



Evento: XXVI Jornada de Pesquisa

MODELAGEM DE FORMA DE ONDA PARA PROCESSO GMAW¹

WAVEFORM MODELING FOR GMAW PROCESS

Sinara Rithiele Maciel dos Santos², Mauricio de Campos³, João Manoel Lenz⁴

¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí.

² Bolsista CNPq; estudante do curso Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional (PPGMMC) da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI), atua no Projeto da Empresa Fricke Soldas Ltda, intitulado Modelagem matemática e validação de um conversor de potência de máquinas de solda a arco elétrico.

³ Docente do programa em Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional.

⁴ Docente do programa em Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional.

RESUMO

Este artigo descreve a análise de um modelo matemático direcionado à soldagem por arco elétrico do tipo GMAW. O modelo permite a predição de parâmetros de soldagem, assim como o comportamento do processo em condições operacionais, analisar o comportamento da onda de corrente em circunstância de arco e de curto-circuito geradas no processo de soldagem. Este modelo é baseado em equações que descrevem as características simplificadas da fonte de tensão do inversor, e da carga. Resultados de simulação na ferramenta computacional SIMULINK são apresentados, indicando que o modelo representa satisfatoriamente o processo de soldagem por arco elétrico.

Palavras-chave: GMAW. Soldagem. Onda. Arco. Curto-Circuito. SIMULINK.

ABSTRACT

This article describes the validation of a mathematical model aimed at GMAW welding. The model allows the prediction of some welding parameters, as well as the behavior of the process under operating conditions, to analyze the behavior of the current wave in circumstances of arc and short-circuit generated in the welding process. This model was based on a set of equations, which describe the operating characteristics of the inverse voltage source, modeling the load in arc and short-circuit circumstances. The validation of the model involved simulations in the computational tool of SIMULINK, which the model proved to be able to analyze the behavior with variations in arc length

Keywords: GMAW. Welding. Wave. Arc. Short circuit. SIMULINK.



1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos houve uma grande evolução quanto ao processo de soldagem, a qual é utilizada na indústria, em geral na utilização da fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas metálicas. A sua aplicabilidade abrange desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e como pontes, navios, carros, entre outros. Cada vez mais, exigem-se inovação nas máquinas para a realização da soldagem e surgem técnicas avançadas para união de materiais, particularmente de metais e suas ligas, através da fusão, seguida da solidificação dos materiais quando expostos a uma fonte de calor.

Em Kah (2021), diversos tipos de processos de soldagem são citados e cada um possui sua aplicação adequada. A soldagem por arco elétrico é largamente utilizada por produzir uniões de alta resistência em materiais metálicos, através da conversão de energia elétrica em calor. Para uma maior qualidade e eficiência de uma solda, torna-se necessário a utilização de máquinas com maior precisão, ou seja, o bom resultado garantirá maior durabilidade no produto.

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW – Gas Metal Arc Welding), também conhecida como soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas), um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo, que usado com um escudo no momento de soldagem.

Segundo Zeng (2016), os conversores de potência de máquinas de solda a arco elétrico, mesmo com sua mobilidade, produtividade elevada, facilidade em manuseio e grande automatização, ocorrem decorrentes impedimentos quando referidos a calibragem dos parâmetros de soldagem, o que ocasionam excessos de resíduos. A elevada corrente de operação, pode ser um dos motivos desse fenômeno, por isso, identificar a faixa de corrente adequada para o tipo de material/equipamento, pode diminuir as imperfeições na solda assim como desperdício de material/custos. Assim, a formação da corrente elétrica precisa ser controlada para a estabilidade do arco elétrico, garantindo uma solda mais macia, reduzindo as escórias e os níveis de respingos.



Como em Devakumaran e Ghosh (2010), a qualidade do cordão de solda é amplamente determinada pela seleção ideal de tensão de arco e corrente de soldagem. Paul (2010) relata que a variação dos valores nominais do arco tensão e corrente de soldagem levam a defeitos como falta de fusão e derretimento, causando os respingos. Paul (2011), diz ser necessário estudar as características da fonte de energia sob condições de operação estáticas e dinâmicas para decidir sobre o faixa ideal de parâmetros de soldagem. Tanju e Turhan (2011), esclarece que no processo GMAW, o material é transferido na forma de gotículas de metal fundido que por meio da transferência de curto-circuito, ocorre da ponta do eletrodo para a poça de fusão, e que possui seu próprio comprimento de arco característico, penetração de solda e forma da poça de fusão. Para Ghosh e Kulkarni (2010), nos casos de processo GMAW, o controle da fonte de alimentação de saída é baseado na tensão, enquanto no controle da fonte de alimentação de saída é baseado na corrente.

Um modelo matemático desenvolvido em Yu e Wu (2001) utilizou simulações para estudar a influência dos parâmetros da forma de onda da corrente na transferência de curto-circuito. No entanto, os tais experimentos de controle da forma de onda atual, o controle do estágio do arco era deficiente e instável. Em Zeng (2016), a proposta é um modelo simplificado e eficaz para o processo GMAW. A fonte de alimentação foi modelada por um circuito equivalente RL série juntamente com uma fonte de tensão, inspirada na pesquisa de Tipi (2010a, b).

Em Zeng (2016), onde o objetivo estava em reduzir os respingos e melhor formação de solda, foi adotado um método refinado de controle da forma de onda da corrente e relatamos um modelo para GMAW, seus resultados de simulações, foram comparados com experimentos para avaliação da influência da grande corrente constante e da pequena corrente constante do estágio de arco sobre os resultados da soldagem. Um método de controle de forma de onda onde foi proposto em Zeng (2016), conforme apresentado na Fig. 1.

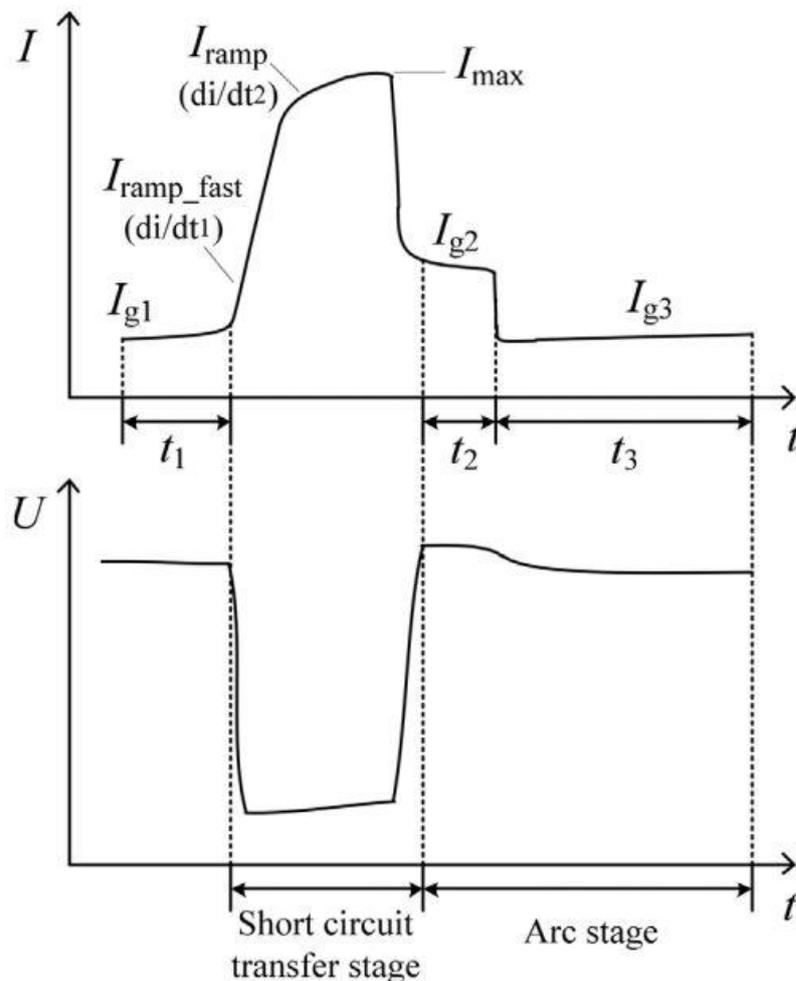


Figura 1: Forma de onda da corrente e da tensão durante o processo de soldagem por arco elétrico.

Em estágio de curto-circuito, a corrente de curto-circuito pode ser controlada para garantir um bom andamento do processo de estrangulamento, ou seja, momento que não há transferência de calor sendo assim, reduzir respingos quando a ponte líquida de curto-circuito se romper. Em estágio de arco, uma grande corrente é necessária para aumentar o arco elétrico, promovendo a fusão do fio de soldagem para formar as gotas derretidas, aumentar a penetração da soldagem e melhorar sua formação.

O sistema em Zeng (2016) se divide em quatro partes: a fonte de alimentação do inversor, o sistema alimentador de arame, o sistema de controle e o sistema de carga de arco.



Contudo, nem todas as variáveis utilizadas foram apresentadas, como, por exemplo, os modelos mecânicos de máquinas e sensores. Neste trabalho, somente as etapas 1 e 2, da Fig.2 serão investigadas.

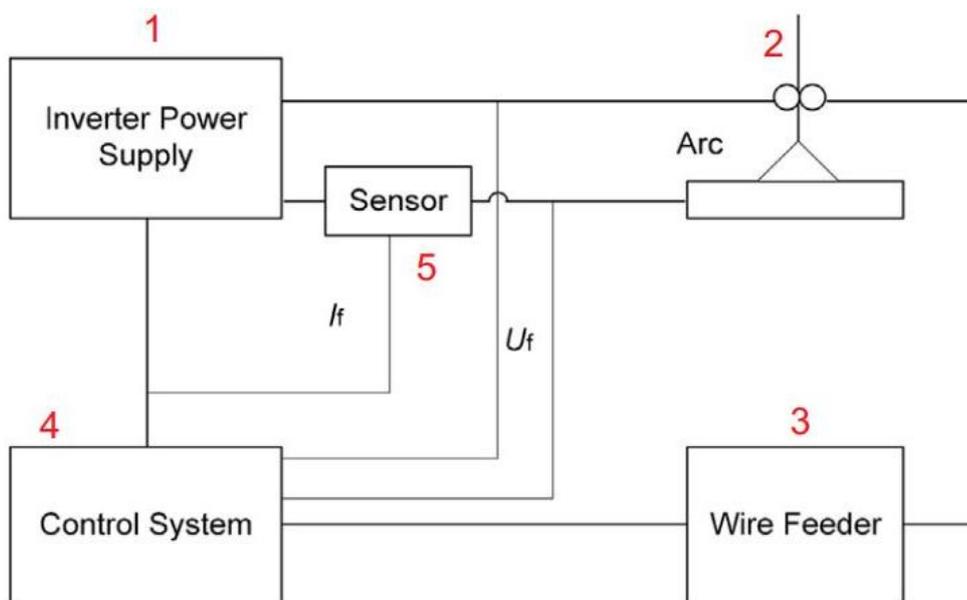


Figura 2: Diagrama esquemático do sistema GMAW controlado por forma de onda.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da onda de corrente em circunstância de arco e de curto-circuito, geradas no processo de soldagem em GMAW. Deste modo, a organização do texto é composta pelas ferramentas e métodos utilizados para chegar à modelagem matemática e as simulações referentes à modelagem da fonte de alimentação do inversor, da carga em estágio de arco e curto-circuito. Seguidos dos resultados obtidos, as conclusões, agradecimentos e referencial teórico.



2. FERRAMENTAS E MÉTODOS

Para este estudo, simulações no software MATLAB/Simulink são realizadas para analisar o comportamento do formato da onda de corrente em circunstância de arco e curto-circuito.

2.1. MODELAGEM DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO INVERSOR

Modelada por um circuito equivalente RL com uma fonte de tensão, como demonstrada na Fig. 3 e expressa em (1), tem-se que U_p , é a tensão de saída do inversor, L é a indutância equivalente do circuito, R é a resistência equivalente do circuito, U_f é a tensão do arco e i a corrente instantânea de soldagem.

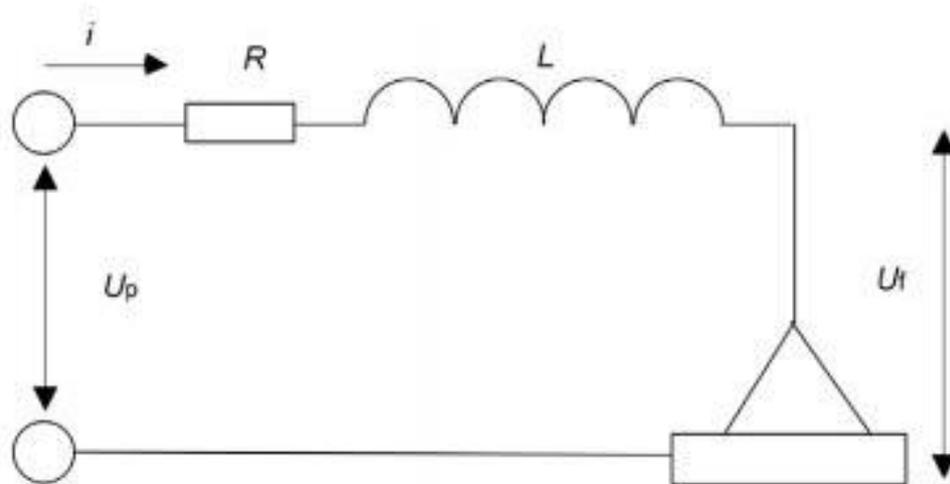


Figura 3: Circuito equivalente da fonte de alimentação.

$$U_p - L \frac{di}{dt} + Ri + U_f + 1 \quad (1)$$

Assim como em Zeng (2016), os valores de L e R utilizados são de 140 μH e 0,025 Ohm , de modo que i pode ser expresso por (2), onde U_p , pode ser substituído por (3), onde inclui o α que é o ciclo de trabalho da forma de onda PWM.

Através da (2), um modelo de fonte de alimentação do inversor é modelado e simulado conforme a Fig. 4.

$$i = \int \left[\frac{U_p - Ri + U_f}{L} \right] dt \quad (2)$$



$$U_p = E\alpha \tag{3}$$

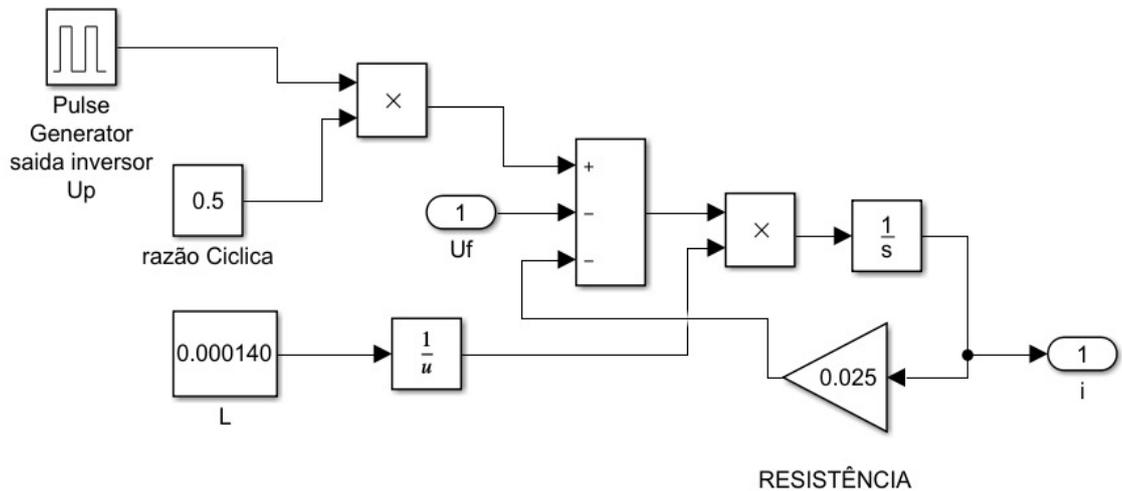


Figura 4: Modelo de simulação do circuito equivalente da fonte de alimentação.

2.2. MODELAGEM DA CARGA EM ARCO E EM CURTO-CIRCUITO

-Alguns fatores contribuem para a formação do arco, como:

- A carga;
- Comprimento do arco L_a : Onde é influenciada pela taxa de alimentação do arame V_s com o comprimento máximo do arco e o tempo t em estágio e curto-circuito. Durante o curto-circuito, o comprimento considera-se zero, como pode ser expresso na (4). Em estágio de arco, o tempo é determinado pelo comprimento máximo do arco e a taxa de alimentação do arame. Como pode ser expresso em (5).

$$L_a = L_{max} - V_s \tag{4}$$

$$L_a = 0 \tag{5}$$

- Forma de alimentação do circuito: Para o processo GMAW, o metal é transferido do arame à poça de fusão apenas quando há contato entre os dois, ou a cada curto-circuito, sendo que o arame entra em curto-circuito com a poça de 20 a 200 vezes por segundo. Quando o arame toca a poça de fusão, a corrente começa a aumentar para uma corrente de curto-circuito. Quando



esse valor alto de corrente é atingido, o metal é transferido. O arco é então reaberto. Como o arame está sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue fundi-lo, o arco será eventualmente extinguido por outro curto. O ciclo recomeça. Não há metal transferido durante o período de arco aberto, somente nos curtos-circuitos. A corrente de soldagem é detectada por um sensor Hall, e um filtro de passa-baixa é utilizado para detectar a tensão do arco e a corrente de soldagem.

- Fusão do fio e sua velocidade: Foi utilizado como material de solda o aço carbono, com placas de 1 mm de espessura, aplicados pequenos comprimentos de arco (baixas tensões) e baixas correntes de soldagem. Por trata-se de simulações, os dados utilizados serão baseados em medições realizados em Zeng [2016]. A modelagem de carga é mostrada na Fig. 5, sendo definido que R_1 é a resistência da extensão do fio, R_2 a resistência da coluna do arco e D um diodo regulador de tensão. Quando a chave K está acionada considera-se em estágio de arco, caso contrário em estágio de curto-circuito. A tensão do arco pode ser calculada através da (6) que define como U_1 é a queda de tensão da extensão do fio, U_2 a tensão queda na coluna do arco e U_3 é a soma da queda do ânodo e queda catódica.

$$U_f = U_1 + U_2 + U_3 \quad (6)$$

A tensão do arco é representada por (7), ou ainda, onde E_1 é o gradiente potencial da coluna do arco e L_a é o comprimento do arco, representada por (8), conforme Zeng [2016], considera-se U_1 como 1 V, U_3 é 19 V, R_1 é 0,02 Ohm. O gradiente de potencial empírico E_1 é determinado como 1,77 V / mm. No estágio de curto-circuito, L_a é considerado 0 mm e U_3 é considerado 0 V. Então, a tensão do arco é obtida desconsiderando as quedas na coluna do arco e a somas das quedas entre ânodo e cátodo da Fig. 5. Representada então, pela (9).

$$U_f = R_1 i + U_2 + U_3 \quad (6)$$

$$U_f = R_1 i + E_1 L_a + U_3 \quad (7)$$

$$U_f = R_1 i \quad (8)$$



Com base em (7) e (8), uma modelagem é mostrada na Fig. 6, o sinal de transição entre o estágio de arco e o estágio de curto-circuito é implementado com o módulo SWITCH do SIMULINK. Assim como em Zeng [2016], se $La > 0$ considerado no estágio de arco, se $La < 0$ é considerado em estágio de curto-circuito.

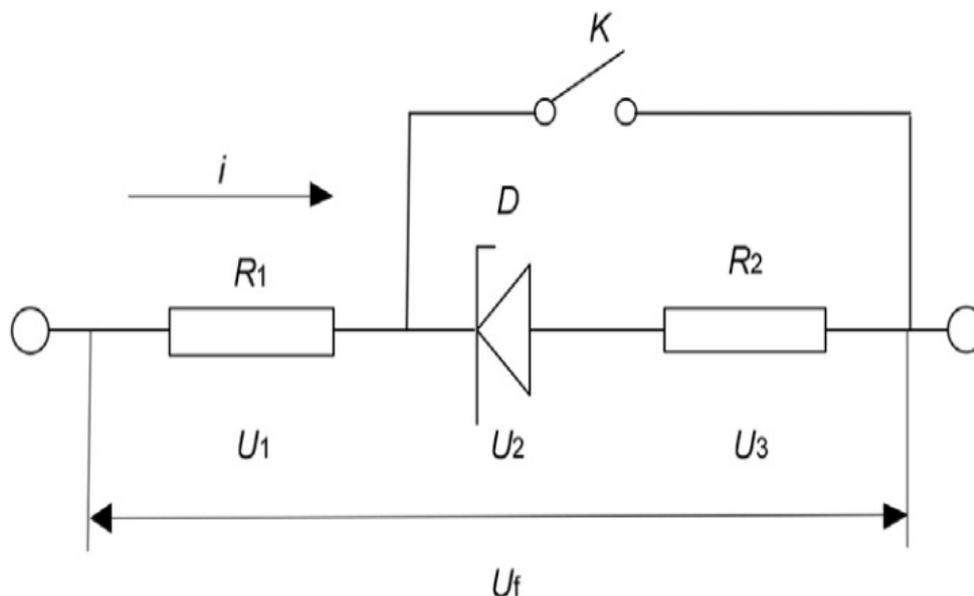


Figura 5: Circuito equivalente da carga.

3. RESULTADOS

Em Zeng [2016], um método refinado de controle da forma de onda da corrente foi demonstrado para a redução de respingos e melhor formação de solda. Para análise do modelo, utilizou-se a ferramenta SIMULINK do MATLAB, e os resultados simulados foram comparados com apresentador pelo autor, de modo a avaliar a influência da corrente em estágio de arco. Com base neste modelo foram confirmados como eficazes e eficientes para uma estabilidade de processo de soldagem. Para este trabalho, baseado na Fig.7 onde mostra as formas de onda experimentais de corrente e tensão de soldagem em placas de 1 mm de espessura com otimização dos parâmetros de controle da forma de onda, resultado do estudo de Zeng [2016]. Para a variável de tensão de saída da fonte de alimentação Up , calculou-se com uma frequência de 76,92 Hz e um período de 0.013 s.

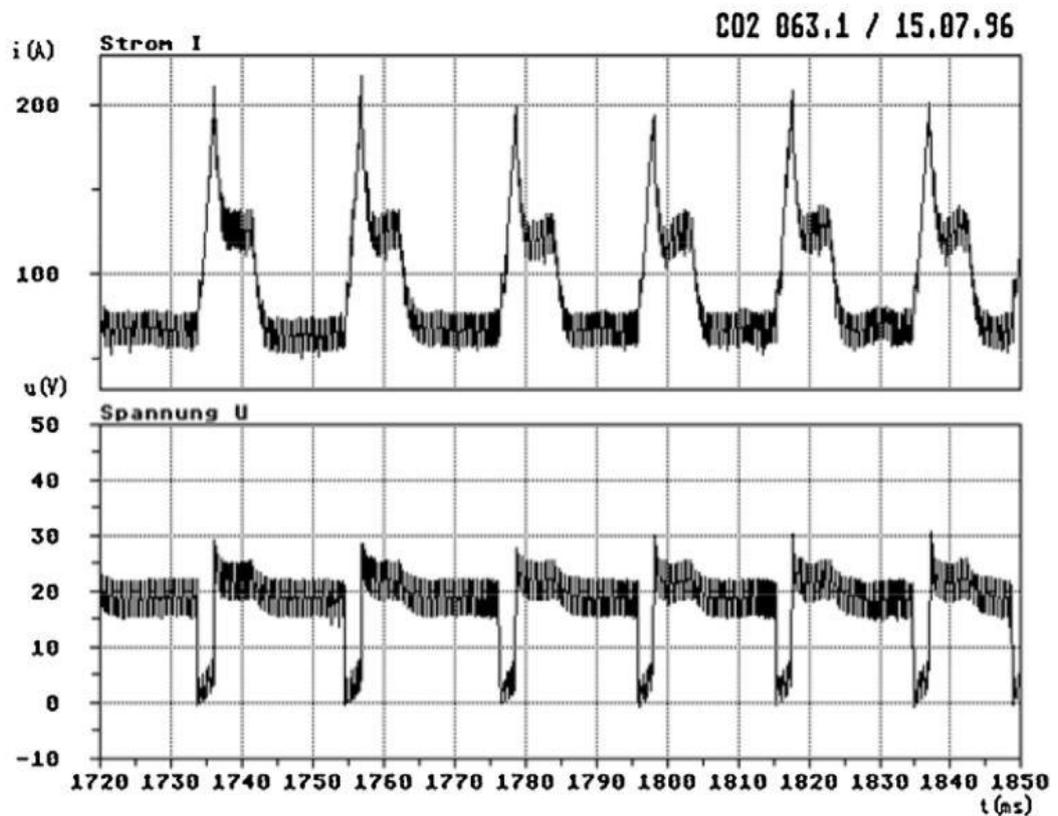


Figura 7: Formas de onda de corrente, com parâmetros otimizados.

Na Fig. 8, pode-se observar a tensão do inversor U_P , definida com valor de 20 V. Já na Fig. 9, o comportamento da tensão do arco U_f . Na Fig. 10 o comportamento da corrente i .

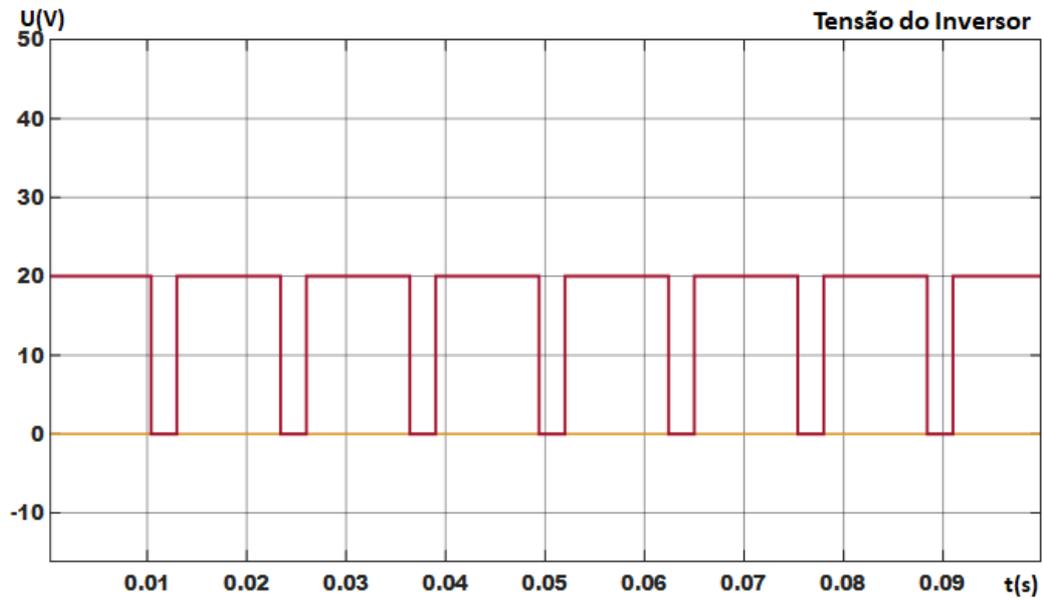


Figura 8: Formas de onda da tensão do inversor.

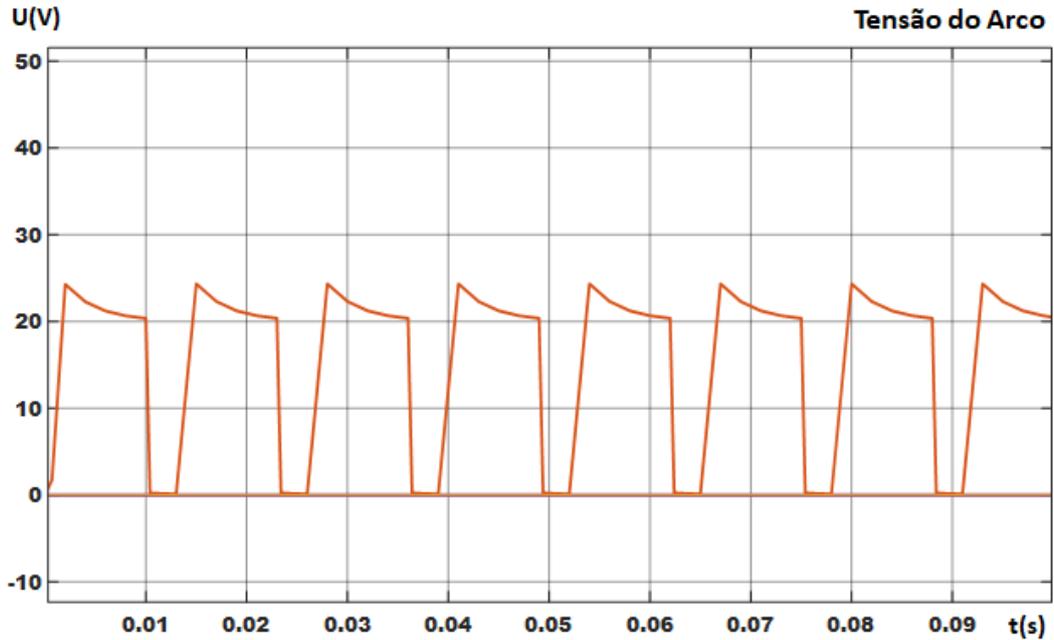


Figura 9: Formas de onda da tensão do arco.

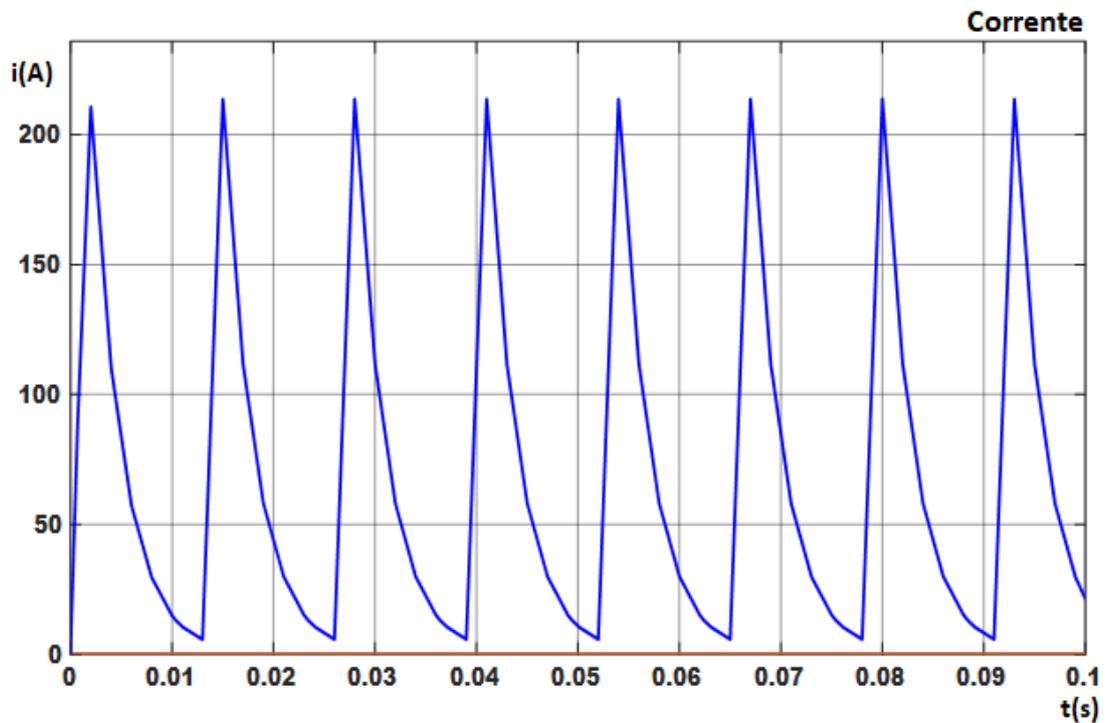


Figura 10: Formas de onda da corrente.

Como se pode observar na Fig. 11, quando o curto-circuito acontece, a tensão do arco $U_f = 0$ e a corrente dispara, atingindo seu valor máximo. Então, i decresce com a variação do comprimento de arco L_a , que é o sinal de transição entre o estágio de arco e o estágio de curto-circuito. A direção da tensão do arco é determinada pelo comprimento do arco detectado: se o comprimento do arco for maior que zero, o processo de soldagem é considerado no estágio de arco, caso contrário o processo é considerado no estágio de curto-circuito.

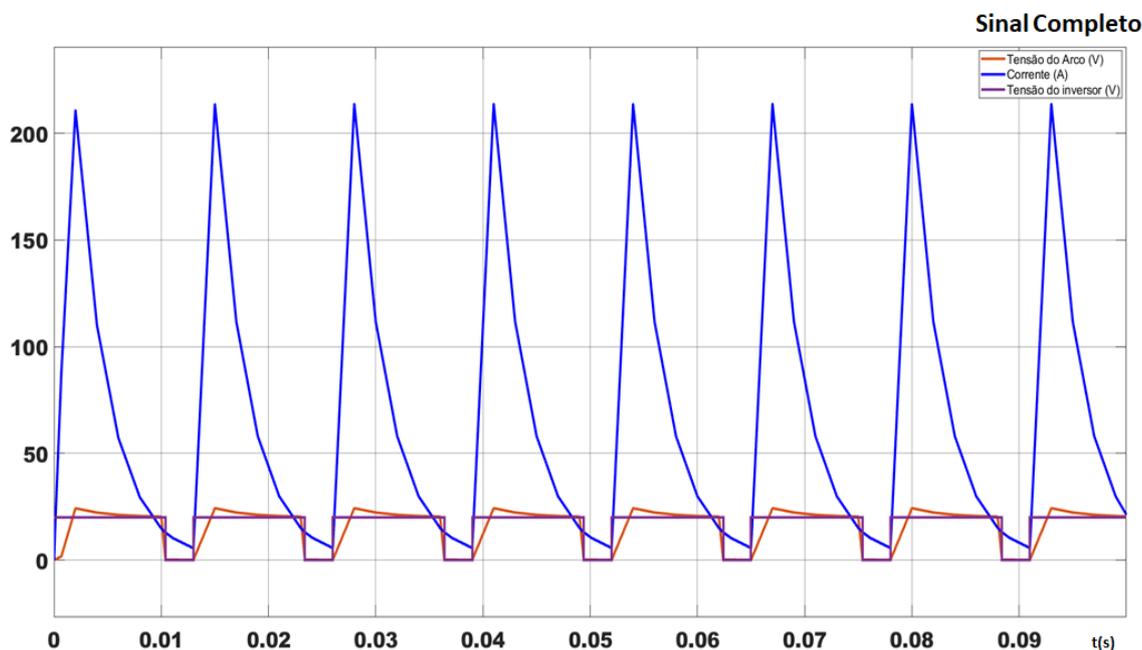


Figura 11: Sinal completo das formas de onda.

Diante dos resultados, concluiu-se que o modelo matemático que utilizou poucos recursos computacionais e apresenta baixo tempo de processamento, mesmo com todas as limitações e ausência de variáveis, quando simulados apresentou resultados relativamente bons em relação a dados apresentados na literatura.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um modelo matemático para análise diretas dos sinais de corrente em circunstancia de arco e de curto-circuito foi simulado, os resultados foram comparados com o resultado otimizado dos parâmetros de controle da forma de onda encontrado na literatura.

Conclui-se que os resultados simulados foram satisfatórios e similares aos comparados com a literatura. Assim, conclui-se que a modelagem matemática e computacional do processo GMAW possibilita a definição dos parâmetros necessários para o controle adequado de corrente e tensão da soldagem por arco elétrico, aumentando sua eficiência e qualidade.



5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), e a Empresa Fricke Soldas Ltda (BALMER), por proporcionar meu ingresso ao programa de pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional (PPGMMC) da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI), por meio da bolsa de estudos e auxílio financeiro, através desta oportunidade, tenho a possibilidade de dedicação integral ao projeto de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Devakumaran, K.; Ghosh, P.K. Thermal characteristics of weld and HAZ during pulse current gas metal arc weld bead deposition on HSLA steel plate. *Materials and Manufacturing Processes* 2010, 25 (7), 616–630.

Ghosh, P.K.; Devakumaran, K.; Bhaskarjyoti, S. Arc efficiency in pulsed current gas metal arc welding of ferrous and non ferrous materials. *Australian Welding Journal* 2009, 54, 38–48.

Ghosh, P.K.; Kulkarni, S.; Devakumaran, K. Modern engineering of arc welding provides wider scope in thermo- mechanical weld simulation for fabrication of advanced Structural steels. *Materials and Manufacturing Processes* 2010, 25 (1–3), 154–160.

Min Zeng, Junsen Huang, Yanjie Zhang, and Pengfei Hu. Modeling for gmaw process with a current waveform control method. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 10 2016. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.018.

Paul Kah. Control of GMAW, pages 165–279. 01 2021. ISBN 9780128239056. doi: 10.1016/B978-0-12-823905-6.00004-0.



Paul, A.K. Energy efficiency prospects of power electronics: Example: Welding inverter. *Indian Welding Journal* 2009, 42 (3), 24–36.

Paul, A.K. Qualitative study of status of indigenous arc welding equipments in India. *Indian Welding Journal* 2011, 44 (3), 58–66.

Tanju, T.; Turhan, K. Weldability of AISI 430=AISI 1030 steel couples via the synergic controlled pulsed (GMAW-P) and manual gas metal arc (GMAW) welding techniques. *Materials and Manufacturing Processes* 2011, 26 (7), 926–932.

Tipi, A.D., 2010b. The study on the drop detachment for automatic pipeline GMAWsystem: short-circuit mode. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 50, 149–161.

Yu, J., Wu, L., 2001. Simulation of droplet transfer process and current waveformcontrol of CO2arc welding. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 11, 667–670(English Ed.).