

EZIO FERNANDES DA SILVA

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DO EFEITO DA SOLDAGEM A ARCO
SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM PLANTAS
INDUSTRIAIS**

Tese apresentada ao programa de Pós- graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

**UBERLÂNDIA - MG
2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG – Brasil

S586m Silva, Ezio Fernandes da, 1968-
2013 Modelagem e avaliação do efeito da soldagem a arco sobre a qualidade da energia elétrica em plantas industriais Ezio Fernandes da Silva. - 2013.
164 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.
Coorientador: José Carlos de Oliveira.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Energia elétrica - Teses. I. Scotti, Américo, 1955- II. Oliveira, José Carlos de, 1947- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

EZIO FERNANDES DA SILVA

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DO EFEITO DA SOLDAGEM A ARCO
SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM PLANTAS
INDUSTRIAIS**

Tese aprovada pelo programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Américo Scotti - UFU - Orientador e Presidente

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira - UFU - Co-orientador

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior - UFU

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho - UFU

Prof^a. Dr^a. Maria Emília de Lima Tostes - UFPA

Dr. Raul Gohr Júnior - IMC

Uberlândia, 27 de Fevereiro de 2013

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho, a minha esposa
Kátia Mônica, aos meus filhos Victor e Bruna
e aos meus pais, Vicente Pereira da Silva e Milca Fernandes da
Silva que me acompanham e vibram com minhas vitórias.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** por iluminar os caminhos da minha vida e pela generosa companhia durante as etapas de realização deste trabalho, auxiliando nas minhas decisões e atitudes.

Aos Prof. **Américo Scotti** pela orientação, ensinamentos, discussões e pela confiança depositada, ao Prof. **José Carlos de Oliveira** pela co-orientação, pela confiança e pelo auxílio no trabalho e ao Prof. José Rubens Macedo Jr. pelas sugestões e pelo incentivo em alcançar novos desafios.

À **minha família** pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo ao longo das fases e obstáculos superados em minha vida. À minha esposa **Kátia Mônica** pelo amor, carinho, companheirismo, compreensão e auxílio dedicado a minha pessoa.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Ensino Superior) a oportunidade de desenvolver este trabalho pelo Programa DINTER UFU/IFG nº1773/2007 e pelo apoio financeiro.

Aos professores **Louriel Vilarinho, Valtair Ferraresi, Márcio Bacci, Antônio Carlos Delaiba, José Wilson Resende e Milton Itsuo Samesima**, pelo auxílio e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas do Dinter, **Omar, Carlos Bezerra, Eider, Ricardo, Luiz Carlos, José Luiz Pena e Aldemi**, pelo incentivo, esforço empregado e pelas caronas em cada viagem realizada. Aos colegas da sala de estudos, **André Resende, Daniel Souza, Hélio Almeida, Lindbergh, Regina e Thonsom**, pela amizade e companheirismo.

Ao colegas do laboratório de soldagem e qualidade da energia elétrica, **Diandro, José Francisco, Fabrício Santílio e Marcelo Rossi**, pela colaboração nos ensaios experimentais e solução em tratamentos dos dados.

SILVA, E.F. **Modelagem e Avaliação do Efeito da Soldagem a Arco sobre a Qualidade da Energia Elétrica em Plantas Industriais**. 2012. 164 f.. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG

RESUMO

Atualmente existe uma grande preocupação com os diversos aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE), visto que estes fatores podem de certa forma provocar danos em equipamentos sensíveis e outras anomalias que representam prejuízos aos consumidores em geral. Diante deste quadro, as agências reguladoras do setor elétrico têm se preocupado em estabelecer normas, procedimentos, critérios e recomendações para evitar a má qualidade da energia gerada, principalmente devido ao fato das indústrias possuírem cargas de natureza intrinsecamente perturbadoras, como as resultantes de operações de soldagem. Um ramo de grande destaque na economia é o das indústrias metalúrgicas, que na maioria se utilizam de máquinas de soldagem no seu processo produtivo. Dentro deste contexto, a presente de tese apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação a fim de estudar o comportamento de uma unidade industrial com máquinas de soldagem em operação. Para isto, implementou-se na plataforma *Simulink* um modelo da simulação do arco elétrico de soldagem para o processo MIG/MAG e posteriormente associou-se esse modelo com a topologia de uma máquina de soldagem. A partir dos sinais das correntes e tensões instantâneas na entrada da máquina de soldagem torna-se possível qualificar e quantificar os índices sobre a QEE no ponto de acoplamento comum (PAC), a saber, sensação instantânea de *flicker* (S_f), índice de severidade de cintilação (P_{st}) e frequências inter-harmônicas. Dentro deste cenário surge a proposta da presente tese, a qual tem como objetivo realizar um programa de simulação para várias máquinas de soldagem com processo MIG/MAG que permita determinar antecipadamente os distúrbios causados à rede elétrica, contribuindo de certa forma para a análise de novos projetos e/ou já instalados.

SILVA, E.F. **Modeling and Assessment of the Arc Welding Effect on the Electric Energy Quality in Industrial Plants.** 2013. 164 f.. Doctorate Thesis, Federal University of Uberlandia, Uberlândia, MG, Brazil

ABSTRACT

Currently there is great concern about the various aspects related to power quality (PQ), as these factors may somehow cause damage to sensitive equipment and other anomalies that represent losses to consumers in general. Given this representation, the regulatory agencies of the electricity sector have been concerned to establish standards, procedures, rules and recommendations to avoid poor quality of the electric power generated, mainly due to the fact that industries have nature loads intrinsically disturbing, as resulting from the welding operations. But a trade of great prominence in the economy is the metallurgical industries, which mostly use welding machine in its production process.

Within this context fit the present proposal for doctoral thesis, which is focused on the development of simulation tool to study the behavior of an industrial unit with welding power sources in operation, analyzing the effects caused by this type of load, of intermittent and random character, to the network. For this, a model has been developed to simulate the electric arc welding to the process MIG/MAG and subsequently to join this model with the topology of a welding machine. Through the model of a welding machine developed in a Simulink platform, the behavior of the instantaneous currents and voltages at the entrance of the welding machine at the point of common coupling (PCC) and in electric arc welding became possible, providing conditions for these data were sufficient to qualify and quantify the effects of the MIG/MAG welding process over the PQ. Indicators of PQ have been analyzed, namely, instantaneous flicker sensation (S_f), severity index flicker (P_{st}) and interharmonics frequencies. Within this scenario the proposal of this thesis, which aims to conduct a simulation program for various welding machines MIG/MAG process for determining in advance the disturbances caused to the electric power network, contributing to the analysis of new projects and/or already installed.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do arame-eletrodo [m ²]
A_e	Área da seção do arame-eletrodo $A_e = \pi.d_e^2/4$ [m ²]
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
A_x	Constantes empíricas que dependem das condições operacionais
B_x	Constantes empíricas que dependem das condições operacionais
CC	Corrente constante
C_x	Constantes empíricas que dependem das condições operacionais
$DBCP$	Distância Bico de Contato Peça
d_e	Diâmetro do arame-eletrodo [m]
di/dt	Taxa de variação da corrente
D_x	Constantes empíricas que dependem das condições operacionais
E_a	Campo elétrico na coluna do arco [V/mm]
f	Velocidade de alimentação do arame no processo GMAW [m/min]
FC	Fator de trabalho
f_{cc}	Frequência de curto-circuito
f_p	Frequência de pulso
FT	Fator de transferência
I	Corrente de soldagem [A]
i_{arco}	Corrente do arco aberto
I_b	Corrente de base [A]
i_{cc}	Corrente de curto-circuito
i_{cc}^i	Corrente quando o curto é iniciado
i_{cc}^t	Corrente do final do curto
I_{curto}	Corrente durante o curto-circuito
I_m	Corrente média
I_{max}	Corrente máxima de soldagem
I_{min}	Corrente mínima de soldagem

x

I_p	Corrente de pico [A]
i_t	Corrente de transição
L	Soma das indutâncias da fonte e do cabo [Vs/A]
l_{arco}	Comprimento do arco elétrico [m]
l_e	Comprimento energizado do eletrodo
L_s	Indutância interna da máquina de soldagem
M	<i>Slope</i> ou Inclinação da característica estática da máquina [V/A]
MIG/MAG	Processo de soldagem a arco com arame maciço e proteção gasosa
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
R_{arco}	Resistência do arco [Ω]
R_b	Resistência entre o bico de contato e o arame-eletrodo [Ω]
R_c	Resistência de contato entre arame-eletrodo e metal de base [Ω]
R_e	Resistência do eletrodo, sendo: $R_e = \rho_e \cdot l_e / A_e$ [Ω]
R_f	Resistência parasita do circuito elétrico do processo MIG/MAG [Ω]
R_s	Resistência elétrica interna da máquina de soldagem [Ω]
R_t	Somatório de resistências consideradas no circuito [Ω]
t	Tempo [s]
$T(t_{arco} + t_{cc})$	Período de transferência das gotas
t_{cc}	Tempo de duração do curto
t_{arco}	Tempo que o arco permanece aberto
t_b	Tempo de base [s]
t_p	Tempo de pico [s]
V_{ac}	Queda de tensão anódica-catódica [V]
V_{arco}	Tensão do arco aberto
V_{alim}	Velocidade de alimentação do arame [m/s]
V_{an}	Queda de tensão anódica [V]

VC	Tensão constante
v_c	Taxa de variação da DBCP no tempo [m/s]
V_{cat}	Queda de tensão catódica [V]
V_{cc}	Tensão durante o curto circuito
V_{cc}^i	Tensão quando inicia o curto
V_{cc}^f	Tensão quando termina o curto
V_{cir}	Tensão em vazio da fonte [V]
V_e	Queda de tensão ao longo do eletrodo
V_i	Tensão de reignição do arco após o fim do curto-circuito
W	Velocidade de fusão do arame [m/min]
X/R	Relação entre a reatância em 60 Hz e a resistência da fonte de alimentação ou constante de tempo do circuito
α	Coeficiente que representa a contribuição do aquecimento anódico pelo arco, processo GMAW [mm/s.A]
β	Coeficiente que representa a contribuição do efeito joule para a fusão do arame, processo GMAW [1/s.A ²].
ρ_e	Resistividade de arame-eletrodo [$\Omega \cdot m$]
ε	O fator chave que é definido como zero ou um
κ_A	Tensão anódica [V]
κ_j	Resistividade elétrica do arame-eletrodo, dependente da sua composição química e da distribuição de temperatura ao longo do eletrodo durante a soldagem [$\Omega \cdot m$]
τ_{curto}	Constante de tempo
ΔH_{total}	Entalpia total contida no metal de adição no momento que a gota é destacada do arame-eletrodo [J/kg]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução	1
1.1 Contextualização, motivação e objetivo geral	1
1.2 Etapas Metodológicas.....	2
1.3 Contribuições esperadas da tese.....	4
1.4 Estrutura da tese.....	5
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica	7
2.1 Considerações iniciais.....	7
2.2 Descrição do processo de soldagem MIG/MAG.....	7
2.3 Tipos de modos de transferência metálica do processo.....	8
2.3.1 <i>Curto-circuito</i>	9
2.3.2 <i>Globular</i>	11
2.3.3 <i>Goticular</i>	11
2.3.4 <i>MIG Pulsado</i>	12
2.4 Modelagem do arco elétrico.....	13
2.1.1 - <i>Arco elétrico em fornos</i>	14
2.1.2 - <i>Arco elétrico em soldagem</i>	15
2.5 Modelo dinâmico do conjunto máquina eletromagnética e arco de soldagem.....	14
2.5.1 <i>Comportamento do modelo para os períodos de Arco aberto e curto-circuito</i>	21
2.6 Topologias das máquinas de soldagem utilizada no processo MIG/MAG.....	27
2.7 - Qualidade da Energia Elétrica.....	30
2.7.1 <i>Cintilação luminosa</i>	30
2.7.2 - <i>Flutuação de tensão</i>	30
2.7.3 - <i>Flickermeter</i>	32
2.7.4 - <i>Inter-harmônica</i>	35
2.8 - Normatização do setor elétrico contemplando cargas como máquinas de soldagem.....	37
2.9 Considerações Finais.....	39

CAPÍTULO III - Simulação do processo de Soldagem MIG/MAG	41
3.1 Considerações iniciais.....	41
3.2 Estrutura de simulação do arco de soldagem para o processo MIG/MAG.....	42
3.3 Inclusão de perturbações nos parâmetros do arco elétrico de soldagem.....	43
3.4 Integração entre fonte e arco de soldagem.....	45
3.5 Ligação da máquina de soldagem à rede de alimentação.....	46
3.6 Análise de desempenho do programa.....	48
3.7 Considerações Finais.....	52
CAPÍTULO IV – Avaliação Experimental de Soldagem MIG/MAG	53
4.1 Considerações iniciais.....	53
4.2 Aparato experimental.....	53
4.3 Ensaios experimentais para os diversos modos de transferência.....	55
4.3.1 <i>Modo de transferência por curto-circuito</i>	57
4.3.2 <i>Modo de transferência globular</i>	59
4.3.3 <i>Modo de transferência goticular</i>	61
4.3.4 <i>MIG pulsado</i>	63
4.4 Espectros de frequências inter-harmônicas.....	65
4.4.1 <i>Curto-circuito</i>	66
4.4.2 <i>Globular</i>	67
4.4.3 <i>Goticular</i>	68
4.4.4 <i>Frequência de pulso de 34,5 Hz</i>	68
4.5 Determinação da Sensação instantânea de <i>flicker</i> (Sf) e índice de severidade de curta duração (P_{st}).....	69
4.6 Considerações Finais.....	73
CAPÍTULO V - Análise de Desempenho Computacional do Modelo da Soldagem MIG/MAG	75
5.1 Considerações iniciais.....	75
5.2 Simulações da máquina de soldagem operando sob diferentes modos de transferência.....	75
5.2.1 <i>Modo de transferência por curto-circuito</i>	75
5.2.2 <i>Modo de transferência globular</i>	81

5.2.3 Modo de transferência goticular.....	83
5.2.4 MIG pulsado.....	85
5.5 Análise dos Resultados.....	87
5.6 Considerações Finais.....	88
CAPÍTULO VI - Simulação de uma Planta Industrial para Soldagem com Processo MIG/MAG.....	91
6.1 Considerações iniciais.....	91
6.2 Simulação da combinação de duas e três máquinas de soldagem.....	92
6.3 Simulação da Planta Industrial com Máquinas de Soldagem MIG/MAG.....	99
6.4 Estudo de Casos.....	103
6.5 Análise dos Resultados.....	107
6.6 Considerações Finais.....	108
CAPÍTULO VII - Conclusões.....	111
CAPÍTULO VIII – Propostas para Trabalhos Futuros.....	113
Referências Bibliográficas.....	115
APÊNDICE A - Oscilogramas de tensões e correntes para a condição MIG pulsado com diversas frequências de pulso obtidas experimentalmente.....	123
APÊNDICE B - Espectros de Frequência em Vários Instantes Para os Diversos Modos de Transferência.....	127
APÊNDICE C - Espectros de frequência inter-harmônicas da corrente e tensão para diversas frequências de pulso obtidas experimentalmente.....	139
APÊNDICE D - Efeitos das Variações Paramétricas no Modelo de Simulação do Processo de Soldagem MIG/MAG.....	141
APÊNDICE E - Simulação da Máquina Trabalhando com o Modo de Transferência MIG Pulsado Modificado.....	147
APÊNDICE F- Simulação de Duas Máquinas MIG/MAG Trabalhando com Modo de Transferência por Curto-Circuito sem Perturbação com Diferentes Frequências de Curto-Circuito.....	151
APÊNDICE G - Simulação de Três Máquinas MIG/MAG Trabalhando com Modos de Transferência MIG Pulsado ($f_p=68,8$ Hz), por Curto-Circuito com Perturbação e Globular.....	155
APÊNDICE H - Simulação de Cargas Resistivas e Máquinas de Soldagem.....	161