

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

*Marcus Vinícius Ribeiro Machado, Carolina Pimenta Mota, Roberto Mendes Finzi Neto, Louriel Oliveira Vilarinho.*

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, 2000) – o desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos e métodos de monitoramento processos são necessários.

Além de ser uma necessidade, o monitoramento e controle de processos de soldagem são a chave para o desenvolvimento de tecnologias destes processos, especialmente aplicações de soldagem automática e robotizada (USHIO, 1992).

A norma ISO 3834:2005 (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 ISO 17662:2005 trata sobre as necessidades de monitoramento de cada processo de soldagem, especificando os dados que devem ser monitorados e a correta escolha e calibração dos sistemas e equipamentos de medidas (ISSO 17662, 2005).

Diferentes equipamentos, de diferentes fabricantes, 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 (YAPP, 2001; ZHANG, 2008). Equipamentos programáveis também estão disponíveis no mercado, como os dispositivos de aquisição DAQ (Data Acquisition) da National Instruments que são adaptáveis ao monitoramento da soldagem com o acoplamento de condicionadores de sinais e transdutores específicos (MACHADO *et al.*, 2011a), sendo estes bastante utilizados em ambientes de pesquisa e desenvolvimento de processos, enquanto os primeiros são utilizados tanto para pesquisa quanto para indústria.

A tendência industrial atual segue na criação de equipamentos de uso prático e simplificado, sendo 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 dificuldades de uso e, se aplicado em ambientes fabris, o equipamento deve-se adaptar ao meio e não o contrário.

Pensando em flexibilidade, principalmente, os dispositivos atuais devem 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 facilidade de instalação e movimentação.

A ideia inicial de se construir um dispositivo sem fios veio da tendência atual observada em dispositivos móveis, tais como, notebooks, smartphones e tablets. Estes estão cada vez mais ricos em recursos, tanto com o uso de hardware mais poderosos como de softwares capazes de realizar tarefas complexas, tornando a integração do monitoramento dos processos de soldagem com a praticidade do uso de comunicação sem fio uma realidade alcançável e bastante promissora. Sendo aplicável e expansível para controle de supervisão remota, facilitando muitos procedimentos de soldagens, por exemplo, em ambientes hostis, bem como a possibilidade de se realizar a supervisão por parte de especialistas capacitados sem que eles estejam presentes no local da operação.

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

Para finalização do trabalho, deve-se realizar o estudo dos sinais envolvidos em processos de soldagem a arco elétrico (TIG e MIG/MAG), desenvolvimento do sistema físico de monitoramento, especificando sensores e/ou transdutores, projetos de circuitos de condicionamento de sinais e determinação da tecnologia de comunicação sem fio, desenvolvimento da Interface Homem-Máquina, tanto no sistema embarcado quanto para a visualização e armazenamento dos sinais monitorados, finalizando então com a construção de um protótipo e por fim, sua validação na utilização no monitoramento de processos de soldagens TIG e MIG/MAG (MACHADO, 2011). Um fluxograma de trabalho é apresentado na Fig. 1.

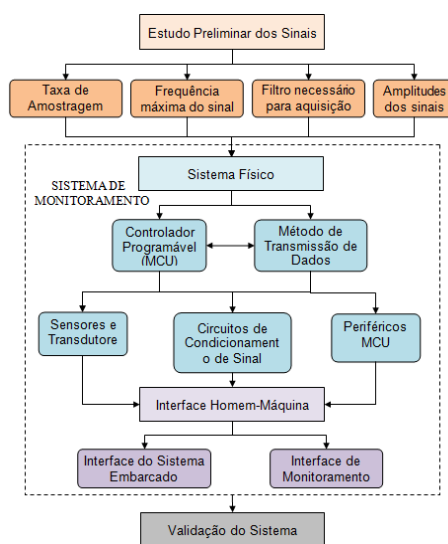


Figura 1: Fluxograma da metodologia aplicada para execução do trabalho

O estudo e documentação dos sinais de soldagem são tão importantes para a qualificação do processo que a Norma ISO 17662:2005 define e indica quais as variáveis devem ser monitoradas nos diferentes processos de soldagem, e documentadas de acordo com a ISO 3834:2005, buscando alcançar a qualidade dos processos requerida. Pela ISO 17662:2005, deve-se monitorar, em todos os processos, o material de base e metal de adição; junta e a máquina de soldagem entre outros. Na maioria dos processos, devem ser monitorados os consumíveis, gás de purga e o gás de proteção. Especificamente na soldagem a arco, devem ser monitorados o tecimento, as variáveis elétricas e as características da soldagem mecanizada (velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem) (ISSO 17662, 2005).

O 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. 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 (aramé) de adição (quando for o caso) dos processos de soldagem a arco.

Para a avaliação das variáveis elétricas (corrente e tensão) das soldagens TIG e MIG/MAG, soldagens foram realizadas e os sinais elétricos foram adquiridos a uma taxa de amostragem de 125 kS/s, sem filtros analógicos, para se observar as características de frequências e amplitudes presentes nos sinais soldagens. A velocidade de alimentação não foi parte do estudo por que seu monitoramento é mais simples, devido a menor dinâmica do sinal.

Pelo Teorema da Amostragem, as componentes de frequência em até 62,5 kHz (metade da aquisição realizada em 125 kHz) podem ser observadas (WHITTAKER, 1915), sendo suficiente a este estudo, já que os sinais provenientes das fontes de soldagem possuem sua componente de maior frequência, o chaveamento da própria fonte, em torno de 20 a 30 kHz para a maioria das fontes comerciais (MODENESI, 2009).

Para fins de discussão, duas abordagens distintas foram definidas para o monitoramento dos sinais em soldagem, sendo elas: científica e tecnológica, Fig. 2. A abordagem científica é focada no estudo aprofundando dos processos de soldagens, utilizada, normalmente, em laboratórios e centros de pesquisa em soldagem, onde se procura obter o máximo de informações possíveis dos sinais, ou seja, os detalhes, podendo assim se observar as variações de cada regulagem nos parâmetros, e suas influências sobre o cordão de solda. A outra abordagem, a 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 informação suficiente para detecção de problemas e verificação de possíveis defeitos.

Conhecendo-se o comportamento em frequência do sinal adquirido, os sinais da soldagem, é possível determinar a taxa de amostragem mínima necessária para o projeto do sistema de monitoramento. Dos espectros de frequência dos sinais, em trabalho anterior, determinou-se que as informações significativas, tanto em tensão quanto em corrente, estão em até cerca de 300 Hz (PONOMAROV e ALERHAYEM, 1997).

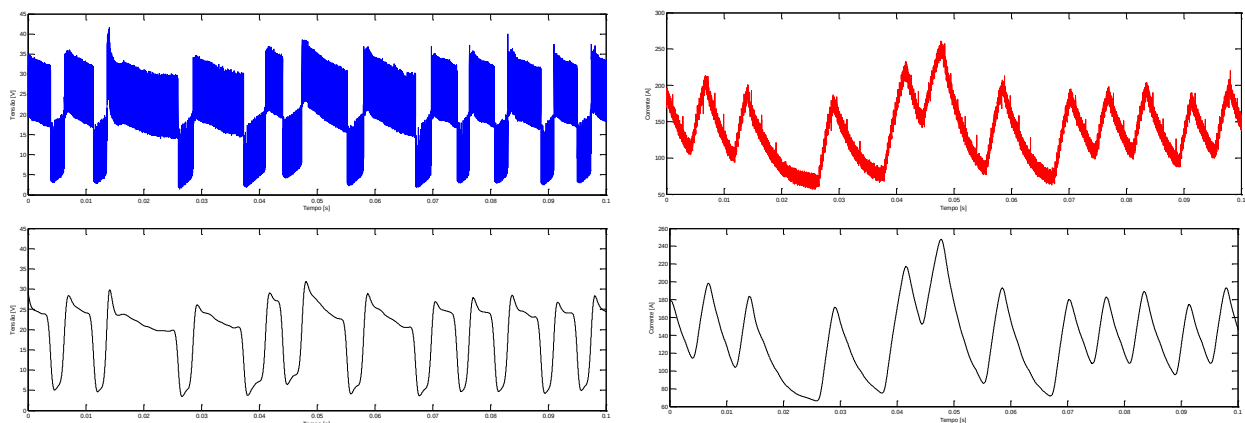


Figura 2: Comparativo entre oscilogramas dos sinais com abordagens científica (superiores) e tecnológica (inferiores). Esquerda: Tensão, Direita: Corrente.

Para uma abordagem tecnológica, portanto, essa frequência de 300 Hz encontrada é a frequência máxima para a observação da informação desejada contida nos sinais de soldagem. Testes foram realizados para determinar a menor taxa de amostragem possível, e o filtro de frequência necessário para o monitoramento dos processos para uma abordagem tecnológica.

A Figura 3 ilustra as formas de onda amostradas em 125 kS/s e 1250 S/s, ambas atenuadas por filtro passa-baixa. Deve-se ressaltar que a menor taxa de amostragem foi simulada através da maior taxa de aquisição, após a atenuação (filtros digitais), buscando-se pontos nos intervalos específicos de tempo (período de 800  $\mu$ s) e ignorando os pontos intermediários a eles.

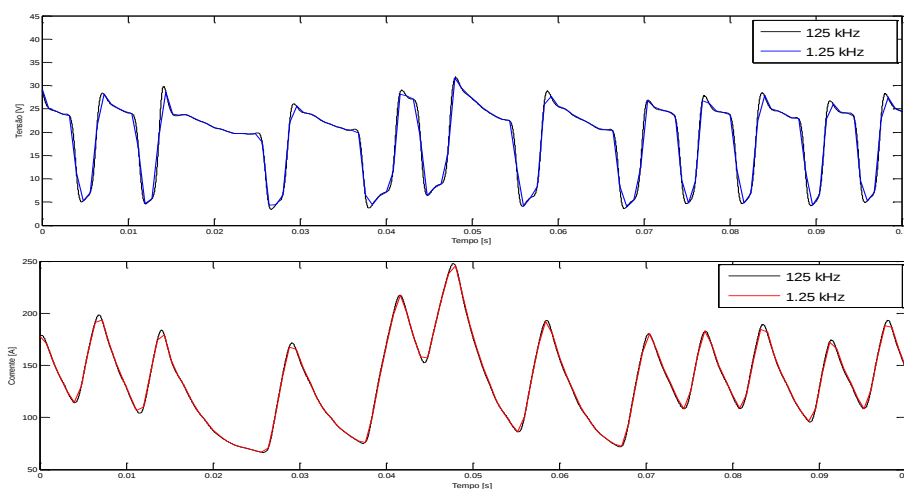


Figura 3: Comparativo entre oscilogramas de tensão (superior) e corrente (inferior) com taxas de aquisição de 125 kHz e 1250 Hz.

Sendo assim, a taxa de amostragem em 1250 S/s mostrou-se fortemente correlacionada a taxa de amostragem superior em todos os testes realizados, ou seja, essa taxa menor é suficiente para a caracterização dos sinais elétricos na soldagem. É importante ressaltar também que não houve qualquer alteração nos valores médio e RMS para ambos os sinais em todos os testes, levando em consideração a resolução desejada para cada parâmetro (0,1V para tensão e 1A para a corrente (MACHADO *et al.*,2011b)), e o filtro para os sinais foi determinado como sendo um passa-baixa Butterworth com frequência de corte em 1591 Hz (MACHADO *et al.*,2011a).

Definidos os parâmetros a serem monitorados (tensão, corrente e velocidade de alimentação), a taxa de aquisição necessária e o filtro, devem-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 e disponibiliza-los para visualização e armazenagem.

A maioria dos conversores digitais utiliza-se de sinais de tensão para a interpretação dos dados adquiridos, portanto, o parâmetro de tensão do arco não necessita de um transdutor. Para os sinais de corrente e velocidade de alimentação, escolheu-se, respectivamente, um sensor Hall e um encoder relativo óptico rotativo em quadratura. A próxima etapa para o desenvolvimento do sistema de monitoramento dos sinais em soldagem é o condicionamento dos mesmos, adequando-os à entrada do conversor analógico-digital (A/D). 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), e para a velocidade de alimentação converter o sinal modulado em frequência do encoder em um sinal de tensão (MACHADO *et al.*,2011a), além de circuitos de segurança para o conversor A/D.

Definiu-se, inicialmente, o uso de microcontroladores (MCUs) para a amostragem, conversão, preparo e armazenamento dos sinais digitais, já que este tipo de controlador elimina a necessidade do uso de computadores próximo ao processo de soldagem (maior portabilidade), ou seja, um sistema independente (embarcado), sua natureza programável garante a escalabilidade do produto, e, boa parte dos MCUs disponíveis comercialmente, já possuem periféricos para conversão (conversor A/D de 12 bits) e armazenamento (memória), e, em produtos específicos, periféricos que trabalham diretamente com encoders em quadratura.

Por fim, o dispositivo de comunicação sem fio deve ser selecionados. 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. O uso de infravermelho, em uma breve avaliação, não se adéqua aos requerimentos deste sistema, já que é necessária uma linha direta para a comunicação (emissor e receptor alinhados), assim, em um ambiente industrial, obstáculos e o constante movimento de pessoas e máquinas o inviabilizam. Esta é a principal, porém não única, limitação deste método de comunicação sem fio.

Em comunicação por radiofrequência, existe 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. Dentre elas, a faixa de 2400-2500 MHz (2.4 GHz), se popularizou na aplicação de redes sem fio, tais como Wi-Fi (IEEE 802.11b/g), Bluetooth(IEEE 802.15.1) e ZigBee (IEEE 802.15.4) (ITU, 2010). A frequência elevada de comunicação torna o dispositivo imune aos ruídos gerados pelos equipamentos utilizados em soldagem e seus módulos de comunicação são comercialmente disponíveis por diversos fabricantes para sua integração com sistemas microcontrolados, como em celulares, notebooks, etc.

O padrão Wi-Fi (IEEE 802.11b/g) foi escolhido para a comunicação entre o sistema de aquisição e a interface com o usuário por apresentar uma maior taxa de comunicação de dados e maior flexibilidade de uso (monitoramento inserido em uma rede de computadores).

Como interface com o usuário, com comunicação Wi-Fi, a criação de um serviço de página de internet se apresenta como a mais dinâmica, flexível, com maior escalabilidade, e independente do dispositivo de observação (pode-se usar tanto um celular quanto um computador), fazendo assim do dispositivo de aquisição um WebServer. As ferramentas de programação são gratuitas e dispensam, assim, o uso de ferramentas custosas de desenvolvimento de programas, sendo uma grande vantagem frente a produtos programáveis que geralmente necessitam de softwares proprietários, muitas vezes mais caros que o dispositivo físico.

A interface com o usuário é capaz de:

- Cálculo e exibição dos valores, médio e RMS, para os sinais de forma dinâmica (documentação e monitoramento);
- Exibição contínua de gráficos com intervalos de tempo (janela) definidos (monitoramento);
- Possibilidade de armazenamento dos dados recebidos (documentação);
- Informações sobre as versões do sistema, dispositivo físico e de interface com o usuário;
- Manual de utilização do sistema como um todo;
- Configurações administrativas (como atualização das versões do sistema).

É importante ressaltar 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, sendo a interface exibida na Fig. 4.

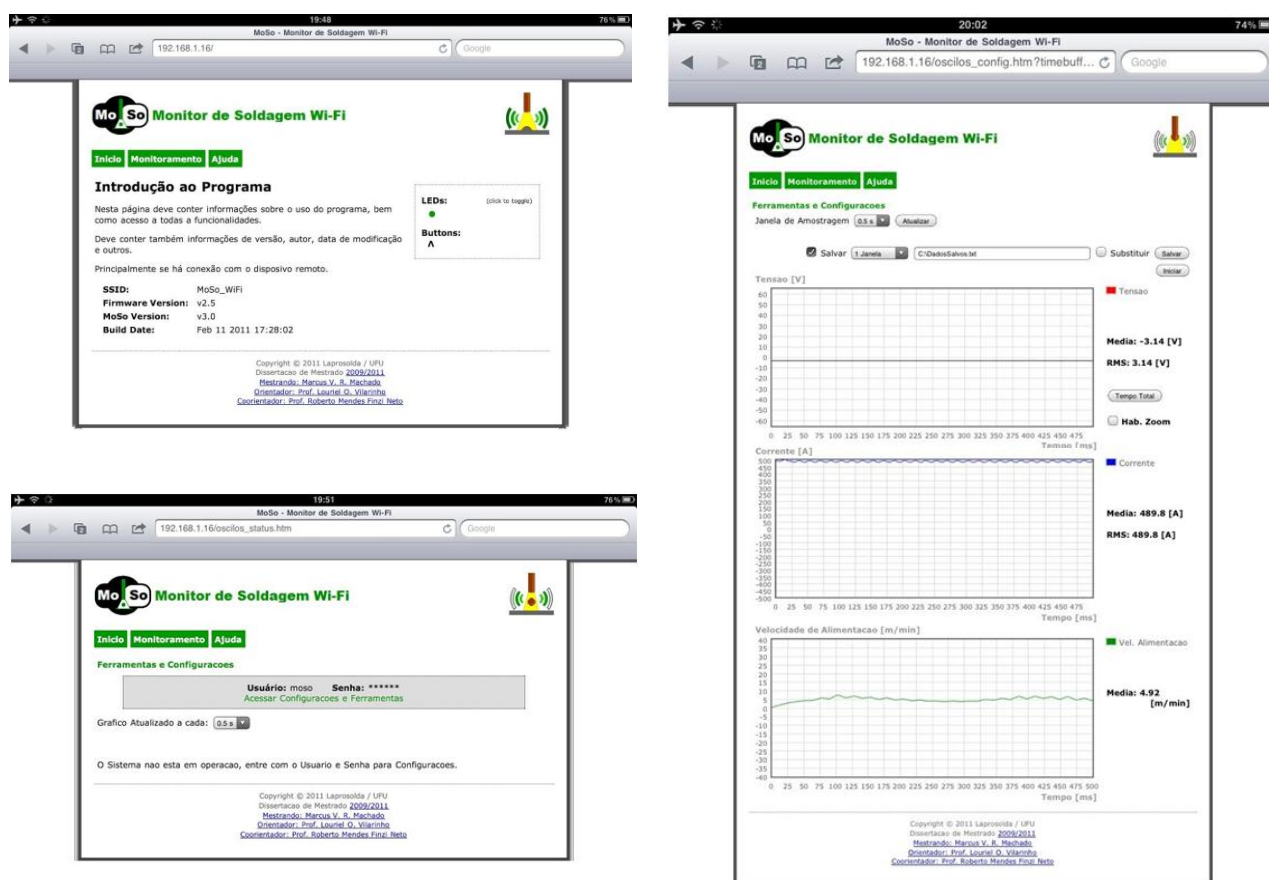


Figura 4: Interface com o usuário

Para validar o funcionamento do sistema de monitoramento sem fio de processos de soldagem a arco elétrico, Monitor de Soldagem WiFi (MoSo Wi-Fi), realizou-se a instalação do protótipo construído em meio operacional de laboratório, e através do monitoramento e sua comparação com um sistema de monitoramento de referência, foi possível validar a aplicabilidade do sistema, sua exatidão e seus limites de uso. As aquisições do sistema de referência foram realizadas 125 kS/s, sendo que no caso este não apresenta filtro passa-baixa para nenhum sinal (corrente e tensão), sendo o mesmo sistema utilizado no estudo dos sinais.

Previamente o sistema foi calibrado com o uso de um banco de carga, que mantém uma resistência constante durante a aplicação de uma corrente constante, sendo então realizadas medidas do valor de corrente e tensão por instrumentos calibrados (padrão) e pelo sistema de monitoramento, de onde se obtém a relação dos valores lidos pelos dois sistemas (MACHADO *et al.*, 2011a). A calibração do sistema apresentou comportamento linear, com valor de coeficiente de determinação  $R^2 = 1$  (o  $R^2$  mede o modo de associação de duas variáveis, quanto da parcela de  $y$  que é explicada por  $x$  (BERTOLO, 2008)). O erro padrão (que calcula o maior erro padrão da estimativa, para a faixa de 95% da amostra e mede a variabilidade em torno da curva de regressão (BERTOLO, 2008)), limitado pela resolução do sistema de conversão A/D, ficou em 0,03 V para a tensão, e 1,2 A para a corrente, indicando que o erro de leitura do sistema proposto está nos limites estipulados.

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, além de soldagens TIG Pulsado e TIG CA, com comportamento em frequência, correntes e tensões nominais variados.

Como forma de validação, se analisou a resposta do sistema MoSo quanto à fidelidade na reprodução do formato de onda, e atendimento dos requisitos das normas de documentação (valores médios retificados e RMS). Os valores de corrente e tensão médios retificados e RMS foram calculados a partir do intervalo entre o início e o fim da solda e calcularam-se, também, os erros relativos entre o Sistema de Monitoramento proposto e um sistema de aquisição de referência. Comparou-se o sinal obtido pelo MoSo com o sinal de referência originalmente adquirido sem uso de filtros e também com a aplicação de um filtro digital passa-baixa, para retirada da alta frequência, Butterworth de 2ª ordem e frequência de corte de 1591 Hz (mesma especificação do analógico do MoSo). Esta comparação foi realizada através da correlação cruzada dos formatos de onda.

A Tabela 1 e a Tabela 2 relacionam os parâmetros para realização dos testes em MAG-P (MAG Pulsado) e MAG goticular, respectivamente. Utilizou-se a condição de UGGP (uma gota por pulso) para os testes MAG-P (OJO e SCOTTI, 2005).

Tabela 1: Parâmetros operacionais para soldagem por MAG-P.

| Teste   | $I_p$ [A] | $t_p$ [ms] | $I_b$ [A] | $t_b$ [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%CO<sub>2</sub> com vazão de 14 l/min, arame de solda ER70S-6 1.0 mm.  $I_p$ : 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. DBCP: distância bico de contato peça.*

Tabela 2: 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%CO<sub>2</sub> 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.*

A Figura 5.a ilustra o teste MAG0001, mostrando o comparativo entre os sinais adquiridos, sem a aplicação do filtro passa-baixa digital aos sinais do sistema de referência. A Figura 5.b ilustra o mesmo teste (MAG0001), porém, comparando-se o sinal obtido pelo MoSo com o sinal de referência filtrado.

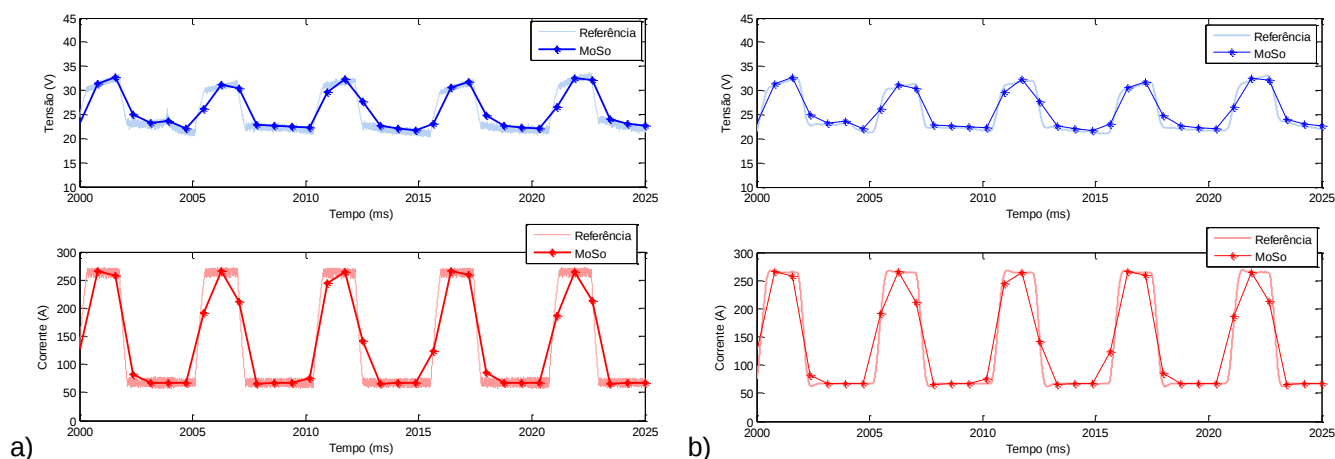


Figura 5: Tensão (superiores) e corrente (inferiores) obtidos no teste MAG0001 para o sistema MoSo e de referência, a) sem filtro e b) com filtro.

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, para o 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 (quando observadas ao longo de toda a solda), 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 observadas da forma de onda adquirida pelo sistema MoSo.

Para comparação de diferente frequência de pulsação, ilustra-se o processo de MAG-P (MAG0002), Fig. 6. 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 grande fidelidade, sempre 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.

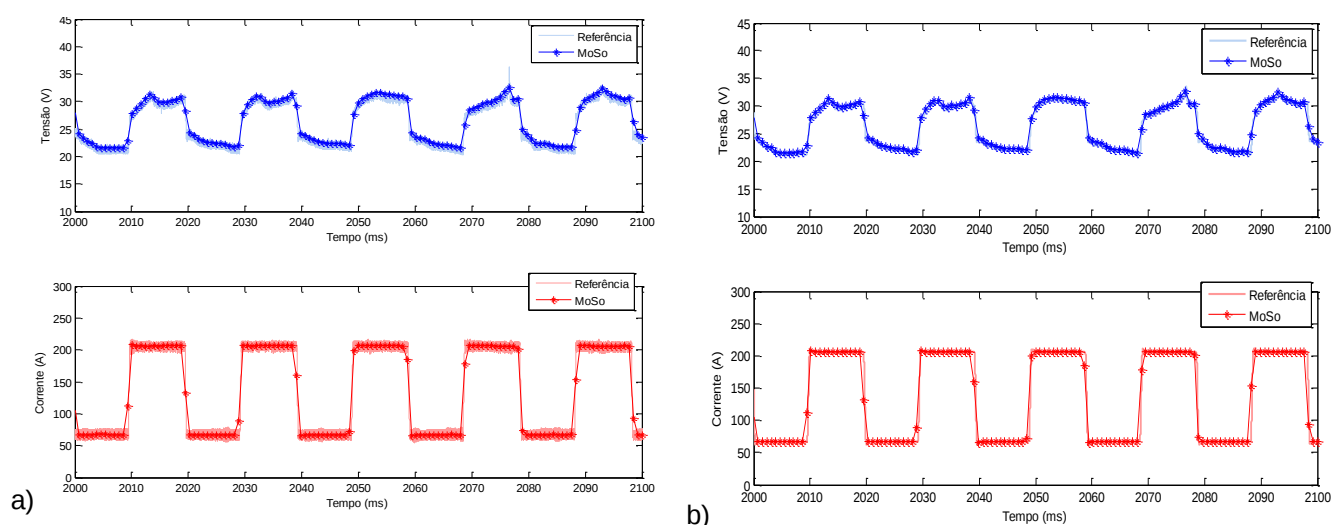


Figura 6: Tensão (superiores) e corrente (inferiores) obtidos no teste MAG0002 para o sistema MoSo e de referência, a) sem filtro e b) com filtro.

Para as formas de onda da tensão, observa-se um pequeno deslocamento entre as duas curvas ( $\sim 0,2$  V), acredita-se que este deslocamento pode ser resultante de erros de calibração, tanto do MoSo quando 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.

Para as soldagens MAG goticular, onde os sinais de tensão e corrente apresentam baixas frequências, sendo predominantemente compostos 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 Fig. 7.a. Quando se aplica o filtro sobre o sinal de referência, Fig. 7.b, as diferenças entre as curvas ficam praticamente imperceptíveis, sendo completamente aplicável o sistema MoSo para soldagem MAG goticular.

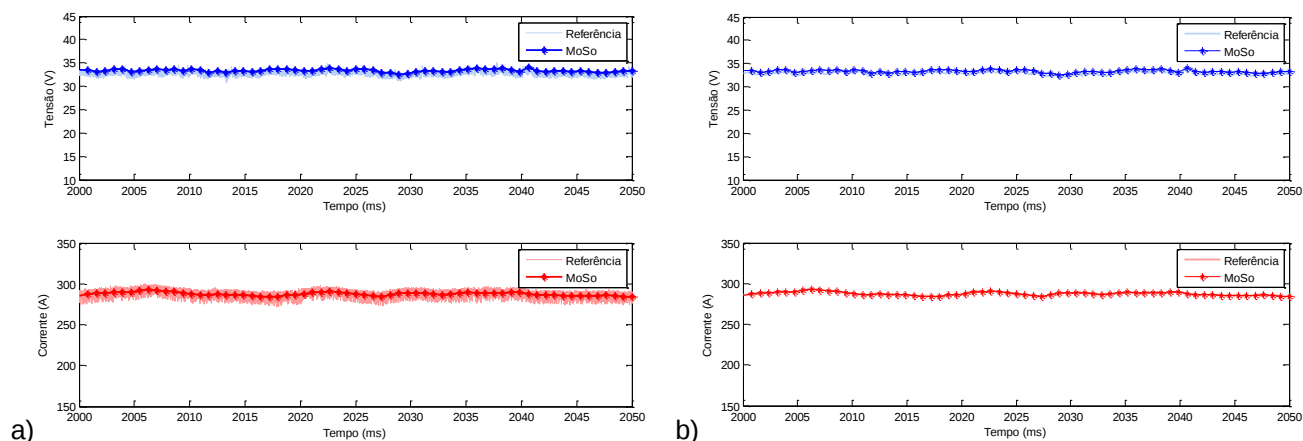


Figura 7: Tensão (superior) e corrente (inferior) obtidos no teste MAG0003 para o sistema MoSo e de referência. a) sem filtro e b) com filtro

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 gotícula, mostraram, como esperado, que 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 reproduzir o formato de onda com boa fidelidade para soldagens pulsadas próximas de 200 Hz, os valores médios e eficazes são representativos dos processos.

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 de corrente, as correlações apresentaram valores acima 0,9, chegando ao valor máximo (1,0) quando comparado com o sinal filtrado. Sendo assim, a correlação obtida entre as formas de onda entre os sinais adquiridos pelo MoSo e referência foram considerados satisfatórios, sendo então o sistema proposto capaz de realizar o monitoramento para os processos citados.

A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros para a realização dos testes em soldagens MAG com transferência metálica por curto-circuito.

Tabela 3: Parâmetros operacionais para soldagem por curto-circuito.

| Teste   | Tensão [V] | Valim [m/min] | DBCP [mm] | Frequência de curto-circuito [Hz] |
|---------|------------|---------------|-----------|-----------------------------------|
| MAG0006 | 18,0       | 4,0           | 15        | 75                                |
| MAG0007 | 25,0       | 10,0          | 15        | 40                                |
| MAG0008 | 19,0       | 4,0           | 23        | 80                                |
| MAG0010 | 27,0       | 8,0           | 23        | 50                                |

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

Para a discussão das soldagens MAG curto-circuito, optou-se pelos testes com menor e maior frequência de transferência metálica. A Figura 8 mostra o comparativo entre os sinais adquiridos, tanto de tensão quanto de corrente, sem a aplicação do filtro passa-baixa digital aos sinais do sistema de referência.

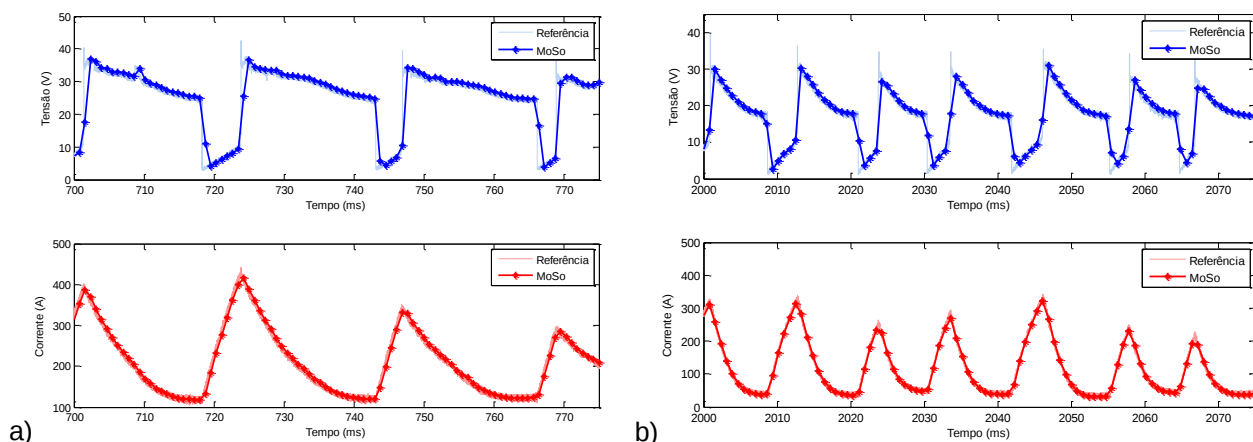


Figura 8: Tensão (superiores) e corrente (inferiores) obtidos no teste MAG0007 (a) e MAG0008 (b) para o sistema MoSo e de referência sem filtro digital.

Observou-se pelas formas de onda adquiridas pelo MoSo, que a taxa de amostragem mostrou-se suficiente, representando, visualmente, de forma fiel o observado pelo sistema de referência, para ambos testes. As frequências de curto-circuito consideradas estáveis variam de 20 a 200, segundo diversos autores que apresentam trabalhos com diferentes valores. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008; NEEDHAM, 1985; ADOLFSSON *et al.*, 1999).

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 a o sinal de tensão apresenta transições abruptas, enquanto o sinal da corrente, pelo efeito da indutância, apresenta transições mais suaves podendo 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-circuito 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.

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 próximas 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.

Para as soldagens por TIG, a Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros para a realização dos testes.

Tabela 4: Parâmetros operacionais para soldagem processo TIG (ROCHA, 2001).

| Teste   | Ip [A] | tp [ms] | Ib [A] | tb [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. 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. DEP: distância eletrodo peça.

Discutindo os processos TIG CA, escolheu-se para análise visual o teste com maior frequência de pulsos, ou seja, o ensaio TIG0006. A Figura 9.a mostra o comparativo entre os oscilogramas obtidos pelos dois sistemas, com o de referência sem filtro digital, e a Fig. 9.b com o sinal de referência filtrado.

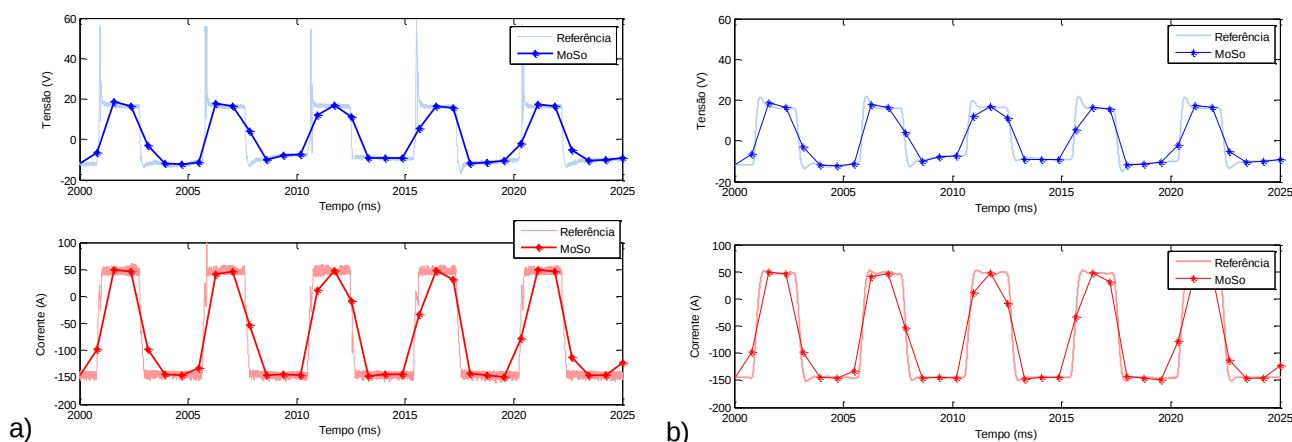


Figura 9: Tensão (superiores) e corrente (inferiores) obtidos no teste TIG0006 para o sistema MoSo e de referência, (a) sem filtro e (b) com filtro

Da mesma forma que 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, mesmo sem uma boa representação do formato de onda, e sendo este teste de 200Hz de frequência de pulso.

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). No sistema MoSo, tanto a inserção de um filtro passa-baixa nos circuitos de condicionamento de sinal, quanto a baixa taxa de amostragem fizeram com que esta componente de alta frequência (pico de reformação do arco) não fosse observada. Quando o sinal de referência é filtrado, o pico de reformação é confundido a um pico de overshoot de resposta do filtro. 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.

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. Diz-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.

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 matemáticos.

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.

Diz-se então que o sistema proposto é aplicável para uma abordagem tecnológica, em soldagens TIG Pulsado, CC, e apresentada uma aplicabilidade limitada a TIG CA para frequências até 100 Hz.

O sistema de monitoramento sem fio (projetado, construído e validado), apresentou importantes resultados. Em relação à caracterização dos sinais elétricos de soldagem a arco destaca-se que, para fins tecnológicos, os sinais da soldagem apresentaram frequências de interesse máximas de 300 Hz. Os filtros passa-baixa de segunda Butterworth com 1,5 kHz de frequência de corte e as taxas de amostragem em 1280 S/s mostraram-se suficientes para a observação destes sinais. Para abordagem científica, taxas de amostragem de 2000 S/s são indicadas, em alguns casos 4000 S/s e, para se observar detalhadamente os sinais dos processos de soldagem, amostragem da ordem de 125 kS/s são recomendadas sem a utilização de filtros.

Quanto ao equipamento construído temos que, a tecnologia de comunicação por WiFi aliada à interface por WebServer implementada por um microcontrolador apresentou grande aplicabilidade de flexibilidade, e dão ao sistema escalabilidade, flexibilidade e portabilidade, sendo o protótipo com dimensões de 89x180x260 mm, menos de 1,5 kg com os cabos e transdutores.

Em relação à validação do sistema MoSo, o mesmo se apresentou adequado para monitoramento de soldagens MAG-P, MAG e MAG curto-circuito, com erros menores que 2% nos valores de tensão e corrente médias e eficazes, e em soldagens TIG pulsadas, com erro relativo inferior a 2,5%, apresentando boa reprodução dos formatos 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 boa reprodução dos formatos de onda para abordagem tecnológica.

Diz-se então que o dispositivo proposto apresenta grande capacidade de aplicação no monitoramento em processos de soldagem em ambientes industriais e trabalhos em campo, devido a sua flexibilidade, robustez e portabilidade, sendo que se pode realizar o monitoramento dos processos de soldagem por computadores que estejam em rede com o equipamento, além de ser possível realizar o acompanhamento de produção através de celulares e/ou tablets.

## REFERÊNCIAS

- ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJÖ, G.; CLAEISSON, I. On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding. WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, v. february, p. 59s-74s, February 1999.
- BERTOLO, L. A. Revisão de Estatística, Apostila. p. 14, 2008.
- 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 requirements 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), 2008, "G013. What is meant by ISM applications and how are the related frequencies used?" Acessado em: 07/11/2010. Link: [www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013](http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013)
- MACHADO, M. V. R. Sistema Embarcado para Monitoramento Sem Fio de Sinais em Soldagem a Arco Elétrico com Abordagem Tecnológica. 2011. 126f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- MACHADO, M. V. R., MOTA, C. P., FINZI NETO, R. M., VILARINHO, L. O. Topologia de Condicionamento de Sinais para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco. Anais do Consolda 2011. Natal – RN. 2011. 11p.
- 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 Cobef 2011. Caxias Do Sul, Rs, Brasil. 11 P.
- MODENESI, P. J. Fontes de Energia para a Soldagem a Arco. Apostila, p. 37, 2009.

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

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%O<sub>2</sub>. Uberlândia: 23 p. 2005.

PONOMAROV, V.; ALERHAYEM, O. ; et al. Arc Welding Process Statistical Analysis. Methodical approaches, analysis conceptions, experiences. 1. ed. Helsingor: 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.

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

SCOTTI, A. E PONOMAREV, V., 2008, "Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, Melhor desempenho", Artliber Editora Ltda, São Paulo, Brasil.

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

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.

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.