

## ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DO TUBO DE CONTATO À PEÇA DE TRABALHO NA SOLDAGEM MIG/MAG (GMAW)

**Salvador Alves de Melo Júnior**  
**Guilherme Caribe de Carvalho**  
**Sadek C. Absi Alfaro**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, GRACO (Grupo de Automação e Controle), 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: [sadek@graco.unb.br](mailto:sadek@graco.unb.br).

### **Resumo**

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para estimação da distância entre o tubo de contato elétrico e o metal base (“stand-off”) no processo de soldagem GMA (“Gas Metal Arc”). A metodologia proposta baseou-se na medição da resistência elétrica entre o tubo de contato e o metal base durante os períodos de extinção do arco de soldagem no modo de transferência de metal por curto-circuito. Tais períodos foram determinados nas curvas de evolução temporal da tensão e da corrente de soldagem através da identificação dos ciclos positivos da derivada temporal do sinal de corrente e dos ciclos de baixa tensão correspondentes ao curto circuito. Utilizando técnicas estatísticas de seleção de variáveis e de regressão múltipla, obteve-se como resultado um modelo linear relacionando a velocidade de alimentação do arame de soldagem, a corrente média obtida do experimento e interações dessas com a resistência média de curto-circuito (variáveis independentes) à estimativa do “stand-off” (variável dependente). Durante os testes de validação, observaram-se erros de estimação da ordem de 4% em relação aos valores esperados.

**Palavras-chave:** Soldagem, Modelagem, Monitoramento.

### **1. METODOLOGIAS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE SOLDAGEM**

O processo de soldagem *GMAW* (*Gas Metal Arc Welding*) é um dos processos de fabricação e reparo que tem sido cada vez mais utilizado nas linhas de montagem industriais, devido à sua versatilidade e produtividade. Entretanto, há certa dificuldade em se utilizar os parâmetros adequados na automação deste processo, devido ao conjunto de variáveis envolvidas e controle das mesmas. Além disto há sempre o erro inerente aos equipamentos e métodos utilizados, mesmo no caso de sistemas autônomos.

Para tentar sanar este tipo de problema, diversos trabalhos têm sido propostos para automação e controle dos processos de soldagem, tais como: A investigação do padrão de som emitido durante o processo *GMAW* proposto por Saini e Floyd, (1998) visando o controle on-

line deste processo a partir de informações das características do arco, da poça de metal e do modo de transferência do material; Uma metodologia de controle através da aquisição de dados visuais sincronizados com sensores eletrônicos para determinar o modo de transferência, o qual tem um grande efeito sobre a penetração, fluxo de calor e faixas de parâmetros e posições disponíveis para soldagem Johnson et al., (1991).

Entretanto, para efetivação do controle de qualquer processo, é necessário analisar as variáveis de controle do mesmo. Há na literatura diversas possibilidades. Carvalho, (1997) citou em seu trabalho algumas propostas, dentre elas destacam-se o monitoramento da tensão do arco, corrente de curto-circuito e tempos de arco e curto-circuito, proposto por Norrish (1992); A análise quantitativa do desvio padrão e do coeficiente de variação para quantificar a estabilidade do processo, o qual foi proposto por Ogunbiyi e Norrish, (1996); Tem-se ainda um estudo proposto por Needham, (1985), no caso de transferência de material por curto-circuito, que a taxa entre o tempo de arco e tempo de curto-circuito deva ser mantida, dentro de certa faixa, tão constante quanto possível; Outra possibilidade é a medição da área sob o gráfico (I x V) correspondente a cada ciclo de curto-circuito, calculando-se o desvio padrão destas áreas de um número específico de ciclos, proposta por Ditley et al., (1996). Ou ainda o próprio trabalho de Carvalho que propõe uma análise da estabilidade do processo utilizando os valores de tensão abaixo da média.

Propõem-se então com este trabalho uma metodologia para medir indiretamente o “*stand-off*”, por meio dos sinais de corrente e tensão de soldagem durante o processo *GMAW*, os quais serão utilizados para calcular a derivada temporal da corrente durante o tempo de curto-circuito. O modelo matemático e estatístico será então obtido por meio da regressão múltipla, o qual pode ser utilizado em uma metodologia de controle do processo de soldagem.

## **2. CONTROLE DO PROCESSO "GMAW"**

O sistema de alimentação do arame é projetado para manter a velocidade do arame constante, a um valor pré estabelecido, independente das variações do arco de soldagem. Processos convencionais de soldagem utilizam fontes do tipo tensão constante que proporcionam um auto ajuste e estabilização do comprimento do arco Norrish, (1992) e Carvalho, (1997). Assim, um aumento no comprimento do arco causa um aumento da tensão no mesmo, desse modo a corrente de saída da fonte se reduz de acordo com a maior demanda de tensão. Com isso a taxa de fusão se reduz e assim, menos arame é consumido e o comprimento do arco é reduzido. Algo semelhante acontece quando se diminui o comprimento do arco, o qual produz um aumento da corrente; portanto, há um aumento da taxa de fusão e novamente o arco volta a crescer para o valor original Norrish, (1992).

Entretanto este controle descrito acima não é suficiente para se obter uma solda com boa aparência e propriedades físicas. Portanto, para se obter melhores resultados em termos da qualidade de solda, é necessário controlar as variáveis para estabilizar o processo, de modo a prever a performance deste, ou seja, é necessário adquirir o sinal de entrada, processá-lo e atuar no sinal de saída. Além disto, é preciso monitorar o sistema para garantir que este esteja sempre operando dentro de certos limites definidos Norrish, (1992).

## **3. PROCEDIMENTO**

Para realizar este trabalho foi preciso seguir certos passos para se chegar ao resultado pretendido. Estes são descritos a seguir:

- a) Programa para adquirir e tratar os dados de soldagem;
- b) Definição da área de trabalho;

- c) Equação para estimar o *stand-off*, utilizando-se a resistência de curto-circuito, a velocidade de alimentação do arame (*wire feed speed* – WFS) e a corrente de soldagem;
- d) Experimentos de validação do modelo.

### 3.1 Determinação da área de trabalho

O primeiro passo foi entender como o sistema funciona durante a soldagem, e definir a faixa de parâmetros iniciais e as variáveis com as quais se trabalharia. Então por meio da revisão bibliográfica *Welding Handbook*, (1942) e da atenção de um técnico experiente em soldagem, determinaram-se estes valores conforme é mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Faixa de valores utilizados durante o experimento.

Tensão de soldagem <sup>1</sup>	WFS	“Stand-off”
Entre 17 e 30V	4, 6, 8 e 10 m/min	8, 10, 12, 14, 16 e 18 mm

### 3.2 Aquisição dos dados

Para esta aquisição de dados utilizou-se um aplicativo de programação gráfica, o qual era compatível com a placa de aquisição<sup>2</sup> do laboratório. Neste programa, configurou-se um “gatilho” (*trigger*) para iniciar a aquisição quando a corrente de soldagem ultrapassasse 10A, durante a qual eram mostrados os gráficos de tensão e corrente de cada “janela” contendo 1024 amostras. Terminado o processo de soldagem, encerra-se a aquisição e os seguintes resultados são enviados para um arquivo do tipo texto:

- Tamanho da janela (1024 amostras por janela)
- Frequência de amostragem (2500 Hz)
- *Stand-off* ajustado na fonte de soldagem (SO)
- Velocidade de alimentação do arame ajustada na fonte de soldagem (WFS)
- Tensão ajustada na fonte de soldagem (Vset)
- Média da Tensão obtida da fonte de soldagem (Vmfnt)
- Média da Corrente obtida da fonte de soldagem (Imfnt)
- Sinais do canal 0 (Tensão)
- Sinais do canal 1 (Corrente)

---

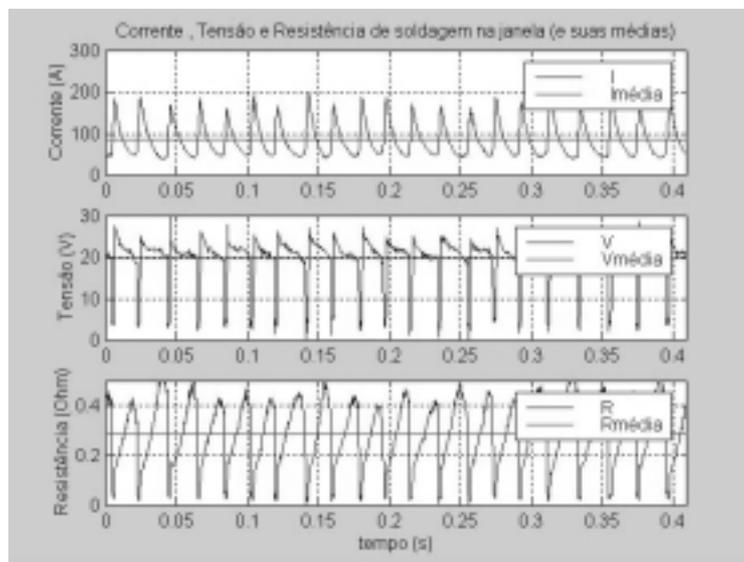
1 A faixa de valores da tensão ajustada na fonte de soldagem é dependente da estabilidade do processo GMAW e do tipo de transferência de material, a qual só é verificada durante o experimento.

2 Características da placa de aquisição: Entradas analógicas de 12-bit: 16 (terra comum); Saídas analógicas: 4; Linhas programáveis digitais: 24; Faixa da tensão de entrada: 0V a 10V / -5V a 5V.

### 3.3 Análise dos dados de soldagem

Após a coleta dos dados, elaborou-se outro programa para análise dos dados. Este programa lê os arquivos gerados na etapa anterior, analisando cada uma das “janelas” de dados, calculando as médias da tensão e corrente de soldagem e da resistência. A seguir são mostrados os gráficos destes valores em função do tempo. No caso, o tempo de cada janela é de 0.4096 segundos. Se os gráficos supra citados apresentarem uma frequência de curto-circuito regular, inicia-se a próxima etapa deste programa que é o calculo da primeira derivada da corrente de soldagem.

Sabe-se que uma função crescente ou decrescente tem a sua derivada positiva ou negativa respectivamente e que durante o curto-circuito a corrente de soldagem cresce rapidamente conforme pode ser visto na Figura 1. Além disto, durante o tempo de curto-circuito o arco praticamente deixa de existir e com isso a resistência à passagem de corrente tende a diminuir bastante e assim ocorre um aumento da corrente de curto-circuito. Com base nisto, quando a derivada da corrente de soldagem for positiva, calculam-se os valores da resistência de curto-circuito e sua média, caso contrário faz-se a derivada e a resistência de curto-circuito iguais a zero. Os resultados desta análise são enviados para um arquivo texto na forma matricial.



**Figura 1.** Gráfico de tensão, corrente e resistência durante o curto-circuito.

### 3.4 Análise Estocástica

Nesta fase foi utilizado um programa específico para análise estatística dos resultados, o qual permite realizar diversas análises até chegar a modelagem matemática do processo em estudo. As etapas seguidas foram as seguintes:

- Determinação das variáveis importantes para a modelagem do processo;
- Verificação da independência das variáveis selecionadas;
- Determinação da equação para estimar o “*stand-off*”.

Para determinar quais variáveis teriam maior influência no processo, utilizou-se um método de análise chamado método de regressão linear por eliminação adiantada (“*Stepwise Regression Forward*”), que consiste de incluir e excluir variáveis até se encontrar o conjunto que tem a maior razão de F (Distribuição de Fisher).

Os resultados encontrados na etapa acima, envolviam variáveis que não apresentavam uma independência muito evidente e para uma análise estatística clássica, as variáveis devem

ser: a) Independentes; b) Aleatórias e c) O erro deve ter uma distribuição normal. Com base nisto utilizou-se o “*Ridge Regression*” para verificar se estas variáveis tendiam a ser independentes. Como resultados desta ferramenta de análise estatística temos o gráfico “*Coefficient x theta*”, o qual deve indicar que o nível de correlação tende a zero.

A etapa seguinte foi encontrar a equação matemática estatística para estimar o “*stand-off*” por meio da regressão múltipla, tendo a análise de variância como parâmetro de escolha, onde o principal critério utilizado foi a maior razão de F possível.

### 3.5 Validação do modelo

Para validação do modelo encontrado foram necessários novos testes, utilizando-se as mesmas variáveis, equipamentos e procedimentos daqueles utilizados para determinação da equação de regressão, porém com valores diferentes daqueles utilizados para gerar o modelo (dentro da faixa de trabalho). Estes testes seguirão um projeto fatorial (“*factorial design*”) 2<sup>3</sup>. Os resultados encontrados pelo modelo foram comparados com os valores de “*stand-off*” ajustados antes de iniciar o processo de soldagem.

## 4. RESULTADOS ENCONTRADOS

Resultados obtidos pela análise dos sinais de tensão e corrente durante o processo de soldagem *GMAW* estão mostrados na tabela 2.

**Tabela 2.** Sinais do Processo de Soldagem *GMAW*

NRO	SO	WFS	Vset	Vmfnt	Vmexp	Imfnt	Imexp	Rccmedia
	[mm]	[m/min]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[Ohm]
1	8	4	21	20,0	20,0	83	83,8	0,308384
2	8	4	23	20,2	20,0	85	85,3	0,290929
3	8	6	22	20,0	20,6	120	122,7	0,218371
4	8	6	23	21,8	21,6	121	124,2	0,222263
5	8	8	25	23,5	23,2	147	155,4	0,187302
6	8	10	26	24,5	23,8	188	190,3	0,145768
7	10	4	20	19,1	19,1	77	79	0,323084
8	10	6	22	20,8	20,6	115	117,2	0,238729
9	10	6	24	22,7	22,7	118	119,7	0,237201
10	10	8	24	22,7	22,3	139	141,9	0,201521
...	...	...	...	...	...	...	...	...
29	18	6	22	21,5	20,9	93	95,7	0,276575
30	18	8	24	22,8	22,6	117	119,3	0,239869
31	18	10	24	22,6	22,4	133	135,8	0,209656

Onde:

- SO = Valor do “*Stand-off*” ajustado no programa de movimentação de robô.
- WFS = Velocidade de alimentação do arame (“*wire feed speed*”).
- Vset = Tensão ajustada na fonte de soldagem.
- Vmfnt = Média da tensão de soldagem obtida da fonte de soldagem.
- Vmexp = Média da tensão de soldagem obtida dos sinais de tensão do experimento.
- Imfnt = Média da corrente de soldagem obtida da fonte de soldagem.
- Imexp = Média da corrente de soldagem obtida dos sinais de corrente do experimento.
- Rccmedia = Média da resistência de curto-circuito do experimento.

Na Tabela 3, usando regressão múltipla obtemos as variáveis significantes:

**Tabela 3.** Resultado obtido com o "*Stepwise Variable Selection Forward*".

Variáveis Independente	Coefficiente	Erro Padrão	Valor - t	Nível de significância
CONSTANTE	23,270702	4,133501	5,6298	0,0000
WFS	-8,071033	0,896089	-9,0070	0,0000
Imexp	0,401666	0,050576	7,9418	0,0000
WFS * Rccmedia	53,008483	4,158347	12,7475	0,0000
Imexp * Rccmedia	-3,174132	0,295681	-10,7350	0,0000

Na Tabela 4 a e b, mostra-se, respectivamente, o resultados da análise de variância para o modelo linear e não linear e a tabela 5, os resultados obtidos com "*Ridge Regression*"

**Tabela 4a.** Resultados da análise de Variância (ANOVA) do modelo linear.

Tipo	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F <sup>3</sup>	Valor P
Modelo	273,43300	4	68,358300	197,779	0,0000
Erro	6,56697	19	0,345630		

**Tabela 4.b.** Resultados da análise de Variância (ANOVA) do modelo não linear.

Tipo	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	Razão F	Valor P
Modelo	63,41320	4	15,8533000	200,375	0,0000
Erro	1,50324	19	0,0791180		

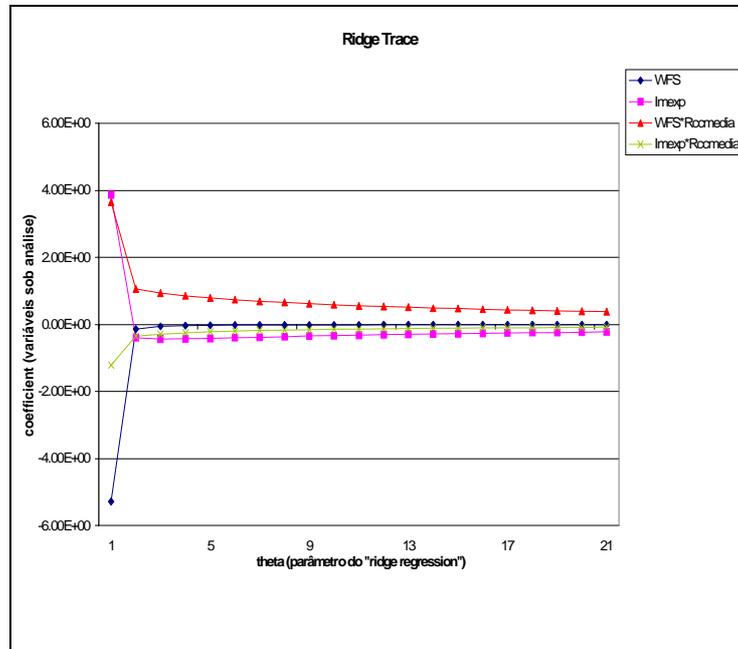
**Tabela 5.** Resultado obtido com o "*Ridge Regression*".

Theta	WFS	Imexp	WFS* Rccmedia	Imexp* Rccmedia
0,00	-5,28E+00	3,872946	3,646088	-1,21E+00
0,05	-1,33E-01	-0,389771	1,053827	-3,48E-01
0,10	-5,44E-02	-0,433889	0,933635	-2,88E-01
0,15	-3,23E-02	-0,42937	0,854666	-2,49E-01
0,20	-2,31E-02	-0,41456	0,792151	-2,21E-01
0,25	-1,84E-02	-0,397148	0,739737	-1,99E-01
0,30	-1,56E-02	-0,379518	0,694578	-1,81E-01
0,35	-1,38E-02	-0,362534	0,655023	-1,66E-01
...	...	...	...	...
0,80	-7,93E-03	-0,252167	0,435993	-9,64E-02
0,85	-7,60E-03	-0,243668	0,420507	-9,21E-02
0,90	-7,29E-03	-0,235702	0,406096	-8,82E-02
0,95	-7,01E-03	-0,228222	0,39265	-8,46E-02
1,00	-6,74E-03	-0,221188	0,380075	-8,13E-02

<sup>3</sup> A razão "F" (Coeficiente de Fisher), indica a variância do modelo em torno da sua média.

Onde:

- Theta = Parâmetro do “ridge regression” ;
- WFS = Velocidade de alimentação do arame;
- Imexp = Média da corrente de soldagem obtida do experimento;
- Rccmedia = Resistência de curto-circuito média.



**Figura 2.** "Ridge Trace"

Assim, o resultado da Regressão Múltipla nos leva ao seguinte equacionamento do “Stanf Off”:

$$SO = 23.270702 - 8.071033*WFS + 0.401666*Imexp + 53.008483 *WFS * Rccmedia - 3.174132*Imexp*Rccmedia$$

Resultados encontrados na validação do modelo estão mostrados na tabela 6,

**Tabela 6.** Resultado da validação do modelo.

Ensaio	SO (mm)	SO estimado	Erro	SO <sup>(0.8)</sup> estimado	erro
1	9	9,7	7,3%	9,6	6,4%
2	17	17,4	2,0%	17,4	2,2%
3	9	9,3	3,0%	9,2	2,7%
4	13	13,4	3,1%	13,3	2,3%
5	17	16,4	3,6%	16,4	3,7%
6	13	12,9	0,8%	12,8	1,6%
7	9	9,7	7,8%	9,7	7,7%
8	13	12,8	1,8%	12,6	2,7%
9	17	17,9	5,1%	18,0	5,7%
<b>Média</b>			3,8%		3,9%
<b>Desvio Padrão</b>			2,4%		2,2%

Onde:

- SO Estimado = “*stand-off*” obtido do modelo linear.
- $SO^{(0.8)}$  Estimado = “*stand-off*” obtido do modelo não linear.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da seleção das variáveis indicou uma interação entre a velocidade de alimentação do arame (WFS) e a corrente média do processo de soldagem com a resistência de curto-circuito média, pois como a velocidade de alimentação do arame esta relacionada com a corrente de soldagem<sup>4</sup> e esta com a resistência, fez-se necessário a utilização do “*ridge regression*” para determinar se estas variáveis tendiam a ser independentes, o que pela tabela 5 e pela Figura 2, nota-se que o erro relacionado à correlação destas variáveis tem uma distribuição normal, ou seja, este erro não afetará significativamente os resultados.

O uso de um modelo não linear não promoveu melhoria dos resultados de validação do modelo linear, apesar daquele apresentar um valor da razão de F superior a este (Tabela 4b).

Pelo resultado da análise de variância, nota-se que o valor da razão F encontrado (197.779), indica que esta relação entre as variáveis é válida para representar o sistema em análise, pois conforme pode ser visto na tabela D do Apêndice do livro do George Box, (1972), para esta situação o valor tabelado de F é 7.26, ou seja, muito menor que o valor encontrado para o modelo. Além disto, pela análise da tabela 6, a distribuição do erro é gaussiana, e indicou uma boa qualidade do modelo.

O modelo é limitado às condições em que foram realizados os ensaios (tipo de processo de soldagem, gás utilizado, fluxo do mesmo, modo de transferência, tipo e diâmetro do eletrodo, etc.), ao cilindro de gás utilizado e à região de trabalho (WFS, SO).

## 6. CONCLUSÕES

Com base neste trabalho chegou-se às seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos com a metodologia proposta, indicaram que esta pode ser válida no contexto do controle do processo de soldagem, como uma etapa anterior ao controle propriamente dito.
- O erros encontrados podem ser devido: (a) Em parte pelo modelo; (b) Ao ruído quando da transmissão dos sinais de soldagem; (c) Ao erro durante o posicionamento do robô para ajustar o “*stand-off*”; (e) Ao erro do mecanismo de alimentação do arame e deslocamento do “*braço*” do robô.
- No caso da implementação do controle, deve-se elaborar um programa específico para este fim, que faça a aquisição e análise dos dados, evitando-se assim a necessidade de uso de diversos programas e a perda de dados por tempo de processamento.
- O modelo matemático por regressão múltipla linear é um modelo mais simples e indica resultados melhores que o modelo não linear.

---

4 Quanto maior a velocidade de alimentação do arame, maior a corrente de soldagem.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PADCT/Finep, CNPq, FAP-DF e RHAE/MCT, pelo apoio a este e outros trabalhos do grupo.

## 8. REFERÊNCIAS

- CARVALHO, G. C., **An Adaptive Control System for Off-line Programming in Robotic Gas Metal Arc Welding**. Cranfield, 1997. Ph.D. Thesis – School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University.
- NORRISH, J., **Advanced Welding Process**. Bristol – UK, 1992.
- SAINI D. e FLOYD S., An Investigation of Gas Metal Arc Welding Sound Signature for On-line Quality Control, **Welding Journal**, p. 172s-179s, Apr. 1998.
- **Welding Handbook**, 6<sup>a</sup> edição, parte 2, AWS, United States of America, 1942
- BOX, George, et al., **Statistics for Experimenters, An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building**, John Wiley & Sons, NY – USA, 1972.