



## **MODELAGEM MATEMÁTICA EM CAIXA PRETA DE UMA MÁQUINA DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO<sup>1</sup>**

**BLACK BOX MATHEMATICAL MODELING OF AN ELECTRIC ARC WELDING MACHINE<sup>1</sup>**  
**Sinara Rithiele Maciel dos Santos<sup>2</sup>, Mauricio de Campos<sup>3</sup>, João Manoel Lenz<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí.

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> Docente do programa em Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional.

### **RESUMO**

As máquinas de soldagens necessitam de calibragem de parâmetros para obter uma boa estabilidade e qualidade do cordão de solda, influenciando diretamente nesse resultado. Sua topologia envolve muitos processos e estruturas internas, tornando a modelagem complexa ou inacessível. Este trabalho, propõe um estudo através de caixa-preta relacionando os dados de entrada e saída de medições de tensão e corrente, para obtenção do ajuste de curva e encontrar a função de transferência que melhor a descreva.

**Palavras-chave:** Topologia, Caixa-Preta, Função de Transferência.

### **ABSTRACT**

Welding machines need parameter calibration to obtain good stability and quality of the weld bead, directly influencing this result. Its topology involves many internal processes and structures, making modeling complex or inaccessible. This work proposes a study through black box relating the input and output data of voltage and current measurements, to obtain the curve fit and find the transfer function that best describes it.

**Keywords:** Topology, Black Box, Transfer Function.

### **INTRODUÇÃO**

A procura por máquinas de maior precisão, qualidade e eficiência de uma solda, tornou-se necessidade no mercado para garantir melhores resultados e maior durabilidade no produto. Existem diversos tipos de processos de soldagens e cada um possui sua aplicação adequada, através da conversão de energia elétrica em calor e por produzir uniões de alta resistência em materiais metálicos, a utilização da soldagem por arco elétrico vem se destacando na indústria.



Conforme apresentado na Fig. 1 a estrutura básica de inversor, mesmo com uma topologia reduzida facilitando transporte e manuseio, com produtividade elevada, as máquinas de solda a arco elétrico persistem em decorrentes problemas quando tratar-se de calibragem dos parâmetros de soldagem.

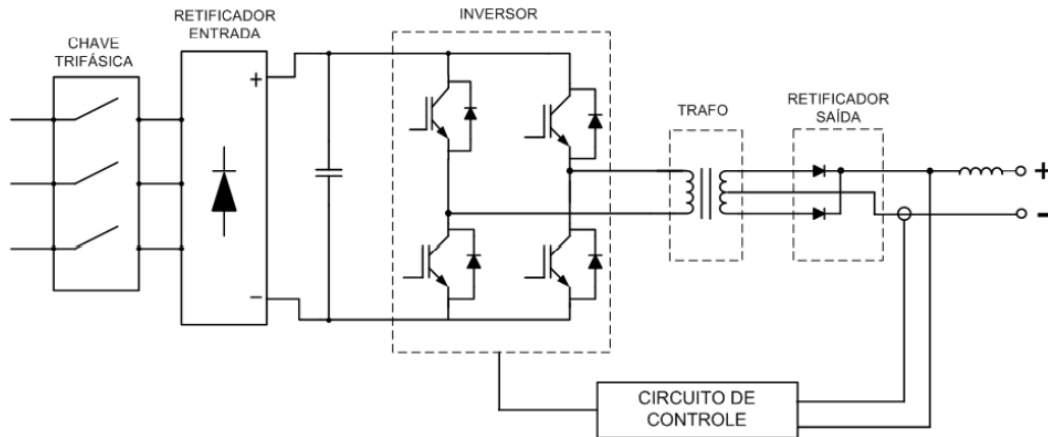


Figura 1: Estrutura básica do inversor.

O circuito funciona através da conexão com a entrada de energia da rede elétrica. A tensão de entrada é retificada através de uma ponte retificadora trifásica, e para a redução de oscilações e tornar a tensão mais contínua, é filtrada por um banco de capacitores. O ajuste da razão de trabalho das chaves do inversor permite regular a tensão na saída, fazendo o controle da tensão fornecida pelo circuito para a carga, e atingido as faixas de tensão e correntes adequadas na saída do equipamento.

A corrente alternada a partir do circuito inversos e ao passar pelo transformador, ganha elevação de corrente e redução de tensão. O transformador quando em conjunto com diodos retificam o sinal no secundário tornando-a contínua novamente.

Na saída do circuito normalmente é incluído um indutor, que auxilia para um bom funcionamento da retificação e contribuindo para manter as faixas de corrente próxima ao valor definido, possibilitando limitar algumas oscilações indesejadas na corrente, que implicam diretamente na qualidade do processo de soldagem.

Cada fabricante, determina o circuito de controle empregado a máquina de soldagem. Sua função está atrelada a realizar ajustes em tempo real, controlando a proteção de sobre tensão, os ajustes da intensidade do arco durante a sua abertura, controlar a corrente e da tensão de saída, assim como o ajuste de controle de corrente: local ou remoto.



Quanto a definição da corrente de operação pelo usuário, é necessário ser respeitada pela indicação do manual do fabricante e geralmente trabalha-se em elevadas faixas de correntes, a adequação destas faixas variam de acordo com o tipo de transferência metálica e o material/equipamento, para garantir a estabilidade do arco elétrico, uma solda mais macia com redução de escórias e os níveis de respingos.

Existem três técnicas de modos de transferências metálicas, por meio de curto-circuito (short arc), globular (globular) e aerossol (spray arc). O que definem essas técnicas, é a forma em que o metal é transferido do arame para a poça de fusão, principalmente a corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte e o gás de proteção, conforme ESAB (2005).

Neste trabalho, será relevante a técnica de transferência metálica por curto-circuito. Essa transferência acontece naturalmente quando baixos valores de tensão e corrente são utilizados no processo para garantir a boa estabilidade do arco explica em SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. (2008).

Para a transferência é estabelecido um curto-circuito, isso acontece quando o metal fundido se forma na ponta do eletrodo geralmente pequenas gotas de tamanho próximo ao do diâmetro do arame e toca a poça de fusão que se forma em decorrência da tensão superficial, ocasionando um curto-circuito elétrico e extinguindo a formação do arco. Ocorre a transferência quando há contato entre os dois, ou a cada curto-circuito, variações de 20 a 200 vezes por segundo quando o arame entra em contato com a peça. Como explica em CORDEIRO (2017).

Modelar um processo completo de soldagem torna-se algo complexo, por abranger muitas variáveis. Conforme em MENESES (2013) e BINGUL ZAFER (2006), que classificam as variáveis do processo de soldagem entre parâmetros diretos de soldagem, a qual estão relacionados com o reforço da solda, porosidade, fusão incompleta, largura da solda, penetração, a geometria da zona de fusão, as propriedades mecânicas, a microestrutura da solda e as discontinuidades. E os parâmetros indiretos de soldagem, que se referem a variáveis de entrada que controlam os processos de soldagem, como corrente, tensão, taxa de alimentação do arame e velocidade da soldagem.



Em NAINDU D. S.(2003), explica que a corrente de soldagem sofre variações, diretamente influenciada pela velocidade de alimentação do eletrodo. Ao atingir altas faixas provocam excessos de escórias, aumentando profundidade e largura de penetração, e resultando em um grande aumento de tamanho do cordão de solda.

Já em WÊGLOWSKI M. S. (2008) analisou o quanto a influência da corrente de soldagem impacta sobre a transferência de metal do processo de soldagem a arco elétrico, interferindo significativamente na gota metálica no diâmetro, na velocidade de deslocamento e também, na taxa de transferência da mesma.

Com o objetivo de simular as variações de tensão, corrente e de comprimento do arco durante o processo de soldagem a arco elétrico, MODENESI P.J. (2007) utilizou linguagem C++ para desenvolver comparações a partir de resultados experimentais com a possibilidade de variação das variáveis do processo na soldagem.

Para modelar e simular um processo de transferência metálica por curto-circuito, assim como desenvolvida em SHIWEI Z. (2011), manipulou ferramentas computacionais para investigação das variações na corrente e voltagem de soldagem, e atingiu mudanças dos parâmetros resultantes em um bom cordão de solda, sem desperdícios de material.

Para calcular a distribuição de temperatura no eletrodo durante o momento de soldagem, MODENESI P.J. (2007), desenvolve um modelo numérico tendo como parâmetros o controle a taxa de fusão, a corrente de soldagem e a fração do material vaporizado. Foi possível identificar anomalias na curva de taxa de fusão realizadas com fontes de alimentação de corrente constante, ocorrem por mudanças abruptas nas condições de aquecimento do eletrodo pelo arco ou pela fração fundida de material de enchimento vaporizado.

Existem algumas possibilidades de modelar os estágios de potência de máquinas de solda a arco elétrico, através da construção de modelos matemáticos da dinâmica de um sistema e a partir de dados obtidos através de simulações e comprovações experimentalmente. Um dos modelos matemáticos que pode ser definido, é através do método matemático Caixa Preta, a qual é obtida a partir da realização de experimentos e análise dos dados, relacionados entre os dados de entrada e saída, conforme apresentado na Fig. 2 a representação do modelo Caixa Preta.

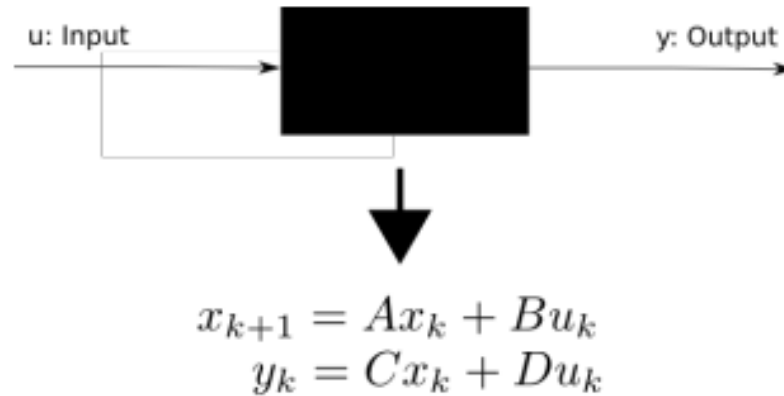


Figura 2: Representação do Modelo Caixa Preta.

Essa modelagem é utilizada quando a estrutura interna do equipamento é complexa, inacessível ou desconhecida. A aplicação desse modelo em inversores de frequência é baseada na tensão de entrada e na corrente de saída, capaz de fazer uma representação simplificada da realidade suficientemente precisa dos aspectos essenciais do sistema. Ou seja, não conhecer o sistema internamente porém se tem dados sobre ele, ou ainda, as condições de modelagem mais adequadas.

A motivação para modelar um inversor de frequência, é a busca em diminuir a possibilidade de se cometerem possíveis erros de projeto e ampliar o processo de influência na qualidade de soldagem. Sendo assim, este trabalho busca a função de transferência que melhor descreva o sinal de corrente em circunstância de arco e de curto-circuito, geradas no processo de soldagem arco elétrico.

## 2. FERRAMENTAS E MÉTODOS

Para este estudo, simulações nos softwares PSIM e MATLAB/Simulink são realizadas para obter a identificação do sistema do inversor, através da função de transferência para comparar o sinal da corrente de saída em circunstância de arco e curto-circuito.

### 2.1 Inversor

A topologia analisada, é uma fonte de soldagem portátil, com tamanho reduzido, baixo peso e baixo consumo de energia. Por tratar-se de um equipamento que possui uma fonte inversora de alta durabilidade, com curva característica de tensão constante, possui um conjunto de



potência com arco estável, conjunto retificador, inversor e filtros que proporcionam uma soldagem de alta qualidade com grande facilidade de abertura de arco. Seu princípio de funcionamento e topologia segue ao modelo apresentado na Fig. 1, BALMER (2019).

### 2.1.1 Parâmetros

Conforme em BALMER (2019), a indicação pelo fabricante na seleção de tensão no modelo trifásico 220 V / 380 V, trabalha-se com uma corrente de 250 A, o ciclo de trabalho é de 60%, e uma corrente de 195 A, o ciclo de trabalho é de 100%. Na retificação de entrada, a tensão alternada trifásica é retificada e no inversor, ocorre a conversão de frequência na faixa de 40kHz, composto por módulos de IGBT. No transformador ocorre a redução da tensão para o nível necessário para a soldagem, em torno de 26 V. Na retificação de Saída, acontece uma nova retificação e filtragem, e então a corrente é disponibilizada na saída da fonte, 250 A.

Alguns fatores influenciam para modelagem da carga em arco e em curto-circuito, como apresentado em ZENG et al.(2016), o comprimento do arco por depender da influência da taxa de alimentação do arame com o comprimento máximo do arco e o tempo em estágio e curto-circuito.

A forma de alimentação do circuito, onde o metal é transferido do arame à poça de fusão apenas quando há contato entre os dois, ou a cada curto-circuito. A fusão do fio e sua velocidade, geralmente aplicando-se pequenos comprimentos de arco (baixas tensões) e baixas correntes de soldagem. E principalmente a carga, como modelada em um circuito equivalente da carga na Fig. 3, sendo 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.

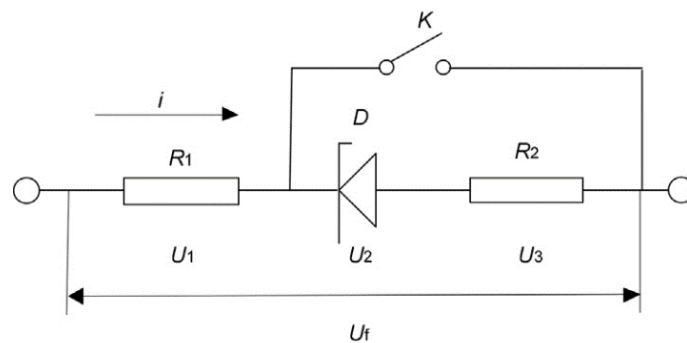


Figura 3: Circuito equivalente da carga.



A chave K é implementada para alternância entre os estágios de arco e curto-circuito uma, sendo o comprimento do arco  $> 0$  considerado no estágio de arco, e sendo comprimento  $< 0$  é considerado em estágio de curto-circuito, ZENG et al.(2016).

### 2.1.2 Simulação

Como um método proposto de pesquisa conforme apresentada na Fig. 4, realizou-se a implementação da simulação do circuito inversor para o processo de soldagem GMAW através do PSIM Software, seguindo a topologia proposta na Fig. 1, e de dados utilizados em BALMER (2019), como resultado dos sinais de corrente em circunstância de arco e de curto-circuito, estão demonstrados na Fig. 5 com forma de onda do comportamento do processo de soldagem GMAW.

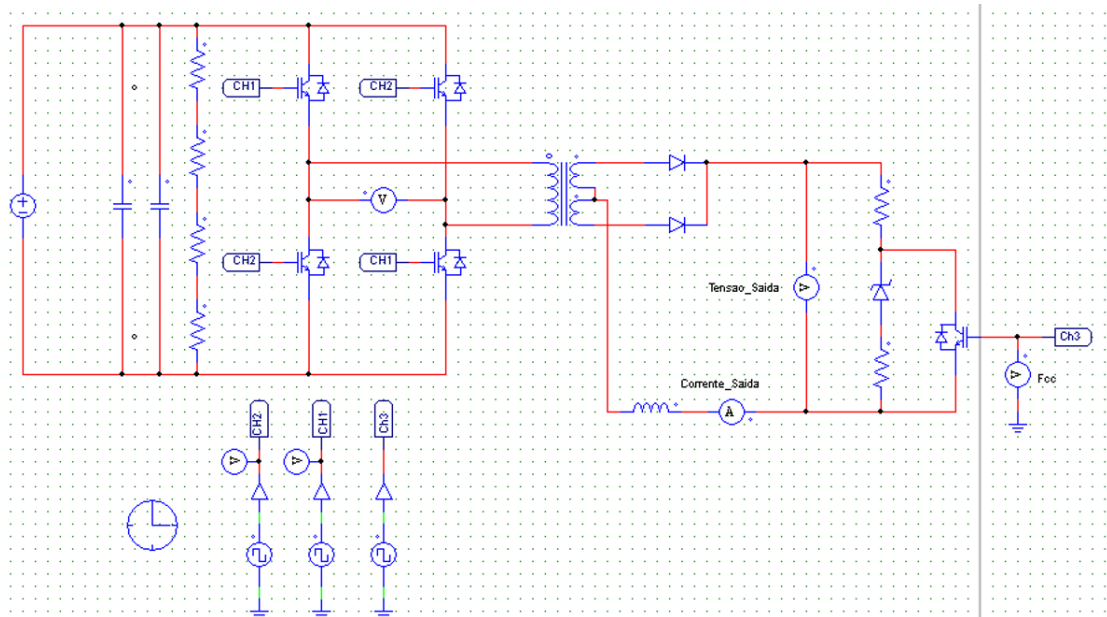


Figura 4: Modelo de simulação do processo GMAW.

A Fig. 5 mostra o comportamento do processo completo de soldagem GMAW, em circunstancia de arco e curto-circuito, podendo ser observado que nesta situação, a tensão da carga/saída está limitada com valor de 30 V, assim como o comportamento da tensão do arco e da corrente em 250 A, seguindo parâmetros de fabricante.

O metal fundido ao tocar a poça de fusão, provocando com que a tensão cai bruscamente e permanecendo baixa até o fim do curto-circuito, no mesmo momento em que a corrente aumenta rapidamente, decaindo após a extinção do arco. Quando o consumível tocar a poça de



fusão a corrente cresce para uma corrente de curto-circuito, ao atingir o valor de corrente dentro da faixa adequada ocorre a transferência de metal, e o arco é reaberto. Quando este mesmo consumível estiver sendo alimentado mais rapidamente que o arco consegue derrete-lo, o arco será interrompido por outro curto-circuito e o ciclo se renovará, MARQUES P. V.; MODENESI (2011).

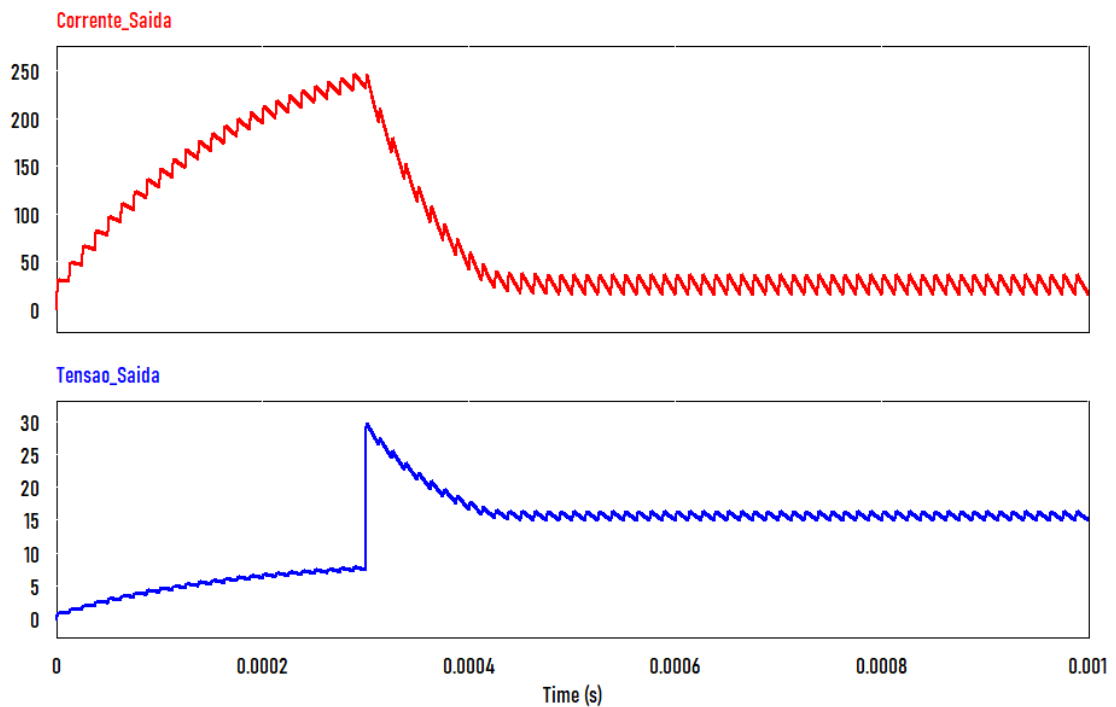


Figura 5: Comportamento do processo de soldagem GMAW.

Para melhor compreensão e obtenção da função de transferência, o sinal foi separado em dois momentos: situação de arco e situação de curto-circuito, ou ainda, chave aberta e chave fechada. A função de transferência mostra a relação entre entrada e saída da simulação, nesta pesquisa uma relação entre tensão e corrente. Através da ferramenta do Matlab, utilizando a função “*systemIdentification*” é possível identificar a função com dados no domínio do tempo para encontrar a aproximação do resultado final.

### 3. RESULTADOS

Ao obter o modelo computacional, e simular o comportamento dinâmico do sistema e melhor estimar sua trajetória, com os valores identificados e parametrizados do modelo, os sinais de entrada do processo e os sinais de perturbação injetados no processo, este algoritmo





de simulação deve prever o comportamento das variáveis internas e de saída do processo, de forma mais aproximada à realidade. Por não conhecer a ordem/grau da função de transferência, conforme mostra na Fig. 6, foi necessário realizar algumas tentativas a fim de encontrar a melhor aproximação para o ajuste de curva.

SIMULAÇÃO CHAVE ABERTA			SIMULAÇÃO CHAVE FECHADA		
POLOS	ZEROS	%	POLOS	ZEROS	%
1	0	91,95	1	0	37,92
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>92,03</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>82,82</b>
3	1	92,07	3	1	-11,62
3	2	92,08	3	2	-14,93
			4	2	-15,1
			4	3	86,34
			5	2	86,38
			5	3	-14,12
			5	4	86,38

Figura 6: Tentativas de encontrar a melhor aproximação do ajuste de curvas.

Ao simular o circuito demonstrado na Fig. 4, considerando a chave aberta em situação de arco, pode-se obter ajuste aos dados de estimativa 2 polos e 1 zero, com 92,03 % chega-se a função de transferência  $G_1$  expressa em (1), assim como o ajuste de curva demonstrado na Fig. 7.

$$G_1(s) = \frac{1,409 \times 10^5 s + 4,105 \times 10^7}{s^2 + 6651 s + 1.413 \times 10^5} \quad (1)$$

Considerando a chave fechada em situação de curto-circuito, pode-se obter ajuste aos dados de estimativa 2 polos e 1 zero, com 82,82 % chega-se a função de transferência  $G_2$  expressa em (2), assim como o ajuste de curva demonstrado na Fig. 8.

$$G_2(s) = \frac{5,109 \times 10^7 s + 3,663 \times 10^8}{s^2 + 1,953 \times 10^5 s + 1.464 \times 10^7} \quad (2)$$

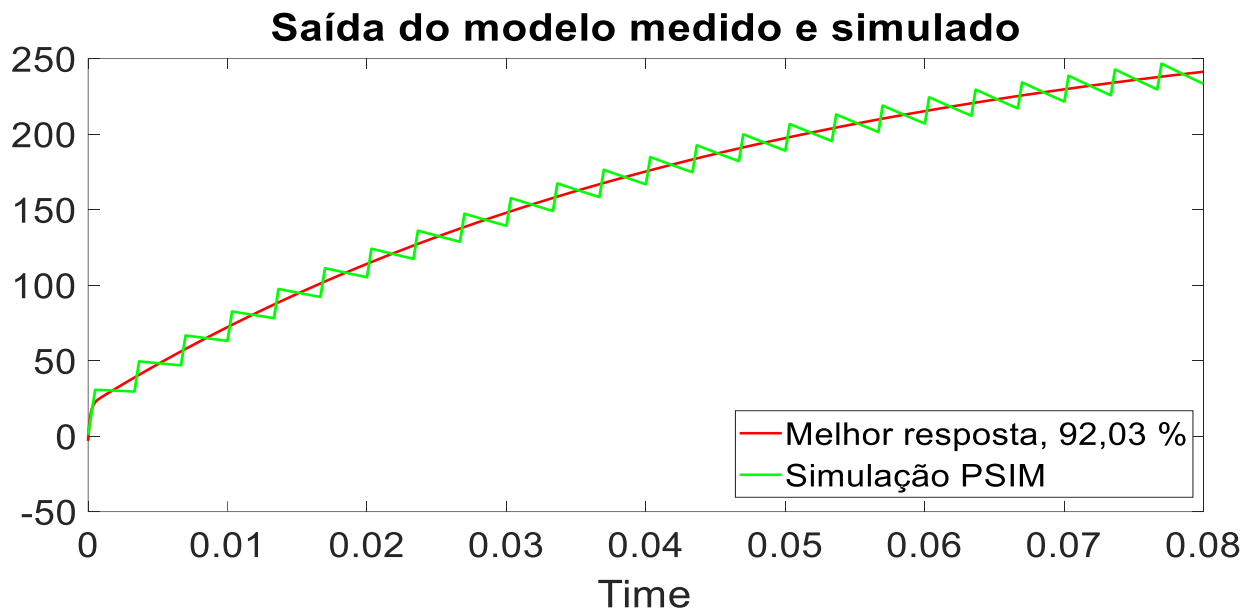


Figura 7: Tentativas de encontrar a melhor aproximação do ajuste de curvas.

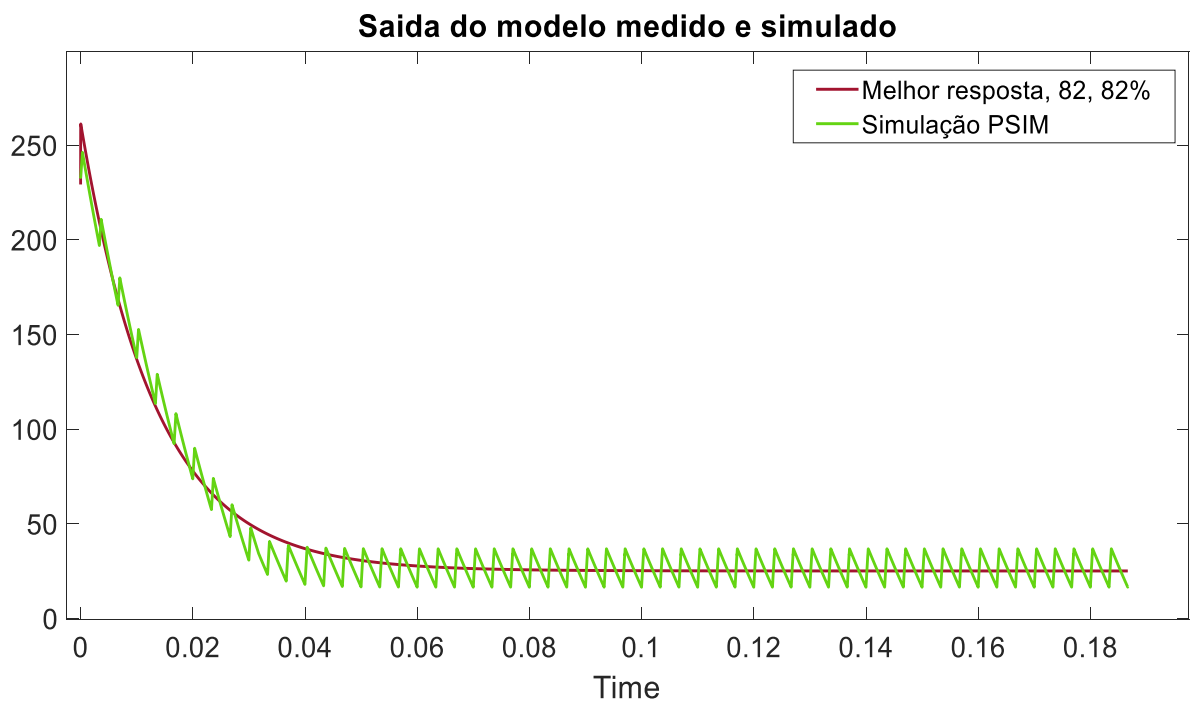


Figura 8: Tentativas de encontrar a melhor aproximação do ajuste de curvas.



#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Um modelo matemático foi estudado para analisar o circuito do inversor de solda através de modelagem caixa-preta dos dados de entrada e saída, medidos através de simulação e utilizados para encontrar a função de transferência que melhor a descreva.

Conclui-se que os resultados obtidos através do modelo Caixa-Preta foram satisfatórios e similares aos comparados com as simulações realizadas. Assim, conclui-se que se chegou ao melhor/aproximado ajuste de curva, assim como a identificação da função de transferência.

#### **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**

BALMER. Manual de operação /Vulcano FLEX MIG 260i - Catálogo 2019/2022. [S.l.], 2019.

BINGUL ZAFER, e. C. G. E. A real-time prediction model of electrode extension for gmaw. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronic. [S.l.]: December, 2006. p. 45–54.

CORDEIRO, G. M. UM ALGORITMO PARA CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE CURTO-CIRCUITOCOM E SEM CURTOS INCIPIENTES. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

ESAB. Manual de operação /Soldagem MIG/MAG. [S.l.], 2005.



MARQUES P. V.; MODENESI, P. J. B. A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. [S.l.]: Belo Horizonte: UFMG, 2011. v. 3.

MENESES, L. Y. H. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW-S EM SOLDAGEM ORBITAL. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2013.

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.

MODENESI, P. J.; REIS, R. I. A model for melting rate phenomena in GMA welding. [S.l.], 2007.

NAINDU D. S., O. S. e. M. K. L. Modeling, sensing and control of gas metal arc welding. In: Kidlington, Oxford: Elsevier Science Ltd. [S.l.]: December 2003. p. 1–347.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. [S.l.], 2008.

SHIWEI Z., J. H. F.-W. . F.-X. 06, pages = 176–183, title = Modeling and Simulating of Short-Circuiting Transferring in GMAW., volume = 1, journal = International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, doi = 10.1109/CDCIEM.2011.278 2011.

WÊGLOWSKI M. S., H. Y. e. Z. Y. M. Effect of welding current on metal transfer in gmaw. In: Archives of Materials Science and Engineering. [S.l.]: february, 2008. p. 49–56.