



Evento: XXVII Jornada de Pesquisa

## **MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DA SOLDAGEM GMAW UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

### **MATHEMATICAL AND COMPUTATIONAL MODELING OF THE THERMAL EFFICIENCY OF GMAW WELDING USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

**Ricardo José Campelo Arruda Júnior<sup>2</sup>, Airam Teresa Zago Romcy Sausen<sup>3</sup>, Paulo Sérgio Sausen<sup>4</sup>, Maurício de Campos<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Trabalho de Pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, desenvolvido na Unijuí;

<sup>2</sup> Bolsista CNPq, estudante do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional – UNIJUÍ;

<sup>3</sup> Professora do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional – UNIJUÍ;

<sup>4</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional – UNIJUÍ;

<sup>5</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional – UNIJUÍ.

#### **RESUMO**

Neste artigo o objetivo é utilizar a modelagem matemática a partir de Redes Neurais Artificiais como ferramenta para prever qual a arquitetura de rede é mais acurada para o cálculo da eficiência da soldagem do tipo arco elétrico de forma a atender as especificidades da empresa Bruning Tecnometal Ltda. A modelagem é validada com uso do software Matlab na ferramenta *nftool*, com o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt, valor de  $R^2$  de 97%, e Erro Quadrático Médio de 0,11972%.

**Palavras-chave:** Modelagem Matemática. Redes Neurais Artificiais. GMAW. Soldagem.

#### **ABSTRACT**

This paper aims to use mathematical modeling from Artificial Neural Networks as a tool to predict which network architecture is more accurate for calculating the efficiency of electric arc welding, in order to meet the specifics of the company. Bruning Tecnometal Ltd. The modeling is validated using the Matlab software in the *nftool* tool, with the Levenberg-Marquardt training algorithm,  $R^2$  value of 97%, and Mean Square Error of 0,11972%.

**Keywords:** Mathematical Modeling. Artificial Neural Networks. GMAW. Electric arc. Welding.

#### **INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento tecnológico, cresce e acompanha as necessidades da humanidade, desde os primórdios. A revolução industrial e as guerras mundiais aceleraram os processos e as melhorias. Contudo, até chegar nas várias técnicas empregadas hoje para unir metais, na idade



dos metais e mais tarde na idade média, a fundição era a técnica utilizada. Modenesi, Marques e Santos (2012) citam que há um exemplar no Museu do Louvre, de um pingente de ouro, datado de 4000 AC, fabricado na Pérsia, com indícios de ter sido soldado. Isso mostra como a soldagem é importante para o desenvolvimento da humanidade, desde uso em joias, construção de cidades, indústria naval, transporte maquinários dos mais variados e setores. Segundo Weman (2004), as soldagens por resistência, a gás e a arco, foram desenvolvidas antes a Primeira Guerra Mundial, sendo a primeira por volta de 1856, a soldagem a gás e a arco por volta de 1900. Observa-se que a soldagem a arco foi patenteada pelo sueco Oscar Kjellberg, sendo utilizada para fins industriais até os dias atuais, essa técnica foi melhorada com o passar dos anos passando a ser chamada de soldagem elétrica com eletrodo revestido.

Modenesi, Marques e Santos (2012) afirmam que há dois grupos para as técnicas de processos de soldagem: os processos de soldagem por pressão, de acordo com o nível de acabamento, ou seja, por ultrassom, por fricção, por forjamento, por resistência elétrica, por difusão, por explosão, e fricção com mistura; e os processos de soldagem por fusão, tais como, Soldagem com Eletrodos Revestidos (Shielded Metal Arc Welding - SMAW), Soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding - GTAW, no Brasil Tungsten Inert Gas - TIG), Soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding - GMAW), Soldagem com Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding - FCAW), Soldagem a Arco Submerso (Submerged Arc Welding - SAW). A soldagem a arco elétrico é umas das mais populares hoje. No setor metalúrgico, esse tipo de soldagem costuma ser realizada de forma automatizada, de modo que a tocha de solda é movimentada por um robô através de uma espécie de braço mecânico (MAROSKI, 2021).

Neste contexto, este artigo objetiva analisar comparativamente um modelo matemático baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs) variando a arquitetura da rede, ou seja, o número de neurônios e o tipo de algoritmo de treinamento, a fim de obter uma rede que forneça, de forma prática e rápida, uma boa estimativa da eficiência térmica do processo de soldagem a arco elétrico. As simulações são realizadas na ferramenta computacional Matlab e as redes são comparadas a partir do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do Erro Quadrático Médio (EQM). A empresa Bruning Tecnometal Ltda., fundada em 1947, com atuação nos segmentos da agrícola, rodoviário, automotivo e construção, localizada no município de Panambi no estado do RS, firmou parceria com o Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC), da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, para o desenvolvimento



de um modelo matemático para estimar a melhor eficiência do processo de soldagem GMAW, uma vez que as normas são muito genéricas e não atendem as questões específicas da empresa. Isso terá impacto em otimização de recursos financeiros.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

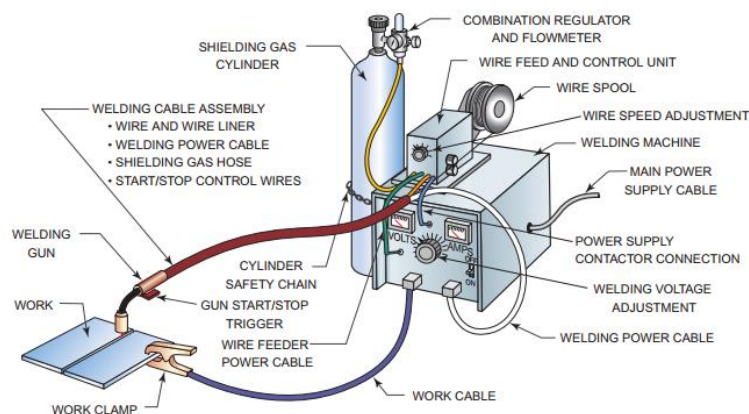
Nesta seção é apresentada uma revisão da literatura acerca dos conceitos necessários para o entendimento do processo de soldagem GMAW, e a modelagem via Redes Neurais Artificiais.

### Princípios da soldagem a arco elétrico - MIG/MAG

A soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas. Processos de soldagem e processos afins são também utilizados na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Há mais de cinquenta processos diferenciados empregados na indústria, isso ocorre, em grande parte, devido aos avanços tecnológicos (EULLER, 2017).

A definição do processo de soldagem a arco elétrico GMAW (Gas Metal Arc Welding), popularmente denominado soldagem MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas) é expresso como um arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa, estabelecido pela circulação da corrente elétrica entre o metal de base e o eletrodo nu, consumível e alimentado de forma contínua (ESAB, 2005). Na Figura 1 esse processo é apresentado.

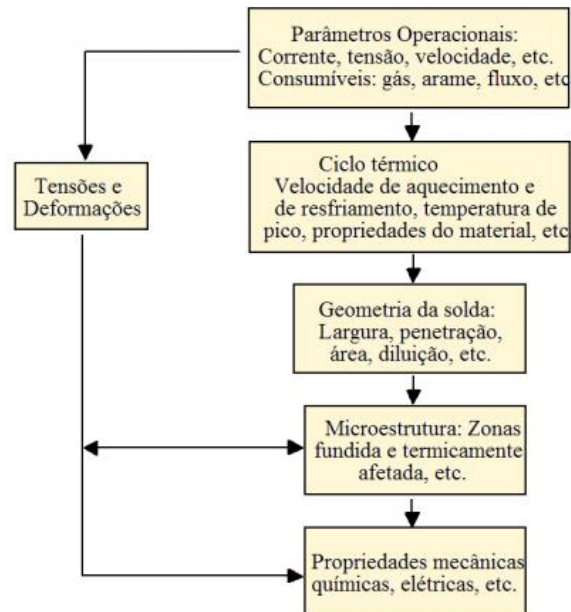
Figura 1 – Esquema do processo de soldagem MIG/MAG.



Fonte: (JEFFUS; BOWER, 2010).

Modenesi, Marques e Santos (2012) definem a soldagem do tipo MIG/MAG como o processo em que a união das peças é realizada a partir do aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico consumível e a peça de metal base. O processo é protegido de impurezas da atmosfera do arco, pois podem provocar oxidação. Alguns gases utilizados são gás hélio, argônio, CO<sub>2</sub> ou misto como argônio/CO<sub>2</sub>. Sendo necessário ajustes de parâmetros por parte do operador, seja o processo semiautomático ou automático. Na Figura 2 é apresentado um escopo do processo de soldagem, onde é possível identificar os parâmetros envolvidos.

Figura 2 – Escopo da metalurgia de soldagem.



Fonte: (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

### Eficiência na soldagem GMAW

Como parâmetro de avaliação para a soldagem à arco elétrico, é recorrente a determinação do *rendimento térmico* também denominado *eficiência térmica* ou, simplesmente, *eficiência*, que é indicada por  $\eta$  (MAROSKI, 2021). A determinação da real parcela de calor transferida para o metal base pelo arco elétrico e eletrodo é possível pelo uso de aparatos de medição como calorímetros. Uma das importantes consequências da correta determinação da eficiência térmica do arco e como ela é alterada pela combinação dos parâmetros de soldagem





envolvidos é na determinação da taxa de resfriamento das juntas soldadas, logo, na correta previsão dos ciclos térmicos resultantes. (HACKENHAAR et al., 2017).

De forma sucinta, a eficiência ( $\eta$ ) do processo de soldagem a arco elétrico pode ser compreendida como a razão entre a energia transferida para o corpo de prova e a energia nominal produzida pelo arco (AREVALO; VILARINHO, 2012) apud (MAROSKI, 2021). Ainda segundo Maroski (2021),  $\eta$  permite avaliar a porcentagem da energia produzida que, efetivamente, está sendo consumida no processo, além de poder ser observada no cálculo do calor imposto pelo arco elétrico (H), que representa a quantidade de energia, por unidade de comprimento, transferida ao material que está sendo soldado (JORGE; GOHRS; SCOTTI, 2017) apud (MAROSKI, 2021).

Malin e Sciammarella (2006) definem que a entrada de calor é uma quantidade de energia que é transferida para o metal base por uma fonte de energia (um arco ou raio laser) por unidade de comprimento de solda (cm ou pol.), o calor do arco elétrico pode ser calculado, segundo Malin e Sciammarella (2006) por:

$$H = \frac{\eta \cdot P}{v} \quad (1)$$

e

$$P = U \cdot I \quad (2)$$

onde: H é calor do arco elétrico (J/mm);  $\eta$  é a eficiência; P é a potência em watts (W); v é a velocidade de soldagem (mm/s); U é a tensão em volt (V); I é corrente elétrica em amperes (A).

A variável  $\eta$  é necessária para o cálculo do calor do arco elétrico (H). Haelsing, Kusch e Mayer (2012) apud Maroski (2021) citam que há uma relação válida para a soldagem a arco elétrico que é:

$$Q = P \cdot t_w \cdot \eta \quad (3)$$

onde: Q é o aporte térmico (descontado as perdas);  $t_w$  é o tempo da solda (s) Assim pode-se ter a eficiência do processo da soldagem a arco elétrico dada por:

$$\eta = \frac{Q}{P \cdot t_w} \quad (4)$$

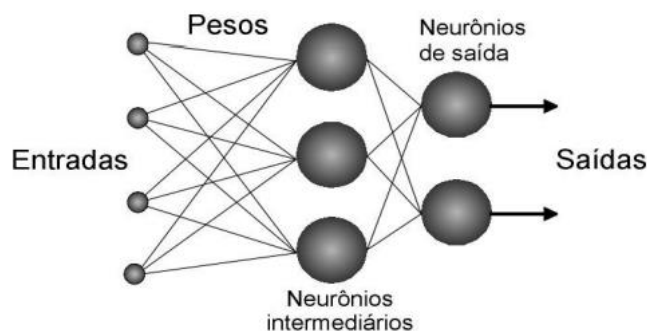


Hurtig et al. (2016) afirma que é importante uma determinação acurada da entrada de calor e sua eficiência de arco correlacionada, e isso está ficando mais evidente à medida que a modelagem do processo de soldagem está progressivamente atingindo um estágio de uso prático. O uso da calorimetria também é uma alternativa para entradas com valores brutos de calor, pois aumentam a robustez dos modelos de simulação de soldagem. Uma vez que conseguem trabalhar com dados da complexidade necessária a soldagem, podendo ser calculado  $Q$  e a eficiência do processo.

### Redes Neurais Artificiais

Uma RNA é um modelo matemático que procura simular a estrutura e a funcionalidade de uma rede neural biológica (KRENKER, BESTER E KOS, 2011 apud MAROSKI, 2019). Compreendida como uma estrutura conexionista, a RNA é composta por unidades fundamentais de processamento de informação densamente interligadas entre si: os neurônios (FURTADO, 2019 apud MAROSKI, 2019). São sistemas massivamente paralelos e distribuídos, formados por unidades de processamento simples, que calculam determinadas funções, normalmente não lineares, distribuídas em camadas, sendo interligadas por conexões que se associam a pesos, que por sua vez armazenam o conhecimento representado na rede, servindo para ponderar entradas recebidas por unidades constituintes (HAYKIN, 2007 apud SOUSA, BRITO e XIMENES, 2022)

Figura 3: Exemplo de Topologia de rede Neural Artificial



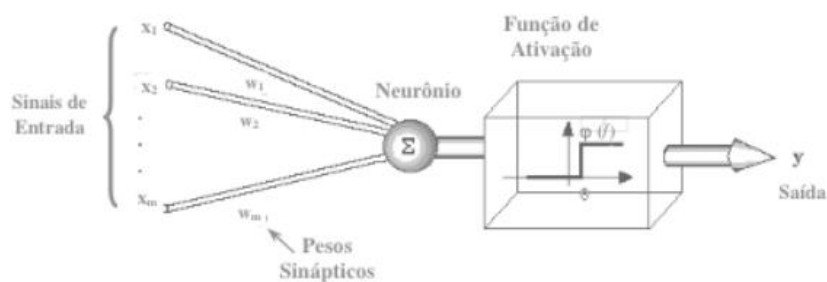
Fonte: (SOUSA, BRITO e XIMENES, 2022)



Na Figura 3 é apresentado um exemplo de arquitetura de RNA, onde podem ser observadas a camada de entrada, camada oculta e camada de saída, com seus respectivos neurônios (SOUSA, BRITO e XIMENES, 2022). O neurônio tem como finalidade estabelecer a unidade computacional básica da rede, já a arquitetura definirá a estrutura de conexões entre os neurônios. Por outro lado, o algoritmo de aprendizagem descreve um método para alterar o estado individual dos neurônios e as conexões entre eles, objetivando atingir um comportamento global para a rede (SOUSA, BRITO e XIMENES, 2022).

Ainda segundo Sousa, Brito e Ximenes (2022) as RNAs podem ser direcionadas a três grupos de atividades específicas: modelagem, aplicações e implementações. Salienta-se ainda que o processo de modelagem de RNAs abrangem três níveis, neurônios, arquiteturas e algoritmos de aprendizagem. O neurônio tem como finalidade estabelecer a unidade computacional básica da rede, já a arquitetura definirá a estrutura de conexões entre os neurônios. Enfatiza-se que o algoritmo de aprendizagem descreve um método para alterar o estado individual dos neurônios e as conexões entre eles, objetivando atingir um comportamento global para a rede.

Figura 4: Esquema da Unidade Processadora de McCulloch e Pitts.



Fonte: (FURTADO, 2019)

O neurônio de McCulloch e Pitts, apesar de simples, ainda é utilizado. Nele os sinais são apresentados à entrada  $x_j$ , o sinal da entrada apresentado à sinapse  $j$  conectada ao neurônio  $k$  é multiplicado por um peso sináptico  $w_{k,j}$  no neurônio  $k$ , é feita a soma ponderada dos sinais recebidos, produzindo um determinado nível de atividade. Se este nível de atividade exceder um certo limite, a unidade processadora produzirá uma determinada resposta como saída.

Furtado (2019) é apresentado matematicamente o modelo da Figura 4 por:



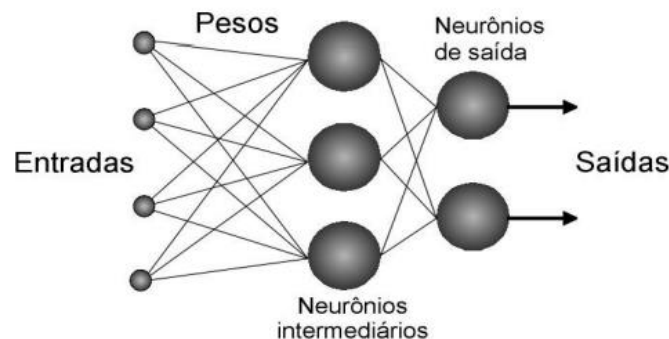
$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{k,j} \cdot x_j \quad (5)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (6)$$

onde:  $x_j$  é o sinal de entrada;  $w_{kj}$  são os pesos sinápticos ou pesos;  $y_k$  é o sinal de saída;  $\varphi(v_k)$  é a função ativação.

A ideia do neurônio de McCulloch e Pitts, ainda hoje é utilizada com variações na função de ativação, podendo ser, segundo Finocchio (2014): função linear, função degrau bipolar, função rampa, função sigmóide e função tangente hiperbólica. Estas podem assumir valores binários (0 e 1), valores bipolares (-1 e 1) e valores reais. Furtado (2019) cita que para além da excitação vindas das entradas que os neurônios sofrem, cada neurônio, também é excitado pelas “bias”, uma constante de valor 1, transmitida pela sinapse  $w_{i,0}$ . E embora cada neurônio possa realizar processamento simples, uma rede com múltiplos neurônios é capaz de realizar operações bastante complexas, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Rede Neural Artificial de múltiplas camadas.



Fonte: FURTADO (2019)

Nesse contexto, os resultados obtidos nesse artigo por meio de Redes Neurais Artificiais, são criados e treinados com a ferramenta computacional *nftool* do Matlab, a partir de dados experimentais fornecidos pela Bruning e apresentados em Maroski (2021). Os algoritmos de treinamentos utilizados são Levenberg – Marquardt, Bayesian Regularization e Scaled Conjugate Gradient.



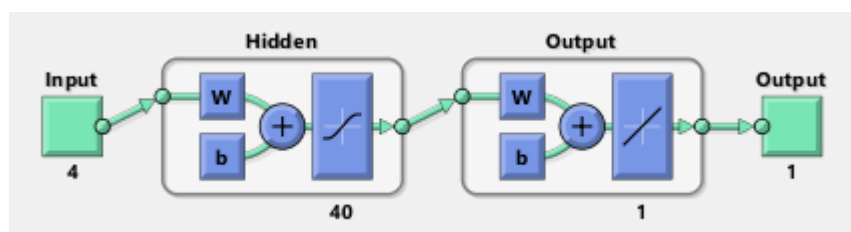


## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações obtidos a partir das RNAs desenvolvidas na ferramenta computacional *nftool* do Matlab. Nas análises são comparados os desempenhos de três arquiteturas de RNAs, sobretudo no que diz respeito ao  $R^2$  e ao EQM, a fim de identificar a arquitetura que tende a apresentar maior assertividade.

Os resultados são encontrados a partir de 9 simulações computacionais de treinamento das RNAs, com três simulações para cada algoritmo de treinamento: Levenberg – Marquardt, Bayesia Regularization e Scaled Conjugate Gradient, variando a quantidade de neurônios em 40, 80 e 120, para cada arquitetura de rede, com uma camada oculta, com taxa de validação e treinamento em 10% para todos os casos. Há 4 entradas utilizadas pelas RNAs que são: *stick-out*, *vazão do gás*, *velocidade de soldagem* e *velocidade de alimentação do arame*), em um total de 42 conjuntos de dados; como alvo (saída da rede) a variável *eficiência*, também com 42 observações (MAROSKI, 2021). Na Figura 14, é apresentado o diagrama gerado para um treinamento de uma RNA com 40 neurônios.

Figura 14: Diagrama das RNAs.



Fonte: o autor, a partir da ferramenta *nftool* do Matlab.

Após a modelagem das 9 redes, os resultados são apresentados na Tabela 1. Observa-se que os melhores resultados são obtidos pela rede 1 com 40 neurônios, treinamento Levenberg-Marquardt, EQM de 0,0011972, com um valor de  $R^2$  de 97,08% e pela rede 9, com 120 neurônios, treinamento Scaled Conjugate Gradient, EQM de 0,0010493, com um valor de  $R^2$  de 97,35%. Logo, a partir dos resultados indica-se a rede 1 para a determinação da eficiência do processo de soldagem no treinamento da RNA, visto que possui uma quantidade de 80 neurônios a menos que a rede 9.



Tabela 1: Simulações das RNAs.

Resultados das Simulações das RNAs						
RNA	NN	TT	R <sup>2</sup>	EQM	DPE	DPS
rede 1	40	Levenberg - Marquardt	0,97083	0,0011972	0,1245	0,1257
rede 2	80	Levenberg - Marquardt	0,92156	0,0020813	0,1097	0,1257
rede 3	120	Levenberg - Marquardt	0,96882	0,0014184	0,1215	0,1257
rede 4	40	Bayesia Regularization	0,44931	0,011773	0,05071	0,1257
rede 5	80	Bayesia Regularization	0,46719	0,014293	0,01467	0,1257
rede 6	120	Bayesia Regularization	0,45816	0,011613	0,03565	0,1257
rede 7	40	Scaled Conjugate Gradient	0,95565	0,0016347	0,1134	0,1257
rede 8	80	Scaled Conjugate Gradient	0,96988	0,00070629	0,1219	0,1257
rede 9	120	Scaled Conjugate Gradient	0,97353	0,0010493	0,1281	0,1257

Fonte: o autor.

NN – Número de Neurônios; TT – Tipo de Treinamento; R<sup>2</sup> – Regressão; EQM – Erro Quadrático Médio; DPE – Desvio Padrão dos Dados de Entrada; DPS – Desvio Padrão dos Dados de Saída.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos experimentais na indústria, são caros e demandam tempo. A utilização de inteligência artificial, por meio de RNAs, torna o processo mais rápido e com menor custo. Assim, a rede *nftool* treinada na ferramenta Matlab, com 40 neurônios, algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt, apresentou boa acurácia e pode ser utilizada pela indústria que utiliza a soldagem a arco elétrico para a determinação da eficiência. Como trabalhos futuros, sugere-se obter modelos a partir da variação de outras topologias de RNAs ou a inclusão de variáveis de entrada que não foram consideradas nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HAYKIN, S. Neural networks and learning machines, 3. ed edn, Pearson Prentice Hall (2009).
- FINOCCHIO, M. A. F. Noções de redes neurais artificiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (2014).



FURTADO, M. I. V. (2019). *Redes neurais artificiais: uma abordagem para sala de aula*, Atena Editora.

Lu, M. J. e Kou, S. (1989). Power inputs in gas metal arc welding of aluminum – part 2, *Welding Journal* **60**(11): 452s–456s.

LU, M.; KOU, S. (1989). Power inputs in gas metal arc welding of aluminum-part 2. *Welding Journal*, v. 68, n. 11, p. 452s–456s, 1989.

SOUSA, P.N.; BRITO, R.X.; XIMENES, J.N.S. Estudo Comparativo a Partir da Aplicação de Técnicas de Aprendizagem Profunda Baseadas em Dados Pluviométricos Coletados por Estação Meteorológica Automática, *Revista de Sistemas e Computação*, Salvador, v. 12, n. 1, p. 40-49, jan./abr. 2022

MAROSKI, M. W. Modelagem matemática da eficiência térmica da soldagem a arco elétrico utilizando redes neurais artificiais. Dissertação (Mestrado) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2021.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Introdução à metalurgia de soldagem. In: .1. ed. [S.l.: s.n.], 2012. cap. 1 - Introdução, p. 06–21.

ARÉVALO, H. D. H. Desenvolvimento e avaliação de calorímetros via nitrogênio líquido e fluxo contínuo(água) para processos de soldagem. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

AREVALO, H. D. H.; VILARINHO, L. O. Desenvolvimento e avaliação de calorímetros por nitrogênio líquido e fluxo contínuo para medição de aporte térmico. *Soldagem & Inspeção*, SciELO Brasil, v. 17, p.236–250, 2012.

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

ESSERS, W.; WALTER, R. et al. Heat transfer and penetration mechanisms with gma and plasma-gma welding. *Welding Journal*, v. 60, n. 2, p. 37–42, 1981.

EULLER, J. C. Processo GMAW com CO2 aquecido. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2017.

HACKENHAAR, W. et al. Avaliação da eficiência térmica do arco do processo de soldagem mag polaridade variável (thermal arc efficiency evaluation for mag variable polarity welding process). In: . [S.l.:s.n.], 2017.

HAELSIG, A.; KUSCH, M.; MAYER, P. New findings on the efficiency of gas shielded arc welding. *Welding in the World*, Springer, v. 56, n. 11, p. 98–104, 2012.



HURTIG, K. et al. A critical analysis of weld heat input measurement through a water-cooled stationary anode calorimeter. *Science and Technology of Welding and Joining*, Taylor & Francis, v. 21, n. 5, p.339–350, 2016.

JEFFUS, L.; BOWER, L. *Welding: Skills, Processes and Practices for Entry-Level Welders: Book One*. [S.l.]: Delmar, 2010.

JORGE, V. L.; GOHRS, R.; SCOTTI, A. Active power measurement in arc welding and its role in heat transfer to the plate. *Welding in the World*, Springer, v. 61, n. 4, p. 847–856, 2017.

LU, M.; KOU, S. Power inputs in gas metal arc welding of aluminum-part 2. *Welding Journal*, v. 68, n. 11, p. 452s–456s, 1989.

MALIN, V.; SCIAMMARELLA, F. Controlling heat input by measuring net power. *Welding Journal*, v. 85, n. 7, p. 44–50, 2006.

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

SGARBI, P. V. *Construção e validação de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

WEMAN, K. A history of welding. *ESAB Welding Equipment AB*, Laxå, Sweden., v. 1, n. 59, p. 32–35, 2004. Citado na página 5.