

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE POTÊNCIA ELÉTRICA EM SOLDAGEM A ARCO

Alexandre Saldanha do Nascimento

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia/MG CEP: 38400-902
asnascimento@mecanica.ufu.br

Marcio de Andrade Batista

engandrade10@yahoo.com.br

Vinicius Castanheira do Nascimento

vcnascimento@hotmail.com.br

Américo Scotti

ascotti@mecanica.ufu.br

Resumo: *A potência elétrica em soldagem é classicamente definida como o produto da tensão pela corrente, a partir da qual se determina a energia imposta do processo. Do valor desta energia se faz previsões dos ciclos térmicos e das conseqüentes alterações metalúrgicas e geométricas da união. O problema é que na literatura especializada são aplicados diferentes métodos de cálculo deste parâmetro. Os métodos mais comuns são o da Potência Média Aritmética e o da Potência Eficaz. Outro método é o da Potência Instantânea (média aritmética da multiplicação pontual da tensão pela corrente). Finalmente, existiria ainda o método da Potência Instantânea RMS. Desta forma, neste trabalho foi proposto avaliar os quatro métodos e justificar as diferenças entre eles e, ainda, as conseqüências sobre os cálculos de energia imposta e de rendimentos térmicos. Para tal, foram feitas soldagens MIG/MAG em mesma potência (2 níveis), mas variando-se os modos de transferência entre curto-circuito, globular, goticular e pulsado. Calculou-se a Potência de soldagem pelos quatro métodos e, para justificar as diferenças, usou-se o Teorema da Esperança. As seções transversais dos cordões foram medidas e as energias calculadas aplicadas em simulações para previsão de rendimento térmico. Verificou-se a variância e o grau de correlação entre os sinais de tensão e corrente para os três modos de transferência. Conclui-se que o cálculo da Potência Instantânea é o mais adequado em todos os tipos de transferência, pois independe do grau de correlação entre as variáveis elétricas.*

Palavras-chave: *Potência de Soldagem, Teorema da Esperança, Transferência Metálica.*

1. INTRODUÇÃO

O aporte térmico em soldagem é uma variável de fundamental importância para o controle da qualidade da solda, influenciando diretamente na microestrutura da zona fundida e da zona termicamente afetada pelo calor, nas propriedades mecânicas e na geometria do cordão. Para o cálculo do aporte térmico, é necessário o conhecimento da potência do arco, que por sua vez é obtida através dos valores de corrente de soldagem e tensão do arco. Na literatura especializada, tem-se encontrado divergências entre autores sobre o método a ser utilizado para o cálculo da potência do arco. O método mais comum é o da **Potência Média Aritmética**, no qual o cálculo é feito através do produto dos valores médios de tensão e corrente ($P_{arit} = U_{arit} \times I_{arit}$). Um segundo método (**Potência Eficaz**) utiliza os valores RMS de tensão e corrente ($P_{RMS} = U_{RMS} \times I_{RMS}$). Outro método, menos utilizado, é o da **Potência Instantânea**, sendo adotada, neste caso, a média

aritmética da multiplicação da tensão pela corrente feita pontualmente ($P_{inst} = (\sum U_i \times I_i)/n$). Finalmente, mesmo que não encontrado na literatura de soldagem, seria o método da **Potência Instantânea RMS**, obtida através do valor RMS do produto da tensão e corrente pontuais ($P_{InstRMS} = (\sum (U_i \times I_i)^2/n)^{1/2}$). Bosworth (1991) aponta que a diferença entre os resultados usando os três primeiros métodos chega a ordem de 30%.

A maioria das máquinas de soldagem possui medidores, analógicos ou digitais, que fornecem leituras médias eficazes (RMS) da corrente e tensão de soldagem (apesar de muitos usuários acharem que estão lendo os respectivos valores médios). Alguns pesquisadores têm usado estes valores RMS de corrente e tensão para definir a potência, sem discutir a consequência desta abordagem sobre seus resultados. Sabe-se que o valor RMS só é igual ao valor médio quando o sinal for constante (sem oscilações, o que aconteceria, por exemplo, quando a resistência e/ou sinal da fonte não variam no tempo). No entanto, segundo Needham (1985), o arco de soldagem não obedece a lei de Ohm e a tensão do arco não é proporcional a corrente de soldagem. Em outras palavras, o arco embora tenha uma carga resistiva, não exibe uma resistência constante. Dilthey e Killing (1990), ao estudar o calor imposto em soldagem com corrente constante, senoidal e pulsada, concluiu que os valores médios aritméticos e valores efetivos apresentaram diferenças tanto para corrente, como para tensão. Entretanto, de acordo com Bosworth (1991), o valor RMS pode ser satisfatório para muitas aplicações de soldagem onde o aporte térmico não precisa ser controlado ou especificado. Mas, quando o material a ser soldado é sensível ao efeito do calor, como aços tratados termicamente, o aporte térmico precisa ser corretamente definido para evitar possíveis perdas de propriedades mecânicas, alterações metalúrgicas e geométricas da união. Já para Needham (1985), subentendendo estar falando de processos MIG/MAG com fonte do tipo tensão constante, a potência do arco deve ser calculada pelo produto da média dos valores de tensão, que são praticamente constantes, pela média dos valores de corrente sobre o tempo de interesse, ou seja, a Potência Média Aritmética. Por sua vez, nos trabalhos de Bosworth (1991) e Joseph (2001), fazendo uso de calorimetria e calculando a eficiência térmica, foi concluído que a potência instantânea é o método mais apropriado para determinar o aporte térmico. Entretanto não tentam justificar este achado.

Como se vê, mesmo nos dias de hoje, existem divergências sobre um assunto que por parecer simples é tratado de forma trivial. Desta forma, neste trabalho se propôs a estudar os métodos de cálculo de potência usados pelos usuários de soldagem e as consequências sobre os cálculos de energia imposta (os quais afetam as previsões das modificações metalúrgicas, da geometria do cordão, etc.), mas tentando também esclarecer as razões para diferenças entre resultados de diferentes métodos e, assim, propor o método que seria mais adequado.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

Com o objetivo de se levantar os dados para avaliar os métodos de cálculo, foram realizados cordões de solda utilizando o processo MIG nos modos convencional (tensão constante) e pulsado, mantendo-se as mesmas energias de soldagem (em dois níveis de energia). Denomina-se aqui energia de soldagem a relação entre a potência do arco ($U \times I$) pela velocidade de soldagem (V_{sol}), a qual não deve ser confundida com calor imposto, que também leva em consideração o rendimento térmico. A velocidade de soldagem foi a escolhida como variável de controle para manter constante o valor de energia de soldagem, por ser o parâmetro de mais fácil manipulação e de menor influência na estabilidade do arco.

O metal de adição utilizado foi o da classe AWS ER70S-6, de 1,2 mm de diâmetro, e como gás de proteção foi utilizada a mistura comercial de Argônio-5%O₂ (valor nominal), com vazão de 15 L/min. Os cordões de solda foram depositados em 12 placas de teste de aço carbono ABNT 1020 de mesmas dimensões, com 4,8 x 51,5 x 200 mm, em simples deposição sobre chapa, através de um sistema mecanizado de condução da tocha (velocidade de soldagem calibrada). Foi feito apenas um cordão por placa de teste para evitar efeitos de pré-aquecimento e calor diferenciado sobre a geometria do cordão a ser formado, sendo que se tentou manter o mesmo comprimento do cordão em todas as amostras, com valor aproximado de 150 mm. Procurou-se assim, garantir termicamente

as condições mais similares possíveis. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados em corrente pulsada e na Tabela 2 as regulagens utilizadas nos modos convencionais, destacando-se que se procurou trabalhar com 2 níveis de energia similares em cada versão do processo (pulsado, curto-circuito e vôo livre). É importante apontar que foram realizados dois cordões de soldas com cada parâmetro, para verificar a repetibilidade dos resultados. Foi possível se obter os dois níveis de energia desejados inicialmente com transferência pulsada, o mesmo ocorrendo para o modo curto-circuito (agora variando-se a velocidade de soldagem), mantendo-se o mesmo tipo de transferência nos dois níveis de energia.

Tabela 1. Parâmetros de Regulagem para as soldagens no modo Pulsado.

Nível de Energia	Valim (m/min)	I _{média} (A)	I _{pulso} (A)	I _{base} (A)	t _{pulso} (ms)	t _{base} (ms)	V _{sol} (cm/min)	E* (kJ/m)
1	3,2	120	250	60	10,5	22,8	30,0	617
2	5,1	180	250	60	7,5	4,4	30,0	1037

(*) – o valor de energia expresso não foi regulado e sim calculado pelo método de Potência Instantânea (média de dois experimentos).

Tabela 2. Parâmetros de Regulagem para as soldagens no modo Convencional.

Nível de Energia	Valim (m/min)	U _{ref} (V)	V _{sol} (cm/min)	E** (kJ/m)	Modo de transferência Característico
1	4,0	20	30,0	596	Curto-circuito
2	6,0	24	28,5	1004	Curto-circuito
1	4,0	27	44,5	525	Globular
2	6,0	31	40,0	1010	Goticular (“spray”)

(**) – o valor de energia expresso não foi regulado e sim ajustado através da velocidade de soldagem para manter-se semelhantes com os da Tabela 2 e, posteriormente, calculado pelo método de Potência Instantânea (média de dois experimentos).

Para monitorar os valores instantâneos de corrente e tensão, foi utilizado um sistema de aquisição de dados, com frequência de aquisição 13,642 kHz e um tempo de aquisição de 4 segundos, obtendo-se 54571 dados por soldagem. A resolução da aquisição com 12 bits é de 0,05 V para a tensão e 0,24 A para a corrente. Os dados de tensão e corrente obtidos foram gravados, tratados e utilizados para os cálculos e comparação da significância da potência dos arcos pelos quatro métodos, a saber:

- **Potência Média Aritmética**, no qual o cálculo é feito através do produto dos valores médios de tensão e corrente, conforme Equação 1.

$$P_{arit} = U_{arit} \times I_{arit} \quad (1)$$

$$\text{onde } U_{arit} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} \quad \text{e} \quad I_{arit} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} .$$

- **Potência Eficaz (RMS)**, no qual o cálculo é feito através do produto dos valores RMS do sinal de tensão e corrente, conforme Equação 2.

$$P_{RMS} = U_{RMS} \times I_{RMS} \quad (2)$$

$$\text{onde } U_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{n}} \quad \text{e} \quad I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} .$$

- **Potência Instantânea Média**, sendo adotada neste caso, a média aritmética dos resultados do produto da tensão pela corrente feitos pontualmente. Pode ser descrita também como a média de todos os valores instantâneos de potência medidos durante uma solda, conforme Equação 3.

$$P_{inst} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n U_i * I_i \right)}{n} \quad (3)$$

- **Potência Instantânea RMS**, obtida através do valor RMS do produto de todos os valores instantâneos de tensão e corrente medidos durante uma solda, conforme Equação 4.

$$P_{instRMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(U_i * I_i)^2}{n} \right)} \quad (4)$$

onde n é o número de amostras da aquisição.

Ainda metodologicamente, para suportar a análise da diferença entre os métodos de Potência Média e Potência Instantânea, foi utilizado o Teorema da Esperança, o qual pode ser resumidamente explicado da seguinte forma:

- O teorema estatístico do limite central afirma que “se a flutuação total numa certa variável for o resultado da soma das flutuações de muitas variáveis independentes (no estudo em questão são duas, Tensão e Corrente) e de importância iguais, a sua distribuição tenderá para a normalidade, não importando qual seja a natureza das distribuições das variáveis individuais” (Neto et al, 1995);

- Fazendo uma hipótese de que tanto a Tensão (U) como a Corrente (I) em processos de soldagem “flutuam” de maneira independente e com igual importância, neste caso U e I teriam uma distribuição normal. Pode-se, assim, admitir que a distribuição de probabilidade conjunta (P) da Tensão e da Corrente segue a condição expressa pela Equação 5 (Allard, 1980), denominada Distribuição de Probabilidade Conjunta:

$$P(V=v_n, I=i_k) = P(V=v_n) \cdot P(I=i_k) \quad (\text{para todo } i \text{ e } k) \quad (5)$$

- Desta maneira, é possível afirmar que a Tensão (U) e Corrente (I) são variáveis aleatórias independentes se, e somente se, obedecerem a Equação 5;

- Segundo Soares (1991), a média de uma variável aleatória X_n é também chamada de Valor Esperado, Esperança Matemática ou Esperança de X_n ;

- Admitindo que a Tensão e Corrente obedecem a Equação 5 (estatisticamente independentes), pode-se demonstrar pelas Equações 6 a 10 que a Esperança da Potência (E) é o produto da Esperança da tensão (E(U)) pela Esperança da Corrente (E(I), ou seja, E (Potência) é igual ao produto dos valores médios individuais de U e I.

$$E(V.I) = \sum_n \sum_k v_n i_k P(V=v_n, I=i_k) \quad (6)$$

$$E(V.I) = \sum_n \sum_k v_n i_k P(V=v_n) \cdot P(I=i_k) \quad (7)$$

$$E(V.I) = \sum_n v_n P(V=v_n) \cdot \sum_k i_k P(I=i_k) \quad (8)$$

$$E(Potencia) = \sum_n v_n P(V=v_n) \cdot \sum_k i_k P(I=i_k) \quad (9)$$

$$E(Potencia) = E(V.I) = E(V) \cdot E(I) \quad (10)$$

Como em soldagem é muito comum se usar o valor da potência para simulações de ciclos térmicos, de geometrias e até de tensões residuais, torna-se importante avaliar a consequência do uso das diferentes formas de cálculos, já que de cada uma se obtém resultados numericamente diferentes. O exemplo escolhido neste trabalho foi o cálculo do rendimento térmico (η), com os quatro diferentes valores de potência, através do modelo proposto por Rosenthal (Easterling, 1983), conforme equação 11, mesmo ciente de que para aplicar esta equação os formatos dos cordões deveriam se assemelhar a um semicírculo, além de ser para chapas finas (condições não concordantes com este trabalho). Mas como o objetivo no momento é de apenas demonstrar as consequências, qualquer método de simulação serviria, inclusive o proposto com os erros esperados. Nota-se que na equação é necessário entrar com o produto da tensão pela corrente, ou seja, valor de potência, com isso quatro valores de rendimento térmico são calculados pelos diferentes métodos.

$$\eta = \frac{[(T_f - T_0) \cdot V_s \cdot d \cdot \rho c 2r]}{\left[\left(\frac{2}{\pi e} \right)^{1/2} \cdot U \cdot I \right]} \quad (11)$$

Sendo T_f – Temperatura de fusão do material da chapa em Kelvin;

T_0 – Temperatura ambiente em Kelvin;

V_s – Velocidade de soldagem em mm/s;

d – Espessura da placa de teste em mm;

ρ – Densidade do material;

c – Calor específico do material em J/Kg.K;

r – Metade da largura da ZAC em mm;

U – Tensão em Volts;

I – Corrente em Ampère.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os resultados dos cálculos de potência pelos quatro métodos encontrados na literatura técnica em função do tipo de transferência metálica. As Figuras 1 a 4 ilustram de forma gráfica as diferenças de valores de cada cálculo (os pontos foram interligados por curvas de tendência apenas para facilitar a visualização das diferenças entre valores calculados).

Tabela 3. Valores de Potência calculada pelos 4 métodos em função do tipo de transferência para os níveis de energia 1 e 2 (valores médios das réplicas experimentais para cada condição).

Nível de Energia	Denominação	P _{Média}	P _{RMS}	P _{Inst}	P _{Inst RMS}
Nível Baixo	Média CC1	2945,9	3313,2	2980,2	3477,1
Nível Alto	Média CC2	4746,7	5112,4	4769,8	5248,4
Nível Baixo	Média Glob	3895,2	4013,7	3895,7	4046,1
Nível Alto	Média Got	6730,4	6759,4	6735,3	6769,2
Nível Baixo	Média Pul1	2653,5	3373,5	3083,1	4211,3
Nível Alto	Média Pul2	4774,7	5425,1	5182,8	5991,3

Através do gráfico apresentado na Figura 1, que corresponde aos valores de potência calculados para o modo curto-circuito de transferência, verifica-se uma grande variação entre os valores obtidos pelos diferentes métodos, coerentemente nos dois níveis de energia utilizados. Para os modos de transferência globular e goticular (“spray”) apresentados na Figura 2, não se observou muita variação nos resultados dos cálculos de potência e as curvas se apresentaram praticamente planas, principalmente no modo de transferência goticular. No gráfico apresentado na Figura 3, referente aos cálculos de potência no modo pulsado, observou-se um comportamento similar ao verificado para curto-circuito, ou seja, com variações significantes entre os diferentes métodos de cálculo. Este comportamento cíclico da corrente ortogonalmente ao da tensão (independência) afeta significativamente o valor da potência calculado pelas diferentes formas, apresentando as maiores diferenças nos resultados quando o modo de transferência é em corrente pulsada.

A Figura 4 apresenta uma comparação entre todos os métodos de cálculo de potência em todos os modos de transferência metálica estudado. Através da análise do gráfico, pode-se verificar que a curva referente ao cálculo da potência instantânea se mantém sempre entre os valores da curva de potência média e potência RMS. Na região onde o modo de transferência predominante é globular ou spray, as curvas apresentam-se sobrepostas, indicando pouca influência dos métodos para o cálculo da potência. Observa-se também nos modos de transferência por curto-circuito que os métodos de cálculo Potência Média e Potência Instantânea apresentam valores próximos e as curvas estão sobrepostas. A avaliação da Figura 4 também mostra que a curva referente ao método chamado potência instantânea RMS fornece os maiores valores de potência obtidos. Em condições onde o aporte térmico deve ser rigorosamente definido, essa diferença pode levar a equívocos na

determinação dos parâmetros utilizados, gerando até mesmo defeitos como falta de penetração ou de fusão.

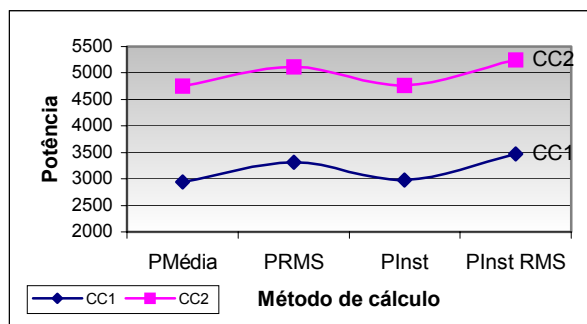


Figura 1. Método de cálculo x Potência para transferência em curto-circuito.

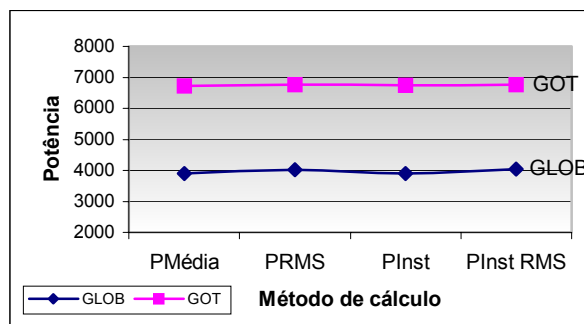


Figura 2. Método de cálculo x Potência para transferência em vô livre (globular e goticular).

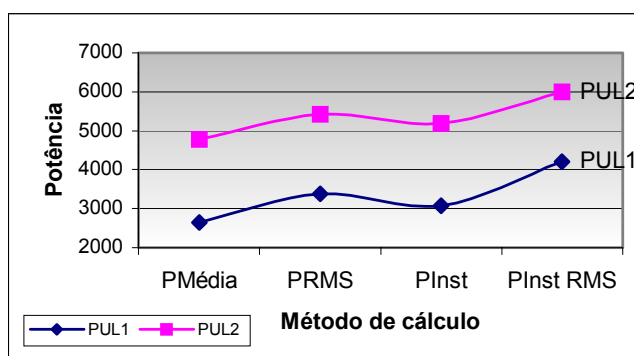


Figura 3. Método de cálculo x Potência para transferência em corrente pulsada.

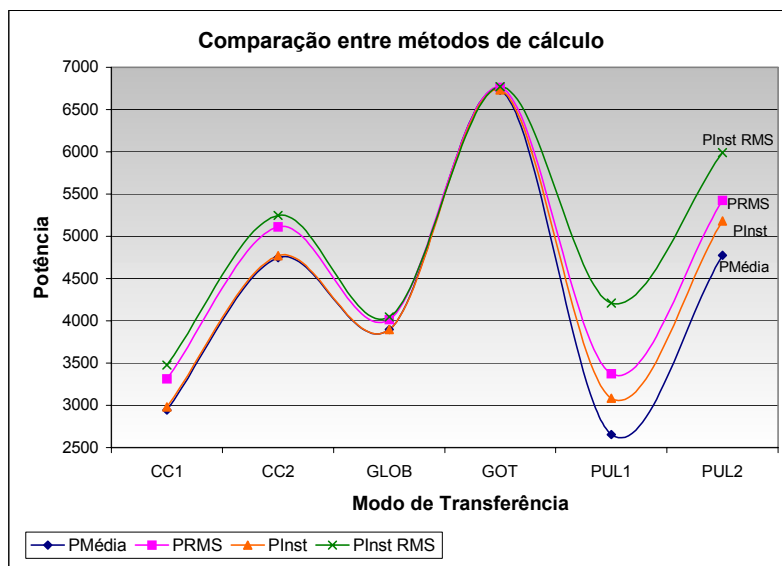


Figura 4. Comparação entre os diferentes métodos de cálculo da potência.

A Tabela 4 apresenta os valores da diferença entre os métodos de cálculo de potência em relação ao método da Potência Instantânea, para os diferentes modos de transferência metálica. Pode-se notar que as menores diferenças, qualquer que seja o método de cálculo, se deram para as transferências em vô livre, principalmente em goticular. Mas chama atenção também que no modo de transferência por curto-circuito a diferença entre Potência Instantânea e Potência Média foi muito pequena, justificando, a princípio, neste caso utilizar esses dois métodos para o cálculo de potência. Já no modo pulsado foram quase sempre obtidas as maiores variações entre os métodos, alcançando

um máximo para o cálculo referente à potência instantânea RMS de 36,6%. De modo geral os métodos de cálculo de potência que utilizam os valores instantâneos RMS forneceram as maiores variações, mostrando-se inadequado para o estudo do aporte térmico em soldagem (aceitando-se que matematicamente foi demonstrado que o método de potência Instantânea é o melhor).

Tabela 4. Diferença nos métodos de cálculo em relação à Potência instantânea.

Transfer.	P_{Inst} (Adequada)	$P_{Média}$	Dif. %	P_{RMS}	Dif. %	$P_{Inst RMS}$	Dif. %
CC1	2980,2	2945,9	-1,15	3313,2	11,18	3477,1	16,67
CC2	4769,8	4746,7	-0,48	5112,4	7,18	5248,4	10,03
Glob	3895,7	3895,2	-0,01	4013,7	3,03	4046,0	3,86
Got	6735,3	6730,3	-0,07	6759,4	0,36	6769,2	0,50
Pul1	3083,1	2653,5	-13,93	3373,5	9,42	4211,3	36,60
Pul2	5182,8	4774,6	-7,88	5425,1	4,68	5991,3	15,60

Na tentativa de se explicar os resultados acima através do Teorema da Esperança (o qual mostrou ser o método da Potência Instantânea o mais adequado), deve-se lembrar que, de acordo com Montgomery e Runger (2003), duas variáveis serão independentes (como requer o teorema) se a distribuição dos dados forem normal bidimensional e ainda apresentar um coeficiente de correlação nulo. Entretanto, em soldagem normalmente estas **variáveis são dependentes**, em maior ou menor grau em função do modo de transferência metálica.

Em princípio, percebe-se que para o modo de transferência por vôo livre (globular e goticular) as variáveis tensão e corrente não apresentam grande dependência. Portanto, neste caso é possível se calcular a potência por qualquer um dos métodos apresentados, justificando os resultados da Tabela 4. As diferenças não teriam sido totalmente nulas devido a algumas ondulações mínimas que ocorrem nos sinais como resultado do comportamento do arco e das características elétricas das fontes de soldagem. Porém, no modo de transferência onde se utiliza a corrente pulsada, no qual há uma forte dependência entre as variáveis tensão e corrente, justifica-se a grande diferença entre os valores de potência calculados pelos diferentes métodos.

Já no modo de transferência por curto-circuito, a primeira vista se esperava que as variáveis tensão e corrente fossem dependentes (pelo comportamento de suas curvas, na qual a corrente cresce sempre que a tensão reduz). No entanto, os valores de potência calculados pelo método Potência Média e Potência Instantânea apresentaram valores bem próximos, o que levaria a supor que as variáveis fossem independentes. Por achar infundada esta suposição, fez-se as análises de correlação e covariância entre as variáveis. Porém, em situações, onde as variáveis envolvidas não têm seu comportamento descrito de maneira “suave”, ou seja, quando os índices de variações envolvidos em cada uma delas se assemelham a problemas rígidos, onde as variáveis mudam com passos de integração diferentes, recomenda-se que seja feita a normalização ou adimensionalização dos dados a serem apurados. Estas técnicas permitem que variáveis que possuem faixas de variação com diferenças significativas sejam avaliados com os mesmos “pesos”, ou seja, pode-se buscar uma correlação e co-variância mais precisas e eficazes entre as diversas variáveis envolvidas no processo estudado.

Como no caso estudado, as variáveis apresentam dimensões diferentes, foi necessário fazer uma normalização dos dados, dividindo cada valor pontual pelo valor médio. A Tabela 5 apresenta os coeficientes de correlação e de covariância entre os sinais de tensão e corrente, nos diferentes modos de transferência e em seus dois níveis de energia. Nota-se que para o modo de transferência pulsado, a correlação e a covariância apresentam maiores valores, bem mais distantes de zero, ou seja, as variáveis nestes casos são dependentes e justificam os resultados da Tabela 4. Já nos modos de transferência por curto-circuito, globular e goticular, tanto a correlação como a covariância assumem valores baixos bem próximos de zero, significando que as duas variáveis tensão e corrente nestes casos são independentes (justificando novamente os resultados da Tabela 4). No caso do

curto-circuito, apesar de estatisticamente elucidado, não se encontrou uma explicação física para ser ter sinais com aparente dependência, porém independentes entre si.

Tabela 5. Coeficiente de Correlação e Covariância.

Modo de transferência	Coeficiente de correlação	Covariância U e I
CC1- teste 1	0,095	1,158
CC1- réplica	0,096	1,164
CC2 - teste 1	0,059	0,478
CC2- réplica	0,072	0,493
Glob1 - teste 1	-0,002	-0,009
Glob2- réplica	0,037	0,045
Got1 - teste 1	0,288	0,073
Got2 - réplica	0,295	0,074
Pul1 - teste 1	0,885	16,100
Pul1- réplica	0,890	16,274
Pul2 - teste 1	0,871	8,737
Pul2- réplica	0,861	13,598

Assim, nem sempre se pode usar a Equação 7 (Potência Média) no cálculo da potência. Com isso, assume-se neste trabalho daqui para frente que a média aritmética da multiplicação da tensão pela corrente feita pontualmente, denominada por **potência instantânea, é a forma mais indicada para o cálculo da potência em soldagem**, já que se aplica tanto para variáveis independentes quanto para dependentes.

Concorrentemente às análises acima, as características geométricas dos cordões de solda, definida pela largura (L), penetração (P) e reforço (R), além das áreas fundida (A_{Fun}), da ZAC (A_{ZAC}) e do reforço (A_{Ref}) foram obtidas nos diferentes modos de transferência metálica e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados médios das características geométricas.

Transferência	L (mm)	P (mm)	R (mm)	$A_{Fun} (mm^2)$	$A_{ZAC} (mm^2)$	$A_{Ref} (mm^2)$
CC1	7,81	1,47	2,71	5,26	22,44	15,08
CC2	11,35	1,74	2,875	11,07	48,41	23,31
Glob	9,32	0,73	1,75	4,98	18,29	10,73
Got	11,27	2,07	2,4	10,37	46,93	17,14
Pul1	8,39	1,41	2,17	5,09	25,00	12,21
Pul 2	11,21	2,67	2,57	13,39	44,69	19,10

Tabela 7. Valores de rendimento térmico calculados pelas diferentes potências.

Tipo	P_{Inst}	Rend. (%)	$P_{Média}$	Rend. (%)	P_{RMS}	Rend. (%)	$P_{Inst RMS}$	Rend. (%)	L/2 (mm)	$V_{sol} (mm/s)$
CC1	2980,2	69,00	2945,9	69,81	3313,2	62,07	3477,1	59,14	3,91	5,00
CC2	4769,8	59,52	4746,7	59,81	5112,4	55,54	5248,4	54,09	5,68	4,75
Glob	3895,7	94,37	3895,2	94,37	4013,7	91,90	4046,0	91,31	4,66	7,42
Got	6735,3	58,82	6730,3	58,82	6759,4	58,62	6769,2	58,53	5,64	6,67
Pul1	3083,1	71,85	2653,5	83,26	3373,5	65,49	4211,3	52,46	4,20	5,00
Pul2	5182,8	56,95	4774,6	61,82	5425,1	54,41	5991,3	49,26	5,61	5,00

De posse dos valores da geometria do cordão de solda, foi possível prever o rendimento térmico do processo utilizando o modelo proposto por Rosenthal (Easterling, 1983), os valores de

rendimento foram calculados utilizando os diferentes valores de potência calculados pelas diferentes formas e o resultado está apresentado na Tabela 7. Naturalmente, as diferenças entre os valores de rendimento seguem a mesma tendência dos resultados da Tabela 4. Este fato mostra que, independentemente da precisão do cálculo de rendimento térmico usado neste trabalho (chegando a mostrar valores maiores do que 100%), vai se ter diferentes valores de acordo como o método de cálculo da potência. E os usuários destes cálculos devem ficar atentos para isto.

4. CONCLUSÕES

- Existem diferenças significativas nos valores de potência calculados por diferentes métodos;
- A diferença dos resultados entre os métodos é constante, independente do modo de transferência e do nível de energia, significando um erro sistemático nos resultados caso se esteja usando o método que não seja o mais exato. O erro sistemático pode ser maior ou menor, até nulo, dependendo do modo de transferência (comportamento dos sinais de tensão e corrente). Assim, pode-se utilizar os valores de leitura de corrente ou tensão até direto dos aparelhos de medida (amperímetros e voltímetros) para se calcular a Potência, se, e somente se, for aceita a incorporação desse erro sistemático;
- A presença de dependência ou independência entre as variáveis (U e I) mostrou-se um fator importante na tomada da decisão sobre o melhor método de cálculo (através de uma análise estatística pelo coeficiente de correlação e/ou pela covariância é possível identificar as relações de dependência entre as variáveis tensão e corrente (U e I) nos diferentes métodos de transferência, inclusive naqueles que por sentimento poderia se dizer ao contrário);
- Pôde-se demonstrar e concluir matematicamente, pelo Teorema da Esperança, que dos quatro possíveis métodos de cálculo de potência, o mais adequado (exato) a ser utilizado é o da Potência Instantânea, pois o método pode ser aplicado mesmo que as variáveis tensão e corrente sejam dependentes. Assim, o método mais adequado para se fazer simulações ou previsões em processos de soldagem, na qual se utiliza o parâmetro de potência, é o da Potência Instantânea;
- É possível afirmar também que para os modos de transferência em que o coeficiente de correlação e a covariância assumem valores próximos de zero é possível calcular a potência tanto pelos métodos da Potência Média ou Potência Instantânea (mas não pelo de Potência RMS e nem pelo de Potência RMS instantânea, pois esta premissa só é válida para os casos em que se aplica o teorema da Esperança).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas de estudos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSWORTH, M.R., Effective Heat Input in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding With Solid Wire Electrodes, *Welding Journal*, USA, vol.70, n.5, p.111-117, Mai 1991.
- NEEDHAM, J.C. What do you Mean by Current?, *Welding Institute Research Bulletin*, TWI, UK, p.277- 280, Ago 1985.
- DILTHEY, U., KILLING, R. Heat Input for Pulsed GMAW, *Welding Design and Fabrication*, vol.63, n.9, p.51-53, Set 1990.
- JOSEPH, A. P. Assessing the Effects of GMAW-Pulse Parameters on Arc Power and Weld Heat Input: 2001. 104p. M.Sc. Thesis - Ohio State University, USA.
- NETO, B., B., SCARMÍNIO, I. S., BRUNS, R. E. Como fazer experimentos. 1 ed., Campinas: Ed. UNICAMP, 1995, 401p.
- ALLARD, R.J. Introdução á econometria, Rio de Janeiro: Ed. GUANABARA KOOGAN, 1980. 209p.

- SOARES, J.F., FARIA, A.A., CESAR., Introdução á Estatística, Belo Horizonte: Ed. GUANABARA KOOGAN, 1991, 378p.
- EASTERLING, K. Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Sweden: Ed. BUTTERWORTHS, 1983. 230p
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C., Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 2ª Ed, Rio de Janeiro - Brasil: Ed. LTC, 2003. 463p.

ASSESSMENT OF ELECTRICAL POWER CALCULATION METHODS IN ARC WELDING

Alexandre Saldanha do Nascimento

University Federal of Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M -Uberlândia/MG
CEP: 38400-902

asnascimento@mecanica.ufu.br

Marcio de Andrade Batista

engandrade10@yahoo.com.br

Vinicius Castanheira do Nascimento

vcnascimento@hotmail.com.br

Américo Scotti

ascotti@mecanica.ufu.br

Abstract: *Electric Power in welding is classically defined as the product of voltage and current, from which the process heat input is determined. From the energy value, previsions of thermal cycle, and the consequences on the metallurgical and bead geometry modifications, are taken. The main issue is that different methods of calculating this parameter are found in the specialized literature. The most popular ones are the Arithmetical Average Power and the RMS Power. Another method is the Instantaneous Power (arithmetical average of the voltage and current punctual product). Finally, there would be yet the Instantaneous RMS Power. Thus, in this work it was proposed to assess the four methods and to justify the differences amongst them and the consequences on the heat input and thermal efficiency calculations. For that, MIG/MAG welding were carried out at the same power (2 levels), yet varying the metal transfer modes, covering short-circuiting, globular, spray and pulsed. Welding Electric Powers were calculated using the four methods and, for justifying the differences, the Expectance Theorem was employed. Transverse sections of the bead were measured and the calculated heat input applied in simulations for thermal cycle previsions. Variance and correlation indexes between voltage and current signals were obtained. It was concluded that the calculation of the Instantaneous Power is the most adequate method, since it is independent from the correlation degree between the electrical signals.*

KEY-WORDS: WELDING ELECTRIC POWER, EXPECTANCE THEOREM, METAL TRANSFER.