

Controle de Parâmetros de Soldagem com Tecimento através do uso de Acelerômetros e Sensores de Presença

Marcus Vinícius Ribeiro Machado, mvmachado@mecanica.ufu.br
Carolina Pimenta Mota, cpimentamota@gmail.com
Luiz Carlos Menezes Júnior, lycan-jr@hotmail.com
Louriel Oliveira Vilarinho, vilarinho@mecanica.ufu.br

Resumo: A instrumentação e controle inseridos nos processos de fabricação, principalmente relacionados aos processos de soldagem, tem se desenvolvido de forma acelerada nos últimos anos. O desenvolvimento de tecnologias embarcadas mais baratas e acessíveis ao desenvolvedor e consumidor final tem modificado a forma como o monitoramento destes processos tem sido realizada. Além dos sinais usuais de tensão, corrente e velocidade de alimentação, a realidade atual permite que outras variáveis possam ser monitoradas durante a realização da solda, sinais como a emissão luminosa e pressão sonora do arco voltaico, ou mesmo as características da poça de fusão, como largura ou penetração podem ser monitoradas durante a realização da solda. Pensando-se em soldagens automáticas ou mecanizadas, o ângulo de ataque e o tecimento da soldagem (oscilação do ângulo de trabalho) são importantes em revestimentos por cordões de solda e uniões com juntas chanfradas, principalmente onde há diferenças entre espessura das peças a serem soldadas, sendo que estes apresentam séria dificuldade de serem medidos e principalmente controlados. Atualmente há propostas para tal problema, mas não de forma contínua durante a soldagem, assim uma solução para o monitoramento e controle do tecimento e ângulo de ataque da tocha de soldagem é através do uso de acelerômetros e sensores de presença. O acelerômetro e sua característica simples de resposta analógica proporcional à aceleração da gravidade permite o monitoramento, de forma indireta, do ângulo de inclinação quando o objeto apresenta comportamento estático. Da mesma forma, podem-se utilizar sensores magnéticos ou transmissivos óticos para a determinação da presença de um objeto em certa posição. Portanto, a proposta deste trabalho é o projeto e o desenvolvimento de um sistema embarcado, flexível, robusto e de baixo custo que seja capaz de monitorar o ângulo de inclinação (trabalho) da tocha durante o movimento de tecimento e controlar uma fonte de soldagem possibilitando o uso de três conjuntos de parâmetros distintos (utilizando um para cada lateral do chanfro e outro para a raiz), indo desde a escolha de um microprocessador e sensores capazes de realizar a tarefa, até a fabricação dos circuitos, projeto de um filtro para eliminar os comportamentos dinâmicos e teste in-loco em uma mesa movimentadora XY-T, utilizada para realização de soldagens com tecimento.

Palavras-chave: Soldagem, Tecimento, Monitoramento, Acelerômetro, Controle.

1. INTRODUÇÃO

A instrumentação e controle inseridos nos processos de fabricação, principalmente relacionados aos processos de soldagem, tem se desenvolvido de forma acelerada nos últimos anos. O desenvolvimento de tecnologias embarcadas mais baratas e acessíveis ao desenvolvedor e consumidor final tem modificado a forma como o monitoramento destes processos tem sido realizada. Quando se fala em tecnologia embarcada, tem-se, por princípio, a ideia de um dispositivo ou equipamento que tenha em sua constituição todos os componentes necessários para seu funcionamento (MACHADO, 2011), como sua unidade de processamento e entrada e saída de dados. De uma forma geral, chamamos de sistema embarcado aquele que realiza a sua tarefa, seja esta qual for, sem ajuda de qualquer outro equipamento (como um computador). Bons exemplos de sistemas embarcados são as próprias fontes de soldagens, os caixas eletrônicos de bancos ou mesmo um alarme de cabeceira.

Além dos sinais usuais de tensão, corrente e velocidade de alimentação, a realidade tecnológica atual permite que outras variáveis possam ser monitoradas durante a realização da solda. Sinais como a emissão luminosa e pressão sonora do arco voltaico, com instrumentos de fácil acesso ao pesquisador (espectrômetros, câmeras térmicas ou microfones) podem fornecer informações sobre a composição (qualitativa) gasosa do arco ou o comportamento da transferência metálica (BÁLSAMO *et al.*, 2000; VILARINHO, 2009; MOTA *et al.*, 2011). Mesmo as características da poça de fusão, como largura ou penetração podem ser monitoradas durante a realização da solda através de câmeras industriais e softwares de processamento de imagens (ZHANG *et al.*, 1995; ZHANG *et al.*, 1996; BASKORO *et al.*, 2008; HARA e SUGA, 2008; CHEN *et al.*, 2009), recursos que vem se tornando mais usuais em diferentes setores das pesquisas e indústrias.

Pensando-se em soldagens automáticas ou mecanizadas, com maior produtividade e flexível à inserção de tecnologias de monitoramento e controle, o ângulo de ataque e o tecimento da soldagem (oscilação do ângulo de trabalho) são variáveis importantes. Por exemplo, em soldagens para revestimentos ou em uniões com juntas chanfradas, principalmente onde há diferenças entre espessura das peças a serem soldadas. Saber a posição angular da tocha de soldagem em relação a um ou mais eixos é uma tarefa que apresenta sérias dificuldades. Quando se tem acesso ao controlador da movimentação da tocha (como um braço robótico ou mesmo uma mesa movimentadora) a solução é, de certa forma, simples e direta. Porém, quando se busca um monitoramento contínuo durante o processo de soldagem, onde o sistema de movimentação é fechado ao usuário (o que é a realidade na maioria das vezes), a solução seria a implantação de um sensor que seja capaz de monitorar de forma independente ao sistema de movimentação a posição da tocha de soldagem.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é a concepção, o desenvolvimento e a validação de um sistema de monitoramento da oscilação do ângulo de trabalho (tecimento) da tocha de soldagem e seu uso no controle online dos parâmetros de regulagem do processo de soldagem a arco. O projeto engloba a concepção e escolha de mais de um possível sensor de monitoramento do ângulo de trabalho, analógico ou digital, o desenvolvimento de um dispositivo microprocessado embarcado, incluindo hardware e software, com flexibilidade para o uso de todos os sensores escolhidos, e a validação do sistema como um todo.

2. CONCEPÇÃO

Tendo em vista o objetivo proposto, de controle de parâmetros de regulagem de soldagem durante o processo através do monitoramento do tecimento da tocha de soldagem, e a premissa básica de seu uso direcionado a soldagens de juntas chanfradas (com espessuras similares ou não), tem-se, ilustrada na Figura 1, a concepção de funcionalidade do CONPARTE (Sistema de Controle de Parâmetros por Tecimento).

Durante o processo de oscilação da tocha de soldagem, determinaram-se três regiões de trabalho (da Figura 1, regiões de número 1, 2 e 3). Cada região tem características distintas, como material, espessura da chapa ou comprimento do arco, e a adaptabilidade do processo em cada uma dessas pode significar em um grande aumento da qualidade da junta soldada.

Sendo assim, a concepção inicial da funcionalidade do CONPARTE é a distinção em tempo real da posição da tocha de soldagem em uma das possíveis regiões e, doravante, o envio de um sinal de controle para a fonte de soldagem para que este modifique seus parâmetros de regulagem como, por exemplo, o ajuste da intensidade da corrente adaptando-se à espessura da chapa.

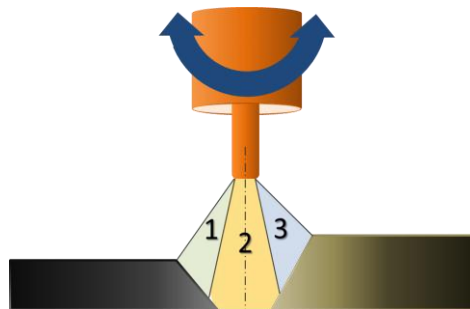


Figura 1. Concepção do controle de parâmetros por tecimento (CONPARTE).

2.1. Sensores

Inicialmente, quando se formula o propósito de medir o ângulo de inclinação da tocha, vêm-se imediatamente à mente o uso de acelerômetros. Acelerômetros são, por base, sensores que medem a aceleração da gravidade em relação a um ou mais eixos. Atualmente, existem sensores de baixo custo e simplificado para o usuário final, inseridos na maioria dos aparelhos tecnológicos que utilizamos no dia a dia, como os *smartphones* ou controladores de jogos.

É possível determinar o ângulo de inclinação usando o vetor de gravidade e sua projeção nos eixos do acelerômetro. Em um acelerômetro de um eixo, uma rotação no eixo do acelerômetro causa a redução da magnitude da aceleração neste eixo e, pela trigonometria básica, a projeção da gravidade no eixo produz uma aceleração igual ao seno do ângulo entre o eixo do acelerômetro e o horizonte (Analog Devices Inc., 2010), como é ilustrado na Figura 2.

De forma similar, para um acelerômetro de três eixos, se podem determinar os ângulos de inclinação para cada um dos três eixos em relação a uma posição de referência (Figura 3). O uso da função arco tangente e da razão entre acelerações traz benefícios como sensibilidade constante e acurácia por todos os pontos da esfera (Analog Devices Inc., 2005; Analog Devices Inc., 2007).

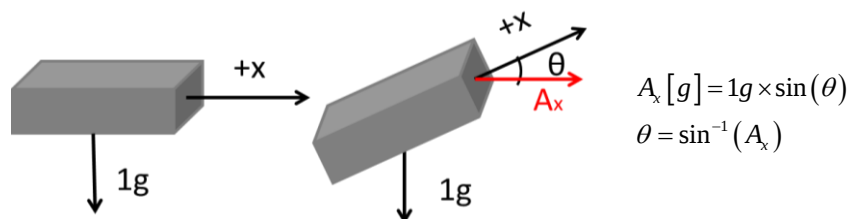


Figura 2. Funcionamento de acelerômetro de um eixo.

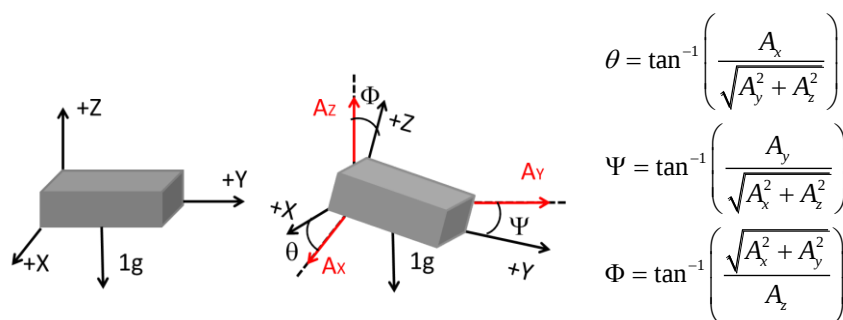


Figura 3. Funcionamento de acelerômetro de três eixos.

Mesmo que seja um sensor absoluto para medição do ângulo da tocha, o acelerômetro tem em sua natureza analógica certa sensibilidade a ruídos eletromagnéticos. Além disso, como sua principal função é medir a aceleração, este sensor é sensível não somente às variações estáticas de posicionamento, mas também às variações dinâmicas. Ou seja, todas as vibrações envolvidas no sistema também acarretam na mudança das projeções nos eixos desse.

Propõe-se de forma complementar, portanto, a procurar soluções de natureza mais simples e robustas às variações dinâmicas da movimentação relativa ao tecimento da tocha (como a grande aceleração nos pontos de inversão de sentido). Sensores digitais são, primeiramente, mais robustos ao ruído eletromagnético inexoravelmente ligado ao processo de soldagem de fontes chaveadas. Uma característica binária permite também uma forma de monitoramento de estados (ativo ou desativo) que pode favorecer também na insensibilização devido às vibrações.

Sendo assim, o primeiro sensor digital utilizado para o monitoramento do ângulo da tocha é o sensor magnético. Muito comum em finalidades do tipo controle de estado de portas (fechada/aberta), o sensor magnético é constituído, em uma parte, de uma chave magnética contendo contatos normalmente abertos ou fechados (NA/NF) e, na outra parte, de um ímã (Athina Tecnologia, 2007). Quando aproximados frente a frente, a chave magnética reage à presença do ímã a certa distância e modifica o estado de seus contatos, agindo como um botão (Renecha Diseño, 2009). A distância entre as partes cujos contatos do sensor são modificados é seguramente constante e precisa o suficiente mesmo para movimentos de maior velocidade e/ou aceleração. O sensor magnético é uma boa opção, também, quando se necessita utilizar o tecimento linear.

De forma similar, pode-se utilizar o sensor transmissivo óptico como sensor digital binário (Vishay Semiconductors, 2011). O sensor transmissivo óptico consiste em um par emissor-receptor de luz, normalmente infravermelha, que estão dispostos frente a frente em uma cápsula própria. Quando um objeto opaco interrompe o fluxo da luz, o foto receptor então é ativado (é um transistor fotossensível do tipo NPN) e é enviado um sinal nível alto para a sua saída. A sensibilidade deste tipo de sensor depende principalmente do tamanho do feixe de luz que é transmitido e receptado entre seus extremos, ou seja, se o feixe de luz é bastante estreito, um objeto como uma agulha pode resultar em um nível alto. Esse tipo de sensor é muito usado em encoders ópticos.

Este tipo de análise ainda pode ser aplicado a mais sensores, de variadas formas (como encoders ópticos relativos) dos que os três apresentados anteriormente. Porém, este trabalho contempla o uso específico desses três, ilustrados na Figura 4, e analisa suas vantagens e limitações de aplicação.



Figura 4. Sensores do CONPARTE: magnético 9028PA (esquerda), sensor transmissivo óptico TCST1103 (centro) e acelerômetro MMA7361L (direita).

2.2. Fonte de Soldagem

Tão importante quando a escolha dos tipos de sensores, a fonte de soldagem a ser controlada é um ponto crucial no projeto. A grande maioria dos fabricantes de fontes de soldagem, em especial as marcas com maior mercado mundial, entrega suas fontes ao usuário final como uma “caixa preta”, sem possibilidade de comunicação ou mesmo controle do funcionamento desta de uma forma remota. Este tipo de equipamento, como o uso de soldagem sinérgicas, pode ser muito útil ao consumidor que realiza trabalho em campo, mas é desfavorável no ramo das pesquisas.

Desta forma, existem poucos modelos de fontes de soldagem que podem ser controlados de forma direta, simplificada e eficiente. Um deles é a fonte DIGIPlus A7, da fabricante nacional IMC Soldagem. Esta contém um modo de controle externo (VIA I/O) que permite que o usuário pré-programe até seis diferentes configurações de soldagem (parâmetros) MIG/MAG e que, durante o processo, um sinal remoto modifique as configurações através de três bits de controle (IMC Soldagem, 2011), conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Bits de controle e programas de soldagem equivalente na DIGIPlus A7 (IMC Soldagem, 2011).

Programa	Bit 2	Bit 1	Bit 0
P1	0	0	0
P2	0	0	1
P3	0	1	0
P4	0	1	1
P5	1	0	0
P6	1	0	1

O modo de controle VIA I/O tem duas limitações que devem ser observadas com atenção. A mudança de um programa para o outro ocorre em até 10ms, porém no caso de transferência por curto-circuito e CA pulsada, a mudança ocorre na reabertura do arco e após o pulso, respectivamente. E o tempo entre programas deve ser superior a 100ms, ou seja, cada região deve ter tempo mínimo de duração de 100ms (IMC Soldagem, 2011).

As características do modo VIA I/O impõem, por consequência, limitações de frequência ao movimento de tecimento. Se cada região deve ter o tempo mínimo de 100ms e, não considerando o tempo de troca de 10ms, tem-se um tempo total de período mínimo de 400ms, ou seja, uma frequência máxima de oscilação de 2,5Hz. Portanto, a partir deste ponto de trabalho, consideram-se todas as oscilações do movimento da tocha com frequências acima do limite máximo como acelerações dinâmicas e, portanto, ruídos.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Hardware

Com a escolha dos sensores apropriados para o monitoramento do ângulo de trabalho da tocha e a forma de controle possível para fonte de soldagem, deve-se desenvolver um sistema embarcado que receba os sinais de quaisquer desses, interprete seus significado (estabeleça em qual das regiões a tocha se encontra) e, por fim, envie sinais de controle para a fonte de soldagem.

Optou-se pelo uso de um microprocessador para a unidade central de controle. Sua natureza permite o uso de sinais de entrada analógicos ou digitais e saídas digitais para a realização do comando da fonte, permitindo, também, fácil comunicação com o usuário final, através de botões, LEDs (diodos emissores de luz) e displays (LCD) - Figura 5. Um sistema portátil e embarcado, podendo ser facilmente adaptado para diferentes ambientes de trabalho.



Figura 5. CONPARTE: sistema real e seus componentes.

A unidade central de controle, ilustrada na Figura 6, é composta pelo microprocessador e 8 bits PIC18F4580, com uma velocidade clock de 40 Mhz (Microchip Technology Inc., 2007). Esta unidade possui dois botões (BOT1 e BOT2) para tomada de decisões do usuário, um conector de entrada/saída para o sensor (ACEL), um conector de saída de 4 pinos para o controle da fonte (FONTE) e três LEDs ligados às saídas digitais e um LCD 16x2 como mostradores de estados.

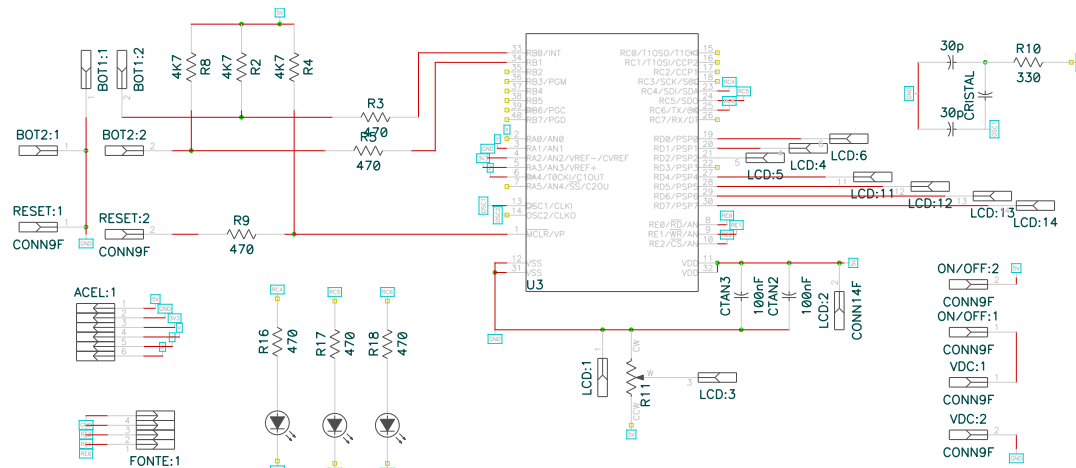


Figura 6. Esquemático da unidade central de controle microprocessada do CONPARTE.

Os pinos responsáveis pela comunicação com o sensor podem ser configurados (2 ao 6), via programação, para se comportarem como entradas analógicas ou mesmo digitais, se adaptando, portanto, aos diferentes sensores escolhidos apenas pela mudança do seu software interno. Desta forma, o circuito de adaptação elétrico de cada sensor foi inserido em um módulo distinto, separado da unidade central de controle e intercambiável através o conector ACCEL.

3.1.1. Módulo Sensor Acelerômetro

Para o acelerômetro não há necessidade de nenhuma adaptação elétrica (Figura 7). Os valores analógicos das acelerações em X, Y e Z são conectados diretamente às entradas analógicas do PIC. O acelerômetro recebe, também, a alimentação de 5 V e retorna um valor de referência (3,3 V) para o conversor A/D (Freescale Semiconductor, Inc, 2008).

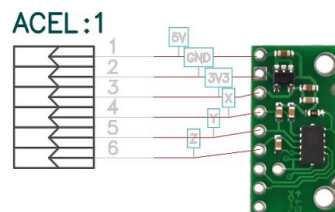


Figura 7. Módulo Acelerômetro: esquemático.

É importante ressaltar que, diferindo dos outros sensores, o sinal analógico do acelerômetro pode sofrer queda em sua qualidade devido a ruídos eletromagnéticos. Desta forma, se construiu uma estrutura em alumínio para a proteção deste sensor. A estrutura, devidamente aterrada ao controle central do sistema, evita a interferência externa no sinal do acelerômetro, assim como protege dos próprios riscos intrínsecos ao processo de soldagem, como os respingos.

3.1.2. Módulo Sensor Magnético

O sensor magnético, como dito anteriormente, funciona como um botão de contatos NA e NF. Desta forma, se utiliza o esquema de resistores *pull-up* e *pull-down* o envio de seu sinal para a entrada digital dos pinos do microprocessador, ou seja, resistores que garantem a alternância segura entre os níveis lógicos alto ($\geq 2V$) e baixo ($\leq 800mV$). Este esquema, ilustrado na Figura 8, é utilizado com qualquer entrada digital de microprocessadores, garantindo, também que não haja extrapolação de corrente permitia no pino do CI (circuito integrado). Optou-se pelo uso dos contatos normalmente fechados do sensor magnético e, através desse esquema de resistores, a porta receberá um nível alto quando o ímã se aproximar do sensor.

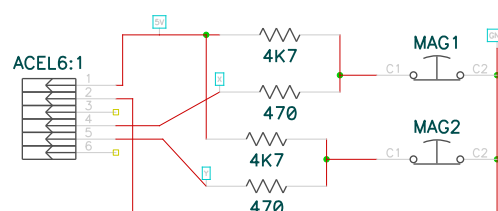


Figura 8. Módulo Sensor Magnético: esquemático.

3.1.3. Módulo Sensor Transmissivo Óptico

O módulo para o sensor transmissivo óptico está ilustrado abaixo (Figura 9). Apesar de utilizar também as configurações de entradas digitais dos pinos do microprocessador, este sensor tem que ser alimentado com a mesma referência que a unidade central de controle para que sua saída seja interpretável. Quando um objeto obstrui totalmente a luz proveniente do receptor, o emissor tem um sinal de saída de 5V. Caso esta obstrução não seja total, mas seja capaz de superar a zona de saturação do receptor, o sinal de saída será menor que 5V e maior que zero. Como citado anteriormente, a entrada digital do microprocessador interpreta seu nível de tensão apenas como nível alto para tensões acima de 2V e abaixo de 0,8V para nível baixo.

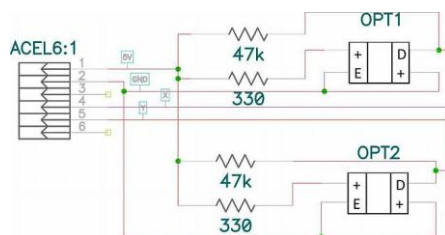


Figura 9. Módulo Sensor transmissivo óptico: esquemático.

3.2. Software

Uma rotina de controle foi desenvolvida em linguagem C e inserida no microprocessador da unidade central de controle. De uma forma básica, como é ilustrado na Figura 10, o programa distingue em qual das regiões a tocha se encontra e, como resposta, indica essa região ao usuário através do acionamento de um dos três LEDs presentes no painel e envia à fonte de soldagem qual programa pré-programado ela deve executar.

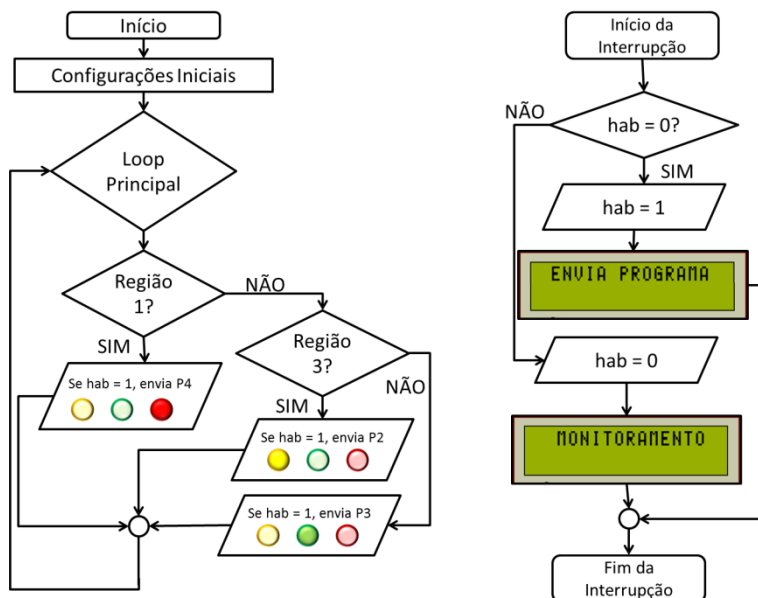


Figura 10. Fluxograma Simplificado do software de controle do CONPARTE.

O envio do sinal para a fonte ainda é condicionado por um botão no painel de controle. No modo de “Monitoramento” apenas há a indicação das regiões através dos LEDs, sem o envio dos sinais para a fonte e, no modo “Envia Programas” ambos os LEDs e sinais de controle são atualizados em tempo real. Padronizou-se, também que o programa pré-programado da região central é o programa P3 (010), e os programas das regiões laterais são os programas P2 (001) e P4 (011).

Particularmente, existem diferenças marcantes no software de controle do acelerômetro para o software de controle dos sensores digitais (sensor transmissivo óptico e magnético). Para os sensores digitais, seus bits de estado (alto e baixo) são varridos a uma alta frequência e, a cada ciclo de varredura, o software direciona o controle de acordo com a região classificada. Com configurações mais simples e uso menor de memória do microprocessador, este software pode ser aplicado, posteriormente, a qualquer sensor digital binário que se desejar.

Por outro lado, a aquisição do sinal analógico do acelerômetro requer uma programação mais complexa do microprocessador, além de requerer um nível alto de processamento do sinal obtido. Os pinos de entrada são

configurados para entradas A/D, então os sinais adquiridos são convertidos para inteiros de 0 a 1024 (10 bits) de acordo com a tensão de referência de $3,3V$, calibrados para simbolizar sua variação entre $1g$ e $-1g$, filtrados através de um filtro digital Butterworth de 2ª ordem em $5Hz$ (duas vezes a frequência máxima de trabalho, a fim de retirar as acelerações dinâmicas), o ângulo de inclinação é calculado através da função atan2 e convertido para graus e, por fim, é determinada a região onde se encontra a tocha e enviado o sinal de controle da fonte e de indicação do usuário por LEDs. Todo este ciclo é repetido há uma frequência de $400Hz$.

4. VALIDAÇÃO

Para validar a aplicabilidade do CONPARTE no monitoramento em tempo real do tecimento e verificar as vantagens e limitações de cada sensor escolhido em sua concepção, se determinaram três situações distintas de soldagem. Para cada situação, a unidade central de controle do CONPARTE foi utilizada com um módulo distinto e, portanto, com um sensor distinto para o monitoramento do tecimento da tocha de soldagem.

Na primeira situação, se determinou um tecimento pendular com tempo de parada lateral, onde as regiões periféricas (1 e 3) ocorram apenas quando a tocha estiver em uma de suas paradas. Na segunda situação, se determinou um tecimento linear sem tempo de parada lateral e com três regiões com largura distintas. Na última situação, se determinou um tecimento pendular com parada lateral com ângulo de troca de regiões distintos dos ângulos de parada. Utilizou-se para o monitoramento de cada situação (Figura 11), respectivamente, os módulos: sensor transmissivo óptico, magnético e acelerômetro.

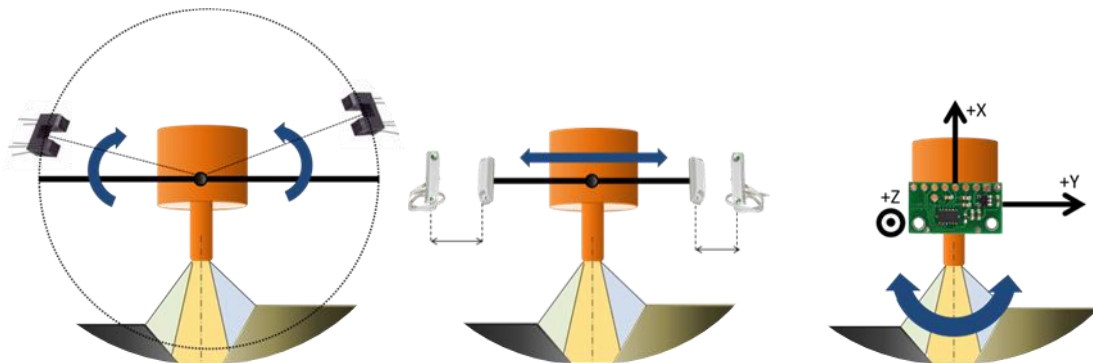


Figura 11. Formas de montagem mecânica na tocha de soldagem para os diferentes sensores.

A Tabela 2 resume a configuração do movimento da tocha durante o processo de soldagem para a validação do módulo com sensor transmissivo óptico. Com um tecimento pendular de frequência em $1Hz$ e amplitude de tecimento de 3° com tempo de parada lateral superior ao tempo mínimo de programa da fonte de soldagem, os sensores transmissivo ópticos foram posicionados de forma que sejam acionados apenas nas paradas laterais, ou seja, nas posições de $\pm 1,5^\circ$ em relação à posição central do tecimento pendular.

Tabela 2. Configuração de movimento da tocha para a validação do módulo de Sensor Transmissivo óptico.

Parâmetro	Valor
Frequência de Tecimento	$1Hz$
Amplitude de Tecimento	3°
Tempo de parada lateral	$0,25s$
Velocidade de Soldagem	$5mm/s$

Os programas pré-programados na fonte de soldagem são resumidos na Tabela 3. Para a manutenção da corrente constante como forma de melhor visualização da mudança de regiões, determinaram-se três intensidades de corrente diferentes e, na fonte de soldagem, programadas como soldagem pulsadas com corrente de pico e de base idênticas. O tempo de pulso total para todos os programa foi de $18ms$.

Tabela 3. Descrição dos programas para a validação do módulo de Sensor Transmissivo óptico.

Programa	Corrente	Velocidade de alimentação	Período de Pulso
P2	$150A$	$3m/min$	$18ms$
P4	$200A$	$3,5m/min$	$18ms$
P3	$100A$	$2,5m/min$	$18ms$

Durante o processo de soldagem, os sinais de tensão e corrente da fonte de soldagem, assim como os dois sensores do módulo sensor transmissivo óptico foram adquiridos. Deve-se ressaltar que os sinais provenientes dos sensores foram adquiridos como sinais analógicos. A Figura 12 ilustra o resultado obtido.

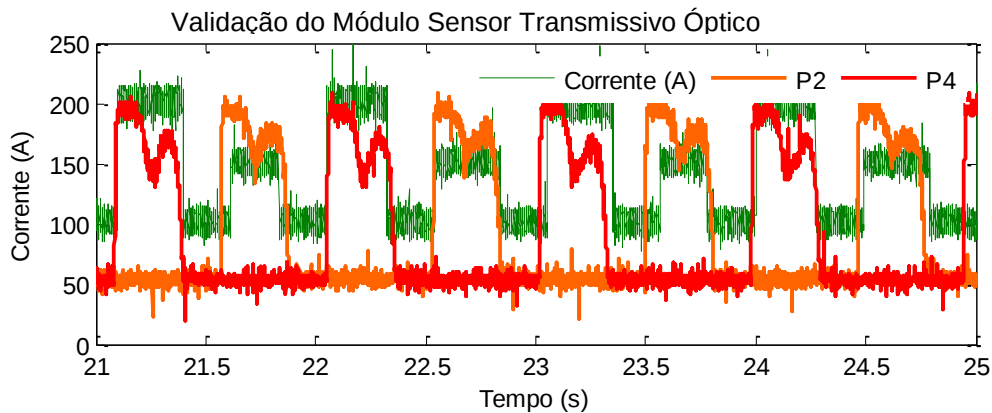


Figura 12. Formas de onda para a validação do módulo do sensor transmissivo óptico.

Observou-se que o sistema, com o uso do módulo de sensor transmissivo óptico, respondeu como esperado e controlou corretamente a alteração entre os programas pré-programados para cada região. Em alguns pontos de troca de região, observa-se um pequeno atraso entre o acionamento (ou saída) do sensor transmissivo óptico e a resposta pela troca de fonte. Acredita-se que o atraso é proveniente do próprio sistema de controle da fonte que, além de um tempo de atraso de até 10ms, tem em sua característica a espera pelo fim do período de pulso (18ms).

Pela aquisição analógica dos sensores é possível observar que a vibração mecânica do sistema de movimentação da tocha (neste caso, uma mesa XY-T) causa uma queda na tensão de saída dos sensores. Deve-se considerar sua de tensão variação real na Figura 12 de 0 a 4V. Acredita-se que esta queda é proveniente da obstrução parcial do feixe de luz do emissor, não causando a saturação total da junção receptora e, portanto, uma menor passagem de tensão. O microprocessador, no entanto, interpreta qualquer tensão acima de 2V como nível alto e, portanto, a vibração não foi capaz de prejudicar o funcionamento do sistema.

A Tabela 4 resume a configuração do movimento da tocha para a validação do módulo com sensor magnético. Com o tecimento linear sem tempo de parada lateral e com amplitude de tecimento de 10mm, os sensores magnéticos foram posicionados para dividirem o movimento da tocha em três regiões distintas, de 6,2mm, 1,4mm e 2,4mm de largura, como ilustra a Figura 13.

Tabela 4. Configuração de movimento da tocha de soldagem para a validação do módulo de Sensor Magnético.

Parâmetro	Valor
Frequência de Tecimento	0,25Hz
Amplitude de Tecimento	10mm
Velocidade de Soldagem	5mm/s

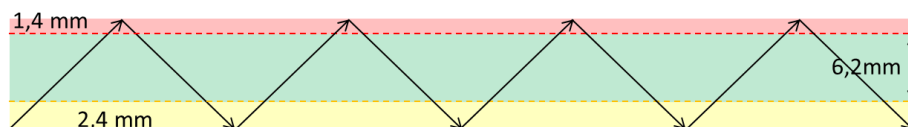


Figura 13. Esquemático do tecimento linear e seus parâmetros.

Os programas pré-programados na fonte de soldagem são resumidos na Tabela 5. Similarmente ao adotado na validação para o sensor transmissivo óptico, determinaram-se três intensidades de corrente diferentes e, na fonte de soldagem, programadas como soldagem pulsadas com corrente de pico e de base idênticas.

Tabela 5. Descrição dos programas para a validação do módulo de Sensor Magnético.

Programa	Corrente	Velocidade de alimentação	Período de Pulso
P2	300A	6m/min	18ms
P4	260A	8m/min	18ms
P3	220A	10m/min	18ms

Durante o processo de soldagem, os sinais de tensão e corrente da fonte de soldagem, assim como os dois sensores do módulo magnético foram adquiridos. Deve-se ressaltar que os sinais provenientes dos sensores foram adquiridos como sinais analógicos. A Figura 14 ilustra o resultado obtido.

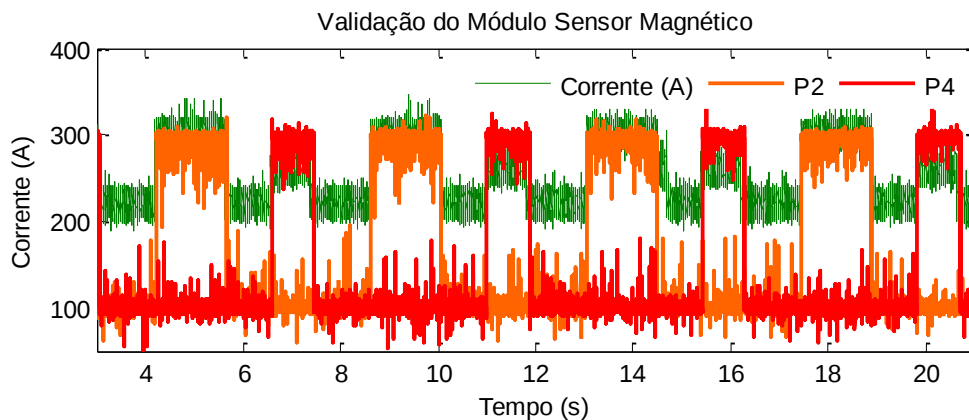


Figura 14. Formas de onda para a validação do módulo do sensor magnético.

Observou-se que o sistema com o uso do módulo de sensor magnético, de uma forma geral, respondeu como esperado e controlou corretamente a alteração entre os programas pré-programados para cada região. O sinal adquirido dos sensores (deve-se adotar sua variação entre 0 a 5V) mostrou-se ruidoso para a aquisição analógica, mas a sincronia exata observada entre os programas e a detecção das regiões pelos sensores prova que o sistema é, de fato, robusto.

Um fato importante a ser ressaltado neste ponto, porém, é a limitação de amplitude mínima de tecimento que pode ser obtida com este módulo de sensor magnético. Como a chave magnética receptora é ativada com uma distância mínima do ímã, limitou-se o uso do sistema a um deslocamento mínimo de 5mm para a distinção correta das três regiões.

Por fim, a Tabela 6 resume a configuração do movimento da tocha para a validação do módulo com sensor acelerômetro. Com o tecimento pendular com tempo de parada lateral e com amplitude de tecimento de 6°, o sistema foi configurado para dividir o movimento da tocha em três regiões distintas, sendo as regiões periféricas iniciadas a +2,5° e -1,9° da linha central do movimento.

Tabela 6. Configuração de movimento da tocha para a validação do módulo de Sensor Acelerômetro.

Parâmetro	Valor
Frequência de Tecimento	1Hz
Amplitude de Tecimento	6°
Tempo de parada lateral	0,25s
Velocidade de Soldagem	5mm/s

Os programas pré-programados na fonte de soldagem são resumidos na Tabela 7. Similarmente ao adotado nas validações anteriores, determinaram-se três intensidades de corrente diferentes e, na fonte de soldagem, programadas como soldagem pulsadas com corrente de pico e de base idênticas.

Tabela 7. Descrição dos programas para a validação do módulo de Sensor Acelerômetro.

Programa	Corrente	Velocidade de alimentação	Período de Pulso
P2	220A	6m/min	18ms
P4	260A	8m/min	18ms
P3	300A	10m/min	18ms

Durante o processo de soldagem, os sinais de tensão e corrente da fonte de soldagem foram adquiridos. Para verificar o funcionamento do acelerômetro, adquiriram-se os sinais de acionamento dos LEDs indicativos dos programas P2 e P4, facilitando a interpretação da funcionalidade do sistema. A Figura 14 ilustra o resultado obtido.

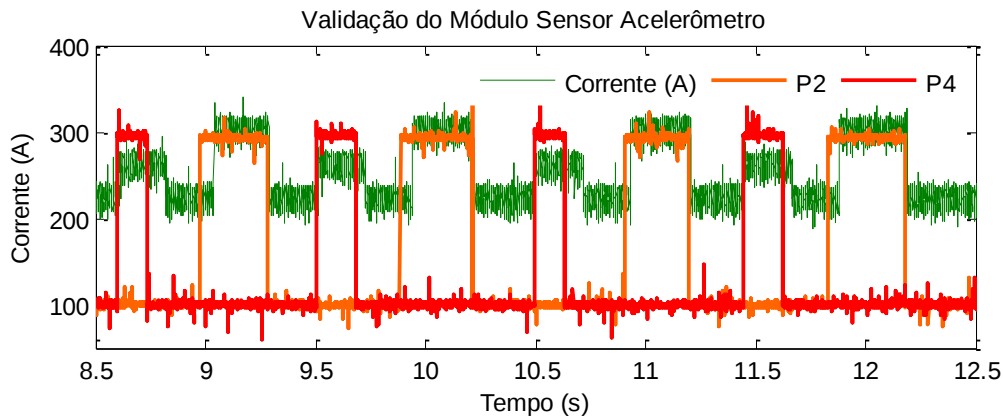


Figura 15. Formas de onda para a validação do módulo do sensor acelerômetro.

Observou-se que o sistema, com o uso do módulo de sensor acelerômetro, respondeu como esperado e controlou de forma correta a alteração entre os programas pré-programados para cada região. Em alguns pontos de troca entre regiões, observa-se um pequeno atraso entre o acionamento do LED e a resposta pela troca de fonte e acredita-se que o atraso é proveniente do próprio sistema de controle da fonte, como ocorreu para a validação do sensor transmissivo óptico.

O sistema de monitoramento com o uso do acelerômetro mostrou-se eficiente e preciso para o monitoramento do ângulo de tecimento da tocha, principalmente após a inserção de um filtro digital no programa de controle para eliminar o efeito proveniente das vibrações do sistema de movimentação. Esta configuração, ao contrário das outras, não demanda uma montagem mecânica complexa ao início de cada soldagem, ajustando a posição dos sensores, pois é um sensor que tem um retorno absoluto em relação à aceleração da gravidade.

Desta forma, pode-se concluir que o sistema CONPARTE é capaz de realizar o monitoramento do tecimento da tocha de soldagem (angular e linear) e controlar os parâmetros da fonte de soldagem, dividindo corretamente o seu movimento em três regiões distintas e flexíveis à configuração do usuário. Sua aplicação é facilmente adaptável a qualquer sistema de movimentação da tocha e sua natureza modular e embarcada o torna flexível e robusto para diferentes tipos de aplicação.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi a concepção, o desenvolvimento e a validação de um sistema de monitoramento do tecimento da tocha de soldagem e seu uso no controle dos parâmetros em soldagens a arco, chamado de CONPARTE, englobando sua concepção e escolha dos sensores de monitoramento, o desenvolvimento de um dispositivo microprocessado embarcado (*hardware* e *software*) com e a validação do sistema como um todo.

Tendo em vista o objetivo proposto e a premissa básica de seu uso direcionado a soldagens de juntas chanfradas (com espessuras similares ou não), a concepção do CONPARTE é a distinção em tempo real da posição da tocha de soldagem em uma das três regiões de trabalho (região central e duas periféricas) e o envio de um sinal de controle para a fonte de soldagem.

Escolheram-se, inicialmente, três diferentes sensores para o uso do CONPARTE com características distintas: um acelerômetro de três eixos (MMA7361L), sensores magnéticos de contato normalmente fechado (9028PA) e sensores transmissivo ópticos no infravermelho (TCST1103). Para a fonte de soldagem, escolheu-se a IMC DIGIPlus A7, que contém um modo de controle externo onde se modifique as configurações (dentre 6 programas pré-programados) através de três bits de controle.

O sistema embarcado é dividido em uma unidade central de controle e seus três módulos. A unidade central de controle é programada de forma flexível para a interpretação dos sinais digitais ou analógicos vindos dos sensores e cada módulo conectado à unidade central de controle tem suas adaptações elétricas necessárias. Esta configuração faz com que seja possível expandir o uso do CONPARTE para diferentes sensores sem necessidade de grandes adaptações.

Em sua validação, concluiu-se que o CONPARTE é capaz de realizar o monitoramento do tecimento da tocha de soldagem (angular e linear) e controlar corretamente os parâmetros da fonte de soldagem em suas três regiões distintas. Os três módulos mostraram-se capazes de realizar o monitoramento correto, sendo que as vibrações mecânicas (aqui adotada como qualquer movimento acima de $2,5\text{Hz}$) se mostrou como a principal dificuldade a ser transposta pelo sistema. Os sensores magnéticos tem em sua limitação uma largura mínima do movimento de 5mm .

Sua natureza flexível, embarcada e programável, faz com que o CONPARTE seja adaptável a qualquer sistema de movimentação da tocha de soldagem, como mesas de movimentação ou braços robóticos. Sua natureza modular permite, também, a inserção de uma gama de outros sensores de monitoramento sem que haja necessidade de modificação da unidade central de controle. Como propostas futuras, espera-se adaptar o CONPARTE para o uso com

encoders ópticos, medidores de profundidade a laser e potenciômetros de precisão, possibilitando assim uma maior gama de sensores possíveis de se utilizar, onde a escolha deverá ser com base na facilidade de adaptação no sistema de movimentação da tocha de soldagem.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos professores do Laprosolda/UFU, pelo incentivo e ideias, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e à CAPES/PROEX.

7. REFERÊNCIAS

- Analog Devices Inc. **AN-1057 Application Note: Using an Accelerometer for Inclination Sensing** 2010. 8 p. Application Note.
- Analog Devices Inc. **AN3107 Application Note: Measuring Tilt with Low-g Accelerometers**. 2005. 8 p. Application Note.
- Analog Devices Inc. **AN3461 Application Note: Tilt Sensing Using Linear Accelerometers**. 2007. 8 p. Application Note.
- Athina Tecnologia. Sensor Magnético de Sobrepor REVERSÍVEL (linha premium) 2007. Disponível em: < http://www.setefogo.com.br/sensores_sobrepor_reversivel.html >. Acesso em: 15 de agosto de 2012.
- BÁLSAMO, P. S. S.; VILARINHO, L. O.; VILELA, M.; SCOTTI, A. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. **Int. J. for the Joining of Materials** 2000.
- BASKORO, A. S.; MASUDA, R.; KABUTOMORI, M.; SUGA, Y. Welding Penetration Control for Aluminum Pipe Welding Using Omnidirectional Vision-based Monitoring of Molten Pool. 8th International Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.
- CHEN, H.; LV, F.; LIN, T.; CHEN, S. Closed-Loop Control of Robotic Arc Welding System with Full-penetration Monitoring. **J Intell Robot Syst**, n. 56, p. 565 - 578, 2009.
- Freescale Semiconductor, Inc. **MMA7361L: ±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer**. 2008. 11 p. Technical Data.
- HARA, K.; SUGA, Y. Penetration Control by Monitoring of Molten Pool Condition in TIG Welding of Thin Steel Metal. 8th International Welding Symposium, 2008. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan. 16-18 November. 1 p.
- IMC Soldagem. **Manual de Instruções DIGIPlus A7**. 2011. 75 p. Manual de Instruções:
- MACHADO, M. V. R. **Sistema Embarcado Sem Fio para Monitoramento de Sinais em Soldagem a Arco Elétrico com Abordagem Tecnológica**. 2011. 115 p. f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Microchip Technology Inc. **PIC18F2480/2580/4480/4580 Data Sheet - 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with ECAN™ Technology, 10-Bit A/D and nanoWatt Technology**. 2007. 483 p.
- MOTA, C. P.; MACHADO, M. V. R.; FERNANDES, D. B.; VILARINHO, L. O. Estudo da emissão de raios infravermelho próximo em processos de soldagem a arco. **Soldagem e Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 044-052, Jan./Mar. 2011.
- Renecha Diseño. **790521/790522/79052 Como Funciona**. 2009. 8 p.
- VILARINHO, L. O. O arco TIG a 100 A e argônio puro é um arco especial? **Soldagem e Inspeção**, v. 14, n. 4, p. 353-357, Out/Dez 2009. ISSN 0104-9224.
- Vishay Semiconductors. **Transmissive Optical Sensor with Phototransistor Output**. 2011. 12 p. Technical Data: 83764.
- ZHANG, Y. M.; KOVACEVIC, R.; LI, L. Adaptive Control of Full Penetration Gas Tungsten Arc Welding. **IEEE Transactions On Control Systems Technology**, v. 4, n. 4, July 1996.
- ZHANG, Y. M.; LI, L.; KOVACEVIC, R. Monitoring of Weld Pool Appearance for Penetration Control. Trends in Welding Research, Proceedings of 4th International Conference, 1995. Gatlinburg, Tennessee. 5-8 June. 4 p.