sistema, e o teste de maior intensidade de corrente, 202 A, mostrou-se com a melhor qualidade de imagem em geral quando obtidas em alta velocidade.

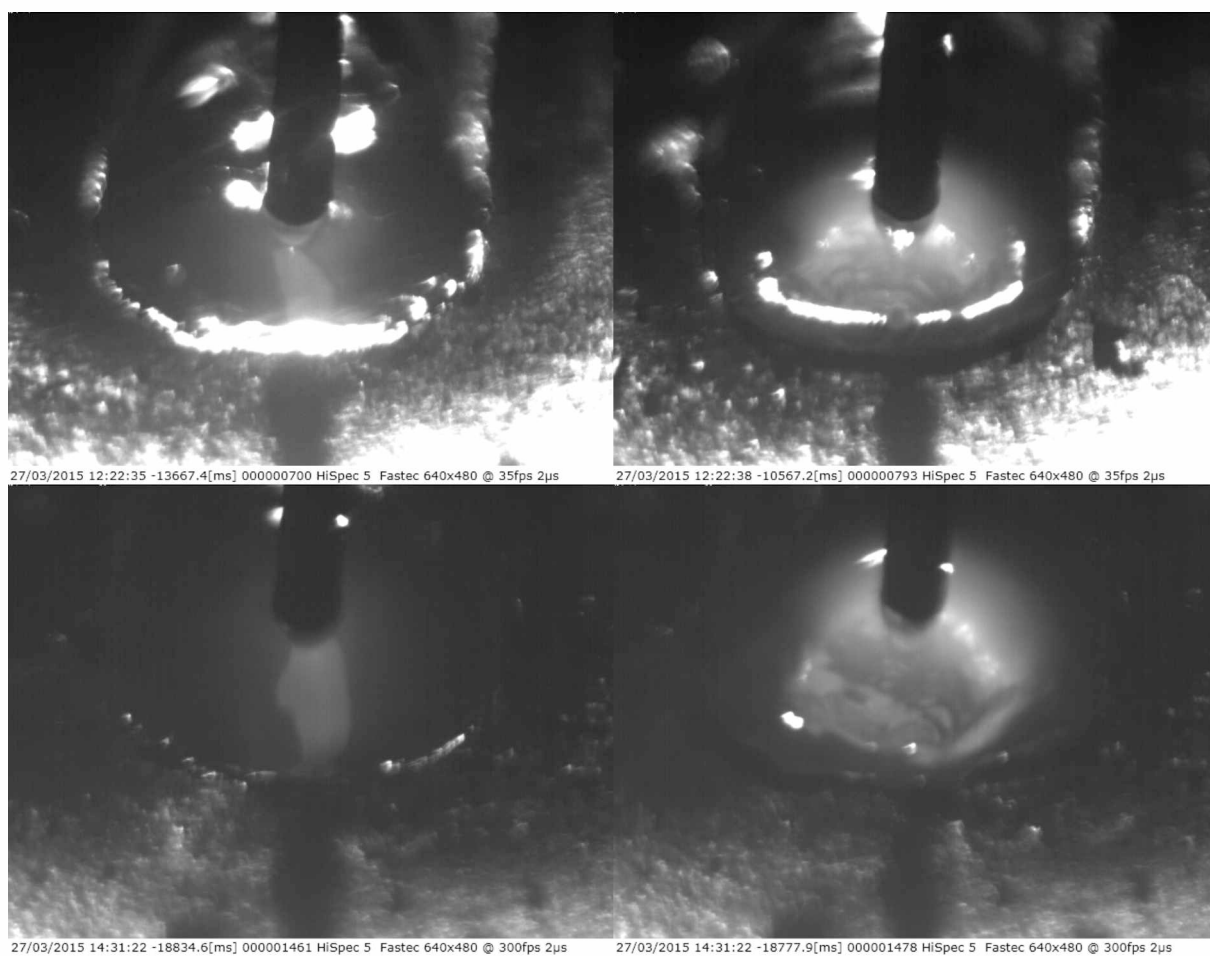


Figura 5.67 – Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (127 A, 53 Hz) em 30 (cima) e (127 A, 53 Hz) 300 (baixo) FPS.

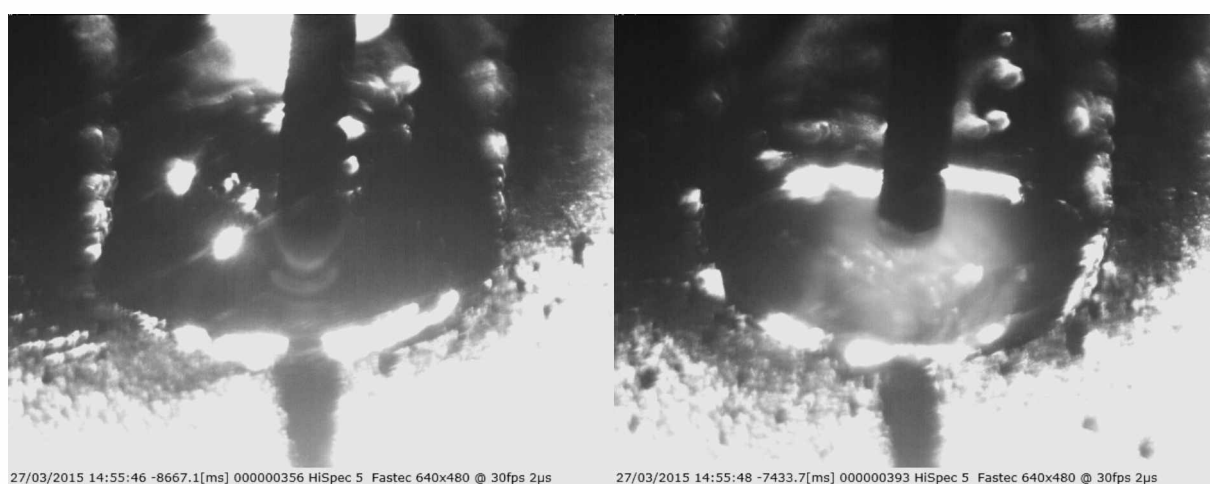




Figura 5.68 – Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (160 A, 83 Hz) em 30 (cima) e (160 A, 84 Hz) 300 (baixo) FPS.

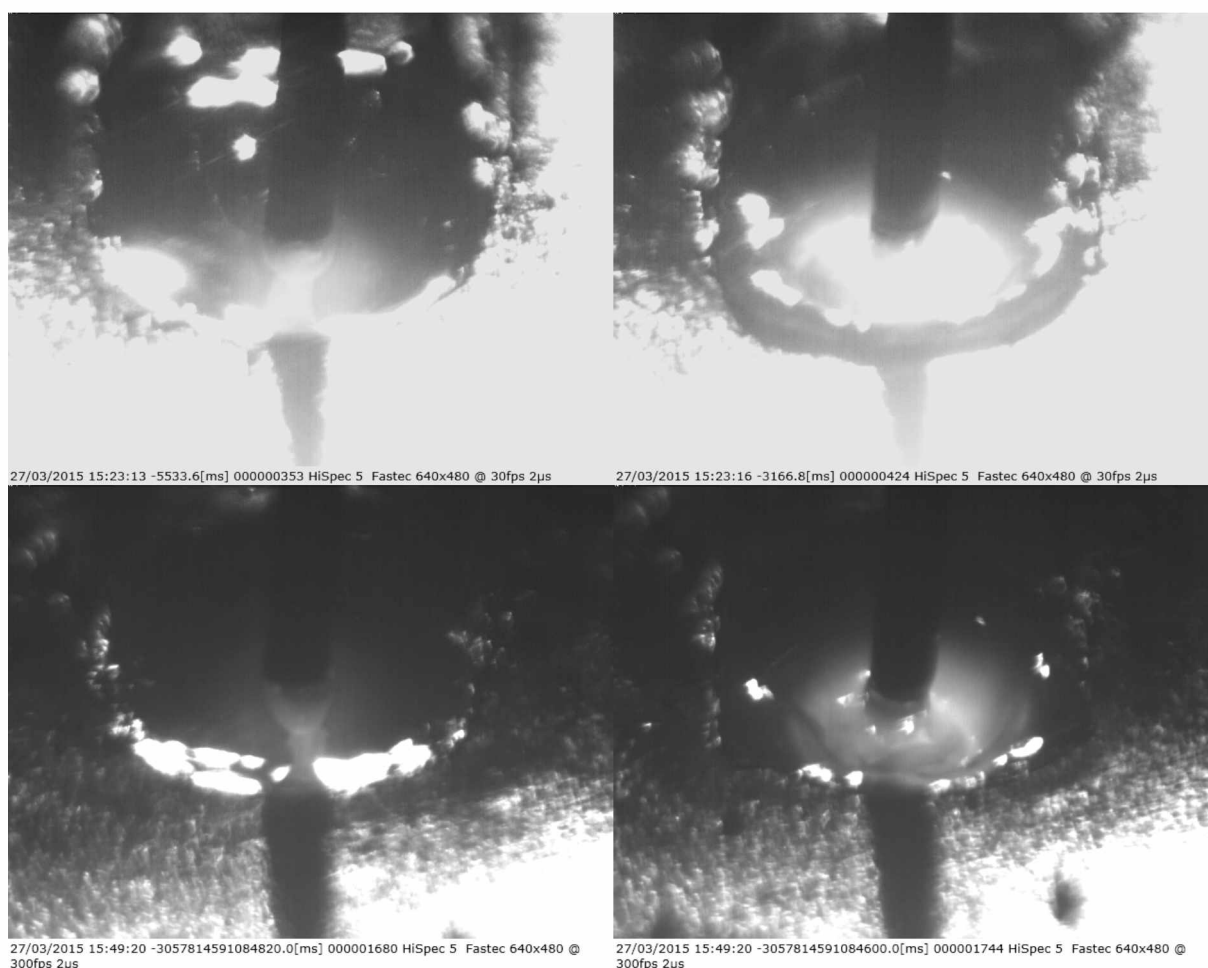


Figura 5.69 – Imagens obtidas pelo ViaSolda em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (204 A, 101 Hz) em 30 (cima) e (199 A, 96 Hz) 300 (baixo) FPS.

Imagens subsequentes retiradas de cada condição são apresentadas na Figura 5.70 à Figura 5.73. Como escala de tempo deve-se considerar que, entre quadros há uma diferença de 3,33 ms e, portanto, a sequência de imagens mostradas ocorre em um intervalo de tempo de 16,67 ms.

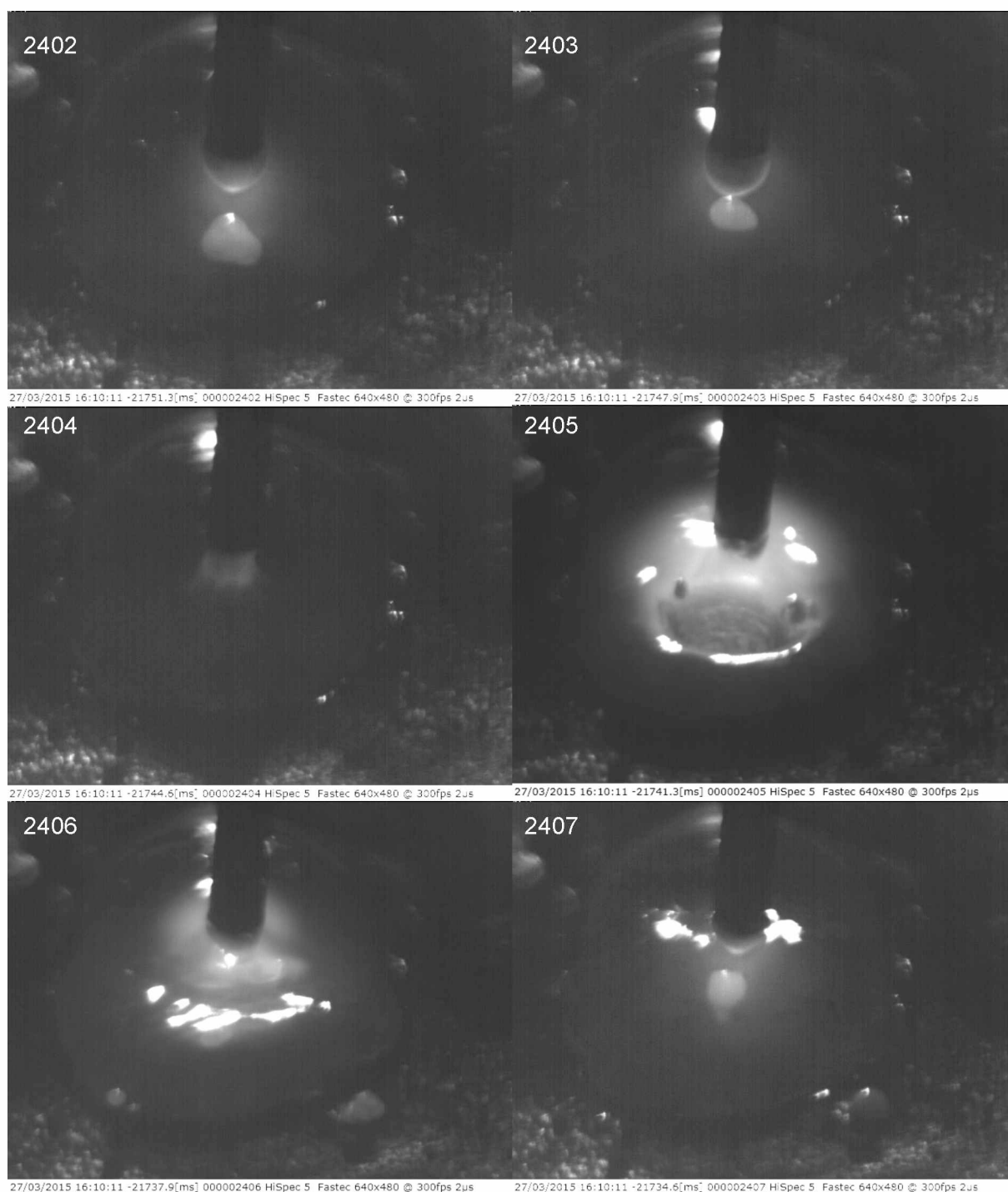


Figura 5.70- Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda com uso de fibra óptica em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (90 A, 21 Hz) em 300 FPS.



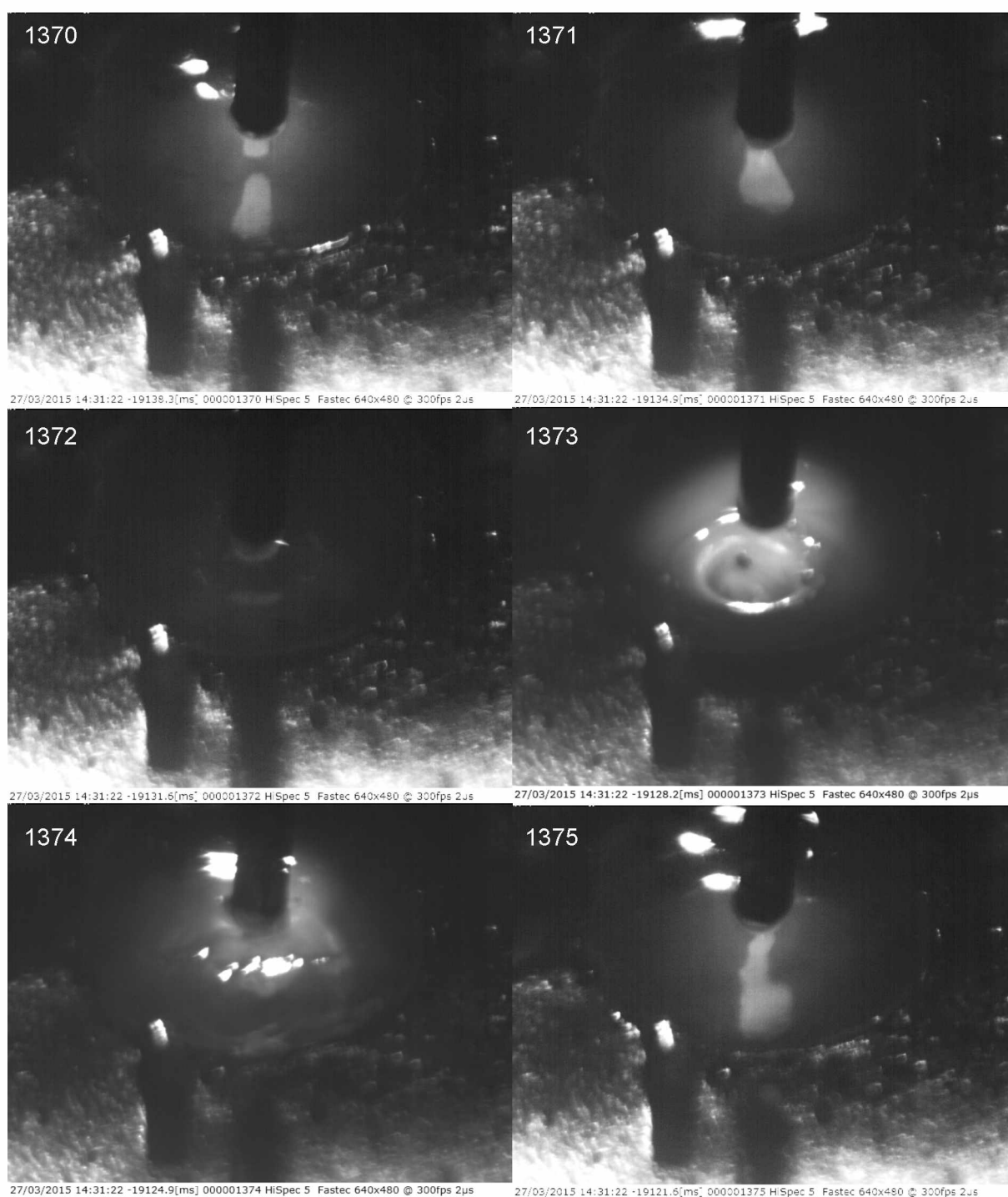


Figura 5.71 – Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda com uso de fibra óptica em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (127 A, 53 Hz) em 300 FPS.

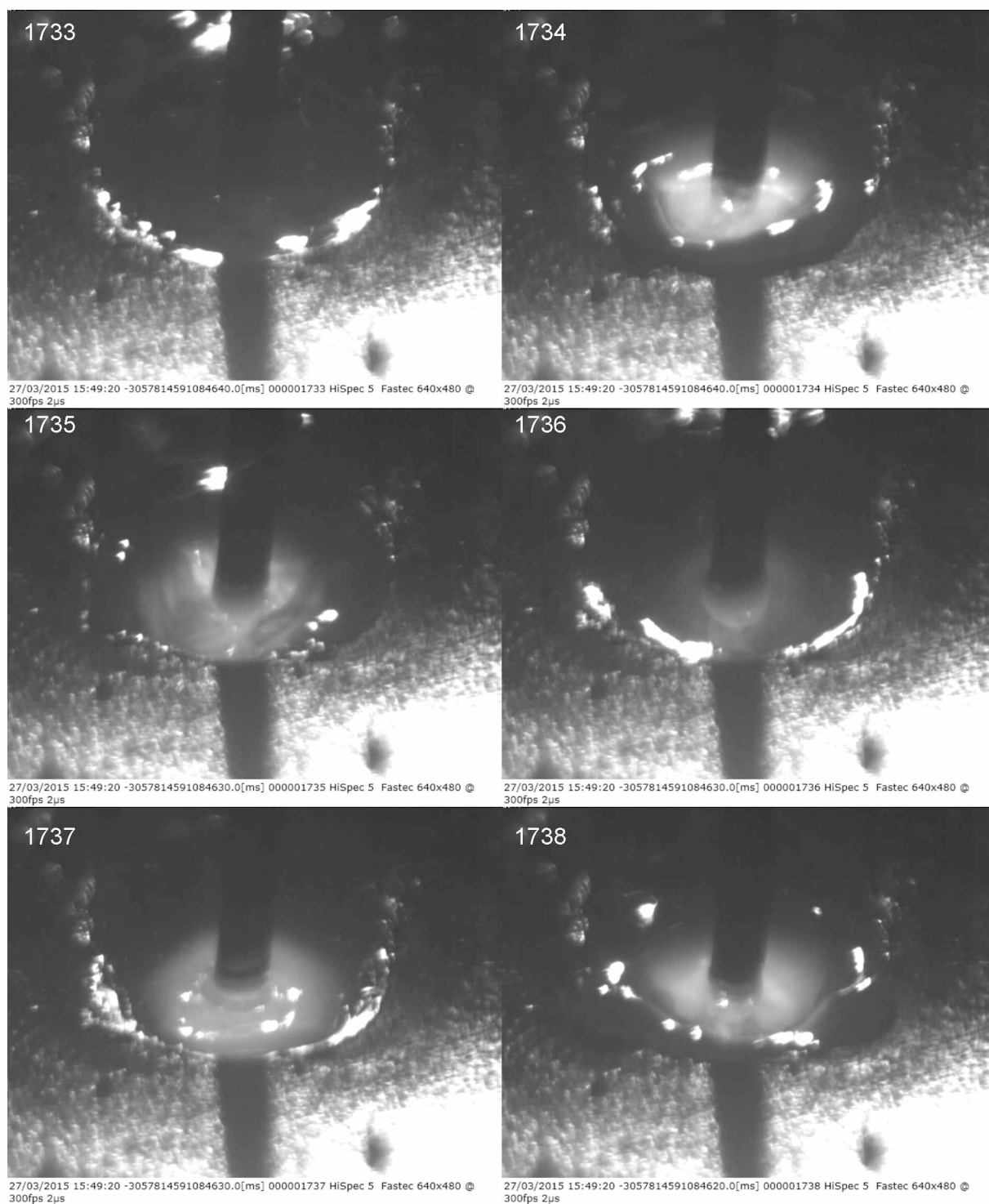


Figura 5.72 – Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda com uso de fibra óptica em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (160 A, 84 Hz) em 300 FPS.

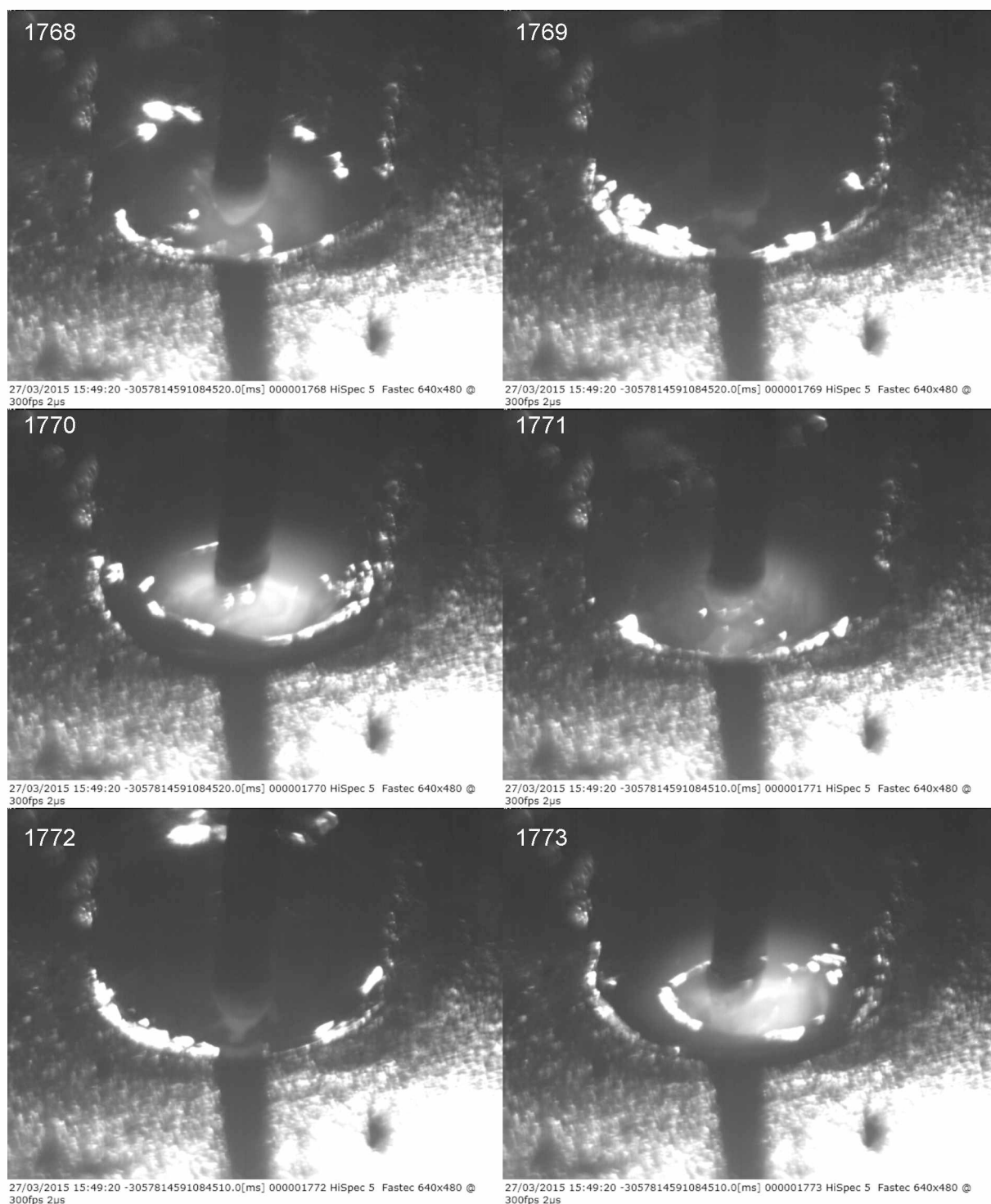


Figura 5.73 – Sequência de imagens obtidas pelo ViaSolda com uso de fibra óptica em soldagens MIG/MAG com transferência por curto circuito (199 A, 96 Hz) em 300 FPS.

A fibra óptica provou-se um acessório essencial para a obtenção de imagens em alta velocidade com maior qualidade, nitidez e contraste, sendo possível observar as nuances da transferência metálica por curto circuito, ou seja, os momentos de toque da gota na poça, de reignição do arco, de ação da tensão superficial, entre outros, principalmente nas

frequências de curto circuito mais baixas. Mesmo no caso de maior frequência, porém, é possível observar o fenômeno de abertura e fechamento do arco. Um estudo adicional com sincronia das imagens com os sinais elétricos é necessário, porém, para o aprofundamento das conclusões no tema.

Por fim, tendo em vista o êxito no aumento da densidade luminosa como o uso de fibra óptica, principalmente em velocidade nominais de aquisição de imagens, onde a superfície da chapa atinge saturação máxima para soldagens com transferência por curto circuito, repetiu-se o ajuste de parâmetros da condição de curto-circuito com corrente alta (3,0 m/min, 20 V, 157 A) com a iluminação provida da fibra óptica apenas com os 9 diodos laser centralizados. O comparativo é ilustrado na Figura 5.74.

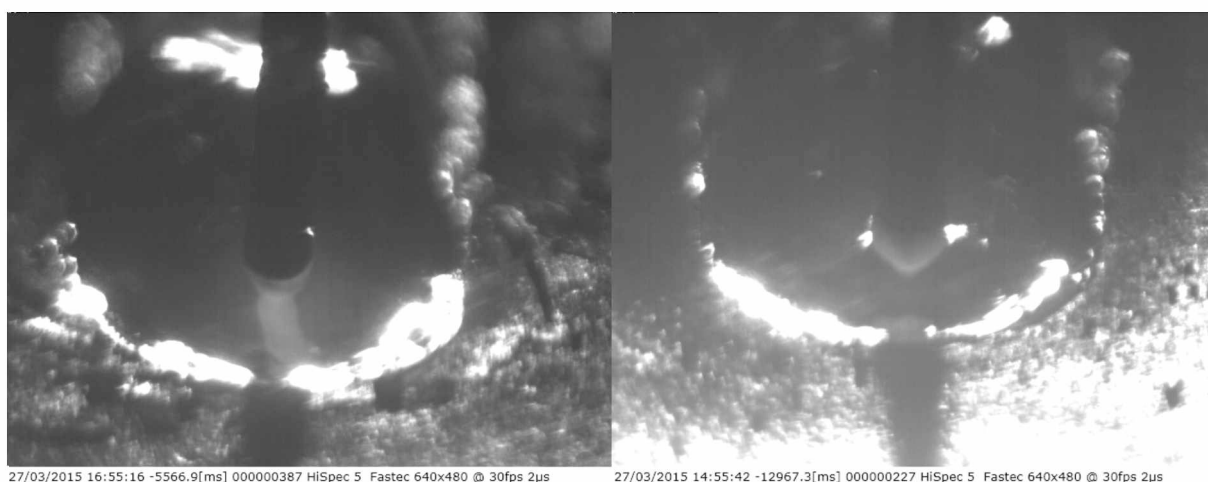


Figura 5.74 – Comparativo de diodos laser em 30 FPS: 9 (esquerda) e 19 (direita).

Apesar de perder a intensidade luminosa, o conjunto de 9 diodos laser em conjunto com a fibra óptica é capaz de sobrepor o arco e iluminar a região ao redor da junta de forma satisfatória. Este resultado é determinante na escolha da distribuição dos diodos laser nos requisitos e projeto do sistema guiado sem fio. Considerando que se consiga replicar as condições de acionamento em alta baixa e alta frequência, a ideia de se utilizar conjuntos de 9 diodos laser, traz flexibilizações ao sistema, principalmente em filmagens de baixa intensidade luminosa do arco, que serão discutidas no tópico pertinente ao assunto (6.3.3).

#### 5.2.4.2 Transferência Voo Livre

Os sinais elétricos de tensão e corrente médios foram observados para cada experimento de soldagens MIG/MAG convencional com transferência por curto circuito e filmagens em baixa e alta velocidade com o uso da fibra óptica e são resumidos na Tabela 5.18.

Tabela 5.18. Valores médios dos sinais elétricos observados nos processos com transferência por voo livre com o uso de fibra óptica.

Parâmetros	Transferência	FPS (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	Valim (m/min)
VL1	Globular	30	172	28,5	3,6
		300	172	28,5	3,62
VL2	Goticular	30	247	27,2	7,1
		300	254	27,2	7,2
VL3	Com alongamento	30	316	30,2	8,81
		300	312	30,3	8,84

Exemplos de imagens obtidas pelo sistema de visão para o processo MIG/MAG com transferência em voo livre, para velocidade nominal e máxima com o uso de fibra óptica, são mostradas na Figura 5.75 à Figura 5.73. A título de obtenção de escala, sempre considerar o diâmetro do arame de 1,2 mm. As condições globular e goticular foram realizadas com diafragma em 5,6 e a goticular com alongamento em 4.

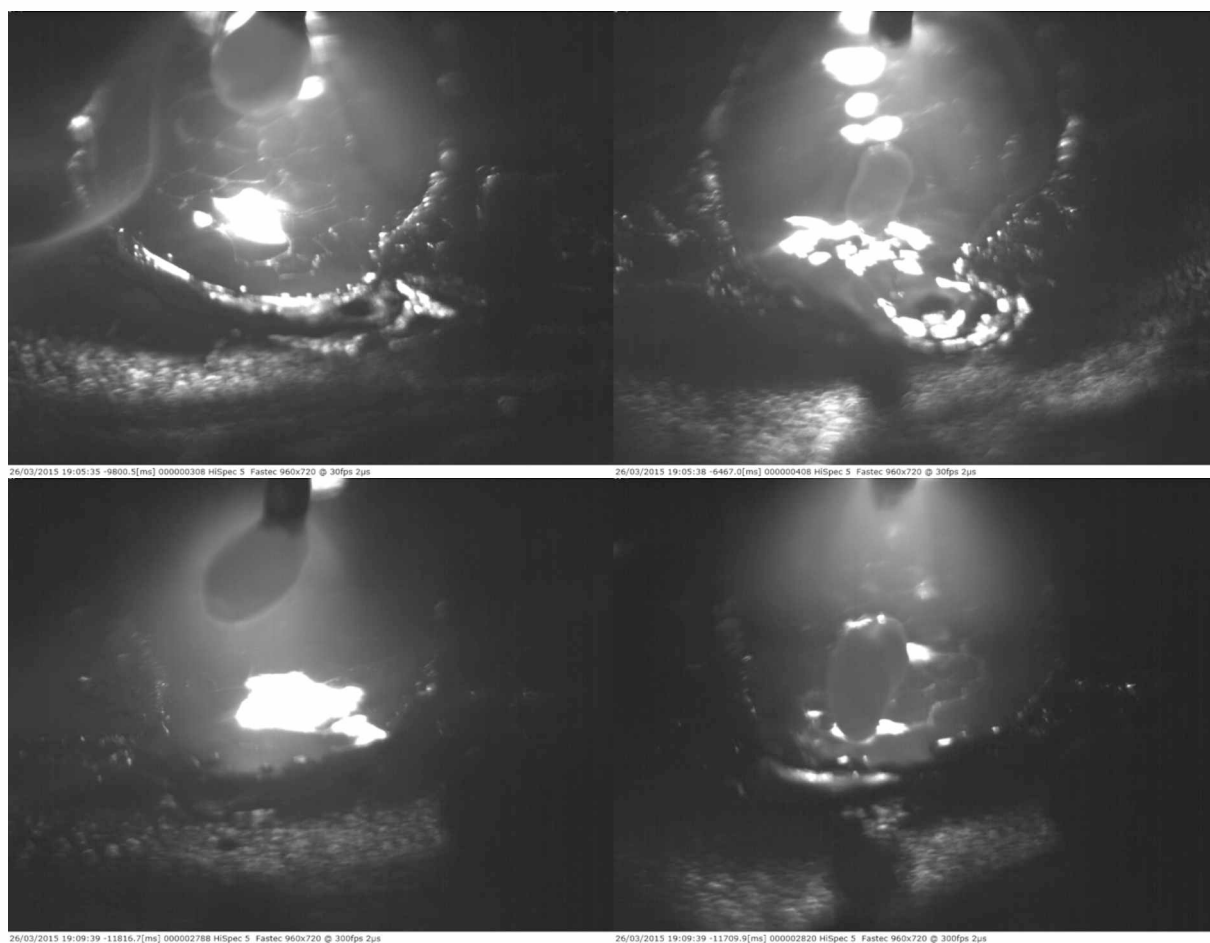


Figura 5.75 - Imagens obtidas pelo ViaSolda com uso de fibra óptica em soldagens MIG/MAG com transferência por voo livre globular (28,5 V, 172 A) em 30 (cima) e 300 (baixo) FPS.

Assim como ocorreu na validação em transferências por curto-circuito, a inserção da fibra óptica apresentou resultados com melhor qualidade, maior nitidez e com boa visualização da poça e seus arredores, quase sem nenhuma interferência do arco, para todas as condições estabelecidas de transferência em voo livre. Para a transferência globular é possível observar com maior nitidez a poça fundida e a instabilidade de sua formação pelo formato e transferência da gota.

As imagens obtidas com a transferência goticular mostraram-se de melhor qualidade de contraste e nitidez para aquisição de imagens em velocidade nominal enquanto a transferência em voo livre goticular com alongamento mostrou melhor qualidade de imagens em velocidade alta.

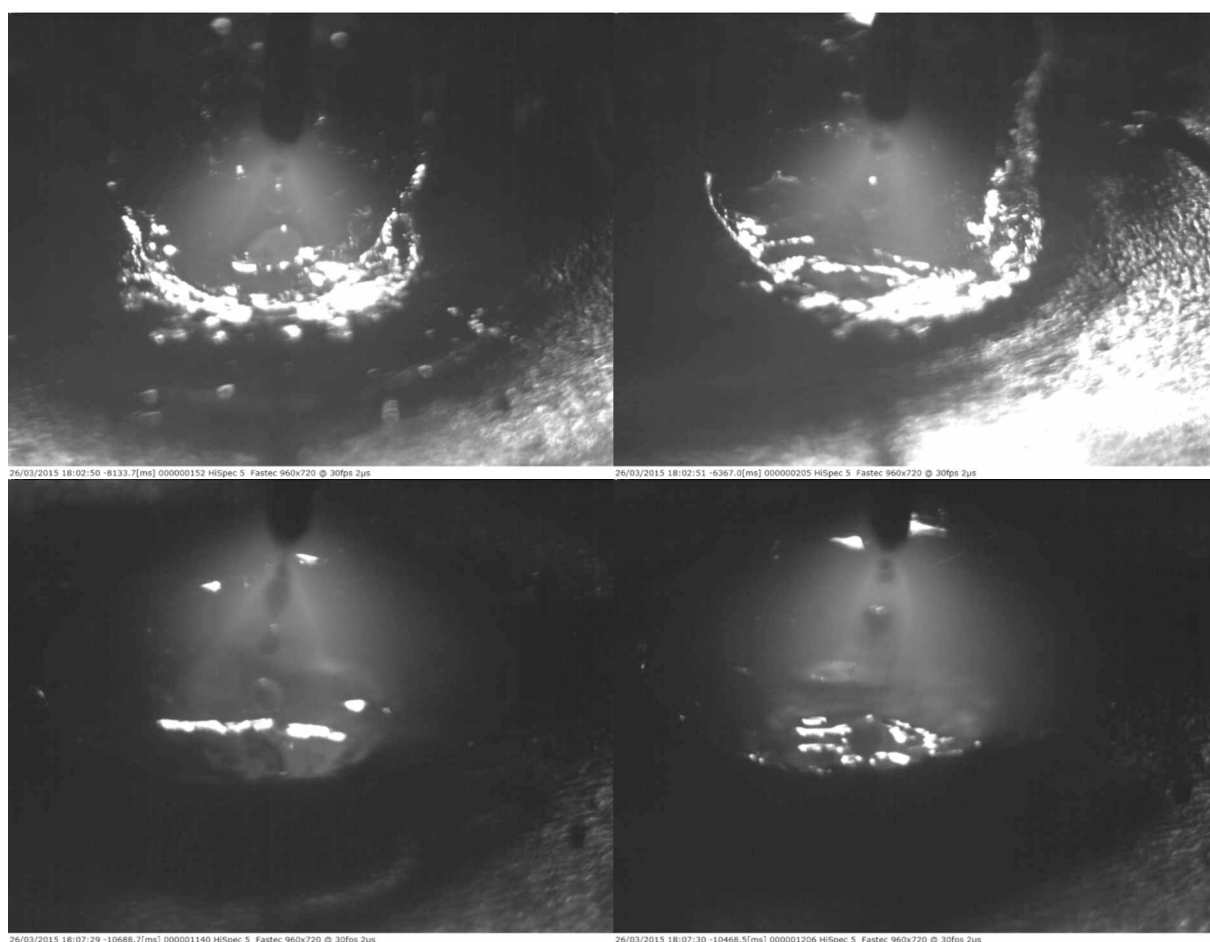


Figura 5.76 – Imagens obtidas pelo ViaSolda com uso de fibra óptica em soldagens MIG/MAG com transferência por voo livre goticular (27,2 V, 247 A) em 30 (cima) e 300 (27,2 V, 254 A) (baixo) FPS.

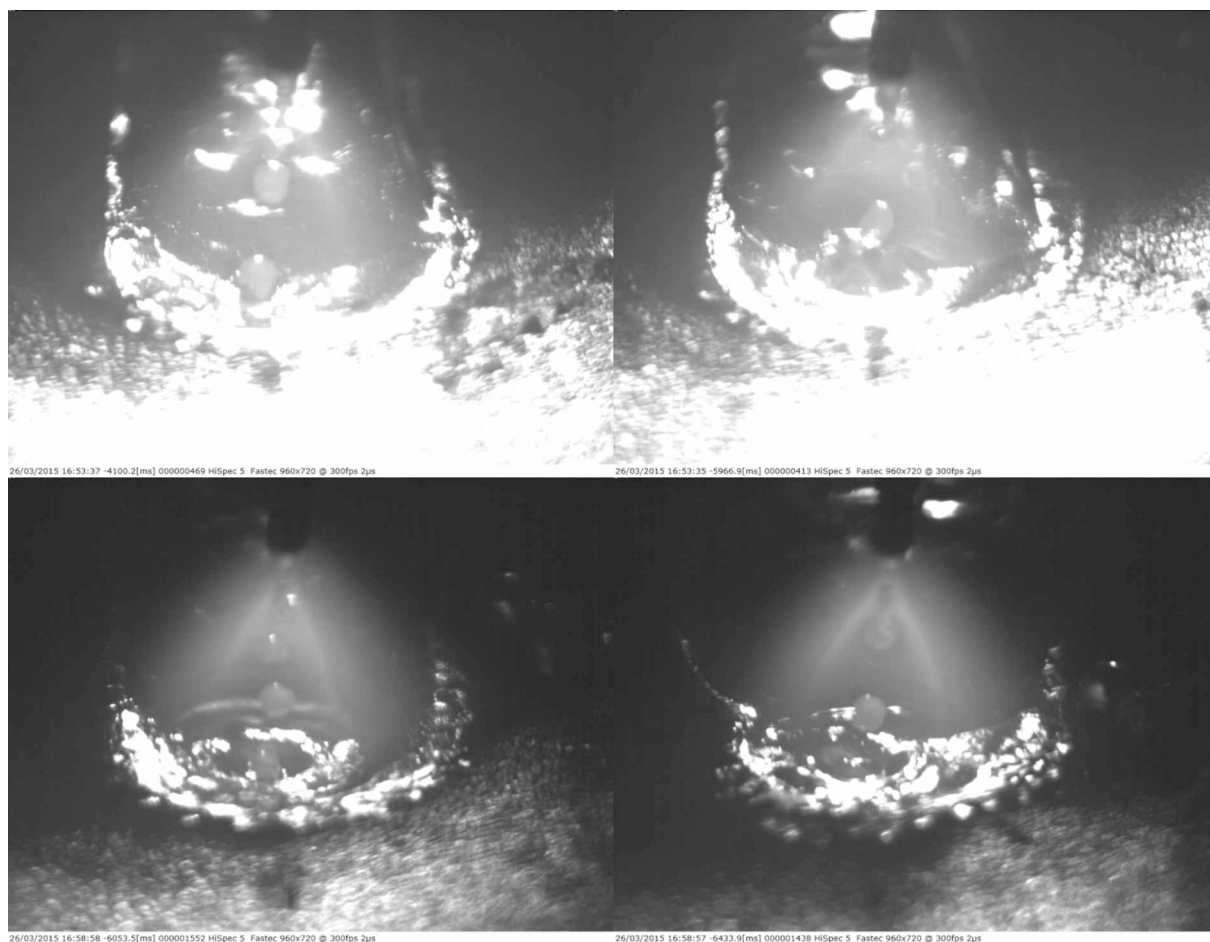



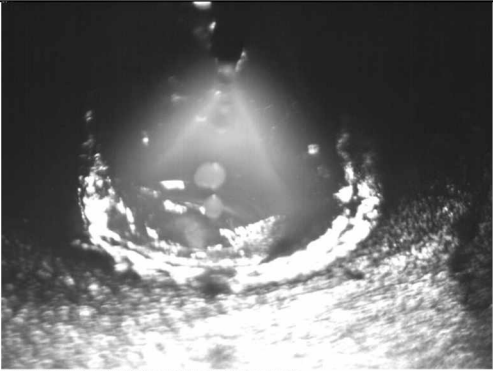


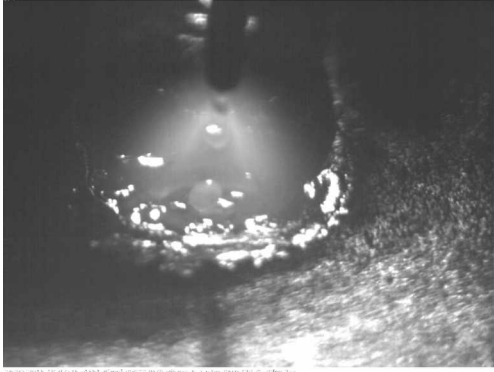


Figura 5.77 – Imagens obtidas pelo ViaSolda com uso de fibra óptica em soldagens MIG/MAG com transferência por voo livre goticular com alongamento (30,2 V, 316 A) em 30 (cima) e (30,3 V, 312 A) 300 (baixo) FPS.

Até este ponto, pouco se discutiu sobre a influência da abertura do diafragma sobre a qualidade das imagens com o ViaSolda. Para os testes apresentados anteriormente, procurou-se manter a mesma abertura do diafragma para facilitar o comparativo da intensidade luminosa do diodo laser presente na imagem. Porém, em busca do entendimento para se obter melhor qualidade de imagem em geral, replicou-se o ajuste dos parâmetros de transferência em voo livre goticular com alongamento para diferentes aberturas do diafragma e ambas velocidades de aquisição de imagens. Os resultados são apresentados na Tabela 5.19, abaixo.



Tabela 5.19 – Comparativo de abertura do diafragma em imagem do ViaSolda.

Diafragma	30 FPS	300 FPS
f/4	 <small>26/03/2015 14:30:47 -0633.5[ms] 00000303 HiSpec 5 Fastec 960x720 @ 30fps 2x4</small>	 <small>26/03/2015 16:45:21 -0235.6[ms] 00002433 HiSpec 5 Fastec 960x720 @ 300fps 2x4</small>
f/5.6	 <small>26/03/2015 16:53:34 -7233.7[ms] 00000375 HiSpec 5 Fastec 960x720 @ 300fps 2x4</small>	 <small>26/03/2015 16:58:59 -4006.62[ms] 00002570 HiSpec 5 Fastec 960x720 @ 300fps 2x4</small>
f/8	 <small>26/03/2015 16:53:34 -7233.7[ms] 00000375 HiSpec 5 Fastec 960x720 @ 300fps 2x4</small>	 <small>26/03/2015 17:14:54 -5603.7[ms] 00011386 HiSpec 5 Fastec 960x720 @ 300fps 2x4</small>
11	 <small>26/03/2015 17:15:15 -7233.7[ms] 00011386 HiSpec 5 Fastec 960x720 @ 300fps 2x4</small>	----

Enquanto o tempo de abertura, ou *shutter*, é o responsável por abrir o sensor CCD e deixar apenas por um breve momento a passagem da luz, o diafragma controla a quantidade de luz que chega ao obturador, deixando um passagem maior (f/4) ou menor

(f/11). Este dispositivo funciona como a íris da câmera e tem um papel fundamental para a fotografia: controlar a profundidade de campo. A profundidade de campo é a área capaz de estar completamente focada em uma imagem. Quanto menor a abertura do diafragma, maior será a profundidade de campo.

Considerando que o processo de soldagem é um fenômeno dinâmico que envolve o movimento da chapa, o destacamento de gotas, o formato variável destas gotas (principalmente na transferência globular), e flutuação e mudança de formato de poça fundida, quanto maior a profundidade de campo possível, maior será a quantidade de fenômenos que poderão ser visíveis com nitidez na imagem.

Este ponto traz uma conclusão importante para a visualização de processo de soldagem: quando mais concentrado o sistema de iluminação for, mantendo a mesma potência luminosa, maior será a possibilidade de fechar-se o diafragma da câmera, e portanto, melhor será a nitidez da imagem como um todo. É um esforço infrutífero colocar um sistema de iluminação com um número elevado de diodos laser, por exemplo, se não for possível projetá-los de forma concentrada sobre a região de interesse e, por consequência, na câmera.

### **5.3 Considerações Finais**

Tendo em vista que o desenvolvimento de um novo protótipo do sistema de visão, com otimização da topologia de acionamento dos diodos laser e estudo aprofundado e extensivo sobre suas limitações e aplicações em soldagens diversas, é uma etapa primordial para estabelecer-se requisitos realistas para o desenvolvimento de um sistema guiado sem fio para soldagens mecanizadas, apresentam-se as seguintes conclusões e considerações finais:

- A topologia de pulso quadrado aumentou a capacidade emissora do mesmo conjunto de diodos laser utilizados anteriormente com a topologia ressonante (19 diodos), de forma robusta, de simples construção e controle eletrônico;
- Deve-se precaver no uso da topologia de pulso quadrado em relação ao isolamento do sistema como um todo da rede, preferivelmente utilizando-se de fontes chaveadas ou isoladas e um computador com fonte isolada da rede (como um notebook);
- A topologia quadrada é robusta para acionamentos de alta frequência, sem distinção de funcionamento mesmo a acionamentos em 1 kHz. O elemento limitador é, com certeza, o diodo laser e estabeleceu-se a frequência máxima de acionamento sem perda considerável de eficiência em 300 Hz.

- Estudos investigativos provaram que, mesmo com acionamentos em 1 kHz, não há queima do diodo laser. Porém o aquecimento de sua junção PN provoca queda na eficiência de emissão NIR do diodo, perdendo sua aplicabilidade para visualização de processos de soldagem;
- Validou-se o protótipo ViaSolda Pulso quadrado em soldagens TIG, TIG Pulsado, MIG/MAG com transferência por curto-circuito, curto-circuito controlado (STT, RMD e CMT), em voo livre (globular, goticular e com alongamento), com valores de tensão de até 33 V e correntes de até 310 A, gases CO<sub>2</sub> puro, Ar + 25% CO<sub>2</sub>, Ar + 8% CO<sub>2</sub> e Ar + 5% O<sub>2</sub>, em filmagens de baixa (30 FPS) e altas velocidades (300 FPS);
- A fibra óptica foi capaz de aumentar a densidade luminosa na região de interesse de forma eficaz, melhorando a nitidez e qualidade em geral das imagens;
- Um conjunto de 9 diodos laser é capaz de prover luz suficiente para a sobreposição do arco, em soldagens com menor intensidade luminosa quando utilizado em conjunto com a fibra óptica;
- Quanto maior a concentração da fonte de luz, menor poderá ser a abertura do diafragma e, por consequência, maior a área com nitidez que será observável na região da poça de fusão.

## CAPÍTULO VI

### PROJETO DO SISTEMA GUIADO SEM FIO – VIASOLDA WEB

#### 6.1 Requisitos do sistema

O objetivo final deste trabalho é um sistema guiado sem fio para soldagem mecanizada supervisionada, através do uso de monitoramento com auxílio visual e uso de iluminação por infravermelho próximo. Desta forma, além do sistema de iluminação pelo uso de diodos laser em sincronia com a obtenção de imagens, que compõe o que se pode chamar de sistema de visão (ou ViaSolda), deve-se desenvolver um meio para o envio de imagens e do controle de movimentação da tocha de soldagem por comunicação sem fio.

Ao longo da evolução das etapas anteriormente descritas, resultados e considerações importantes, como a eficiência do uso de fibra óptica nas validações em soldagem, afetaram diretamente a estrutura da proposta inicial do sistema guiado sem fio. Uma limitação enfrentada para o uso de apenas um sistema embarcado com dados totalmente sem fio se encontrava no envio de imagens da câmera analógica. Porém, um dispositivo *encoder*, que captura imagens analógicas e as transforma em um dispositivo IP (GXV3500) foi descoberto no mercado e adicionado como hardware. Desta forma, é possível eliminar o computador como dispositivo mestre, substituindo-o apenas por um MCU, deixando o sistema completamente embarcado.

A Figura 6.1 resume graficamente a proposta final de desenvolvimento do sistema guiado sem fio para soldagens mecanizadas com uso de iluminação no infravermelho próximo, chamado aqui de ViaSolda Web. O sistema possui controle totalmente embarcado das funções do controle do sistema e visão (iluminação por diodos laser e câmera) e do movimento da tocha em seus três eixos e envio da imagem pelo codificador IP, com acesso e controle remoto e todos os dispositivos ligados em uma única rede sem fio.

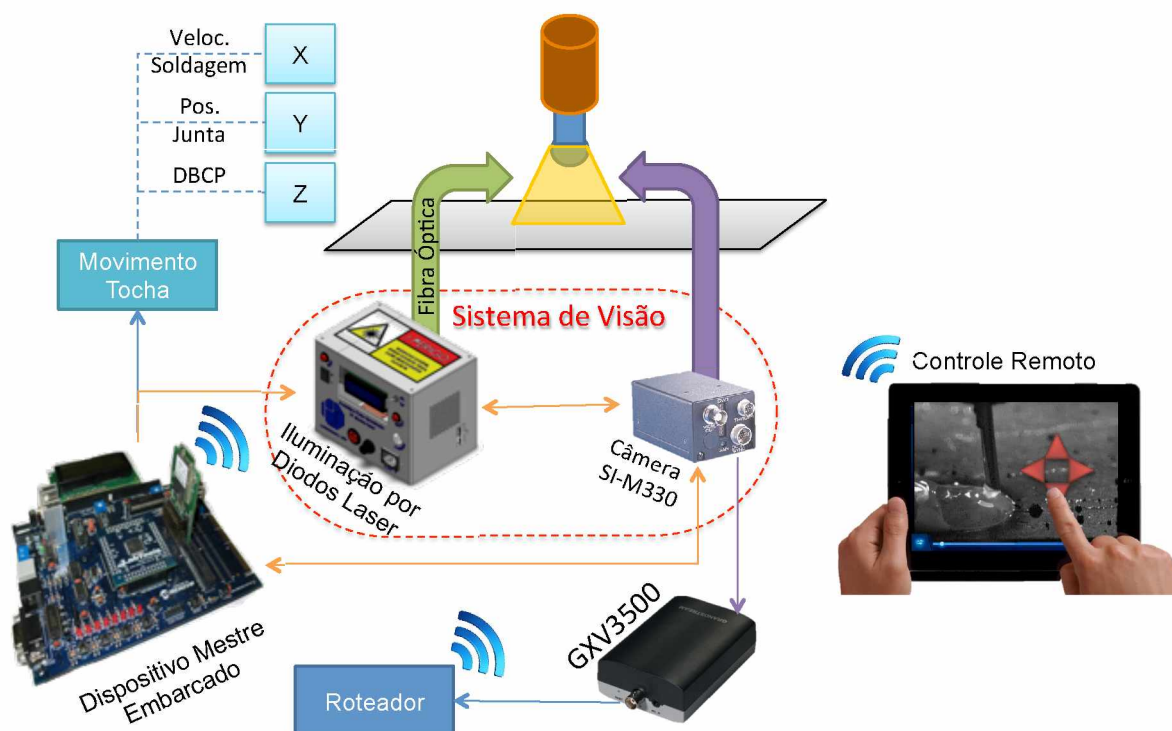


Figura 6.1 – Proposta final do Sistema Guiado Sem Fio ViaSolda Web.

Os requisitos específicos para cada funcionalidade do ViaSolda Web são detalhados a seguir:

- O ViaSolda Web é constituído pelos seguintes componentes principais: um dispositivo mestre embarcado, o sistema de visão contendo o circuito de iluminação por diodos laser no infravermelho próximo e a câmera analógica SI-M330, a concentração da fonte de iluminação através de uma fibra óptica e a conversão da imagem analógica para IP por um conversor;
- O dispositivo cliente, ou controle remoto, receberá a imagem da região de interesse (junta e seus arredores) e terá acesso ao controle de parâmetros e soldagem (velocidade de soldagem e DBCP) do movimento da tocha por uma IHM simples e clara;
- O envio sem fio do dispositivo mestre e do conversor IP ao dispositivo cliente de controle remoto se dá por comunicação Wi-Fi, ligados a uma rede aberta local dedicada (provida por um roteador). O conversor IP é conectado a rede sem fio através do roteador por um cabo Ethernet;
- O dispositivo mestre, um MCU embarcado que deve possuir interface com placa de comunicação Wi-Fi, controla os periféricos: topologia de acionamento de diodos laser, câmera analógica e movimento da tocha de soldagem;

- Para o controle de movimento da tocha de soldagem, atribuem-se três eixos distintos responsáveis pela variação dos parâmetros: velocidade de soldagem (eixo X), posição sobre a junta (eixo Y) e DBCP (eixo Z). Considera-se três conjuntos de motor de passo-*driver*, com entrada de trem de pulsos (PWM) para a velocidade de rotação e um bit para o sentido de rotação;
- A topologia de acionamento dos diodos laser e a câmera SI-M331 se comunicam através de dois cabos coaxiais, enviando e recebendo os sinais de sincronização *trigger* e *shutter*;
- O sistema de iluminação é composto em sua totalidade por 50 diodos laser de alta potência no infravermelho próximo, divididos em seis conjuntos individuais de 8 ou 9 diodos cada;
- Definiu-se, priorizando a segurança dos semicondutores, a topologia ressonantes para acionamento dos diodos laser, procurando-se manter a integridade da junção dos semicondutores. Assume-se o uso de duas chaves (Mais e Menos) para o controle de cada conjunto.
- Cada conjunto individual deve ser controlado de forma independente pelo dispositivo mestre, respeitando a sincronia com o momento da obtenção da imagem pela câmera;
- O dispositivo mestre deve conter forma de disparar a fonte de soldagem de forma automática.

## 6.2 ViaSolda Web – Dispositivo Mestre

O dispositivo mestre embarcado é o componente central do sistema guiado sem fio ViaSolda Web. Ele é composto, basicamente, por um *hardware* de controle, que deve ser capaz de se comunicar com todos os periféricos (movimento da tocha, câmera e iluminação por diodos laser), por um *firmware* de controle destes periféricos, de forma eficiente e independente, além de se comunicar de forma inteligente com a interface homem-máquina acessada pelo usuário através de uma página web (*webserver*).

A arquitetura geral do dispositivo mestre para sistema guiado de soldagem mecanizada com comunicação Wi-Fi, ilustrada na Figura 6.2, deve conter principalmente um microcontrolador capaz de controlar todas as funções necessárias (entradas e saídas digitais, contagem precisa e interdependente de tempo e funções PWM, e protocolos de comunicação), e uma interface com o usuário embutida na memória no sistema embarcado (dar informações diretas do funcionamento do sistema) e uma unidade de memória EEPROM para armazenamento da interface de visualização *webserver*.

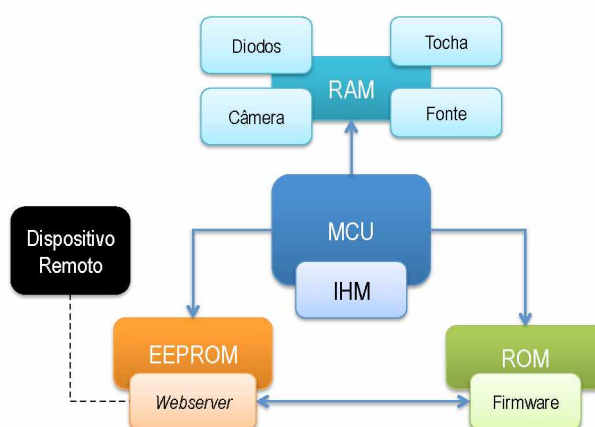


Figura 6.2 - Arquitetura geral do dispositivo mestre.

#### 6.2.1 Hardware de Controle Sem fio

Tendo em vista a restrição de tempo para o desenvolvimento de um sistema embarcado com tecnologia própria, recorreu-se ao uso de uma placa de desenvolvimento, a Explorer 16BR (FIALHO, 2008). Com possibilidade de integração com o módulo Wi-Fi e grande diversidade de periféricos disponíveis (Figura 6.3) com biblioteca diversas para *firmware*, a placa de desenvolvimento permite a escolha de alguns microcontroladores e garante funcionalidade do *hardware*.

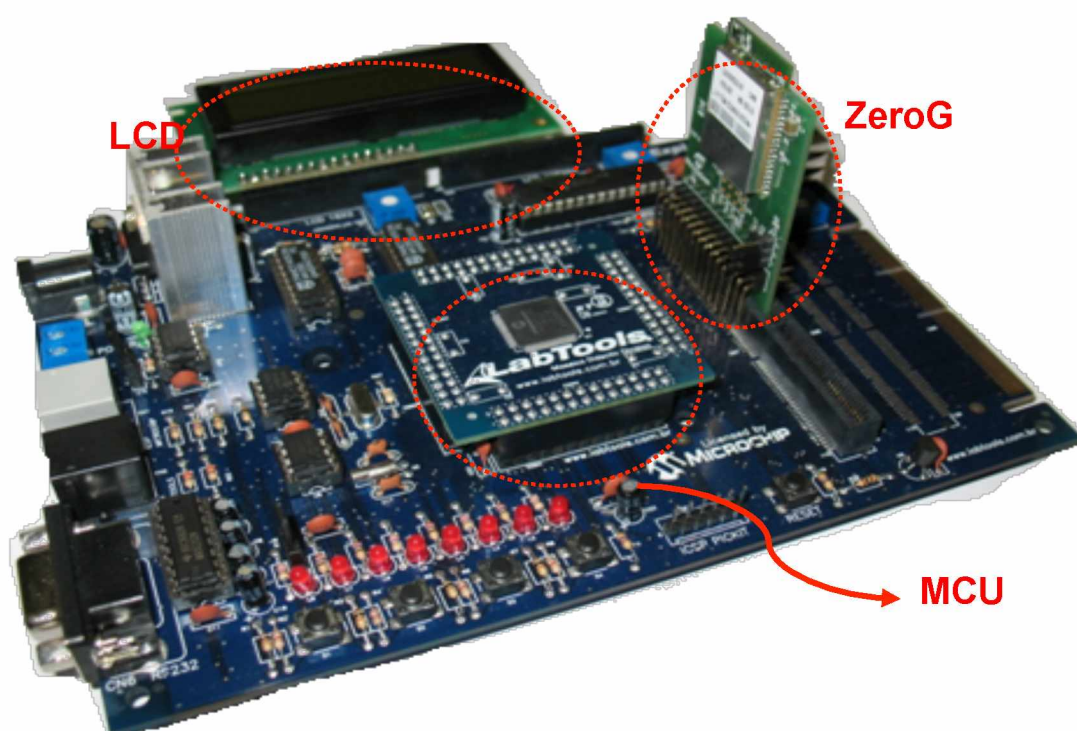


Figura 6.3 – ZeroG, MCU, LCD e outros periféricos integrados em Explorer 16BR.



O módulo Microchip ZeroG ZG2100M Wi-Fi PICtail Module é responsável pela comunicação sem fio WiFi, apresentando taxa de transferência de 2 Mbps e grande disponibilidade de documentação e referência para desenvolvimento de produtos. Este produto é desenvolvido para facilitar sua inserção em desenvolvimento com microcontroladores da Microchip (Microchip Inc., 2010), fabricante também de placas de desenvolvimento, com flexibilidade de escolha da arquitetura de acordo com sua aplicação.

Como pilha de comunicação, pela grande flexibilidade de uso em diferentes equipamentos, e pela facilidade de integração em diferentes plataformas, a pilha TCP/IP é integrante das bibliotecas disponíveis do fabricante do módulo Wi-Fi.

Outro ponto importante é a quantidade de memória de programa e de dados de acordo com o módulo de comunicação sem fios e a velocidade de processamento. Como o módulo de comunicação Wi-Fi já foi definido anteriormente, a Tabela 6.1 direciona a seleção de MCUs para uso com o dispositivo ZeroG ZG2100M em relação a sua eficiência de transmissão de dados.

Para a definição do microcontrolador, apesar da vasta diversidade de produtos comercialmente disponíveis, deve-se levar em conta a velocidade de processamento dos dados, a capacidade de armazenamento e de programação, a quantidade de pinos digitais de entrada e saída disponíveis, a quantidade de *timers* e PWMs e a resolução disponível no conversor A/D.

Tabela 6.1 – Desempenho da Pilha TCP/IP para diferentes MCUs (Microchip Technology Inc., 2010)

Microcontrolador	MIPS	Controlador de rede	Taxa de Transmissão(kbytes/sec)			
			TCP com (X) bytes na TX FIFO			UDP
			200	2000	8000	
PIC18F97J60	10.4	ZeroG ZG2100M	5	21	25	14
PIC24FJ128GA010	16	ZeroG ZG2100M	9	44	54	46
dsPIC33FJ256GP710	40	ZeroG ZG2100M	11	67	93	52
PIC32MX360F512L	80	ZeroG ZG2100M	12	66	94	53
PIC32MX795F512L	80	ZeroG ZG2100M	12	69	96	56

Notas: \* MIPS – Milhões de Instruções por Segundo; TX FIFO – Fila de Transmissão.

Considerando-se as características dos periféricos (*timer*, PWMs, etc) a velocidade de processamento e as quantidades de memória de programa e dados disponíveis em cada MCU, definiu-se o **dsPIC33FJ256GP710** como o dispositivo a ser utilizado. Sua eficiência de transmissão é equivalente a MCUs de maior poder de processamento, com um menor custo, e sua arquitetura de 16 bits (Microchip Technology Inc., 2007), o torna mais acessível quanto à programação, possuindo maior documentação e maior domínio público.

De uma forma geral, o hardware de controle do ViaSolda Web (Figura 6.4) deve possuir três saídas digitais para cada módulo de acionamento dos diodos laser – pulso para a chave Mais, pulso para chave menos e controle do relé de segurança –, uma entrada e uma saída digital para a comunicação com a câmera – saída do sinal de *trigger* e entrada do sinal de *shutter* – uma saída digital para o controle de disparo fonte de soldagem, três saídas PWMs e saídas digitais para controle de motores de passo – X, Y e Z – e seus sentidos, dois temporizadores independentes para contagem da base de tempo (FPS em 30 Hz) e contagem de tempo em alta frequência para pulsos das chaves (1  $\mu$ s), além da interface de comunicação com o usuário, memórias RAM e ROM suficiente para a execução do programa e memória EEPROM contendo o código fonte do servidor web e comunicação com módulo WiFi

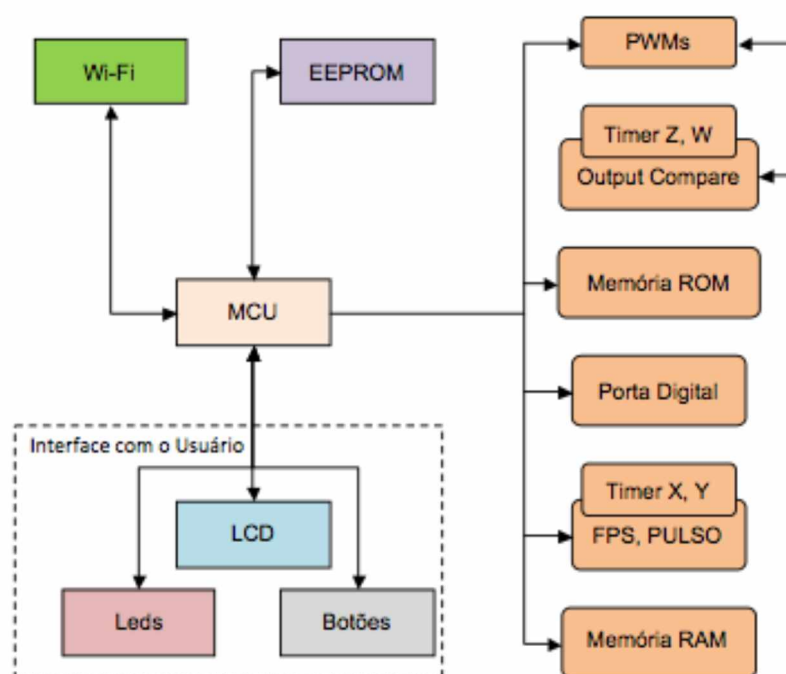


Figura 6.4 – Arquitetura do Hardware de Controle do ViaSolda Web.

Considerando-se a evolução do sistema guiado com adição dos valores médios e RMS dos sinais elétricos em soldagem – Tensão, Corrente, e Velocidade de Alimentação –

tem adicionalmente dois canais analógicos e uma entrada de contagem de tempo (*input capture*) já reservada na arquitetura atual. Por fim, um botão de segurança é inserido em paralelo ao botão MCLR (*Master Clear*), responsável pelo reset do *firmware* do MCU.

A Tabela 6.2 lista toda a comunicação do MCU com os circuitos externos, o pino correspondente nos registradores deste e o terminal no soquete de saída reservado (CN7). Todos os pulsos para as chaves Mais foram colocados em uma mesma porta de registradores do MCU, para facilitar a troca de estados em um único ciclo de programação. Aplica-se o mesmo para os pulsos das chaves Menos e os controles dos relés.

Tabela 6.2 - Lista descritiva de funções MCU com suas correspondências em seu registrador e terminal do conector CN7.

Descrição	Tipo	Pino	CN7	Descrição	Tipo	Pino	CN7
X	PWM	OC1/RD1	93	PA1/PB1	I/O	RE0/RB10	109/79
Y	PWM	OC2/RD2	94	PA2/PB2	I/O	RE1/RB11	110/80
Z	PWM	OC3/RD3	95	PA3/PB3	I/O	RE2/RB12	111/81
DX	I/O	RD3	96	PA4/PB4	I/O	RE3/RB13	112/82
DY	I/O	RD4	97	PA5/PB5	I/O	RE4/RB14	113/83
DZ	I/O	RD5	98	PA6/PB6	I/O	RE5/RB15	114/84
Tensão	AI	RE7/AN31	76	R1	I/O	RC1	85
Corrente	AI	RE6/AN30	75	R2	I/O	RC2	86
Valim	IC	RD8/IC1	101	R3	I/O	RC3	87
Fonte	I/O	RD9	102	R4	I/O	RC4	88
Shutter	I/O	RD10	103	R5	I/O	RC13	89
Trigger	I/O	RD11	104	R6	I/O	RC14	90

Para que todas as funções do MCU sejam ligadas a suas respectivas placas de destino (lógica digital, controle da fonte, etc), uma placa PCB foi projetada para o acesso dos terminais do conector CN7, onde o próprio formato inferior da placa com suas trilhas farão a conexão aos terminais. Este conector, e sua montagem com a placa de lógica digital é ilustrado na Figura 6.5.

Para possibilitar o disparo automático de um fonte de soldagem, o terminal Fonte (RD9), juntamente com a alimentação do sistema (5 V e GND) são enviados para uma pequena placa auxiliar, que contém um circuito de ganho de corrente por um transistor (BC549), um LED de indicação de acionamento e um relé de saída que será responsável pelo curto circuito entre os terminais de disparo da fonte. A fonte deve ser selecionada para disparo de dois toques, ou seja, o relé permanecerá em curto durante o processo de soldagem.

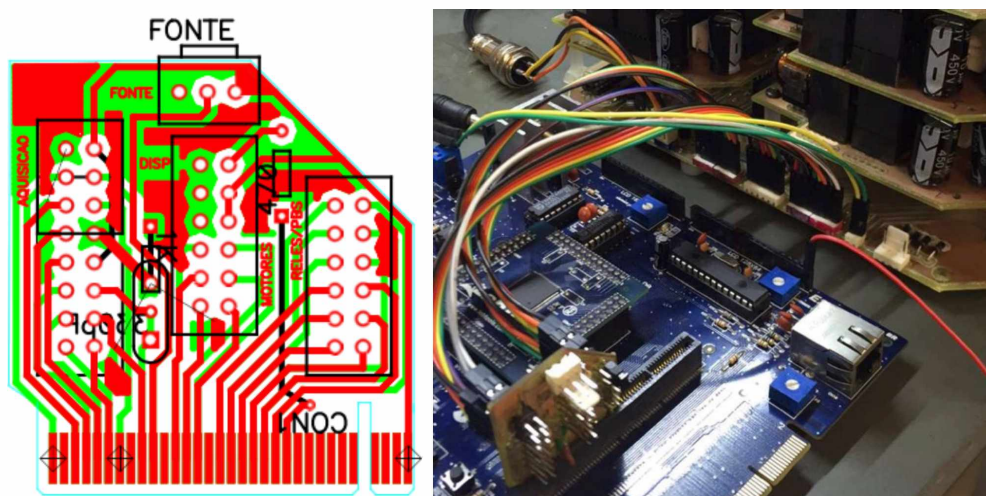


Figura 6.5 – PCB do conector Explorer/Exterior (esquerda) e montagem com ligações de pinos de controle de topologia de acionamento (direita).

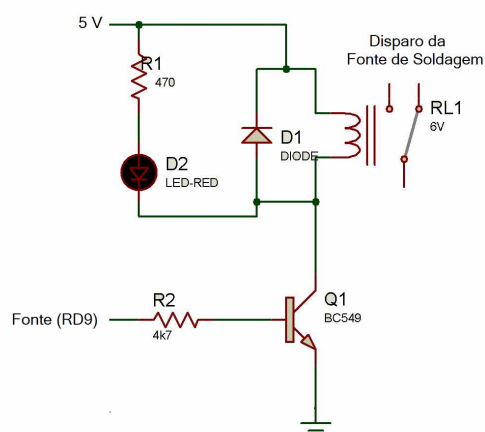


Figura 6.6 – Circuito de adaptação terminal Fonte e disparo da Fonte de Soldagem.

Para que os sinais de controle dos motores de passo, X, Y e Z, construiu-se um cabo manga de 8 vias 26 AWG, de comunicação Explorer/Mesa XYZ, com uma extremidade contendo os terminais do tipo modular para a PCB de conexão da Explorer, e em sua outra extremidade um conector do tipo Mike de 8 vias com a ligação descrita na Figura 6.7.



Pino	Cor	Função	Pino	Cor	Função
1	Azul	Y	5	Rosa	DX
2	Verde	X	6	Malha	GND
3	Salmão	Z	7	Roxo	DY
4	Amarelo	5 V	8	Cinza	DZ

Figura 6.7 – Descrição de cabo Explorer/Mesa ZYX.

Por fim, é necessário um circuito de correção dos níveis de tensão para os sinais de controle de pulso e direção dos drivers dos motores X, Y e Z. Para que o nível alto do MCU, que é baseado em uma lógica digital de 3,3 V, seja considerado nível alto pelos *drivers* de motores de passo, utilizou-se de um artifício simples, mas eficiente: a inserção de um circuito integrado (CI) contendo portas lógicas inversoras.

Para a porta lógica digital, em especial as do tipo HC (tecnologia CMOS), o limiar de nível alto se encontra próximo dos 2,8 V. Desta forma, todo sinal de entrada será transformado para a lógica TTL (alimenta-se o CI com 5 V) na saída da porta lógica, ilustrado na Figura 6.8. A única precaução necessária, é que, durante a criação da lógica de controle, deve-se levar em consideração que na saída há a inversão de nível.

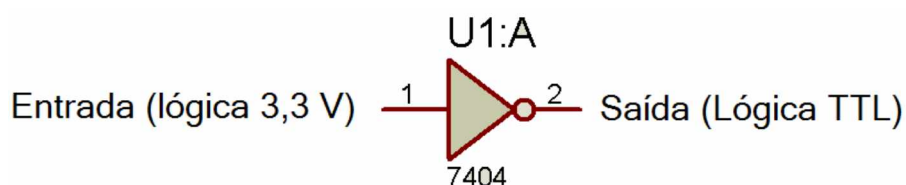


Figura 6.8 – Uso de inversor 74HC04 para mudança de níveis de tensão em sinais de pulso e direção de motores de passo.

## 6.2.2 Interface Homem-Máquina (IHM)

### 6.2.2.1 IHM Webserver

A interface homem-máquina principal do sistema guiado de soldagem, ViaSolda Web é composta pelas páginas web embutidas na memória EEPROM do dispositivo mestre do sistema. É ela quem será responsável por prover o auxílio visual ao operador e prover meios para que este tome decisões de controle sobre a movimentação da tocha. Desta forma, a IHM deve ser disposta de forma que o usuário consiga agrupar todas as funcionalidades essenciais (imagem e controle) em uma única tela, independentemente do dispositivo (e sua resolução de tela) que ele estiver utilizando.

Utilizando-se dos conceitos de leiaute responsivo e sistema de grades da framework Bootstrap, idealizou-se a página principal de utilização da IHM com a seguinte estrutura: uma barra de navegação no topo da página, fixa, uma janela principal dividida em dois lados contendo, de um lado, a imagem provinda do *encoder* IP de vídeo e, de outro lado, botões de acionamento para controle dos três motores em seus sentidos distintos, o acionamento do sistema de iluminação e da fonte e, por fim, uma linha de rodapé contendo as

informações extras. Concentrando-se em um design minimalista, para que o operador se foque nas funções essenciais, o leiaute da página principal do ViaSolda Web pode ser vista na Figura 6.9.

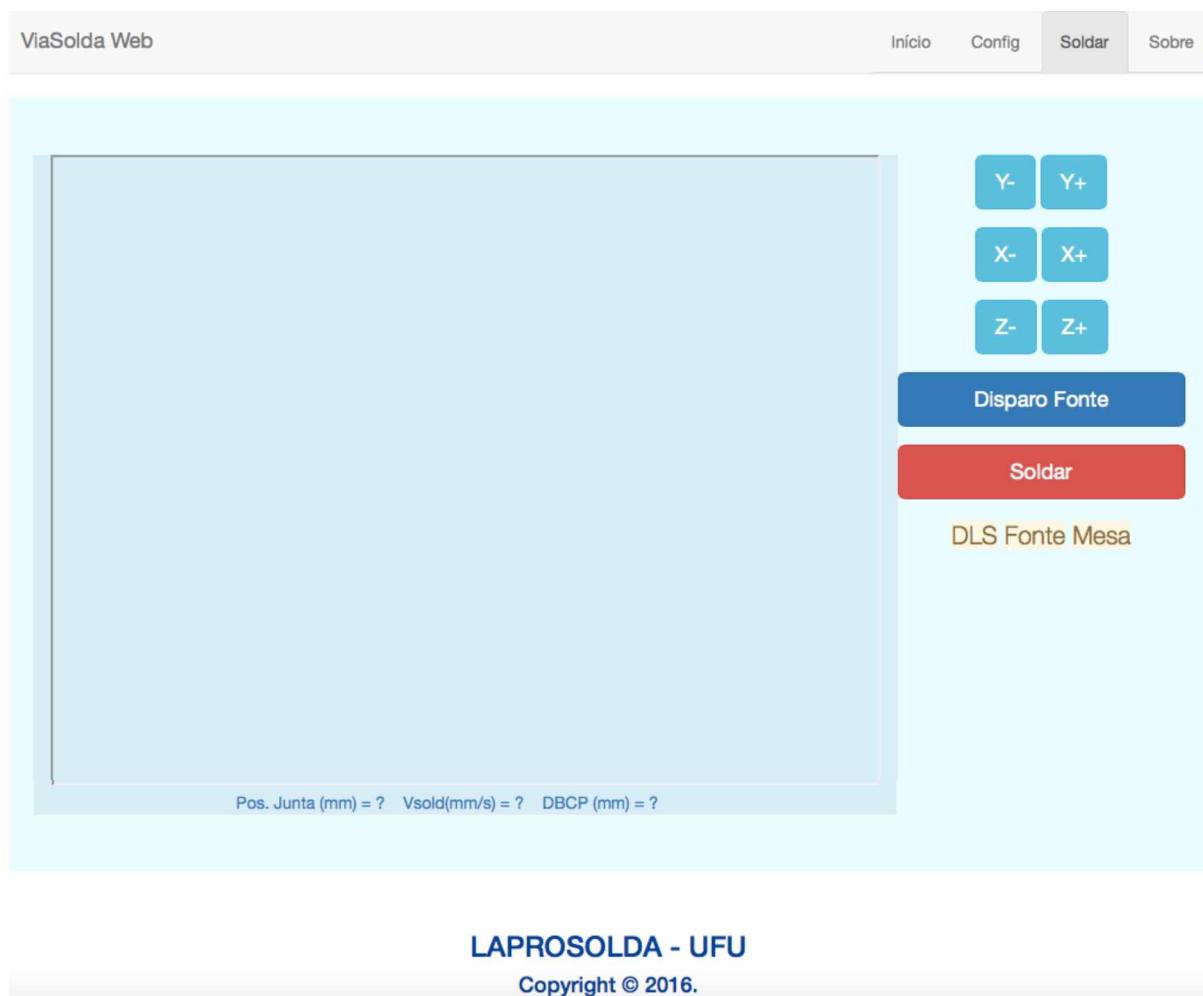


Figura 6.9 – IHM Principal do ViaSolda Web (solda.html).

A IHM principal portanto contém as seguintes interfaces de informação e controle do operador: 6 botões com estilo de informação para o intervenção do movimento da tocha durante a soldagem, um botão com estio principal de informação contendo a função de disparo da fonte / diodos laser, um botão no estilo principal de perigo com a função do início do movimento na direção de soldagem, a janela contendo a imagem da região de interesse, três textos no estilo de aviso que indicação os estados dos três dispositivos principais (mesa, diodos laser e fonte) e três textos no estilo de informação contendo o valor atual das variáveis controladas (velocidade de soldagem, DBCP e posição sobre a junta). A Tabela 6.3, resume cada uma das funções.

Tabela 6.3 – Descritivo de funções IHM do conteúdo principal da página ViaSolda Web.

Descrição	Classe	Função
video	<i>iframe</i>	Carrega a página principal do <i>encoder</i> IP GXV3500.
X+	Botão	Aumenta a velocidade de soldagem em um incremento DVSOLD.
X-	Botão	Reduz a velocidade de soldagem em um decremento DVSOLD.
Y+	Botão	Movimenta a tocha em uma distância definida DJUNTA para a direita
Y-	Botão	Movimenta a tocha em uma distância definida DJUNTA para a esquerda
Z+	Botão	Aumenta a DBCP em um valor definido DDBCP
Z-	Botão	Diminui a DBCP em um valor definido DDBCP
Disparo Fonte	Botão	Liga/Desliga o acionamento da Fonte e do ViaSolda
Soldar	Botão	Inicia o movimento de soldagem na velocidade VSOLD.
DLS	Texto	Indica o estado do ViaSolda (ligado/desligado).
Fonte	Texto	Indica o estado da Fonte (ligada/desligada).
Mesa	Texto	Indica o estado do movimento de soldagem (ligado/desligado)
Pos. Junta	Span	Indica o valor da posição da tocha em relação ao centro da junta.
Vsold	Span	Indica o valor da velocidade de soldagem atual.
DBCP	Span	Indica o valor da DBCP atual.

Deve-se ressaltar que os valores definidos de movimento da tocha, assim como o delta de incremento/decremento da velocidade de soldagem são definidos pelo *firmware* do ViaSolda Web, ou seja, estão listados no código programado na MCU. Caso o usuário deseje modificar esses valores, deve-se reprogramar o MCU com a mudança de valores. A grande vantagem da flexibilidade de programação, tanto do MCU quanto do servidor web, porém permite que futuramente essas configurações sejam inseridas na IHM do Webserver.

Uma segunda página importante para o funcionamento do auxílio visual e controle da movimentação da tocha durante a soldagem é uma página de configuração dos ajustes do sistema de visão (Vídeo) e dos parâmetros de soldagem, *forms.html*, ilustrado na Figura 6.10.

Mantendo-se ao projeto simplificado, o usuário deve escolher entre dois ajustes de taxa de quadros da aquisição de vídeos (30 ou 1000), inserir os valores da velocidade de soldagem e da DBCP ajustadas inicialmente do seu processo. Os valores da velocidade de soldagem e da DBCP são as variáveis essenciais para o processo de soldagem guiada (da página *solda.html*). O usuário deve conferir se a DBCP da tocha corresponde ao valor inserido na IHM. Como valores padrão tem-se 30 FPS de taxa de quadros, 30 cm/min de velocidade de soldagem e 15 mm de DBCP.



Figura 6.10 - Página de Configuração dos ajustes de Vídeo/Soldagem (forms.html).

Quando o usuário pressiona o botão “Envia dados ao PIC”, a MCU receberá, em forma de dados de formulário, os valores inseridos pelo usuário e retornará os valores ao IHM, que modificará o texto de aviso “Feedback do PIC”. Apenas quando o texto estiver de acordo com os valores enviados ao MCU, o usuário pode retornar à página de Solda para realizar o processo através do sistema guiado com auxílio visual.

Apesar de não ser a IHM principal, quando o conteúdo web for acessado ele entrará inicialmente em uma página de entrada, index.html, com funções de movimento livre da tocha (Figura 6.11).

Esta página, com estrutura muito semelhante a página IHM principal (solda.html), contém o conteúdo principal é dividido em duas colunas, onde a esquerda se observa a imagem enviada pelo *encoder* IP GXV3500, e a direita tem-se os botões de movimento dos motores X, Y e Z. Ao contrário da página de soldagem em si, na página de entrada, quando os botões são acionados, eles promoverão um movimento contínuo da tocha na direção selecionada, e o botão pressionado indicará seu movimento com uma mudança de estilo (passará a cor de fundo verde). Para parar o movimento contínuo da tocha no sentido determinado, o usuário deve pressionar novamente o botão.

O botão no estilo principal de informação “Disparo DLS”, quando pressionado, enviará um sinal de nível alto para o acionamento dos módulos de diodo laser. Com o retorno do MCU, o texto de aviso “Aguarda Disparo” será substituído por “Enviando Pulsos”.

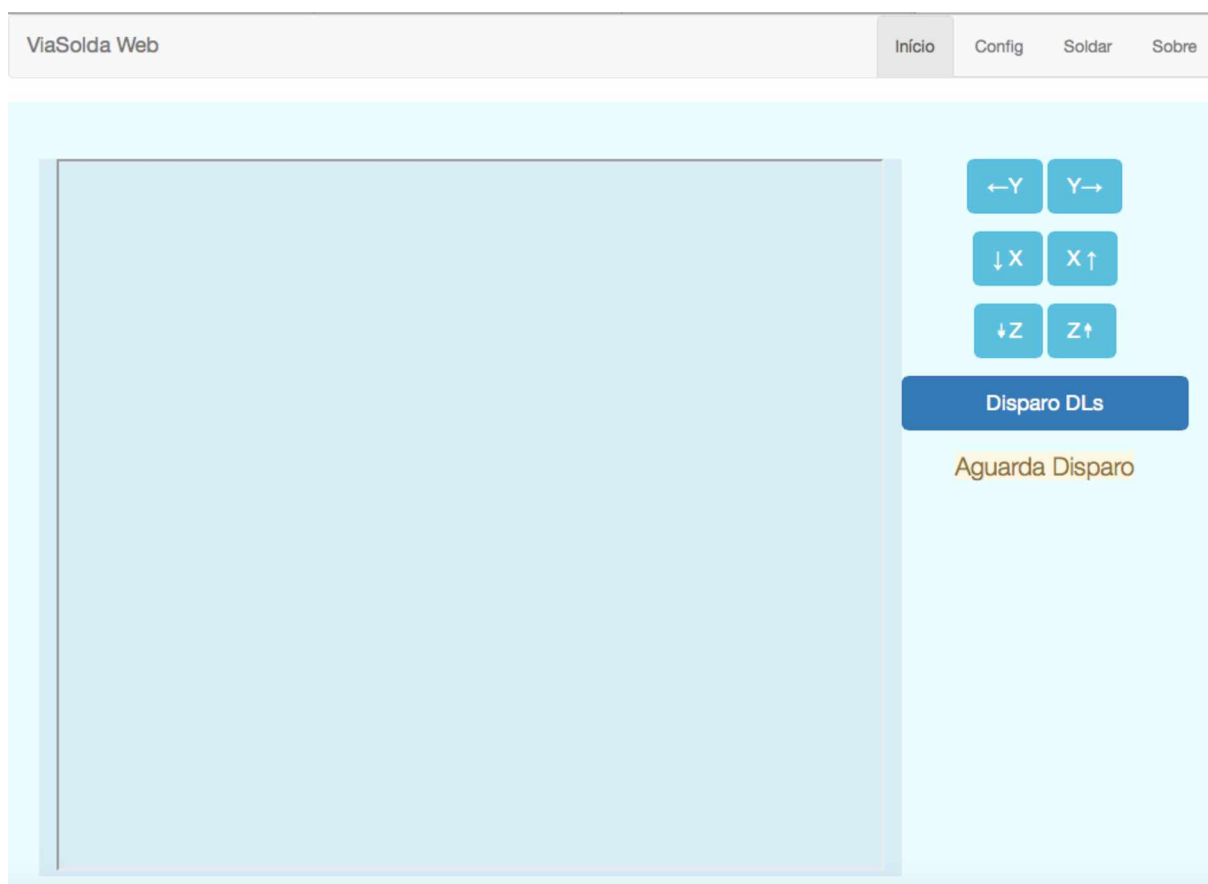


Figura 6.11 - Página de movimento livre da tocha com auxílio visual (index.html).

Tabela 6.4 – Descritivo de funções IHM na página de movimento livre do ViaSolda Web.

Descrição	Classe	Função
video	<i>iframe</i>	Carrega a página principal do <i>encoder</i> IP GXV3500.
X+	Botão	Liga/Desliga movimento da tocha à frente.
X-	Botão	Liga/Desliga movimento da tocha para trás.
Y+	Botão	Liga/Desliga movimento da tocha para a direita.
Y-	Botão	Liga/Desliga movimento da tocha para a esquerda.
Z+	Botão	Liga/Desliga movimento da tocha para cima.
Z-	Botão	Liga/Desliga movimento da tocha para baixo.
Disparo DLs	Botão	Liga/Desliga o acionamento da Fonte e do ViaSolda
Aguarda Disparo	Texto	Indica estado dos DLs alternando o texto entre “Aguarda Disparo” e “Enviando Pulsos”.

No rodapé da página de entrada, além do informativo semelhante às páginas descritas anteriormente, tem-se a informações das versões da pilha TCP/IP, do firmware e as datas de compilação tanto do Firmware quando da interface web (Figura 6.12). A maioria das informações está contida na memória ROM da MCU, portanto só serão disponibilizadas quando a IHM (cliente) estiver se comunicando com o dispositivo mestre.

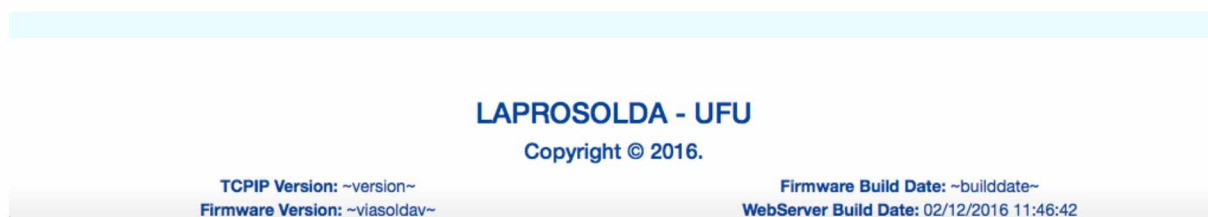


Figura 6.12 - Rodapé de página index contendo informações das compilações do sistema.

Todos os eventos que geram comunicação entre a IHM e o MCU, como os disparos de fonte e dos diodos laser e movimentação da tocha, passam pela comunicação cliente-servidor-cliente, ou seja, quando o usuário pressiona um botão de interação, um sinal de controle é enviado ao MCU, o MCU recebe e executa uma determinada ação, e dentro desta ação retorna um sinal de estado para a leitura do IHM, que atualizará sua interface de acordo com o tipo de ação (trocar cores de botões, atualizar texto, entre outros). Desta forma, toda e qualquer informação mostrada na IHM reflete em tempo real o que está sendo executado no dispositivo mestre.

Para que isso seja possível, tem-se quatro formas distintas de comunicação entre a IHM e o *firmware* do MCU: um byte (caractere) de indicação de eventos, da IHM para o MCU, um bit de estado (0 ou 1) de ações, da MCU para o IHM, um conjunto de bytes, atualizados por demanda do IHM (apenas pela atualização da página por botão ou pelo navegador) para leitura de valores contidas nas memórias do MCU e, por fim, um conjunto de bytes que é enviado ao IHM por demanda do MCU (atualizado constantemente) contendo valores dos parâmetros de soldagem.

Desta forma, tem-se a descrição da comunicação IHM/MCU implementadas neste trabalho: um caractere de “0” a “F” que indica o evento de pressionar um botão, um conjunto de 16 bits de estado das ações do MCU chamados genericamente de *~led(n)~*, os conjuntos de bytes de demanda do IHM *~version~*, *~viasoldav~*, *~biuldate~*, *~feedfreq~*, *~feedvsol~*, *~feeddbcp~*, e, por fim, os conjuntos de bytes transmitidos por TCP (ao comando do MCU) *~pot(0)~*, *pot(1)* e *~pot(2)~*. A descrição do evento/ação que cada variável comanda está listada na Tabela 6.5.

#### 6.2.2.2 IHM Integrada ao Sistema Embarcado

Incorporado ao sistema físico há como interface com o usuário, que auxilia no acompanhamento do funcionamento do sistema, os seguintes itens:

- LCD de texto com 2 linhas e 16 colunas;
- Sete (7) LED's indicativos;

Tabela 6.5 – Descritivo bytes de comunicação IHM/MCU.

Byte	Bit de Estado	Evento/Ação	Bytes	Variável
0	led(0)	-	~pot(0)~	Posição na junta <sup>(2)</sup>
1	led(1)	Y- <sup>(1)</sup>	~pot(2)~	DBCP <sup>(2)</sup>
2	led(2)	Y+ <sup>(1)</sup>	~pot(1)~	Veloc. De Soldagem <sup>(2)</sup>
3	led(ISO 3834, ISO3834)	X- <sup>(1)</sup>	~feedfreq~	FPS na MCU <sup>(ISO 3834, ISO3834)</sup>
4	led(ISO 3834, ISO3834)	X+ <sup>(1)</sup>	~version~	Versão TPC/IP <sup>(1)</sup>
5	led((BONE))	Z- <sup>(1)</sup>	~viasoldav~	Versão Firmware <sup>(1)</sup>
6	led(6)	Z+ <sup>(1)</sup>	~biuldate~	Data Compiiação <sup>(1)</sup>
7	led(7)	Disparo DLS <sup>(1)</sup>	~feedvsol~	Veloc. De Soldagem Inicial <sup>(ISO 3834, ISO3834)</sup>
8	led(ISO 3834, ISO3834)	Y- <sup>(2)</sup>	~feeddbcp	DBCP Inicial <sup>(ISO 3834, ISO3834)</sup>
9	led(9)	Y+ <sup>(2)</sup>		
A	led(10)	X- <sup>(2)</sup>		
B	led(11)	X+ <sup>(2)</sup>		
C	led(12)	Z- <sup>(2)</sup>		
D	led(13)	Z+ <sup>(2)</sup>		
E	led(14)	Disparo Fonte <sup>(2)</sup>		
F	led(15)	Soldar <sup>(2)</sup>		

Legenda: <sup>(1)</sup>index.html, <sup>(2)</sup>solda.html e <sup>(ISO 3834, ISO3834)</sup>forms.html

O LCD (Display de cristal líquido) exibe, quando o sistema está em funcionamento, o nome da rede Wi-Fi em que o ViaSolda Web está conectado e o endereço de IP fornecido pela rede (Servidor DHCP). Caso algum erro ocorra no funcionamento, como queda de conexão, rede não existente, entre outros, também, é exibido neste dispositivo de interface. Se ao ligar o dispositivo não exibir nenhum endereço, nem mesmo o endereço padrão 169.254.1.1, indica que o dispositivo de comunicação Wi-Fi não foi inicializado.

Os LED's são utilizados para indicação do funcionamento em tempo real do sistema, passando informações ao usuário do que está configurado para ser executado. Sua disposição é ilustrada na Figura 6.13 e sua descrição de indicação é resumida na Tabela 6.6.

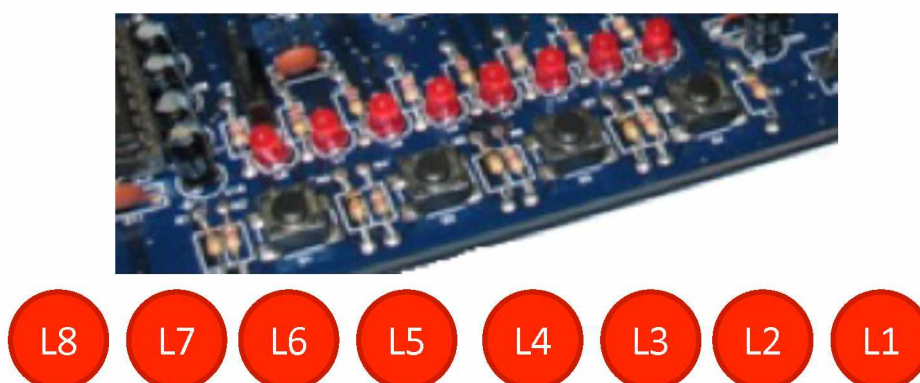


Figura 6.13 – LEDs indicativos da IHM do sistema embarcado.

Tabela 6.6 –Resumo de Função descrita pelos LEDS como IHM do sistema embarcado.

LED	Estado	Ação
L1	Pisca em ~1Hz	Webserver em execução
L2	Liga/Desliga	Soldar (mov. da soldagem)
L3	Liga/Desliga	Motor Z em movimento
L4	Liga/Desliga	Fonte de Soldagem / DLs
L5	Liga/Desliga	Motor X em movimento
L6	Liga/Desliga	Motor Y em movimento

### 6.2.3 Firmware de Controle – ViaSolda WiFi

O Firmware de controle, ViaSolda WiFi é baseado em um conjunto de bibliotecas e exemplos prontos para comunicação TCP/IP da Microchip com o uso da Explorer BR com a placa ZeroG. Por se tratar de um algoritmo complexo e extenso, neste ponto serão descritos em maior detalhes apenas as funcionalidade que foram criadas ou modificadas no código-fonte do exemplo base para a adequação aos requisitos de firmware do sistema guiado ViaSolda Web. Basicamente, criou-se um código de definições inerentes a configuração específica das funções do ViaSolda Web -temporizadores, configuração do oscilador e uso de PLL, PWMs – e customizou-se o código de comunicação HTTP entre a IHM e o MCU as comunicações necessárias (descritas no item 6.2.2.1).

Para tornar o código flexível a mudanças e robusto em funcionamento, todas os registradores de comunicação externa ao MCU, como pinos digitais para ligar pulsos PAs, PBc, Relés, fonte e sinais de *shutter* e *trigger* para a câmera foram definidos dentro do cabeçalho do código de definições, chamado de *driver.h*, com a seguinte estrutura de código:

```
#define      nomefantasia      REGISTRADOR
```

Onde o nome fantasia é, por exemplo, **DX**, para o terminal de sentido do motor X e o registrador é LATDbits.LATD4. Por se tratar de um código extenso e, já sabendo da configuração de hardware pela Tabela 6.2, não é necessário listar todas as linhas de código.

Para as definições de valores padrões, como o incremento da tocha na DBCP e sobre a junta, o incremento de velocidade de soldagem e seu valor inicial, a FPS padrão do sistema de visão, e as calibrações da mesa XYZ (passo em mm de casa motor e definição de sentidos), o código implementado, ainda no cabeçalho do código de definições é visto na Figura 6.14.



```

//-----
// Definicoes de Valores Padroes
//-----
#define FPSPADRAO 30
#define VSOLPADRAO 30 //cm/min -> vsol*10/60 Hz
#define OCRSPADRAO 10 //valor largura de pulso padrao us (PWMs)
#define DVSOLPADRAO 2 //delta de mudança de velocidade em X
#define DBCPPADRAO 15
#define DDBCP 1 //delta da DBCP em mm
#define DJUNTA 1 //delta da junta em mm

//-----
// Definicoes de drivers de passo
//-----
#define PASSOX 0.000625 //exemplo 1mm por passo
#define PASSOY 0.0005
#define PASSOZ 0.003125
#define DXP 0 //Definição de sentido Positivo
#define DXN 1 //Definição de sentido Negativo
#define DYP 0
#define DYN 1
#define DZP 1
#define DZN 0

```

Figura 6.14 - Definições de valores padrão dos drivers de passo.

As linhas principais do código de definições, chamado de *driver.c*, especifica todas das funções externas do ViaSolda Web – o uso de temporizadores (do Timer 2 ao Timer 7), configuração do oscilador e uso de PLL a configuração dos PWMs e todos os códigos de interrupção.

Para a implementação de um PWM independente e contínuo, é necessária a atribuição e configuração de um Timer atrelado a ele, podendo ser, no caso deste MCU, o Timer 2 ou o Timer 3. Desta forma, atribuiu-se ao Timer 2 a responsabilidade de controle temporal do PWM1/OC1, ligado ao motor X e ao Timer 3 o controle temporal dos PWM2/OC2 2 PWM3/OC3, ligados aos motores Y e Z, respectivamente. Portanto, o motor X tem um funcionamento independente (afinal é o motor responsável pela velocidade de soldagem) e os motores Y e Z funcionam sempre sob a mesma frequência, o que em termos práticos, não atrapalham o controle de posicionamento da tocha no modo contínuo (movimentação livre).

Porém quando se deseja a criação de um trem de pulsos contínuo, necessário para a funcionalidade de movimento finito da posição da tocha (sobre a junta e na DBCP), o uso simples do PWM contínuo não é suficiente. Seria necessário deixar o modo contínuo ligado por um determinado tempo? É um algoritmo de fácil implementação? É um algoritmo preciso em relação ao número de pulsos que deve ser enviado ao motor de passo?

Uma solução encontrada, não a ideal, era solucionar a falta de PWM em modo finito na MCU é o uso de um Timer para a geração da forma de onda. Calculando meio período da frequência do trem de pulsos e, a cada deste, alternando o estado de um bit de saída digital, é possível criar um trem de pulso com 50% de ciclo de trabalho. Contando-se o

número de meios períodos, tem-se como determinar o controle finito de pulsos (2 vezes o numero de meios períodos). Portanto, uma rotina de timer é atribuída a cada motor com requisito de movimento finito (Timer 7 ao motor Y e Timer 8 ao motor Z) e o meio período é configurado e a rotina de interrupção do timer controla o numero de pulsos e quantidade destes que serão enviadas. O fluxograma da interrupção do Timer 7 é ilustrado na Figura 6.15. Deve-se considerar que a interrupção do Timer 8 é similar a esta.

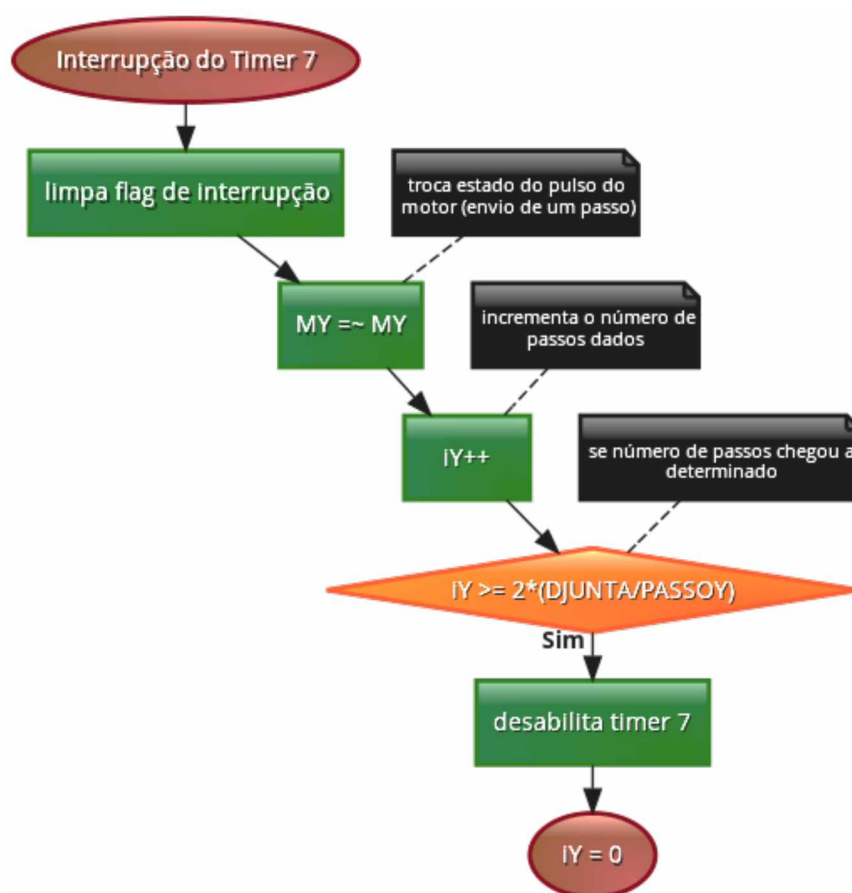


Figura 6.15 – Fluxograma de interrupção do timer 7 envio de passos finitos ao motor Y.

Para a criação dos pulsos em sequencia para o driver de gate das chave do módulo ressonante, de modo a interferir o mínimo possível com as outras funções do MCU, utilizou-se de 2 temporizadores: o Timer 4 para a criação da base de tempo (30 Hz, por exemplo) e o Timer 5 para a contagem de tempo rápida para a criação de pulsos, 1 us, ambos configurados com funções de interrupção. Os fluxogramas da Figura 6.20 detalham o algoritmo de interrupção destes temporizadores.



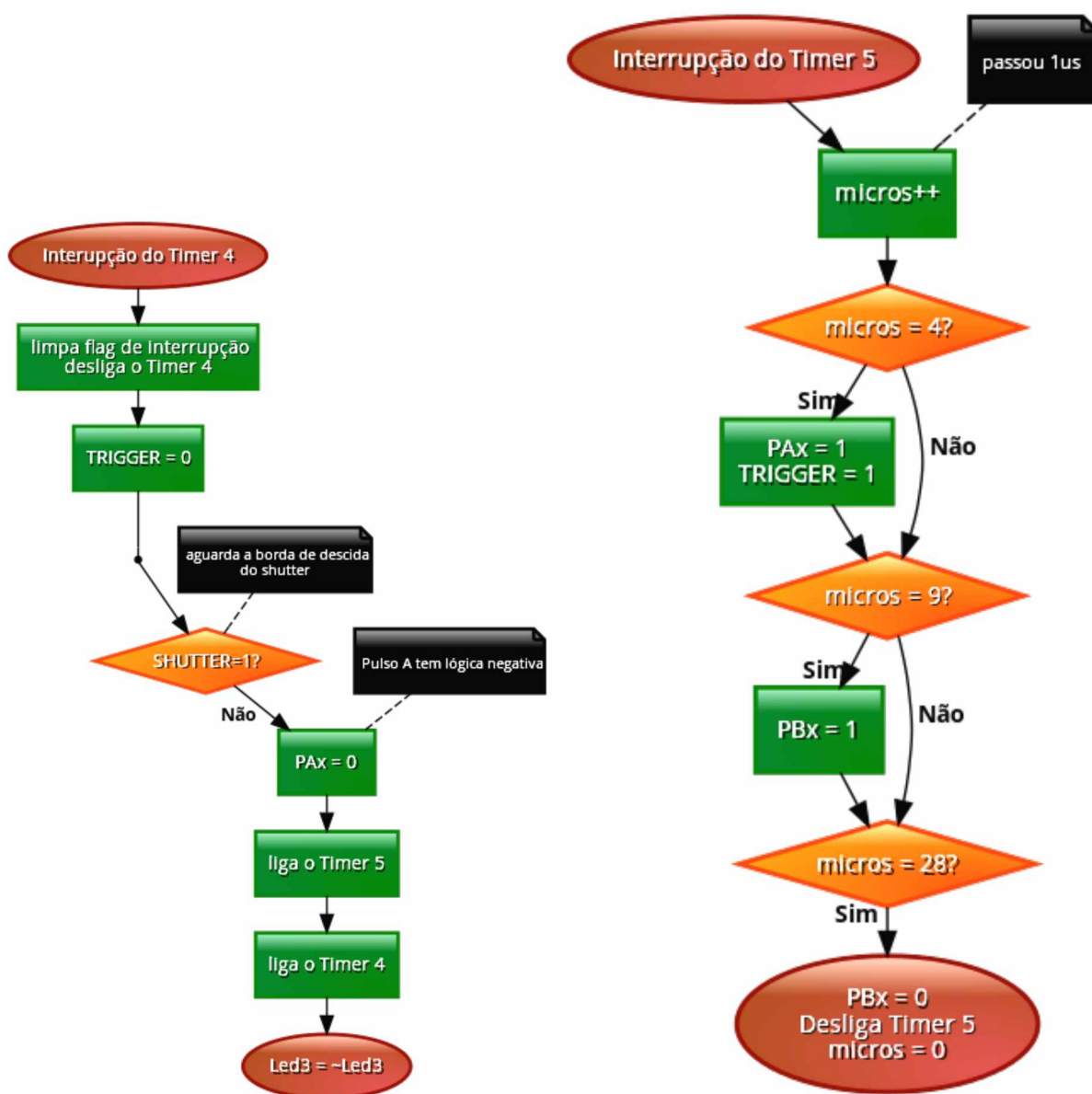


Figura 6.16 – Fluxogramas das interrupções responsáveis pelos pulso PAX e PBx.

Por fim, descrevem-se as modificações na função de comunicação HTTP, contida no arquivo *CustomHTTPAPP.c*. Quando há a mudança do BYTE de comunicação da IHM, o MCU executa uma rotina de leitura e interpretação, baseado no teste condicional *switch-case*. As ações do MCU para cada valor do BYTE IHM, para o envio das páginas *index.html* e *solda.html* são detalhadas nos fluxogramas da Figura 6.17 e Figura 6.18, respectivamente.

Para cada conjunto de bytes enviados ao MCU, informando os valores da velocidade de soldagem, posição na junta e DBCP atuais, assim como o feedback do MCU na página *forms.html*, é criada uma função de envio de dados por “impressão HTTP” e seus códigos estão nas Figura 6.19 à Figura 6.21.

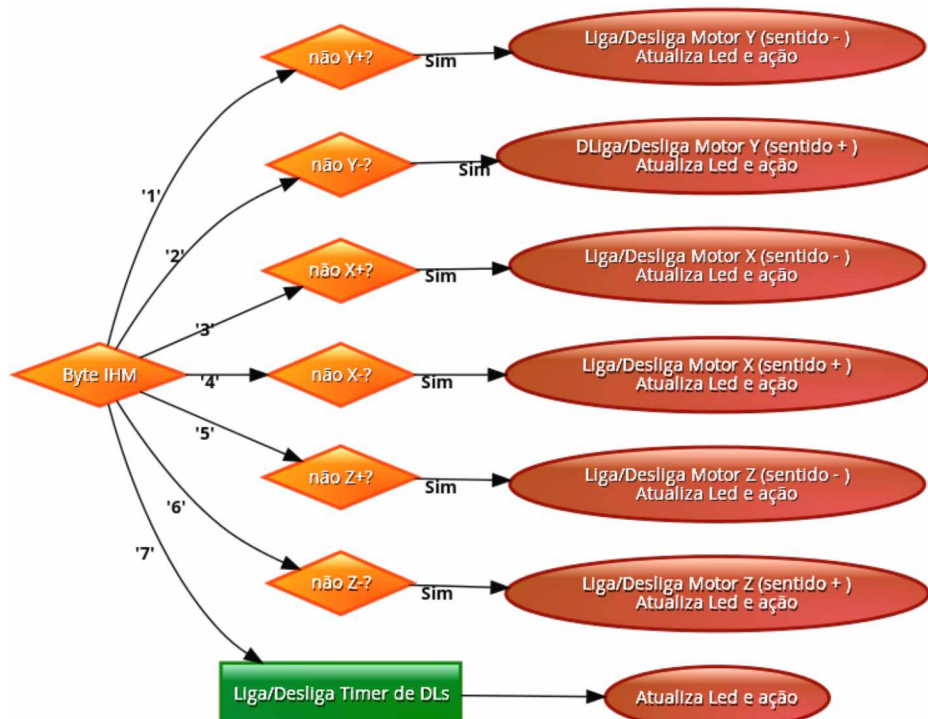


Figura 6.17 - Fluxograma de interpretação de mudança no Byte IHM (led.cgi), casos da página index.html.

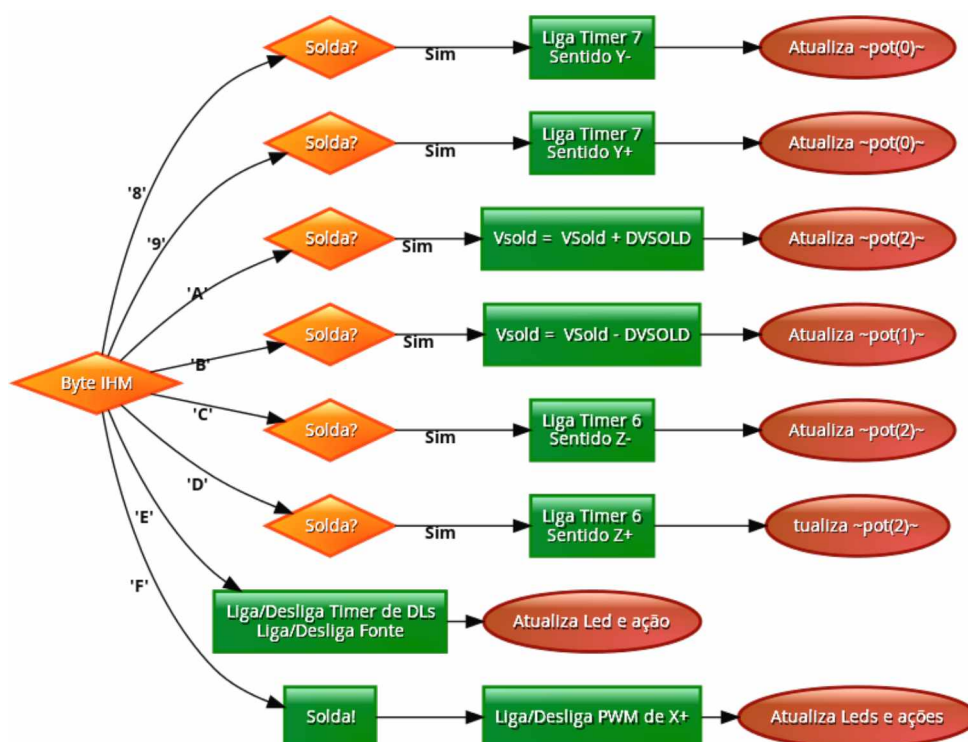


Figura 6.18 - Fluxograma de interpretação de mudança no Byte IHM (led.cgi), casos da página solda.html.

```
// HTTPPrint modificada para uso de status[];
void HTTPPrint_led(WORD num)
{
    // Print output if TRUE and ON or if FALSE and OFF
    if((state && num) || (!state && !num))
        TCPPutROMString(sktHTTP, (ROM BYTE*)"SELECTED");
    return;
}
```

Figura 6.19 - Função de impressão HTTP para estados dos ~led(n)~.

```
void HTTPPrint_pot(void)
{
    char PotString[11];
    // Exemplo: 1000,15,-10
    sprintf(PotString, "%u,%u,%d", vsol, dbcp, junta);
    TCPPutString(sktHTTP, PotString);
}
```

Figura 6.20 - Função de impressão HTTP para parâmetros de soldagem.

```
void HTTPPrint_feedvsol(void)
{
    char feedvsol[4];
    sprintf(feedvsol, "%d", vsol);
    TCPPutROMString(sktHTTP, (ROM void*)feedvsol);
}

void HTTPPrint_feedfreq(void)
{
    char feedfreq[4];
    sprintf(feedfreq, "%d", freq);
    TCPPutROMString(sktHTTP, (ROM void*)feedfreq);
}

void HTTPPrint_feeddbcp(void)
{
    char feeddbcp[4];
    sprintf(feeddbcp, "%d", dbcp);
    TCPPutROMString(sktHTTP, (ROM void*)feeddbcp);
}
```

Figura 6.21 – Funções de impressão HTTP para página forms.html.

### 6.3 Topologia de Pulso Ressonante

Com os resultados promissores em diversas soldagens com o protótipo de pulso quadrado, estabeleceu-se que os 50 diodos laser estipulados como requisitos do novo sistema de visão (para integração ao sistema guiado sem fio) seriam divididos em seis conjuntos de oito (ISO 3834, ISO3834) - quatro destes - ou nove (9) – dois destes - diodos laser.

Tendo consciência que o aumento do número de diodos laser de 19, do protótipo anterior, para um número quase três vezes maior, a intensidade luminosa emitida não será mais uma limitação para a sobreposição do arco de solda, ainda mais considerando o aumento da densidade luminosa sobre a região de interesse que a fibra óptica irá exercer, optou-se novamente por uma topologia de acionamento que fosse mais segura ao semiconductor retornando, portanto, à topologia ressonante.

Os itens a seguir descreverão as principais etapas de projeto e desenvolvimento da topologia de pulso ressonante, com análise qualificada do circuito ressonante, simulação, especificações de componentes, montagens e testes de bancada, assim como o agente limitador da estrutura modular apresentada.

#### 6.3.1 *Circuito Modular de Topologia Ressonante*

Utilizando-se da teoria de circuitos ressonantes e, procurando uma topologia de comutação suave das chaves, idealizou-se a nova topologia de acionamento de diodos laser, representados na Figura 6.22 pelo conjunto de componentes DLs e VLed.

Pelo chaveamento das chaves Mais e Menos, 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. Os componentes Cr e Lr formam o que se denomina de circuito ressonante LC série. Quando a ressonância ocorre, devido à aplicação da frequência apropriada, 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 DRL, ligados em antiparalelo com o conjunto de diodos laser, DLR2, em antiparalelo com a chave Mais e DRL3, em antiparalelo com o capacitor ressonante, são chamados de diodos de “roda-livre”. Neste circuito, sua principal função é permitir a passagem de corrente no sentido oposto dos componentes semicondutores (ou passivo) em determinados momentos, impedindo que haja tensão reversa sobre estes e criando caminhos de circulação da corrente para um circuito de chaveamento suave.

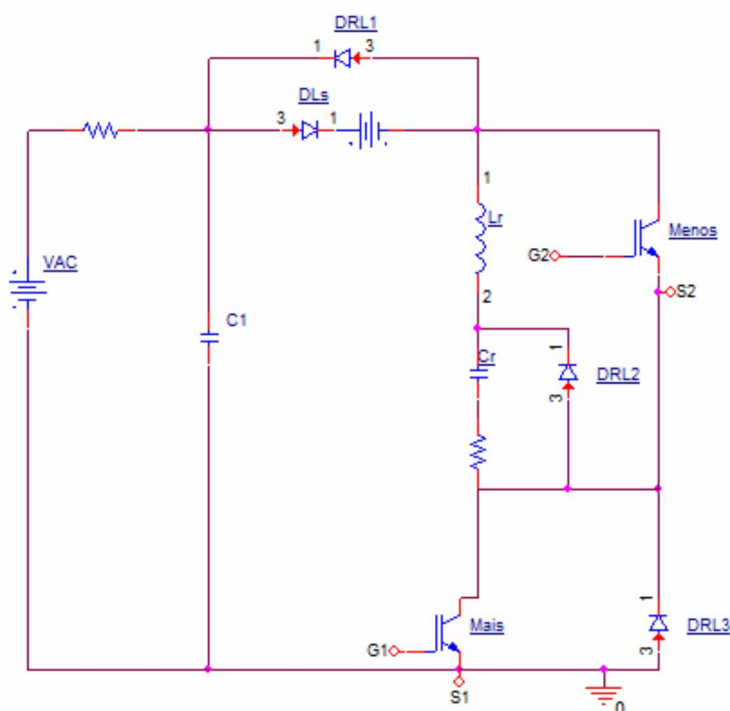


Figura 6.22 – Topologia ressonante de acionamento de diodos laser.

A Figura 6.23, a seguir apresenta-se a análise operacional qualitativa desta topologia, considerando-se todos os componentes ideais, uma frequência de ressonância constantes em todos os estágios e uma análise em regime permanente.

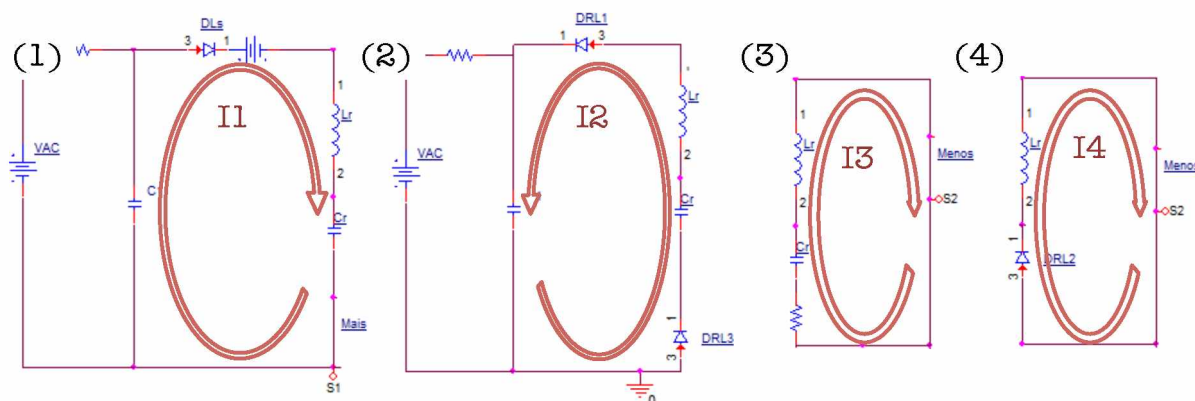


Figura 6.23 - Distribuição dos quatros estágios do circuito ressonante.

Pode-se dividir o funcionamento desta topologia em quatro estágios, distintos. Durante o primeiro estágio, de  $t_0$  a  $t_1$ , a chave “Mais” encontra-se em condução e a chave “Menos” aberta. Considerando que o capacitor ressonante estará completamente descarregado no início do estágio, a corrente proveniente da fonte de tensão constante  $V_{dc}$  é responsável pelo acionamento do diodo laser, que está diretamente polarizado, e carrega capacitor ressonante. Quando o capacitor está completamente carregado não há mais condução de corrente para esta etapa. Este estágio é finalizado após a corrente ressonante e, conseqüentemente, a corrente do diodo laser, cair a zero. Assim, em  $t = t_1$  a chave Mais é tirada de condução.

Durante o segundo estágio, ambas as chaves são mantidas abertas e o capacitor ressonante, age como uma fonte de tensão, com polaridade inversa a tensão retificada de entrada. Desta forma, a corrente ressonante circula em sentido oposto ao primeiro estágio, com passagem pelo diodos de roda livre DL1, e DL3, descarregando o capacitor. Quando a corrente ressonante deixa de circular, o capacitor não está totalmente descarregado.

O terceiro estágio começa quando se coloca a chave Menos em condução, mantendo a chave Mais aberta. O capacitor ressonante, ainda carregado, resultará na circulação da corrente pelos elementos ressonantes até a sua descarga total. No ultimo estágio, o diodo roda livre DRL2 permite que a corrente do indutor ressonante ainda circule pela topologia, até que esta também caia a zero.

Tendo em vista que a frequência e, por consequência, o período ressonante ( $dt$ ), e que a corrente de circula durante o primeiro estágio, e seu valor de pico, é igual ao tempo e a corrente em que se deseja acionar os diodos laser, tem-se os seguintes requisitos do projeto da topologia ressonante (Tabela 6.7):

Tabela 6.7 – Requisitos de projeto da topologia ressonante.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de Entrada Alternada	220	V
Tensão de Entrada DC ( $V_{dc}$ )	311	V
Tensão inicial Cr ( $V_{co}$ )	0	V
Queda de tensão DLs	54	V
Tempo de pulso ( $dt$ )	2,5	$\mu s$
Corrente de pico DLs ( $I_{pico}$ )	55	A

Espera-se que um pulso de maior corrente ajude na eficiência de emissão do diodo laser e que um tempo de pulso de aproximadamente 2,5  $\mu s$  garanta a que durante todo o tempo de abertura do shutter da câmera (mesmo que seja da câmera de alta velocidade, de 2  $\mu s$ ) haja presença da luz do diodo laser. Considerou-se, uma queda de tensão provocada pelos diodos laser de 54 A (cerca de 7 V de queda por semiconductor).

Para a determinação dos valores dos componentes ressonantes, em detrimento da frequência de ressonância (tempo de pulso) e do pico de corrente que circula pelos diodos laser, tem-se as seguintes equações (MOTA, 2011):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (6.1)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{dt} = \frac{1}{\sqrt{C_r \cdot L_r}} \quad (6.2)$$

$$I_{pico} = \frac{V_{DC} - V_{LED} - V_{C_0}}{Z_0} \quad (6.3)$$

Com um pequeno ajuste de valores para a aproximação do capacitor ressonante em valores comerciais, tem-se os valores dos componentes ressonantes:

$$\begin{aligned} C_r &= 165nF \\ L_r &= 3,6\mu H \end{aligned} \quad (6.4)$$

A construção do indutor ressonante com núcleo de ar, que depende no diâmetro e comprimento do núcleo do indutor, diâmetro do fio, com cálculo do numero de espiras utiliza-se da seguinte equação:

$$L_r[\mu H] = \frac{0,0788 \cdot d_f^2 \cdot n^2}{(3 \cdot d_f) + (9 \cdot l_f) + (10 \cdot 2 \cdot nc \cdot \varphi)}$$

Utilizando-se de um fio 21 AWG e um núcleo do indutor de aproximadamente 1,2 cm, tem-se o valor do número de espiras teórico igual a **24**. Porém, como a construção real do indutor não leva em consideração um núcleo totalmente de ar (a estrutura é de um tubo de paredes finas de plástico), utilizou-se de um medidor de impedância para o ajuste correto do número de espiras. Desta forma, tem-se:

$$n = 27 \text{ espiras} \quad (6.5)$$

O funcionamento da topologia foi simulado em ambiente OrCAD, com tempos relativos aos estágios de, respectivamente, 4, 5, e 20  $\mu s$  (estágios 3 e 4). As principais forma



de onda dos componentes semicondutores (chaves Mais e Menos) e ressonantes são mostrados nas figuras seguir.

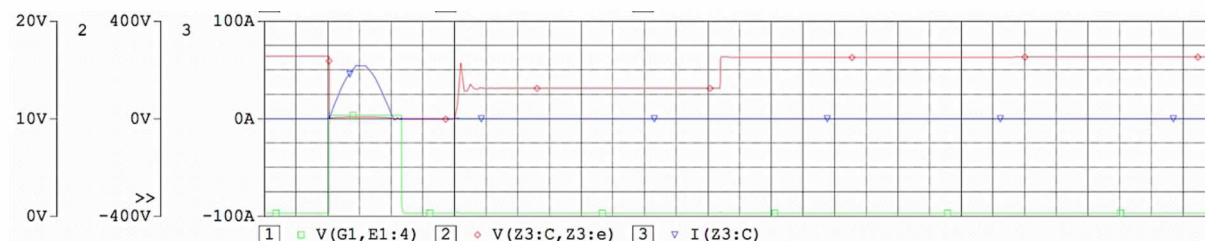


Figura 6.24 - Resultados da simulação computacional: tensão de gate e coletor-emissor da chaves Mais e corrente sobre os diodos laser.

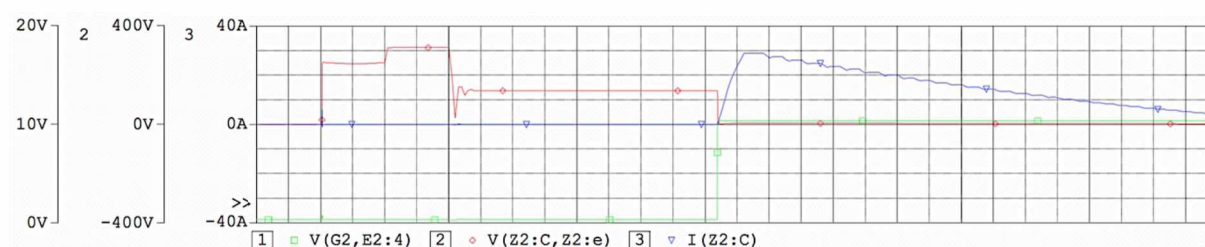


Figura 6.25 - Resultados da simulação computacional: tensão de gate e coletor-emissor da chaves Menos.

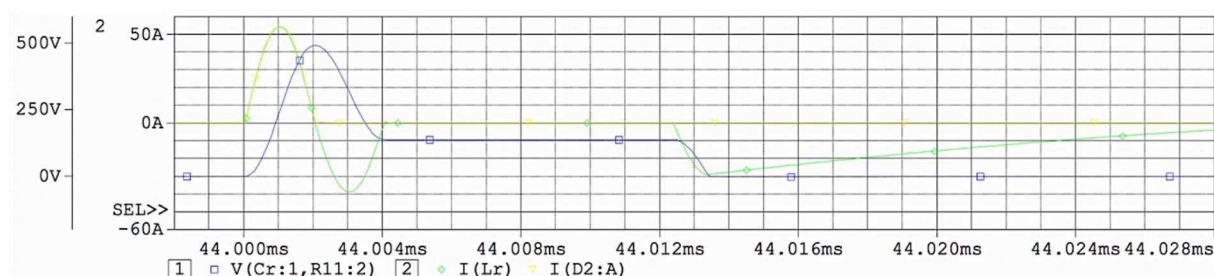


Figura 6.26 - Resultados da simulação computacional: corrente sobre indutor e tensão sobre capacitor ressonante.

A topologia ressonante projetada, ao contrário do ocorrido na topologia de pulso quadrado possui duas chaves e, neste caso, necessita de um circuito de driver de gate que possua isolamento galvânico do circuito de controle. Considerando que, cada circuito possui duas chave em referências diferentes, Mais e Menos e que serão construídos 6 circuitos de acionamento, um para cada conjunto de diodo laser, um aspecto importante a ser observado é a quantidade de fontes isoladas necessárias no sistema completo.

Considerando que todas as chaves Mais podem manter entre si a mesma referência, o sistema completo necessita de 8 fonte de alimentação isoadas e independentes:



- Inserção de um *autotrafo* variável (Varivolt) na entrada do circuito, anterior à ponte retificadora, para aumento gradual da tensão alternada de entrada (Vac);
- Substituição dos diodos laser por um diodo ultrarrápido BYV26C (PHILIPS SEMICONDUCTORS, 1994) para simulação do bloqueio de passagem de corrente reversa e medição das principais formas de onda do circuito, com variação de tensão de entrada até 220 V;
- Substituição do diodo ultra rápido por um diodo laser de alta potência, repetindo as etapa de inserção do varivolt, com variação de tensão de entrada até 220 V;
- Testes de sincronia de imagens e de observação das formas de onda em funcionamento de longa duração, com o diodo laser sendo monitorado pela própria câmera;
- Inserção do conjunto de 8 diodos laser e medição das principais formas de onda no circuito com o controle da tensão alternada de entrada pelo uso do varivolt, com testes de sincronia de imagens.

Os principais resultados obtidos com o teste final, de um módulo ressonante com 8 diodos laser e controle da tensão alternada de entrada pelo varivolt estão na Tabela 6.8 e as principais formas de onda obtidas com o osciloscópio e a entrada de tensão de rede de 220 V é ilustrado na Figura 6.28.

Tabela 6.8 - Principais valores obtidos no módulo de topologia ressonante com 8 diodos laser e uso de varivolt.

FPS (Hz)	Vac (V)	Vce+ (V)	Vge (V)	Idl (A)	tpulso (us)	Duty Cycle (%)	Ief (A)	Vce- (V)
30	60	86.40	14.42	5.92	2.93	0.0088	0.04	0.00
30	80	120.00	14.35	9.90	2.83	0.0085	0.06	0.00
30	100	142.00	14.33	13.90	2.83	0.0085	0.09	0.00
30	120	178.00	13.92	18.20	2.80	0.0084	0.12	0.00
30	140	208.00	14.03	22.60	2.81	0.0084	0.14	0.00
30	160	236.00	14.14	26.80	2.82	0.0085	0.17	0.00
30	180	266.00	14.05	31.20	2.82	0.0085	0.20	0.00
30	200	290.00	13.29	35.60	2.83	0.0085	0.23	0.00
30	200	334.00	13.51	42.00	2.83	0.0085	0.27	0.00
30	220	328.00	13.34	40.00	2.82	0.0085	0.26	0.00

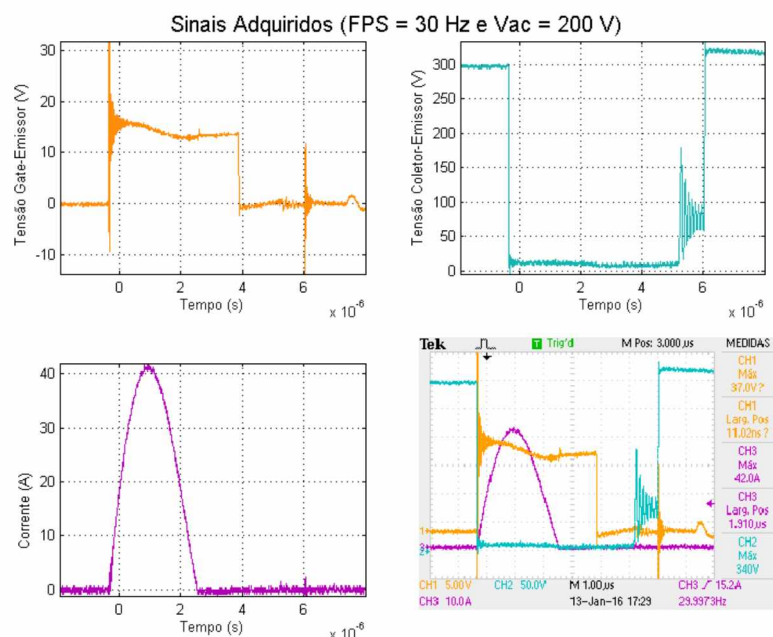


Figura 6.28 - Principais formas de onda em módulo com o conjunto de 8 diodos laser e entrada de tensão da rede de 220 V.

Tendo em vista que todos os conjuntos de diodo laser serão acionados de forma similar, com as mesmas necessidades de alimentação e sinais de controle, elaborou-se o projeto de uma placa de circuito impresso de forma modular (Figura 6.29). Esta placa, composta de conectores duplicados em todas as suas entradas (alimentação, pulso para a chave mais, pulso para a chave menos, sinal de acionamento do relé de segurança) e todas as suas saídas (ponto positivo e negativo de circulação da corrente do diodo laser) e de jumpers de configuração permite que todas as seis placas sejam construídas de forma única e configuradas de acordo com a necessidade de montagem.

Cada placa modular foi identificada com um número e um LED em paralelo ao relé de segurança de cor única. Além disso, cada placa foi configurada com seus jumper de entrada, tanto para as entradas de controle quanto as saídas dos pulsos de corrente para os diodos laser de forma única, para eliminar a possibilidade de curto-circuito indesejáveis. Por fim, cada placa foi submetida individualmente às etapas de testes de bancada e suas formas de onda foram observadas. Para a tensão de entrada alternada da rede, 220 V, os valores de pico da corrente, passado pelo diodo ultrarrápido (BYV26C), por um diodo laser de teste e pelo conjunto de 8 ou 9 diodos laser são resumidos na Tabela 6.9.

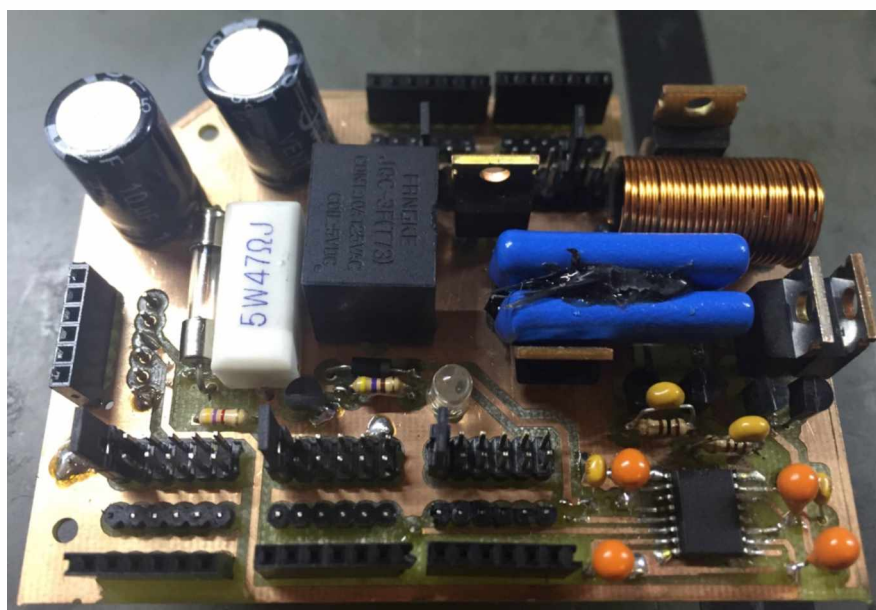


Figura 6.29 – PCB Modular de Topologia ressonante.

Tabela 6.9 – Resultados de corrente de pico para as placas modulares.

Placa	Cor LED	Corrente de Pico (A)		
		BYV26C	1 DL	8/9 DLs
1	Branco	52,4	52,4	42,0
2	Vermelho	55,2	54,8	39,2
3	Amarelo	52,0	52,0	40,4
4	Azul	54,0	54,0	39,6
5	Verde	56,8	52,4	41,2
6	Laranja	52,4	52,4	41,6

As placas que mostraram maior valor de corrente de pico para os testes com um único diodo laser foram propositalmente combinadas com os conjuntos contendo 9 diodos: as placas de número dois (2) e quatro (ISO 3834, ISO3834). De forma a organizar a montagem da topologia ressonante completa, dividiu-se as placas em dois conjuntos, pares e ímpares, e as placas foram montadas em uma estrutura de torre, de forma a compartilhar todos os sinais de entrada e saída em seus terminais, que pode ser vista na Figura 6.30.

Em antecipação do uso do protótipo completo em aquisição de imagens em alta velocidade, submeteu-se uma das placas a um teste de bancada com variação da frequência de acionamento. Os testes foram realizados com o uso de do diodo rápido , nas frequências de 30, 60, 100, 200 e 300 Hz. As formas de onda obtidas estão ilustradas na Figura 6.31 e provam que a topologia possui um funcionamento similar mesmo com o aumento da frequência, concluindo inicialmente ser possível a configuração do protótipo para altas frequências.



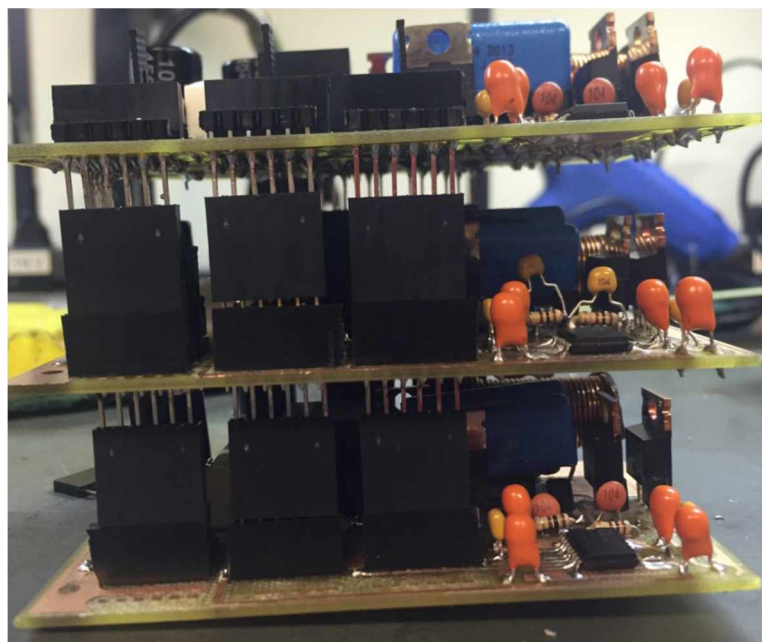


Figura 6.30 - Exemplo de montagem em torre entre módulos de topologia ressonante.

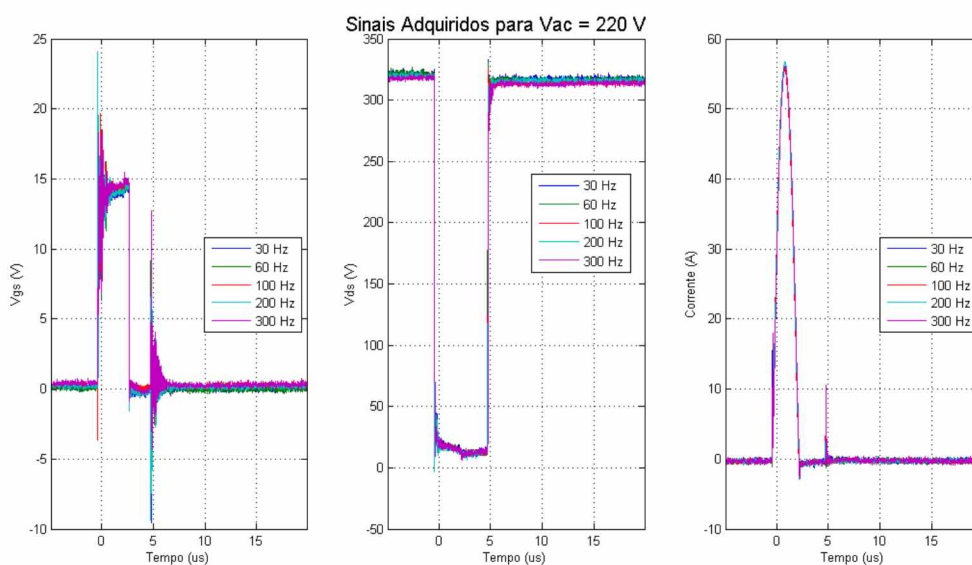


Figura 6.31 - Teste de Acionamento da Topologia Ressonante para variação de FPS (uso de diodo BYV26C).

### 6.3.2 Circuito de Controle e Lógica Digital

Para o alcance de uma boa sincronia entre pulso de acionamento e tempo de exposição da câmera, sem, entretanto, correr risco de prejudicar os diodos laser por falhas de conexão ou da câmera, o MCU comunica-se com a SI-M331 por duas vias: através de um envio de *trigger* e pela leitura do sinal de *shutter* desta. Assim como proposto no protótipo de pulso quadrado, o pulso digital da entrada A do circuito de *driver* de gate e

isolamento (ASUM5230), que será enviada para a chave Mais, é composto por uma lógica digital entre o pulso de acionamento da câmera (TRIGGER), o pulso de *shutter* da câmera e um pulso de controle de uma das saídas digitais do MCU (PAx). A lógica de controle de acionamento digital é exemplificada na

O pulso de entrada do circuito de ajuste para a chave deve ocorrer se, e somente se, o MCU estiver enviando um pulso de TRIGGER para a câmera, a câmera estiver respondendo com o seu sinal de SHUTTER e o MCU tiver recebido e lido esse sinal da câmera e respondido corretamente com um pulso de 3  $\mu$ s (PIC\_PAx). Para que não haja grandes atrasos em relação ao tempo de abertura da câmera, o pulso deve se iniciar em conjunto com o sinal de *shutter* e finalizar com o sinal de controle do MCU.

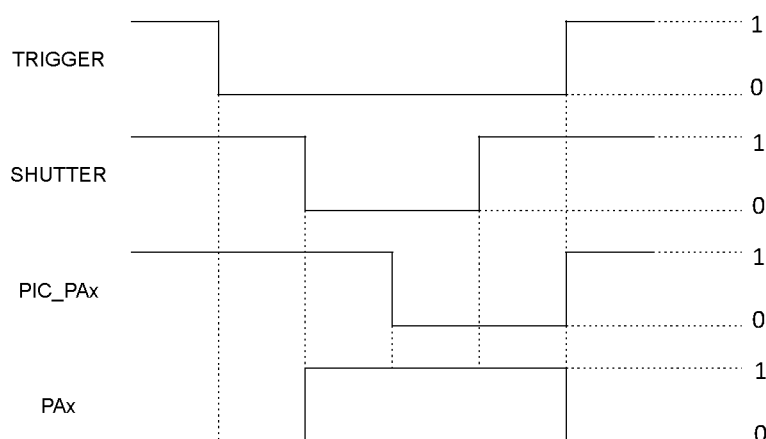


Figura 6.32 – Lógica de controle de acionamento digital.

A tabela verdade da lógica de controle é apresentada na . Utilizando-se, dos conceitos de simplificação de álgebra booleana através do Mapa de Karnaugh, a expressão lógica equivalente para o controle do acionamento da chave semicondutora é:

$$PAx = \overline{TRIGGER + (SHUTTER \cdot PIC\_PAx)} \quad (6.6)$$

Desta forma, o pulso de entrada do circuito de ajuste para a chave somente terá nível alto, quando o sinal de *trigger* estiver baixo e o sinal de *shutter* da câmera ou o sinal de pulso do MCU estiverem também em nível baixo. O circuito completo, entre os três sinais e a saída digital PAx, para cada módulo ressonante, está ilustrado abaixo.



TRIGGER	SHUTTER	PIC_PAx	PAx
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

	TS	00	01	11	10
P	0	1	1	0	0
	1	1	0	0	0

Figura 6.33 – Tabela verdade (esquerda) e mapa de Karnaugh (direita) de lógica digital de pulso.

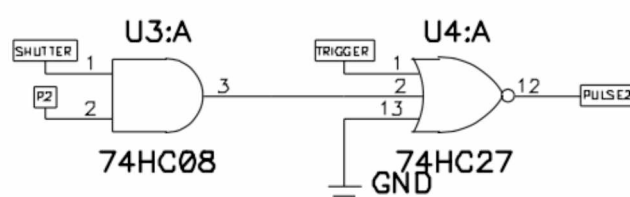


Figura 6.34 – Circuito lógico de controle do acionamento da chave.

Observa-se que todos os sinais foram ligados à entrada de sua respectiva porta lógica com um circuito de “pull-up”, que garante o nível alto quando a entrada estiver flutuante (Figura 6.35).

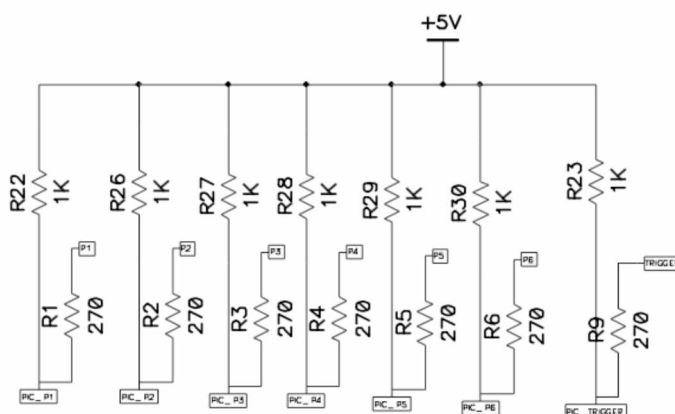


Figura 6.35 - Circuitos pull-ups para saídas PAx do MCU.

Por fim, para as entradas de tensão dos módulos ressonantes, a placa deverá conter uma entrada de 5 V, já supondo o uso da mesma fonte chaveada que alimentará o hardware do MCU, com uma segunda fonte isolada de 15 V, para a alimentação dos circuitos de acionamento das chaves Mais, e uma entrada retificada da tensão alternada da rede, composta por um ponte retificadora de diodos, visto na Figura 6.36.

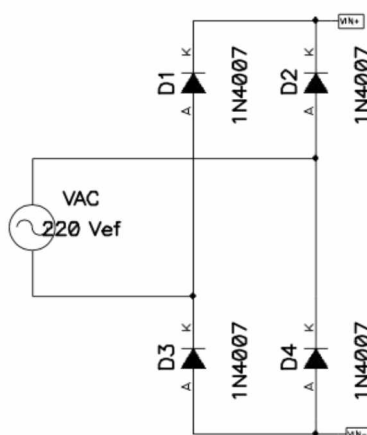


Figura 6.36 - Circuito retificador para tensão alternada de entrada.

### 6.3.3 Circuito de Diodos Laser

Tendo em vista o resultado promissor do uso de um número reduzido de diodos laser em conjunto com a fibra óptica (ver Figura 5.74), principalmente em soldagens que exigem menor intensidade luminosa para sua visualização sem maior interferência do arco, como as MIG/MAG com transferência por curto circuito ou as TIG de baixa corrente, estabeleceu-se nos requisitos do sistema guiado sem fio para soldagens mecanizadas a distribuição do número total de diodos laser (50 unidades) em conjuntos de menor quantidade.

Entretanto, é possível o acionamento de um conjunto de diodos laser em dois arranjos distintos: em série ou em paralelo, Figura 6.37. 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 (cerca de 9 V), aumentando a corrente de pico que passa pelo conjunto, com a corrente sendo dividida, idealmente, de forma igual 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.

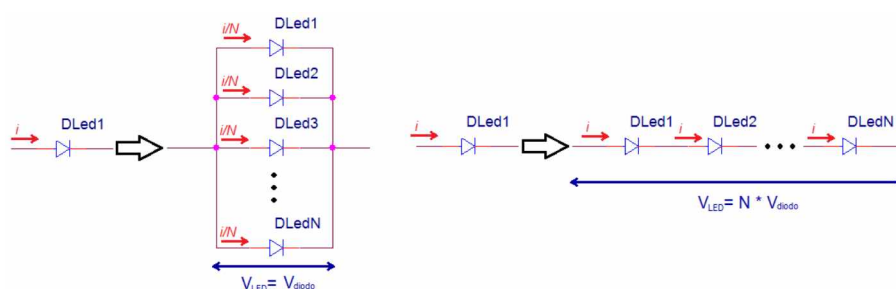


Figura 6.37 – Configuração dos diodos laser em: paralelo (esquerda) e série (direita).

Como a energia luminosa é o que realmente interessa para o propósito deste trabalho, e esta é proporcional à corrente neste semiconductor (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.

Desta forma, e considerando os resultados observados no projeto e testes de bancada da topologia ressonante modular, dividiu-se a totalidade dos 50 diodos laser em seis conjuntos, onde quatro deles possuem oito (ISO 3834, ISO3834) diodos laser em série e dois deles possuem nove (9) diodos laser em série.

Considerando que as condições de acionamento em alta baixa e alta frequência trarão resultados em validação próximo ao observado no protótipo de pulso quadrado, já que apesar da forma senoidal da corrente é menos degradante ao componente semiconductor e, em relação a intensidade luminosa obteve-se um ganho no valor de pico (da corrente), a ideia de se utilizar conjuntos de 9 diodos laser, traz as seguintes flexibilizações do sistema, principalmente em filmagens de baixa intensidade luminosa do arco:

- Acionamento de um conjunto por vez para minimização do desgaste do diodo laser, quando em filmagens de baixa velocidade;
- Acionamento de pares de conjuntos (mínimo de 16 diodos laser) para o aumento da luminosidade em soldagens de maior intensidade do arco, mantendo a proteção ao desgaste no diodo laser;
- Flexibilização do acionamento de conjunto em combinações desejadas para aumento de intensidade luminosa com mínimo desgaste dos sistema (como os dois exemplos anteriores);
- Uso do conjunto completo de diodos pode permitir filmagens com iluminação indireta, já que se espera uma densidade luminosa muito superior ao que já foi obtido, o que não foi possível de se obter com qualidade até o momento;
- Caso se deseje filmagens em alta velocidade (saindo do escopo de sistema guiado), combinação de acionamento dos conjuntos é flexível para se obter até o máximo de 1800 FPS (cada conjunto acionado em 330 Hz) sem grande deterioração do diodo laser.

Como cada topologia modular possui uma resposta ligeiramente diferente da outra, devido a imprecisão dos componentes ressonantes (capacitor e indutor), e sabe-se quais desta possuem maior pico de corrente, distribuiu-se os conjuntos de diodo de forma que ambos os conjuntos de 9 diodos pertencessem ao lado par de acionamento, conectando-os às placas de número 2 e 4.

A construção da PCB dos diodos laser deve, portanto, contemplar os seis pares de entrada e saída do pulso de corrente provindo das placas modulares, do lado par e ímpar e distribuir a trilha de cada pulsos de corrente evitando ao máximo a inserção de indutância de trilha, com formatos sem quinas ou ângulos fortes. Como cada diodo laser será ligado à entrada de uma fibra óptica, estes não precisam estar agrupados em um pequeno espaço e é prudente, considerando a construção posterior de um adaptador diodo laser/fibra, deixar espaços entre os conjuntos de diodo laser. A PCB projetada e construída é vista na Figura 6.38, assim como a distribuição dos conjuntos de diodos com suas respectivas placas.



Figura 6.38 – PCB de distribuição do conjunto de 50 diodos laser.

Por fim, para a adaptação do diodo laser com a face de entrada de cada fibra óptica, projetou-se e se construiu suportes (um para cada lado) em ABS através de prototipagem rápida (Figura 6.39). Testes de impressão foram realizados anteriormente, para que a face superior do diodo laser estivesse centralizada e concêntrica com a face de entrada da fibra óptica e que cada fibra tivesse interferência em seu furo de conexão, permitindo uma maior rigidez de montagem. Uma moldura para o circuito de diodos laser também foi impresso, garantindo maior rigidez e ainda isolamento em sua montagem com o conjunto de módulos de acionamento.

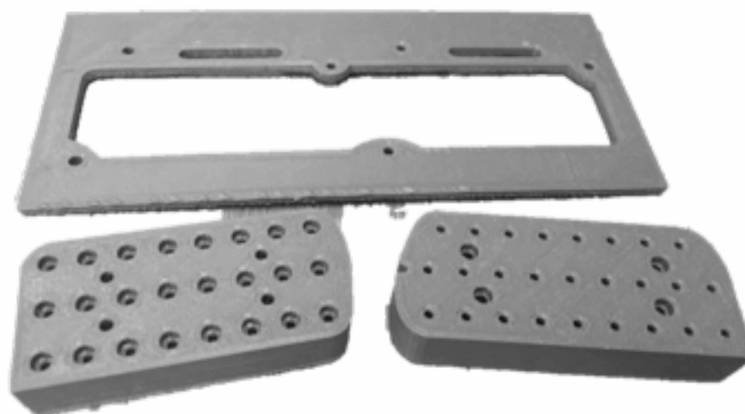


Figura 6.39 – Protótipos em ABS: suporte de PCB dos diodos laser (cima) e adaptadores de diodo laser com a fibra óptica (baixo).

#### 6.3.4 *Protótipo Ressonante e medidas de Proteção*

O protótipo final do sistema de visão ressonante é composto por uma torre que placas interligadas entre si, Figura 6.40, onde o circuito inferior provém a lógica digital de pulso da câmera e os pulsos das chaves dos módulos ressonantes, as placas intermediárias, três de cada lado, são semelhantes entre si, contendo um módulo de acionamento de duas chaves (Mais e Menos) pela topologia ressonante descrita no item 6.3.1, e o circuito superior contém as trilhas e os 50 diodos laser.

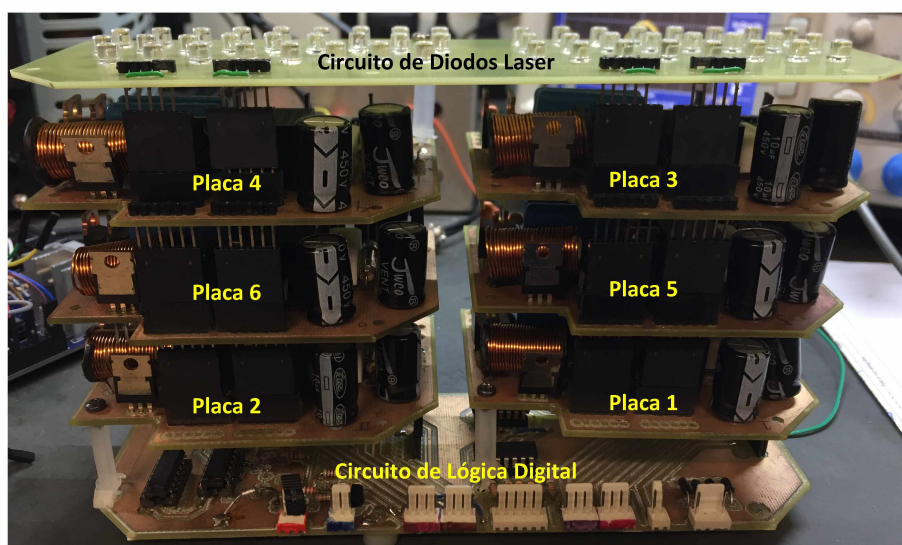


Figura 6.40 - Montagem do Sistema de Visão Projetado para o Sistema Guiado sem Fio.

A comunicação entre os módulos foi montada de forma que permitisse a flexibilidade (troca e configuração individual) entre eles e também com o intuito de garantir rigidez mecânica e continuidade nos contatos elétricos na montagem final. Apesar de ser

uma montagem que, com certeza, impressiona, suas características são favoráveis, em conjuntos com outros fatores, com o aparecimento e a susceptibilidade do sistema como um todo ao ruído eletromagnético.

Portanto, apesar de todas as placas individualmente possuírem robustez e comportamento elétrico dentro do esperado pelo projeto e simulação, a montagem final apresentou grande instabilidade de funcionamento e susceptibilidade a ruídos. Credita-se esse comportamento ao fato que os sinais de alta e baixa tensão são transmitidos por todas as placas, de baixo para cima e o drivers de *gate*, certamente possuindo uma natureza chaveada para a criação da tensão isolada, estão muito próximos uns dos outros e também das trilhas das placas adjacentes.

Esta susceptibilidade causa sobrechaveamento da topologia ressonante e, por consequência, estresse e, em alguns casos, queima dos principais componentes semicondutores, como as chaves IGBT, os *drivers* de *gate* e até mesmo os diodos laser. Outro fatores que podem contribuir para a susceptibilidade do protótipo a ruídos.

- a distância dos sinais de controle do MCU ao *driver* das chaves, assim como o uso de cabos não blindados;
- o circuito de conexão Explorer/Exterior foi construído como medida paliativa possuindo contatos elétricos instáveis, gerando sinais flutuantes e com trilhas muito finas de conexão, dificultando a soldagem dos pinos e, ocorrendo quebra de trilhas e soldas frias com facilidade;
- a tensão de 3.3 V tem pouca estabilidade como nível alto em uma logica TTL e não é tratada de forma alguma para o envio dos pulsos PBs, para as chaves Menos;
- o uso de fontes chaveadas para alimentação dos componentes: uma fonte chaveada de 9 V para o circuito de controle, uma de 15 V para o acionamento das chaves Mais e uma fonte chaveada 12 V para a câmera.

A fim de se obter o melhor resultado possível sem que houvesse risco de queimas dos componentes semicondutores (em sua maioria de difícil acesso para compra), estabeleceu-se algumas metas e correções do sistema para proteção contra sobrechaveamento:

- Construção de gaiolas de Faraday para cada módulo de controle, com a carcaça das gaiolas na referência do controle (GND);
- Inserção de filtros RC em todas as entradas de pulso do *driver de gate* (1 kΩ e 330 pF), assim como na entrada da tensão de *shutter* no MCU;
- Troca dos cabos de envio de sinais do MCU para a lógica digital por um cabo manga com blindagem (GND na malha);

- Inserção de um circuito de condicionamento dos sinais shutter e trigger da câmera, passando por duas portas inversora com *Schmidt trigger* cada uma delas, na tentativa de aumentar o nível de tensão para o TTL e impedir flutuações de tensão pela lentidão da borda de descida;
- Troca das fontes chaveadas por fontes lineares para testes;
- Diminuir o número de placas na montagem (para, por exemplo 4) a fim de diminuir a influencia eletromagnética sofrida por cada placa;
- Usar o Varivolt como tensão de entrada no lugar da tensão da rede para diminuir e controlar o nível de tensão e corrente circulando pelos diodos laser, mesmo sabendo que essa ação afetará diretamente a intensidade luminosa emitida pelo circuito.

Todas essas medidas foram implantadas no protótipo final de topologia ressonante, consumindo um longo tempo que poderia ter sido utilizado em outras atividades. Durante todos esses experimentos para tentar eliminar o sobrechaveamento observado no módulos ressonantes, houve queima de componentes chave, como o driver de *gate* (ADUM5230), chaves IGBT e de um número alto de diodos laser. Mesmo após todas as correções realizadas, com uma montagem de apenas 3 placas e regulagem de tensão de entrada pelo varivolt, o sistema permaneceu com funcionamento instável, em momentos que não houve nenhum sobrechaveamento alternando-se com momentos de sobrechaveamento exagerado, sem mudanças nos componentes do teste de bancada.

Por se tratar de um desenvolvimento complexo e totalmente novo na área, é esperado que surjam contratempos e imprevistos que devam ser superados ao longo do tempo. Porém, o tempo se tornou a variável limitadora neste caso. Desta forma, por falta de tempo para melhorias eficientes, o Protótipo de Sistema de Visão com 50 diodos laser e Topologia Ressonante, aqui descrito, foi considerado instável para testes em validação em soldagens. Todo o desenvolvimento restante descrito considera seu funcionamento adequado, porém para a validação em soldagens optou-se por utilizar o Protótipo ViaSolda Pulso Quadrado.

## 6.4 Validação do ViaSolda Web

### 6.4.1 Soldagens MIG/MAG

Para a validação do sistema guiado sem fio, ViaSolda Web, em soldagens, escolheu-se dois conjuntos de parâmetros para soldagem MIG/MAG, procurando-se obter uma configuração de transferência por curto circuito e uma em voo livre.



Tabela 6.10 – Parâmetros ajustados para o teste ViaSolda Web e MIG/MAG.

Parâmetro		Curto Circuito	Voo Livre	Unidade
		Valor Médio	Valor Médio	
Soldagem	Gás de Proteção	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	Ar + 8% CO <sub>2</sub>	---
	Vazão do Gás de Proteção	14	14	l/min
	DBCP	12	18	mm
	Tensão	20	31	
	Velocidade de Alimentação	2,8	3,6	
Sistema de Visão	Frequência de Acionamento	30		FPS
	Tempo de pulso	2		μs
	Tempo de Exposição ( <i>shutter</i> )	1,25		μs
	Seleção de <i>Trigger</i> (SW1-4)	Normal Shutter		
	Acúmulo do CCD (SW1-5)	Field Accumulation		
	Correção de Gama (SW1-7)	0,45		

O par câmera-fibra óptica são dispostos de forma antissimétrica em relação à tocha de soldagem, com ângulos simétricos de inclinação, 27°, e distâncias de 250 mm da região de interesse (tocha, poça e seus arredores). Para estas filmagens, especificamente, o par câmera-*driver* foi posicionado longitudinalmente à junta de soldagem.

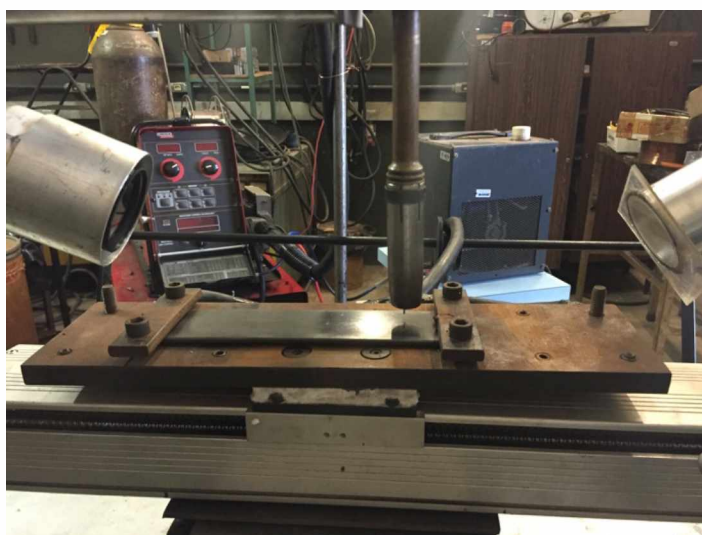


Figura 6.41 - Montagem experimental de validação ViaSolda Web

Segue lista dos equipamentos e consumíveis utilizados durante a realização dos testes.

- Óculos de proteção modelo 620.P1002.00 Skyline.
- Mesa movimentadora XYZ;
- Fonte Lincoln Eletric Power Wave 450/STT, para processo STT;

- Arame ER70S6 com diâmetro de 1,2 mm
- Chapas de aço ao carbono de espessura 1/2”.
- Componentes do Sistema Guiado Sem Fio (Figura 6.42):
  - Protótipo ViaSolda Pulso Quadrado como Driver dos diodos Laser
  - Filtro Óptico Comar 905 IH 25;
  - Câmera Costar SI-M331;
  - Placa de captura e conversão IP GXV3500
  - Fibra Óptica de comunicação Diodos/Solda
  - Explorer 16BR e seus periféricos como dispositivo mestre
  - Ultrabook LG com Win7 e Internet Explorer como dispositivo cliente
  - Roteador sem Fio com entrada Ethernet

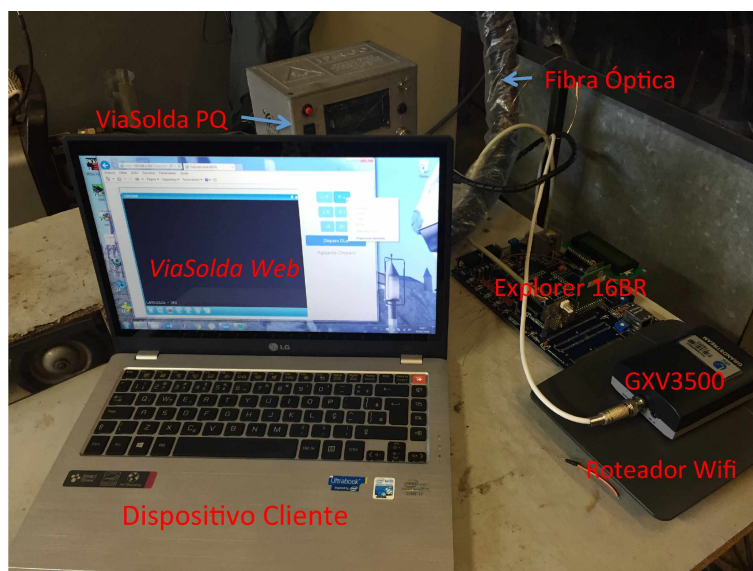


Figura 6.42 - Detalhe de montagem do Sistema Guiado sem Fio.

Para a documentação desta validação, a tela do dispositivo cliente foi capturada em uma taxa de 30 FPS por um programa comercial de captura de imagens (*VirtualDub*), durante todo o processo de soldagem guiada com auxílio visual. A placa de conversão IP também oferece a captura das imagens da câmera analógica em um vídeo .avi, que também foi adquirido como prova da validação. Exemplos das telas do dispositivo cliente, durante a validação em MIG/MAG com transferência por curto circuito e voo livre são mostradas na Figura 6.43 e na Figura 6.44.

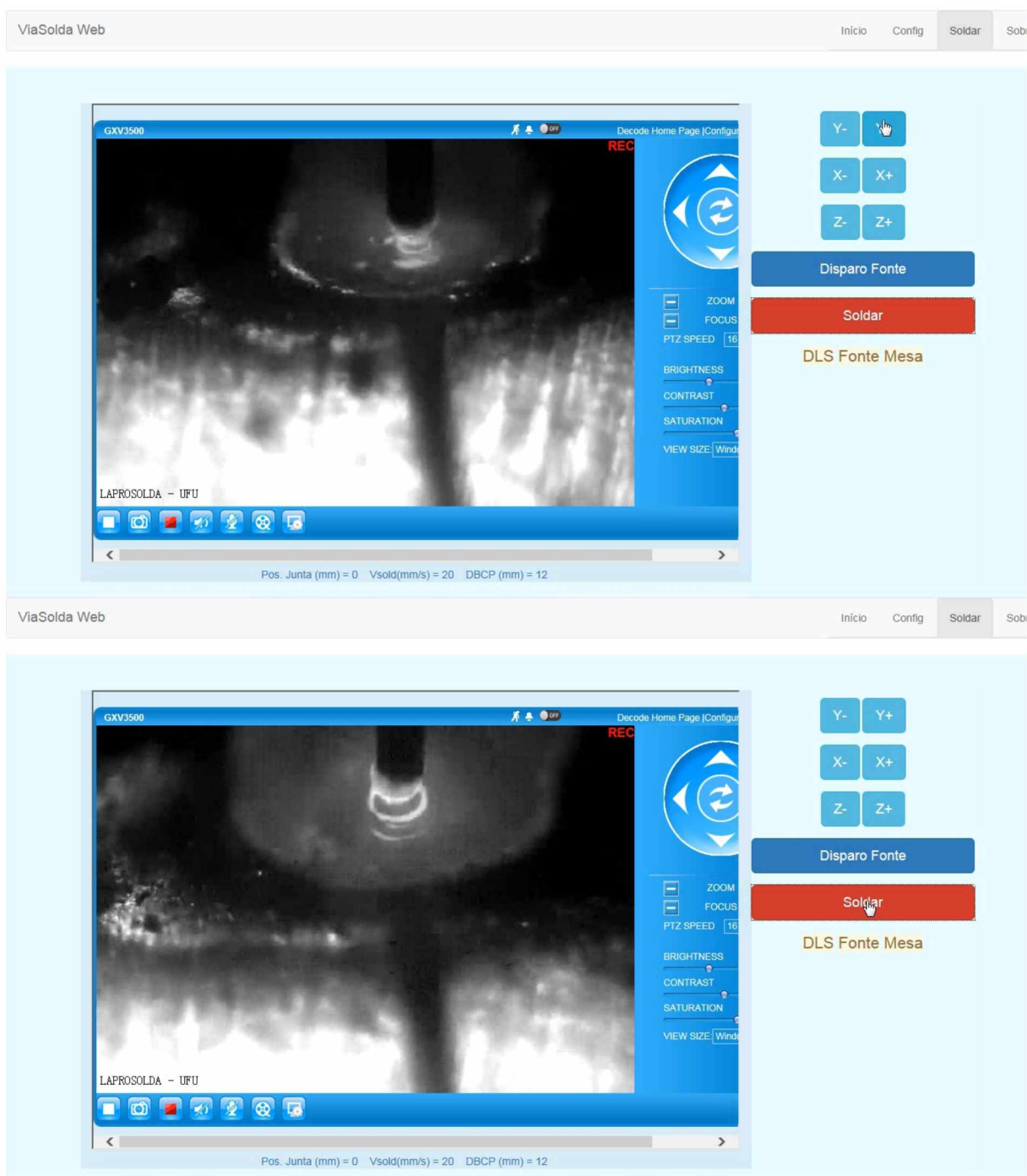


Figura 6.43 – Exemplos de imagens da captura de tela para a validação do ViaSolda Web com soldagem MIG/MAG CC (20 V, 2,8 m/min).

Exemplos de imagens do sistema de visão, capturada pela GXV3500 são mostradas na Figura 6.45. Observa-se que, para que não haja perda de envio de imagens pela câmera analógica, o *encoder*, envia imagens com menor resolução. Porém, estas imagens apresentam aspecto de iluminação e contraste semelhantes aos obtidos com o protótipo ViaSolda em validações anteriores. Mesmo para o processo com transferência por

vôo livre globular (só é possível identificar o processo quando se analisa as imagens capturadas) é possível discernir a região a frente da junta para tomada de decisões de posicionamento da tocha.

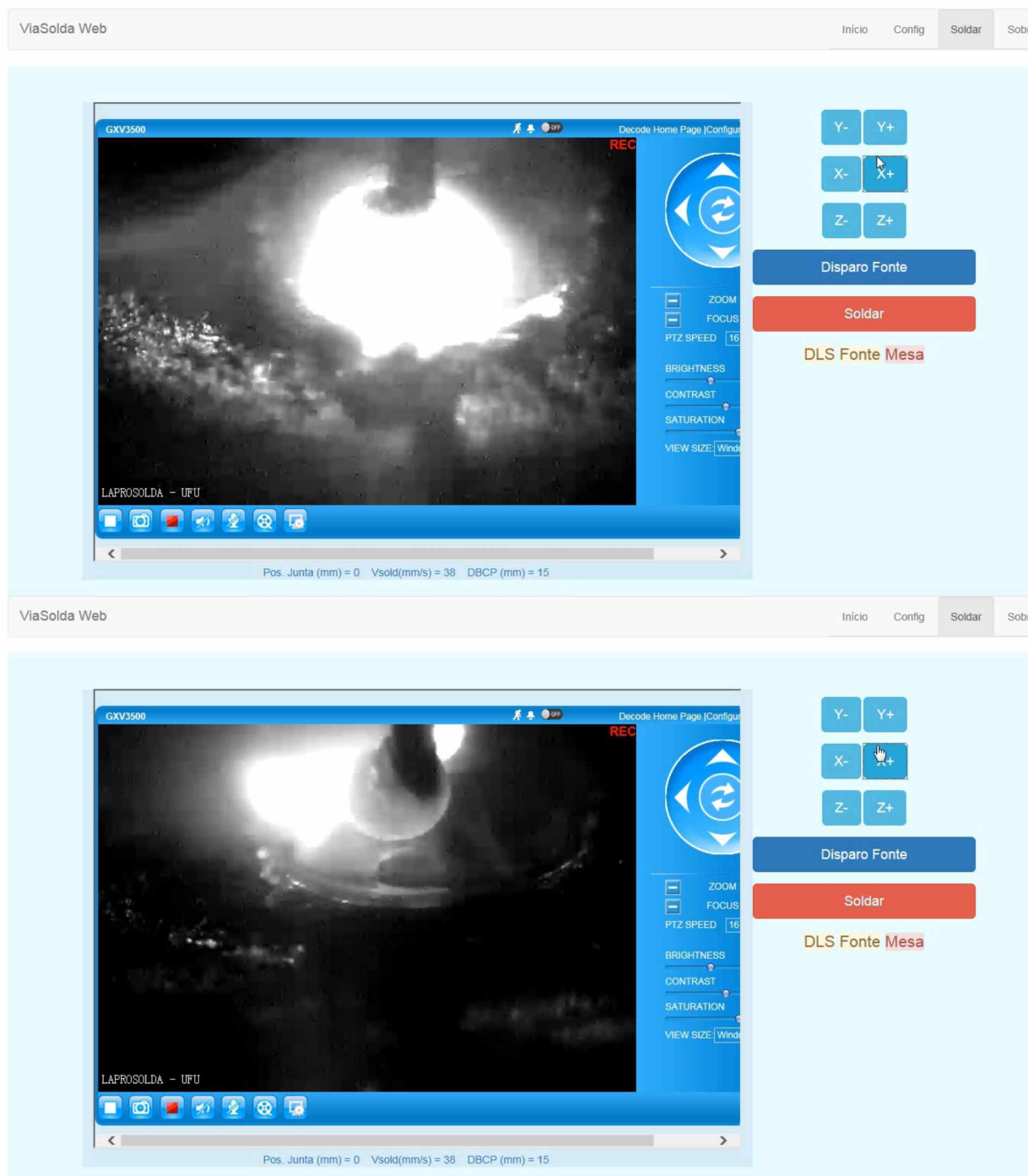


Figura 6.44 – Exemplos de imagens da captura de tela para a validação do ViaSolda Web com soldagem MIG/MAG VL (31 V, 3,6 m/min).

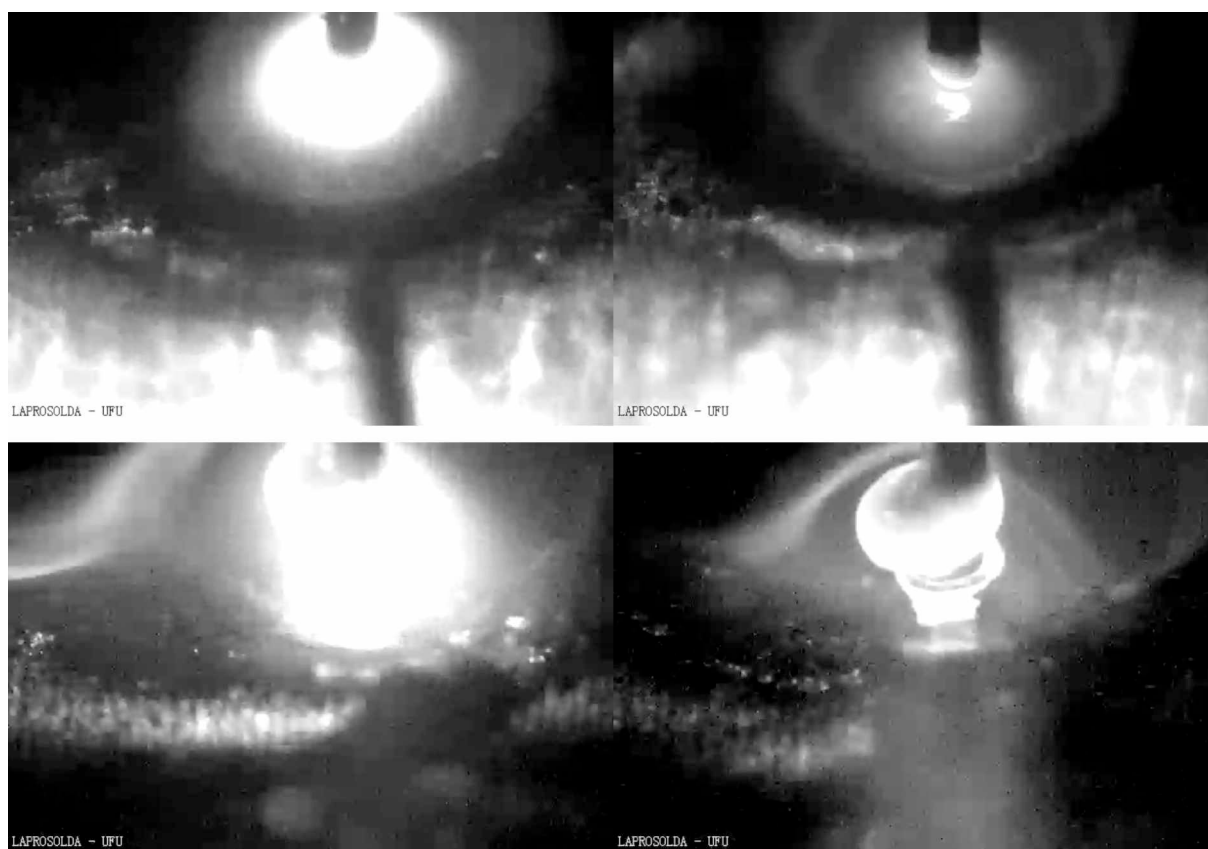


Figura 6.45 - Exemplos de imagens capturadas pela GXV3500 em soldagens MIG/MAG CC (cima) e VL (baixo).

Por fim, o aspecto superficial do cordão de solda é mostrado na Figura 6.46. É possível perceber os momentos em que a tocha movimentou-se (em relação a chapa), promovendo um cordão “torto”. A mudança da velocidade de soldagem provocou a diminuição da deposição de material., claramente visível no final do cordão com transferência por curto circuito e a mudança de DBCP (diminuição, no caso da transferência em voo livre) também afetou o aspecto do cordão se solda.

#### 6.4.2 Avaliação Subjetiva de Usuários

Tendo em vista que a melhor validação prática para um sistema guiado com auxílio visual é a experiência vivenciada pelo operador e sua opinião a cerca das vantagens e limitações do sistema, alguns depoimentos de pessoas que tiveram contato direto com o sistema de visão ViaSolda e o sistema guiado sem fio ViaSolda Web foram coletados e são mostrados a seguir.





Figura 6.46 - Aspecto final do cordão de solda com variação de DBCP e junta para CC (cima) e VL (baixo]

*"Dentre os inúmeros desafios de uma soldagem circunferencial em um chanfro estreito está a dificuldade de manter o arco no centro do chanfro. Normalmente é necessário um certo contorcionismo por parte do soldador para corrigir a posição da tocha à medida que esta se desloca da posição plana até a sobre cabeça, passando pela vertical. Nesta última posição, a tendência de escorrimento é tão grande que muitas vezes o metal líquido se desprende da poça e atinge o soldador. Com o sistema de visão posicionado eu pude, na condição de soldador, fazer as correções da trajetória da tocha observando nitidamente a poça de soldagem através de um laptop sentado confortavelmente na cadeira da minha mesa. Com certeza, com a popularização desse sistema através da adesão dessa tecnologia por parte das construtoras de oleoduto/gasoduto, a tarefa de unir tubos através da soldagem se tornará mais fácil e consequentemente de melhor qualidade."*

*Prof. Víctor Augusto Nascimento Magalhães*

*"Em testes, ao utilizar o sistema – ViaSolda – consegui observar a junta e realizar o seguimento da mesma observando as características do chanfro (em V). Com o sistema foi possível ainda verificar a flutuação da poça fundida e sua dinâmica, sendo de grande auxílio em soldagem fora de posição. A facilidade de uso e sua capacidade de visão é de grande auxílio no estudo e desenvolvimento de processos de soldagem".*

*Prof. Marcus Vinícius Ribeiro Machado*

*"Utilizar o sistema de visão para mapear os parâmetros do processo de soldagem arame tubular é uma maneira nova de pesquisar em relação a trabalhos anteriores como por*

*exemplo, a técnica de perfilografia. É um sistema de fácil instalação e uso. O equipamento apresenta um manual bem explicativo."*

Hamed Alinezhad Kordi

*"Ao utilizar o sistema, nota-se uma imagem de alta qualidade e permite ao soldador experimentar com nitidez a percepção visual da junta soldada, da poça de fusão em formação e da DBCP (distância bico contato peça) durante a execução do processo de soldagem. É notório que o equipamento tem potencial de proporcionar ao soldador conforto (posicionar-se de forma ergonomicamente correta) e evitar o mesmo de contato direto com fumos metálicos (classificados como asfixiantes ou tóxicos) e da exposição à radiação se utilizado na soldagem mecanizada. Portanto, recomendo o uso do equipamento para controlar remotamente o processo de soldagem em tempo real e espero que seja utilizado pela indústria principalmente para melhorar a saúde do soldador."*

Lucas Alves do Nascimento

*"Tive a oportunidade de utilizar o sistema com diferentes processos de soldagem e aplicações. No que se refere aos processos MIG/MAG com transferência curto-circuito convencional e os derivativos STT, RMD e CMT foi possível visualizar com nitidez o posicionamento do eletrodo em relação à junta, bem como a formação da poça fundida à frente do cordão e sua acomodação dentro do chanfro. Durante a soldagem com o processo CMT foi possível observar os frequentes recuo do arame-eletrodo durante a transferência das gotas metálicas e como esse recurso, soma ao controle eletrônico da fonte, proporciona uma transferência mais suave e com menor agitação da poça de fusão. O sistema também mostrou-se uma importante ferramenta no estudo da transferência metálica na soldagem subaquática. Considero o sistema um grande avanço para setores industriais e pesquisas voltados para a soldagem automatizada."*

Prof. Thonson Ferreira Costa



## CAPÍTULO VII

### CONCLUSÕES

Partindo-se do objetivo principal de projeto, desenvolver um sistema guiado de soldagens com uso de iluminação no infravermelho próximo, é possível concluir que:

*a) Em relação a inserção da câmera analógica de baixo tempo de exposição:*

- A qualidade da imagem de uma câmera analógica depende de fatores externos como do cabo de transmissão da imagem, da placa e do *software* de captura utilizados e da interferência eletromagnética que podem ser geradas nas fontes de soldagem, porém provém uma imagem nítida e clara para a observação da região da poça fundida e seus arredores;
- As imagens em soldagens com baixa intensidade luminosa (transferência por curto-circuito) mostram que a inserção de uma câmera de baixo tempo de exposição é uma solução promissora para a melhoria do sistema de visão por infravermelho próximo nos processos de soldagem;
- A utilização do protótipo de topologia ressonante mostrou, porém, que há necessidade do aumento da intensidade luminosa dos diodos laser durante o tempo de abertura da câmera, principalmente quando se observa soldagens com maior nível de intensidade luminosa.

*b) Em relação ao projeto e validação do Protótipo de Pulso Quadrado:*

- A topologia de pulso quadrado aumentou a capacidade emissora do mesmo conjunto de diodos laser utilizados anteriormente, de forma robusta, mesmo para acionamentos de alta frequência, sem distinção de funcionamento mesmo a acionamentos em 1 kHz.

- O diodo laser torna-se um elemento limitador para uso em altas frequências, porém investigações sobre seu comportamento mostram que o aumento da corrente eficaz sobre em valores de até valores próximos de 1 A (39,2 A em 300 FPS). Com respeito ao ciclo de trabalho de 0,1%, ainda tem potencial de uso em iluminação de processos de soldagem;
- Validou-se o protótipo ViaSolda Pulso quadrado em soldagens TIG, TIG Pulsado, MIG/MAG com transferência por curto-circuito, curto-circuito controlado (STT, RMD e CMT), em voo livre (globular, goticular e com alongamento), com valores de tensão de até 33 V e correntes de até 310 A, gases CO<sub>2</sub> puro, Ar + 25% CO<sub>2</sub>, Ar + 8% CO<sub>2</sub> e Ar + 5% O<sub>2</sub>, em filmagens de baixa (30 FPS) e altas velocidades (300 FPS);
- Na maioria das imagens obtidas, o sistema de visão é capaz de sobrepor a luz do arco de solda, mesmo para transferências metálicas com maior intensidade de corrente. Em todos os casos foi possível discernir a poça e seus arredores, principalmente com o aumento da densidade de luz provinda da fibra óptica.
- O uso do sistema de visão em alta velocidade provou ser uma ferramenta promissora no estudo da transferência metálica em processos MIG/MAG, sendo possível observar as transições do fenômeno físico com detalhes, principalmente em transferências de menor velocidade de ocorrência (curtos-circuitos mais lentos ou voo livre globular).

*c) Em relação ao projeto e validação do Sistema Guiado Sem Fio:*

- A topologia de acionamento modular ressonante mostrou-se em experimentos de bancada experimental robusta e a inserção do driver de gate com tensão isolada deixou o circuito seguro sem a inserção de um número absurdo de fontes de alimentação, flexível (em montagem ou possibilidades de acionamento individual) para a construção do protótipo com 50 diodos laser;
- O protótipo de driver de gate montado em torre provou-se susceptível a falhas no chaveamento, atribuído a interferências eletromagnéticas e aos níveis de tensões baixas do circuito de controle. Mesmo com a aplicação de diversas medidas preventivas, não foi possível utilizar o protótipo fora dos testes de bancada de forma segura aos componentes semicondutores;
- Validou-se a montagem do ViaSolda Web com o protótipo ViaSolda Pulso quadrado em soldagens MIG/MAG com transferência por curto-circuito e voo livre globular, com captura das imagens da tela (IHM e tomadas de decisão) e movimento da tocha durante o processo de soldagem para comprovação de sua aplicabilidade;

- As imagens obtidas de forma sem fio pelo codificador tem o aspecto pixelado, deterioramento característico de sistemas de imagens desta natureza para a manutenção do envio em tempo real. Estas imagens apresentam aspecto de iluminação e contraste semelhantes aos obtidos com o protótipo ViaSolda, mesmo para o processo com transferência por voo livre, sendo possível discernir a região a frente da junta para tomada de decisões de posicionamento da tocha;
- Apesar da necessidade de uso do protótipo pulso quadrado como sistema de iluminação, foi possível validar o sistema guiado sem fio com respeito a todos os seus requisitos de projeto, com comprovação empírica pelo aspecto superficial dos cordões de solda;
- Depoimentos subjetivos de usuários que tiveram contato com o sistema de visão, ViaSolda, e o sistema guiado sem fio, ViaSolda Web, mostram sua versatilidade de aplicações no estudo de diferentes aspectos em processos de soldagem e, principalmente, seu potencial de uso para o auxílio visual em soldagens circunferenciais, proporcionando conforto ao operador e eliminando seu contato direto com as emissões prejudiciais a saúde inerente aos processos de soldagem.

## **CAPÍTULO VIII**

### **TRABALHOS FUTUROS**

Como estudos e desenvolvimentos futuros, para a melhoria do sistema de visão para processos de soldagens e seu desenvolvimento em um sistema guiado sem fio para o auxílio de processo mecanizados sugere-se os seguintes tópicos:

- Projeto de um novo sistema óptico para o protótipo de ViaSolda Pulso Quadrado, visando a diminuição de sua estrutura física, porém aplicando os mesmos princípios para condensação e homogeneização da luz provinda das diferentes fontes pontuais;
- Atualização da placa de circuito impresso do Protótipo ViaSolda Pulso Quadrado para a inclusão de isolamento galvânico entre controle e potência, trazendo maior proteção e flexibilização de uso em ambientes diferentes;
- Projeto de um fibra óptica com maior flexibilidade e menor peso, facilitando sua utilização em soldagens mecanizadas onde a tocha se movimenta, como em soldagens circunferenciais;
- Projeto de um novo arranjo do sistema de visão, preferencialmente por fibra ópticas, cuja aquisição de imagens e iluminação seja concêntrica, com o intuito 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;
- 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;

- Projeto de transferência do circuito do dispositivo mestre (MCU e periféricos) para, em conjunto com a lógica digital, compõem a placa inferior da montagem do Protótipo Ressonante, eliminando a distância entre fonte e receptor do pulso de controle, assim como inserção de elevadores de nível de 3,3 para 5 V em todos os terminais de controle,
- Estudo de inserção de um MCU escravo dedicado ao controle do acionamento dos módulos ressonantes, inserido no circuito inferior de lógica digital, com níveis de tensão de 5 V e comandado pelo dispositivo mestre;
- Estudo aprofundado das causas do sobrechaveamento no Protótipo de Topologia Ressonante e determinação de outras medidas que possam estabilizar seu funcionamento;
- Validação em soldagens diversas utilizando da Topologia Ressonante com 50 diodos laser e estudo de sua utilização como iluminação indireta ou em soldagens com alto nível de luz do arco (com o duplo arame);
- Inserção de maior controle das configurações do dispositivo mestre na IHM webserver (valores padrão de deslocamento, escolha dos módulos a serem acionados, etc);
- Estudo de utilização de módulos ressonantes para a obtenção de filmagens em alta velocidade (como 1800 FPS);
- Projeto e inserção de circuito condicionador de sinais para aquisição de Tensão, Corrente e Velocidade de Alimentação pelo dispositivo mestre;
- Mudança do algoritmo do *firmware* e do IHM para incluir o envio periódico (por exemplo, a cada 1 segundo) dos valores médios e RMS dos sinais elétricos da soldagem;
- Inserção de algoritmo de proteção a movimentação da tocha para o caso de perda de conexão, ou criação de controle local (painel redundante), evitando a possibilidade de choques mecânicos ou perda total de controle remoto por parte do operador;

## CAPÍTULO IX

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PIXELINK. **PL-B776F Firewire, PL-B776G Gigabit Ethernet, PL-B776U USB 2.0**. Ontario, 3 p. Datasheet: 776.

Costar Video Systems. **Remote Head Monochrome CCD Camera SI-M330 Operation Manual**. Temecula, CA, 32 p. Operation Manual: SI-M330.

PHILIPS SEMICONDUCTORS. **BYV26 series - Fast Soft-recovery Controlled Avalanche Rectifiers**. 1994. 13 p. Datasheet: BYV26C.

ST MICROELECTRONICS. **IRF740 - N-Channel 400V - 0.48  $\Omega$  - 10 A - TO-220 PowerMESH MOSFET**. Italy, 1998. 9 p. Datasheet: IFR740.

International Rectifier. **IRG4BC20U - UltraFast Speed IGBT**. 2000. 9 p. Datasheet: PD - 91448D.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **In-Circuit Serial Programming<sup>TM</sup> (ICSPTM) Guide**. 2003a. 264 p. Datasheet: DS30277D.

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

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

OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. **Nanostack Pulsed Laser Diode in Plastic Package 75 W Peak Power**. Regensburg, 2006. 6 p. Datasheet: SPL PL90\_3.

Microchip Technology Inc. **dsPIC 33F Family Data Sheet - High Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers**. 2007. 370 p.

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

ITU - International Telecommunication Union. G013. What is meant by ISM applications and how are the related frequencies used? , 2008. Disponível em: < [http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html - g013](http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html-g013) >. Acesso em: 9 de março de 2011.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC18F2458/2553/4458/4553 Data Sheet - 28/40/44-Pin High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with 12-Bit A/D and nanoWatt Technology**. 2009. 46 p. Datasheet: DS39887C.

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

Microchip Technology Inc. **Microchip TCP/IP Stack 5.20b**. 2010. 94 p. Help: License Rev. No. 01-100709.

LINCOLN. Technology gest to the root of pipe welding. 2010. Disponível em: < <http://www.lincolnelectric.com> >. Acesso em: 20 de abril de 2010.

Microchip Inc. **ZG2100M/ZG2101M Wi-Fi® Module Data Sheet - 2.4 GHz 802.11b Low Power Transceiver Module**. 2010. 32 p. Data Sheet: DS70624A.

Connect One - The Device Networking Authority. Nano Socket iWiFi. 2011. Disponível em: < <http://www.connectone.com/products.asp?did=73&pid=98> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

Bluetooth SIG, Inc. The Official Bluetooth Technology. 2011. Disponível em: < <http://www.bluetooth.com> >. Acesso em: 13 de março de 2011.



Wi-Fi Alliance. Wi-Fi Alliance: Home. 2011. Disponível em: < <http://www.wi-fi.org> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

Sparkfun Electronics. WiFly GSX Breakout. 2011. Disponível em: < <http://www.sparkfun.com/products/10050> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

Microfone (Cápsula) de Eletreto - Para que complicar? , 2013. Disponível em: < <http://www.qsl.net/p/pp5vx/artigos/Microfone-de-Eletreto.pdf> >.

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, Supplement 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. Gatinburg, 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 International 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**. 10ª 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.

CAPELLI, A. **Como projetar Fontes Chaveadas de Alimentação**. Revista Saber Eletrônica. São Paulo. 346: 3-13 p. 2001. Disponível em:

CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas: Teoria e Ensaios**. 4a. Edição. São Paulo: Érica, 2011. p.

CARVALHO, R. **Bootstrap 3: Criando Layouts e Grids**. <http://webdevacademy.com.br/tutoriais/ux/bootstrap-3-layouts-sistema-grids/>.Dispon%C3%ADvel em:

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.

COSTA, T. F.; FILHO, E. B.; AREVALO, H. D. H.; VILARINHO, L. O. Avaliação do Processo MIG/MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado para a Soldagem de Dutos de Aço Carbono em Passe Único. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 4, p. 13, Out/Dez 2012 2012.

CUNHA, A. F. O que são sistemas embarcados? **Saber Eletrônica**, v. 43, n. 414, p. 1-6, Julho 2007.

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

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. Gatinsburg, 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.

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.

FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial: Conceitos, Aplicações e Análises**. 6a edição. Érica, 2008. 278 p. ISBN 978-85-7194-922-5.

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.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. 4a Edição. São Paulo: Editora Érica, 2008. p.

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.

GALEV, M. **Home Networking with ZigBee**. Design Article of EE Times 2004. Disponível em: <http://www.eetimes.com/design/communications-design/4006430/Home-networking-with-Zigbee>.

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

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.

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

ISO 3834. **Quality requirements for fusion welding of metallic materials**. 2005. 66 p. Norma: ISO 3834:2005.

JIALEI, Z.; XIANGDONG, J.; XI, Q. Application Study of Edge Detection for Droplet in Laser Enhanced GMAW Welding. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2014, p. 9, 2014.

JINCHAO LIU; ZHUN FAN; SØREN INGVAR OLSEN; KIM HARDAM CHRISTENSEN, J.; KRISTENSEN, E. K. A Real-time Passive Vision System for Robotic Arc Welding. 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2015. Gothenburg, Sweden. Aug 24-28. 389-394 p.

KOOPMAN JR., P. J. Embedded System Design Issues (the Rest of the Story). Proceedings of the International Conference on Computer Design (ICCD 96). 1996. Austin, TX, USA. October 7-9. 14 p.

KRAUSS, J. D. A. F., DANIEL A. **Electromagnetic with Applications**. Fifth Edition. Singapore: WCB/McGraw-Hill, 1999. p.

KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. **Welding International**, v. 14, n. 2, p. 4, 2000 2000.

LEAL, F. S.; TOLEDO, M. M.; GODOY, C. M. G.; COELHO, R. C. ALGORITMO PARA DETECÇÃO DE PICOS DE ONDAS CARACTERÍSTICAS DO ECG. XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica – CBEB 2014, 2014. 4 p.

LI, K. H.; ZHANG, Y. M. Consumable Double-Electrode GMAW Part II: Monitoring, Modeling and Control. **Welding Journal**, v. 87, n. 2, p. 44-50, February 2008.

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

Portal Hands: awesome mobile. Veja como montar uma rede Wi-Fi segura em casa., Rio de Janeiro, 2010a. Disponível em: <  
<http://moglobo.globo.com/integra.asp?txtUrl=/tecnologia/mat/2010/12/27/veja-como-montar-uma-rede-wi-fi-segura-em-casa-923360288.asp> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

Portal Hands: awesome mobile. Veja como montar uma rede Wi-Fi segura em casa. Por: Machado, A.; Teixeira, C. A.; Setti R.. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em: <  
<http://moglobo.globo.com/integra.asp?txtUrl=/tecnologia/mat/2010/12/27/veja-como-montar-uma-rede-wi-fi-segura-em-casa-923360288.asp> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

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

MARCOTTER, E. **Responsive Web Design**. New York: 2011. p.

MOTA, C. P. **Controle Teleguiado De Posicionamento De Tocha De Soldagem**. 2008. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Graduação em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOTA, C. P. **Sistema de Visão por Infravermelho Próximo para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco**. 2011. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOTA, C. P.; MACHADO, M. V. R.; FERNANDES, D. B.; VILARINHO, L. O. Estudo da emissão de raios infravermelho próximo em processos de soldagem a arco. **Soldagem e Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 044-052, Jan./Mar. 2011.

MOTA, C. P.; MACHADO, M. V. R.; FINZI NETO, R. M.; VILARINHO, L. O. Sistema de Visão por Infravermelho Próximo para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco. **Soldagem e Inspeção**, v. 18, n. 1, p. 019-030, Jan./Mar. 2013.



NASCIMENTO, L. T. D. **Avaliação da utilização de tecnologia de comunicação sem fio em redes PROFIBUS e FOUNDATION Fieldbus™**. 2008. 61 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Instrumentação) - Centro de Tecnologia e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

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

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 9th edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 964 p. ISBN 0-13-043245-8.

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.

OLIVEIRA, A. S. D.; ANDRADE, F. S. D. **Sistemas Embarcados - Hardware e Firmware na Prática**. 1a edição. Érica, 2006. 315 p. ISBN 85-365-0105-7.

OLIVEIRA FILHO, J. C. D. **Minicurso Zigbee**. Saber Eletrônica Online: 6 p. 2010. Disponível em: <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1634/>.

ONISHI, T.; KAWAHITO, Y.; KATAYAMA, S. In-Process Monitoring and Adaptative Control in Micro Welding with Fiber Laser. 8th International Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de Imagens Digitais - Princípios, Algoritmos e Aplicações**. Editora Thomson Learning, 2007. 528 p. p. ISBN 9788522105953.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999. 844 p. ISBN 85-346-0598-X.

RENE, T. **Introdução ao Bootstrap para iniciantes**. <http://websocialdev.com/introducao-ao-bootstrap-para-iniciantes-em-desenvolvimento/> 2015. Disponível em:

SAEED, G.; ZHANG, Y. M.; JAYMES, C. A Compact Sensor for Welding Process Control. Proceedings of 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. Proceedings of the 7th International Conference on Trends in Welding Research, 2005b. Callaway Garndes Resort, Pine Mountain, Georgia. May 16-20, 2005. p.665 - 670.

SANCHES, D. **Interferência Eletromagnética: em Sistemas Eletrônicos**. Clube de Autores, 2010. 215 p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber Editora, 2008. 284 p.

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.

SILVA, R. H. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**. 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado) - UFSC, Santa Catarina.



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.

SUNG, K.; LEE, H.; CHOI, Y. S.; RHEE, S. Development of a Multiline Laser Vision Sensor for Joint Tracking in Welding. **Welding Research, Supplement 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.

UMEHARA, Y.; SUZUKI, R.; NAKANO, T. Development os the Innoative GMW wire Improving the Flow Directon os Molten Pool. 8th Internation Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.

VILARINHO, L. O.; LUCAS, B.; HOUGHTON, M.; LUCAS, J. J.; RAGHUNATHAN, S. Sistema de Visão por infravermelho p´roximo 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.

WALL, W. A.; STEPHENS, D. L. Automatic Closed Circuito Television Electrode Guidance for Welding. **Welding Journal**, p. 713-720, 1969.

WILLIG, A. Wireless local and wireless personal area network technologies for industrial deployment. In: ZURAWSKI, R. (Ed.). **The industrial communication technology handbook**, 2005.

WOLF, W. **Computers as Components - Principles of Embedded Computing System Design**. 1st edition. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 688 p.

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.; 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.

## APÊNDICE I

### CÓDIGO FONTE DO ALGORITMO DE SINCRONIZAÇÃO ENTRE PULSOS RESSONANTES E CÂMERA SI-M331 “VIASOLDA\_CAM”

```
//-----  
//                                     VIASOLA - CAM  
//-----  
//  
// PROGRAMA DE ACIONAMENTO DOS DIODOS LASER DE ALTA POTÊNCIA POR UM PIC 16F877A  
// COM SINCRONIA ATRAVES DA SAÍDA DO SHUTTER (TEMPO DE EXPOSIÇÃO) DA CÂMERA.  
//  
// ULTIMA MODIFICAÇÃO: 24/08/2011  
//-----  
//  
// OBS: BOTÕES MAIS E MENOS HABILITAM/DESABILITAM O RECEBIMENTO DO SHUTTER E  
//       ACIONAMENTO DOS DIODOS E BOTAO DISP É SUBSTITUÍDO POR ENTRADA DE TRIGGER  
//       DO PIC./  
//-----  
  
#include "C:\Documents and Settings\Laprosolda\Meus  
documentos\Carolina\16F877A\viasolda_cam.h"  
#include <math.h>  
#include <stdio.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <LCD.C>  
#use fast_io(E)  
#use fast_io(A)  
#use fast_io(B)  
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()  
{  
    int DISP;  
    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);
    lcd_init();

    ext_int_edge(H_TO_L);
    SET_TRIS_B( 0x07 );
    SET_TRIS_E( 0x00 );
    SET_TRIS_A( 0x00 );
    output_low(PIN_B7);          //acionador do rele de potencia
    output_low(PIN_A0);          //frequencimetro
    //intro();
    disable_interrupts(INT_RTCC);
    disable_interrupts(INT_EXT);
    DISP=0;
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("--- VIASOLDA ---");
    lcd_gotoxy(1,2);
    lcd_putc("AGUARDA CAMERA. ");
    delay_ms(2000);
//BOTAO DE SEGURANÇA: ACIONA RELE E LED
    while(!input(PIN_B0))        //AGUARDA SINAL DA CAMERA!
    {
        lcd_gotoxy(1,2);
        lcd_putc("AGUARDA DISPARO.");
        while(input(PIN_B1))
        {
            output_high(PIN_B7);    //acionador do rele de potencia
            lcd_gotoxy(1,2);
            lcd_putc("ENVIANDO PULSOS.");
            while(1)
            {
                while(!input(PIN_B0))
                {
                    output_high(PIN_E1);
                    delay_cycles(2);
                    #asm
                    movf    0x03,W
                    movwf   0x09
                    #endasm
                    delay_cycles(ISO 3834, ISO3834);
                    output_low(PIN_E2);
                    delay_ms(10);
                }
            }
        }
    }
}

```

## APÊNDICE II

### CÁLCULO DE CORRENTE EFICAZ DA TOPOLOGIA DE PULSO QUADRADO

Por definição, a corrente eficaz pode ser calculada por:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_2} [i(t)]^2 \cdot dt} \quad (11.1)$$

Sabe-se que, para a topologia de pulso quadrado, a equação da corrente se comporta de forma aproximadamente constante apenas durante o tempo de acionamento das chaves, entre  $T_0$  e  $T_{pulso}$ , e é nula entre dois acionamentos consecutivos, entre  $T_{pulso}$ , e  $T_2$ , como mostra a **Error! Reference source not found.**

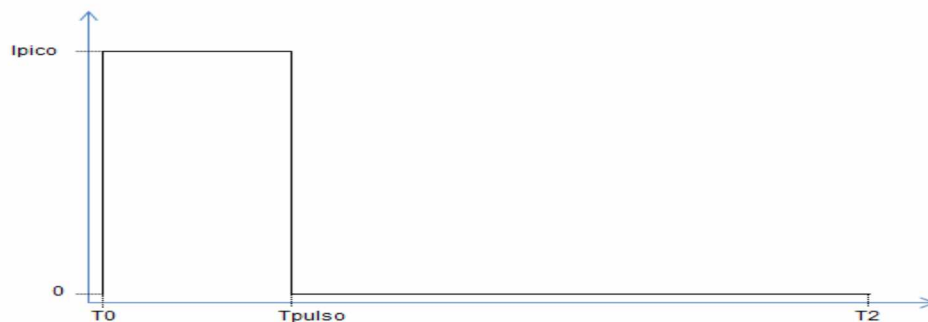


Figura 11.1 - Forma de onda esquemática durante um ciclo de pulso quadrado.

Pode-se, então, substituir o valor da corrente de pico na Eq. (11.1) e expandi-la para:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_0} \cdot \int_{T_0}^{T_{pulso}} [I_{pico}]^2 \cdot dt + \int_{T_{pulso}}^{T_2} [0]^2 \cdot dt} \quad (11.2)$$

Considerando o tempo inicial igual à zero,  $T_0 = 0$ , e a frequência de pulso  $f = 1/T_{pulso}$ , pode-se simplificar a Eq. (11.2) para:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{T_{pulso}}{T_2} \cdot I_{pico}^2} \quad (11.3)$$

Considerando a frequência de pulso  $f = 1/T_{pulso}$ , pode-se simplificar a Eq. (11.3) para:

$$I_{ef} = I_{pico} \cdot \sqrt{T_{pulso} \cdot f} \quad (11.4)$$

Para a especificação do fabricante dos diodos laser pode-se acioná-los com uma corrente de pico de 40 A, tempo de pulso de 100 ns e frequência de 1 KHz, Portanto:

$$\begin{aligned} I_{ef(fabricante)} &= I_{pico} \cdot \sqrt{T_{pulso} \cdot f} = 40 \cdot \sqrt{100 \times 10^{-9} \cdot 1000} \\ I_{ef(fabricante)} &\cong 0,4A \end{aligned} \quad (11.5)$$

Para a especificação da topologia apresentada, os diodos laser são acionados com uma corrente de pico de 40 A, tempo de pulso de 2  $\mu$ s e frequência de 30 Hz, Portanto:

$$\begin{aligned} I_{ef(PQ)} &= I_{pico} \cdot \sqrt{T_{pulso} \cdot f} = 40 \cdot \sqrt{2 \times 10^{-6} \cdot 30} \\ I_{ef(PQ)} &\cong 0,31A \end{aligned} \quad (11.6)$$

## APÊNDICE III

### CÓDIGO FONTE DO ALGORITMO DO MCU DO VIASOLDA PULSO QUADRADO “VIASOLDA\_NOVA PLACA”

```
//*****
//          VIASOLDA - PULSO QUADRADO - FPS VARIÁVEL - PIC18F4553
//-----
// Autora: Carolina Pimenta Mota
// Última Revisão: 27/02/2015
//-----
//
// Programa responsável pelo controle de envio de pulsos para diodos laser de
// alta potência em sincronia com tempo de abertura (shutter) de uma câmera. A
// uma frequência ajustada (até 1kHz), o PIC envia um sinal de TRIGGER e, quan-
// do a câmera envia o pulso de shutter, um pulso de 1.5 us é enviado para os
// diodos laser. dois botões (MAIS e MENOS) fazem o ajuste da frequência de pul-
// os desejada. Há um botão (DISPERATI) para habilitar/desabilitar o envio dos
// pulsos,
// um botão (MAIS) que habilita o envio de um pulso fixo (30Hz), independente
// da frequência ajustada e um botão (MENOS) para a re-escolha da frequência a-
// justada.
//
//-----
//  PINAGEM
//  B0 - HABILITA/DESABILITA PULSOS (FUNÇÃO DISP)
//  B1 - HABILITA/DESABILITA FPS Fixo de 30 Hz e FUNÇÃO MAIS
//  B2 - FUNÇÃO MENOS e HABILITA ROTINA DE ESCOLHA DA FREQ
//  E0 - TRIGGER
//  E1 - SHUTTER
//  E2 - PULSO DE ACIONAMENTO DOS DIODOS LASER
//  B5 - FREQUENCÍMETRO (1/2 FPS)
//  PORTA D - LCD (USO DE 4 VIAS DE COMUNICAÇÃO)
//
//*****
#include <ViaSolda_NOVAPLACA.h>          #include <stdio.h>
#include <LCD.C>                          #include <stdlib.h>
#include <math.h>                         #include <string.h>
```



```

//Declaração de constantes do LCD
#define ENABLE_PIN D0
#define RS_PIN D1
#define RW_PIN D2
#define Data4 D4
#define Data5 D5
#define Data6 D6
#define Data7 D7

// Definição dos botões IHM e pinos do
PIC
#define DISP          PIN_B0
#define MAIS          PIN_B1
#define MENOS         PIN_B2
#define RELE          PIN_C2
#define TRIGGER       PIN_E0
#define SHUTTER       PIN_E1
#define PULSO         PIN_E2
#define FREQ          PIN_B5

// Definição do uso dinâmico dos
botões + e -
#define      tempo1          300
//tempo de espera de 300 ms
#define      tempo2          100
//tempo de espera de 50 ms
#define      fini            30
//FPS inicial
#define      fmin            10
//FPS minima
#define      fmax            1000
//FPS maxima
#define df      10          //df
- incremento da FPS

#define FOSC  375000          //Freq.
de Oscliação/4/PS (PS=32)
#define priority timer0, ext, ext1, ext2

// Declaração de Variáveis
char s[60];
int1 hab, baixa;
unsigned int16 f;
unsigned int16 TMR, TMRaux;
float TMRf;

unsigned int16 cont;

// Declaração das funções utilizadas
void frescurite(void);
void rolagem2(char s[], int linha, int
cont);
void rolagem(char s[], int linha, int
cont);
void substr(char dest[], char src[],
int offset, int len);
void type(char s[], int linha);
void rotina_escolha(void);
void botoes(void);

#define _TIMER0
void TIMER0_isr(void)
{
    set_timer0(TMR);
    setup_wdt(WDT_ON);
    #asm
        // Envio do trigger para a camera
        BCF 0xF84,0
Teste:
        BTFSC 0xF84,1
        GOTO Teste
        // Envia pulsos para diodo (1.5 us)
        BCF 0xF84,2
        NOP NOP NOP NOP NOP NOP NOP NOP NOP
NOP
        NOP NOP NOP NOP NOP NOP NOP //NOP
NOP NOP
        // NOP NOP NOP
        BSF 0xF84,2
        // finaliza trigger para a camera
        BSF 0xF84,0
        // Atualização 27/02 - Atraso de
teste de resposta da câmera em 600 ns
        NOP NOP NOP NOP NOP NOP
    #endasm
    setup_wdt(WDT_OFF);
    if(!input(SHUTTER)){
        output_low(RELE);
        disable_interrupts(INT_TIMER0);
        hab=0;
        strcpy(s,"SEM RESPOSTA DA CAMERA.
");

```

```

rolagem2(s, 2, 1);
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("AGUARDA DISPARO.");
enable_interrupts(INT_EXT1);
enable_interrupts(INT_EXT2);
}
// Frequencimetro
output_toggle(FREQ);
clear_interrupt(int_timer0);
clear_interrupt(int_ext);
clear_interrupt(int_ext1);
clear_interrupt(int_ext2);
}

#int_EXT
void EXT_isr(void)
{
    lcd_gotoxy(1,2);
    if (hab==0){
        output_high(RELE);
        lcd_putc("ENVIANDO PULSOS.");
        enable_interrupts(INT_TIMER0);
        set_timer0(TMR);
        disable_interrupts(INT_EXT1);
        disable_interrupts(INT_EXT2);
        hab=1;}
    else if (hab==1) {
        disable_interrupts(INT_TIMER0);
        enable_interrupts(INT_EXT1);
        enable_interrupts(INT_EXT2);
        output_low(RELE);
        lcd_gotoxy(1,2);
        lcd_putc("AGUARDA DISPARO.");
        hab=0;
    }
    delay_ms(500);
}

// Rotina de interrupção por botão
externo (MAIS)
#int_EXT1
void EXT1_isr(void)
{
    if (hab==0)
    {
        lcd_gotoxy(1,2);
        if (baixa==0)
        {
            TMRAux = TMR;
            TMR = 53036;
            lcd_putc("FPS FIXA DE 30Hz");
            baixa=1;
        }
        else if (baixa==1)
        {
            TMR = TMRAux;
            printf(lcd_putc,"FPS    =    %4Lu    Hz
",f);
            baixa=0;
        }
        delay_ms(500);
        clear_interrupt(int_ext1);
    }
}

// Rotina de interrupção por botão
externo (MENOS)
#int_EXT2
void EXT2_isr(void)
{
    if(hab==0)
    {
        rotina_escolha();
    }
}

void main()
{
    setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD);
    setup_adc(ADC_OFF);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_wdt(WDT_OFF);

    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_3
2);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);

    setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1)
;

```

```

setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
setup_vref(FALSE);
disable_interrupts(INT_TIMER0);
disable_interrupts(INT_EXT);
disable_interrupts(INT_EXT1);
disable_interrupts(INT_EXT2);

set_tris_b(0b00000111);
set_tris_e(0b0010);
set_tris_c(0b00000000);
output_high(TRIGGER);
output_high(PULSO);
output_low(RELE);

ext_int_edge( 0, H_TO_L);
ext_int_edge( 1, H_TO_L);
ext_int_edge( 2, H_TO_L);
disable_interrupts(GLOBAL);

lcd_init();

// Frescurite inicial
frescurite();

// Rotina de Escolha do FPS
rotina_escolha();
hab=0; baixa=0;
cont = 0;
lcd_gotoxy(1,2);
lcd_putc("AGUARDA DISPARO.");
delay_ms(2000);
clear_interrupt(int_ext);
enable_interrupts(GLOBAL);
enable_interrupts(INT_EXT);

while(1)
{
}

// FUNÇÕES IMPLEMENTADAS POR USUÁRIO
void frescurite(void)
{
    // ESCRITA INICIAL NO LCD
    strcpy(s, " -- VIASOLDA -- ");
    type(s,1);

```

```

    strcpy(s, "LAPROSOLDA - SISTEMA DE
VISAO PARA PROCESSOS DE SOLDAGEM ");
    rolagem2(s,2,1);
    strcpy(s, "DRIVER DE PULSO QUADRADO
COM FPS VARIÁVEL VER. 02/2015 ");
    rolagem2(s, 2, 1);
    strcpy(s, "MSc. Carolina Pimenta
Mota ");
    rolagem2(s, 2, 1);
}

void rotina_escolha(void)
{
    // Rotina de Escolha dos Ângulos
    f=fini;
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("- FPS DESEJADO -");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc, "FPS    =    %4Lu    Hz
",f);
    while(input(DISP)){
        botoes(); }
    lcd_gotoxy(1,1);
    lcd_putc("- CONFIRMA FPS -");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc, "FPS    =    %4Lu    Hz
",f);
    delay_ms(2000);
    while(input(DISP)){
        TMRf=65536-(FOSC/f);
        if(TMRf-floor(TMRf) < 0.5)
        {
            TMR = floor(TMRf);
        }
        else
            TMR = ceil(TMRf);
        strcpy(s, " -- VIASOLDA -- ");
        type(s,1);
    }

    // Função de uso dinâmico dos botoes +
e -
void botoes(void)
{
    if((!input(MAIS))    &&    (f<fmax)    &&
input(MENOS)){

```

```

int count = 0;
while((!input(MAIS)) && (f<fmax) &&
input(MENOS))
{
    f = f + df;
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"FPS = %4Lu Hz
",f);
    if (count<5)
    {
        delay_ms(tempo1);
        count++;
    }
    else {delay_ms(tempo2);}
}
if((!input(MENOS)) && (f>fmin) &&
input(MAIS)){
int count = 0;
while((!input(MENOS)) && (f>fmin) &&
input(MAIS))
{
    f = f - df;
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"FPS = %4lu Hz
",f);
    if (count<5)
    {
        delay_ms(tempo1);
        count++;
    }
    else {delay_ms(tempo2);}
}
}

void type(char s[], int linha)
{
    int i;
    for (i=0; ; i++)

        if (s[i]=='\0')
        { break; }
        lcd_gotoxy(i+1,linha);
        printf(lcd_putc,"%c",s[i]);
        delay_ms(100);
    }

void substr(char dest[], char src[],
int offset, int len)
{
    int i;
    for(i = 0; i < len && src[offset + i]
!= '\0'; i++)
        dest[i] = src[i + offset];
    dest[i] = '\0';
}

void rolagem2(char s[], int linha, int
cont)
{
    int c, i; char aux2[16];
    char aux[100]="";
    strcat(aux,s);
    i=0;c=0;
    while (c<cont)
    {
        if (aux[i]=='\0')
        { i=0; c++;
        if (c==cont) break;
        }
        lcd_gotoxy(1,linha);
        substr(aux2,aux,i,16);
        printf(lcd_putc,"%s",aux2);
        delay_ms(250);
        i++;
    }
}

```

## APÊNDICE IV

### OBSERVAÇÕES DE SINCRONIA E ATRASOS DO CIRCUITO DE CONTROLE DO VIASOLDA PULSO QUADRADO

Para o melhor entendimento do funcionamento do controle da câmera analógica SI-M330 em seu modo de controle por *trigger* externo e, tendo em vista que todo e qualquer tempo de atraso é relevante em um tempo de abertura de 1,25  $\mu\text{s}$ , as formas de onda dos sinais de controle foram observadas através de um osciloscópio (Tektronix TPS-2014).

Os principais pontos de interesse sobre a sincronia e tempo de atraso no circuito de controle seguem abaixo:

- A câmera analógica possui um tempo de resposta entre o sinal de *trigger* e o momento do início do tempo de abertura. Este tempo é assíncrono (variável e indeterminístico), com valores de aproximadamente 100 a 150  $\mu\text{s}$ .

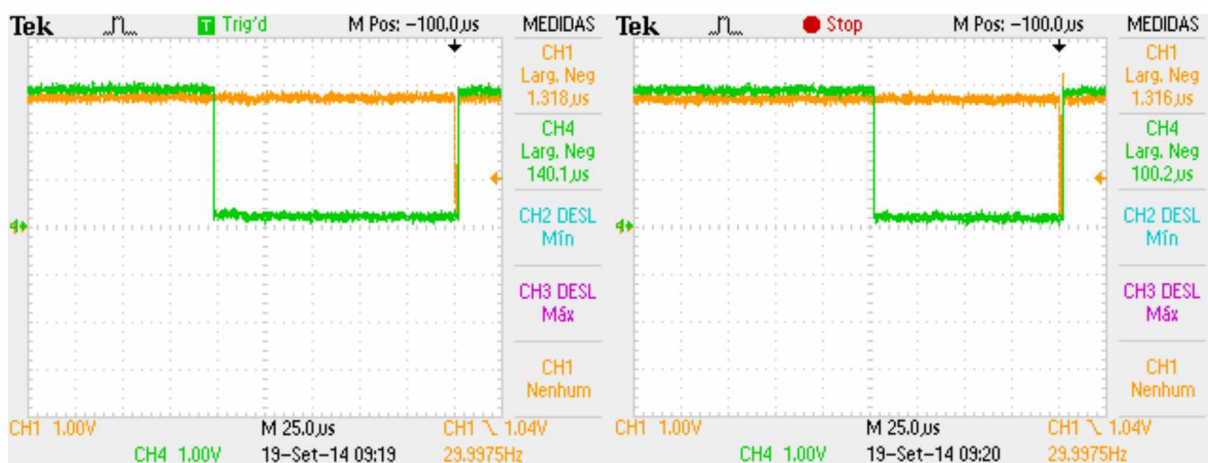


Figura 13.1 – Assincronia entre TRIGGER (CH1) e SHUTTER (CH2) da câmera.

- O sinal de *shutter* da câmera possui níveis de tensão considerados baixos em um circuito TTL, o que é a lógica da grande parte dos MCUs e circuitos de lógica digital. Esses níveis foram ajustados através do circuito descrito na Figura 5.12.



Figura 13.2 - Níveis de entrada (CH1) e saída (CH3) do circuito conexão do SHUTTER.

- O laço de repetição embutido no algoritmo do MCU cria um atraso entre o momento de descida do sinal de *shutter* da câmera (PIC\_SHUTTER) que depende do tempo de ciclo de instrução da MCU e da eficiência do próprio algoritmo. Esse tempo é, também, assíncrono, e variou de 200 a 700 ns.

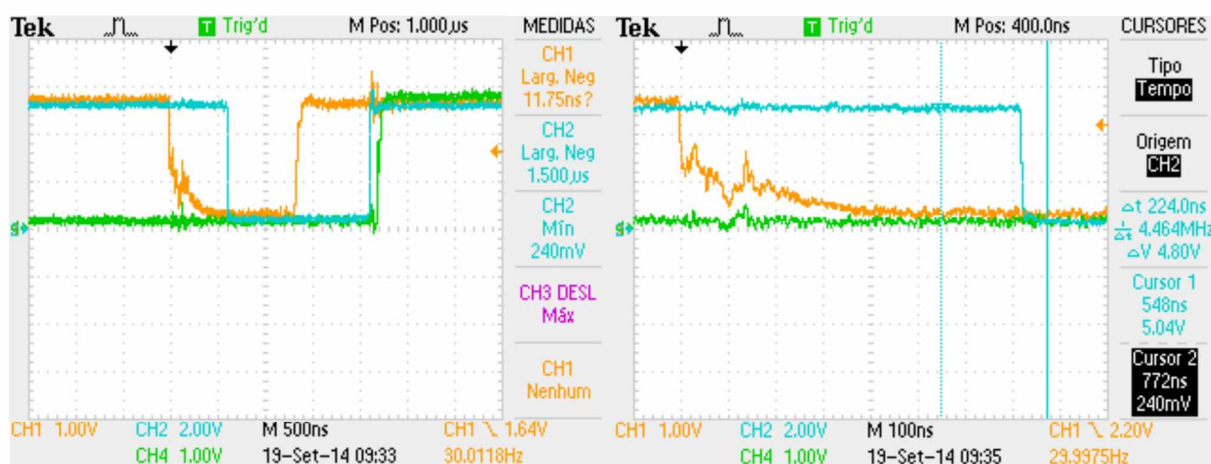


Figura 13.3 – Assincronia e atraso entre PIC\_SHUTTER (CH1) e PIC\_PULSO (CH2).

- A porta lógica “E” entre os sinais de PIC\_SHUTTER e PIC\_PULSO insere um atraso de aproximadamente 50 ns para o seu sinal de saída. O pulso de indicação do momento de abertura da câmera apresenta variação em seus níveis de tensão no momento de sua descida e provoca um “falso” pulso transiente na saída da primeira porta digital.



Figura 13.4 – Atraso da lógica digital “E”: entradas (CH1 e CH2) e saída (CH3).

- O atraso total entre as entradas e a saída da lógica digital é de pouco mais de 50 ns.
- O atraso total do circuito de controle (lógica digital eICL 7667) é de 100 ns.

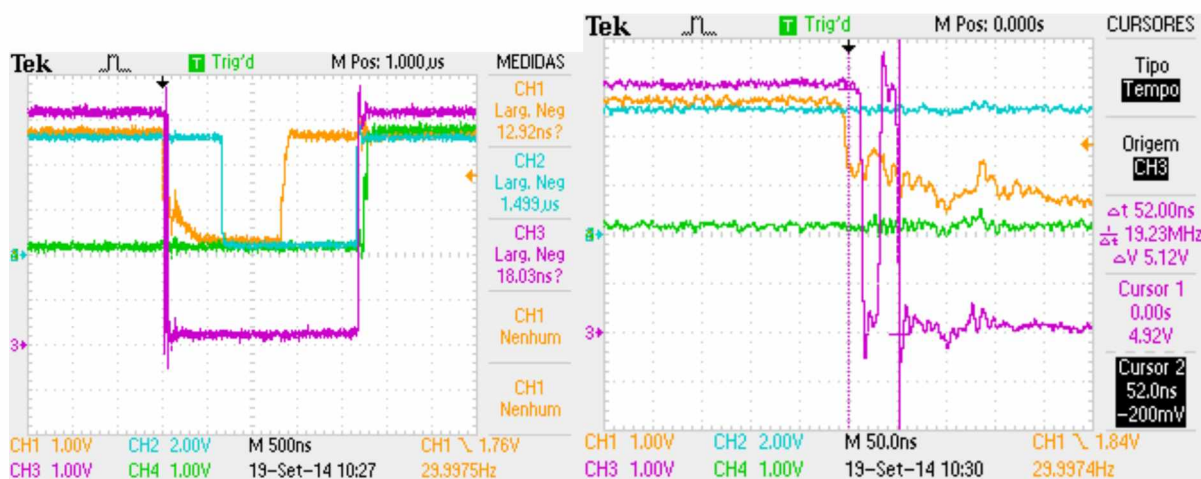


Figura 13.5 – Atraso total da lógica digital: entradas (CH1, CH2 e CH4) e saída (CH3).

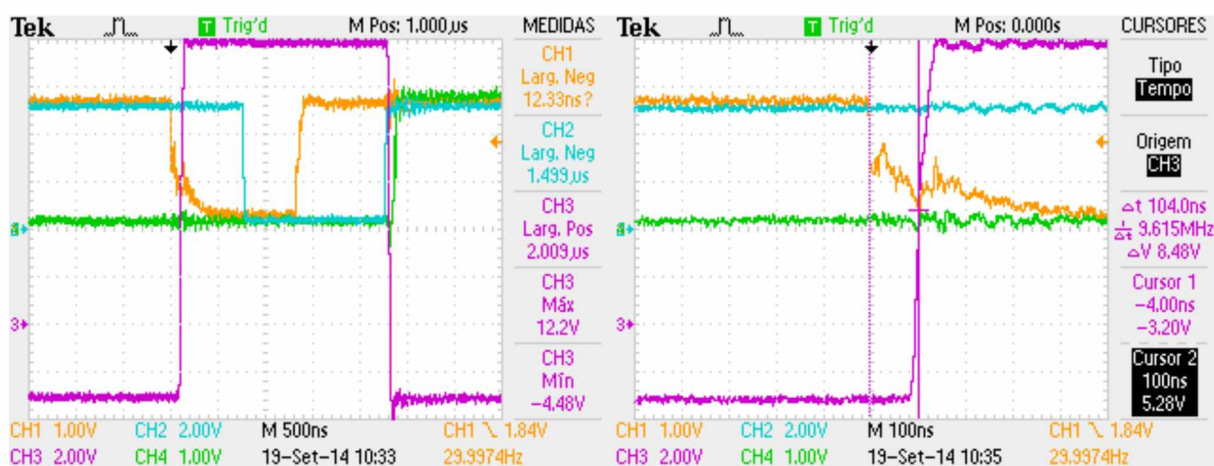


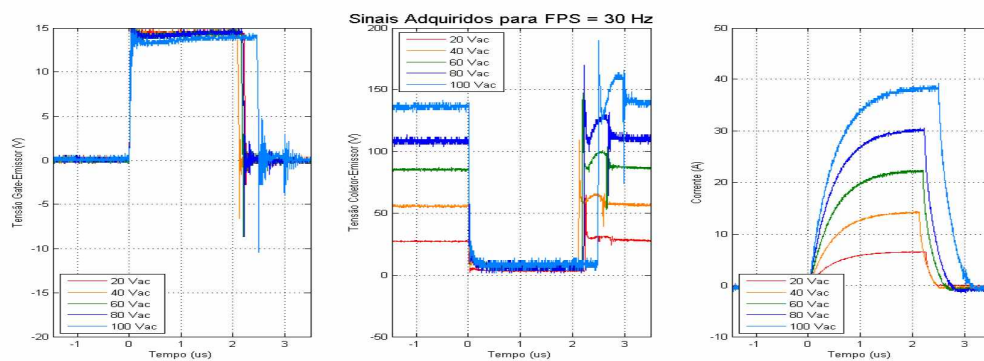
Figura 13.6 – Atraso total do circuito de controle: entradas (CH1, CH2 e CH4) e saída (CH3).



## APÊNDICE V

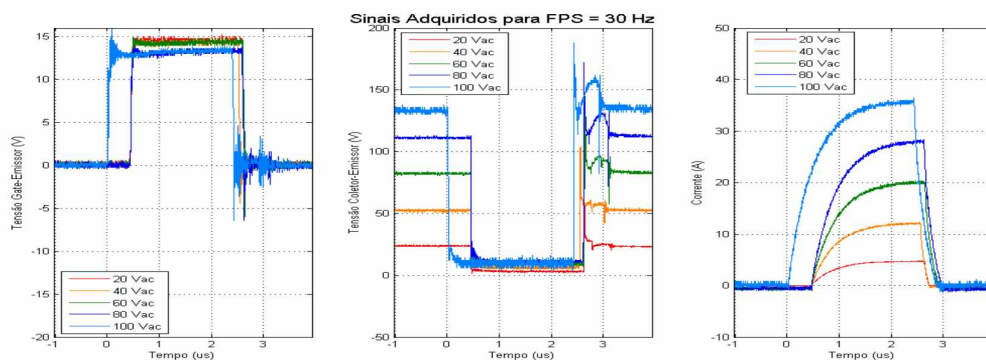
### FORMAS DE ONDA OBSERVADAS EM TOPOLOGIA DE PUSLO QUADRADO

Etapas: sem diodos laser (BYV26C) com 30 Hz e Varivolt.



FPS (Hz)	Vac (V)	Vce (V)	Vge (V)	Idl (A)	tpulso (us)	Duty Cycle (%)	Ief (A)
30	20	27.61	14.40	6.60	2.26	0.0068	0.05
30	40	55.67	14.38	14.30	2.13	0.0064	0.10
30	60	85.36	14.27	22.40	2.20	0.0066	0.15
30	80	108.40	14.25	30.60	2.23	0.0067	0.21
30	100	136.64	13.63	39.20	2.50	0.0075	0.29

Etapas: 1 diodo laser + 1 BYV6C há 30 Hz e Varivolt.



FPS (Hz)	Vac (V)	Vce (V)	Vge (V)	Idl (A)	tpulso (us)	Duty Cycle (%)	Ief (A)
30	20	23.81	13.81	4.80	2.21	0.0066	0.03
30	40	52.39	13.54	12.30	2.13	0.0064	0.08
30	60	82.38	13.50	20.40	2.21	0.0066	0.14
30	80	111.35	12.40	28.40	2.19	0.0066	0.19
30	100	133.20	13.11	36.40	2.44	0.0073	0.26

## APÊNDICE VI

### CÓDIGO FONTE (MATLAB) DE TRATAMENTO DE FORMAS DE ONDA OBTIDAS COM O OSCILOSCÓPIO TPS 2014

```
%-----
% FORMAS DE ONDA DO OSCILOSCÓPIO TPS2014
%-----
clear all
close all
[d]=uigetdir();
pastas=dir(d);
[nome, pasta]=uigetfile([d,'\','*.xls*'],'Escolha o arquivo XLS');
dados = importdata([pasta,nome],',', 4);
testes = dados.data.Plan1(1:end,1:2);
testes=testes(find(isnan(testes(:,1))~=0),:); %Retira, se houver os NaN
N = length(testes);
pasta2 = dados.textdata.Plan1(5:end,11);
% Salvar dados??? (1 - SIM)
ButtonName = questdlg('Salvar arquivos?','?', 'SIM', 'NÃO', 'SIM');
salvar = strcmp(ButtonName, 'SIM');
% Coloque aqui a ordem dos canais!
Vds = 'Tens,,o Coletor-Emissor (V)';
I = 'Corrente (A)';
Vgs = 'Tens,,o Gate-Emissor (V)';
Vdl = 'Queda de Tens,,o DL (V)';
Vdsmenos = 'Tens,,o Coletor-Emissor (V)';
nomecanais=strvcat(Vgs,Vds,I,Vdsmenos);
%% Plota e sala imagens
j=0;
for i=3:N+2 %1 e 2 s,,o '.' e '..'
    if (pastas(i).isdir)
        j=j+1;
        onda=dir([d,'\ ',pastas(i).name,'\ ','*.CSV']);
        ch1 = importdata([d,'\ ',pastas(i).name,'\ ',onda(1).name],',', 16);
        a = figure('Position',[50,50,800,600],'Color','w');
        suptitle(['Sinais Adquiridos (FPS = ',num2str(testes(j,1)),' Hz e
Vac = ',num2str(testes(j,2)),' V)'])
        subplot(2,2,1)
        plot(ch1.data(:,4),ch1.data(:,5),'Color',[253 141 10]./255)
        grid on
        ylabel(nomecanais(1,:));
        xlabel('Tempo (s)');
        axis([ch1.data(1,4) ch1.data(length(ch1.data(:,4)),4)
min(ch1.data(:,5)) max(ch1.data(:,5))])
        if (length(onda)>=2)
            subplot(2,2,2)
            ch2 = importdata([d,'\ ',pastas(i).name,'\ ',onda(2).name],',',
16);
            plot(ch2.data(:,4),ch2.data(:,5),'Color',[23 181 178]./255)
            grid on
```

```

        ylabel(nomecanais(2,:));
        xlabel('Tempo (s)');
        axis([ch1.data(1,4) ch1.data(length(ch1.data(:,4)),4)
min(ch2.data(:,5)) max(ch2.data(:,5))])
        hold on
        if(length(onda)>=3)
            subplot(2,2,3)
            ch3 = importdata([d,'\ ',pastas(i).name,'\ ',onda(ISO 3834,
ISO3834).name),',', 16);
            plot(ch3.data(:,4),ch3.data(:,5),'Color',[176 1 179]./255)
            grid on
            ylabel(nomecanais(3,:));
            xlabel('Tempo (s)');
            axis([ch1.data(1,4) ch1.data(length(ch1.data(:,4)),4)
min(ch3.data(:,5)) max(ch3.data(:,5))])
            if(length(onda)>=4)
                subplot(2,2,2)
                ch4 = importdata([d,'\ ',pastas(i).name,'\ ',onda(ISO 3834,
ISO3834).name),',', 16);
                plot(ch4.data(:,4),ch4.data(:,5),'Color',[24 184 2]./255);
                grid on
                ylabel(nomecanais(4,:));
                xlabel('Tempo (s)');
                legend('S+', 'S-', 'Location', 'East');
                axis([ch1.data(1,4) ch1.data(length(ch1.data(:,4)),4)
min(ch4.data(:,5)) max(ch2.data(:,5))])
                hold off
            end
        end
        end
        imagem = axes('Parent',a,'Units','points','Position',[290 40
290 180],'Tag','imagem');
        aux = dir([d,'\ ',pastas(i).name,'\ ','*.BMP']);
        [tela,map] = imread([d,'\ ',pastas(i).name,'\ ',aux(1).name]);
        imshow(tela,map)
        canal1(j,:)=ch1.data(:,5);
        canal2(j,:)=ch2.data(:,5);
        canal3(j,:)=ch3.data(:,5);
        canal4(j,:)=ch4.data(:,5);
        if (salvar == 1)

            set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto'); % Use screen size
            print(gcf,'-dpng',[d,'_',pastas(i).name],'-zbuffer','-r100');
%-djpeg99
            saveas(gcf, [d,'_',pastas(i).name], 'fig')
            % saveas(gcf, [d,'_',pastas(i).name], 'jpg')
        end
        % pause(1)
    end
end

t = ch1.data(:,4);
save
([d,'_dados.mat','canal1','canal2','canal3','canal4','t','testes','pasta2'
,'nome','pasta','d'])
close all

```

## APÊNDICE VII

### INFORMAÇÕES ADICIONAIS EM TESTES DE ALTA FREQUÊNCIA

A Figura 16.1 apresenta um comparativo entre os sinais de todas as frequências, para a tensão máxima de entrada. Deve-se ressaltar que estes foram filtrados (*Butterworth* de segunda ordem em 40 MHz) para fim de facilitar sua visualização em um único gráfico.

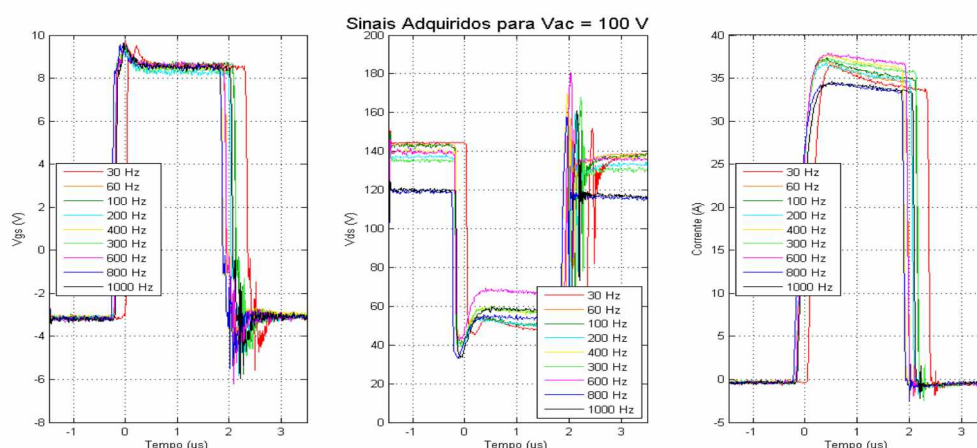


Figura 16.1 – Comparativo dos sinais adquiridos para as diferentes frequências.

Observa-se que, para todas as frequências de acionamento, os sinais apresentam comportamento de entrada e saída de comutação semelhantes. O aumento na frequência, principalmente para 800 e 1000 Hz, gera queda da tensão direta sobre a chave fora de condução, podendo indicar descarga excessiva dos capacitores na entrada do circuito. Este, também influi na forma como a corrente se comporta em condução: quando maior a frequência, menor é o pico de corrente circulante, mantendo, porém um valor médio próximo ao esperado (35 A).

A Figura 16.2 ilustra o comportamento do circuito com o aumento da tensão de entrada, nas situações de menor e maior frequência. Observa-se o aumento de ruído no circuito de comutação da chave, variação do tempo de pulso (MCU assíncrono) e aumento da dissipação em condução da resistência equivalente da chave, cm quedas de aproximadamente 50 V.

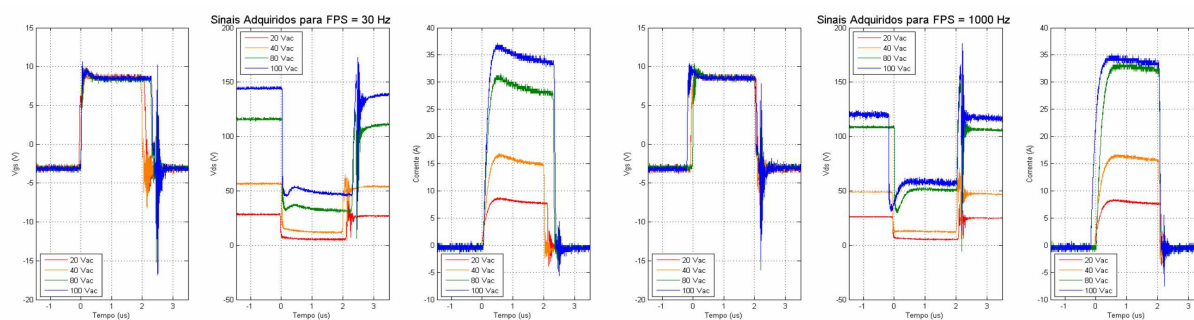


Figura 16.2 – Comparativo dos sinais para o aumento da tensão de entrada em 30 e 1000 Hz.

. As tabelas e figuras abaixo resumem os resultados obtidos para todos os testes de funcionamento da topologia em alta frequência, da topologia sem o uso de diodos e com a inserção de um diodo laser para teste de *burn out*.

Tabela 16.1 – Resultados da análise para testes de alta frequência.

FPS (Hz)	Vac (V)	Vds (V)	Vgs (V)	Idl (A)	tpulso (us)	Duty Cycle (%)	Ief (A)
30	20	28.42	9.20	8.19	2.17	0.0065	0.07
30	40	56.62	10.00	15.86	2.01	0.0060	0.12
30	80	116.04	10.20	29.61	2.30	0.0069	0.25
30	100	144.41	10.60	35.28	2.33	0.0070	0.29
60	20	28.04	9.40	8.36	2.12	0.0127	0.09
60	40	56.86	9.80	16.96	2.27	0.0136	0.20
60	80	114.74	10.40	32.94	2.33	0.0140	0.39
60	100	143.35	10.60	35.61	2.14	0.0129	0.40
100	20	27.62	9.20	8.25	2.09	0.0209	0.12
100	40	56.86	9.80	16.85	2.21	0.0221	0.25
100	80	113.25	9.80	32.11	2.15	0.0215	0.47
100	100	142.95	10.80	36.04	2.32	0.0232	0.55
200	20	26.99	9.40	8.01	2.14	0.0428	0.17
200	40	56.56	9.80	16.88	2.01	0.0403	0.34
200	80	108.98	10.40	28.37	2.10	0.0421	0.58
200	100	137.13	11.80	35.66	2.24	0.0447	0.75
300	20	26.07	9.20	7.76	2.23	0.0670	0.20
300	40	53.78	9.60	16.58	2.29	0.0688	0.43
300	80	101.57	10.20	30.44	2.28	0.0684	0.80
300	100	135.27	15.20	36.57	2.34	0.0701	0.97
400	20	25.03	9.40	7.53	2.25	0.0902	0.23
400	40	51.88	9.40	15.64	2.28	0.0914	0.47
400	80	103.89	10.40	29.10	2.13	0.0850	0.85
400	100	139.96	16.40	36.90	2.07	0.0827	1.06
600	20	26.42	9.40	7.96	2.35	0.1410	0.30
600	40	55.49	10.00	17.02	2.11	0.1264	0.61
600	80	100.84	10.40	30.86	2.38	0.1430	1.17
600	100	139.53	11.60	37.31	2.14	0.1284	1.34
800	20	25.37	9.40	7.71	2.12	0.1698	0.32
800	40	51.40	10.00	16.42	2.17	0.1734	0.68
800	80	98.64	10.40	30.82	2.30	0.1838	1.32
800	100	119.17	10.20	33.98	2.12	0.1696	1.40
1000	20	26.06	9.20	8.02	2.17	0.2168	0.37
1000	40	48.92	9.60	16.25	2.11	0.2106	0.75
1000	80	108.70	10.40	32.81	2.07	0.2068	1.49
1000	100	119.98	10.40	34.14	2.25	0.2246	1.62



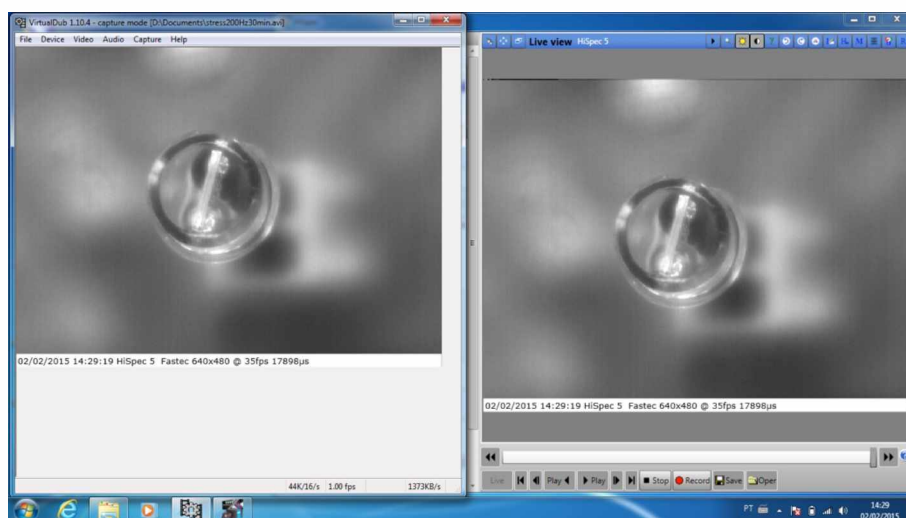


Figura 16.3 - Captura do perfil do diodo laser para testes de *burn out* e estresse.

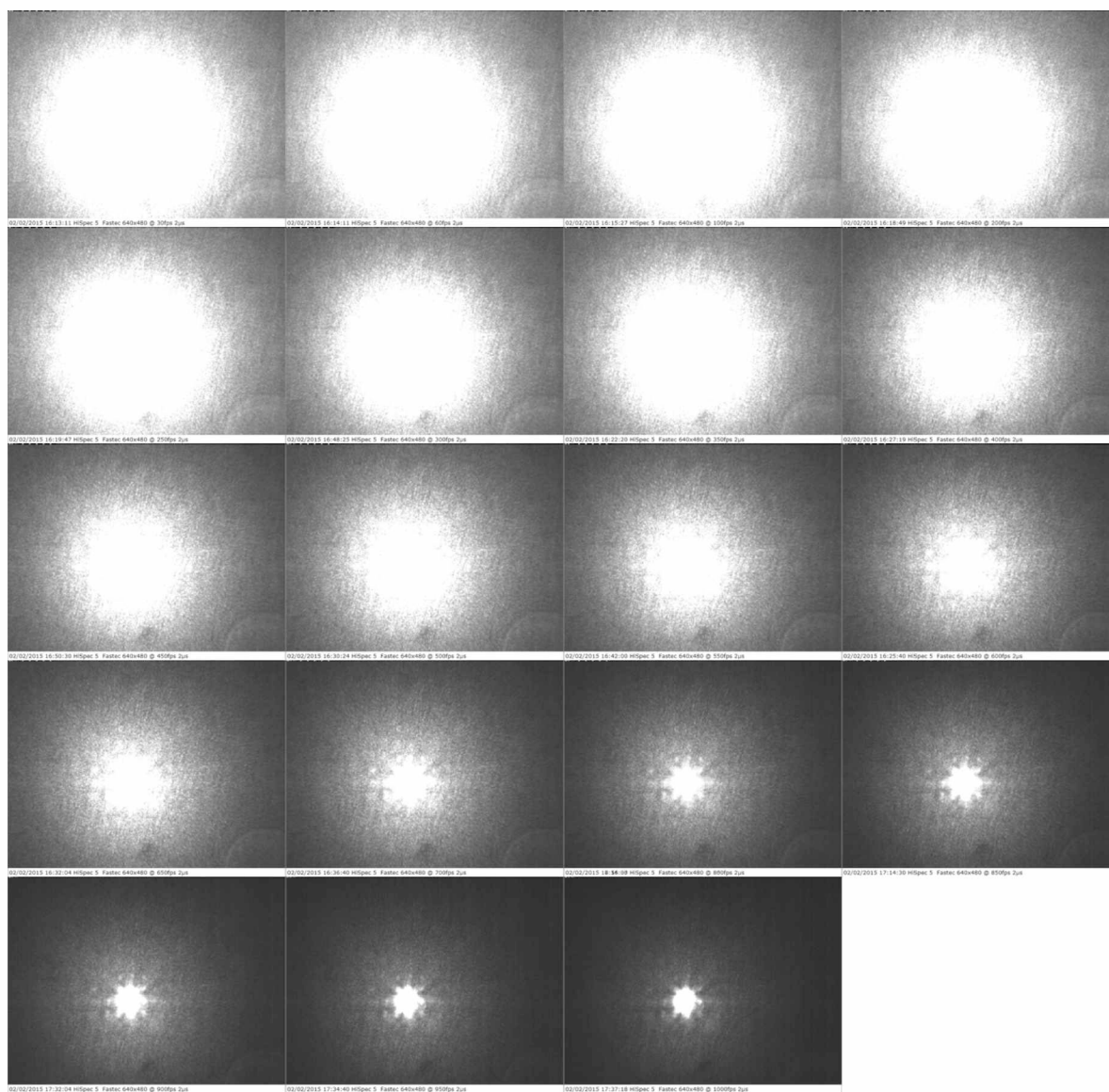


Figura 16.4 - Resultados do perfil do diodo laser para testes de *burn out* e estresse

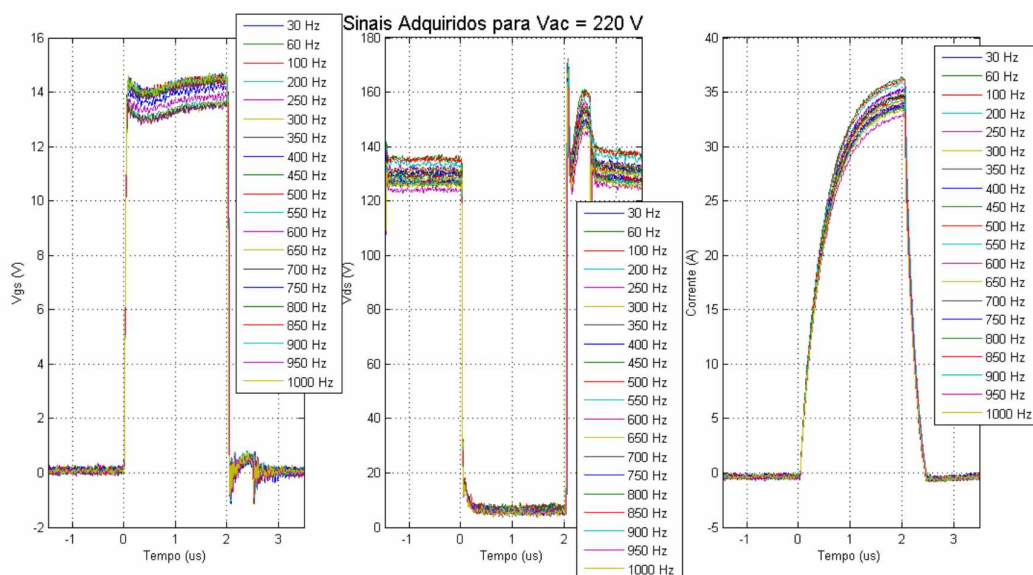


Figura 16.5 – Comparativo dos sinais adquiridos para as diferentes frequências (1 diodo laser).

Tabela 16.2 – Resultados da análise para testes de alta frequência (1 diodo laser).

FPS (Hz)	Vac (V)	Vce (V)	Vge (V)	Idl (A)	tpulso (us)	Duty Cycle (%)	Ief (A)
30	220	131.24	14.15	36.40	2.06	0.0062	0.23
60	220	135.55	14.21	37.20	2.05	0.0123	0.34
100	220	135.20	14.15	37.60	2.06	0.0206	0.43
200	220	133.54	13.36	37.20	2.08	0.0415	0.61
250	220	131.65	13.23	35.60	2.04	0.0510	0.67
300	220	131.23	13.30	35.60	2.05	0.0614	0.73
350	220	130.38	13.26	35.20	2.05	0.0718	0.78
400	220	129.68	13.90	35.20	2.05	0.0818	0.83
450	220	129.17	14.19	35.20	2.05	0.0923	0.88
500	220	128.77	14.25	35.60	2.05	0.1027	0.92
550	220	128.10	14.12	35.20	2.06	0.1132	0.97
600	220	127.13	14.12	35.20	2.05	0.1231	1.00
650	220	127.81	14.23	34.80	2.04	0.1325	1.05
700	220	126.51	14.15	34.80	2.04	0.1428	1.07
750	220	126.85	14.29	34.40	2.08	0.1559	1.11
800	220	126.23	14.26	34.40	2.05	0.1642	1.14
850	220	126.63	14.30	34.40	2.05	0.1743	1.18
900	220	126.59	14.27	34.80	2.04	0.1840	1.21
950	220	124.00	13.61	34.00	2.06	0.1957	1.22
1000	220	125.89	14.27	34.40	2.04	0.2036	1.26



## APÊNDICE VIII

### CÓDIGO FONTE (MATLAB) DE TRATAMENTO DE IMAGENS PARA MAPEAMENTO DA FIBRA ÓPTICA

```

%-----
%   PROGRAMA DE MAPEAMENTO DA FIBRA OPTICA
%-----
pasta = 'MATLAB\';
a=dir(pasta);
fibra = a(ISO 3834, ISO3834).name;
fibra = imread([pasta,fibra]);
aux = imfill(im2bw(fibra,0.12),'holes');
aux = bwselect(aux,416,382);
se1 = strel('disk',45);
se = strel('disk',1);
se2 = strel('disk',4);
baux = imdilate(edge(aux),se1);
fibra2=fibra;
figure(1) imshow(fibra);
for i=4:length(a)
    nome = a(i).name;
    I = imread([pasta,nome]);
    bw = and(and(aux,im2bw(I,0.93)),~baux);
    bw = imfill(bw,'holes');
    bw = imerode(bw,se2); % Sobreposi;ão de fibras
    borda = imdilate(edge(bw),se);
    fibra2(find(borda))=255;
    fibra(find(imdilate(bw,se)))=(i-3)*5;
    s = regionprops(bw, 'centroid', 'Area');
    centroids = cat(1, s.Centroid);
    areas = cat(1, s.Area);
    [area,t] = max(areas);
    centroid(i-3,:)=centroids(t,:);
end
figure(ISO 3834, ISO3834) imshow(fibra);
colormap(jet(255))
set(1,'Position', [1 41 1366 652])
hold on
for i=1:50
    text(centroid(i,1)-10, centroid(i,2),num2str(i),'Color',[51-i)*5/255 0 0])
end
figure(2)imshow(fibra2); hold on
for i=1:50
    text(centroid(i,1)-10, centroid(i,2),num2str(i),'Color',[250/255 0 0]) end

```

## APÊNDICE IX

### MANUAL DO USUÁRIO PARA PROTÓTIPO DE PUSLO QUADRADO



Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de  
Processos de Soldagem –  
LAPROSOLDA/UFU

ViaSolda  
Sistema de Visão para Processos de  
Soldagem

---

# MANUAL DO USUÁRIO

---

*Protótipo 19 Diodos Laser*

Eng. MSc. Carolina Pimenta Mota

Abril/2015

## 1. Descrição do Protótipo ViaSolda

O ViaSolda – Sistema de Visão para Processos de Soldagem é um protótipo construído pelo LAPROSOLDA para a realização filmagens dos processos de soldagem a arco.

Filmagens da região de interesse (poça de fusão, eletrodo e seus arredores) com interferência mínima da luminosidade do arco é possível através da junção da obtenção de imagens por uma câmera com baixo tempo de exposição em sincronia com iluminação no infravermelho próximo, onde o arco de solda tem menor intensidade de emissão.

O protótipo de 19 Diodos com Pulso Quadrado e seus componentes externos são ilustrados nas Figura 1 e Figura 2, abaixo.

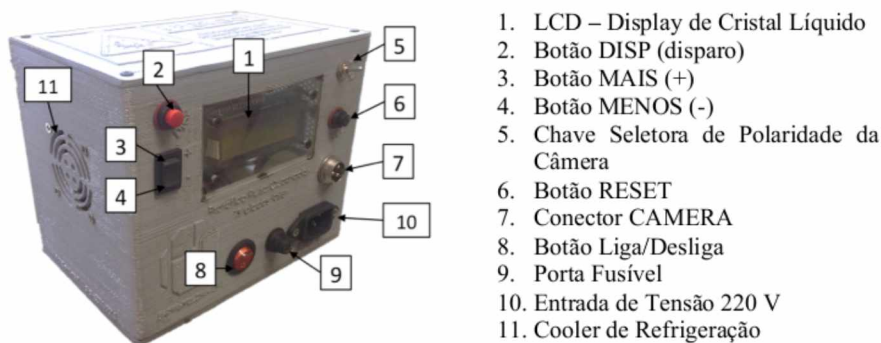


Figura 1 - Protótipo ViaSolda: vista do painel de controle.

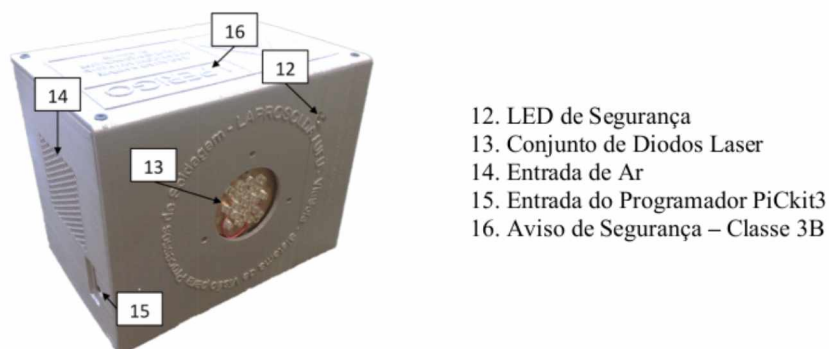


Figura 2 - Protótipo ViaSolda: vista frontal.

A interface com o usuário é dada pelo botões: DISP, MAIS, MENOS e pelo display de cristal líquido (LCD). O LCD fornece as informações necessárias ao

usuário e demanda por comandos – ajuste da taxa de quadros por segundo e disparo dos diodos – através dos botões. O botão RESET é responsável por reestabelecer o *software* --VIASOLDA -- (programado no microprocessador embutido no sistema) a sua configuração inicial.

A interface ViaSolda – Câmera é dada pelo conector CAMERA (7) e pela chave seletora de polaridade da câmera (5). Esta interface possibilita a sincronia entre o momento do pulso de iluminação infravermelha e o tempo de abertura (*shutter*) da câmera, resultando em imagens nítidas e com luminosidade homogênea ao longo do processo de filmagem.

A entrada de energia para o sistema é dada pelo conjunto entrada de tensão (10), porta fusível (9) e botão Liga/Desliga (8). Deve-se sempre ligar o protótipo na tensão de 220 V (50/60 Hz). O porta fusível contém um fusível de 1 A e o botão Liga/Desliga possui um LED interno para indicar a presença da energia no sistema.

**ATENÇÃO!**  
**Tensão de Entrada: 220 V**

O LED (12) e o Aviso de Segurança (16) compõem os itens de segurança ao usuário. Por se tratar de um diodo laser de Classe 3B, deve-se evitar contato visual direto com o feixe de luz. O aviso de segurança encontrado no sistema é uma tradução livre direta do aviso de proteção ilustrado na Figura 3. Nele, é impresso a seguinte mensagem: “PERIGO! Radiação Invisível. Evitar contato visual. Laser Semicondutor Classe 3B.”



Figura 3 - Aviso de Proteção para o uso de laser Classe 3B.

O uso de óculos de proteção específico para os diodos laser infravermelhos é obrigatório para o manuseio do equipamento. O laboratório dispõe, atualmente, de três (3) unidades deste, de modelo 620.P1002.00 Skyline.

**O uso de óculos de proteção é obrigatório para o manuseio do equipamento!**

O cooler de refrigeração (11) e a entrada de ar (14) permitem o arrefecimento dos componentes eletrônicos dentro do sistema ViaSolda, não permitindo que seu aquecimento prejudique o funcionamento como um todo.

**Manter o sistema de arrefecimento sempre ligado durante o funcionamento do ViaSolda.**

## 2. Uso do Hardware ViaSolda

O protótipo do ViaSolda com 19 diodos laser foi projetado para realização de filmagens em soldagens pela reflexão direta da iluminação infravermelha até a câmera. Desta forma, o protótipo e a câmera devem ser posicionados em lados opostos à tocha de soldagem, em distâncias e ângulos semelhantes em relação à superfície de interesse no corpo de prova. Como exemplo, tem-se os valores de 25° de inclinação e uma distância de 240 mm da junta ilustrados na montagem experimental da Figura 4.

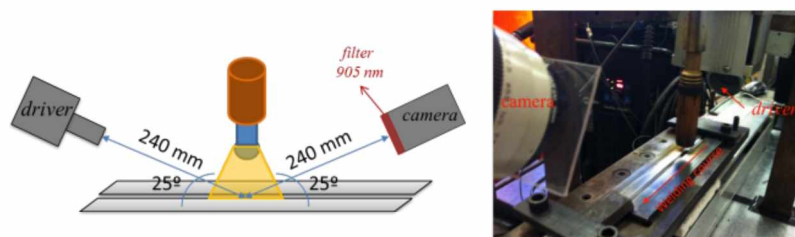


Figura 4 – Montagem experimental: (a) Posicionamento esquemático do sistema, (b) Posicionamento real

**Recomenda-se sempre o uso de uma distância próxima de 250 mm para máxima eficiência do sistema óptico e melhor aproximação da região de interesse.**

O laboratório dispõe de dois braços telescópicos para auxiliar o posicionamento do protótipo e da câmera. O protótipo é acoplada à base do braço telescópico através de um parafuso 1/4" e a cabeça remota da câmera (SI-M330) por um suporte construído para tal fim (Figura 5).

Para que apenas o espectro de emissão no infravermelho próximo dos diodos laser seja capaz de alcançar a câmera, deve-se utilizar um filtro óptico de interferência em 905 nm. No laboratório é possível encontrar o seguinte modelo de filtro com as especificações necessárias: Edmund Optics Filter BP 905NM X 10NM OD4 25MM. Seu acoplamento é realizado entre o CCD da câmera e a lente através de um adaptador, Figura 5.

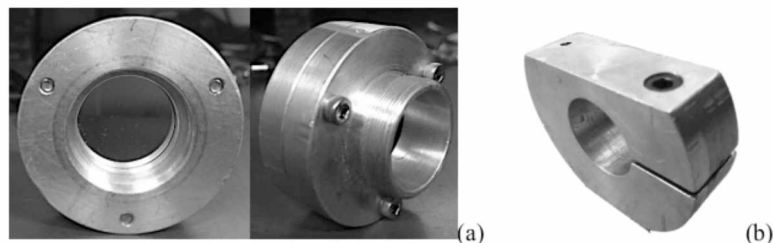


Figura 5 - (a) Adaptador de filtro para câmeras (b) Suporte câmera-braço telescópico

Para um melhor aproveitamento do feixe luz dos diodos laser, utiliza-se um esquema óptico com suportes e com uma lente planoconvexa, modelo 250 PQ 50 a frente do protótipo ViaSolda, Figura 6.

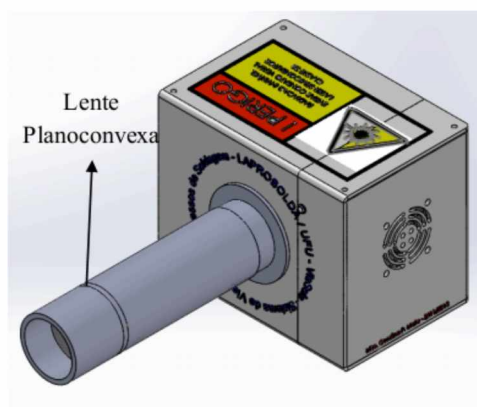


Figura 6 - Esquema de sistema óptico do protótipo ViaSolda

### 2.1. Configuração da Câmera COSTAR SI-M330

A câmera analógica da fabricante Costar (Figura 7), de modelo SI-M330 é a câmera selecionada como padrão de uso do protótipo ViaSolda. Seu tempo de abertura mínimo ( $\sim 1,25\mu s$ ) para uma câmera de baixa velocidade (30 quadros por segundo), baixo custo e cabeça remota são características que beneficiam o uso do protótipo ViaSolda.



Figura 7 - Câmera Analógica SI-M330 da Costar.



### 2.1.1. SI-M330: Configuração de Hardware

A configuração necessária para o uso da SI-M330 em sincronia com o protótipo ViaSolda é:

*External Trigger Mode*  
*Random Trigger Mode – 1*  
*High Speed Shutter Mode*

A configuração da câmera é feita inteiramente através de *jumpers* posicionados em duas localizações distintas: o conjunto de *jumpers* SW1, que é encontrado na parte de trás do painel da câmera; e o conjunto de *jumpers* SW3, localizado na placa C00503B. O posicionamento para a configuração desejada está listado na Tabela 1.

Tabela 1 - Posicionamento de jumpers de configuração da câmera SI-M330.

Chave	Posição	Configuração
SW1-1	ON	<i>Shutter speed</i> <i>1/100000</i>
SW1-2	ON	
SW1-3	ON	
SW1-4	ON	<i>Ext. Trigger shutter</i>
SW1-5	OFF	<i>Field Accumulation</i>
SW1-6	ON	<i>Non-Interlace</i>
SW1-7	ON	<i>Gama Correction 0.45</i>
SW1-8	ON	<i>Gain ADG On</i>
SW3-1	ON	<i>Random Trigger-1</i>
SW3-2	ON	
SW3-3	ON	
SW3-4	OFF	<i>High Speed Shutter</i>

Para maiores informações sobre esta câmera, consultar o manual de operações da Costar, intitulado “Remote Head Monochrome CCD Camera SI-M330 Operation Manual”.

A interface câmera-ViaSolda se dá através de um cabo construído especificamente para tal. Suas extremidades são compostas por um conector Mike Fêmea de 3 Vias, que se conecta ao conector CAMERA (no protótipo) e um conector HiRose Fêmea de 6 Vias, que se conecta ao conector TRIGGER (na SI-M330).

Por se tratar de uma câmera analógica, sua interface com o computador deve ser através de uma placa digitalizadora de imagens, neste caso, a Diamond TVW750USB ATI Theater HD 750 USB TV Tuner (Figura 9). Um cabo com extremidades BNC Fêmea e RCA Macho liga o conector *Video Output* (SI-M330) à entrada vídeo composto da placa digitalizadora (Diamond), respectivamente.





Figura 8 - Cabo Mike/Hirose (ViaSolda CAMERA – SI-M330 TRIGGER)

A Chave Seletora de Polaridade deve estar na posição !



(a)



(b)

Figura 9 – (a) Placa digitalizadora Diamond USB TV Tuner (b) Cabo BNC-RCA

### 2.1.2. SI-M330: Configuração de Software

A obtenção de imagens proveniente da placa digitalizadora pode ser obtida através de qualquer programa comercial de captura de imagens. O usuário deve-se certificar, inicialmente, que o *driver* referente à placa digitalizadora está devidamente instalado no sistema operacional.

Neste manual, utilizaremos como referencia o programa gratuito VirtualDub 1.10.4, cuja tela inicial é ilustrada na Figura 10. Este programa não necessita de instalação, sendo executado diretamente através do arquivo “VirtualDub.exe”.

Para a entrada na sessão de captura de vídeo, acesse o menu *File – Capture AVI...* A Tela da sessão de captura de vídeos (Figura 11) é aberta para o usuário.

Para selecionar a entrada de vídeo proveniente do placa digitalizadora, deve-se acessar o menu *Device – ATI AVStream Analog Capture (DirectShow)*.

Certifique-se que a entrada de vídeo de captura na placa digitalizadora está no vídeo componente, pelo menu *Video – Video Source – Video Composite*.

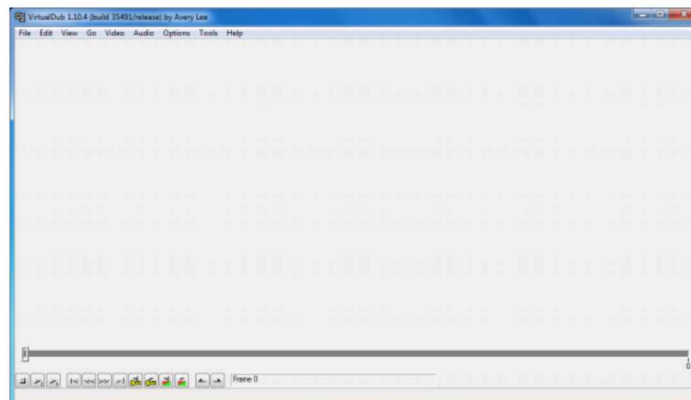


Figura 10 – Tela Inicial do programa de captura de imagens VirtualDub.

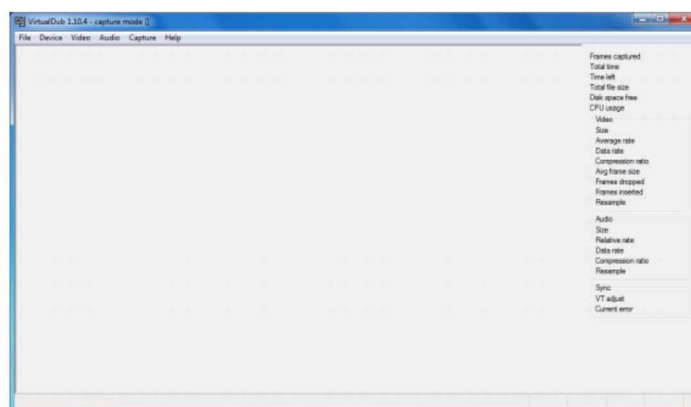


Figura 11 – VirtualDub – Tela de Captura de vídeos.

Habilite a imagem em tempo real da câmera através do menu *Video – Overlay*.

Para configurar a taxa de quadros da captura do vídeo, acesse o menu *Capture – Settings*. Uma pequena janela se abrirá (Figura 12), onde o usuário deve inserir o valor de 30 quadros por segundo.

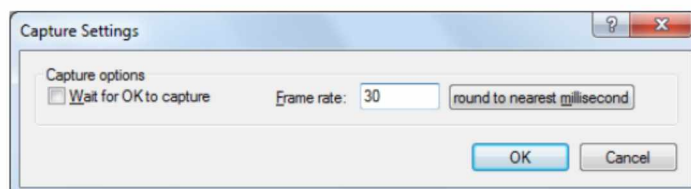


Figura 12 – VirtualDub – Tela de configuração de captura.

Por fim, retire a entrada de áudio através do menu *Audio – Enable Audio Capture*. Para habilitar a captura do vídeo, acesse o menu *File – Set capture file* (ou pressione a tecla de atalho F2). Uma janela de escolha do arquivo de vídeo será aberta (Figura 13). O usuário deve inserir o nome do arquivo de vídeo desejado, não se esquecendo de também inserir a extensão “.avi” e clicar sobre o botão *Save*.

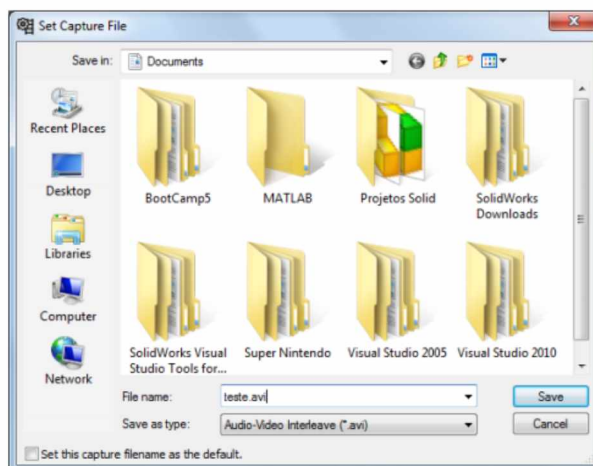


Figura 13 - VirtualDub - Tela de escolha do arquivo de vídeo da captura.

A captura efetiva do vídeo corre apenas quando o usuário inicia-la pelo menu *Captura – Capture Video*, ou pelas teclas de atalho F5 e F6, e se encerará pela menu *Captura – Stop capture*, ou pela tecla de atalho ESC.

## 2.2. Configuração da Câmera HiSpec 5

Para filmagens em alta velocidade deve-se utilizar a câmera HiSpec 5 (Figura 14), disponível em laboratório. Sua compatibilidade com o protótipo ViaSolda foi validada através de testes experimentais, com obtenção de imagens em até 300 quadros por segundo.



Figura 14 - Câmera Digital de Alta Velocidade HiSpec 5.

### 2.2.1. HiSpec 5: Configuração de Hardware

A interface câmera-ViaSolda se dá através de um cabo construído especificamente para tal. Suas extremidades são compostas por um conector Mike Fêmea de 3 Vias, que se conecta ao conector CAMERA (no protótipo) e dois conectores BNC Macho que se conectam ao SHUTTER IN e SHUTTER OUT (HiSpec 5).

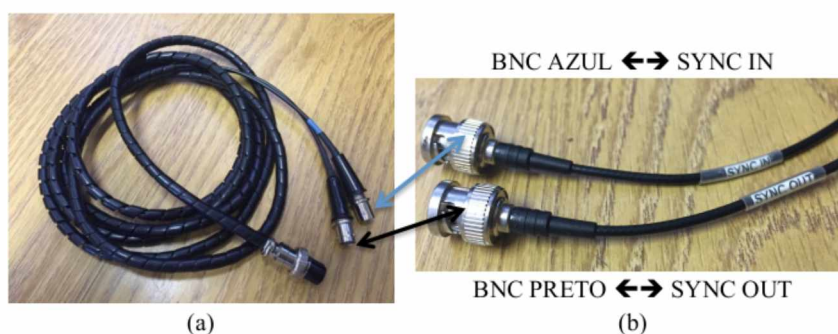


Figura 15 – (a) Cabo Mike - 2 BNCs (b) Detalhe para conexão com cabo HiSpec5.

**A Chave Seletora de Polaridade deve estar na posição  !**

### 2.2.2. HiSpec 5: Configuração de Software

A configuração da câmera é feita inteiramente através do software do fabricante de nome HiSpec Control Software. A tela inicial do programa pode ser vista na Figura 16, abaixo.

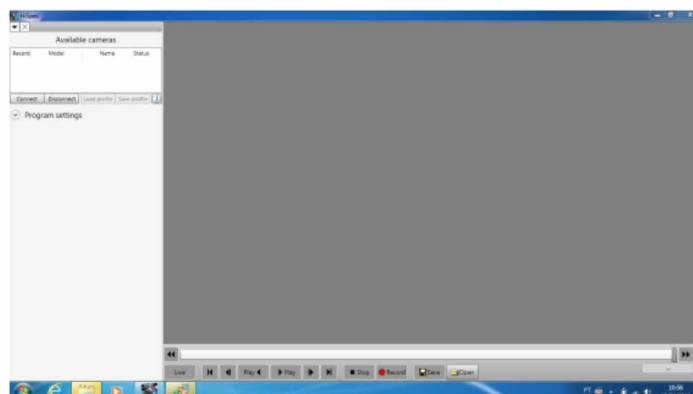


Figura 16 – Tela Inicial do Software da HiSpec 5.

Depois de conectada ao software as seguintes configurações devem ser alteradas para o uso com o protótipo ViaSolda: *framerate*, *shutter* e *enable sync in*, como ilustrado na Figura 17.

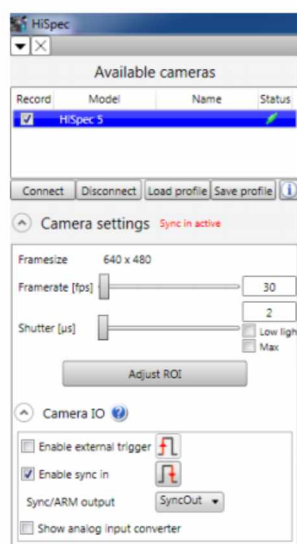


Figura 17 – Software HiSpec: configuração para uso com protótipo ViaSolda.

A taxa de quadros por segundo deve ser selecionada de acordo com a FPS desejada para a realização de filmagens. Por exemplo, para uma filmagem de baixa velocidade (30 fps), insere-se o valor de 30 no rótulo *framerate*. O manual deste software indica a utilização de um valor superior à taxa de quadros de entrada (por ex.: 35).

Em *Camera IO*, habilite a opção *Enable Sync In* e certifique-se que a configuração esteja habilitada para a borda de descida (↓). Com todos os ajustes realizados, o botão *Live* fornecerá ao usuário as imagens em tempo real obtidas pela câmera.

A etiqueta de *shutter* deve sempre estar selecionada em seu valor mínimo, 2 µs!

### 2.3. Configuração de Nova Câmera

O protótipo ViaSolda tem, entre suas características, a flexibilidade de sincronizar seus pulsos de iluminação com câmeras distintas das apresentadas neste manual. Para que isso seja possível, porém, a câmera escolhida deve apresentar as seguintes funções/características de funcionamento:

- Sensibilidade ao espectro no infravermelho próximo (905 nm)
- Tempo de exposição máximo de 2µs;
- Possibilidade de controle externo através de sinal de *trigger*;
- Entrada de *trigger* TTL (níveis entre 0 e 5 V);
- Resposta ao controle externo através de sinal de *shutter*;
- Saída do sinal de *shutter* TTL;

Considerando que todas as demandas anteriores sejam cumpridas, resta o desenvolvimento do cabe de interface câmera/ViaSolda. A pinagem no conector CAMERA é apresentada na Figura 18.

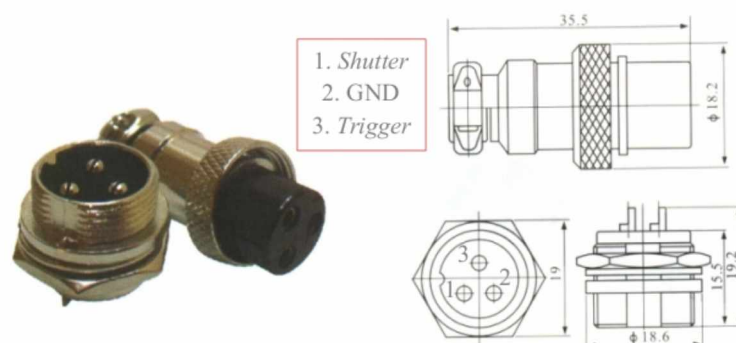




Figura 18 - Pinagem de saída e descrição de conector CAMERA.

Uma última característica que deve-se levar em consideração é a polaridade do sinal de *shutter* emitido pela câmera. Escolhe-se a posição da chave seletora de acordo com este, ou seja, se o sinal de *shutter* é um nível de tensão normalmente baixo e, durante o tempo de abertura, este nível é direcionado para nível alto, deve-se selecionar a chave na posição superior . Caso contrário, onde o nível de tensão é alto com exceção do momento de abertura, deve-se colocar a chave seletora na posição inferior .

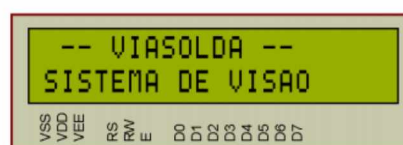
### 3. Uso de Software -- VIASOLDA --

#### 3.1. Ligar o sistema pelo botão Liga/Desliga.

Com o sistema ligado, o botão (8) tem um LED interno que acende, indicando a presença da tensão de entrada (10) e o cooler de refrigeração (13) deve ligar.

O LCD deve acender sua luz de fundo e escrever a mensagem introdutória, como segue:

```
-- VIASOLDA --
LAPROSOLDA - SISTEMA DE VISAO
PARA PROCESSOS DE SOLDAGEM
DRIVER DE PULSO QUADRADO
COM FPS VARIÁVEL VER. 02/2015
MSc. Carolina Pimenta Mota
```

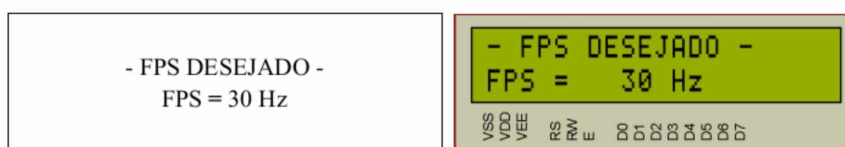




### 3.2. Entrada de FPS:

O usuário deve inserir a taxa de quadros por segundo que será realizada a filmagem. Como padrão, o sistema considera 30 quadros por segundo, tendo seus limites superiores e inferiores em, respectivamente, 1000 e 10 Hz.

Inicialmente, lê-se na tela do LCD (1):



Os botões MAIS e MENOS diminui e aumenta, respectivamente, a taxa de quadros desejada em intervalos de 10 Hz. O LCD atualiza o valor selecionado para o usuário. Supondo uma taxa de quadros de 300 Hz, por exemplo, lê-se no LCD:



Quando ajustada a FPS desejada, deve-se apertar o botão DISP. Uma mensagem de confirmação será lida no LCD, com a frequência ajustada.



Para confirmar sua escolha, pressione o botão DISP novamente. Desta forma, o sistema está pronto para o acionamento dos diodos laser. Lê-se a seguinte mensagem no LCD:



### 3.3. Acionamento/Parada dos Diodos Laser

Para o acionamento dos diodos laser, deve-se pressionar o botão DISP. É possível verificar o sistema em funcionamento de três diferentes formas:

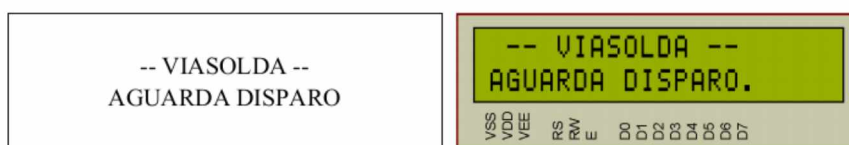


- a) Ouve-se o estalo de acionamento do relé de segurança
- b) O LED de segurança é acesso na parte frontal do sistema
- c) Lê-se no LCD a seguinte mensagem:



A qualquer momento pode-se interromper o acionamento dos diodos laser, pressionando o botão DISP. É possível verificar o estado de pausa no acionamento de três diferentes formas:

- a) Ouve-se o estalo de desligamento do relé de segurança
- b) O LED de segurança é desligado na parte frontal do sistema
- c) Lê-se no LCD a seguinte mensagem:

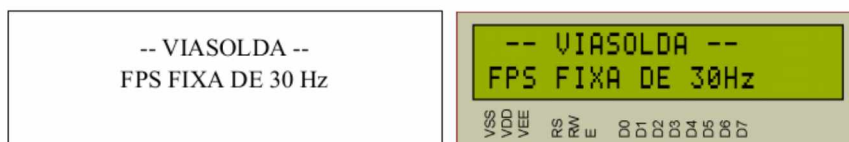


**Recomenda-se acionar os diodos laser pelo tempo mínimo necessário para a realização da filmagem para a preservação da vida útil dos semicondutores.**

Quando o sistema está aguardando o disparo do usuário (diodos laser desligados), pode-se optar pela transição da taxa de quadros da frequência ajustada para a frequência fixa de 30 Hz pressionando o botão MAIS.

**Recomenda-se acionar os diodos laser com a taxa fixa de 30 Hz para fins de alinhamento (ajuste da câmera) para a preservação da vida útil dos semicondutores.**

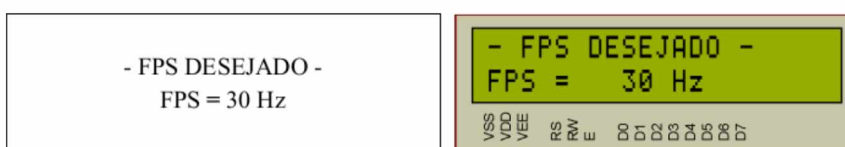
Pressionado o botão MAIS, a taxa de quadros é fixada em 30 Hz, com indicação no LCD:



Pressionado o botão MAIS novamente, a taxa de quadros é revertida à taxa de quadros ajustada no início do programa (no exemplo, 300 Hz):



Uma segunda opção quando o sistema está aguardando o disparo do usuário é a escolha de uma nova taxa de quadros, pressionando o botão MENOS. O usuário deve repetir o procedimento de ajuste da FPS utilizando os botões MAIS, MENOS e DISP. No LCD, se lê novamente:



#### 4. Lista de Equipamentos

Segue a lista de equipamentos, em ordem alfabética, para a utilização plena do sistema ViaSolda:

- Adaptador de filtro de interferência para câmera (Figura 5)
- Braço Telescópico (2 unidades)
- Cabo BNC-RCA: SI-M330 / Diamond (Figura 9)
- Cabo Mike-2BNC: ViaSolda / HiSpec 5 (Figura 15)
- Cabo Mike-HiRose: ViaSolda / SI-M330 (Figura 8)
- Câmera Analógica Costar SI-M330 (Figura 7)
- Câmera de Alta Velocidade HiSpec 5 – e acessórios (Figura 14)
- Filtro de Interferência Edmund Optics BP 905NM X 10NM OD4 25MM (Figura 5)
- Fonte 12 V<sub>DC</sub> – 1A com conector Hirose (12 vias) para SI-M330
- Lente planoconvexa 250 PQ 50
- Óculos de proteção 620.P1002.00 Skyline (3 unidades)
- Placa digitalizadora Diamond USB TV Tuner (Figura 9)
- Protótipo ViaSolda 19 Diodos Laser Pulso Quadrado (Figura 1 e Figura 2)
- Sistema óptico em tubos de alumínio (Figura 6)
- Suporte de fixação SI-M330 – braço telescópico (Figura 5)

## APÊNDICE X

### CÓDIGO FONTE (MATLAB) DE TRATAMENTO DAS IMAGENS OBTIDAS EM SOLDAGEM CURTO-CIRCUITO CONTROLADO

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[arquivo,pasta]=uigetfile('*.avi','Escolha o vídeo...');
filme = mmreader([pasta,arquivo]);
nquadros = get(filme,'NumberOfFrames');
quadros=read(filme);
mkdir([pasta,arquivo(1:length(arquivo)-4)]);
for i=1:nquadros
    mov(i).cdata = quadros(:,:,i);
    if(i<10)
        imwrite(mov(i).cdata,[pasta,arquivo(1:length(arquivo)-
4),'\\','000',num2str(i),'.jpg']);
    else if(i<100)
        imwrite(mov(i).cdata,[pasta,arquivo(1:length(arquivo)-
4),'\\','00',num2str(i),'.jpg']);
    else if(i<1000)
        imwrite(mov(i).cdata,[pasta,arquivo(1:length(arquivo)-
4),'\\','0',num2str(i),'.jpg']);
    else if(i<10000)
        imwrite(mov(i).cdata,[pasta,arquivo(1:length(arquivo)-
4),'\\',num2str(i),'.jpg']);
    end
end
end
end end
fprintf('Conversao de AVI para JPG concluída!\n');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[arquivo,pasta]=uigetfile('*.avi','Escolha o vídeo...');
filme = mmreader([pasta,arquivo]);
nquadros = get(filme,'NumberOfFrames');
quadros=read(filme);

fig=figure;
set(fig, 'position', [150 150 720 480])
aviobj = avifile('teste.avi','FPS',30)
for k=1:nquadros
    original = rgb2gray(quadros(:,:,k));
    imshow(medfilt2(original,[8,8]));
    F = getframe(fig);
    aviobj = addframe(aviobj,F);
end
close(fig)
aviobj = close(aviobj);

```