

MARCUS VINÍCIUS RIBEIRO MACHADO

**SISTEMA EMBARCADO SEM FIO PARA
MONITORAMENTO DE SINAIS EM SOLDAGEM A
ARCO ELÉTRICO COM ABORDAGEM
TECNOLÓGICA**



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

2011

MARCUS VINÍCIUS RIBEIRO MACHADO

**SISTEMA EMBARCADO SEM FIO PARA MONITORAMENTO DE
SINAIS EM SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ABORDAGEM
TECNOLÓGICA**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Coorientador: Prof. Dr. Roberto M. Finzi Neto

UBERLÂNDIA - MG

2011

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

M149s Machado, Marcus Vinícius Ribeiro, 1986-
Sistema embarcado sem fio para monitoramento de sinais em soldagem a arco elétrico com abordagem tecnológica / Marcus Vinícius Ribeiro Machado. - 2011.
115 f. : il.

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

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

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

CDU: 621

*Dedico,
Aos meus pais, Walter e Silá
pelo apoio, suporte e
encorajamento nesta jornada de estudos,
buscando sempre crescer
e alcançar vitórias, como esta.*



*"Ninguém é tão sábio que nada tenha para aprender,
nem tão tolo que nada tenha para ensinar."*
Blaise Pascal

AGRADECIMENTOS

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

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro no fornecimento da bolsa de mestrado para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, ideias na solução de problemas, indicações de estudos, discussões sobre assuntos diversos acrescentando a este trabalho grande experiência e qualidade, e pelas horas de conversas e conselhos que sem dúvida, foram essenciais para a insistência e conclusão do trabalho.

Ao Professor Roberto Mendes Finzi Neto, pela coorientação, atenção e dedicação, pelas horas extras de trabalho, pela paciência durante as fervorosas discussões sobre os problemas encontrados e na busca de soluções, além da disposição de ensinar e sempre esclarecer dúvidas.

Ao Professor Américo Scotti, por me acolher no grupo de pesquisa enquanto ainda aluno de graduação, passando grandes ensinamentos e criando um sentimento de afinidade com a Soldagem, incentivando o ingresso no estudo dos processos de soldagem e na instrumentação dos mesmos.

À minha namorada, Carolina Pimenta Mota, por me acompanhar, me ensinar a ser paciente com os problemas, sempre me motivando a agregar ideias ao trabalho, além da imensurável ajuda na finalização do presente documento.

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

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

MACHADO, M. V. R. Sistema Embarcado Sem Fio para Monitoramento de Sinais em Soldagem a Arco Elétrico com Abordagem Tecnológica. 2011. 115 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Devido a grande importância industrial da união soldada e sendo a soldagem um processo especial de fabricação, que não pode ser completamente inspecionado contra defeitos apenas após sua finalização, o seu monitoramento constante se faz necessário. Pela ISO 3834, o fabricante deve adotar medidas para garantir a qualidade necessária, onde o monitoramento pode ser usado para garantir documentação do processo, auditorias, ações corretivas e revisão de pessoal. Assim, dada importância deste monitoramento, é fundamental ter à disposição da indústria um sistema de utilização direta, mas que contenha o estado da arte em tecnologia de comunicação. Tecnologicamente, o monitoramento é requerido pela ISO 17662:2005, que, além da correta calibração dos sistemas e dos equipamentos, esta norma requer a verificação, ou seja, o registro para confirmação através da provisão de evidência objetiva que as exigências específicas foram cumpridas. É possível encontrar sistemas que consigam realizar tal monitoramento de forma satisfatória, mas com uso de comunicação por cabos, que por muitas dificultam a utilização, e com a necessidade de um computador com sistema operacional específico e que fique solidário ao sistema de monitoramento. Desta forma, um sistema que seja embarcado, ou seja, independente, que consiga monitorar diferentes sinais do processo de soldagem e que se comunique de forma robusta e flexível com diversos computadores, palms, smartphones, etc é, sem dúvida, um passo importante para o monitoramento e registro contínuo das soldas. Isto é possível graças à disseminação de redes de computadores em ambientes fabris e a possibilidade do uso do protocolo TCP/IP. Mais do que estas características, o sistema deve ser de baixo custo e baixo consumo de energia para ampliar sua abrangência e independência/flexibilidade de uso em campo, respectivamente. Com base nestas premissas, foi projetado, construído e avaliado um sistema embarcado para monitoramento sem fio de sinais em soldagem a arco elétrico, denominado MoSo Wi-Fi (Monitor de Soldagem WiFi). Num primeiro momento, três canais de aquisição estão disponíveis (tensão, corrente e velocidade de alimentação), onde os ensaios executados com soldagens TIG corrente alternada e MAG (curto-círcuito, góticular e pulsado) demonstram a grande aplicabilidade do mesmo, a um custo de hardware aproximado de US\$ 550,00.

Palavras-Chave: Embarcado; Monitoramento; ISO 3834; Sem Fio, Soldagem.

MACHADO, M. V. R. **Embedded System for Wireless Signal Monitoring During Arc Welding with Technological Approach.** 2011. 115 f. Master Dissertation, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

ABSTRACT

Due to the industrial importance of welding and since it is a special process (i.e., the process result cannot be completely assured only using inspection), its constant monitoring is necessary. ISO 3834 standard, which requires that the manufacturer adopts measures to assure the necessary quality, where monitoring can be used to guarantee corrective documentation of the process, auditions and staff revision. Thus, due to the importance of this monitoring, it is crucial to have a dedicated system for industrial use. Moreover, this system must contain the state of the art in communication technology. For technological use, this monitoring is standardized by the ISO 17662:2005, which requires the correct calibration of this system and the equipment and requires the verification (register for confirmation), through the provision of objective evidence that specific requirements had been fulfilled. To fulfill this need, it is possible to find systems that can satisfactorily accomplish such monitoring, but with the use of cable communication, which brings difficulty and plasters the system with of a specific computer with specific operational system. Therefore, an important step for the monitoring and continuous register of welds is the development of an embedded system, independent, capable of monitoring different signals from the welding process and communicating with robust and flexible manner with diverse computers, palms, smartphones, etc. This is possible thanks to the dissemination of computer networks in industrial environments, and the possibility to use the TCP/IP protocol. In addition, a monitoring system must also be of low cost and low consumption of energy to extend the applicability and independence/flexibility for field use, respectively. Therefore and having these premises in mind, this work deals with the project, construction and evaluation of a wireless embedded system for monitoring and analyzing signals during arc welding, called here as MoSo WiFi (Monitor de Soldagem WiFi). At a first moment, three acquisition channels are available (voltage, current and wire feed speed) and from the welding tests using alternating-current TIG and GMAW (Short-circuit, Spray and MIG Pulsed), it is possible to conclude that the developed system demonstrates great applicability with a final hardware cost of US\$ 550.00.

Keywords: Embedded; Monitoring; ISO 3834; Wireless, Welding.

LISTA DE SÍMBOLOS

ζ	Amortecimento
ω_n	Frequência natural de oscilação
CPU	Unidade de processamento central
DBCP	Distância bico de contato peça
DHCP	Protocolo de configuração dinâmica de máquina
DMA	Acesso direto à memória
FFT	Transformada rápida de Fourier
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto
I	Corrente
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHM	Interface homem-máquina
LCD	Display de cristal líquido
LED	Diodo Emissor de Luz
MAG	<i>Metal Active Gas Welding</i>
MAG-P	Processo MAG pulsado
MCU	Dispositivo microcontrolador
MoSo Wi-Fi	Monitor de Soldagem desenvolvido neste trabalho
M_p	Valor máximo de <i>overshoot</i>
n	Número de pontos adquiridos discretamente
r	Coeficiente de correlação de Pearson
RMS	Valor eficaz
TCP/IP	Protocolo de controle de transmissão / Protocolo de Internet
t_d	Tempo que o sistema demora a atingir o pico de seu <i>overshoot</i>
TIG CA	Processo TIG com corrente alternada
TIG	<i>Tungsten Inert Gas Welding</i>
True-RMS	Valor eficaz verdadeiro
t_s	Tempo de acomodação
U	Tensão
Valim	Velocidade de alimentação
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
X_i	Cada ponto do sinal discreto
$X_{média}$	Média aritmética de uma grandeza
$X_{média-retificada}$	Média aritmética retificada de uma grandeza

Prefixos e Sufixos

<i>_med</i>	Resultado numérico de cálculo de valor médio
<i>_rms</i>	Resultado numérico de cálculo de valor eficaz
<i>filt</i>	Resultado de medição para a forma de onda de referência filtrada
<i>lab</i>	Resultado de medição pelo sistema de referência do laboratório
<i>moso</i>	Resultado de medição pelo MoSo
<i>Xcorr</i>	Correlação entre a medição efetuada pelo MoSo e pelo sistema de referência
<i>Xcorr_filt</i>	Correlação entre a medição efetuada pelo MoSo e pelo sistema de referência, mas com sinal filtrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação do Trabalho.....	1
1.2. Objetivos do Trabalho	3
1.3. Organização da Dissertação	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Monitoramento e Análise de Dados.....	5
2.2.1. <i>Abordagens em Monitoramento de Processos de Soldagem.....</i>	10
2.2.2. <i>Normalização.....</i>	11
2.2.3. <i>Trabalhos Realizados.....</i>	13
2.2.4. <i>Benchmarking.....</i>	16
2.3. Sistemas Embarcados	18
2.4. Comunicação de Dados Sem Fio em Ambiente Industrial.....	23
3. METODOLOGIA	29
4. ESTUDOS PRELIMINARES DOS SINAIS.....	32
5. DEFINIÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DO MoSo	40
5.1. Requisitos do sistema	40
5.2. Sistema Físico.....	42
5.2.1. <i>Sistema de Comunicação sem fio.....</i>	42
5.2.2. <i>Microcontrolador e seus periféricos.....</i>	44
5.2.3. <i>Sensores e Transdutores</i>	47
5.2.4. <i>Condicionadores de Sinais.....</i>	48
5.3. Interface Homem-Máquina.....	54
5.4. Protótipo.....	61
5.5. Considerações Finais.....	61
6. VALIDAÇÃO DO MoSo Wi-Fi	64
6.1. Calibração do MoSo Wi-Fi	64
6.2. Validação do Condicionamento de Sinal	67
6.3. Soldagens <i>in loco</i>	69
6.3.1. <i>Soldagens MAG-P e MAG góticas.....</i>	70
6.3.1.1. Estudo da influência do filtro no overshoot e na medida dos sinais ...	74

6.3.2. Soldagens MAG curto-círcuito.....	81
6.3.3. Soldagens TIG.....	84
6.4. Cálculo Estimado de Custo do <i>Hardware</i>	90
7. CONCLUSÕES.....	92
8. TRABALHOS FUTUROS.....	96
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	98
10. ANEXO I.....	103
PROGRAMA PARA ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DAS FORMAS DE ONDA	103
11. ANEXO II.....	106
PROGRAMA DE COMPARAÇÃO MoSo E SISTEMA DE REFERÊNCIA.....	106
12. ANEXO III.....	110
PROGRAMAS PARA ANÁLISE DO EFEITO DO FILTRO NO <i>OVERSHOOT</i>	110
13. ANEXO IV	113
PROGRAMA PARA ANÁLISE DO COEFICIENTE DE PEARSON	113
14. ANEXO V	114
PROGRAMAS PARA ANÁLISE DO EFEITO DA RETIFICAÇÃO EM TIG CA.....	114

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação do Trabalho

Dentre os processos de fabricação, em especial os de união permanente de metais, a soldagem a arco tem sido um dos mais importantes utilizados na indústria. Com sua grande utilização e, sendo a soldagem um processo especial de fabricação, – a garantia da qualidade da junta soldada e inspeções contra imperfeições não podem ser realizadas apenas após sua finalização (ISO 9001:2000) – o desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos e métodos de monitoramento processos são necessários.

A norma ISO 3834:2005 trata sobre os requisitos de qualidade para soldagens por fusão de metais, fornecendo orientações sobre práticas para se obter qualidade nas soldagens e como documentar todo o processo, indo desde a qualificação do soldador, a qualificação do procedimento de soldagem, documentação de material, até o monitoramento dos parâmetros operacionais do processo (como tensão, corrente, velocidade de alimentação e outros). A aplicação deste tipo de norma não é uma obrigatoriedade para os fabricantes, porém, na busca por processos de soldagem e produtos finais com maior qualidade, normas como estas são referências confiáveis de boas práticas para que se alcance a qualidade desejada e requerida. Além disto, sua documentação pode ser utilizada em auditorias, ações corretivas e revisão pessoal.

Existem diversos equipamentos, de diferentes fabricantes por todo o mundo, que realizam monitoramento das variáveis dos processos de soldagem, cada um com seu enfoque de processo específico, nos parâmetros que são monitorados, com suas vantagens e limitações. Equipamentos programáveis também estão disponíveis no mercado, como os dispositivos de aquisição DAQ (*Data Acquisition*) da National Instruments (2011), que são adaptáveis ao monitoramento da soldagem com o acoplamento de condicionadores de

sinais e transdutores específicos, sendo bastante utilizado em ambientes de pesquisa e desenvolvimento de processos, enquanto os primeiros são utilizados tanto para pesquisa quanto para indústria.

A tendência atual segue na criação de equipamentos de uso prático e simplificado, de uso dedicado com a eliminação de circuitos adaptativos e maior flexibilidade de instalação, já que o equipamento de monitoramento deve auxiliar o usuário a melhorar o processo, e não ser mais um obstáculo, apresentando problemas e dificuldade de uso e, se aplicado em ambientes fabris, o equipamento deve-se adaptar ao meio e não o contrário.

A demanda por flexibilidade, principalmente, tenderá a modificar a forma como o monitoramento dos parâmetros de soldagem é realizado, substituindo o sistema tradicional de cabos (comunicação serial, paralela, USB ou mesmo Ethernet) por um sistema de comunicação sem fio, devido sua portabilidade.

A ideia inicial de se construir um dispositivo sem fios veio da tendência atual observada em dispositivos móveis, tais como, *notebooks*, *smartphones*, *tablets* e celulares. Estes estão cada vez mais ricos em recursos, tanto com o uso de *hardware* mais poderosos como de *softwares* capazes de realizar tarefas complexas. Observa-se, também, a disseminação de redes de computadores em ambientes fabris onde, em empresas mais modernas, os equipamentos são controlados remotamente.

Fontes de energia para soldagem estão cada vez mais modernas, com grande desenvolvimento da eletrônica, com evolução não só a parte de circuitos de potência, mas também a de acionamento e controle, com a inclusão de interface para robôs, que trabalha paralelamente ao processo de soldagem.

Assim, partindo-se também da necessidade de uma empresa do ramo de soldagem do Triângulo Mineiro, que procurou o Laprosolda/UFU (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem) para buscar uma solução para o monitoramento de toda planta da empresa por meios sem fios (VILARINHO, 2010), é que se imaginou a possível de integração do monitoramento dos processos de soldagem com a praticidade do uso de comunicação sem fio uma realidade alcançável e bastante promissora.

Com a criação deste tipo de tecnologia ligada à soldagem, pode-se expandir, ainda, a sua aplicabilidade para sistemas de controle e supervisão remota, facilitando muitos procedimentos de soldagens, por exemplo, em ambientes hostis ao ser humano, bem como a possibilidade de se realizar a supervisão por parte de especialistas capacitados sem que eles estejam presentes no local da operação.

1.2. Objetivos do Trabalho

Neste contexto de monitoramento sem fio dos parâmetros de processos de soldagem é que se insere a proposta deste trabalho, ou seja, o objetivo principal deste trabalho é o projeto, construção, e avaliação de um sistema de monitoramento sem fio de variáveis dos processos de soldagem a arco, de tecnologia própria, que apresente escalabilidade, portabilidade, autonomia, baixo custo e flexibilidade/simplicidade de operação.

Como objetivos específicos têm-se:

- Estudo dos sinais envolvidos em processos de soldagem a arco elétrico, TIG e MIG/MAG, determinando suas principais características para o posterior monitoramento;
- Projeto e desenvolvimento do sistema físico de monitoramento, incluindo todas as especificações de sensores ou transdutores, projetos de circuitos de condicionamento de sinais e determinação da forma de comunicação;
- Projeto e desenvolvimento da Interface Homem-Máquina, tanto no sistema embarcado quanto o desenvolvimento da plataforma de visualização e armazenamento dos sinais monitorados;
- Construção de um protótipo e validação de sua utilização no monitoramento de processos de soldagens TIG e MIG/MAG.

1.3. Organização da Dissertação

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

No Capítulo II é realizada uma revisão bibliográfica dos tópicos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho como um todo: monitoramento de processos, instrumentação em soldagem, breve introdução a sistemas embarcados e sistemas de comunicação de dados.

No Capítulo III é apresentada uma visão geral do trabalho, descrevendo a metodologia de trabalho para conclusão da dissertação, criando uma sequência de etapas, para o projeto do sistema de monitoramento.

No Capítulo IV tem-se a descrição do estudo preliminar realizado sobre os sinais de processos de soldagem a arco, para estudo de suas características. Com isto poderá se

definir e desenvolver toda parte física, escolha de sensores, condicionamento de sinais e tecnologia de comunicação de dados.

No Capítulo V é realizada a definição, o desenvolvimento do projeto do sistema de monitoramento e discutida a construção do protótipo.

No Capítulo VI são apresentados os resultados experimentais do protótipo construído, desde a validação dos condicionadores de sinais, circuitos de segurança e proteção, e os resultados dos testes realizados no monitoramento de soldagens TIG e 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.

No Capítulo IX são listadas todas as referências das citações realizadas ao longo do trabalho.

Nos Anexos são detalhados todos os algoritmos para os cálculos realizados para avaliação do trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a realização de um projeto em monitoramento sem fio de sinais elétricos em soldagem a arco, é importante que haja um entendimento preliminar sobre os tópicos a serem discutidos nesta revisão bibliográfica: monitoramento e análise de dados, instrumentação em soldagem (envolvendo princípios, normas e produtos comercialmente disponíveis), uma passagem breve por sistemas embarcados e, por fim, uma introdução à comunicação de dados.

2.1. Monitoramento e Análise de Dados

Todos os dias a ação de monitorar é aplicada por todos, monitorando ou sendo monitorados, de forma consciente ou não. Como exemplos de monitoramento, pode-se citar a realização de cálculo do consumo de combustível de um automóvel ou a medição do consumo mensal de um cliente pela concessionária de energia elétrica. Algumas formas de monitoramento são mais facilmente identificadas, como o estudo do clima observando sua variação ao longo dos anos, enquanto as outras são ações normalmente corriqueiras que não chamam atenção ao fato de serem formas de monitoramento, diferentemente da última.

Mas o que é monitoramento? Segundo um dicionário de língua portuguesa (AURÉLIO, 2011), monitoramento é definido como acompanhar, para consideração, dados ou informações fornecidas por instrumentos técnicos. Segundo trabalho publicado (BARTLE, P., 2010), monitoramento pode ser definido como a observação e o registro regular de um processo, realizados de forma rotineira, e acumulando as informações em todos os seus aspectos. Checar o avanço das atividades de um processo, ou seja, uma observação sistemática com propósitos; é ainda, dar uma avaliação sobre o desempenho do processo,

sendo que todas as informações reunidas são utilizadas para tomadas de decisões em prol do aperfeiçoamento do desempenho do projeto.

A atividade de monitorar algum processo ao longo do tempo nos fornece informações para:

- Analisar a situação do processo;
- Determinar se as alterações do processo estão como esperadas;
- Identificar problemas, e encontrar soluções;
- Utilizar de experiência de operações anteriores;
- Determinar se a maneira na qual o projeto foi elaborado é a mais apropriada para a resolução do problema em questão.

Assim, o monitoramento é muito importante no planejamento, implementação e acompanhamento de um projeto ou processo. Mas, como dito anteriormente, o monitoramento é realizado sempre com algum propósito, com um fim específico de estudo, e, quase de maneira geral, os dados acumulados nos processos de monitoramento são armazenados e representados matematicamente como funções de uma ou mais variáveis independentes.

Em processos de engenharia, o propósito do monitoramento comumente é a realização de análise dos dados obtidos. A análise de dados pode ser definida como o processo pelo qual se dá ordem, estrutura e significado aos dados (KACHIGAN, 1986), transformando-os em conclusões ou lições úteis e credíveis. Ou ainda, para a matemática, a investigação de um problema específico por métodos algébricos ou mediante cálculos (MICHAELIS, 2009). O propósito, de uma forma geral, da análise de dados é descrever, resumir dados, identificar relações e diferenças entre variáveis ou, ainda, fazer previsões (MEASURE EVALUATION, 2008).

É possível analisar um dado obtido por diferentes frentes científicas, como a estatística ou mesmo a matemática analítica, e ter como lições deste, infinitas características, indo desde valores simples como periodicidade, valor máximo, valor mínimo, seu valor médio, variância até características complexas, como seu comportamento no domínio da frequência ou a determinação da função que rege a relação entre suas variáveis. Para cada tipo de análise há uma forma determinada de obtê-la e uma finalidade específica para ela, gerando significados aos dados obtidos de acordo com o interesse de quem a realiza. Alguns conceitos de análise de dados estatísticos são apresentados a seguir.

A obtenção da média aritmética de um sinal discreto é dada pela razão da somatória dos valores em cada ponto pelo número total de pontos, ou seja:

$$X_{\text{média}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.1)$$

Onde $X_{\text{média}}$ é o valor da média aritmética, n o número de pontos e X_i cada ponto do sinal discreto.

Por outro lado, uma média aritmética retificada ($X_{\text{média-retificada}}$) de um vetor de dados discretos é dada pela razão da somatória dos valores absolutos de cada ponto pertencente ao vetor pelo número total de pontos, sendo considerada importante para a soldagem (NEEDHAM, 1985).

$$X_{\text{média-retificada}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |X_i| \quad (2.2)$$

O valor eficaz, ou RMS (*root-mean square*), de uma sequência de dados discretos é dado pela razão da raiz quadrada da somatória quadrática dos valores em cada ponto pelo número total de pontos no vetor discreto, ou seja:

$$X_{\text{rms}} = \frac{1}{n} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (2.3)$$

Uma avaliação sobre o **Teorema da Amostragem de Nyquist-Shannon** é fundamental no campo da teoria da informação, particularmente em processamento de sinais. Sendo que amostrar é o processo no qual se converte um sinal (por exemplo, uma função contínua no tempo ou espaço) em uma sequência numérica (uma função discreta no tempo ou espaço). Seu enunciado é dado como:

"Seja um sinal, limitado em banda, e seu intervalo de tempo dividido em partes iguais, de forma que se obtenham intervalos tais que, cada subdivisão compreenda um intervalo com período T segundos, onde T é menor do que $1/2 \cdot F_m$, onde F_m é a maior frequência do sinal original, e se uma amostra instantânea é tomada arbitrariamente de cada subintervalo, então o conhecimento da amplitude instantânea de cada amostra somado ao conhecimento dos instantes em que é tomada a amostra de cada subintervalo contém toda a informação do sinal original. (NYQUIST, 1928)."

Um sinal ou função é limitado em banda se não contém energia em frequências maiores do que o limite de banda B . Um sinal que é limitado em banda é condicionado a quanto rápida é sua variação no tempo. Então, um sinal analógico, limitado em banda, que foi

amostrado, pode ser perfeitamente recuperado, a partir de uma sequência infinita de amostras, se a taxa de amostragem for maior que $2*F_m$ amostras por segundo.

A reconstrução do sinal original é um processo de interpolação que matematicamente define um sinal contínuo no tempo x a partir de amostras discretas $x[n]$ e, às vezes, entre os instantes de amostragem nT .

O procedimento consiste em que cada valor de amostra é multiplicado pela função *sinc* dimensionado, de modo que os cruzamentos de zero da função *sinc* ocorram nos instantes de amostragem e que o ponto central da função *sinc* seja deslocado para o tempo daquela amostra, nT . Todas essas funções dimensionadas e deslocadas são então somadas umas com as outras, para se recuperar o sinal original. As funções deslocadas no tempo e dimensionadas são funções contínuas, fazendo com que a soma das mesmas também seja contínua, de modo que o resultado desta operação é um sinal contínuo. Tal procedimento é representado pela Fórmula de interpolação de Whittaker-Shannon (WHITTAKER, 1915 e WHITTAKER, 1935).

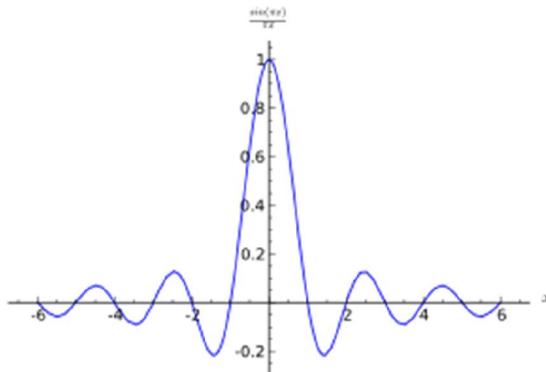


Figura 2.1 – Função *sinc* normalizada: $\sin(x)/(x)$

O Teorema da Amostragem discorre sobre a capacidade de reconstruir o sinal a partir de amostras, entretanto, para o estudo para a soldagem não são realizadas reconstruções do sinal amostrado, mas se pretende sim representar o formato de onda dos processos, sendo então que o teorema é um ponto de partida para o estudo das taxas de amostragem, porém o emprego da mesma não garante a reprodução dos sinais, visto que os sinais dos diferentes processos de soldagem não são limitados em banda, como o caso de soldagem pulsada, onde a transição entre a base e pico apresenta uma alta frequência.

Desta forma, cuidado deve ser tomado ao se tecer comentários sobre o Teorema da Amostragem para sinais que não sejam sinodais puros, já que uma onda retangular,

aproximadamente o caso de uma soldagem pulsada, apresenta componentes sinodais de altíssimas frequências.

2.2. Instrumentação em Soldagem

Uma coleção de técnicas e métodos para o monitoramento de diversos processos de soldagem, pelos mais diversos meios (sensores ópticos, contato, dentre outros) mostra de forma aprofundada e objetiva as necessidades e os equipamentos desenvolvidos por pesquisadores da área. Sendo este ramo de estudo bastante impulsionado pelo advento da microeletrônica, que possibilitou a rápida evolução para dispositivos cada vez melhores, independentes, precisos e robustos. Duas perguntas realizadas pelo autor são simples, porém suas respostas são complexas: “porque os processos de soldagem devem ser monitorados, e como podem ser efetivamente monitorados?”. A resposta não poderia ser diferente, começando pelo ponto de demonstrar que um processo de soldagem, é um sistema extremamente complexo (ZHANG, 2008).

O monitoramento de forma não intrusiva e em tempo real está cada vez mais presente e necessário na indústria de manufatura para detecção de falhas em processos de soldagem a arco. Fato decorrente de que, os produtos devem ser fabricados com alta produtividade e precisão, levando a necessidade de soldadores capacitados, equipamentos de soldas de alta qualidade e procedimentos especificamente desenvolvidos para a aplicação. Entretanto, instabilidades podem ocorrer durante o processo de soldagem, e seus resultados não podem ser verificados por métodos não destrutivos, o que significa tempo perdido e reparos, implicando em custos na produção (ANCONA *et al.*, 2004).

Assim, o monitoramento e o controle de processos de soldagem são a chave para o desenvolvimento de tecnologias em processos de soldagem, especialmente aplicações de soldagem automática e robotizada. O sensoriamento pode ser utilizado para avaliar o processo e os equipamentos (fontes de solda, alimentadores de arames, robôs e manipuladores) em busca de erros de regulagem de parâmetros; a preparação das peças a serem soldadas (junta) é também importante, devem-se verificar as dimensões e com auxílio de seguidores de junta, julgar e corrigir o alinhamento da tocha de soldagem em relação à junta (USHIO, 1992).

Neste sentido, o monitoramento do arco e sua devida armazenagem podem oferecer serviços e vantagens, tais como (YAPP, 2001):

- Calibração de fontes de soldagem;

- Testes de qualidade e desenvolvimento de procedimentos e avaliação de ensaios de soldagem;
- Análise e avaliação da forma de onda mais adequada para desenvolvimento de processos;
- Detecção de falhas para soldagens automatizadas;
- Analise do desempenho do processo;
- Rastreabilidade de partes da produção (lotes), além de servir como medidor de produtividade;
- E detecção de potenciais defeitos na soldagem.

2.2.1. Abordagens em Monitoramento de Processos de Soldagem

Devido à importância dos processos de soldagem na indústria de desenvolvimento e fabricação de produtos, nos mais diversos campos de aplicações, a qualidade do produto deve ser garantida. Porém, como já discutido, isto não pode ser realizado apenas ao final do processo, o que leva a busca por processos que apresentem boa qualidade, com prévia qualificação. Esta busca se dá através de pesquisas e desenvolvimento de equipamentos e processos que resultem em procedimentos de soldagens que sejam testados e qualificados.

Sendo assim, existem duas vertentes quanto ao procedimento de soldagem, sendo a primeira relacionada ao desenvolvimento e estudo dos processos de soldagem, na busca de procedimentos que sejam ótimos para aplicações específicas, e a segunda é o uso pela indústria, que se utiliza dos processos e procedimentos para realizar as tarefas necessárias na fabricação dos produtos. É importante ressaltar que, nestas situações diferentes, características diferentes da informação podem ser consideradas importantes ou não, modificando a forma como devem ser monitorados os processos de soldagem.

Desta forma, para fins de discussão e estudo dos sinais dos processos de soldagem, duas abordagens distintas são definidas neste trabalho para o monitoramento dos mesmos, sendo elas: científica e tecnológica.

A abordagem científica é focada no estudo aprofundando dos processos de soldagem, utilizada, normalmente, em laboratórios e centros de pesquisa em soldagem, onde se procura obter o máximo de informações possíveis dos sinais, ou seja, obter todos os detalhes, com o intuito de observar as variações de cada regulagem nos parâmetros, e suas influências sobre o cordão e qualidade final da solda.

A abordagem tecnológica está voltada para o monitoramento, documentação e o acompanhamento do processo em ambiente de produção, não sendo, então, necessário um maior detalhamento, mas contendo informações suficientes para detecção de problemas e

verificação de possíveis defeitos. Características como os valores médios e RMS dos sinais são importantes, porém o comportamento dinâmico das fontes de soldagens, como chaveamento dos circuitos de potência que controlam a imposição de corrente ou tensão para o processo, pode ser ignorado nesta abordagem.

As diferenças do monitoramento são refletidas nos equipamentos e métodos para realização do mesmo, pois em sistemas de amostragem (conversão de sinais analógicos em sinais digitais) quanto maior a taxa de amostragem e a resolução do sistema, maior é o nível de informação sobre o sinal amostrado e, também, maior é a quantidade de dados a serem transmitidos ou armazenados para um mesmo intervalo de tempo.

Em termos de transmissão, ou mesmo armazenamento, deve-se procurar sempre o menor volume de dados possível (menores taxas de amostragem e resolução), contanto que a informação que se deseja seja obtida de forma satisfatória, sem que haja perdas da informação que se deseja passar (ou guardar), pois há limitações de velocidades de comunicação e de espaço de armazenamento— não para um processo, mas para todos os procedimentos realizados, levando em conta que empresas realizam inúmeras soldagem, e o armazenamento dos dados deve ser considerado.

2.2.2. *Normatização*

A introdução dos procedimentos que garantam a qualidade pela ISO 9000 requer que as medidas das variáveis de um processo sejam indicadas com certos níveis de exatidão. Pelo fato do processo de soldagem exercer profunda influência no custo e qualidade dos produtos, o procedimento deve ser realizado da forma mais efetiva possível (YAPP, 2001).

Para equipamentos de soldagem, a *British Standard: Code of Practice for Validation of Arc Welding* (IEC 7570:2000 apud YAPP, 2001), define dois níveis de exigência diferentes para as fontes de soldagem, para soldagens manuais (*Standard Grade*) e para mecanizadas ou automáticas (*Precision Grade*), conforme mostrado na Tabela 2.1.

A referida norma trata, ainda, sobre como deve ser realizada a validação e a calibração de fontes e instrumentos de medidas, relacionados às fontes. Uma carga resistiva deve ser aplicada, e sobre esta medida as variáveis, para toda amplitude de variação da regulagem de parâmetros na fonte.

Os equipamentos utilizados para a calibração e validação devem ter uma exatidão de medida de no mínimo duas vezes (cinco é preferível) mais alta da que será calibrada, sendo os equipamentos de referência calibrados de acordo com instituições de credibilidade.

Tabela 2.1 – Validação da exatidão de fontes de soldagem

	<i>Standard Grade</i>	<i>Precision Grade</i>
Variável	Exatidão	Exatidão
Corrente (IEC 60974-1:1998)	± 10% do valor verdadeiro entre 100% e 25% da máxima regulagem. ± 2,5% do valor verdadeiro abaixo de 25% máxima regulagem.	± 2,5% do valor verdadeiro entre 100% e 40% da máxima regulagem. ± 1% do valor verdadeiro abaixo de 40% máxima regulagem.
Tensão (IEC 60974-1:1998)	± 10% do valor verdadeiro entre 100% e 25% da máxima regulagem. ± 2,5% do valor verdadeiro abaixo de 25% máxima regulagem.	± 5% do valor verdadeiro entre 100% e 40% da máxima regulagem. ± 2% do valor verdadeiro abaixo de 40% máxima regulagem.
Medidor de Tensão da fonte	± 2,5% da máxima corrente de soldagem	± 1% da máxima corrente de soldagem
Medidor de Corrente da fonte	± 2,5% da tensão em vazio, ou de acordo com a especificação do fabricante.	± 2,5% da tensão em vazio, ou de acordo com a especificação do fabricante.
Valim	± 10%	± 2,5%

Notas: Valim – Velocidade de Alimentação de Arame. O termo validação é utilizado, pois fontes de soldagem não podem ser calibradas, sendo definido como a demonstração que o equipamento opera de acordo com a especificação do fabricante. Entretanto, os indicadores de corrente e tensão, do equipamento, devem ser calibrados (a calibração é definida como a determinação da magnitude dos erros de medidas do instrumento), pois a IEC 7570:2000 diz que as regulagens dos parâmetros de soldagem devem ser realizadas de acordo com os indicadores das fontes de soldagem.

O estudo e documentação dos sinais de soldagem são de grande importância para a qualificação do processo. A norma *Welding - Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including ancillary activities* (ISO 17662, 2005) define e indicam quais, e como, as variáveis devem ser monitoradas nos diferentes processos de soldagem, especificando das grandezas globais (todos os processos) as mais específicas (para cada processo). Uma breve descrição da divisão dos sinais baseada na ISO 17662:2005 diz que, a todos os processos de soldagem, devem ser documentados, o material de base e o metal de adição; tipo de junta; máquina de soldagem; e outros. A maioria dos processos devem incluir os consumíveis; gás de purga e gás de proteção. E, em específico à soldagem a arco, o tecimento; variáveis elétricas; e as tocantes a soldagem mecanizada, como velocidade de soldagem e de alimentação do arame de adição. Como o enfoque deste trabalho está nos sinais específicos à soldagem a arco, a Tabela 2.2 mostra as necessidades exigidas pela norma.

Tabela 2.2 – Variáveis específicas em soldagens a arco que devem monitoradas (ISO 17662, 2005).

Instrumentos e Técnicas	
Variáveis Elétricas*	
Corrente	Amperímetro - Valor médio da corrente retificada.
Tensão	Voltímetro - Valor médio da tensão retificada.
Soldagem Mecanizada	
Velocidade de Soldagem	Medida por régua e cronômetros.
Velocidade de Alimentação	Medida por régua e cronômetros.

*Notas: * Podem ser monitorados continuamente. O tempo de amostragem deve ser razoável para garantir uma leitura estável. Se medidores tipo alicate (tong-tests) forem utilizados, deve levar em consideração a diferença entre média e RMS.*

Com isto, as informações monitoradas devem ser documentadas de acordo com a norma que define os requisitos de qualidade para soldagens por fusão de metais (ISO 3834, 2005), fornecendo orientações sobre práticas para se obter qualidade nas soldagens e como documentar todo o processo, indo desde a qualificação do soldador, a qualificação do procedimento de soldagem, documentação de material, até o monitoramento dos parâmetros operacionais do processo (como tensão, corrente, velocidade de alimentação e etc). Sua aplicação não é uma obrigatoriedade para os fabricantes, porém, na busca por processos de soldagem e produtos finais com maior qualidade, normas como estas são referências confiáveis de boas práticas para que se alcance a qualidade desejada e requerida. Além disto, sua documentação pode ser utilizada em auditorias, ações corretivas e revisão pessoal.

2.2.3. Trabalhos Realizados

A fim de se realizar a construção de um equipamento para instrumentação de processos de soldagem a arco, uma revisão sobre quais sinais devem ser monitorados foi realizada, de acordo com normas. Entretanto, não basta saber quais são, também é necessário saber como monitorar e quais as características dos sinais são importantes, de acordo com a abordagem pretendida.

Em um trabalho mais fundamental sobre o assunto (NEEDHAM, 1985), é proposta a forma mais conveniente de se expressar os valores representativos das formas de ondas presentes nos processos de soldagem, visto que manipulações de dados comumente

usadas são aplicáveis para cargas elétricas lineares; entretanto, o arco elétrico não é linear, ou seja, não obedece a Lei de Ohm.

Este autor (NEEDHAM, 1985) afirma que o sinal de corrente é fundamental à soldagem, e sua medida é, então, de extrema importância, porém dependendo do instrumento e do processo a ser medido podem aparecer erros de mais de 10% nas medidas se não forem observados certos detalhes, erro acima dos aceitáveis para soldagem de alta qualidade.

Além disto, Needham (1985) cita que cada processo exige cuidados especiais, por exemplo, soldagens de corrente constante ou transferência metálica por voo-livre não apresentam problemas, pois a amplitude do sinal é basicamente única. Para este processo pode-se utilizar de instrumentos de medição convencionais, que atualizam o valor das medidas a cada 1-2 s. A utilização de sistemas microcontrolados para a aquisição dos sinais tem a vantagem de poder armazenar grandes quantidades de dados, sendo que a quantidade e a taxa de amostragem são determinadas pelo processo. Este autor cita o registro de 250 amostras por segundo, e calcula o valor da média a cada 1-2 s.

Transferência por curto circuito que oscilam comumente entre 50 e 90 curtos por segundo, se consideradas leituras para médias com intervalos maiores que 0,5 s; pode-se ler apenas o valor da média e descartar o formato de onda. Entretanto se houver o intuito de descrever características dinâmicas, valores como máximo, mínimo e desvio padrão são importantes (NEEDHAM, 1985).

Para soldagem em corrente pulsada, Needham (1985) afirma que medidas devem ser realizadas de tal forma a se distinguir o valor da média do ciclo do formato de onda do valor da média total do formato de onda. Isto pode ser realizado com auxílio de osciloscópios. Já para avaliação de soldagem com polaridade alternada, utiliza-se do conceito de média retificada, que é o valor médio do sinal retificado.

Por fim, Needham (1985) recomenda sempre expressar os valores em termos de valores médios retificados, para evitar confusão principalmente com leituras de instrumentos comerciais, que dão valores RMS. O erro gerado na medida pela confusão entre os valores é de cerca de 11,1%. Em função disso, seus equipamentos de medidas são todos projetados para exibir os valores médios retificados.

Realizando uma avaliação sobre valores médios, médios retificados e RMS de instrumentos de medidas tem-se que, o valor RMS exibido por instrumentos convencionais são calculados com base no valor médio retificado, e então realizado um ajuste de escala considerando um formato de onda senoidal. Comparando o tipo de resposta dos de diferentes instrumentos de medida, o uso de equipamentos corretos na realização das medidas elétricas é citada em nota de aplicação (VÓRTEX, 2010), que afirma a necessidade de uso de aparelhos com medida True-RMS (RMS Verdadeiro) para cargas não lineares,

caso do arco de solda, sob pena de se ter leituras com erros de até 40% do valor real. A Tabela 2.3 ilustra o erro cometido na medida de formas de ondas convencionais, como a quadrada, sendo que se pode dizer que erro similar é gerado em leituras de soldagem com imposição de corrente pulsada e alternada, classificadas como retangulares (pois não são balanceadas em período).

Tabela 2.3 – Comparação de leituras para unidades com reposta média e RMS (VÓRTEX, 2010).

Tipo do Multímetro	Resposta para onda do tipo	
	Senoidal	Quadrada
Resposta Média	Correta	10% acima
True-RMS	Correta	Correta

Trabalhos sobre a tecnologia da soldagem, em ambientes industriais apontam como parâmetros essenciais a prática de soldagem os sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem (OSTER, 1998).

Estudos sobre o monitoramento *on-line* dos processos de soldagem (OSTER, 1998) diz que podem ser utilizados sensores para a medida de corrente como resistores *shunt* em série ao circuito da solda (não isolado do sistema de instrumentação), e sobre este medir a tensão que é proporcional a corrente que passa por ele, seguindo a Lei de Ohm. Outros métodos menos comuns para medida da corrente em campo são os sensores por transformadores de corrente (apenas para corrente AC) e os por efeito Hall (isolado do sistema de instrumentação). A medida da tensão é realizada diretamente entre o bico de contato e a peça, na prática conversores-DC e isoladores são utilizados para adequar os níveis de tensão e isolar a fonte de soldagem do circuito de aquisição. A velocidade de alimentação é registrada com o uso de tacômetros ou *encoder* acoplados ao eixo do motor de alimentação do arame, ou com *encoder* e uma montagem com roda de fricção emparelhada ao arame. Para a velocidade de soldagem pode-se instrumentar o motor do sistema de movimentação da mesma forma do de alimentação, e para soldagens que se utilizam de robôs é problemática, pois há movimentação em mais de um eixo, então normalmente os valores armazenados e impostos a movimentação do robô são armazenados para documentação.

Estudos sobre detecção de falhas e perda de instabilidade do processo GMAW curto circuito (ADOLFSSON *et al.*, 1999) apresentam técnicas matemáticas e resultados que comprovam que se pode instrumentar e avaliar o processo de soldagem através da análise do sinal de tensão do arco. Este é um dos poucos encontrados que expressa a metodologia de monitoramento dos sinais, apresentando o valor do filtro utilizado, 3,0 kHz, e a taxa de amostragem em 8192 kHz, sendo valores altos se comparados à dinâmica do processo, que segundo o próprio autor está entre 50–110 curtos por segundo (diferentemente dos valores indicados por Needham (1985)). Fato que não é de preocupação para a aplicação, visto que os dados foram armazenados em memória permanente direto do sistema de aquisição, não sendo transmitidos a outros dispositivos.

2.2.4. *Benchmarking*

Uma avaliação sobre sistemas de documentação dos sinais dos processos de soldagem mostra sistemas microprocessados que controlam impressoras e imprimem em folhas os formatos de ondas dos sinais (oscilogramas), ou uma coleção de dados, com os valores lidos em forma de tabelas podendo apresentar os valores dos tempos de leitura (OSTER, 1998).

Estudos mostram algumas tendências de tecnologias e equipamentos para o monitoramento de processos de soldagem (YAPP, 2001), indicando alguns dispositivos comerciais, como:

O AMV Weldcheck da Triton Electronics (UK) é capaz de monitorar corrente, tensão, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, vazão de gás e temperatura. Possui uma impressora incorporada e pode armazenar até 12 horas de soldagem. Possui uma interface RS 232 para descarregar os dados para um computador.

O MonArc da Data Harvest (UK) calcula os valores médios dos parâmetros de soldagem e é capaz de imprimir e armazenar estes valores. Pode-se definir valores mínimos e máximos para medição de valores fora dos limites. Possui também a capacidade de armazenar o formato de onda dos sinais, de 1,6s até 32s, a uma taxa de amostragem de 10kS/s até 0,5kS/s, respectivamente. Os dados são armazenados em memória *on-board* e podem ser passados para um PC para eventuais análises.

Um exemplo de sistema para o monitoramento de produção é o ArcAgent da Impact Welding (EUA) sendo capaz de monitorar uma única estação de solda, ou múltiplas interligando vários sistemas por rede RS 485. Apresenta avaliações do estado da produção, como anomalias em velocidade de alimentação, vazão de gás, sendo estas informações realizadas em tempo real em um indicador remoto.

Um analisador de soldagem, Analyticator Hannover da Universidade de Hannover, Alemanha, é utilizado para um estudo detalhada dos formatos de onda envolvidos nos processos de soldagem, adquirindo as mesmas a intervalos de 3us (ou 333,33 kHz).

Outro analisador de sinais, o WeldPrint da Welding Technologies Inovations Pty Ltd, Austrália, é capaz de monitorar o processo de soldagem, e caso detecte alguma falha realiza a armazenagem de momentos antes e após a detecção dos parâmetros.

A Triton Eletronics Ltd. é uma grande fabricante de aparelhos para medição de processos de soldagem, disponibilizando dispositivos capazes de instrumentar corrente (0 - 1000 A \pm 1%), tensão (0 – 100 V \pm 1%) e velocidade de alimentação (0 – 20 m/min \pm 2.5%) e exibir os valores médios dos mesmos, além da energia do arco por comprimento de solda, imposição de calor, em uma tela de LCD – AMV 3000 (Triton Eletronics Ltd., 2010a).

O equipamento AMV 4000 (Triton Eletronics Ltd., 2010b) é capaz de monitorar os dados a uma alta taxa de amostragem, até 100 kS/s, vem preparado para monitorar os mesmos sinais do AMV 3000, porém a velocidade de alimentação está entre 0 e 30 m/min \pm 2%. É desenvolvido para mostrar detalhes dos parâmetros de soldagem, então engenheiro de soldagem pode desenvolver procedimentos de soldagem otimizados. Os dados são armazenados em memória interna, e apresenta conectividade por 2 duas portas seriais, 2 USB, um adaptador ethernet 10/100.

O AMV 4000F (Triton Eletronics Ltd., 2010c), é uma versão industrial e portátil do AMV 4000, tendo uma simplificação para uso por soldadores, podendo armazenar as formas de onda de tensão, corrente tensão, velocidade de alimentação, temperatura e vazão de gás. As taxas de amostragem não são indicadas pelo fabricante, nem a capacidade de armazenamento.

No Brasil são bastante conhecidos os sistemas de monitoramento desenvolvidos pelo IMC Soldagem. Dentre eles, o TC-1 (IMC Soldagem, 2005b) é um dispositivo para medição da corrente (até 500 A RMS) e tensão (até 60 V) capaz de exibir em displays fixos ao equipamento os valores médios, RMS e instantâneos. Disponibiliza ainda para comunicações para computadores ou outros dispositivos de conversão, os sinais analógicos contínuos. Já o Sistema de Aquisição Portátil (SAP 4.01) é um dispositivo que pelo próprio nome é portátil, com grande versatilidade de aplicação na indústria, pesquisa e ensino, com interface gráfica tornando seu uso simplificado e agradável. Capaz de realizar amostragens até a taxa de 5000 pontos por segundo e armazenar até 600s de soldagem. Apresenta leituras em forma de oscilogramas, valores médios e eficazes, quantidade de arame consumida e outras. Utiliza-se de Conversor A/D de 10 bits e suas faixas de medição são de: corrente -600 a 600 A; tensão -100 a 100 V; vazão de gás 0 a 20 l/min; velocidade de arame 0 a 50 m/min (IMC Soldagem, 2005a).

Apesar da grande quantidade de dispositivos para instrumentação em soldagem, o uso de equipamentos móveis e sem fio está cada vez maior, entretanto há sempre um momento onde devem ser ligados a cabos, para recarregar suas baterias. Pesquisas atuais estão buscando formas de evitar isto, criando uma forma de eletricidade no ar (CAMARGO, 2007).

Enquanto pesquisadores buscam transmitir sem fio até mesmo energia, a tecnologia da soldagem também deve evoluir neste sentido, transmitindo, pelo menos, dados e controlando processos livre de fios. Recentemente a partir de 2010, fabricantes de fontes de soldagem já estão neste caminho, desenvolvendo controladores de potência da fonte de soldagem (corrente liberada para o processo, de acordo com um máximo regulado na fonte) através de pedais que se comunicam com a fonte independente de fios (Miller Electric Mfg Co., 2010a) até distâncias de 27,5 metros. Outro produto do mesmo fabricante é um dispositivo capaz de regular os parâmetros na fonte de soldagem, e indica o valor médio de corrente, tensão e percentual de trabalho da fonte de soldagem em um dispositivo remoto, sem fio para acompanhamento à distância pelo soldador, isto pode ser realizado até 180 metros da fonte de soldagem (Miller Electric Mfg Co., 2010b).

Dispositivos de uso geral, programáveis sem fio também estão surgindo no mercado. Sendo um grande fabricante representante deste grupo instrumentos para medição e controle de processos, a *National Instruments*, começou em 2008 a desenvolver produtos sem fio. Atualmente disponibiliza duas tecnologias de instrumentação sem fio, cada uma com um foco de trabalho. A se saber são tecnologias de comunicação por Wi-Fi e WSN (*Wireless Sensor Network*), a Tabela 2.4 lista algumas de suas principais características (National Instruments, 2009).

Tabela 2.4 – Comparação entre as tecnologias de comunicação sem fio disponíveis pela National Instruments (2009).

Tecnologia	Alcance	Taxa de Amostragem	Vida da Bateria
Wi-Fi	30 – 100 m	250 kS/s	1 – 2 dias
WSN	300 m	1 S/s	3 anos

2.3. Sistemas Embarcados

O nome e o conceito de sistemas embarcados não são comumente citados, entretanto, a existência de tais sistemas é a base para o que se chama de vida moderna. Sendo assim, exemplos de alguns dos sistemas embarcados usuais são: Videogames; Micro-ondas; Decodificadores de TV; Aparelhos de TV; Aparelhos de DVD; Celulares; *MP3*

Players: Aparelhos de GPS; sistema de controle de automóveis, aviões, satélites; entre outros.

Mas o que são tais sistemas, e o porquê eles são assim designados? Segundo (CUNHA, 2007), um sistema embarcado é: “Colocar capacidade computacional dentro de um circuito integrado, equipamento ou sistema”. Sendo assim, 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 (1)** 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”.

Devido à infinidade de equipamentos que podem ser citados e criados a partir da ideia de um sistema embarcado, existem algumas subdivisões a fim de classificá-los e auxiliar o desenvolvedor a escolher o melhor conjunto de componentes e equipamentos indicados para cada tipo de sistema.

Inicialmente, pela aplicação do sistema embarcado, eles se classificam em:

- **Sistemas de propósitos gerais:** São as aplicações mais parecidas com os computadores de mesa, como se tem os videogames, os conversores de TV a cabo, caixas de bancos, etc.
- **Sistemas de controle:** Controles em malha fechada com realimentação em tempo real. Geralmente são as aplicações mais robustas, com placas dedicadas e múltiplos sensores de entrada e saída.
- **Sistemas de processamento de sinais:** onde há grande volume de informação a ser processado em curto espaço de tempo. Casos de tratamento de áudio, filtros, modems, compressão de vídeo, radares e sonares, etc.
- **Sistemas de comunicações e redes:** chaveamento e distribuição de informações. Sistemas de telefonia e telecomunicações e internet.

Pela classificação do modo de funcionamento dos sistemas embarcados, é possível determinar, de forma geral, como programar e como será seu funcionamento e comportamento na aplicação para o qual foi projetado.

- **Reativo:** resposta a eventos externos, que podem ser periódicos (caso de sistemas rotacionais ou de controles de loop) ou assíncronos (pressionamento de um botão por parte do usuário).

- **Controle em tempo real:** limites de tempo para executar cada tarefa (leitura de sensor, emissão de sinais para um atuador, etc.)
 - *Soft Real Time:* sem consequências graves se o limite de tempo não for cumprido. Sistema bancário, onde apenas uma mensagem de erro aparecerá.
 - *Hard Real Time:* com consequências graves se qualquer tarefa falhar. Controle de um avião, onde uma falha pode resultar em queda e perdas de vidas. A maior preocupação durante a programação dos dispositivos é relativa a ter sempre sistemas redundantes.

Por fim, tem-se a classificação pelo modo de interação do sistema com o usuário, sendo esta uma parte de extrema importância, pois de nada adianta um sistema ser bem projetado, trabalhar corretamente se o usuário não souber, ou tiver dificuldade de utilização. Assim, diversas formas de interfaces do utilizador são existentes, cada uma com sua aplicabilidade e vantagens. Podem-se citar algumas, como:

- Nenhuma interface do utilizador (dedicados somente a uma tarefa) até uma interface de utilizador completa, similar à dos sistemas operacionais desktop (em sistemas como caixas eletrônicos de banco);
- Sistemas mais simples utilizam botões, LEDs ou telas bastante limitadas;
- Sistemas mais complexos utilizam uma tela gráfica completa. Computadores de mão também oferecem joysticks para apontar;
- A *World Wide Web* forneceu aos desenvolvedores de sistemas embarcados a possibilidade de fornecer uma interface Web através de uma conexão por rede, evitando o custo de uma tela sofisticada dedicada no equipamento.

Com tantas classificações e definições, é de se imaginar que seja uma tarefa complicada e trabalhosa se desenvolver um sistema embarcado, mas quais são suas vantagens, porque utiliza-lo e o que é desejável em um sistema embarcado, são considerações que devem ser feitas pelo desenvolvedor para avaliar a aplicabilidade, e a eficiência de um Sistema Embarcado.

Além disto, das características principais deste tipo de sistema podem-se citar as que se sobressaem como:

- **Tamanho e peso:** Sempre os menores possíveis.
- **Consumo de energia:** quanto menor o consumo de energia, preferencialmente por fontes de energia móveis (baterias), maior for a autonomia do sistema (independência de intervenção pelo utilizador) e

menor for sua necessidade de recarga ou troca de sistema de alimentação, mais competitivo será o produto.

- **Robustez do equipamento:** uma das características determinantes, pois o usuário pode utilizar da forma menos agressiva possível, porém em certas aplicações o *hardware* pode ser levado ao máximo de exigência, devendo então ser projetados para trabalhar em ambientes com condições adversas (vibrações, calor, poeira, variações na tensão de alimentação, interferências eletromagnéticas, raios, umidade, corrosão, etc.).

O projeto de sistemas embarcados segue, normalmente, uma sequência definida de passos. Como metodologia de desenvolvimento, têm-se a chamada visão de projeto *top-down*, Figura 2-2, onde o projeto inicial é uma versão abstrata do sistema a ser desenvolvido, sendo detalhada e desenvolvida em cada fase do projeto.

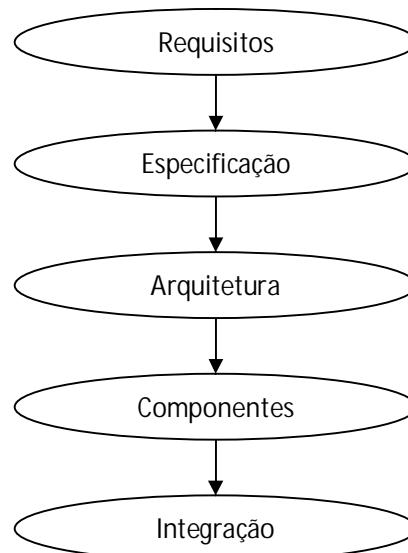


Figura 2-2 – Sequência de passos da técnica *top-down* (WOLF, 2001).

Em uma sequência lógica e direta de desenvolvimento do projeto, inicialmente determinam-se quais são os requisitos do sistema, na especificação descreve-se como o sistema se comporta (não como é construído), desenvolve-se a arquitetura do sistema, relacionando sua estrutura em termos de grande 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).

Em adição à hierarquia do CPU (Unidade Controladora Programável) e memória, existe uma variedade de interfaces que possibilitam o sistema a medir, manipular e, de qualquer outra forma, interagir com o ambiente externo a ele. A interface humana pode ser tão simples como uma luz que pisca ou tão complicada quanto uma visão robótica em tempo real; a porta de diagnóstico pode diagnosticar o sistema sendo controlado (além do próprio funcionamento do sistema embarcado); um FPGA (*Field Programmable Gate Array*) ou mesmo um *hardware* não digital pode ser utilizado para aumentar o desempenho ou segurança. 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 para todos eles. A Figura 2-3 ilustra uma possível organização de um sistema embarcado.

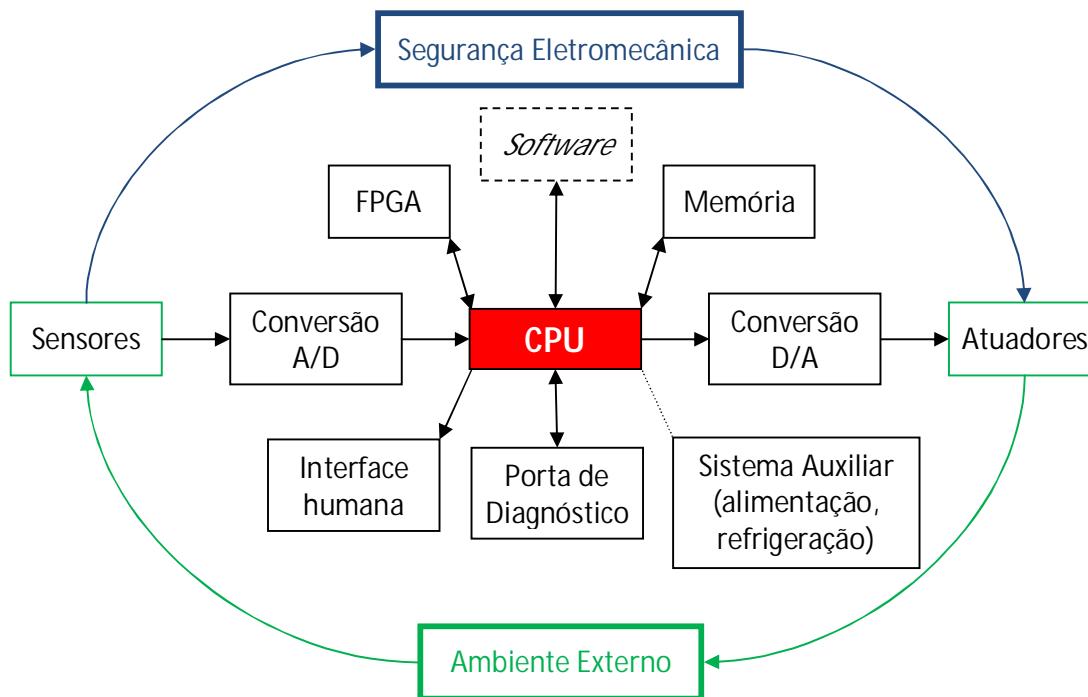


Figura 2-3 – Possível organização para um sistema embarcado (KOOPMAN JR., 1996).

2.4. Comunicação de Dados Sem Fio em Ambiente Industrial

Cada vez mais a comunicação sem fio torna-se popular devido à conveniência e mobilidade (facilidade de deslocamento de um lugar para outro) que proporciona. A disponibilidade ampliada de frequências de rádio para transmissão e às melhorias na tecnologia são fatores importantes na sua evolução. “Fibra ótica e comunicação sem fio são as tecnologias do futuro” (TENENBAUM, 1996).

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 2-4.

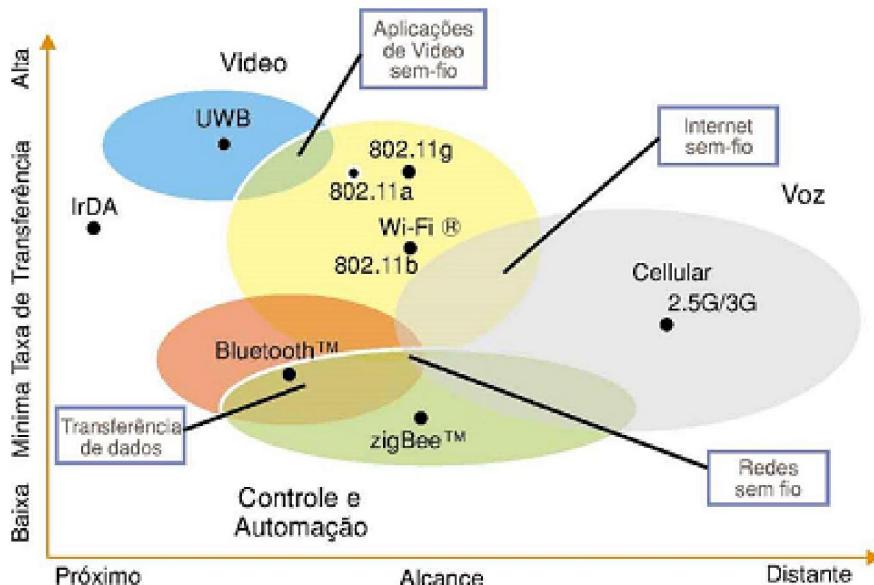


Figura 2-4 – Comparativo entre formas de comunicação de dados sem fio (OLIVEIRA FILHO, 2010).

O uso de infravermelho, em uma breve avaliação, não se adéqua aos requerimentos de um sistema sem fio complexo em um ambiente chão de fábrica, já que é necessário o alinhamento entre o receptor e o transmissor para a transmissão de dados, ou seja, em um ambiente industrial, obstáculos e o constante movimento de pessoas e máquinas o inviabilizam (IrDA, 2011). Esta é a principal, porém, não única, limitação deste método de comunicação sem fio.

Há uma tendência moderna de se implantar cada vez mais as redes sem fio ao invés de redes com fio. Esta propensão é motivada tanto 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*.

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. Outros fatores favoráveis são: flexibilidade na montagem, modificação da estrutura, e mobilidade dos equipamentos e instrumentos (NASCIMENTO, 2008). O emprego de redes de sensores e equipamentos monitorados e controlados sem fio em plantas industriais, especialmente na indústria de processos tem se apresentado 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 layout da planta industrial, já que poucos cabos precisam ser remontados;
- Sistemas móveis de diagnósticos da planta e estações sem fio para programação e configuração.

A adoção de tecnologia sem fio, contudo, acarreta alguns problemas. O primeiro é a disputa entre a alta confiabilidade e requisitos de tempo exigidos pelas aplicações industriais, e os problemas inerentes aos canais sem fio. Problemas não vislumbrados no desenvolvimento dos sistemas cabeados: segurança e interferência (WILLIG, 2005). A frequência elevada de transmissão torna o dispositivo pouco sensível aos ruídos gerados pelos equipamentos utilizados em soldagem, entretanto a transmissão de formas de onda está sujeita a fenômenos como atenuação, reflexão, difração, dispersão, interferência de canal adjacente e de co-canal, ruído térmico ou produzido por outras fontes, e imperfeições nos circuitos de transmissão e recepção.

Fora das redes de computadores, muitas tecnologias proprietárias têm sido usadas para possibilitar a comunicação digital entre dispositivos de forma sem fio. Estas tecnologias têm o propósito de permitir o controle remoto de equipamentos domésticos e interligar os periféricos (teclado, mouse, impressoras, etc) aos computadores, eliminando os fios e tornando mais flexível e prático o uso destes equipamentos. O *Bluetooth* e *ZigBee* são exemplos destas tecnologias.

Nas comunicações por radiofrequência, existem regulamentação e definição das bandas internacionalmente disponíveis para utilização nas áreas industriais, científicas e médicas, sem a necessidade de licenciamento, as bandas ISM – *Industrial, Scientific and Medical* – (ITU - International Telecommunication Union, 2008). Dentre elas, a faixa de

2400-2500 MHz (2.4 GHz), se popularizou na aplicação de redes sem fio, tais como Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15.1) e ZigBee (IEEE 802.15.4). Seus módulos de comunicação são comercialmente disponíveis por diversos fabricantes para sua integração com sistemas microcontrolados, como acontece com celulares, notebooks, etc.

A Tabela 2.5 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).

No tocante ao consumo de energia é de se observar que este não está relacionado apenas ao tempo ativo da comunicação, mas também pela capacidade de economia de energia, passando para o estado de *standby* e ativo de acordo com o uso, onde o equipamento diminui consideravelmente o consumo. Sendo que neste quesito o *ZigBee* é o que apresenta um desempenho melhor quanto a economia de energia.

Tabela 2.5 – Características dos principais padrões de rede sem fio (GALEV, 2004; NASCIMENTO, 2008; OLIVEIRA FILHO, 2010; Wi-Fi Alliance, 2011).

	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 (típica)	400 mA TX <i>standby</i> 20 mA	40 mA TX <i>standby</i> 0,2 mA	30 mA TX <i>standby</i> 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).

O Zigbee permite, de forma simples (código aberto) e com baixo custo, que um desenvolvedor adicione novos dispositivos inteligentes que aumentam a eficiência, segurança, rentabilidade e conveniência de seus produtos (ZigBee, 2011). Por outro lado, este sistema possui baixa taxa de transmissão de dados (250 kbps) quando comparada aos outros e, para a recepção dos dados pelo usuário, é necessária a existência de um módulo também *ZigBee* conectado ao sistema de interface do usuário.

Em equipamentos de processamento de dados portáteis (*notebooks*, *smartphones* e computadores de mão) este tipo de comunicação não é comercialmente embarcado e necessitaria do projeto de um módulo receptor compatível com tais equipamentos (Figura 2-5).

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 comunicação é feita quando os dispositivos comunicam-se e formam uma rede denominada "piconet", na qual podem existir até oito dispositivos interligados, sendo um deles o mestre (*master*) e os outros dispositivos escravos (*slave*). De uma forma geral, uma rede Bluetooth é composta apenas por dois nós (um mestre e um escravo), sendo necessário o "pareamento", ou seja, uma identificação e autorização dos dispositivos anterior ao uso da comunicação de dados em si, Figura 2-6.

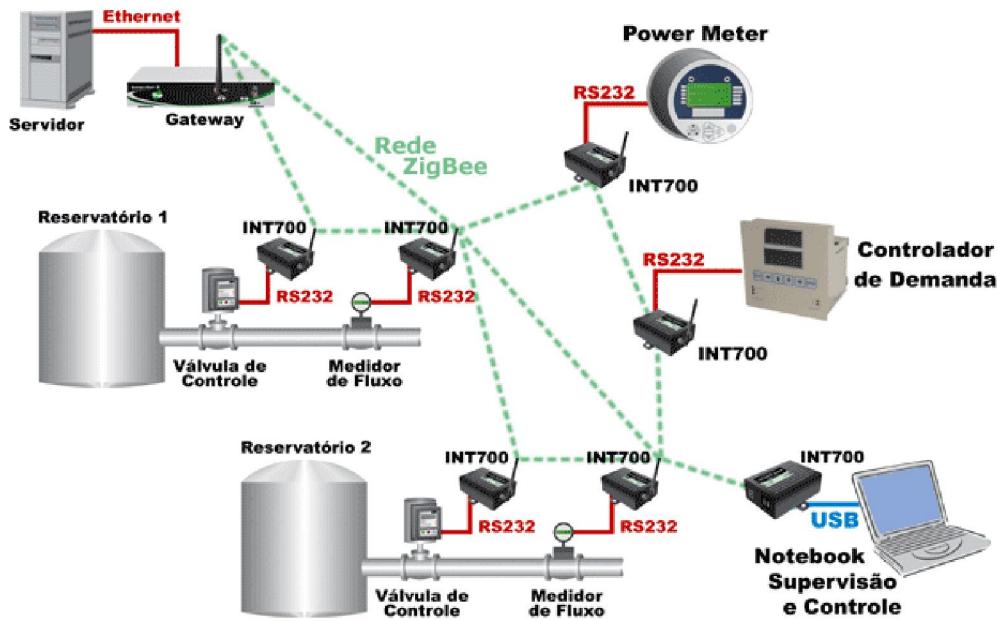


Figura 2-5 – Exemplos de comunicação por Zigbee (Albacore, 2010).



Figura 2-6 – Exemplos de comunicação por Bluetooth (Help Desk de Informática, 2011).

As desvantagens técnicas desta tecnologia são o seu raio de alcance, 10 metros (para a especificação 1.1) e de 100 metros (na versão 1.2, 2.0 e 2.1), o número máximo de dispositivos que podem se conectar ao mesmo tempo, bem como a velocidade de transferência de dados relativamente baixa (FURTADO, 2008).

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.

Atualmente, praticamente todos os computadores portáteis, e boa parte dos celulares de alta tecnologia, vêm de fábrica com dispositivos para rede sem fio no padrão Wi-Fi (802.11 a/b/g/n). O que antes era acessório está se tornando item obrigatório, principalmente devido ao fato da redução do custo de fabricação (Figura 2-7). Existem diversos padrões IEEE 802.11, tais como (Wi-Fi Alliance, 2011):

- IEEE 802.11a: 5 GHz, até 54 Mbps.
- IEEE 802.11b: 2,4 GHz com capacidade teórica de 11 Mbps.
- IEEE 802.11g: 2,4 GHz, teóricos de 54 Mbps.
- IEEE 802.11n: 2,4 GHz e/ou 5 GHz, até 450 Mbps.

Produtos Wi-Fi são facilmente conectados em uma rede, tendo mais de 9 mil certificações de dispositivos que foram testados para interoperabilidade e para garantia de boa convivência com outros equipamentos Wi-Fi. Isto quer dizer que produtos certificados não interferem na operação de outros produtos.

Sendo assim, o padrão Wi-Fi vem ganhando popularidade nas conexões em equipamentos industriais, principalmente devido às suas vantagens. Seja pela ausência da necessidade de obras de infraestrutura, facilidade de alteração de layout sem a preocupação com cabeamento ou pelas altas taxas de transferência de dados (CUNHA, 2008).

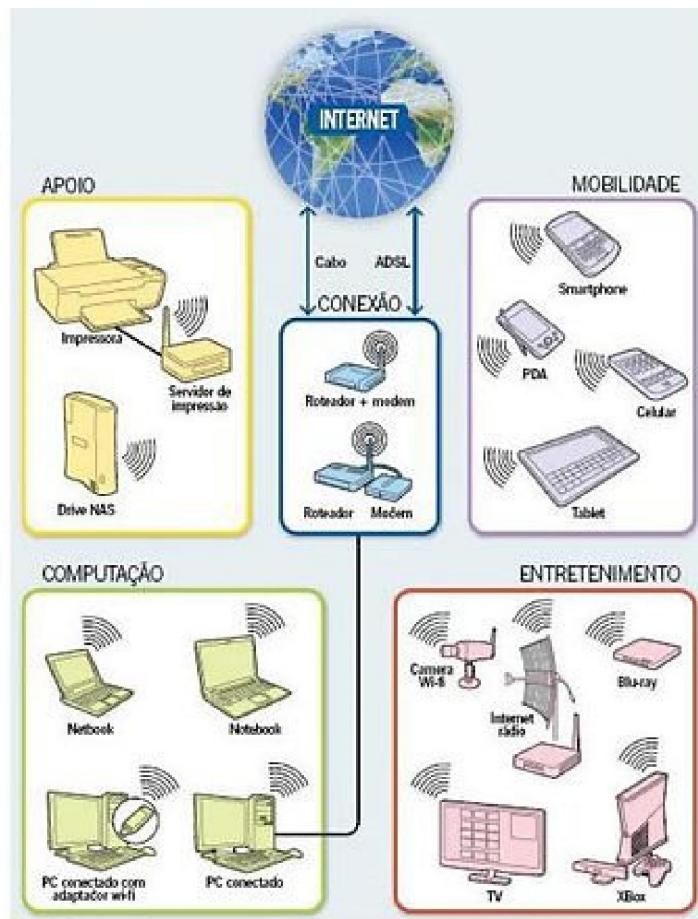


Figura 2-7 – Exemplos de comunicação por Wi-Fi. Adaptada de (Portal Hands: awesome mobile, MACHADO *et al.*, 2010).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

O objetivo principal deste trabalho é o projeto, construção, e avaliação de um sistema de monitoramento sem fio de variáveis dos processos de soldagem a arco, de tecnologia própria, que apresente escalabilidade, portabilidade, autonomia, baixo custo e flexibilidade/simplicidade de operação.

Tendo em vista a utilização deste tipo de tecnologia para o uso em monitoramento de sinais em chão de fábrica, pode-se entender a importância do uso de transmissão sem fio dos dados. Neste caso, para um monitoramento visando qualidade da soldagem, a conformidade com a Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) e obediência às normas existentes, considera-se que a abordagem tecnológica seja a escolha apropriada.

Das variáveis definidas no Item 2.2 como de interesse para processos de soldagem a arco elétrico, inicialmente não se engloba o monitoramento do tecimento (oscilação transversal da tocha em relação à direção da junta) e da velocidade de soldagem, visto que são parâmetros que estão diretamente envolvidos com a habilidade do soldador (em soldagens manuais), e/ou com as características dos sistemas de movimentação da tocha de soldagem (soldagem com a peça fixa) ou da peça (soldagem com movimentação da peça). Sendo assim, apenas as variáveis de tensão, corrente e velocidade de alimentação são de interesse no desenvolvimento deste trabalho.

Para se realizar o monitoramento de qualquer processo, deve-se, primeiramente, conhecer as características principais dos parâmetros que se deseja monitorar e qual o propósito deste monitoramento, ou seja, se a abordagem desejada é tecnológica ou de pesquisa. Afinal, através do conhecimento de suas características, de acordo com o seu interesse, pode-se realizar a aquisição destes sinais para a posterior análise e documentação.

A metodologia de desenvolvimento do trabalho é resumida na Figura 3-1.

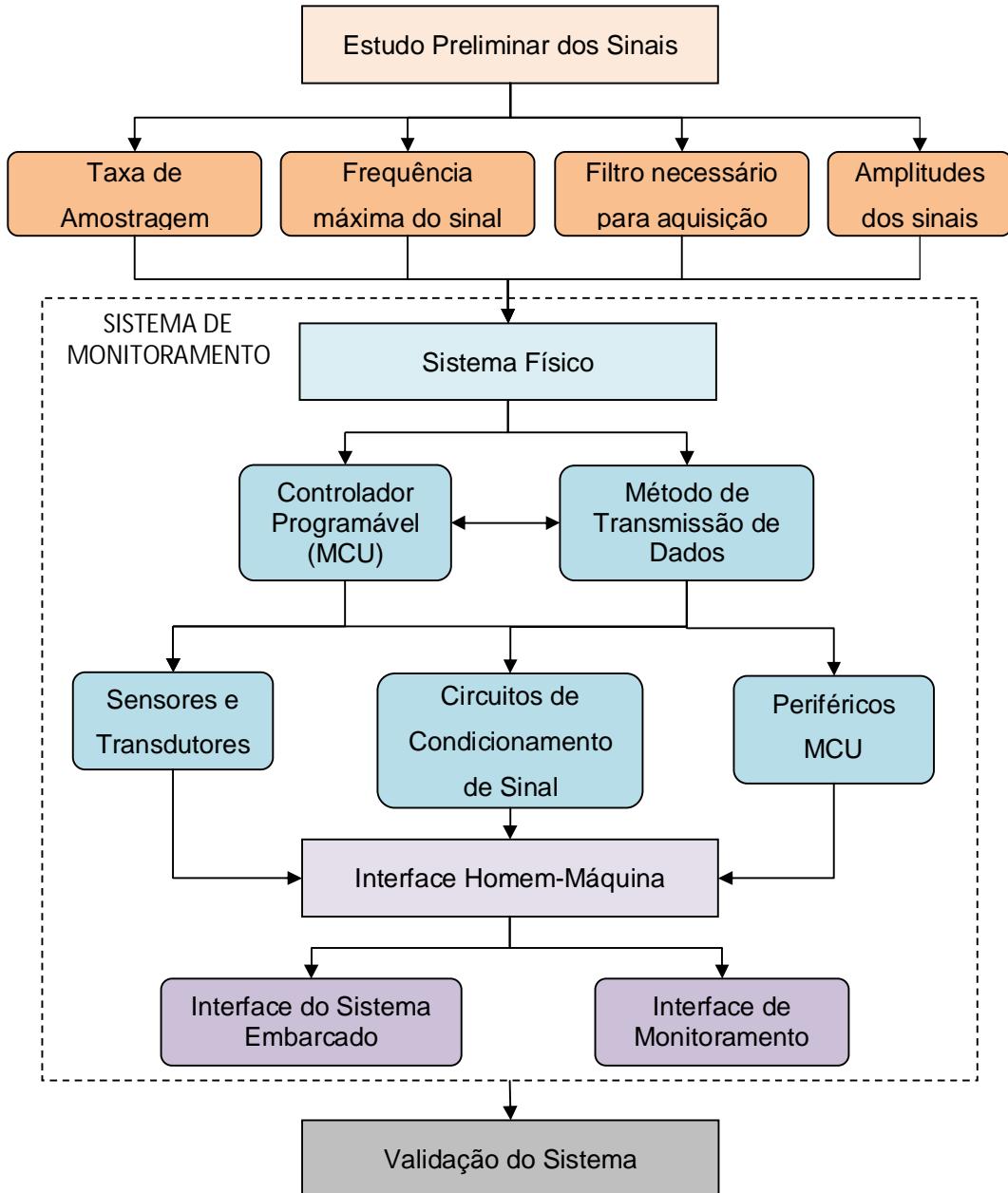


Figura 3-1 – Fluxograma da metodologia aplicada para execução do projeto de dissertação.

Portanto, inicialmente deve-se realizar um estudo dos sinais de interesse da soldagem a arco elétrico (tensão e corrente) e, então, com suas características principais conhecidas, como sua amplitude e frequência máxima de acordo com a abordagem tecnológica, pode-se determinar a taxa de amostragem adequada para uma boa reprodução das características dos sinais de interesse e como estes sinais devem ser filtrados para a eliminação das informações não pertinentes a abordagem escolhida.

Após o estudo preliminar dos sinais de soldagem a arco, e seus resultados obtidos, pode-se realizar a definição da arquitetura física do sistema de monitoramento – escolha de sensores e/ou transdutores, escolha de dispositivos de comunicação de dados sem fio, do dispositivo microcontrolador (MCU) e de seus periféricos e projeto do condicionamento elétrico dos sinais de interesse. Neste ponto, a interdependência entre certas etapas do projeto, como a compatibilidade do dispositivo de comunicação e do controlador, deve ser levada em consideração.

Com todo o sistema físico devidamente determinado, deve-se desenvolver, por fim, a IHM (Interface Homem Máquina), ou seja, a forma de interação do próprio sistema embarcado e de monitoramento e visualização dos dados pelo usuário, realizando a análise e documentação dos dados obtidos.

Ao término do projeto e construção do sistema de monitoramento sem fio (aqui batizado de MoSo Wi-Fi - Monitor de Soldagem), deve-se validar a funcionalidade e aplicabilidade do sistema como um todo através de sua aplicação em meio operacional – monitoramento de processos de soldagem *in loco*, finalizando, assim, as etapas propostas para o desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO IV

ESTUDOS PRELIMINARES DOS SINAIS

Antes de se iniciar os estudos de definição, projeto e desenvolvimento do sistema de monitoramento dos sinais envolvidos em processos de soldagem a arco (definidos no Capítulo III), primeiramente, realizou-se testes preliminares, com estes mesmos processos, para o estudo dos sinais, buscando suas características e determinando, assim, os requisitos e necessidades do sistema de monitoramento.

Para a avaliação das variáveis elétricas das soldagens a arco elétrico, em um primeiro momento, os sinais provenientes da fonte de soldagem foram observados com o auxílio de um osciloscópio. Sendo assim, foi possível se observar todo o sinal proveniente da fonte de soldagem, incluindo o chaveamento desta, em alta frequência, entre 5 e 200 kHz (MODENESI, 2009). Pelos sinais observados no osciloscópio confirmou-se que a frequência de chaveamento da fonte de soldagem utilizada para os testes preliminares está em torno de 25 kHz. Os níveis de tensão DC máximos observados foram da ordem de até 70 V (tensão em vazio da fonte), e o nível de corrente DC definido como objeto de estudo seria de até 500 A.

Sendo assim, para seguir o estudo, foi construído um circuito para condicionar os sinais com as características acima descritas. Um circuito divisor de tensão acoplado a um isolador galvânico foi utilizado para a instrumentação do sinal de tensão e um transdutor por efeito Hall com um circuito divisor de tensão para o sinal de corrente, Figura 4-1. Os sinais foram amostrados e adquiridos por uma placa de aquisição da *National Instruments* a uma taxa de amostragem de 125 kS/s, por canal. Pelo o Teorema da Amostragem (BENDAT e PIERSOL, 1986), podem-se observar componentes de frequência em até 62,5 kHz (metade da aquisição realizada em 125 kS/s). Esta frequência máxima observável é suficiente a este estudo, já que os sinais provenientes das fontes de soldagem possuem sua componente de maior frequência no chaveamento da própria fonte.

Ressalta-se que, embora três canais estejam disponíveis, o foco do trabalho refere-se aos sinais de Tensão e Corrente. O sinal de Velocidade de Alimentação do arame (via *encoder* rotativo) não foi adquirido, pois não houve tempo hábil para finalizar a construção do mecanismo de adaptação do *encoder* arame.

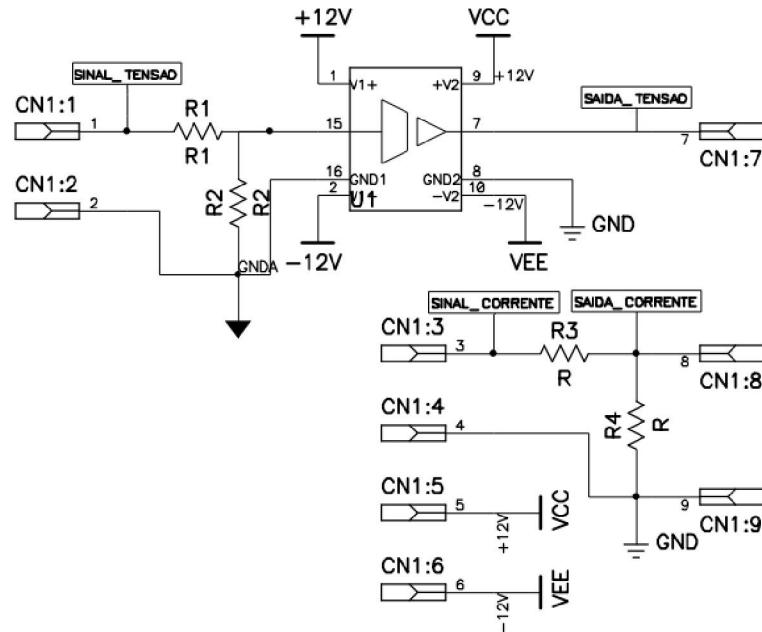


Figura 4-1 – Esquema elétrico do circuito utilizado para aquisição dos sinais para os testes preliminares.

Com base nos resultados observados no osciloscópio, e com a utilização do circuito ilustrado, podem-se realizar os testes preliminares. Soldagens em diferentes condições foram realizadas, com parâmetros regulados para deposição de cordão sobre chapa e os seus sinais elétricos foram adquiridos sobre os bornes da fonte de soldagem. A Tabela 4.1 detalha os parâmetros para cada teste realizado e os equipamentos e insumos em comum a todos são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados na realização das soldagens.

Teste	Tensão [V]	Valim [m/min]	Transferência Metálica
1	32,0	7,0	Goticular (spray)
2	32,0	8,0	Goticular (spray)
3	19,0	6,0	Curto-Circuito
4	22,0	5,3	Curto-Circuito

Obs: Valim = Velocidade de Alimentação do Arame.

A partir dos dados adquiridos com estes experimentos, é possível determinar, para sua futura utilização do desenvolvimento do sistema de monitoramento sem fio, um filtro analógico que seja capaz de retirar as frequências que não são de interesse para o monitoramento do processo de soldagem, e a taxa mínima de amostragem para a observação dos sinais, mantendo as informações dos mesmos.

Tabela 4.2 - Parâmetros de soldagem comuns a todos os testes.

Gás de Proteção	Ar+8%CO ₂ (13 l/min)
Tipo de Soldagem	automática
Processo	MAG
Metal de Adição	ER70S-6 com diâmetro 1,0 mm
Metal Base	Aço Carbono
Fonte de Soldagem	<i>IMC digitec600</i>

Para a determinação da taxa de amostragem dos sinais de soldagem, foram realizadas aquisições com duração de 2 segundos, dos sinais de corrente e tensão, para os testes descritos nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, e realizadas análises matemáticas sobre os mesmos. Para a apresentação e discussão dos resultados iniciais, serão ilustradas as formas de onda apenas para a soldagem em curto-círcuito (Teste 3), e a seguir serão apresentados os resultados finais para todos os testes realizados em forma de tabelas.

A avaliação das componentes em frequência dos sinais de tensão e corrente foi realizada pela aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*, cujo programa em Matlab® se encontra nos anexos). A Figura 4-2 ilustra os sinais adquiridos para o Teste 3 e suas correspondentes FFT, onde se podem observar as frequências dominantes em cada caso.

Pelo espectro de ambos os sinais, observa-se concentrações de intensidade significativas em baixas frequências (próximo do nível DC, ou seja, 0 Hz), em torno de 25 kHz (em outros estudos observa-se até 35 kHz) e, em menor intensidade, em 50 kHz. Como citado anteriormente, a frequência em torno de 25 kHz é proveniente do chaveamento da fonte de soldagem e a componente em 50 kHz, sua primeira harmônica. As componentes em baixa frequência são, pelo conhecimento prévio da física e do comportamento dos diferentes processos de soldagem, provenientes de características relacionadas ao processo em si, como, por exemplo, destacamento de gotas ou curtos-circuitos. O nível DC é o valor médio do sinal.

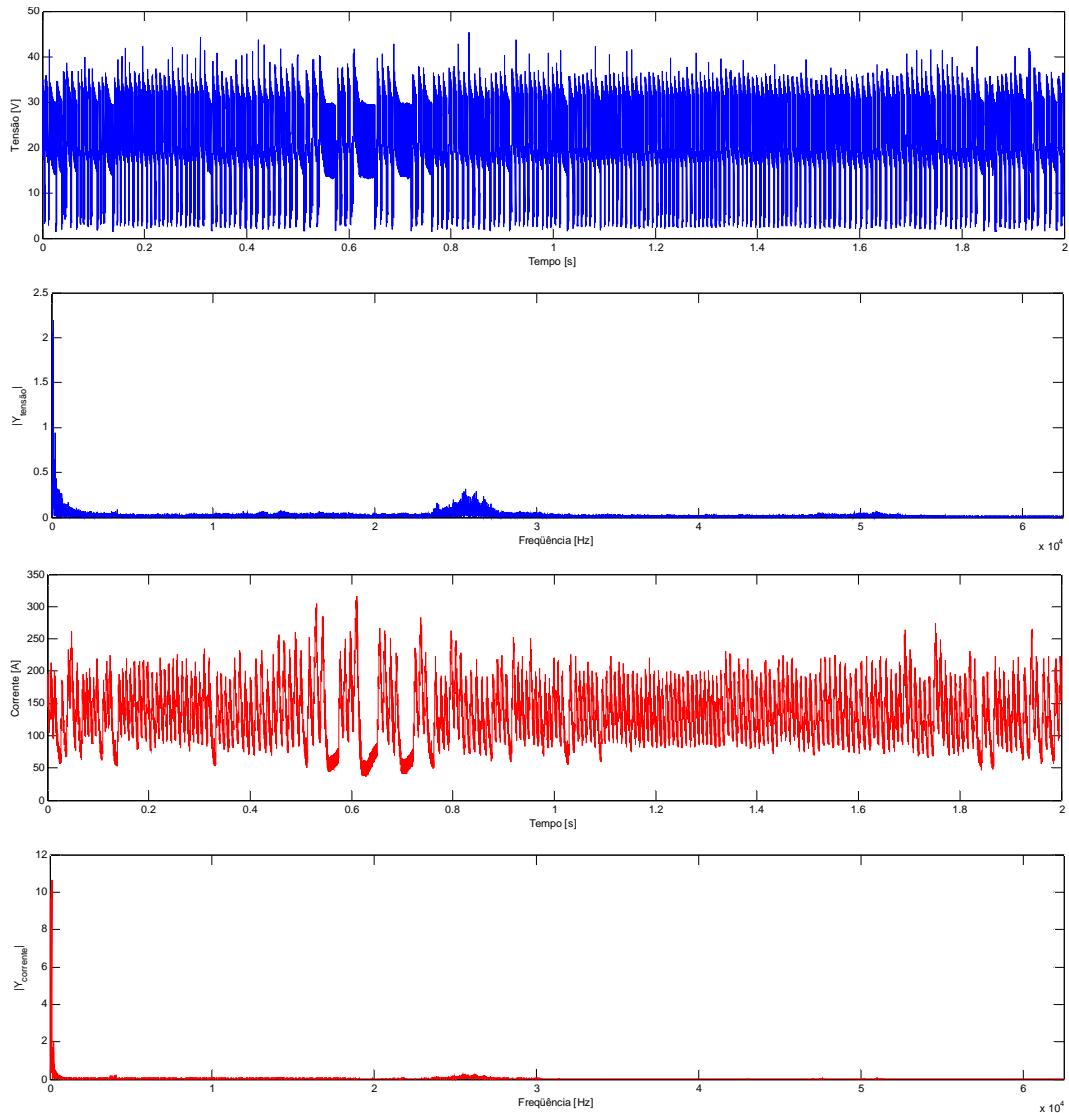


Figura 4-2 – Sinais elétricos para o Teste 3, e suas respectivas FFT s: tensão (dois gráficos superiores) e corrente (dois gráficos inferiores).

Na Figura 4-3 e Figura 4-4 pode-se observar detalhes dos sinais do Teste 3 e de suas FFT. Em cada figura, no canto esquerdo superior, observa-se o oscilograma da forma de onda para o curto-circuito, no canto esquerdo inferior, uma aproximação para a observação do chaveamento da fonte e, por fim, à direita, a FFT do sinal destacando suas componentes de baixa frequência. Pelas características da fonte de soldagem utilizada sabe-se que, para controlar o valor médio de tensão (soldagem em fonte tipo tensão constante), a fonte chaveia a corrente, e, quando isto ocorre (~ 25 kHz), há uma variação dos valores, tanto de corrente quanto de tensão, não caracterizando, então, ruído de aquisição.

Dos espectros em frequência da FFT, em específico para este teste, percebe-se que as informações significativas relativas ao processo de soldagem, tanto em tensão quanto em corrente, estão até cerca de 300 Hz, sendo confirmado por (PONOMAROV e ALERHAYEM, 1997). Esta frequência, portanto, para uma abordagem tecnológica, é a frequência máxima para a observação da informação desejada contida nestes sinais. A

Tabela 4.3 lista as frequências máximas de interesse, para a abordagem tecnológica, de todos os testes realizados. Conforme pode ser observado no detalhe do oscilograma de tensão da Figura 4.3, o tempo de transição de curto-círcuito é << 0.1ms.

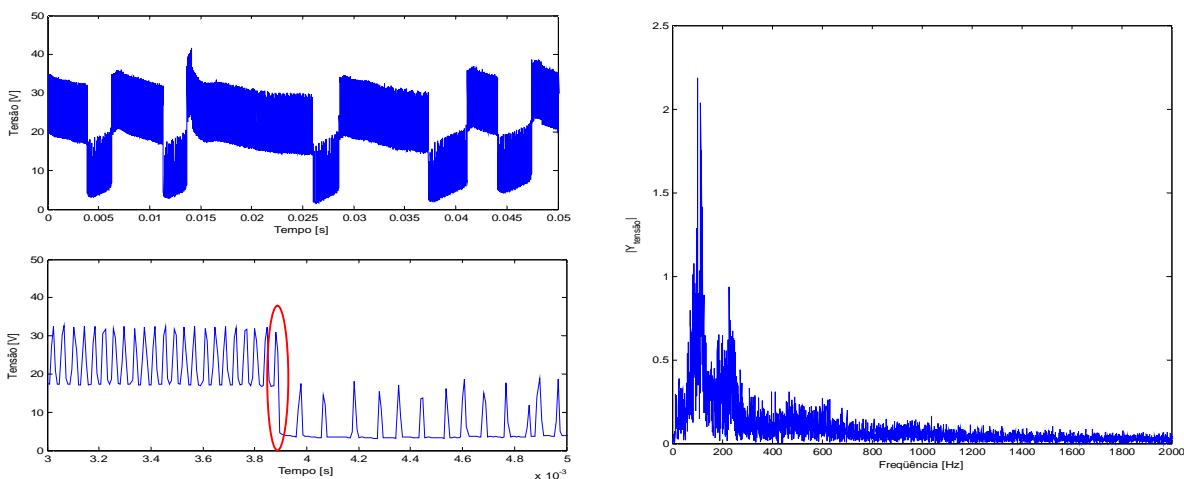


Figura 4-3–Detalhes do sinal de tensão e de sua FFT para o Teste 3.

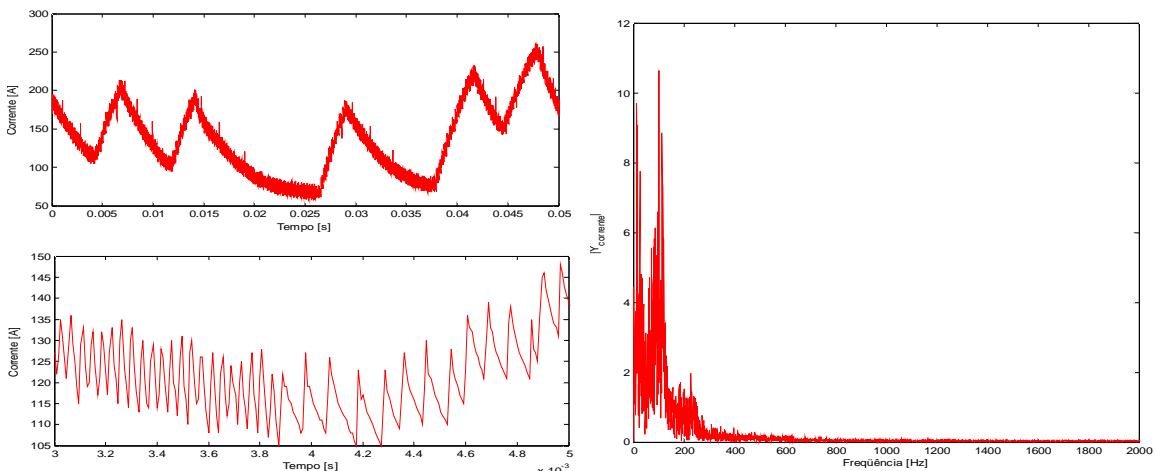


Figura 4-4- Detalhes do sinal de corrente e de sua FFT para o Teste 3.

No sinal de tensão, a variação é maior devido ao ponto de medida utilizado (bornes da fonte), o que não deve ser empregado, ou seja, as medidas devem ser realizadas o mais próximo possível do arco, ou seja, no bico de contato (OSTER, 1998). Assim, as medições

apresentam uma variação em torno de 10 V no valor da tensão durante o chaveamento. Entretanto, se medido entre a peça e o bico de contato a oscilação diminui de forma considerável, o sinal de corrente não apresenta diferença, pois é a mesma em qualquer ponto do circuito, conforme será mostrado no item 6.3.2.

Tabela 4.3 - Frequência máxima de interesse observada nos sinais.

Teste	Frequência [Hz]
1	250
2	300
3	300
4	200

A título de comparação, para uma abordagem científica, a caracterização do chaveamento de forma precisa (onda quadrada) pede taxas de amostragem de pelo menos 125 kHz e, pela abordagem tecnológica, a caracterização dos sinais provenientes do processo de soldagem a arco em si pode ser realizado com uma taxa de amostragem de 1250 Hz, após passarem por um filtro passa-baixa para a retirada das frequências altas fora do escopo de interesse desta abordagem.

A Figura 4-5 compara os sinais adquiridos pelas duas abordagens para o Teste 3. O sinal adquirido foi atenuado com um filtro passa-baixa de *Butterworth* de segunda ordem digital, com frequência de corte em 625 Hz, para simulação do sinal de interesse na abordagem tecnológica. Deve-se ressaltar que, embora sejam apresentados e discutidos os resultados para o Teste 3, um comportamento similar foi observado para os outros ensaios.

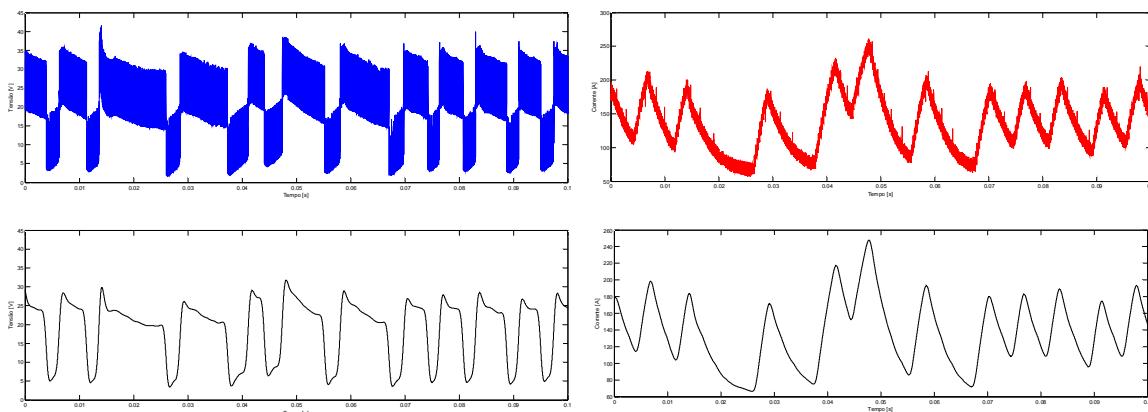


Figura 4-5- Comparativo entre oscilogramas dos sinais com abordagens científica (superiores) e tecnológica (inferiores). Esquerda: Tensão, Direita: Corrente.

Pelas teorias em Estatística, o coeficiente de correlação de Pearson (λ) mede a intensidade de correlação entre dois vetores, sendo eles aleatórios ou determinísticos. Valores de correlação normalizados entre 0,5 e 0,8 têm correlação moderada e valores acima de 0,8 e abaixo de 1 são considerados fortemente correlacionados (SANTOS, 2007).

Assim, através deste coeficiente é possível discernir a confiabilidade dos sinais amostrados com a taxa de aquisição selecionada para a abordagem tecnológica, ou seja, pode-se provar que adquirir os sinais de tensão e corrente em 1250 Hz após atenuá-los com um filtro *Butterworth* passa-baixa de segunda ordem em 625 Hz é suficientemente similar, ou não, a adquirir estes mesmos sinais a 125 kHz, e somente após a aquisição passá-los pelo mesmo filtro, quando se compara as características dos sinais que se deseja observar na abordagem tecnológica.

A Figura 4-6 ilustra as formas de onda amostradas em 125 kHz e 1250 Hz, ambas atenuadas para o Teste 3. Deve-se ressaltar que a menor taxa de amostragem foi simulada através da maior taxa de aquisição, após a atenuação, buscando-se pontos nos intervalos específicos de tempo (período de 800 μ s) e ignorando os pontos intermediários a eles.

Observa-se que o tempo de transição do curto-círcuito foi perdido, sendo aparente de aproximadamente 2 ms, maior que o observado sem os filtros, que foram menores que 0.1 ms. Mostrando que o filtro de 625 Hz não é recomendado para uma abordagem científica.

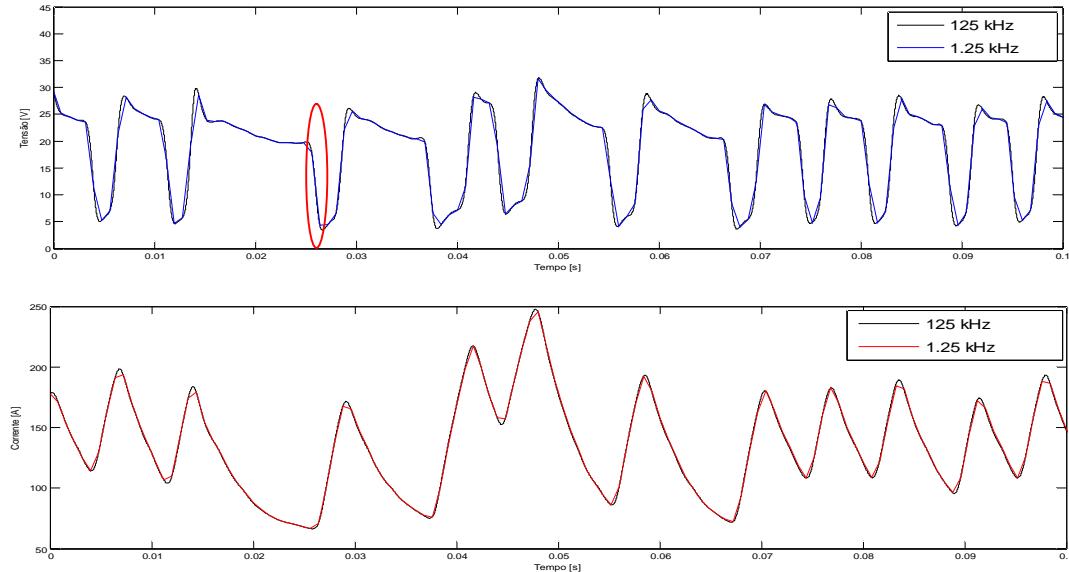


Figura 4-6- Comparativo entre oscilogramas de tensão (superior) e corrente (inferior) com taxas de aquisição de 125 kHz e 1250 Hz.

Observa-se a similaridade das formas de onda das duas taxas de amostragem e, pelos valores do coeficiente de correlação, valores médios e RMS dos sinais (listados na Tabela 4.4), podem-se comparar, matematicamente, as duas taxas de aquisição. Como citado no item 2.2, a resolução de valores medidos desejada para a corrente é de 1 A e para a tensão de 0,1 V.

Tabela 4.4 – Comparaçao matemática dos sinais de soldagem com duas taxas de amostragem.

Teste	Tensão [V]				r	Corrente [A]				r		
	Média		RMS			Média		RMS				
	125 kHz	1250 Hz	125 kHz	1250 Hz		125 kHz	1250 Hz	125 kHz	1250 Hz			
1	32,1	32,1	32,1	32,1	0,83	221	221	221	221	0,99		
2	32,1	32,1	32,1	32,1	0,80	238	238	238	238	0,99		
3	18,8	18,8	20,4	20,4	0,90	134	134	141	141	0,96		
4	21,9	21,9	23,1	23,1	0,91	150	150	157	157	0,98		

Desta forma, a taxa de amostragem em 1250 Hz mostrou-se fortemente correlacionada à taxa de amostragem superior em todos os testes realizados, ou seja, esta taxa menor, com um filtro de 625 Hz é suficiente para a caracterização dos sinais elétricos na soldagem para uma abordagem tecnológica. É importante ressaltar, também, que não houve qualquer alteração nos valores médios e RMS para ambos os sinais em todos os testes, considerando-se a resolução desejada para cada parâmetro.

Por fim, para adequar esta taxa de amostragem ao processo MAG Pulsado (MAG-P), simulou-se uma onda quadrada de frequência variável e realizaram-se todos os cálculos em relação a ela. Para frequências até 300 Hz, uma taxa de aquisição de 1250 Hz provou-se satisfatória, não apresentando distorções nos valores médios e RMS e um coeficiente de correlação de 0,82 para a frequência limite. Acima deste valor como, por exemplo, 350 Hz, houve perda de exatidão (15% de erro relativo) nas medidas elétricas e um coeficiente de correlação de 0,54, indicando apenas moderada correlação. A frequência típica de pulsação para o processo MAG-P varia de 50 a 200 Hz (SCOTTI e PONOMAREV, 2008), sendo esta taxa de amostragem, portanto, adequada para este processo em uma abordagem tecnológica.

Desta forma, para abordagem tecnológica amostragens de 1250 S/s são satisfatórias. Já para abordagem científica, taxas de amostragem de 2000 S/s são indicadas, e para soldagem pulsada próximas de 200 Hz, amostragem de 4000 S/s. Por fim, para observar detalhadamente os sinais dos processos de soldagem (tensão e corrente), amostragem da ordem de 125 kS/s e sem a utilização de filtros.

CAPÍTULO V

DEFINIÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DO MoSo

O presente trabalho não considera o monitoramento do tecimento (oscilação transversal da tocha em relação à direção da junta) e da velocidade de soldagem, visto que são parâmetros que estão diretamente envolvidos com a habilidade do soldador (em soldagens manuais), e/ou com as características dos sistemas de movimentação da tocha de soldagem (soldagem com a peça fixa) ou da peça (soldagem com movimentação da peça).

Sendo assim, o objetivo do sistema de monitoramento é ser capaz de instrumentar e monitorar os sinais elétricos (corrente e tensão) e a velocidade de alimentação do metal (arame) de adição (quando for o caso) dos processos de soldagem a arco.

5.1. Requisitos do sistema

Realizados os testes preliminares, tem-se as informações e requisitos para o *hardware* do sistema de monitoramento sem fio, batizado de MoSo Wi-Fi – Monitor de Soldagem. Ainda devem-se levar em consideração as características estabelecidas como objetivo principal do sistema: tecnologia própria, com escalabilidade, portabilidade, autonomia, baixo custo e flexibilidade/simplicidade de operação.

Tendo em vista os parâmetros a serem monitorados (tensão, corrente e velocidade de alimentação), deve-se selecionar e projetar os dispositivos e circuitos necessários para se construir um sistema físico, completo, que seja capaz de captar os sinais de suas fontes, condicioná-los às necessidades e limitações dos dispositivos de aquisição, convertê-los para sinais digitais suficientemente precisos, e por fim, prepará-los e enviá-los para o sistema de interface com o usuário (Figura 5-1).

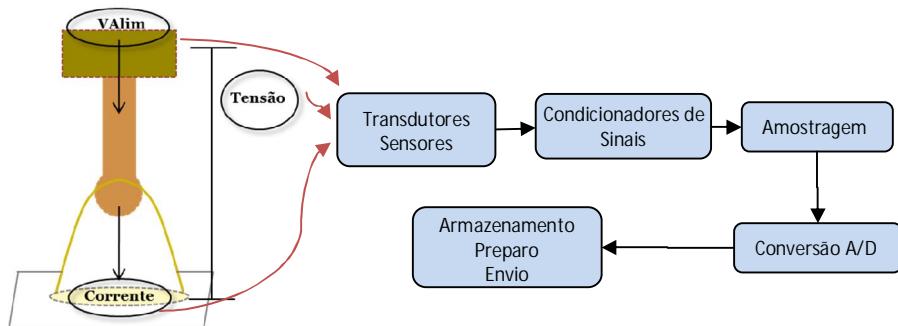


Figura 5-1 – Fluxograma de etapas de obtenção dos sinais de soldagem.

O algoritmo da interface com o usuário deve ser capaz ajustar os dados recebidos de acordo com a calibração, ou seja, reproduzi-los nas unidades e amplitudes referentes ao processo de soldagem, exibir os gráficos dos sinais (oscilogramas) e realizar as análises estatísticas estabelecidas pela norma ISO 17662:2005, mostrando os valores de médias retificadas e RMS. Além disto, deve possibilitar o armazenamento dos dados adquiridos, para futuras referências.

A Tabela 5.1 relaciona as características dos sinais que deverão ser adquiridos, e alguns requisitos do sistema.

Tabela 5.1 – Características dos sinais a serem monitorados e requisitos de *hardware*.

Característica / Requisito	Valor Mínimo	Valor Máximo
Amplitude da Corrente [A_{rms}] ¹	-500	500
Amplitude da Tensão [V] ²	-60	60
Faixa de Vel. de Alimentação [m/min] ³	-22,5	22,5
Frequência Máxima de Interesse [Hz]	–	300
Filtro Passa-Baixa [Hz] ⁴	625	2000
Taxa de Amostragem [S/s] ⁵	1250	–

Notas:¹ – Definida como uma faixa de trabalho comum à maioria dos processos de soldagem a arco elétrico;

² – Definida como uma faixa de trabalho útil, estando seu valor máximo entre 55 e 85 V, a tensão em vazio da maioria das fontes comerciais (MODENESI, 2009). Aumenta-se a acurácia da medida com o uso de um valor intermediário, visto que a mesma é dada pela amplitude dividida pela quantidade de partes da quantização do conversor A/D;

³ – Valor considerado observando as velocidades soldagens usuais utilizadas em soldagens a arco elétrico, e superior à maior velocidade conseguida com a maioria dos alimentadores comerciais, até cerca de 20 m/min;

⁴ – Faixa definida de acordo com o filtro mínimo obtido dos testes preliminares, e valor máximo com o intuito de cortar os sinais de frequências altas, que não são de interesse para o estudo pela abordagem tecnológica;

⁵ – Mínimo definido como sendo a menor frequência capaz de reproduzir o sinal com o mínimo de perdas aceitáveis por este projeto, e com máximo não definido, apesar de taxas acima de 4000 Hz não apresentarem nenhum ganho, devido ao fato do sinal estar filtrado em altas frequências.

5.2. Sistema Físico

A primeira e mais importante etapa do desenvolvimento do sistema físico do MoSo é a escolha da tecnologia de comunicação sem fio mais adequada para este tipo de aplicação e do dispositivo físico responsável pela comunicação (módulo de comunicação). Neste ponto, a interdependência entre certas etapas do projeto, como a compatibilidade do dispositivo de comunicação e do controlador, deve ser levada em consideração.

Em seguida, pode-se realizar a definição da arquitetura física do sistema de monitoramento – escolha do dispositivo microcontrolador (MCU) e de seus periféricos, de sensores e/ou transdutores, e projeto do condicionamento elétrico dos sinais de interesse. A escolha e projeto, em conjunto, de todos os dispositivos citados compõem o que se define aqui como sistema físico.

5.2.1. Sistema de Comunicação sem fio

O sistema de comunicação sem fio é a parte chave para o funcionamento do Sistema de Monitoramento. Portanto, deve ser selecionado durante a primeira etapa de desenvolvimento do MoSo e, partindo dele, todos os outros dispositivos podem ser selecionados.

De uma forma resumida, na Tabela 5.2, tem-se as características, vantagens e desvantagens das principais tecnologias de comunicação sem fio aplicáveis a ambientes fabris.

Tabela 5.2 – 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 remote, 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.

Entretanto, quando se avaliou questões como disponibilidade comercial, custo de aquisição de dispositivos para desenvolvimento da tecnologia, documentação e bibliografia referente ao desenvolvimento de produtos, a tecnologia de Bluetooth fica em desvantagem quando comparada ao Wi-Fi. Outro ponto desfavorável para aquela é a necessidade de “pareamento” anterior à comunicação.

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. Sendo assim, o padrão Wi-Fi foi escolhido para a comunicação entre o sistema de aquisição e a interface com o usuário.

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, sendo eles móveis ou não (Figura 5-2).

Assim, resta a escolha do módulo de comunicação por Wi-Fi. 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 WiFi GSX Breakout (Sparkfun Electronics, 2011), apresenta características do anterior, porém com taxa de transferência limitada em 1 Mbps.

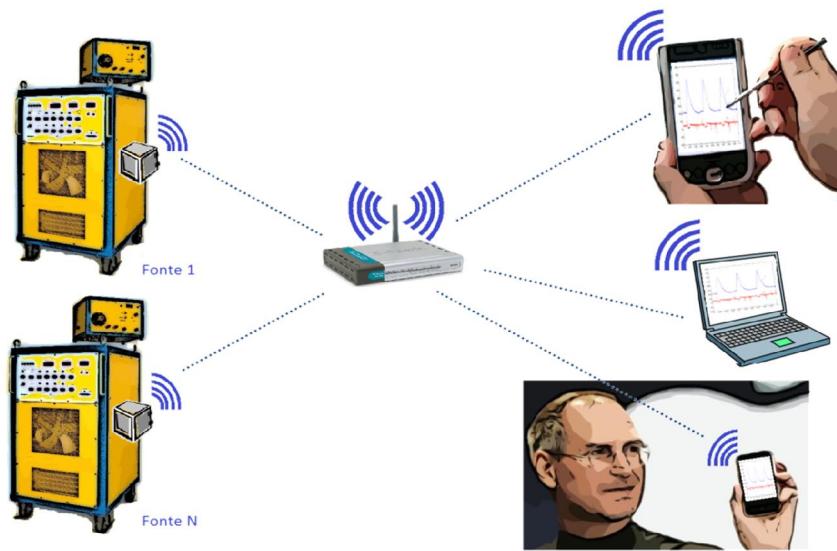


Figura 5-2 – Arquitetura de comunicação sem fio, Wi-Fi, proposta.

Porém, por questões de disponibilidade do produto no mercado local, escolheu-se o módulo Microchip ZeroG **ZG2100M Wi-Fi PICtail Module**, que apresenta 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 **TPC/IP** é integrante das bibliotecas disponíveis do fabricante do módulo Wi-Fi.

5.2.2. *Microcontrolador e seus periféricos*

Tendo em vista a restrição de tempo para o desenvolvimento de um sistema embarcado com tecnologia própria, e a escolha do módulo Wi-Fi citado no item anterior, recorreu-se ao uso de uma placa de desenvolvimento de mesmo fabricante, a **Explorer 16BR** (LabTools, 2008). Com possibilidade de integração com o módulo Wi-Fi e grande diversidade de periféricos disponíveis (Figura 5-3) para pronta implementação de *software*, a placa de desenvolvimento permite a escolha de alguns microcontroladores e garante funcionalidade do *hardware*, o que diminui o tempo de desenvolvimento do sistema.

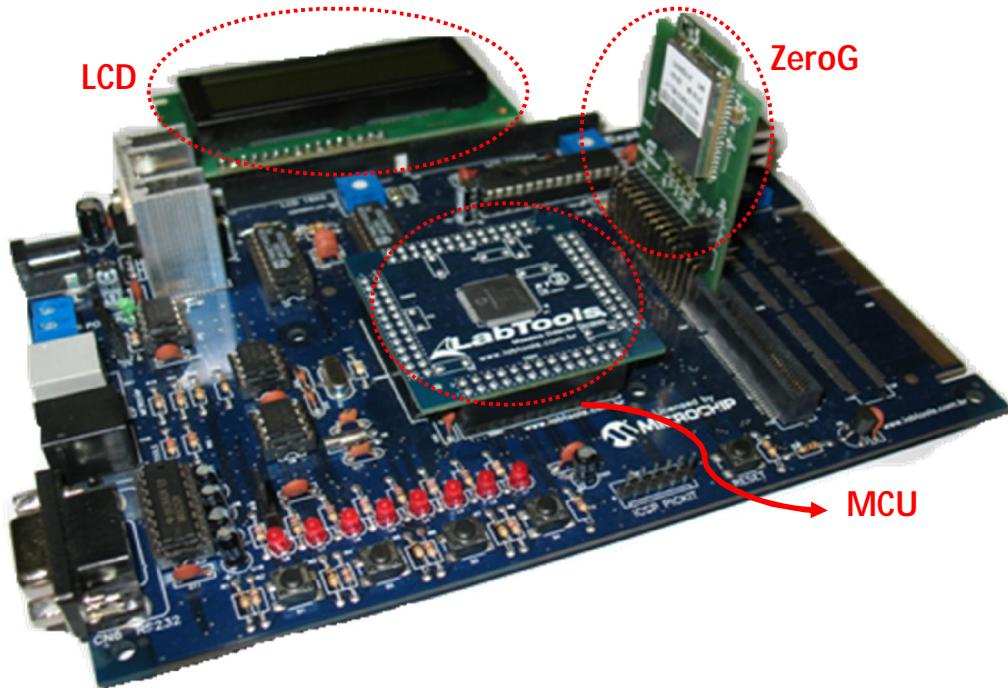


Figura 5-3 – ZeroG, MCU, LCD e outros periféricos integrados em Explorer 16BR.

A arquitetura necessária para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento dos parâmetros de soldagem envolve o módulo de comunicação Wi-Fi, um microcontrolador capaz de controlar todas as funções necessárias (conversão A/D, armazenamento de dados, entradas digitais), uma interface com o usuário no próprio sistema embarcado (dar informações diretas do funcionamento do sistema) e uma unidade de memória EEPROM para armazenamento da interface de visualização (escolha em conjunto com a determinação da interface homem-máquina, item 5.3). Esta é ilustrada na Figura 5-4.

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, e a resolução disponível no conversor A/D.

A regulagem dos parâmetros de tensão, corrente e velocidade de alimentação nas fontes de soldagem eletrônicas têm resolução de 0,1 V; 1 A e 0,1 m/min, respectivamente. O conversor A/D, portanto, deve ter resolução suficiente para realizar leituras com esta resolução. A Tabela 5.3 compara os requisitos com a resolução conseguida com diferentes conversores A/D.

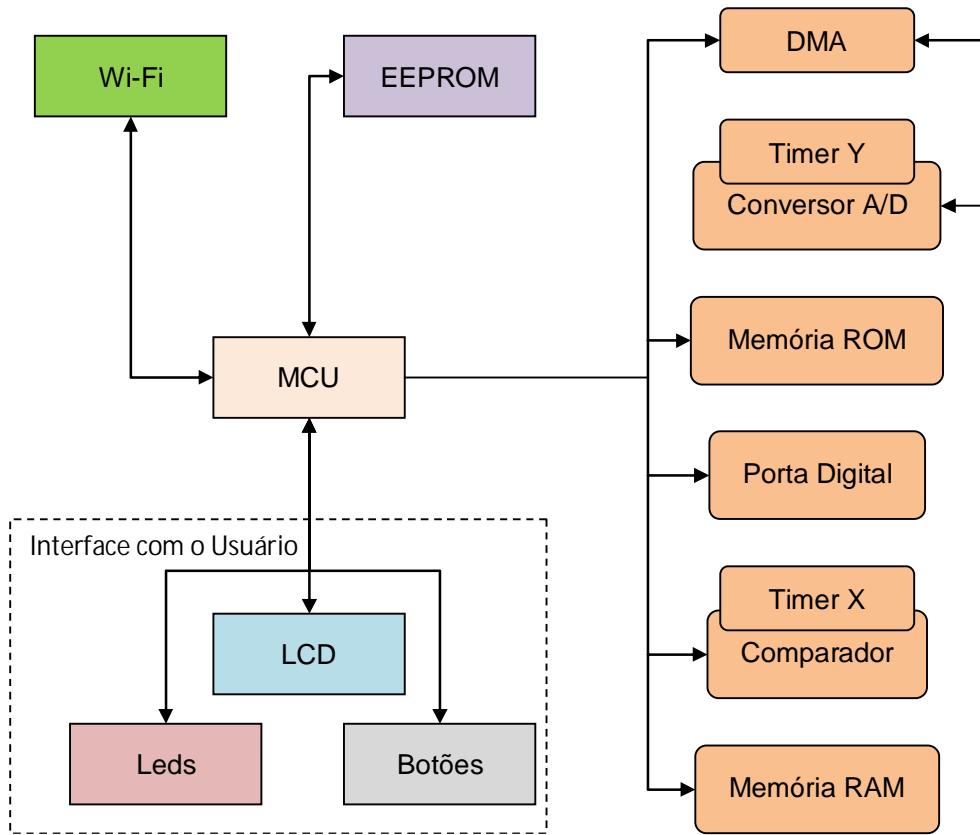


Figura 5-4 – Arquitetura do Sistema de Desenvolvimento.

Tabela 5.3 – Tabela de comparação de resolução nas medidas para diferentes resoluções de conversores A/D.

Grandeza	Faixa de Medição	Requisito	A/D 10 bits	A/D 12 bits	A/D 14 bits
Tensão	± 60 [V]	0,1 [V]	$\pm 0,117$ [V]	$\pm 0,029$ [V]	$\pm 0,007$ [V]
Corrente	± 500 [A]	1 [A]	$\pm 0,978$ [A]	$\pm 0,244$ [A]	$\pm 0,061$ [A]

Outro ponto importante é a quantidade de memória de programa e de dados de acordo com o módulo de comunicação sem fios (tamanho da pilha de protocolo, Tabela 5.2) e a velocidade de processamento.

Pelo requisito de resolução, define-se a resolução do conversor A/D em 12 bits, por atender as necessidades, além de apresentar menor custo e porque dependendo do nível de ruídos e incertezas do tratamento da medida, o uso de maiores resoluções não faz sentido.

Como o módulo de comunicação Wi-Fi já foi definido anteriormente, a Tabela 5.4 direciona a seleção de MCUs para uso com o dispositivo ZeroG ZG2100M em relação a sua eficiência de transmissão de dados.

Tabela 5.4 – 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 a resolução do conversor A/D, 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.

5.2.3. Sensores e Transdutores

A transformação das grandezas físicas dos sinais monitorados em sinais elétricos se dá com o uso de transdutores, que devem ser selecionados a satisfazer as necessidades específicas dos sinais. Os transdutores devem ter saída em tensão, pois o conversor analógico/digital escolhido utiliza-se de sinais de tensão para a interpretação dos dados adquiridos.

Conclui-se então que, a tensão do arco não necessita de um transdutor. Para os sinais de corrente e velocidade de alimentação, foram escolhidos, respectivamente, um transdutor por efeito Hall e um *encoder* relativo óptico rotativo em quadratura.

A escolha do transdutor de efeito Hall, **LEM HT500-SBD**, com a faixa de medição de ± 500 A eficazes, linearidade de 0,5%, resposta em frequência de até 50 kHz e tensão de saída variando de ± 5 V (LEM Components, 2002), deve-se à flexibilidade de instalação (sua pinça (ou alicate) móvel é facilmente transferida de um condutor a outro, i.e., corpo *open loop*), e simplicidade de uso (basta alimentá-lo e colocá-lo em volta do condutor que terá um sinal de tensão proporcional à corrente em sua saída). Entretanto sua facilidade tem um custo, transdutores do tipo *anel* apresentam linearidade melhor e não apresenta risco de não estar completamente fechado, o que provoca erro de leitura, comum em transdutores do tipo pinça (PONOMAROV e ALERHAYEM, 1997).

O *encoder* óptico relativo para a medição da velocidade de alimentação escolhido, **Bourns EM14**, é um *encoder* de 64 pulsos por volta por fase (possui duas fases), com defasagem de 90 graus entre elas para a indicação do sentido de rotação e velocidade máxima de rotação de 120 RPM (BOURNS, 2008) é capaz de medir velocidade angular de um eixo acoplado ao seu, ainda isolando eletricamente o sistema de aquisição. A interpretação de seu sinal de saída é simples e é um dispositivo eficaz e robusto, vantagens para o uso em ambientes industriais.

Os transdutores selecionados para a corrente e velocidade de alimentação são ilustrados na Figura 5-5.



Figura 5-5 – Transdutores: LEM HT500-SBD (esquerda) e Bourns EM14 (direita).

5.2.4. Condicionadores de Sinais

A próxima etapa para a aquisição dos sinais é o condicionamento dos mesmos, adequando-os à entrada do MCU. Em termos de grandeza elétrica, deve-se adequar a faixa de tensão liberada pelo transdutor, no caso da corrente, ou pela própria grandeza, no caso da tensão do arco, para a faixa de trabalho do conversor (divisor de tensão). Além disto, há a necessidade de um circuito de isolamento galvânico – o circuito de aquisição eletricamente isolado da parte de potência (soldagem) –, filtros analógicos para a retirada de frequências

fora do escopo de estudo, adequação de impedância, e circuitos de proteção da MCU (Figura 5-6).

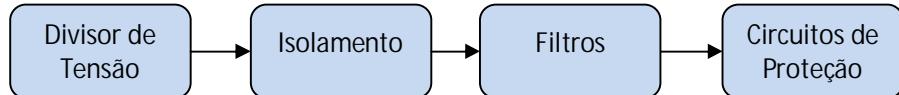


Figura 5-6 – Etapas gerais de condicionamento de sinal.

Sabe-se que, para os sinais de tensão e corrente, será utilizado um conversor A/D de 12 bits, para o sinal de módulo de velocidade de alimentação são contados a duração dos pulsos do encoder através de um comparador digital e para o sentido uma entrada digital simples, Figura 5-7. As entradas analógicas do MCU têm nível de tensão máximo (nível alto) em 3,3 V e mínimo (nível baixo) de 0 V.

O condicionamento para o sinal de tensão proveniente do processo de soldagem é realizado, inicialmente, com um circuito elétrico composto de um divisor de tensão para a faixa de trabalho do conversor A/D (proporção entre os resistores em série) e um isolador galvânico proporcional ISO122P (BURR-BROWN CORPORATION, 1993), ilustrado na Figura 5-8.

O divisor de tensão converte o sinal de entrada de -60 a 60 V para a faixa de -1,65 até 1,65 V (metade da tensão de 3,3 V), com ganho de tensão de aproximadamente $K_{divisor} \approx 1/37,18$ e o isolador galvânico tem ganho unitário, com sua saída, portanto, igual ao sinal em sua entrada.

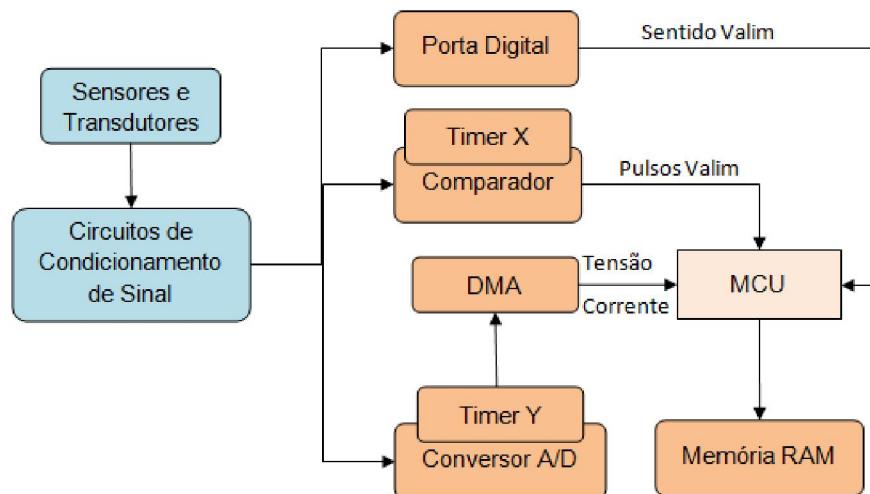


Figura 5-7 – Periféricos e os parâmetros de soldagem monitorados.

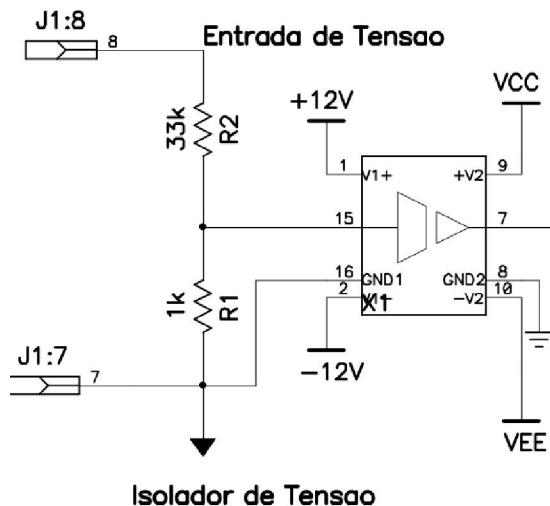


Figura 5-8 –Circuito de entrada para a tensão: divisor e isolamento.

Optou-se pela utilização de um filtro de *Butterworth* passa-baixa de segunda ordem com frequência de corte em 1591 Hz. Esta frequência, dentro dos limites estabelecidos pelos requisitos do sistema (Tabela 5.1), permite uma resposta sem atenuação para frequências até cerca de 600 Hz e atenua quase que completamente sinais com frequência superior a 5000 Hz, e tem seus componentes resistivos com valores comerciais, como é mostrado na Figura 5-9. Este filtro, particularmente, possui um ganho de tensão de $K_{filtro} = 1,586$, como previsto na topologia de *Butterworth*.

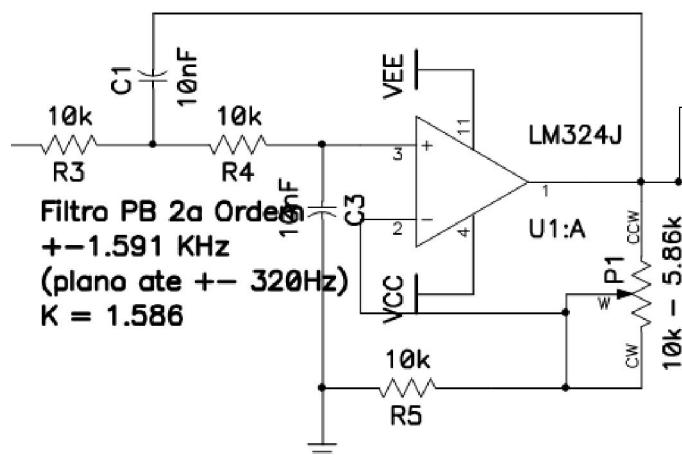


Figura 5-9 –Circuito de filtro para a tensão: *Butterworth* de segunda ordem em 1591 Hz.

Os circuitos de proteção do MCU devem, portanto, realizar tarefas que modelem o sinal de saída do filtro *Butterworth* (no intervalo de $K_{filtro} * [-1,65, 1,65]$ V) para o nível de tensão

suportado pelas entradas analógicas e digitais, de 0 a 3,3 V. A primeira etapa dos circuitos de proteção consiste em um circuito somador, ou deslocador de nível (Figura 5-10).

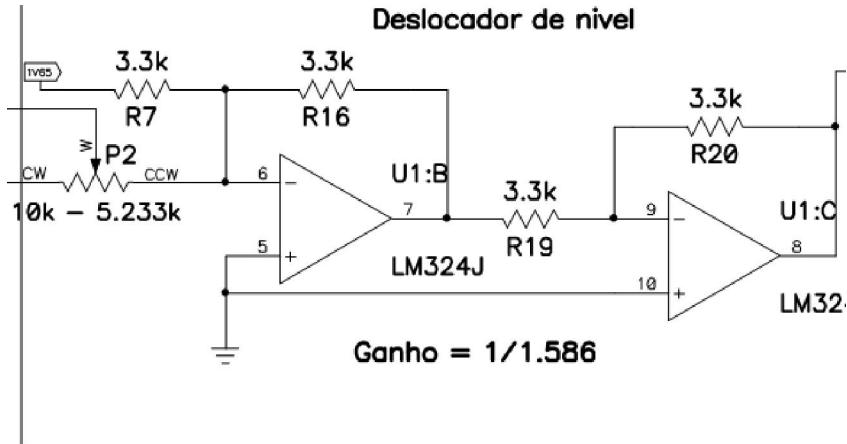


Figura 5-10 –Circuito somador para a tensão.

O circuito somador, constituído de dois amplificadores operacionais, possui ganho de tensão inverso ao ganho de tensão do circuito de filtro, ou seja, $K_{\text{somador}} = 1/1,586$. O sinal de tensão, portanto, é devolvido ao intervalo de -1,65 a 1,65 V. Além do ganho inverso, o circuito somador realiza a soma da tensão de entrada com uma tensão de referência, neste caso, igual a $U_{\text{ref}} = 1,65\text{V}$, deslocando a faixa de tensões para o intervalo de 0 a 3,3 V. A tensão de referência é proveniente de um circuito de tensão de referência (Figura 5-11)

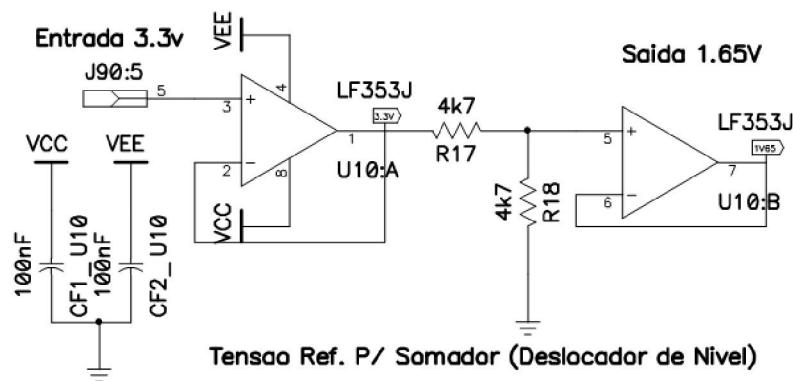


Figura 5-11 – Circuito de tensão de referência para somador.

O circuito de tensão de referência é, basicamente, um divisor de tensão ideal, com o uso de amplificadores operacionais. Ele recebe uma tensão de entrada de 3,3 V, proveniente de um chip de tensão de referência (fornecida a tensão desejada com precisão de 0,01 V) e divide a tensão pela metade, obtendo o nível de 1,65 V. Além de auxiliar no

circuito somador de tensão, o circuito de referência serve como tensão de fundo de escala para o conversor A/D do MCU.

Por fim, tem-se o circuito de proteção do MCU (Figura 5-12). Quando tensões superiores a 60 V ou inferiores a -60 V forem inseridas nos circuitos de condicionamento de sinal (algumas fontes têm tensão em vazio superior), deve-se garantir que esta tensão, acima de 3,3 V ou abaixo de 0 V não alcance os pinos de entrada do MCU, danificando-os.

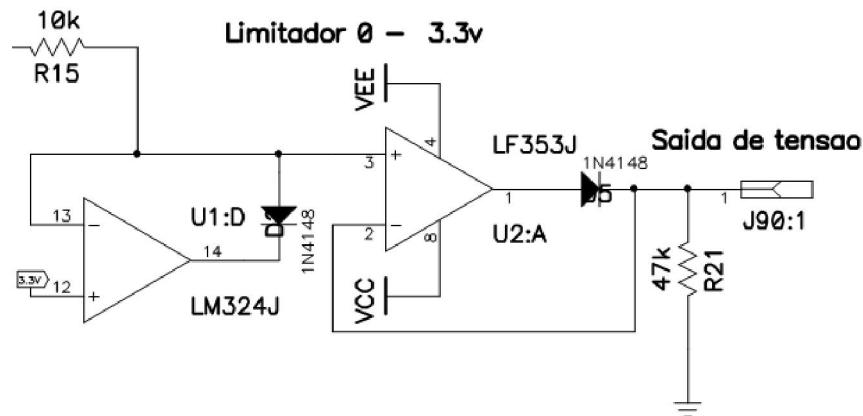


Figura 5-12 –Circuito ceifador positivo e nulo para a tensão.

O circuito ceifador, ou limitador, é responsável pela retirada da parte do sinal de tensão acima ou abaixo de um nível especificado (MALVINO, 1997). Neste caso, tem-se uma tensão de referência superior de 3,3 V (chip de tensão de referência) para o ceifador positivo e um diodo retificador em série com o amplificador operacional para o ceifador nula.

Para o sinal de corrente, os circuitos de condicionamento de sinal diferem-se dos utilizados para a tensão somente pela não necessidade de isolamento galvânico na etapa de condicionamento inicial, como mostra a Figura 5-13.

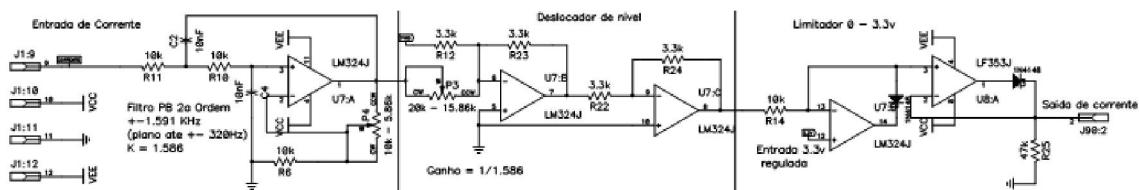


Figura 5-13 – Circuito de condicionamento da corrente: filtro, somador e ceifador.

Os sinais de entrada do transdutor em efeito Hall tem intervalo de tensão de -5 a 5 V e, após a passagem pelo filtro de *Butterworth* de segunda ordem, recebem um ganho de tensão de $K_{filtro} = 1,586$. Para modelar o sinal para o intervalo de tensão de 0 a 3,3 V antes da

entrada dos circuitos de proteção ao MCU, o circuito somador para o sinal de corrente tem ganho diferenciado do mencionado para a tensão, pela mudança de um valor de resistência, ilustrado na Figura 5-14.

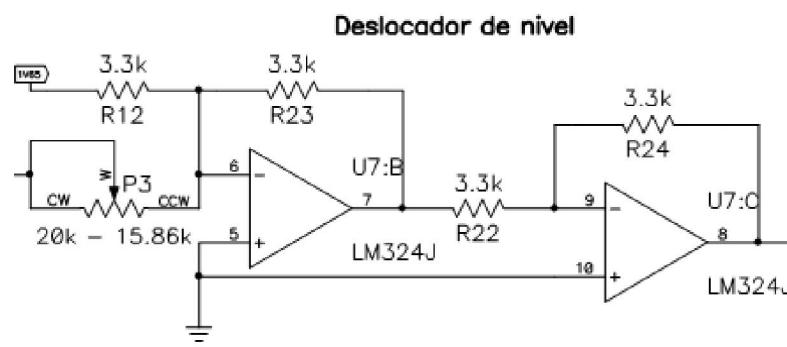


Figura 5-14 –Circuito somador da corrente: diferença apenas em resistência (P3) da tensão.

Para a velocidade de alimentação, os sinais de pulso e sentido estão em portas de entrada digitais do MCU, que aceitam o nível de tensão de 5 V como nível alto (1) e 0 V como nível baixo (0). O *encoder* óptico é alimentado com a tensão de 5 V, portanto, não é necessário nenhum circuito de remodelamento do sinal de velocidade de alimentação. O circuito para o condicionamento deste sinal é ilustrado na Figura 5-15.

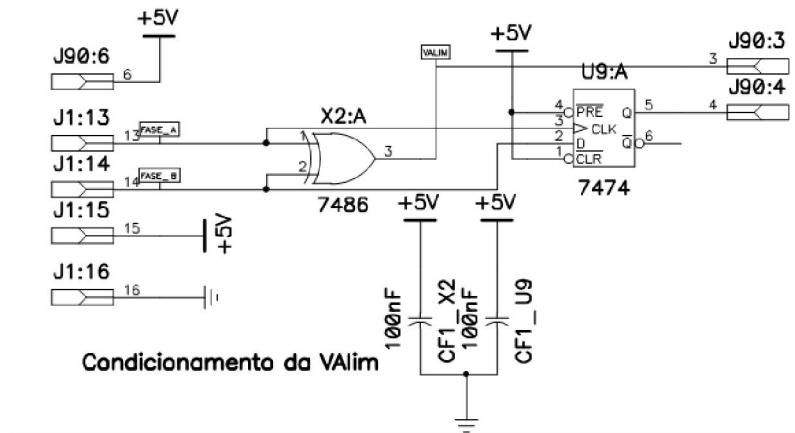


Figura 5-15 – Circuito de condicionamento para a velocidade de alimentação.

Os sinais provindos do *encoder* são defasados em 90 graus para a detecção de sentido e tem 64 pulsos por volta de resolução. Um circuito digital lógico do tipo OU EXCLUSIVO (XOR) recebe os sinais das duas fases e dobra a sua frequência no sinal de saída, diminuindo o tempo de leitura entre a detecção de dois pulsos consecutivos. Um circuito digital Flip Flop do tipo D recebe os dois sinais defasados e tem em sua saída uma

tensão em nível alto para um sentido de rotação e uma saída em nível baixo para o outro sentido de rotação. Desta forma, o MCU é capaz de “contar” o intervalo entre dois pulsos (equivalente à velocidade de alimentação) e saber o sentido de rotação.

5.3. Interface Homem-Máquina

Com todo o sistema físico devidamente determinado, deve-se desenvolver, por fim, a IHM (Interface Homem Máquina), ou seja, a forma de interação do usuário com o próprio sistema embarcado de monitoramento, e a interação com a interface de exibição e visualização dos dados do processo de soldagem obtidos pelo sistema para o usuário, realizando a análise e documentação dos dados obtidos.

5.3.1. Interface Agregada 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;
- Dois (2) botões para ações.

O LCD (Display de cristal líquido) exibe, quando o sistema está em funcionamento, o nome da rede Wi-Fi em que o MoSo 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 botões têm funções de atuadores sobre o sistema, sendo que um é utilizado para realizar o *reset* do sistema, ou seja, caso ocorra algum erro de comunicação, algum travamento ou perda de sinal, pode-se reiniciar o sistema pressionando o botão *RESET*. Já o outro botão (indicado como S4 na placa) é responsável por realizar o envio de um *ping* (serviço utilizado para medir a latência da rede, ou seja quanto tempo o dispositivo tem de atraso de comunicação com o concentrador de rede sem fio), o valor obtido como resposta é exibido no LCD, e lá permanece até uma nova solicitação.

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 (o oitavo LED não é utilizado) é ilustrada na Figura 5-16.

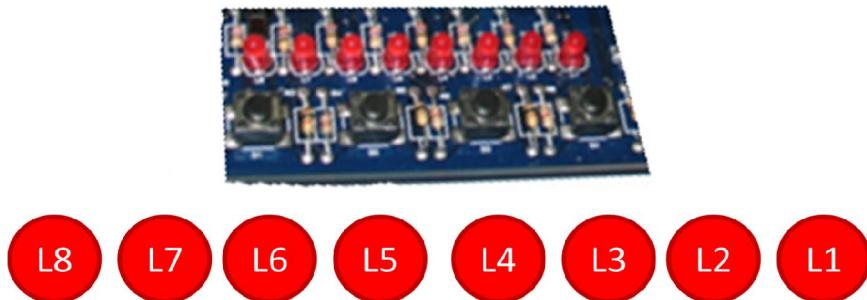


Figura 5-16 – LEDs indicativos da IHM do sistema embarcado.

O LED L1 é o indicativo do funcionamento de todo sistema, pisca a cada 0,5 s. Caso ele pare de piscar significa que o programa principal do microcontrolador está bloqueado ou travado, o que impede a execução das rotinas de comunicação por *Wi-Fi*. Os LEDs de L3 a L6 indicam o tempo que o MoSo está programado para realizar a aquisição continua, contando de 1 a 8 em base binária, 0,5 a 4 segundos em escala real e, após este tempo de janela, enviar os dados para a interface por *WebServer*. Enquanto os dados são enviados para o servidor, não há aquisição dos sinais e o estado atual do sistema – se está adquirindo ou enviando dados é indicado pelo LED L2.

O LED L7 indica se o sistema está pronto para aquisição, ou seja, se foi configurado para realizar a tarefa de aquisição corretamente. O fato de estar configurado não indica que o sistema está adquirindo. Pela arquitetura de comunicação implementada entre o sistema embarcado e a interface por *WebServer*, é necessário uma requisição de dados, sendo então que o sistema responde às solicitadas da interface com o usuário – modo de funcionamento Reativo para o sistema embarcado –, ou seja, o sistema somente adquire os dados se houver um usuário para receber os dados.

5.3.2. Interface Homem-Máquina via *WebServer*

O dispositivo de comunicação sem fio selecionado possibilita a implementação de um servidor de páginas de internet (*WebServer*), que é um meio de alta flexibilidade, podendo ser acessado de qualquer dispositivo móvel ou não que possua um navegador de internet compatível com a tecnologia de codificação utilizada para o desenvolvimento da página.

A vantagem de sua utilização está no fato de não ser necessário o uso de qualquer programa de terceiros, ou mesmo desenvolvidos, no dispositivo de visualização do usuário, reduzindo os custos e a complexidade de utilização do sistema MoSo Wi-Fi. O protocolo utilizado para a criação do *WebServer* é o HTTP que é implementado sobre o TCP/IP, com a utilização da pilha fornecida pelo fabricante do módulo, apresentando a vantagem de ser livre, e gratuito.

Tendo em vista o protocolo de comunicação TCP e a interface com o usuário HTTP, o WebServer é dividido em páginas, cada uma com um intuito específico, conforme será descrito.

O sistema possui as seguintes informações distribuídas em páginas:

- Informações gerais sobre o funcionamento, versões, tanto de monitoramento quanto de interface com o usuário;
- Cálculo e exibição dos valores, médios retificados e RMS, para os três sinais de forma dinâmica (documentação e monitoramento);
- Exibição contínua de gráficos com intervalos de tempo (janela) definidos (documentação e monitoramento on-line do processo);
- Possibilidade de armazenamento dos dados recebidos (documentação);
- Manual de utilização do sistema como um todo;
- Configurações administrativas (configurações do modo de monitoramento e aquisição).

É importante lembrar que todas as interações com o usuários serão dependentes apenas do uso de um navegador de internet atualizado, disponível de forma gratuita para todo e qualquer equipamento com acesso à rede em que o sistema de monitoramento estiver inserido.

A página inicial apresenta informações gerais do dispositivo está conectado, versões do *firmware* do sistema embarcado e da interface com o usuário, além da data de ultima atualização do sistema como um todo. É exibido, nesta, também, o estado do LED L1 e do botão S4, para avaliação do funcionamento de forma remota, e se alguém está pressionando o referido botão (Figura 5-17).

Caso ocorra uma queda na conexão, visto que é necessária uma qualidade mínima do sinal sem fio para um bom funcionamento, ou o sistema embarcado parem de funcionar, os indicadores de conexão serão alterados. Apenas para a página inicial, a caixa contendo *LEDs* e *Buttons* ficará “vazia” e, para todas as páginas, o logotipo do “*arco elétrico*” aparecerá com os indicadores sem coloração verde, como é mostrado na Figura 5-18.

A página de Ajuda contém as informações sobre como o MoSo Wi-Fi funciona, suas características, ações de uso, e histórico de revisões. Há respostas para as principais dúvidas que o usuário possa ter, e auxilio a correção de erros comuns que possam ocorrer durante o funcionamento e ou utilização pelo usuário.



Figura 5-17 – Página inicial do programa com indicadores de funcionamento ligados.

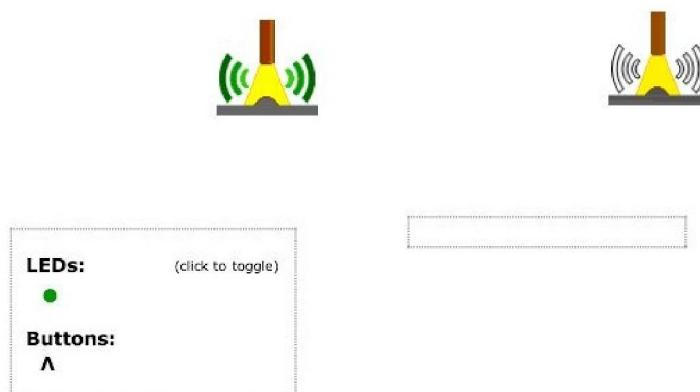


Figura 5-18 – Detalhe para indicadores de conexão ligados (esquerda) e desligados (direita).

Já a página de monitoramento possui duas partes. A parte inicial, quando se entra no sistema pela primeira vez, é uma página somente de *login*, com o intuito de permitir a usuário a configuração do sistema (Figura 5-19).



Figura 5-19 – Página de *login*.

Ao se entrar no sistema com nome de usuário e senha, há um campo para configurações de aquisição, onde se pode iniciar, configurar o tempo de janela, ou parar a aquisição e monitoramento dos dados (Figura 5-20).

Se o sistema não estiver configurado para realizar o monitoramento, ficam exibidas as configurações possíveis e o botão de Iniciar. As configurações possíveis são:

- Janela de Amostragem: seleciona o tempo de aquisição continua sem janelamento entre os dados, após este tempo o sistema recebe os dados, os trata e volta a adquirir. O botão Atualizar atualiza no sistema embarcado o tempo que deverá ser adquirido.
- Caixa de Salvar: selecionado se deseja salvar os dados ao final da aquisição da quantidade de janelas indicada pela Lista de Quantidade de Janelas. O local onde os dados serão Salvos é indicado no Caminho. A caixa Substituir deve ser marcada se não quiser ser perguntado para sobreescriver arquivo existente, e o botão Salvar salva os dados.

Quando o usuário configura o sistema e o botão Iniciar é pressionado, o sistema realiza a aquisição dos sinais e os imprime em gráficos, assim como suas análises estatísticas, como exemplifica a Figura 5-21.

Se o sistema já foi configurado e armado para realizar o monitoramento em um momento anterior, ao se iniciar a conexão ao site novamente e acessar a página de monitoramento, é exibido automaticamente os oscilogramas e valores estatísticos na tela, além da informação de quanto tempo esta para exibição contínua. Neste modo, entretanto, não é possível salvar os dados recebidos.

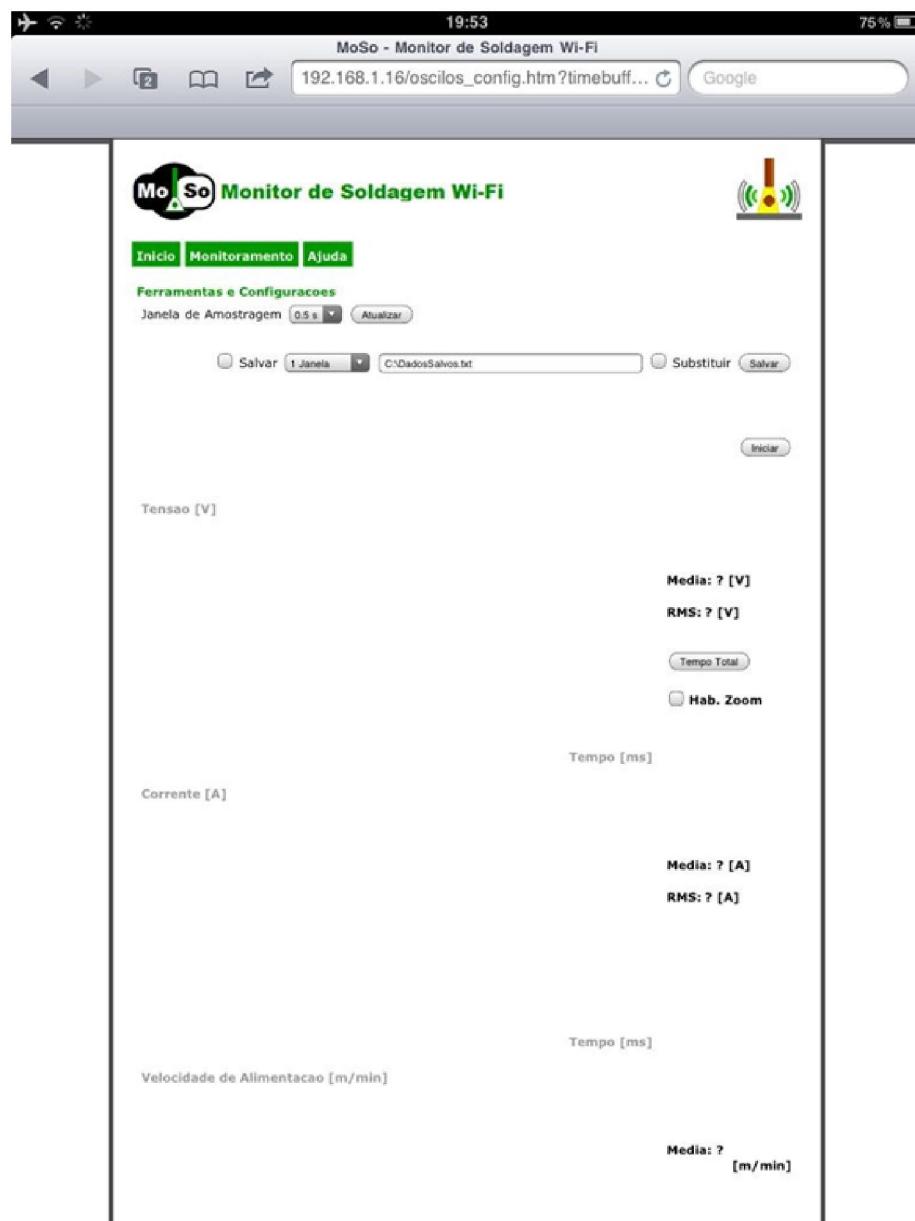


Figura 5-20 – Página de configuração do monitoramento.

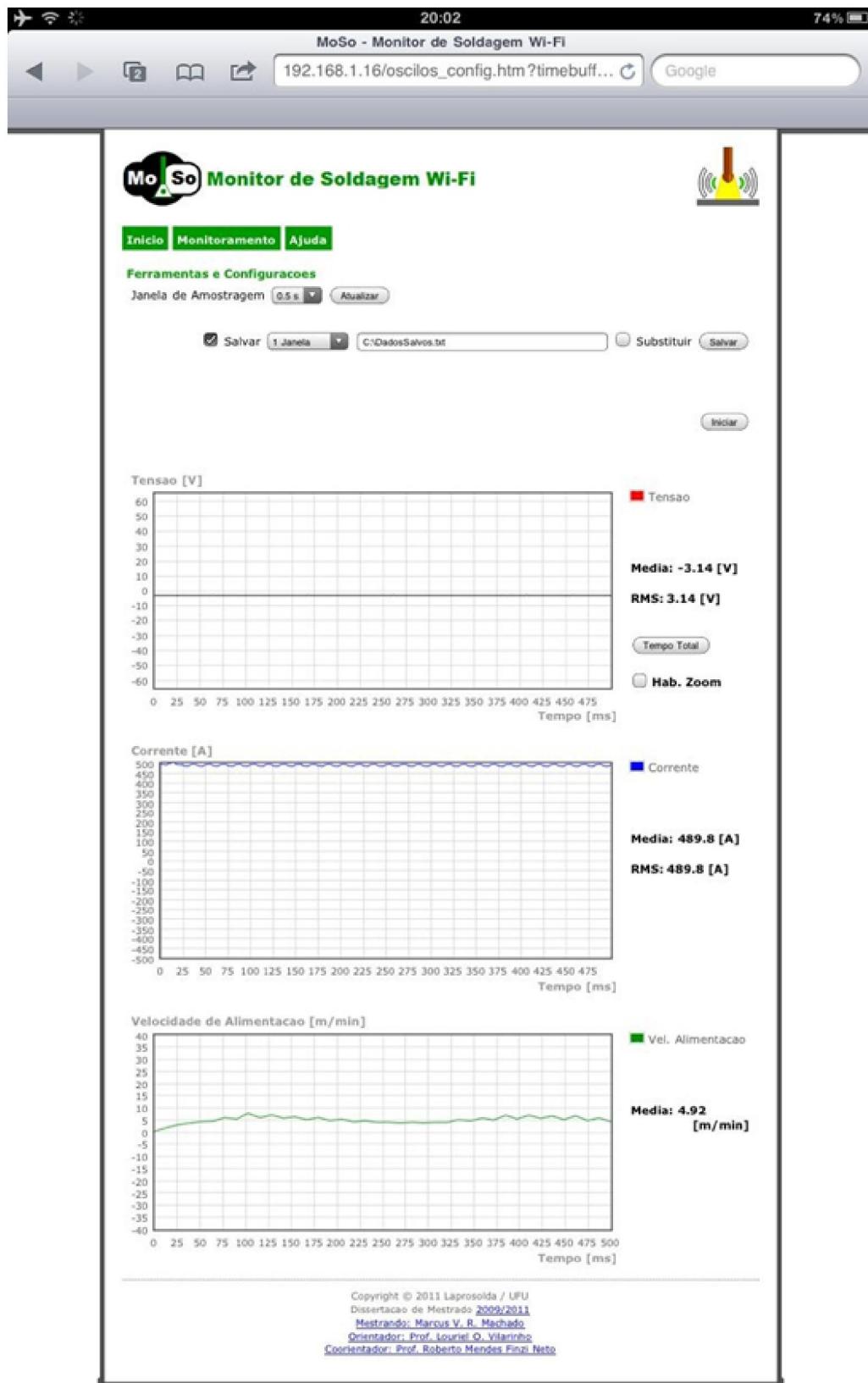


Figura 5-21 – Página do Monitoramento com opção de salvar os dados.

5.4. Protótipo

Para a validação do sistema de monitoramento sem fio, a construção de um protótipo foi realizada, montando todos os componentes e circuitos necessários ao seu funcionamento. São necessárias apenas a ligação do sistema a rede de energia elétrica para alimentação do sistema, e a ligação dos transdutores e cabos de instrumentação. O sistema foi montado em caixa de PVC, sendo o protótipo ilustrado na Figura 5-22.



Figura 5-22 – Protótipo construído. Esquerda: Parte superior, interfaces do sistema físico. Direita: Lateral esquerda com conectores para ligação dos transdutores e sinal de tensão.

5.5. Considerações Finais

Alguns aspectos do sistema de monitoramento sem fio de processos de soldagem a arco elétrico, MoSo, considerados como fora de foco da área do trabalho, não foram citados ou detalhados até o momento. Porém, algumas considerações devem ser realizadas para o melhor entendimento do projeto do MoSo como um todo:

- É importante ressaltar que o sistema embarcado possui memória limitada de armazenamento de dados (RAM), resultando, de um ponto de vista prático, em uma janela limitada de aquisição contínua, esta sendo de, no máximo, 4 segundos para cada parâmetro monitorado;
- Distribuiu-se o tempo máximo de amostragem em oito *buffers* menores, de tamanhos idênticos e relativos a 500 ms de aquisição contínua. Este tempo foi discretizado arbitrariamente para auxiliar na flexibilidade da visualização dos sinais pelos oscilogramas do *Webserver*;

- Durante o envio da janela adquirida não há aquisição de novos pontos, devido ao funcionamento incorreto da característica *cooperative multitask* (multi tarefa cooperativa) da pilha TCP/IP implementada;
- O tempo entre janelas depende de fatores como a quantidade de dados enviados e a qualidade da conexão sem fio, sendo, portanto, não determinístico;
- O conversor analógico-digital do sistema embarcado realiza a amostragem dos sinais de entrada a uma taxa de 10240 S/s para os dois canais, armazenados diretamente na memória DMA (sem uso da CPU), e realiza uma média a cada 4 pontos para diminuir erros de quantização.
- O conversor A/D amostra, sempre, um ponto para a tensão e um ponto para a corrente em seguida, alternado entre elas. Portanto, a taxa de aquisição de cada canal é definida como:

$$f_s = \frac{\text{taxa_amostragem_total}}{n_canais * n_pontos_media} = \frac{10240}{2 * 4} = 1280 \text{ S/s}$$

- Pela natureza da conversão alternada existe um atraso de 1/10240 segundos (97,6 μ s) entre um ponto de tensão e seu equivalente em corrente. O sistema, entretanto, desconsidera o atraso na montagem dos oscilogramas;
- A natureza de transmissão reativa do sistema embarcado não permite o acesso de mais de um usuário simultaneamente;
- A compatibilidade do *Webserver* foi testada para os seguintes navegadores para PC: Internet Explorer 8.0 ou superior (com Windows XP ou, no máximo, Windows 7 Home Premium) apresentou total compatibilidade, Firefox 3.0 ou superior e Safari 3.2 ou superior apresentaram incompatibilidade apenas com a rotina de salvar os dados, por incapacidade de acesso aos disco rígido mesmo com níveis de segurança mínimos;
- A compatibilidade do *Webserver* foi testada para os seguintes navegadores para móveis: Safari para iOS 4.2 (iPhone 4 e iPad) e Opera Mini para Android 2.2 (Froyo para Galaxy S) apresentaram incompatibilidade apenas para salvar dados, devido aos níveis de segurança para acesso aos sistema de arquivo, e Internet Explorer para Windows Mobile 6.1 (DELL Axim X51V e HP iPAQ 6945) apresentou incompatibilidade em testes iniciais;
- Apesar de apresentados na avaliação da Interface Homem-Máquina a velocidade de alimentação, nos estudos não foram realizados testes de medidas desta grandeza para as soldagens *in loco*, pois, mesmo o sistema de monitoramento estando apto a realizar tais medidas, a construção do dispositivo de adaptação do *encoder* ao arame não foi realizada devido à restrição de tempo. Entretanto,

ressalta-se que a sistemática proposta para o *encoder* foi testada através do acoplamento do eixo do *encoder* com o eixo de um motor de corrente contínua, cuja rotação é conhecida, assim como seu sentido de rotação. Assim, ao se variar a rotação do motor, variou-se a rotação do *encoder*, que passou a gerar diferentes sinais de pulso, como esperado. Ao final, o MCU foi capaz de “contar” o intervalo entre dois pulsos (equivalente à velocidade de alimentação) e saber o sentido de rotação; lembrar que a medida da velocidade de alimentação não está associada a conversão A/D de um sinal de tensão, mas sim com uso de um contador digital que mede a frequência do sinal gerado pelo *encoder* relativo.

- Por fim, o protótipo construído do Moso Wi-Fi teve um peso de ~1,5 kg, incluindo sensores e cabeamento, e a caixa do equipamento com medidas de 89x180x260 mm (altura x profundidade x largura).

CAPÍTULO VI

VALIDAÇÃO DO MoSo Wi-Fi

A fim de validar o funcionamento do sistema de monitoramento sem fio de processos de soldagem a arco elétrico (MoSo Wi-Fi) como um todo, como previsto na metodologia geral de trabalho, realizou-se a instalação do protótipo construído em meio operacional e, através de análise do monitoramento realizado em processos *in loco*, e sua comparação com um sistema de monitoramento padrão, é possível obter a aplicabilidade do sistema, sua exatidão e seus limites de uso.

Para que os sinais adquiridos pelo conversor A/D do microcontrolador fossem compatíveis com os sinais reais observados durante os testes sem soldagens a arco elétrico, ou seja, para que a interface com o usuário interpretasse quantização do conversor analógico/digital, entre 0 e 4096 (12 bits), adquirido e enviado pela comunicação sem fio de forma a torná-lo um valor discreto na faixa de trabalho da fonte de soldagem, entre -500 a 500 A para a corrente e entre -60 a 60 V para a tensão, é necessária a realização de uma calibração, descrita a seguir.

6.1. Calibração do MoSo Wi-Fi

Inicialmente, realizou-se a calibração do MoSo Wi-Fi, através do uso de um banco de carga¹ (Figura 6.1), em conjunto com um voltímetro e um amperímetro calibrados, pertencentes ao Laprosolda. O banco de carga mantém a resistência relativamente

¹ Tubo de aço inox, com resfriamento interno a água, utilizado como Resistência Óhmica. O grampo ilustrado na Fig. 6.1 ao ser mudado de posição varia o valor da resistência.

constante durante todo o processo de calibração, garantindo uma leitura estável durante o acionamento da fonte de soldagem tanto para a tensão quanto para a corrente.

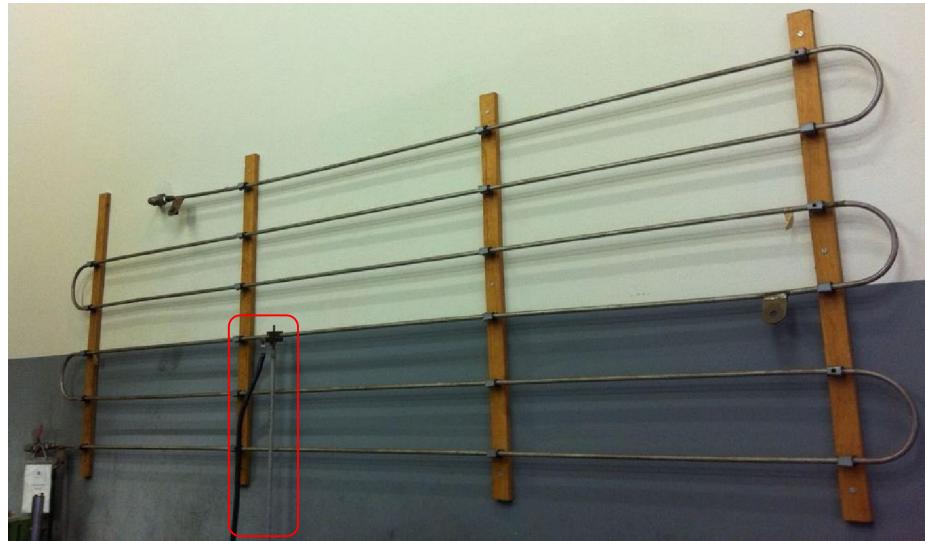


Figura 6-1 – Banco de carga utilizado para calibração, em destaque grampo para variar valor de resistência.

Variou-se a corrente imposta pela fonte de soldagem em um intervalo abaixo do definido pela faixa de trabalho, com menor valor em -450 A e maior valor em 450 A, em acréscimos fixos de 50 A. Para o valor de corrente nula (0 A), abriu-se o circuito da fonte, com o transdutor posicionado no cabo de corrente (medindo assim o *offset* do condicionador) e, para o valor de tensão nula (0 V), com a fonte desarmada (sem tensão em vazio), gerou-se um curto-círcuito nos dois polos ou bornes (positivo e negativo), (medindo assim o *offset* do condicionador).

O transdutor por efeito Hall, bem como o amperímetro calibrado, foram posicionados no cabo de corrente os fios para medir a tensão foram posicionados nos bornes da fonte de soldagem, bem como o voltímetro calibrado.

Segue lista de equipamentos utilizados:

- Multímetro Fluke True RMS 87 III para mediação de tensão (Figura 6-2);
- Amperímetro Minipa True RMS ET-3910 para corrente (Figura 6-2);
- Fonte de Soldagem IMC *Digitec* 600;
- Protótipo MoSo Wi-Fi;
- Banco de Carga do Laprosolda.

Os resultados de tensão e corrente dos medidores calibrados, chamados de “referência de calibração” e do MoSo Wi-Fi para cada valor de corrente imposta são mostrado na Tabela 6.1.



Figura 6-2 – Dispositivos TRUE RMS utilizados em calibração: multímetro (esquerda) e amperímetro (direita).

Tabela 6.1 – Tabela de valores para calibração do MoSo Wi-Fi

Fonte de Soldagem	MoSo Wi-Fi		Referência		
	Corrente Regulada [A _{rms}]	Tensão Lida [V _{rms}]	Corrente Lida [V _{rms}]	Tensão (Fluke) [V]	Corrente (Minipa) [A]
-450	0,827	0,259	-31,22	-463,0	
-400	0,967	0,415	-26,05	-412,0	
-350	1,012	0,571	-24,20	-360,0	
-300	1,106	0,737	-20,96	-308,0	
-250	1,226	0,889	-16,57	-256,8	
-200	1,282	1,044	-14,53	-206,0	
-150	1,322	1,197	-13,00	-154,6	
-100	1,366	1,352	-11,45	-103,2	
-50	1,439	1,504	-8,75	-53,0	
0	1,677	1,662	0,00	0,0	
50	1,897	1,819	8,05	51,1	
100	1,989	1,974	11,38	101,9	
150	2,032	2,129	13,00	152,7	
200	2,077	2,287	14,57	203,8	
250	2,114	2,441	15,99	254,5	
300	2,330	2,598	23,80	305,9	
350	2,554	2,756	32,20	358,0	
400	2,768	2,914	39,96	408,0	
450	2,999	3,069	48,00	459,0	

Como pode ser observado na Figura 6-3, ambas as curvas de tendências apresentaram comportamento linear, com valor de coeficiente de determinação R^2 máximo ($R^2 = 1$) (o R^2 mede o modo de associação de duas variáveis, quanto da parcela de y que é explicada por x (BERTOLO, 2008)), indicando forte correlação entre os valores obtidos pelo sistema calibrado e pelo MoSo Wi-Fi, já o erro padrão (que calcula o maior erro padrão da estimativa, para a faixa de 95% da amostra, sendo que mede a variabilidade em torno da linha ajustada de regressão) ficou em 0,01 V para a tensão, e 1,07 A para a corrente, indicando que o erro de calibração para o sistema proposto está razoavelmente dentro dos limites estipulados.

Os coeficientes de calibração foram, portanto, inseridos no algoritmo de interpretação dos dados recebidos da IHM, ajustando os valores mostrados nos gráficos, assim como as médias retificadas e valores RMS obtidos e a sequência de pontos que pode ser salva pelo usuário. O MoSo Wi-Fi está, deste modo, apto a realização de testes em soldagens *in loco*.

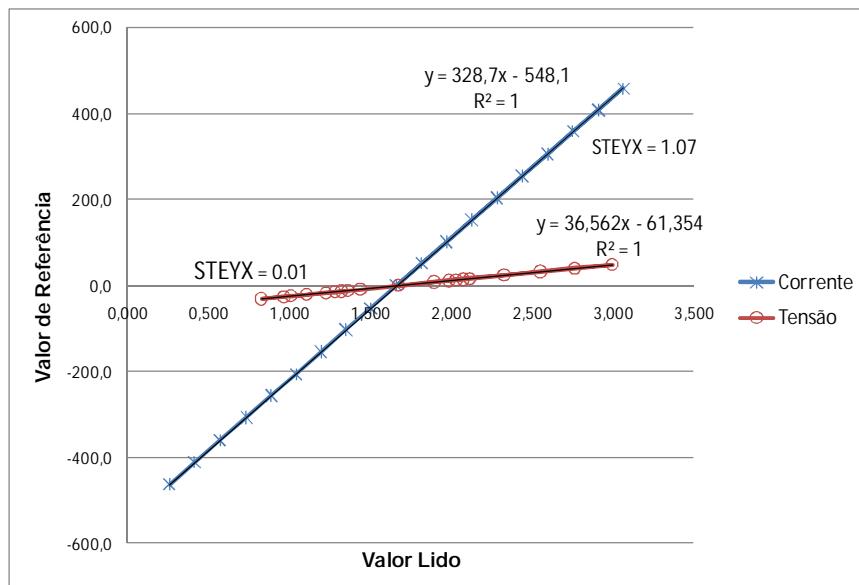


Figura 6-3 – Curvas de calibração do MoSo Wi-Fi, com suas equações, valores R^2 e Erro Padrão (STEXY).

6.2. Validação do Condicionamento de Sinal

Parte importante dos resultados obtidos com a calibração do MoSo Wi-Fi é pertinente à análise do funcionamento dos circuitos de condicionamento de sinal.

Observando-se a Tabela 6.1, principalmente pelos valores de tensão e corrente lidos do sistema sem fio, é possível verificar alguns aspectos importantes e, por fim, validar o projeto adotado para o sistema físico como um todo e, especificamente, alguns circuitos específicos do condicionamento de sinal.

Em uma primeira análise tem-se a validação do circuito somador de tensão. Quando não há estímulo nenhum do transdutor por efeito Hall e uma tensão nula na entrada, observa-se uma saída de 1,662 e 1,677 V, respectivamente, lida pelo MoSo. Estes valores são bem próximos ao valor teórico de tensão somado ao sinal, de 1,65 V, gerado pelo circuito somador. Considerando-se apenas os erros acumulados de 1% para os valores de resistência do divisor da tensão de referência, estes valores estão dentro da faixa de valores esperada, validando, portanto, o funcionamento correto para o referido circuito.

Para a validação do circuito ceifador positivo, deve-se observar a forma de onda de tensão adquirida em soldagem *in loco*, ilustrada na Figura 6-4.

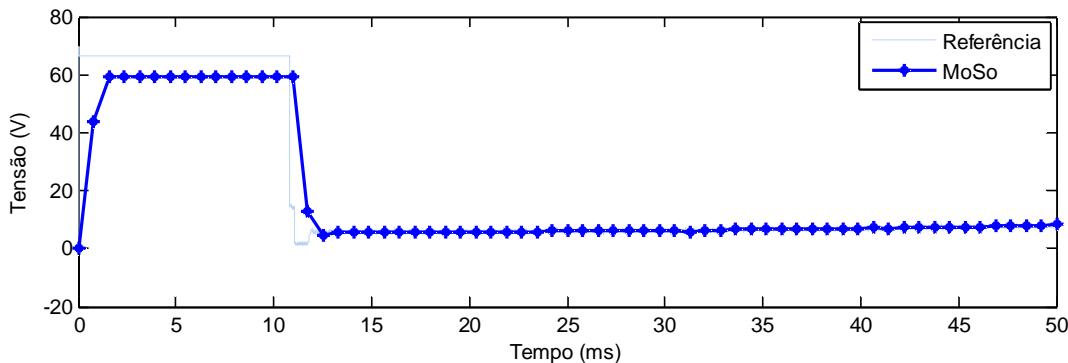


Figura 6-4 – Detalhe do circuito ceifador limitando a tensão em vazio da fonte.

Pelo sistema de medida de referência, a tensão em vazio da fonte de soldagem atinge valores próximos de 70 V. Segundo o projeto de condicionamento de tensão, este valor de entrada geraria uma tensão superior a 3,3 V no pino de entrada do conversor A/D do microcontrolador, danificando-o. Entretanto, é possível observar que o MoSo interpretou a entrada da tensão em vazio como 60 V, assim como esperado tanto pelo limite da escala de conversão, quanto pelo ceifador positivo. Testes utilizando osciloscópio comprovaram a funcionalidade do circuito ceifador positivo, impedindo a passagem de sobretensão e que danificasse o conversor A/D.

Da mesma forma, pela observação de tensões em vazio para soldagens com polaridade negativa, conclui-se que o circuito ceifador nulo respondeu de forma adequada, impedindo que valores de tensão negativos danificassem o funcionamento do conversor A/D e, do microcontrolador. Os ceifadores, positivo e nulo, para o circuito de condicionamento da

corrente também, em testes iniciais com geradores de função, responderam de forma adequada.

De uma forma geral, por fim, pode-se validar o funcionamento do circuito integrado da tensão de referência e suas manipulações subsequentes (divisão). Seu funcionamento correto é fundamental para que os circuitos mencionados acima fossem bem sucedidos em suas tarefas. Portanto, a validação dos circuitos ceifadores e somadores é também a validação da tensão de referência.

6.3. Soldagens *in loco*

Para a avaliação dos resultados finais de aplicabilidade e funcionalidade do MoSo realizou-se diferentes soldagens pelo processo MAG, com transferências metálicas do tipo curto-circuito, goticular (spray) e pulsado, com comportamento em frequência, correntes e tensões nominais variados. As soldagens foram monitoradas pelo MoSo e por um sistema de monitoramento utilizado no Laprosolda/UFU, previamente calibrado, com a aquisição em 125 kS/s, e utilizado nesta etapa como sistema de referência, sendo que no caso este não apresenta filtro passa-baixa para nenhum sinal (corrente e tensão).

A medida do sinal de tensão para esta avaliação foi realizada entre o bico de contato e a peça, sendo desta forma a maneira correta de realizar a medida.

Os dois sistemas de monitoramento tiveram seu funcionamento iniciado antes do início da soldagem, sendo possível, assim, observar o momento da abertura do arco e utilizar este ponto para sincronização das curvas obtidas pelos dois métodos.

Como forma de validação, se analisou a resposta do sistema MoSo quanto: (serão mostrados nesta discussão alguns testes, julgados necessários para análises dos resultados observados, e para todos os testes realizados esta análise é apresentada em forma de tabelas)

- fidelidade na reprodução do formato de onda.
- atendimento dos requisitos das normas de documentação (valores médios retificados, e RMS).

A fim de se realizar uma avaliação, apresenta-se os valores de corrente e tensão (médios retificados e RMS, calculados no intervalo entre o início e o fim da solda), e os erros relativos entre o Sistema de Monitoramento proposto (MoSo) e o sistema de referência. Comparou-se o MoSo com o sinal de referência originalmente adquirido e com o sinal de referência após aplicação de filtro digital, para retirada da alta frequência. O filtro utilizado é o mesmo do sistema físico, sendo, porém, neste caso digital, *Butterworth* de 2^a ordem e frequência de corte de 1591 Hz, conforme já discutido no item 5.2.4. Discutem-se ainda os coeficientes de correlação entre os diferentes sinais adquiridos.

6.3.1. Soldagens MAG-P e MAG goticular

As Tabela 6.2 e Tabela 6.3 relacionam os parâmetros regulados na máquina de solda para realização dos testes em MAG-P e MAG goticular, respectivamente. Utilizou-se a condição de UGGP (uma gota por pulso) para os testes MAG-P de trabalhos realizados anteriormente em laboratório (OJO e SCOTTI, 2005).

Tabela 6.2 – Parâmetros operacionais para soldagem por MAG-P

Teste	Ip [A]	tp [ms]	Ib [A]	tb [ms]	f [Hz]	Valim [m/min]	DBCP [mm]
MAG0001	260	2,0	70	3,4	184,0	6,0	22
MAG0002	210	10,0	70	10,0	50,0	5,5	22

Notas: Soldagens realizadas com fonte IMC Inversal 450, velocidade de soldagem de 20 cm/min, gás de proteção Ar+8%CO₂ com vazão de 14 l/min, arame de solda ER70S-6 1.0 mm. Ip: corrente de pico. tp: tempo de pico. Ib: corrente de base. tb: tempo de base. f: frequência de pulsação. Valim: velocidade de alimentação de arame. DBCP: distância bico de contato peça.

Tabela 6.3 – Parâmetros operacionais para MAG goticular.

Teste	Tensão [V]	Valim [m/min]	DBCP [mm]
MAG0003	38,0	15,0	22

Notas: soldagem realizada com fonte de soldagem Inversal 450, velocidade de soldagem de 20 cm/min, gás de proteção Ar+8%CO₂ com vazão de 14 l/min, arame de solda ER70S-6 1.0 mm. Valim: velocidade de alimentação de arame. DBCP: distância bico de contato peça.

Para o teste MAG0001, a Figura 6-5 que mostra o comparativo entre os sinais adquiridos, já sincronizados, tanto de tensão quanto de corrente, sem a aplicação do filtro passa-baixa digital aos sinais do sistema de referência, visto que o sistema não apresenta filtros analógicos.

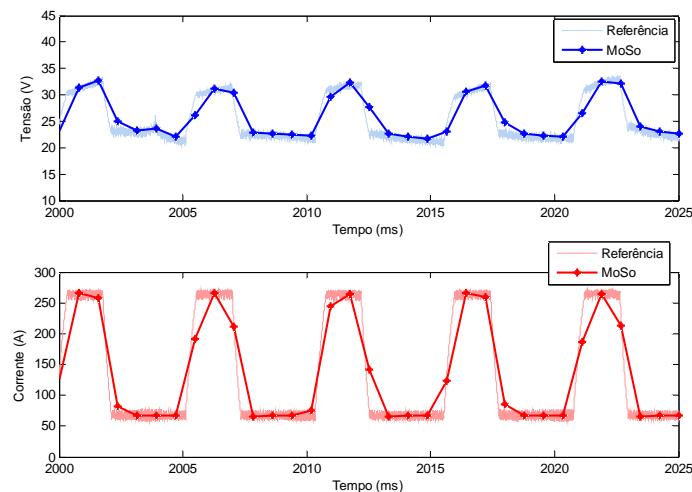


Figura 6-5 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0001 para o sistema MoSo e de referência sem filtro.

Comparando o sinal adquirido pelo MoSo, em linha contínua com marcadores destacando os pontos adquiridos, com o do sistema de referência observa-se a grande discrepância na quantidade de pontos, devido à diferença da taxa de amostragem. É possível observar, também, a oscilação nos valores de pico e base, tanto para a corrente quanto para a tensão, relativos ao chaveamento da fonte de soldagem (descritos em maior detalhe no Capítulo 4).

Pelos oscilogramas, principalmente pela forma de onda da corrente imposta, observa-se a ocorrência de cinco ciclos de pulso em aproximadamente 25 ms, confirmando a determinação da frequência nominal de pulsos em cerca de 184 Hz. Segundo a teoria de decomposição de sinais em séries de Fourier, uma onda retangular, ou um trem de pulsos (forma de onda típica para o processo MAG-P), pode ser descrita pela somatória de cossenos em frequências múltiplas (pares e ímpares) da frequência nominal de pulso (SMITH, 2007), como mostrado na Figura 6-6.

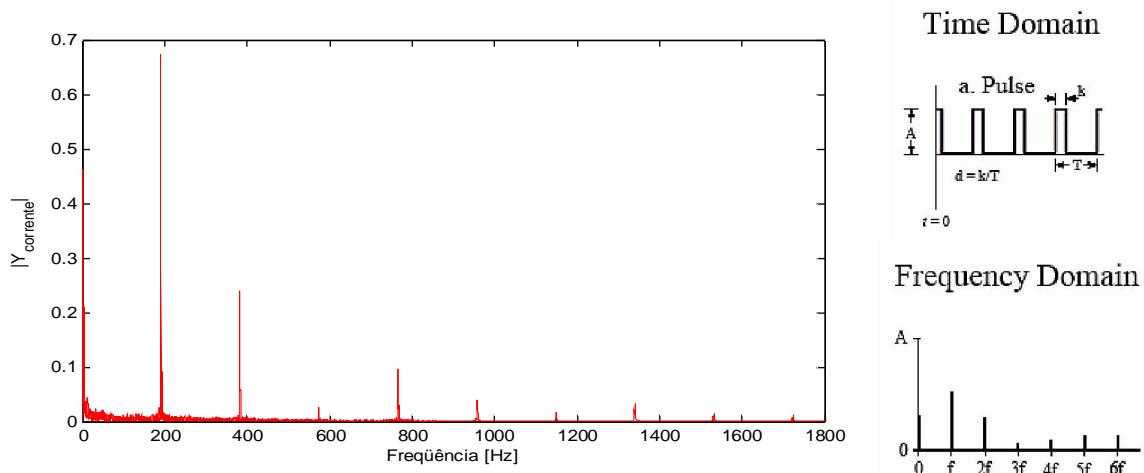


Figura 6-6 – Espectro da corrente para teste MAG0001 (esquerda) e forma de onda típica no domínio do tempo e frequência (direita) (SMITH, 2007).

A presença de frequências altas (tendendo ao infinito em um trem de pulso ideal) é o principal fator que dificulta a representação de uma onda desta forma em um domínio discreto (aquisição) e o que, acredita-se, possivelmente gera o maior erro na análise estatística dos dados.

A Figura 6-7 ilustra o mesmo teste (MAG0001), porém, comparando-se o sinal obtido pelo MoSo com o sinal de referência filtrado.

Pode-se observar, mesmo sem os cálculos dos valores estatísticos, que o sinal adquirido pelo MoSo e o seu equivalente (em taxa de amostragem) obtido pelo sistema de

referência apresentam formas de onda similares, tanto para corrente quanto para tensão, tendo os valores amostrados do MoSo sobrepostos aos valores amostrados da referência.

É possível observar a presença de 6 a 7 pontos por ciclo de pulso, não sendo um número suficientemente grande para a representação de uma forma de onda retangular, no caso de 184 Hz de frequência principal. Porém, características importantes como duração do pulso de pico, duração do pulso de base, frequência principal de pulso, ou seja, informações que podem determinar o funcionamento correto da fonte de soldagem, ou mesmo a concordância da solda com a sua EPS podem ser obtidas da forma de onda adquirida pelo sistema MoSo.

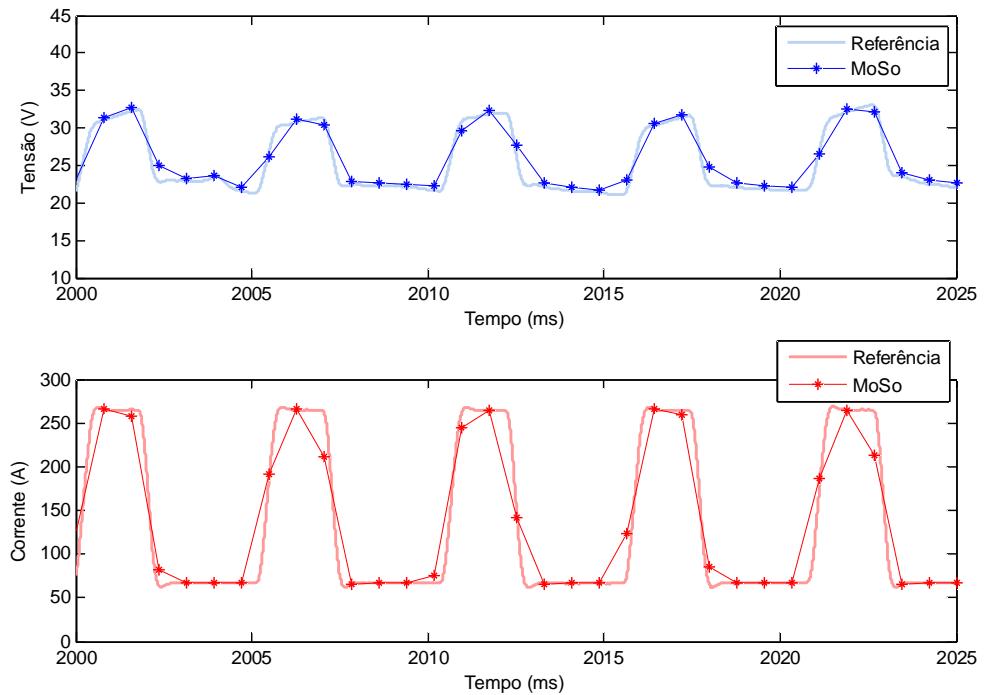


Figura 6-7 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0001 para o sistema MoSo e de referência filtrado.

A título de comparação, ilustra-se um segundo processo de MAG-P (MAG0002), com diferente frequência nominal de pulso, Figura 6-8.

Neste caso, observa-se que um ciclo de pulso tem duração de cerca de 20 ms, apresentando, portanto, frequência nominal de pulso de 50 Hz. Esta, menor que um terço da frequência nominal do teste MAG0001, é suficientemente baixa para que a aquisição, em 1280 S/s, do sistema MoSo represente a forma de onda com boa fidelidade, considerando a aplicação tecnológica. Os pontos discretos do vetor adquirido pelo MoSo acompanham todo

o desenvolvimento dos pontos discretos da referência, incluindo, por exemplo, as oscilações presentes na tensão de pico indicando a transferência metálica.

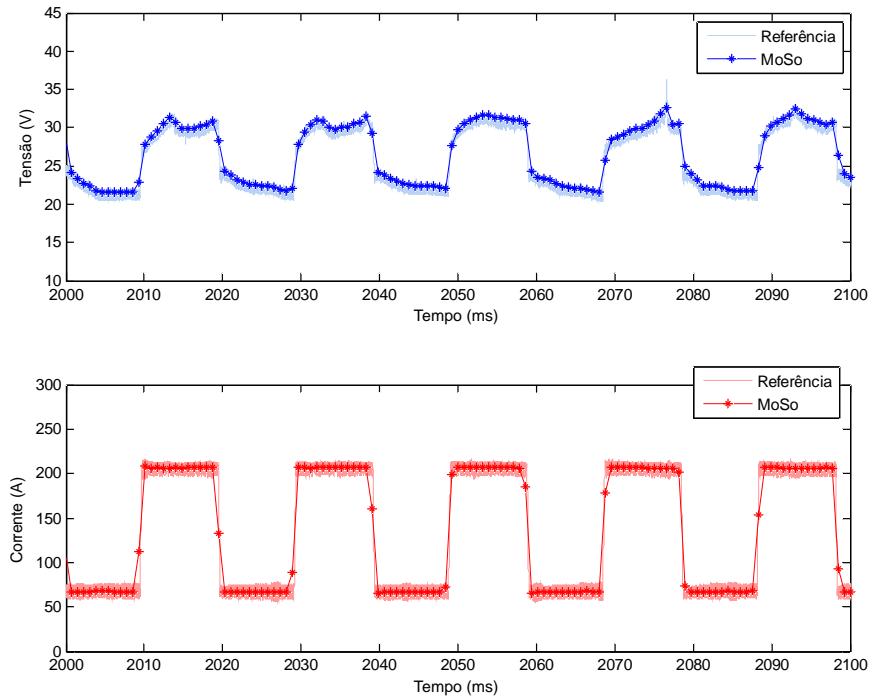


Figura 6-8 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0002 para o sistema MoSo e de referência sem filtro.

Em comparação com as formas de onda equivalente em frequência, observa-se praticamente a sobreposição completa de uma onda de corrente sobre a outra, indicando a eficiência do sistema de monitoramento em frequências mais baixas. Para as formas de onda da tensão, observa-se um pequeno deslocamento destas ($\sim 0,2$ V), apesar de apresentarem comportamento completamente similar. Acredita-se que este deslocamento pode ser resultante de erros de calibração, tanto do MoSo quanto do sistema de referência, ou mesmo da propagação de erros dos circuitos de condicionamento de sinal (quantização, variação dos valores dos resistores ou da tensão de referência do conversor A/D), além da presença do filtro analógico, pois pode-se observar que diferença diminui quando se compara com o sinal de referência filtrado digitalmente, Figura 6-9 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0002 para o sistema MoSo e de referência filtrado. Figura 6-9.

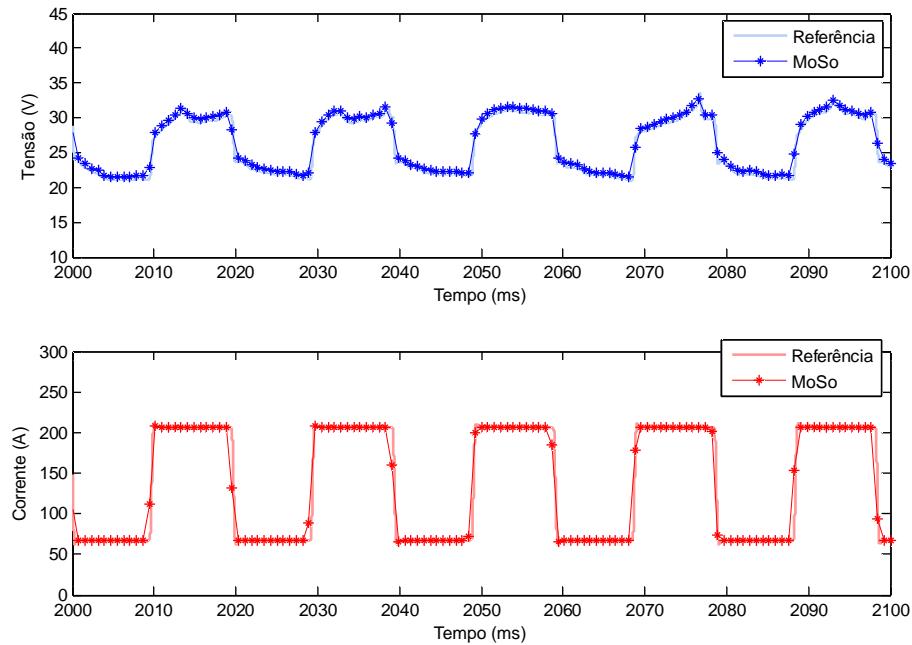


Figura 6-9 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0002 para o sistema MoSo e de referência filtrado.

6.3.1.1. Estudo da influência do filtro no overshoot e na medida dos sinais

Uma última discussão em relação ao monitoramento de processos MAG-P, (que vale para toda instrumentação de processo de soldagem, principalmente onde apresenta pulsação) é relativa a influência da frequência de corte do filtro aplicado aos sinais, e de sua consequência no *overshoot* do sistema e na final aquisição dos dados, sendo ilustrada na Figura 6-10.

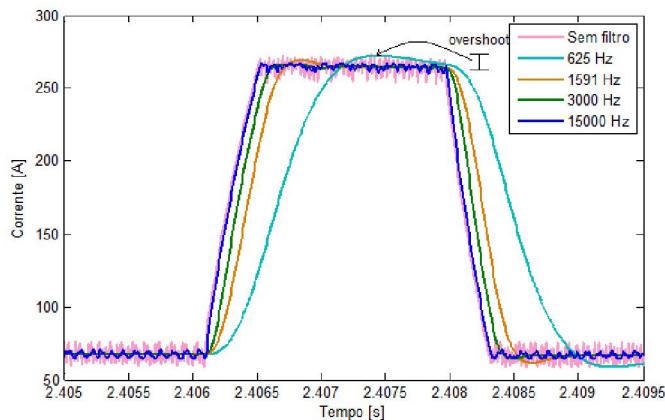


Figura 6-10 – Efeitos do *overshoot* e atraso de fase, observados em filtros com diferentes frequências de corte.

Quando se observa em maior detalhe a transição entre a corrente de base para a corrente de pulso (ou vice-versa) do sinal adquirido sem o uso de nenhum filtro passa-baixa pelo sistema de aquisição padrão (125 kS/s) e o mesmo sinal filtrado com um filtro do tipo passa-baixa de 2^a ordem de *Butterworth* digital, é possível observar a presença de *overshoot* no sinal filtrado em relação ao original, ou seja, os valores de corrente imediatamente após a transição estão acima do valor médio da corrente de pico (ou de base), “alterando” os valores reais do sinal.

Para um sistema qualquer de segunda ordem, sua resposta transiente, no domínio do tempo, a uma entrada em degrau dependente de parâmetros do sistema como o amortecimento (ζ) e a frequência natural de oscilação (ω_n) (OGATA, 2002).

Como, por exemplo, o tempo de pico (tempo que o sistema demora a atingir o pico de seu *overshoot*) t_d é dado por:

$$t_d = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (6.1)$$

O tempo de acomodação (t_s), ou seja, tempo que o sistema demora a atingir uma variação menor que 2 ou 5 % do valor DC da entrada degrau é definido por:

$$t_{s(2\%)} = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (6.2)$$

E, por fim, o valor máximo ou percentual de *overshoot* (M_p), ou seja, o pico atingido pelo sistema em resposta a uma entrada degrau é uma função do amortecimento do sistema:

$$M_p = e^{-\left(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}\right)\pi} \quad (6.2)$$

Para um filtro *Butterworth* de segunda ordem, o valor do amortecimento para qualquer frequência de corte (neste caso ω_n) em resposta a uma entrada em degrau é fixo e seu valor é $\zeta = 0,707$ (TEXAS INSTRUMENTS, 2000). Neste caso, portanto, é possível concluir que um filtro passa-baixa em menor frequência apresenta maior tempo de pico, ou seja, maior atraso, e maior tempo de acomodação (resposta mais lenta) em relação a um filtro de maior frequência. Por outro lado, toda frequência de corte deve resultar em um *overshoot* idêntico. Quando se observa a Figura 6-10 o atraso e a resposta lenta dos filtros

em menor frequência são observados, porém os valores de pico em *overshoot* não são os mesmos para diferentes frequências.

Apesar do filtro sempre apresentar mesmo percentual de *overshoot*, a forma de onda nos processos de soldagem, sejam processos MAG-P, TIG Pulsado e outros, não é uma onda retangular perfeita (degrau), apresentando tempos de subida e descida maiores que zero, então, acredita-se que a resposta dos filtros passa-baixa de segunda ordem deve variar.

Através de simulação por um algoritmo programado em linguagem Matlab® Simulink® (mostrado nos anexos), criou-se duas entradas degrau, uma ideal e outra real (com tempo de subida e descida), e calculou-se a resposta dos diferentes filtros *Butterworth* para elas (Figura 6-11 e Figura 6-12).

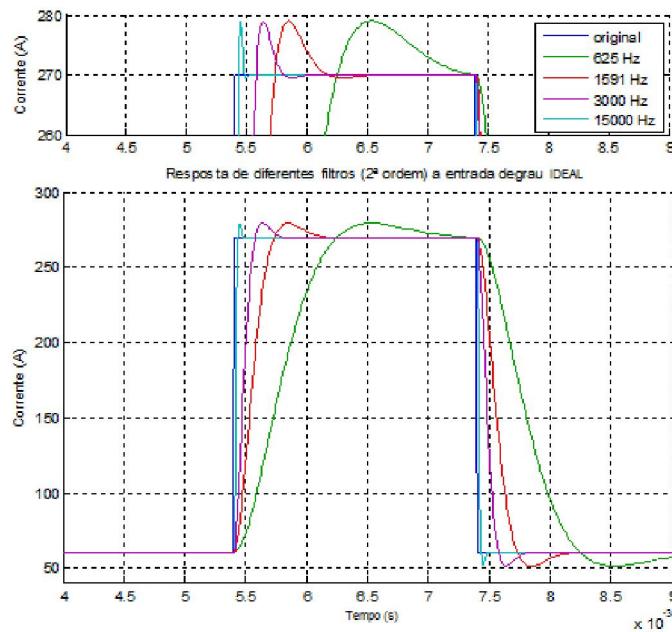


Figura 6-11 – Resposta de diferentes filtros Butterworth a entrada degrau ideal

A entrada degrau real resultou em *overshoots* crescentes para as frequências de corte decrescentes, além de maior tempo de pico e maior tempo de acomodação. A simulação comprova, portanto, o observado para as formas de onda de tensão e corrente em nos testes MAG-P. A determinação analítica da resposta dos filtros de segunda ordem de *Butterworth* a este tipo de função de entrada é de grande complexidade e, por não se tratar de um objetivo de estudo deste trabalho, não será abordada.

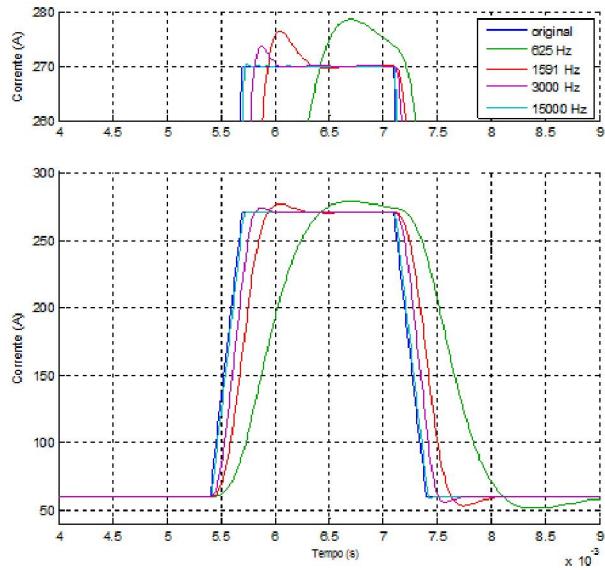


Figura 6-12 – Resposta de diferentes filtros *Butterworth* a entrada degrau real

Após o estudo realizado, continua-se a avaliação das soldagens MAG goticular, onde os sinais de tensão e corrente apresentam baixas freqüências, sendo predominantemente compostas por um nível DC. A taxa de amostragem utilizada pelo MoSo é suficiente para representar ambos os formatos de onda sem perdas de informação relevantes, conforme ilustrado na Figura 6-13.

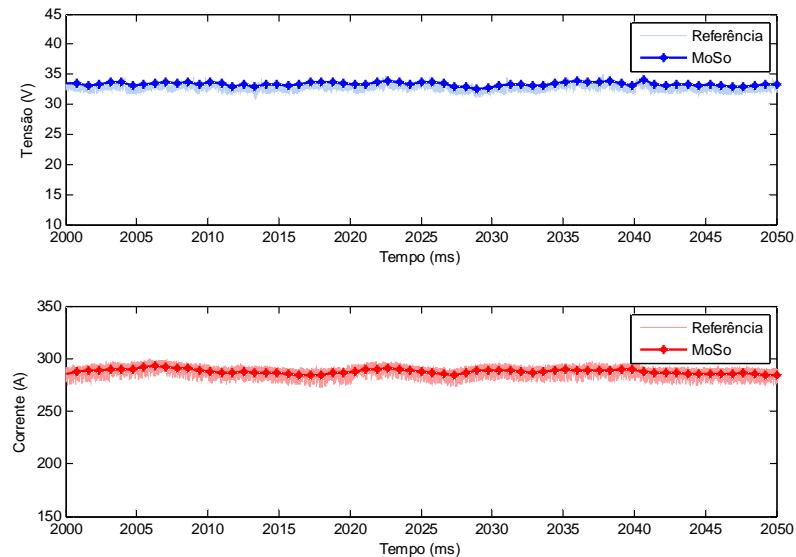


Figura 6-13 – Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0003 para o sistema MoSo e de referência sem filtro.

Quando se aplica o filtro sobre o sinal de referência, as diferenças entre o sinais ficam sem praticamente imperceptíveis, sendo completamente aplicável o sistema MoSo para soldagem MAG goticular, Figura 6-14.

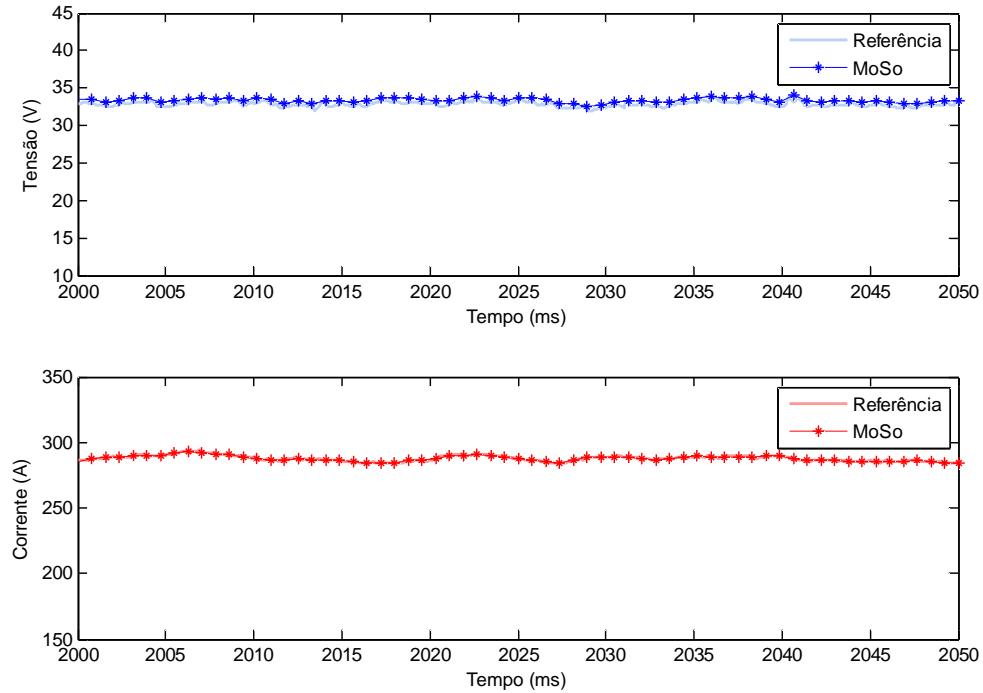


Figura 6-14 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0003 para o sistema MoSo e de referência filtrado.

Os resultados numéricos para os valores médio e eficaz para a corrente e a tensão do sistema MoSo, pelo sistema de referência do laboratório e pela forma de onda filtrada para os testes MAG-P e goticular são mostrados na Tabela 6.4. A coluna à direita, para cada um dos testes, apresenta o erro relativo observado entre cada um dos valores calculados, ou seja, entre o valor do MoSo em comparação com o valor de referência não filtrado e com o valor de obtido pelo sistema de referência após a passagem do filtro passa-baixa. Por fim, as linhas inferiores apresentam o valor do coeficiente de correlação (de Pearson) entre as três formas de onda de corrente e tensão.

Observa-se que, como esperado, o processo MAG-P de maior frequência apresentou maior erro relativo entre os valores médio e eficaz para a forma de onda da corrente que o processo MAG-P de menor frequência e o processo em transferência goticular.

Os valores médios dos sinais apresentaram erros menores que 1%, e os eficazes menores que 2%, mostrando que mesmo não sendo capaz de amostrar o formato de onda

de forma satisfatória para 200 Hz, os valores médios e eficazes são representativos dos processos.

Tabela 6.4 – Resultados obtidos para as soldagens por MAG-P e goticular.

Grandezas	MAG0001		MAG0002		MAG0003	
	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro
Imoso_med*	138		142		277	
		0,73%		0,00%		0,00%
Ilab_med*	137		142		277	
		0,73%		0,00%		0,00%
Ifilt_med*	137		142		277	
Imoso_rms*	161		157		279	
		1,83%		0,63%		0,00%
Ilab_rms*	164		158		279	
		1,23%		0,63%		0,00%
Ifilt_rms*	163		158		279	
Umoso_med*	25,7		27,4		33,6	
		0,39%		1,48%		1,82%
Ulab_med*	25,6		27,0		33,0	
		0,39%		1,48%		1,82%
Ufilt_med*	25,6		27,0		33,0	
Umoso_rms*	26,1		28,3		33,6	
		0,00%		1,43%		1,51%
Ulab_rms*	26,1		27,9		33,1	
		0,00%		1,43%		1,51%
Ufilt_rms*	26,1		27,9		33,1	
U_Xcorr*	0,83		0,99		0,71	
U_Xcorr_filt*	0,92		1,00		0,86	
I_Xcorr*	0,90		0,98		0,99	
I_Xcorr_filt*	0,96		0,99		1,00	

Notas: Os sufixos _med e _rms indicam o resultado numérico de cálculo de valor médio e eficaz, respectivamente. Para a corrente (em A) utiliza-se sempre o prefixo I e para a tensão (em V), o prefixo U. Os indicadores dos sistemas são: moso para o MoSo, lab para o sistema de referência do laboratório e filt para a forma de onda de referência filtrada. Xcorr é a correlação entre MoSo e referência e Xcorr_filt entre MoSo e filtrado.

* Os valores de corrente são em unidades de Ampere e os de tensão em Volts.

É importante observar, neste ponto, que o processo de calibração realizado nos dois sistemas não é considerado o ideal. Como já citado anteriormente, de acordo com a norma de calibração para fontes de soldagem e instrumentos de medida, deve-se utilizar equipamentos calibrados com precisão de, no mínimo, duas vezes a precisão do dispositivo a ser calibrado e, estes devem estar com a calibração válida e realizada por institutos credenciados, possibilitando a rastreabilidade dos instrumentos.

Todos os valores da correlação de Pearson para os testes MAG-P e MAG goticular estão acima de 0,7, indicando forte correlação entre os sinais. Para as formas de onda imposta pela fonte de soldagem (corrente), as correlações apresentaram valores acima 0,9, chegando ao valor máximo (1,0) quando comparado com o sinal filtrado.

Neste ponto é importante observar que a correlação de Pearson tem como resultado a comparação entre as formas dos sinais observados, não levando em consideração, porém, o seu nível DC. Ou seja, duas funções senoidais de mesma frequência com uma diferença entre suas amplitudes possuem correlação máxima, mas um atraso em fase de uma função para a outra gera perda de correlação entre elas, como é ilustrado na Figura 6-15.

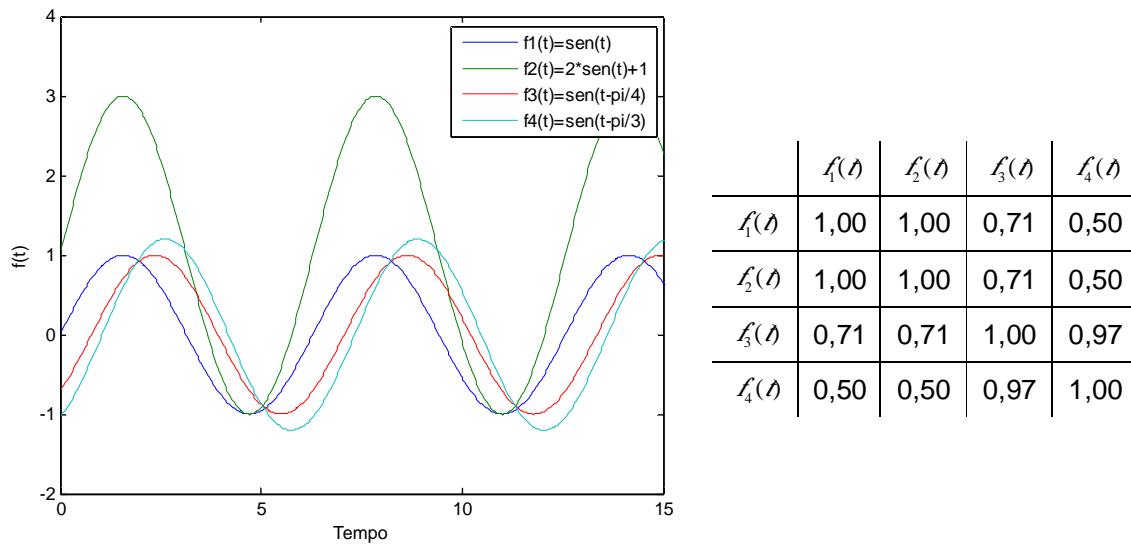


Figura 6-15 – Diferenças entre funções senoidais (esquerda) e matriz de correlação de Pearson destas (direita).

Portanto, acredita-se que o atraso de fase inserido no sinal adquirido pelo MoSo em relação à referência, devido à presença do filtro analógico, pode ser responsável pela diminuição da correlação entre alguns sinais observados. Um erro na sincronia dos dois

sinais obtidos também acarretaria a perda da força da correlação dos sinais. Sendo assim, a correlação obtida entre os sinais MoSo e referência foram considerados satisfatórios.

6.3.2. Soldagens MAG curto-círcuito

A Tabela 6.5 apresenta os valores dos parâmetros operacionais para a realização dos testes em soldagens com transferência metálica por curto-círcuito.

Tabela 6.5 – Parâmetros operacionais para soldagem por curto-círcuito.

Teste	Tensão [V]	Valim [m/min]	DBCP [mm]
MAG0006	18,0	4,0	15
MAG0007	25,0	10,0	15
MAG0008	19,0	4,0	23
MAG0010	27,0	8,0	23

Notas: soldagem realizada com fonte de soldagem Inversal 450, velocidade de soldagem de 20 cm/min, gás de proteção Ar+25%CO₂ com vazão de 14 l/min, arame de solda ER70S-6 1,0 e 1,2 mm². Valim: velocidade de alimentação de arame. DBCP: distância bico de contato peça.

Para a validação do sistema MoSo para soldagens MAG curto-círcuito, optou-se pela discussão dos processos com menor e maior frequência de transferência metálica. Através do cálculo da FFT para cada um dos sinais de tensão adquiridos, estimou-se a frequência de curto-círcuito aproximada para cada um dos testes realizados, resumidas na Tabela 6.7

Tabela 6.6 – Frequência estimada de curto-círcuito.

Teste	Frequência de curto-círcuito [Hz]
MAG0006	75
MAG0007	40
MAG0008	80
MAG0010	50

Para o teste de menor frequência, MAG0007, a Figura 6-16 mostra o comparativo entre os sinais adquiridos, já sincronizados, tanto de tensão quanto de corrente, sem a aplicação do filtro passa-baixa digital aos sinais do sistema de referência.

Observou-se que as formas de onda adquiridas pelo MoSo, tanto para corrente quanto para tensão, apresentaram comportamento semelhante ao sistema de referência e, para esta frequência baixa de curto-círcuito, a taxa de amostragem mostrou-se muito acima do necessário, representando, visualmente, de forma fiel o observado pelo sistema de referência.

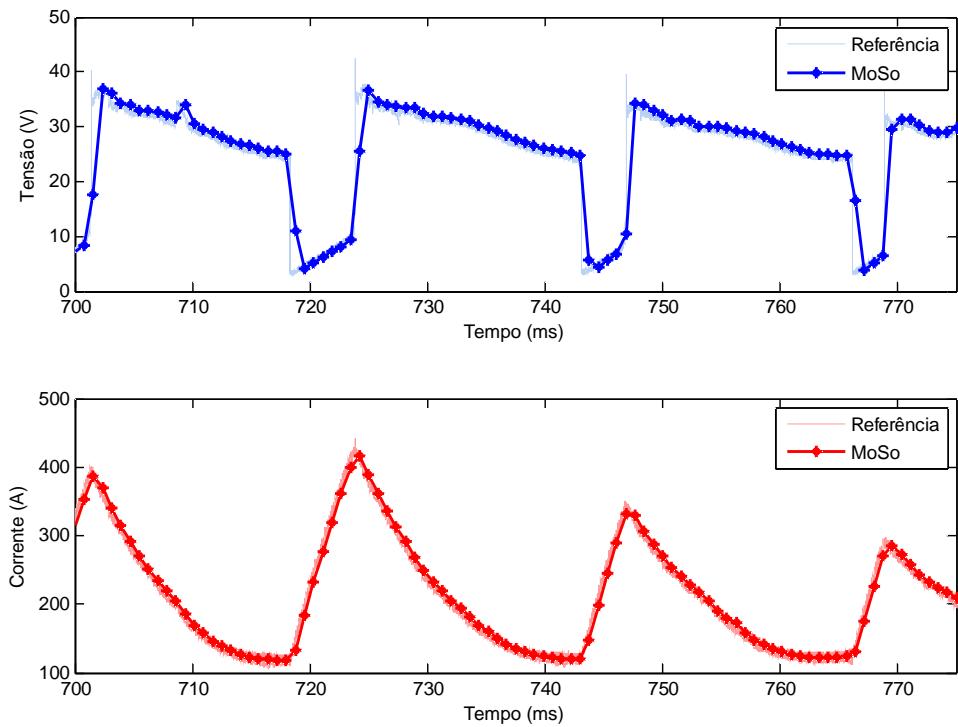


Figura 6-16 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0007 para o sistema MoSo e de referência.

Para o teste de maior frequência de curto-circuito, MAG0008, as formas de onda para tensão e corrente adquiridas pelo MoSo e pelo sistema de referência (sem o uso do filtro digital) são ilustradas na Figura 6-17. Observou-se que, mesmo para uma maior frequência de curto-circuito, a taxa de amostragem do MoSo provou-se suficiente. Visualmente, as formas de onda adquiridas pelo sistema sem fio estão representando de forma fiel as observadas pelo sistema de referência.

Como citado anteriormente, as frequências de curto-circuito consideradas estáveis variam de 50 a 110 curtos por segundo. Autores (SCOTTI e PONOMAREV, 2008) afirmam que as frequências de curto-circuito variam classicamente de 20 a 200 vezes por segundo.

Por ser uma forma de onda menos complexa, em termos de presença de harmônicas pares e ímpares, que a forma de onda típica para MAG-P, e sendo o MoSo satisfatório para o segundo processo em frequências próxima de 200 Hz, pelos resultados mostrados diz-se que o sistema de monitoramento proposto, MoSo, é suficiente para o monitoramento de todo e qualquer processo MAG com transferência por curto-circuito para abordagem tecnológica.

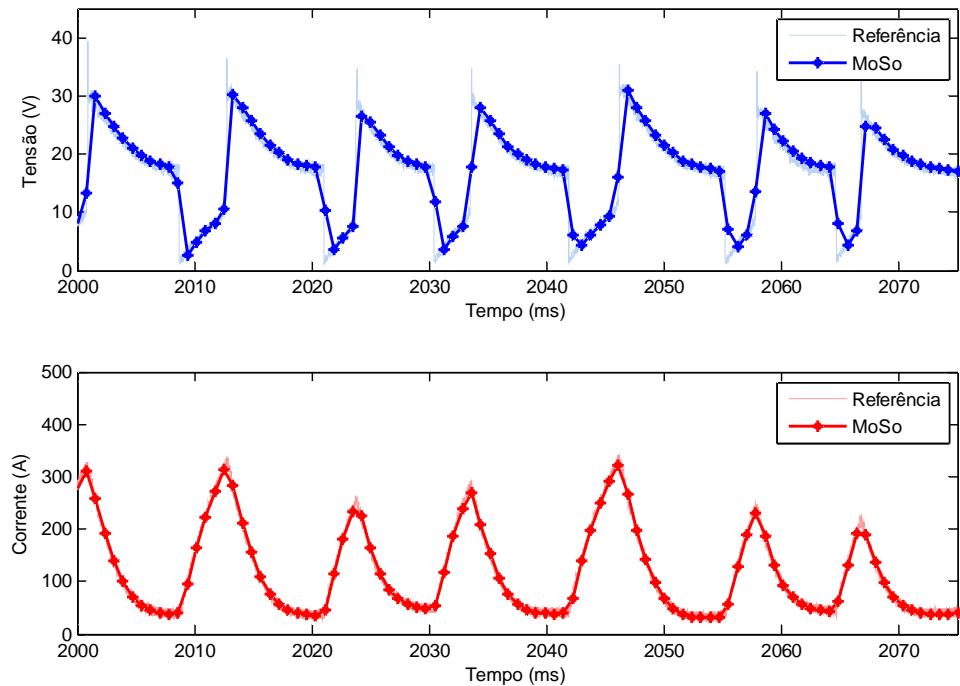


Figura 6-17 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0008 para o sistema MoSo e de referência.

Os resultados numéricos para os valores médio e eficaz para a corrente e a tensão do sistema MoSo, pelo sistema de referência do laboratório e pela forma de onda filtrada para soldagens MAG curto-círcuito são mostradas na Tabela 6.7.

Como esperado pela observação das formas de onda, os valores calculados de média a eficaz, tanto para corrente quanto para tensão mostrou-se abaixo de 2% de erro, menor que critério de erro estabelecido por norma.

Os valores de erro para a tensão mostraram-se superiores aos erros da corrente, o que, em primeira observação, é contraditório para um processo com fonte em modo de tensão constante. Observa-se, entretanto, que o sinal de tensão apresenta transições abruptas, enquanto o sinal da corrente é mais suave (pelo efeito da indutância), sendo que um sinal com transições mais suaves pode ser mais facilmente representado por sistemas de medição com baixas taxas de aquisição.

Os coeficientes de correlação de Pearson entre as formas de onda de tensão e corrente para os testes com transferência por curto-círcuito mostraram-se todos acima de 0,85, indicando a forte correlação entre as formas de onda já observada pelos oscilogramas. A correlação para a corrente, outra vez, mostrou-se superior para a tensão, corroborando a tendência observada nos erros das análises estatísticas.

Tabela 6.7 – Resultados obtidos para as soldagens por MAG curto-círcuito.

Grandeza	MAG0006		MAG0007		MAG0008		MAG0010	
	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro
Imoso_med*	120		219		87		229	
		0,84%		0,00%		1,16%		0,44%
Ilab_med*	119		219		86		228	
		0,84%		0,00%		1,16%		0,44%
Ifilt_med*	119		219		86		228	
Imoso_rms*	141		236		123		259	
		0,00%		0,00%		0,81%		0,00%
Ilab_rms*	141		236		124		259	
		0,00%		0,00%		0,81%		0,00%
Ifilt_rms*	141		236		124		259	
Umoso_med*	16,3		24,8		19		22,6	
		1,88%		1,64%		0,00%		1,80%
Ulab_med*	16,0		24,4		19		22,2	
		1,88%		1,64%		0,00%		1,80%
Ufilt_med*	16,0		24,4		19		22,2	
Umoso_rms*	18,5		26,2		20,5		23,7	
		1,09%		1,55%		0,97%		1,72%
Ulab_rms*	18,3		25,8		20,7		23,3	
		1,09%		1,55%		0,49%		1,72%
Ufilt_rms*	18,3		25,8		20,6		23,3	
U_Xcorr*	0,93		0,95		0,95		0,87	
U_Xcorr_filt*	0,96		0,96		0,98		0,93	
I_Xcorr*	0,99		1,00		0,99		0,99	
I_Xcorr_filt*	1,00		1,00		1,00		1,00	

Notas: Os sufixos _med e _rms indicam o resultado numérico de cálculo de valor médio e eficaz, respectivamente. Para a corrente (em A) utiliza-se sempre o prefixo I e para a tensão (em V), o prefixo U. Os indicadores dos sistemas são: moso para o MoSo, lab para o sistema de referência do laboratório e filt para a forma de onda de referência filtrada. Xcorr é a correlação entre MoSo e referência e Xcorr_filt entre MoSo e filtrado.

* Os valores de corrente são em unidades de Ampere e os de tensão em Volts.

6.3.3. Soldagens TIG

Os testes de validação do sistema de monitoramento sem fio pelo processo TIG foram realizados com soldagens em corrente pulsada e pulsada alternada (CA).

A Tabela 6.8 apresenta os valores dos parâmetros operacionais para a realização destes testes. Estes valores foram selecionados a partir do trabalho de Rocha (2001).

Para o teste TIG corrente pulsada (TIG0002) a Figura 6-18 mostra o comparativo entre os sinais adquiridos, já sincronizados, tanto de tensão quanto de corrente, aos sinais do sistema de referência sem a aplicação do filtro passa-baixa digital.

Tabela 6.8– Parâmetros operacionais para soldagem processo TIG.

Teste	I_p [A]	t_p [ms]	I_b [A]	t_b [ms]	f [Hz]	DEP [mm]
TIG0002	-250	150	-100	400	1,8	3
TIG0003	-250	2	50	8	100,0	3
TIG0004	-150	5	50	15	50,0	3
TIG0005	-150	2	50	4	167,0	3
TIG0006	-150	2	50	3	200,0	3

Notas: soldagens realizadas com fonte de soldagem IMC Inversal 450, velocidade de soldagem de 15 cm/min, gás de proteção Ar puro com vazão de 12 l/min, eletrodo 2,4 mm W-2%Th. I_p : corrente de pico. t_p : tempo de pico. I_b : corrente de base. t_b : tempo de base. f: frequência de pulsação. Valim: velocidade de alimentação de arame. DEP: distância eletrodo peça.

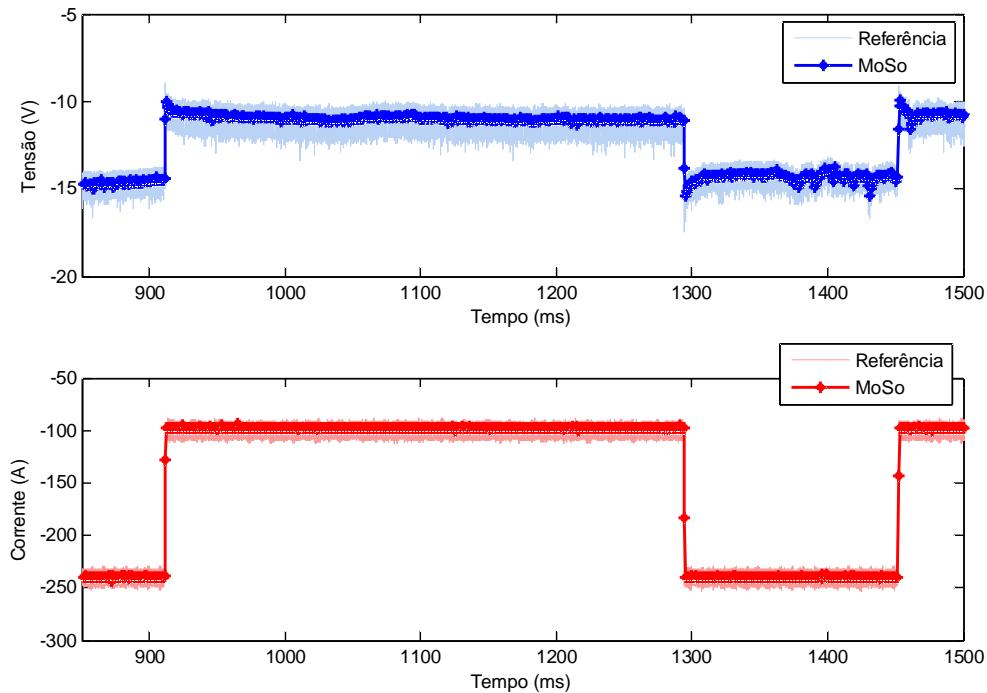


Figura 6-18 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste TIG0002 para o sistema MoSo e de referência.

Observou-se que a forma de onda adquirida pelo MoSo apresentou, visualmente, boa fidelidade à forma de onda do sistema de referência, tanto para a corrente quanto para a tensão. Como o tempo de ciclo de pulso é alto para este processo TIG pulsado, a taxa de

amostragem do sistema de monitoramento sem fio mostra-se muito acima do necessário para uma boa representação da forma de onda, assim como para a análise estatística.

Para os processos TIG CA, escolheu-se para análise visual o teste com maior frequência de pulsos, ou seja, o ensaio TIG0006. A Figura 6-19 e Figura 6-20 mostram o comparativo entre os oscilogramas obtidos pelos dois sistemas.

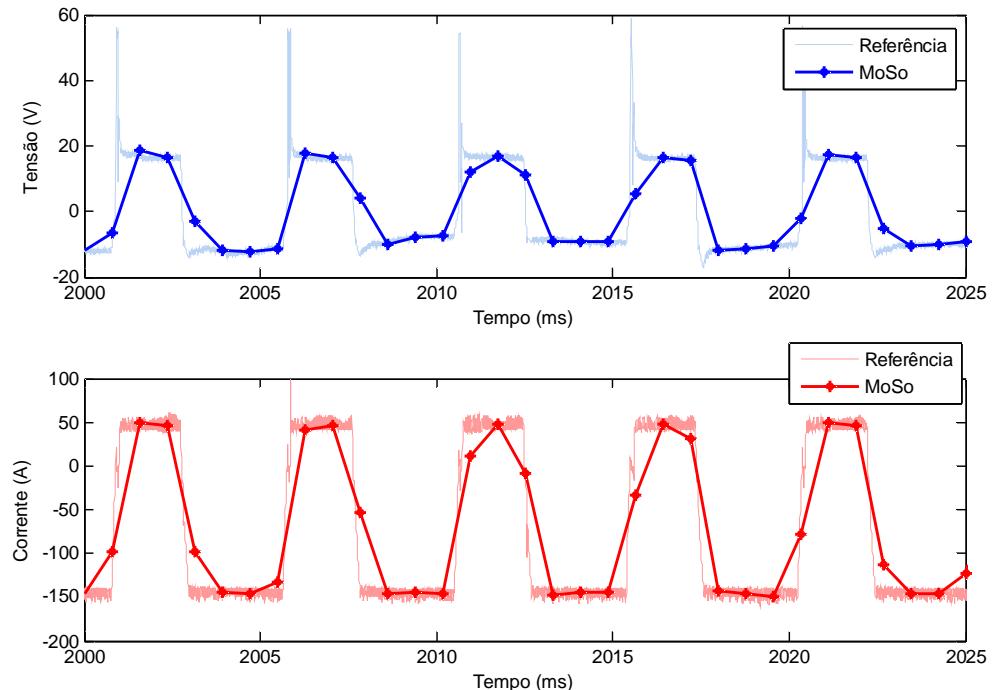


Figura 6-19 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste TIG0006 para o sistema MoSo e de referência.

Pode-se observar que os oscilogramas dos dois sistemas apresentam formas de onda similares, tanto para corrente quanto para tensão, tendo os valores discretos do MoSo sobrepostos aos valores discretos da referência. A taxa de amostragem do MoSo gera aproximadamente 6 pontos por ciclo de pulso, não sendo um número suficientemente grande para a representação do formato de onda com detalhes. Porém, assim como ocorreu nos testes de MAG-P, informações que podem determinar o funcionamento correto da fonte de soldagem, ou mesmo a concordância da solda com a sua EPS podem ser obtidas da forma de onda adquirida pelo sistema MoSo, conforme indicam os resultados da Tabela 6.9.

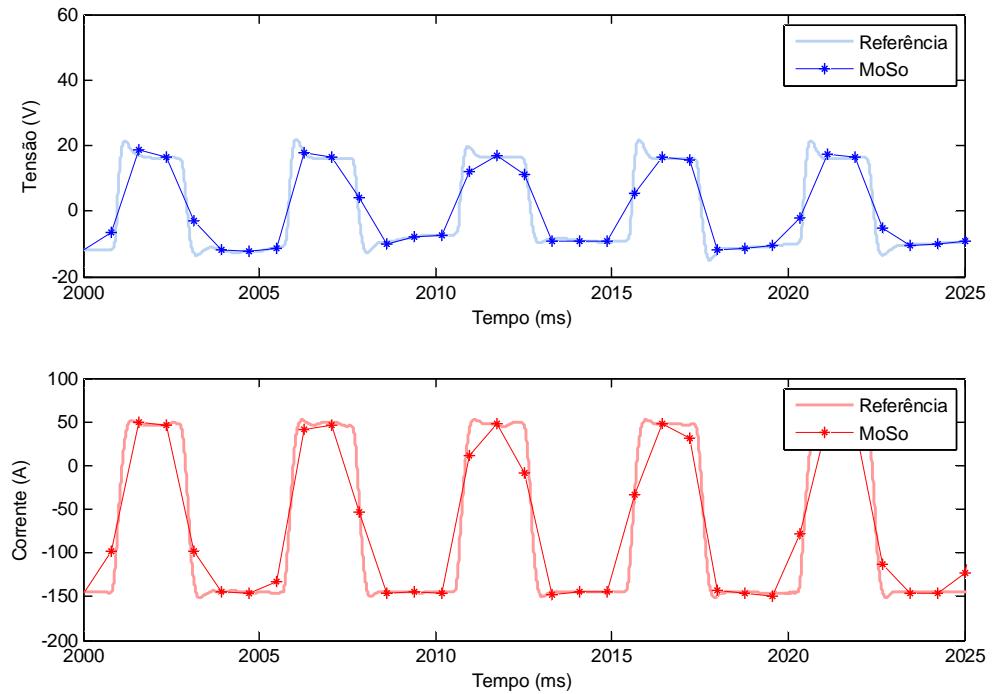


Figura 6-20 –Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste TIG0006 para o sistema MoSo e de referência filtrado.

Um detalhe importante no processo TIG CA é a presença dos picos de tensão, que se acredita ser inerente ao processo de reformação do arco nos momentos de mudança da polaridade, ou ainda a tensão em vazio da fonte. Pela aquisição do sistema de referência os picos de tensão (que representam uma alta componente em frequência) estão visíveis e, como esperado, comportam-se de acordo com o princípio físico de emissão eletrônica para cada polaridade (pico positivo muito superior ao pico negativo).

Neste contexto, ressalta-se que a inserção de um filtro passa-baixa nos circuitos de condicionamento de sinal do MoSo fez com que esta componente de alta frequência (pico de reformação do arco) fosse eliminada do sinal adquirido. Quando o sinal de referência é filtrado, o pico de reformação é confundido a um pico de *overshoot* do filtro (toda avaliação do Item 6.3.1.1 vale para por soldagem curto circuito e pulsada, MIG/MAG, TIG, PLASMA e outras). Portanto, quando se deseja obter este tipo de detalhamento do processo TIG CA, ou seja, uma abordagem científica deste processo, afirma-se que um monitoramento adequado deve ser feito com alta taxa de amostragem e sem uso de filtros analógicos ou digitais.

Os resultados numéricos para os valores médio e eficaz para a corrente e a tensão do sistema MoSo, pelo sistema de referência do laboratório e pela forma de onda filtrada para os testes TIG pulsado e CA são mostradas na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Resultados obtidos para as soldagens por TIG.

Grandezas	TIG0002		TIG0003		TIG0004		TIG0005		TIG0006	
	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro
Imoso_med*	140		195		119		103,00		94	
		2,19%		2,01%		1,65%		5,50%		7,84%
Ilab_med*	137		199		121		109,00		102	
		2,19%		1,52%		1,65%		5,50%		6,93%
Ifilt_med*	137		198		121		109,00		101	
Imoso_rms*	155		211		127		115,00		107	
		1,97%		1,40%		0,78%		4,17%		5,31%
Ilab_rms*	152		214		128		120,00		113	
		1,97%		1,40%		0,78%		3,36%		4,46%
Ifilt_rms*	152		214		128		119,00		113	
Umoso_med*	12,3		13,9		13,5		12,40		11,8	
		0,00%		6,71%		3,57%		12,06%		13,87%
Ulab_med*	12,3		14,9		14,0		14,10		13,7	
		0,00%		5,44%		2,88%		9,49%		11,28%
Ufilt_med*	12,3		14,7		13,9		13,70		13,3	
Umoso_rms*	12,5		14,6		13,8		13,10		12,6	
		0,00%		7,59%		4,17%		12,08%		14,29%
Ulab_rms*	12,5		15,8		14,4		14,90		14,7	
		0,00%		5,19%		2,82%		7,75%		8,70%
Ufilt_rms*	12,5		15,4		14,2		14,20		13,8	
U_Xcorr*	0,96		0,83		0,85		0,73		0,84	
U_Xcorr_filt*	1,00		0,91		0,91		0,85		0,89	
I_Xcorr*	1,00		0,91		0,90		0,85		0,89	
I_Xcorr_filt*	1,00		0,95		0,94		0,91		0,92	

Notas: Os sufixos _med e _rms indicam o resultado numérico de cálculo de valor médio e eficaz, respectivamente. Para a corrente (em A) utiliza-se sempre o prefixo I e para a tensão (em V), o prefixo U. Os indicadores dos sistemas são: moso para o MoSo, lab para o sistema de referência do laboratório e filt para a forma de onda de referência filtrada. Xcorr é a correlação entre MoSo e referência e Xcorr_filt entre MoSo e filtrado.

* Os valores de corrente são em unidades de Ampere e os de tensão em Volts.

O processo TIG pulsado apresentou erros em suas análises estatísticas abaixo de 2,5% para a corrente e nulo para a tensão (baixa frequência de pulsação). Os cálculos estatísticos para os testes dos processos TIG CA apresentaram os maiores erros

percentuais de toda a validação do MoSo, atingindo cerca de 14% de erro para a análise da tensão no teste com maior frequência de pulsos, e cerca de 8% de erro para a corrente. O maior erro observado para o sinal de tensão pode ser atribuído ao fato do mesmo ser mais retangular que o de corrente (mais suave), isso porque o arco é um sistema não linear. Acredita-se que grande parcela destes erros é derivada da própria natureza alternada do processo em conjunto com a matemática dos cálculos estatísticos para a média retificada e o valor eficaz. Uma breve análise será apresentada a seguir.

Quando uma onda retangular alternada sofre o processo de retificação (cálculo do módulo de todos os pontos) ou a mesma é elevada ao quadrado para o cálculo do valor eficaz, sua forma de onda resultante apresenta em todos os seus ciclos pontos de inflexão. Ou seja, quando se retifica uma onda alternada, surgem vales nos pontos onde, anteriormente, a forma de onda passava pelo valor zero da abscissa. Os pontos de inflexão são componentes de alta frequência e, portanto, quando se utiliza uma baixa taxa de aquisição e/ou filtros passa-baixa, as formas de onda resultantes não conseguem acompanhá-las, ou seja, os pontos de inflexão não são representados nos sinais adquiridos com o uso de filtros. Este erro na representação gera, posteriormente, erros nos cálculos estatísticos, como ilustra a Figura 6-21.

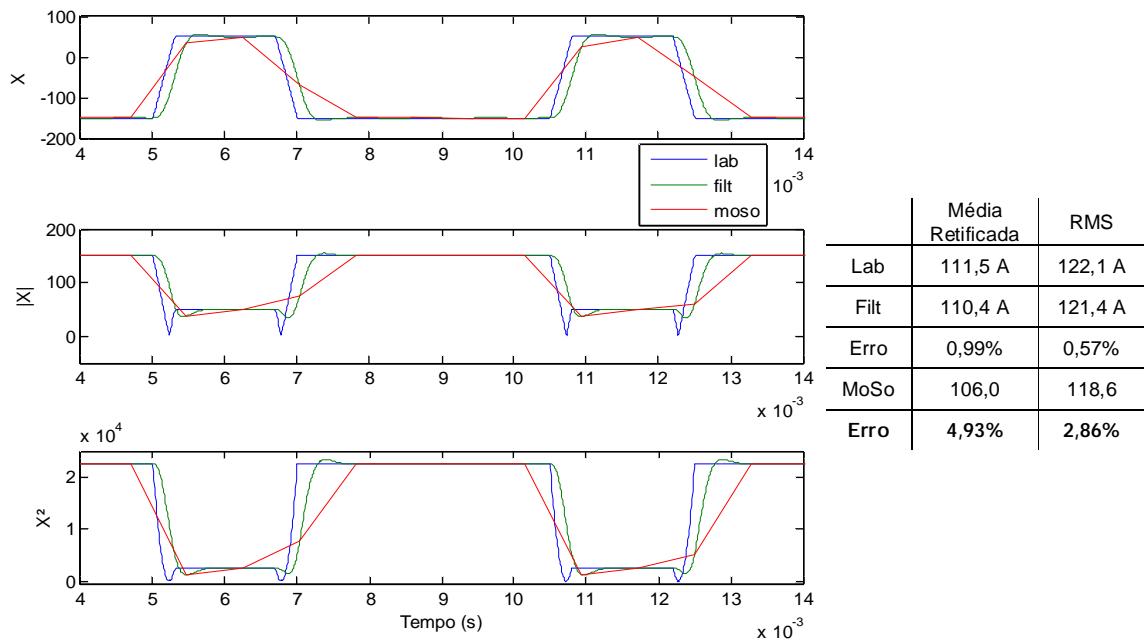


Figura 6-21 – Influência da retificação e soma quadrática sobre formas de onda (esquerda) e análise estatística destas (direita).

Simulou-se, através do MatLAB® Simulink®, uma forma de onda trapezoidal, com tempos de subida e descida, valores e tempos de pico e base próximos ao observado no

processo TIG0006. Deste sinal original (lab), foram calculadas as formas de onda retificada e quadrática, simulando os passos de cálculo para média retificada e RMS. As três formas de onda originais (em azul), foram passadas em um filtro passa-baixa de Butterwoth de segunda ordem com frequência de corte de 1591 Hz (verde) e, por fim, simulou-se a aquisição da onda filtrada com taxa de amostragem de 1280 S/s (vermelho).

Pela análise estatística desta forma de onda ideal simulada, observa-se que o erro gerado apenas pela retificação de um sinal em seu representante em menor taxa de amostragem chega a 5% e, quando se eleva os valores ao quadrado, o erro chega a 3%. No caso dos testes *in loco*, as forma de onda ainda tem as erros de calibração dos sistemas e incertezas de medidas que podem resultar em um erro ainda maior.

Apesar dos erros nas análises estatísticas, pode-se afirmar que as formas de onda adquiridas pelo MoSo estão fortemente correlacionadas com as formas de onda do sistema de referência, já que para todos os processos TIG, os coeficientes de correlação de Pearson foram superiores a 0,73 e, em sua maioria, acima de 0,85.

6.4. Cálculo Estimado de Custo do *Hardware*

Finalizando a etapa final de resultados e discussão, tem-se o cálculo aproximado dos custos totais de *hardware* do sistema de monitoramento sem fio dos processos de soldagem a arco (MoSo) resumidos na Tabela 6.10.

Sendo todos os valores cotados para os equipamentos em dólar, na revenda autorizada dos fabricantes, sendo dentro ou fora do país, podendo assim incidir tarificações e custos de transporte.

Tabela 6.10 – Custo estimado de *hardware* do MoSo (24/07/2011).

Descrição	Valor (US\$)
Kit de desenvolvimento Explorer 16BR	190,00
dsPIC33FJ256GP710-I/PT	
Placa PICtail Plus ZeroG 802.11	60,00
Encoder Relativo 64 pulsos EM14	50,00
Transdutor Efeito Hall LEM HT500-SBD	100,00
Componentes Eletrônicos	100,00
Roteador Wi-Fi AirLive 5470	50,00
Notebook (PC) para visualização e armazenamento de dados	700,00
TOTAL	1250,00

Deve-se ressaltar que o computador responsável pelo armazenamento e visualização dos dados e o roteador Wi-Fi podem ser quaisquer disponíveis, sem muitos requisitos de *hardware*, podendo apresentar valor maior ou menor.

O custo de hardware final do sistema de monitoramento ficou em torno de US\$ 550,00. Sendo que a título de comparação, um sistema de monitoramento USB utilizando uma placa de aquisição da *National Instruments* tem custo mínimo de US\$ 245,00, com adição de US\$ 250,00 para o condicionamento dos sinais (similar ao utilizado no sistema deste trabalho), e cerca de US\$1325,00 pela licença de utilização do *software* LabVIEW®, totalizando em US\$1820,00 (não se está incluindo o preço do computador). Uma placa de aquisição sem fio Wi-Fi para a realização da mesma tarefa, da *National Instruments* tem custo mínimo de US\$945,00, totalizando um sistema de monitoramento sem fio de US\$2420,00 (National Instruments, 2011), também sem o custo do computador.

Vale ressaltar que este é um custo aproximado de hardware. Se pensar em custo de desenvolvimento científico (este pode ser realizado em universidade (sendo o caso do trabalho), em empresa e no sistema produtivo), o mesmo é mais amplo, incluindo:

- bolsa de pesquisa ou salário do pesquisador;
- materiais de consumo para ensaios;
- equipamentos de infraestrutura (fonte de soldagem, sistema de calibração e instrumentação, entre outros);
- pessoal de suporte;
- espaço físico;

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Partindo-se do objetivo principal de projeto, construção e avaliação de um sistema de monitoramento sem fio de variáveis dos processos de soldagem a arco, de tecnologia própria, que apresente escalabilidade, portabilidade, autonomia, baixo custo e flexibilidade/simplicidade de operação, é possível concluir que:

a) *Em relação à caracterização dos sinais elétricos de soldagem a arco:*

- Para as fontes de soldagem utilizadas (IMC *digitec* 600 e Inversal 450), a tensão mostrou máximo nível DC em 70 V, e chaveamento em torno de 25 kHz (de interesse apenas na abordagem científica);
- Os testes realizados em soldagens apresentaram frequências de interesse para tecnologia de máximas de 300 Hz;
- O filtro passa-baixa utilizado de 625 Hz não se mostrou adequado, com alto *overshoot*, atraso em fase e atenuação das amplitudes de interesse quando implementado analogicamente.
- A taxa de amostragem em 1280 S/s mostrou-se suficiente para a reprodução dos sinais adquiridos, para uma abordagem tecnológica;
- Para abordagem científica, taxas de amostragem de 2000 S/s são indicadas. Em soldagem pulsada com cerca de 200 Hz, amostragens de 4000 S/s se fazem necessárias. Para ambas as abordagens, tecnológica e científica, os sinais filtrados analogicamente em 1591 Hz é suficiente.
- Para se observar detalhadamente os sinais dos processos de soldagem, amostragem da ordem de 125 kS/s são recomendadas, sem a utilização de filtros.

- O sinal de corrente pode ser medido em qualquer ponto do circuito elétrico que compreende o arco elétrico, visto que sua característica de estar em série garante que o mesmo valor seja lido em qualquer ponto.
- O sinal de tensão deve ser medido entre a peça e o bico de contato, pois os cabos que ligam os bornes da fonte ao bico de contato, e a peça funcionam como indutores que suavizam a variação da tensão, apresentando medida mais corretas do arco (interesse), e não do funcionamento da fonte de soldagem.

b) Em relação aos componentes selecionados para o sistema físico:

- Para a comunicação de dados escolheu-se o padrão Wi-Fi (IEEE 802.11), e como módulo de comunicação o ZeroG ZG2100M da Microchip®;
- Pela restrição de tempo, escolheu-se o kit Explorer 16 BR, da LabTools como plataforma de desenvolvimento e o microcontrolador de 16 bits dsPIC33FJ256GP71;
- Para transdução do sinal de corrente, o transdutor por efeito Hall LEM HT500-SBD, e para a velocidade de alimentação, o encoder relativo com duas fases EM14, da Bourns;
- Os circuitos de condicionamento dos sinais para os sinais de tensão, corrente (filtro de passa-baixa de 1591 Hz de frequência de corte, ceifadores e de tensão de referência) e velocidade de alimentação foram projetados e calibrados e validados através de testes com leituras por osciloscópios e soldagens *in loco*, mostrando-se adequados.

c) Em relação à interface homem-máquina:

- A interface homem-máquina é composta de sete LEDs indicadores, dois botões atuadores e de um LCD, provendo informações ao usuário como IP do sistema de monitoramento, tempo de *ping*, e estado de monitoramento e aquisição;
- A visualização dos dados é por *Webserver*, possuindo três páginas de acesso do usuário, com página inicial contendo indicadores de conexão, página de configuração e visualização dos oscilogramas e página de ajuda.

- A escolha das IHMs se mostrou adequada, com facilidade de uso e grande possibilidade evolução.

d) Em relação ao projeto final:

- Apesar da integração de tecnologia própria com o módulo Wi-Fi ZeroG e o kit Explorer 16BR, da Microchip, por facilidade de implementação e restrição do tempo projeto e factível a construção placa para substituir a Explorer 16BR, diminuindo custo e aumentando a flexibilidade de incorporação de novos canais de aquisição;
- A natureza programável do DSPIC e da interface homem-máquina utilizada na visualização e armazenamento dos dados dão ao sistema escalabilidade;
- A alimentação por bateria, apesar de constar no projeto inicial do sistema, não foi realizado pela restrição de tempo e, portanto, a autonomia desejada não foi atingida;
- O protótipo com dimensões de 89x180x260 mm, menos de 1,5 kg com os cabos de energia e os transdutores, considerado, então, portátil;
- Estimou-se um custo apenas de hardware relativamente baixo do protótipo do MoSo, cerca de US\$550,00, este sendo mais que três vezes mais barato que um sistema de monitoramento sem fio comercialmente disponível;
- Os transdutores se adaptam com facilidade aos processos de soldagem;
- As interfaces homem-máquina, tanto do sistema embarcado quanto da visualização dos dados, são simples e intuitivas, provendo facilidade de uso;

e) Em relação à validação do sistema MoSo:

- Protótipo adequado para monitoramento de soldagens MAG-P e MAG, com erros menores que 2% nos valores de tensão e corrente médias e eficazes e coeficiente de Pearson indicando forte correlação ($>0,71$) entre as formas de onda do MoSo e do sistema de referência;
- Observou-se que as formas de onda para MAG-P apresentam perfil de pulsos retangulares e, desta forma, possuem componentes harmônicas pares e ímpares, dificultando a reprodução da forma de onda com o uso de filtro passa-baixa;

- Mostrou-se que a frequência de corte do filtro de segunda ordem, para a forma de onda do MAG-P (difere da onda retangular ideal), determina fatores importantes como tempo de atraso, tempo de acomodação e também o valor do pico de *overshoot*, sendo que um filtro em 1591 Hz foi considerado adequado;
- O protótipo mostrou-se adequado para o monitoramento de soldagem MAG curto-círcuito, com erros nas análises estatísticas abaixo de 2% e alta correlação ($>0,85$) entre as formas de onda;
- O protótipo mostrou-se adequado para o monitoramento de soldagens típicas TIG pulsadas, com erro relativo inferior a 2,5% e forte correlação ($>0,95$) entre as formas de onda;
- Para o processo TIG CA, o sistema MoSo mostrou-se adequado para processo com frequência nominal de pulsos de até 100 Hz, com erros inferiores a 5% e altos coeficientes ($>0,85$) de Pearson. Já para o processo TIG CA com altas frequências, ocorreram erros de até 14%, porém com alta correlação ($>0,73$) entre as formas de onda. Acredita-se que o erro estatístico é resultante da alta frequência observada nos pontos de inflexão na retificação dos sinais observados;
- Mostrou-se que o valor da correlação de Pearson não depende da amplitude ou do nível DC de um sinal, sendo prejudicado apenas pelas diferenças no formato da onda e pelo atraso em fase.

CAPÍTULO VIII

TRABALHOS FUTUROS

Como estudos e desenvolvimentos futuros, para a melhoria do sistema de Monitoramento de Soldagem Wi-Fi (MoSo Wi-Fi) e complementando sua portabilidade, autonomia e flexibilidade de instalação sugerem-se os seguintes pontos de trabalho:

- Atualização do módulo Wi-Fi para o atualmente produzido (MRF24WB0MA) de mesmo fabricante (lançado durante a execução do projeto), que possibilita busca de redes sem fio durante o uso, bem como maior estabilidade, menos travamentos durante processos paralelos, podendo assim realizar atualização do *firmware* para realizar envio de dados durante a aquisição;
- Aumento da memória de *buffer* interno, possibilitando maior tempo de aquisição continua sem descontinuidade do sinal, devido à latência de envio;
- Utilização de melhor tecnologia de comunicação sem fio (Wi-Fi) como, por exemplo, a IEEE 802.11b/g/n para maiores velocidades de comunicação;
- Descarregamento contínuo dos dados em dispositivo de armazenamento em massa (cartão de memória), com sistema inteligente (detecção de abertura e extinção de arco), tornando assim o sistema autônomo, salvando os dados quando máquina de soldagem está em operação;
- Tornar o sistema de supervisório, limitado atualmente a apenas um devido à lógica de comunicação de dados, multiusuário;
- Realização de projeto de *Hardware* dedicado, sem utilização de placas de desenvolvimento comerciais, para diminuição de custos e domínio completo da tecnologia;
- Implementação de alimentação por baterias, aumentando a portabilidade, autonomia e flexibilidade de uso do equipamento (possibilidade de uso em

campo), podendo o mesmo operar também em rede elétrica, carregando a bateria ao mesmo tempo em que está em uso;

- Estudo da mudança da IHM com a criação de *software* dedicado, considerando a vantagem de facilidade para salvar os dados (limitado pelo acesso por *HTTP*), com a de perda de flexibilidade (não roda em dispositivo que não possua o *software*), e limite do uso à plataforma que rode a linguagem de programação utilizada para tal fim;
- Aumentar de canais de aquisição, sendo esta atualmente limitada pela velocidade de transmissão de dados e quantidade de *buffer* interno, para monitorar mais tipos de sinais, como o tecimento e a velocidade de alimentação (requeridos pela norma ISO17662 para soldagem a arco elétrico), ou mais de uma máquina de solda ao mesmo tempo, como, por exemplo, em aplicações com MAG Duplo Arame e Plasma-MIG.

CAPÍTULO IX

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJÖ, G.; CLAESSEN, I. On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding. **WELDING RESEARCH SUPPLEMENT**, v. february, p. 59s-74s, February 1999.

ALBACORE - CONNECTWARE TECHNOLOGY. Albacore INT700 Xbee Zigbee Adapter RS323 ou USB. 2010. Disponível em: < <http://www.albacore.com.br/hs/int700box/index.html> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

ANCONA, A.; LUGARÀ, P. M.; OTTONELLI, F.; CATALANO, I. M. A sensing torch for on-line monitoring of the gas tungsten arc welding process of steel pipes. **MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 15, n. 1, p. 2412-2418, 19 November 2004.

AURÉLIO. Dicionário do Aurélio Online. 2011. Disponível em: < <http://www.dicionariodoaurelio.com/Monitorar> >. Acesso em: 9 de março de 2011.

BARTLE, P. THE NATURE OF MONITORING AND EVALUATION: Definition and Purpose. 2010.10.22 2010. Disponível em: < <http://www.scn.org/cmp/modules/mon-wht.htm> >. Acesso em: 7 de março de 2011.

BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **RANDOM DATA - Analysis and Measurement Procedures**. 1986. 566 p.

BERTOLO, L. A. Revisão de Estatística Apostila, p. 14, 2008.

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

BOURNS. **EM14 - 14 mm Rotary OpticalEncoder w/Switch**. 2008. 5 p. Especificação Técnica: REV. 02/08.

BURR-BROWN CORPORATION. **ISO 122P - Precision Lowest Cost ISOLATION AMPLIFIER**. 1993. 16 p.

CAMARGO, L. Eletricidade no ar. Revista Veja.com: 1 p. 2007.

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.

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

CUNHA, R. **Sistemas Wireless em chão de fábricas.** . **Saber Eletrônica**, v. 43, n. 427, p. 1-9, Agosto 2008.

FURTADO, A. **Tecnologias em Redes Sem Fio.** 2008. Disponível em: < <http://www.webartigos.com> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

GALEV, M. **Home Networking with ZigBee.** Design Article of EE Times 2004.

Help Desk de Informática. Info: **Bluetooth.** 2011. Disponível em: < <http://ti14.blogspot.com/2010/08/bluetooth.html> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

IMC Soldagem. **SAP - v4.01 - Sistema Portatil de Aquisição.** 2005a. 19 p. Manual do Sistema:

IMC Soldagem. **TC-1 - INstrumento para medição de tensão e corrente.** 2005b. 2 p. Manual de Instruções:

IrDA. Infrared Data Association. 2011. Disponível em: < <http://www.irda.org> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

ISO 17662. **Welding - Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including ancillary activities.** 2005. 38 p. Norma: ISO 17662:2005.

ISO 3834. **Quality requeriments for fusion welding of metallic materials.** 2005. 66 p. Norma: ISO3834:2005.

ISO 9001:2000. **Sistema de gestão da qualidade novo — Requisitos - Seção 7: Realização do Produto.** 2000. 30 p.

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

KACHIGAN, S. K. **Statistical analysis: An interdisciplinary introduction to univariate & multivariate methods.** New York: Radius Press, 1986. 589 p. ISBN 0942154991.

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.

LABTOOLS. **Guia do Usuário Placa de Desenvolvimento Explorer 16 BR.** 2008. 27 p. Guia do Usuário

LEM COMPONETS. **CurrentTransducer HT 200 to 500-SBD.** 2002. 2 p. Especificação Técnica:

MACHADO, A.; TEIXEIRA, C. A.; SETTI R.. Rio de Janeiro, 2010. Portal Hands: awesome mobile. Veja como montar uma rede Wi-Fi segura em casa. 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.

MACHADO, M. V. R.; MOTA, C. P.; VILARINHO, L. O.; NETO, R. M. F. Estudo De Um Sistema Embarcado Sem Fio Para Monitoramento E Análise De Sinais Em Soldagem A Arco Elétrico. 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2011. Caxias do Sul, RS, Brasil. 11 p.

MALVINO, A. P. Eletrônica: volume 1. 4a edição. São Paulo: Pearson Makron Books, 1997. 747 p.

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

MEASURE EVALUATION. Análise de Dados. Maputo, Moçambique, 2008. Disponível em: < www.cpc.unc.edu/measure/training/mentor/.../modulo3_capa.pdf >. Acesso em: 9 de março de 2011.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. dsPIC 33F Family Data Sheet - High Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers. 2007. 370 p.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. Microchip TCP/IP Stack 5.20b. 2010. 94 p. Help: License Rev. No. 01-100709.

MICHAELIS. Moderno Dicionário da Língua Portuguesa. 2009. Disponível em: < <http://michaelis.uol.com.br/> >. Acesso em: 9 de março de 2011.

MILLER ELECTRIC MFG CO. Wireless Remote Foot Control. 2010a. 2 p. Data Sheet:

MILLER ELECTRIC MFG CO. Wireless Remote Hand Control. 2010b. 2 p. Data Sheet:

MODENESI, P. J. Fontes de Energia para a Soldagem a Arco. Apostila, p. 37, 2009.

NATIONAL INSTRUMENTS. Choosing the Right Technology for Your Wireless Application. 2009. 31 p. Newsletter:

NATIONAL INSTRUMENTS. National Instruments - Test And Measurement. 2011. Disponível em: < <http://www.ni.com> >. Acesso em: 13 de março de 2011.

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.

NEEDHAM, J. C. What do you mean by current? The Welding Institute Research Bulletin, v. 26, n. 8, p. 273-278, August 1985.

NYQUIST, H. "Certain topics in telegraph transmission theory", Trans. AIEE, vol. 47, pp. 617–644, Apr. 1928 [Reprint as classic paper in: Proc. IEEE, Vol. 90, No. 2, Feb 2002](http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4875000).

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 9th edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 964 p. ISBN 0-13-043245-8.

OJO, E.; SCOTTI, A. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PULSO NA SOLDAGEM MAG PULSADA - Parte I: Arame ER70S-6 de 1,2 mm e gás Ar + 5%O₂. Uberlândia: 23 p. 2005.

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.

OSTER, E. On-line weld monitoring - CAQ in welding - State of technology and practical experiences in Germany. **Welding in the World**, v. 41, p. 60-68, 1998.

PONOMAROV, V.; ALERHAYEM, O. ; et al. **Arc Welding Process Statistical Analysis. Methodical approaches, analysis conceptions, experiences**. 1. ed. Helsingør: The European Institute for the Joining of Materials, JOM-Institute, 1997. v. 1. 158 p.

ROCHA, V. S. **Desenvolvimento e Implementação de um Controle para Remoção Seletiva de Óxido na Soldagem TIG de Alumínio**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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

SANTOS, C. **Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem**. Lisboa, Portugal: Edições Sílabo, 2007. 356 p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MAG: Melhor entendimento, Melhor desempenho**. São Paulo, Brasil: Artliber Editora Ltda., 2008. 284 p.

SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. California, USA: California Technical Publishing 2007. 640 p.

TENENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. Editora Campus, 1996. p.

TEXAS INSTRUMENTS. **Active Low-Pass Filter Design**. 2000. 24 p. Application Report: SLOA049A.

Triton Eletronics Ltd. **AMV 3000 Instrument**. 2010a. 1 p.

Triton Eletronics Ltd. **AMV 4000 Instrument**. 2010b. 3 p.

Triton Eletronics Ltd. **AMV 4000F Instrument**. 2010c. 2 p.

USHIO, M. Sensors in Arc Welding. XVIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1992. Rio de Janeiro - Brasil. 9 p.

Vórtex Equipamentos Ltda. **Por quê True-rms?** Belo Horizonte - MG, 2010. 2 p. Nota de Aplicação: FLUKE.

WHITTAKER, J. M. **Interpolatory Function Theory**, Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1935.

WHITTAKER, J. M. "On the Functions Which are Represented by the Expansions of the Interpolation Theory", Proc. Royal Soc. Edinburgh, Sec. A, vol.35, pp. 181–194, 1915.

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

WILLIG, A. Wireless local and wireless personal area network technologies for industrial deployment. In: ZURAWSKI, R. (Ed.). **The industrial communication technology handbook**: CRC Press, 2005.

WOLF, W. **Computers as Components - Principles of Embedded Computing System Design**. 1st edition. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 688 p.

YAPP, D. Trends in Data Acquisition for Weld Monitoring. **Recent Developments and Future Trends in Welding Technology**, p. 1-13, 3rd and 4th September 2001.

ZHANG, Y. **Real-time weld process monitoring**. 1st edition. Cambridge: Woodhead Publishing and Maney Publishing, 2008. 310 p.

VILARINHO, L.O. Comunicação Eletrônica Privada, Março de 2010.

ZIGBEE. ZigBee Alliance. 2011. Disponível em: <<http://www.zigbee.org>>. Acesso em: 13 de março de 2011.

ANEXO I

PROGRAMA PARA ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS DAS FORMAS DE ONDA

```
% Programa para calcular a fft (espectro de freqüência) de um arquivo
% Autor: Louriel Oliveira Vilarinho
%           Marcus V. R. Machado
% Data da última modificação: 28/10/2010
% Centro para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA/UFU
% Universidade Federal de Uberlândia

home
clc
clear all
close all
format long

disp(' ');

[filename, path] = uigetfile('*.*', 'Escolha um arquivo...');

if filename ~= 0
    arq = load([path,filename]);
else
    disp('Arquivo inexistente ou corrompido');
end

disp(' ');
disp ('  Leitura de dados terminada. Aperte qualquer tecla  ')
%%pause

I=arq(:,3); % Criando o arquivo de corrente
U=arq(:,4); % Criando o arquivo de tensão
clear arq;    % Limpando variáveis desnecessárias

N=length(U);

% Cálculo da freqüência de amostragem e freqüência máxima de observação

tempo=6;%%input('  Tempo de Aquisição [s]: ');
fs=length(U)/tempo;
T=0:1/fs:(tempo-1/fs);
```

```

fmax=fs/2;
disp (' ')
disp (' ')
disp(['    Frequência de aquisição utilizada = ',num2str(fs), ' Hz']);
disp(['    Frequência máxima de observação = ',num2str(fmax), ' Hz']);

% Análise da Tensão

% Plotagem do sinal
figure(1),plot(T,U,'b');
hold on
xlabel('Tempo [s]'),ylabel('Tensão [V]')
zoom;

% FFT do sinal original
Yu = fft(U(1:N));
Yu(1)=Yu(1)/max(Yu);
df=1/tempo;
f = df*(0:N/2-1);
figure(2), plot(f,abs(Yu(1:N/2)/(N/2)), 'b')
hold on
xlabel('Frequência [Hz]'),ylabel('|Y_{tensão}|')
zoom;

% Análise da Corrente

% Plotagem do sinal
figure(3),plot(T,I,'r');
hold on
xlabel('Tempo [s]'),ylabel('Corrente [A]')
zoom;

% FFT do sinal original
Yi = fft(I(1:N));
Yi(1)=Yi(1)/max(Yi);
df=1/tempo;
f = df*(0:N/2-1);
figure(4), plot(f,abs(Yi(1:N/2)/(N/2)), 'r')
hold on
xlabel('Frequência [Hz]'),ylabel('|Y_{corrente}|')
zoom;

% Filtro passa-baixa
Wn = 1591; %%input('    Frequencia de corte passa-baixa: ');
Wn1=Wn;
Wn=Wn/fmax;
n = 2;%%input('    Ordem do filtro: ');
[b,a] = butter(n,Wn,'low');

Unova=filter(b,a,U);
Inova=filter(b,a,I);

% Filtro passa-alta
%Wn = 3000; %%input('    Frequencia de corte passa-alta: ');
%Wn1=Wn;
%Wn=Wn/fmax;
%n = 2;%%input('    Ordem do filtro: ');
%[b,a] = butter(n,Wn,'high');

```

```
%Unova=filtfilt(b,a,Unova);
%Inova=filtfilt(b,a,Inova);

% Plotagem do sinal U filtrado
figure(1),plot(T,Unova,'k');

Yunova = fft(Unova(1:N));
Yunova(1)=Yunova(1)/max(Yunova);
df=1/tempo;
f = df*(0:N/2-1);

figure(2), plot(f,abs(Yunova(1:N/2)/(N/2)), 'k')

% Plotagem do sinal I filtrado
figure(3),plot(T,Inova,'g');

Yinova = fft(Inova(1:N));
Yinova(1)=Yinova(1)/max(Yinova);
df=1/tempo;
f = df*(0:N/2-1);

figure(4), plot(f,abs(Yinova(1:N/2)/(N/2)), 'g')
```

ANEXO II

PROGRAMA DE COMPARAÇÃO MoSo E SISTEMA DE REFERÊNCIA

```
%-----  
% PLOTAWIFI.M  
%-----  
%  
% Programa responsável pela comparacao entre a forma de onda obtida pelo  
% sistema wi-fi com um sistema DAQ. Deve-se escolher com cuidado o ponto de  
% sincronizacao nos graficos para evitar erros.  
% -----  
  
close all  
clear all  
clc  
format short  
[arquivo,pasta]=uigetfile('*_moso.txt','Selecione o arquivo MoSo');  
moso=importdata([pasta,arquivo],',');  
lab=importdata([pasta,arquivo(1:length(arquivo)-9),'.txt']);  
  
t=[];  
dados1=[];  
dados2=[];  
for i=65:2:length(moso)-1 %ignora os primeiro 32 pontos (1 buffer)  
    t=[t,moso(1,i)];  
    dados1=[dados1,moso(1,i+1)];  
    dados2=[dados2,moso(2,i+1)];  
end  
t=t-25; %retorna origem para 0  
plot(t,dados1);  
zoom on  
pause  
[xmoso,ymoso]=ginput(1);  
figure,  
tlab=linspace(0,6000,125000*6);  
plot(tlab,lab(:,4));  
zoom on  
pause  
[xlab,ylab]=ginput(1);  
close all  
%%  
aux1=find(t>=xmoso);  
aux2=find(t<=xmoso);
```

```

if(t(aux1(1))-xmoso<abs(t(aux2(length(aux2))-xmoso))
    imoso=aux1(1);
else
    imoso=aux2(length(aux2));
end
aux1=find(tlab>=xlab);
aux2=find(tlab<=xlab);
if(tlab(aux1(1))-xlab<abs(tlab(aux2(length(aux2))-xlab)))
    ilab=aux1(1);
else
    ilab=aux2(length(aux2));
end

clear aux1 aux2

%% Graficos Inteiros
tmoso = t(imoso:length(t))-t(imoso);
Umoso = dado1(imoso:length(t));
Imoso = dado2(imoso:length(t));

tlab2 = tlab(ilab:ilab+(length(tmoso)*125000/1280))-tlab(ilab);
Ulab = lab(ilab:ilab+(length(tmoso)*125000/1280),4);
Ilab = lab(ilab:ilab+(length(tmoso)*125000/1280),3);

%%
plot(tmoso,Umoso)
zoom on
pause
[xini,yini]=ginput(1);
close
aux1=find(tmoso>=xini);
aux2=find(tmoso<=xini);
if(tmoso(aux1(1))-xini<abs(tmoso(aux2(length(aux2))-xini)))
    iini=aux1(1);
else
    iini=aux2(length(aux2));
end
clear aux1 aux2
%% Graficos com ponto inicial escolhido
tmosoi = tmoso(iini:length(tmoso));
Umosoi = Umoso(iini:length(tmoso));
Imosoi = Imoso(iini:length(tmoso));

tlab2i = tlab2(iini*125000/1280:iini+(length(tmosoi)*125000/1280));
Ulabi = Ulab(iini*125000/1280:iini+(length(tmosoi)*125000/1280));
Ilabi = Ilab(iini*125000/1280:iini+(length(tmosoi)*125000/1280));

% Calibracao
Iinterp=interp1(tmosoi,Imosoi,tlab2i);
Uinterp=interp1(tmosoi,Umosoi,tlab2i);
Pu=[10.8753 0.0613];
Pi=[105.3268 -2.1456];
%%
Ulabi=Ulabi*Pu(1)+Pu(2);
Ilabi=Ilabi*Pi(1)+Pi(2);
%% Filtro passa-baixa
Wn = 1591; %%input('    Frequencia de corte passa-baixa: ');
Wn=Wn/62500;
n = 2;%%input('    Ordem do filtro: ');

```

```

[b,a] = butter(n,Wn,'low');

Ufilt=filter(b,a,Ulabi);
Ifilt=filter(b,a,Ilabi);
%Ufilt=Ufilt*Pu(1)+Pu(2);
%Ifilt=Ifilt*Pi(1)+Pi(2);
% Calculos das Medias Retificadas e RMS
format bank
Imoso_med = mean(abs(Imosoi))
Ilab_med = mean(abs(Ilabi))
Ifilt_med = mean(abs(Ifilt))

Imoso_med_normal = mean((Imosoi))
Ilab_med_normal = mean((Ilabi))
Ifilt_med_normal = mean((Ifilt))

Imoso_rms = norm(Imosoi)/sqrt(length(Imosoi))
Ilab_rms = norm(Ilabi)/sqrt(length(Ilabi))
Ifilt_rms = norm(Ifilt)/sqrt(length(Ifilt))

Umoso_med = mean(abs(Umosoi))
Ulab_med = mean(abs(Ulabi))
Ufilt_med = mean(abs(Ufilt))

Umoso_med_normal = mean((Umosoi))
Ulab_med_normal = mean((Ulabi))
Ufilt_med_normal = mean((Ufilt))

Umoso_rms = norm(Umosoi)/sqrt(length(Umosoi))
Ulab_rms = norm(Ulabi)/sqrt(length(Ulabi))
Ufilt_rms = norm(Ufilt)/sqrt(length(Ufilt))

%
U_X=corrcoef(Uinterp,Ulabi);
U_Xcorr = U_X(2)
U_X=corrcoef(Uinterp,Ufilt);
U_Xcorr_filt = U_X(2)
I_X=corrcoef(Iinterp,Ilabi);
I_Xcorr = I_X(2)
I_X=corrcoef(Iinterp,Ifilt);
I_Xcorr_filt = I_X(2)

%%
tlab2f = tlab2(1:(length(tmoso)*125000/1280));
Ulabf = Ulab(1:(length(tmoso)*125000/1280))*Pu(1)+Pu(2);
Ilabf = Ilab(1:(length(tmoso)*125000/1280))*Pi(1)+Pi(2);
Ufiltf=filter(b,a,Ulabf);
Ifiltf=filter(b,a,Ilabf);

figure,
subplot(2,1,1)
plot(tlab2f,Ulabf,'Color',[0.73 0.83 0.96])
hold on
plot(tmoso,Umoso,'b','Marker','*', 'LineWidth',2)
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
legend('Referência','MoSo')
subplot(2,1,2)

```

```
plot(tlab2f,Ilabf,'Color',[1 0.6 0.6])
hold on
plot(tmoso,Imoso,'r','Marker','*','LineWidth',2)
legend('Referência','MoSo')
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');

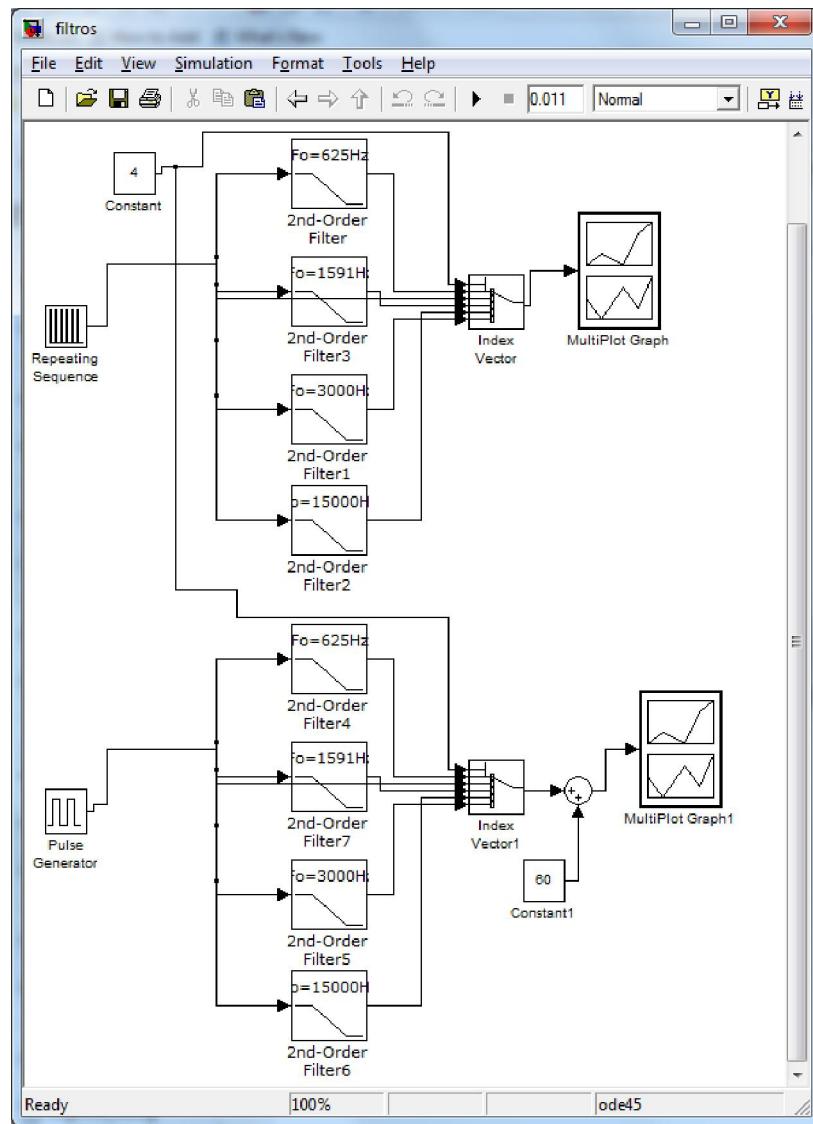
saveas(gcf,[pasta,arquivo(1:length(arquivo)-9),'_nfilt'], 'fig')

figure,
subplot(2,1,1)
plot(tlab2f,Ufiltf,'Color',[0.73 0.83 0.96],'LineWidth',2)
hold on
plot(tmoso,Umoso,'b','Marker','*')
legend('Referência','MoSo')
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Tensão (V)');
subplot(2,1,2)
plot(tlab2f,Ifiltf,'Color',[1 0.6 0.6],'LineWidth',2)
hold on
plot(tmoso,Imoso,'r','Marker','*')
legend('Referência','MoSo')
xlabel('Tempo (ms)');
ylabel('Corrente (A)');

saveas(gcf,[pasta,arquivo(1:length(arquivo)-9),'_filt'], 'fig')
```

ANEXO III

PROGRAMAS PARA ANÁLISE DO EFEITO DO FILTRO NO *OVERSHOOT*



```

% Programa para simular e analisar o efeito da frequência de corte no
overshoot dos filtros
% Autor: Carolina Pimenta Mota
%           Marcus V. R. Machado
% Data da última modificação: 28/10/2010
% Centro para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA/UFU
% Universidade Federal de Uberlândia

home
clc
clear all
close all
format long

disp(' ');

[filename, path] = uigetfile('*.*', 'Escolha um arquivo...');

if filename ~= 0
    arq = load([path,filename]);
else
    disp('Arquivo inexistente ou corrompido');
end

disp(' ');
disp ('    Leitura de dados terminada. Aperte qualquer tecla    ')
%%pause

I=arq(:,3);    % Criando o arquivo de corrente
U=arq(:,4);    % Criando o arquivo de tensão
clear arq;      % Limpando variáveis desnecessárias

N=length(U);

tempo=6;%%input('    Tempo de Aquisição [s]: ');
fs=length(U)/tempo;
T=0:1/fs:(tempo-1/fs);
fmax=fs/2;

%Calibração
Pu=[10.8753 0.0613];
Pi=[105.3268 -2.1456];
U=U*Pu(1)+Pu(2);
I=I*Pi(1)+Pi(2);

% Filtros passa-baixa (625Hz - 1591Hz - 3000Hz - 15000Hz)
Wn = [625 1591 3000 15000]; %%input('    Frequencia de corte passa-baixa:
');
Wn1=Wn;
Wn=Wn./fmax;
n = 2;%%input('    Ordem do filtro: ');
for i=1:length(Wn)
    [b,a] = butter(n,Wn(i),'low');
    Unova(i,:)=filter(b,a,U);
    Inova(i,:)=filter(b,a,I);
end

```

```
% Plotagem do sinal
figure(1),plot(T,U,'b');
hold on
xlabel('Tempo [s]'),ylabel('Tensão [V]')
zoom;
% Plotagem do sinal
figure(3),plot(T,I,'r');
hold on
xlabel('Tempo [s]'),ylabel('Corrente [A]')
zoom;
% Plotagem do sinal U filtrado
figure(1),plot(T,Unova(1,:),T,Unova(2,:),T,Unova(3,:),T,Unova(4,:));
legend('Sem filtro', '625 Hz', '1591 Hz', '3000 Hz', '15000 Hz')
% Plotagem do sinal I filtrado
figure(3),plot(T,Inova(1,:),'b',T,Inova(2,:),'g',T,Inova(3,:),'k',T,Inova(4
,:),'c');
legend('Sem filtro', '625 Hz', '1591 Hz', '3000 Hz', '15000 Hz')
```

ANEXO IV

PROGRAMA PARA ANÁLISE DO COEFICIENTE DE PEARSON

```
% Programa para analise das correlações entre as formas de onda do sistema
% de referencia e o MoSo WiFi
% Autor: Carolina Pimenta Mota
%           Marcus V. R. Machado
% Data da última modificação: 28/10/2010
% Centro para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA/UFU
% Universidade Federal de Uberlândia

clc
clear all
close all

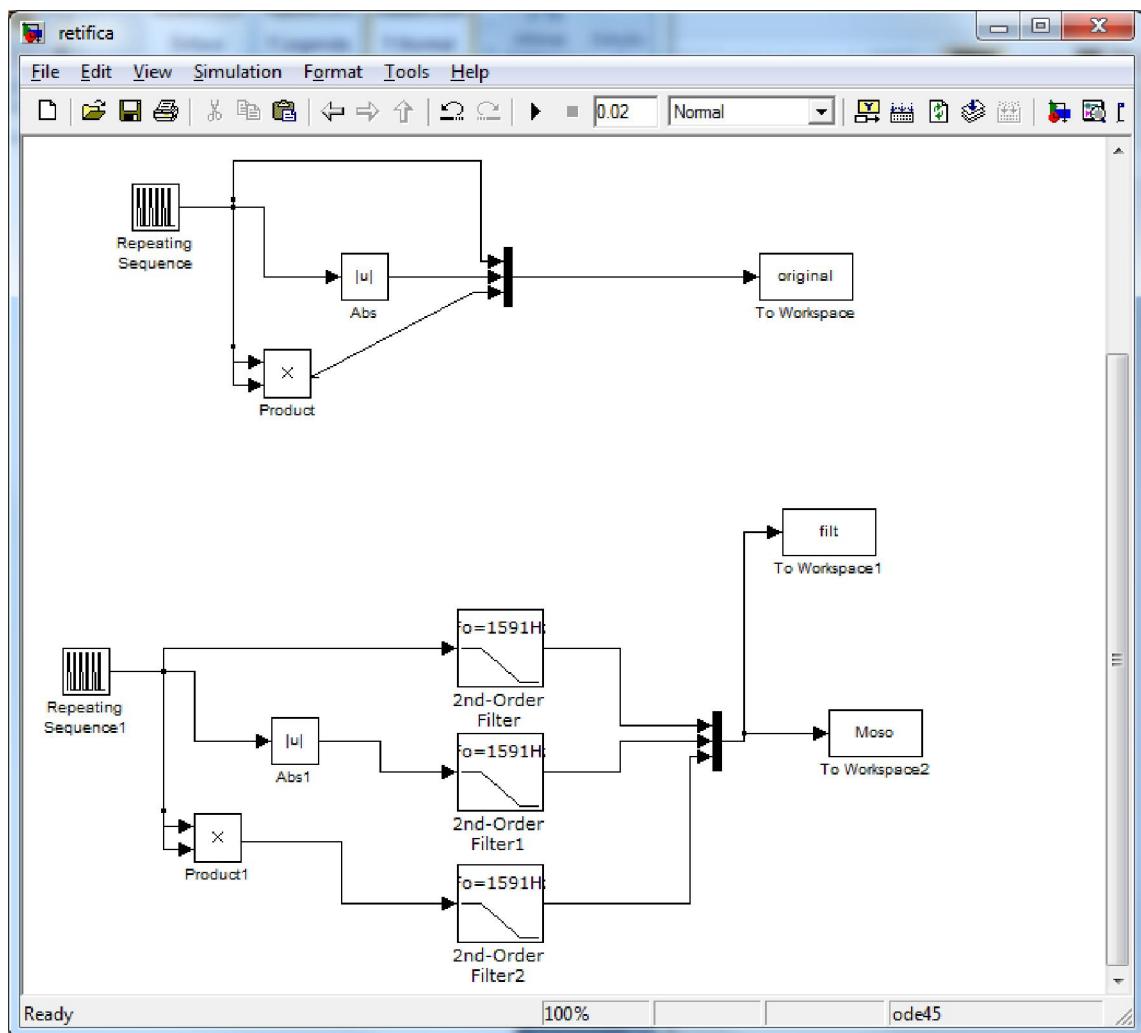
t=0:pi/100:10*pi;
x1=sin(t);
x2=2*sin(t)+1;
x4=1.2*sin(t-pi/3)
x3=sin(t-pi/4);

plot(t,x1,t,x2,t,x3,t,x4)
xlabel('Tempo')
ylabel('f(t)')
legend('f1(t)=sen(t)', 'f2(t)=2*sen(t)+1', 'f3(t)=sen(t-pi/4)', 'f4(t)=sen(t-pi/3)')
axis([0 15 -2 4])

corrcoef(x1,x2)
corrcoef(x1,x3)
corrcoef(x1,x4)
corrcoef(x2,x1)
corrcoef(x2,x3)
corrcoef(x2,x4)
corrcoef(x3,x1)
corrcoef(x3,x2)
corrcoef(x3,x4)
corrcoef(x4,x1)
corrcoef(x4,x2)
corrcoef(x4,x3)
```

ANEXO V

PROGRAMAS PARA ANÁLISE DO EFEITO DA RETIFICAÇÃO EM TIG CA



```
% Programa para análise do efeito da retificação de ondas, ou calculo de
% valor eficaz para sinais alternados.
% Autor: Carolina Pimenta Mota
%           Marcus V. R. Machado
% Data da última modificação: 28/10/2010
% Centro para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA/UFU
% Universidade Federal de Uberlândia

N=length(original(:,1));
t=0:1/125000:(N-1)*1/125000;
n=length(Moso(:,1));
tmoso=0:1/1280:(n-1)*1/1280;
subplot(3,1,1)
plot(t,original(:,1),t,filt(:,1),tmoso,Moso(:,1))
subplot(3,1,2)
plot(t,original(:,2),t,filt(:,2),tmoso,Moso(:,2))
subplot(3,1,3)
plot(t,original(:,3),t,filt(:,3),tmoso,Moso(:,3))
m=mean(original,1);
mf=mean(filt,1);
mm=mean(Moso,1);

mm(3)=sqrt(sum(Moso(:,3))/n);
mf(3)=sqrt(sum(filt(:,3))/N);
m(3)=sqrt(sum(original(:,3))/N);
```