

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Modelagem do Processo MIG/MAG com Transferência
Metálica por Modo Misto Globular/Curto-Circuito**

Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Computação da Universidade
Federal do Rio Grande, como requisito parcial para
a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de
Computação

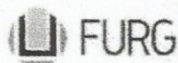
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Zelir Azzolin
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Silvia Silva da Costa Botelho

Rio Grande, 2018

Ficha catalográfica

E921m	Evald, Paulo Jefferson Dias de Oliveira. Modelagem do processo MIG/MAG com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito / Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald. – 2018. 223 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-graduação em Computação, Rio Grande/RS, 2018. Orientador: Dr. Rodrigo Zelir Azzolin. Coorientadora: Dr^a. Sílvia Silva da Costa Botelho 1. Modelagem matemática 2. Identificação de parâmetros 3. Validação de modelos matemáticos 4. MIG/MAG I. Azzolin, Rodrigo Zelir II. Botelho, Sílvia Silva da Costa III. Título. CDU 621.791
-------	--

Catálogo na Fonte: Bibliotecário Me. João Paulo Borges da Silveira CRB 10/2130



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Modelagem do Processo MIG/MAG com Transferência Metálica por Modo Misto Globular/Curto-Circuito

Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald

Banca examinadora:

Prof.ª Dr.ª Cristiane Cauduro Gastadini

Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Junior

Eng. Me. Daniel Souza

Prof. Dr. Rodrigo Zelir Azzolin
Orientador

Prof.ª Dr.ª Silvia Silva da Costa Botelho
Coorientador(a)

*"Se pude enxergar mais longe,
foi porque me apoiei em ombros de gigantes"*
— ISAAC NEWTON

*Dedico esse trabalho aos gigantes de minha vida:
minha família*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço minha esposa Munique Dal Pupo Bueno, por atravessar mais essa jornada comigo, dividindo dias e noites inquietantes para alcançar os objetivos dentro dos limitados prazos que eu mesmo me impunha. Não tenho a menor das dúvidas de que és a minha parceira ideal, pois sempre estás presente em todos momentos de minha vida, seja vitória ou dificuldade. Obrigado por todo companheirismo e compreensão.

Em segundo, agradeço imensamente aos meus pais, Maria Madalena Dias de Oliveira e Milton da Silva Guenez, por terem sempre acreditado no meu potencial e me motivado à ir além. Graças aos seus ensinamentos aprendi que desistir de um objetivo não é uma opção, basta descansar um pouco e retomar o trabalho com energia renovada que qualquer obstáculo se torna menor e assim será possível superá-lo. Evidentemente, sempre de forma simples, humilde e justa para que não prejudique ninguém nesse caminho ao sucesso.

Também agradeço ao meu irmão, Diogo de Oliveira Guenez, pela amizade e paciência nessa jornada, em que muitas vezes me ausentei para progredir nas pesquisas, mas que acabou sendo gratificante a cada etapa finalizada. Ainda assim, vivenciamos muitos momentos divertidos juntos e que venham mais desses bons tempos. Além destes, agradeço também aos meus sogros, Helena Maria Dal Pupo Bueno e José Renato Antunes Bueno, pelos bons fins de semana compartilhados e pelo chimarrão amargo enquanto trabalhava nesta dissertação.

Em especial agradeço ao meu avô, Valmir Dias de Oliveira (*In memoriam*), pelos ótimos momentos de alegria e distração depois de dias de pesquisa árduos. Gostaria de poder dividir mais desses momentos com essa pessoa querida, bem como compartilhar mais vitórias ao longo da vida, entretanto agora somente a chama de sua presença aquece nossos corações. Jamais esquecerei dos bons momentos que vivenciamos junto.

Agradeço também aos meus colegas do curso de mestrado, que também foram colegas de sala de permanência e de carona, Átila Astor Weis, Braian Kozgen Maciel, Luciane Baldassari Soares, Matheus Franz de Faria, Mateus Schott e Renan Zafalon da Silva. Principalmente ao condutor do dia a dia, Átila Astor Weis, por garantir que eu não me atrasasse (às vezes...). Além destes, agradeço à Débora Debiaze de Paula e Eduardo do Amaral Leivas, integrantes da equipe de suporte de hardware do NAUTEC, por terem auxiliado no projeto do sistema de medição, principalmente por adiantarem a fabricação de placas eletrônicas. Outra grande presença que não poderia ficar de fora dos agradecimentos é o Jusoa Lang Mór, parceiro de artigos, relatórios, experimentos e madrugadas à dentro compartilhando ideias e conhecimentos para vencermos os *deadlines* à base de muita

caféina, desde a época do estágio de graduação. Também agradeço ao nosso novo grupo informal de controle, que se formou naturalmente nesse período, que além do Jusóan e a Débora, também participaram a Andreyana Sárila Ramos Ferreira, Rômulo Thiago Silva da Rosa e Fernando da Fonseca Schneider.

Por fim, mas não menos importante agradeço aos professores integrantes do corpo docente do mestrado em Engenharia de Computação por terem compartilhado comigo seus conhecimentos adquiridos ao longo de anos. Agradeço principalmente ao meu orientador, Rodrigo Zelir Azzolin, que entre reuniões e emails me auxiliou para finalizar este trabalho e apoiou a avançar cada vez mais nas pesquisas, que foram muito além do conteúdo dessa dissertação e por trazer novas oportunidades. Também deixo um agradecimento especial ao Daniel, Engenheiro de Soldagem do LAPES, que me ajudou nos ajustes dos parâmetros operacionais e testes que requerem soldagem de fato para aquisição de dados com arco estável.

De forma breve, agradeço à todos que vivenciaram essa jornada comigo e se tornaram bons companheiros de trabalho, de forma direta ou indireta, sejam mestres, colegas, técnicos de manutenção do departamento e demais servidores que colaboram para um ambiente funcional, agradável e limpo de estudo e trabalho. Além de amigos e familiares não mencionados de forma explícita nessa nota de agradecimento.

a todos minha gratidão.

RESUMO

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira. **Modelagem do Processo MIG/MAG com Transferência Metálica por Modo Misto Globular/Curto-Circuito**. 2018. 200 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

A demanda pelo aumento de produtividade e qualidade da solda é uma motivação constante para o desenvolvimento de processos de soldagem mais confiáveis, robustos e automatizados. Entretanto, os processos de soldagem são muito dinâmicos e de alto nível de complexidade, o que acarreta em muita variabilidade no comportamento do processo em si, devido as não-linearidades, incertezas e forte acoplamento de seus parâmetros. Assim, uma alternativa para obter uma solda de melhor qualidade, sem que um soldador profissional seja requerido constantemente durante o processo, é o emprego de técnicas de controle que manipulem os parâmetros de interesse desse processo. Entretanto, para implementar algumas técnicas de controle adequadamente é imprescindível o desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o processo físico o mais próximo possível da realidade. Na literatura são encontrados modelos de diversas dinâmicas inerentes às transferências metálicas nos processos MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), pelo modo globular, curto-circuito ou goticular/*spray*, independentemente. Entretanto, poucos trabalhos são dedicados à discutir as transferências metálicas por modos mistos, principalmente o modo misto globular/curto-circuito. Esse modo de transferência misto é frequentemente utilizado para soldagem de peças que requerem baixo aporte térmico, como placas finas e metais doces, além de ser frequentemente utilizado para acabamento da solda. Portanto, neste trabalho, é realizada uma revisão bibliográfica e proposta a utilização de modelos matemáticos que representam a transferência metálica por modo globular e a transferência metálica por curto-circuito, para representar o processo de transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito. O primeiro modelo corresponde as dinâmicas envolvidas no período de arco aberto, onde ocorre a formação das gotas em modo globular e o segundo modelo representa as dinâmicas do período de curto-circuito, onde uma ponte com material fundido é formada entre o eletrodo e a poça de fusão. Também são empregados critérios de comutação entre os modelos, para permitir a simulação do destacamento de material em qualquer um dos modos de transferência metálica. Além disso, será mostrada a identificação dos parâmetros e simulações dos processos de transferência metálica. Resultados experimentais são apresentados e comparados com as simulações para validação das dinâmicas de saída dos modelos.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Identificação de parâmetros, Validação de modelos matemáticos, MIG/MAG.

ABSTRACT

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira. **Modelling of MIG/MAG Process with Metallic Transfer by Globular/Short Circuit Miscellaneous Mode**. 2017. 200p. Thesis (Master Degree), Graduate Program in Computer Engineering. Federal University of Rio Grande, Rio Grande.

The demand for increase of productivity and quality of weld is a constant motivation for development of welding process more reliable, robust and automated. However, welding processes are very dynamic and they have high complexity level, which entails in much variability of process behavior itself, due to the non-linearities, uncertainties and strong coupling of their parameters. Thereby, an alternative to obtain a better quality of weld without a professional welder being required constantly during the process, is the implementation of control techniques that manipulate the process parameters of interest. However, in order to implement some control techniques in a proper way, it is essential the development of mathematical models that represent the physical process as closest as possible to the reality. In the literature are found models of various dynamics inherent to the metallic transfers in the MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) process, by globular, short-circuit and goticular/spray modes, independently. However, there are little works dedicated to discuss the miscellaneous transfer modes, mainly the globular/short-circuit transfer mode. This miscellaneous transfer mode is often utilised for welding of pieces that require less heat input, such as thin plates and sweet metals, besides that it is frequently utilised for weld finishing. Therefore, in this work, it is realised a literature review and proposed the use of mathematical models that represent globular metallic transfer and short circuit transfer mode, to represent the metallic transfer by globular/short circuit miscellaneous mode. The first model represents the dynamics that are involved in open arc period, where the droplet formation occurs in globular mode and the second model represents the dynamics of short-circuit period, where a bridge of melting material is formed between electrode and fusion pool. Also, switching criteria are employed between both models, which allow to simulate the material detachment in any metallic transfer mode. Furthermore, it will be shown the parameters identification and metallic transfer processes simulations. Experimental results are presented and compared with simulations to validate output dynamics of models.

Keywords: Mathematical modelling, Parameters identification, Mathematical model validation, MIG/MAG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modos de transferência metálica em processos de soldagem à arco segundo [1].	11
Figura 2	Regiões de ocorrência dos modos de transferência metálica em processos MIG/MAG: globular, goticular, curto-circuito e modos mistos.	12
Figura 3	Geometria do cordão de solda formado, onde l , r e p são largura do cordão de solda, reforço da solda e penetração da solda, respectivamente.	21
Figura 4	Relação de acoplamento dos parâmetros nos processos MIG/MAG, sendo a influência de cada parâmetro sobre os demais mostrada através de setas direcionadas com uma cor definida para cada parâmetro.	23
Figura 5	Diagrama da formação da gota na ponta do eletrodo.	29
Figura 6	Relação entre ângulo de soldagem Θ e aceleração da gravidade g	31
Figura 7	Sentido da força eletromagnética influenciado pelo ângulo de condução.	33
Figura 8	Influência da corrente na força eletromagnética.	33
Figura 9	Influência do ângulo de condução no parâmetro f_z	34
Figura 10	Relação das forças que atuam na formação da gota.	37
Figura 11	Diagrama de corpo livre do pingente aproximado a um sistema mola-amortecedor.	38
Figura 12	Circuito elétrico equivalente à fase de arco.	39
Figura 13	Evolução da transferência metálica por curto-circuito, enfatizando os períodos de arco e curto-circuito.	47
Figura 14	Diagrama da fase de curto-circuito.	48
Figura 15	Circuito equivalente da fase de curto-circuito.	48
Figura 16	Raios dominantes da transferência metálica por curto-circuito.	49
Figura 17	Velocidades associadas à transferência metálica durante um curto-circuito.	51
Figura 18	Forças atuantes na transferência metálica durante um curto-circuito.	52
Figura 19	Diagrama de comutação entre os modelos matemáticos sujeitos aos critérios DBFM (para transferência metálica em modo globular) e PIT (para transferência metálica durante um curto-circuito) para representação da transferência metálica em modo misto globular/curto-circuito em processos MIG/MAG.	58
Figura 20	Relação dos parâmetros de entrada (à esquerda), dinâmicas internas (dentro do bloco) e saída (à direita) do modelo (representado pelo bloco) e as condições requeridas para comutação entre modelos, critérios de destacamento de massa e condição de <i>reset</i> das variáveis (acima) após cada destacamento de massa.	59

Figura 21	Fonte de energia Flextec 450.	61
Figura 22	Alimentador de arames LF-33.	61
Figura 23	Transdutor de corrente HTR 500-SB.	62
Figura 24	Pinos do transdutor de corrente HTR 500-SB.	63
Figura 25	Disposição do transdutor de corrente no sistema de aquisição.	63
Figura 26	Transdutor de tensão DVL 250.	64
Figura 27	Conexões do transdutor de tensão DVL 250.	65
Figura 28	Disposição do transdutor de tensão no sistema de aquisição.	65
Figura 29	Diagrama do transformador com ponte retificadora.	66
Figura 30	Diagrama do regulador de tensão 7812.	66
Figura 31	Diagrama do regulador de tensão 7912.	67
Figura 32	<i>Layout</i> do circuito da fonte simétrica.	68
Figura 33	<i>Layout</i> 3D do circuito da fonte simétrica.	68
Figura 34	Fonte simétrica de alimentação construída.	69
Figura 35	<i>Encoder</i> utilizado no sensor de velocidade.	70
Figura 36	Sensor de velocidade acoplado no alimentador de arame.	70
Figura 37	Microcontrolador Arduino DUE.	71
Figura 38	Tensão aqusitada com transferência metálica por curto-circuito.	74
Figura 39	Corrente aqusitada com transferência metálica por curto-circuito.	75
Figura 40	Suposições das posições iniciais da formação do arco elétrico.	78
Figura 41	Suposição do volume máximo da gota.	79
Figura 42	Identificação dos momentos imediatamente antes dos curtos-circuitos e no início dos curtos-circuitos.	80
Figura 43	Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por modo globular.	87
Figura 44	Simulação do processo de soldagem com transferência em modo globular.	88
Figura 45	Inserção de incertezas no modelo matemático para simulação da transferência metálica por modo globular.	89
Figura 46	Simulação do processo de soldagem com transferência em modo globular considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.	90
Figura 47	Validação do modelo da transferência metálica globular: (a) experimental e (b) simulação.	90
Figura 48	Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por curto-circuito.	92
Figura 49	Simulação do processo de soldagem com transferência por curto-circuito.	93
Figura 50	Validação do modelo da transferência metálica por curto-circuito: (a) experimental e (b) simulação.	94
Figura 51	Oscilograma experimental de um único curto-circuito, para melhor visualização das fases de arco e curto.	95
Figura 52	Simulação de um único curto-circuito, para melhor visualização das fases de arco e curto.	96
Figura 53	Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.	97

Figura 54	Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito em um período de tempo menor.	98
Figura 55	Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.	100
Figura 56	Oscilograma experimental do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo de forma predominante globular.	101
Figura 57	Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo de forma predominante globular, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.	101
Figura 58	Oscilograma experimental do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo curto-circuito sobre curto-circuito.	102
Figura 59	Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo curto-circuito sobre curto-circuito, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.	103
Figura 60	Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo curto-circuito sobre curto-circuito sem a queda de tensão na tensão do arco durante os curtos-circuitos de pico de corrente inferiores, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.	103
Figura 61	Validação do modelo da transferência metálica por modo mista globular/curto-circuito: (a) experimental e (b) simulação.	104
Figura 62	Esquema das ligações entre equipamentos para realização do experimento de calibração do transdutor de corrente LEM HTR-500 SB, onde M é o pino de saída do transdutor, A3 é uma porta analógica do <i>Arduino</i> e GND é o referencial do terra.	133
Figura 63	Curva de calibração do transdutor de corrente.	134
Figura 64	Esquema das ligações entre equipamentos para realização do experimento de calibração do transdutor de tensão LEM DVL 250, onde M é o pino de saída do transdutor, A0 é uma porta analógica do <i>Arduino</i> , GND é o referencial do terra, HV indica as ligações de entrada do transdutor de tensão e V_1 e V_2 indicam as fontes de alimentação.	136
Figura 65	Curva de calibração do transdutor de tensão LEM DVL 250.	137
Figura 66	Comparação dos valores de tensão aqisitada pelo sistema de aquisição montado e sistema de aquisição comercial.	139
Figura 67	Comparação dos valores de corrente aqisitada pelo sistema de aquisição montado e sistema de aquisição comercial.	139

Figura 68	Aproximação de 2 centésimos de segundo da curva de comparação dos valores de tensão aqisitada pelos dois sistemas de aquisição. . .	140
Figura 69	Aproximação de 2 centésimos de segundo da curva de comparação dos valores de corrente aqisitada pelos dois sistemas de aquisição. .	140
Figura 70	Erro de medida de corrente mensurada pelo sistema de aquisição montado em comparação a corrente aqisitada pelos sistemas de aquisição comercial.	141
Figura 71	Erro de medida de tensão mensurada pelo sistema de aquisição montado em comparação a tensão aqisitada pelos sistemas de aquisição comercial.	141
Figura 72	Aproximação de 2 centésimos de segundo do erro de medida de corrente mensurada com sistema montado em comparação a corrente aqisitada pelos sistemas de aquisição comercial.	142
Figura 73	Aproximação de 2 centésimos de segundo do erro de medida de tensão mensurada com sistema montado em comparação a tensão aqisitada pelos sistemas de aquisição comercial.	142
Figura 74	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo goticular: (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco. . . .	144
Figura 75	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo goticular: (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco. . . .	144
Figura 76	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: sem variação paramétrica. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	147
Figura 77	Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por voo livre: sem variação paramétrica. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.	148
Figura 78	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	150
Figura 79	Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por voo livre: com variação na tensão da fonte. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.	150
Figura 80	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na velocidade de alimentação do arame. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	151
Figura 81	Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por voo livre: com variação na velocidade de alimentação do arame. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.	152

Figura 82	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na distância entre bico de contato e peça. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	153
Figura 83	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na resistência do arco. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	154
Figura 84	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na campo magnético. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	155
Figura 85	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na indutância da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	155
Figura 86	Análise da influência das forças na transferência por voo livre: desconsiderando influência da força aerodinâmica e força proveniente do momento. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	157
Figura 87	Análise da influência das forças na transferência por voo livre: desconsiderando influência da força da gravidade e força eletromagnética. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	157
Figura 88	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem variação paramétrica. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	158
Figura 89	Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por curto-circuito: sem variação paramétrica. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.	159
Figura 90	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	160
Figura 91	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	161
Figura 92	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	162
Figura 93	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na resistência do arco. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	163

Figura 94	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação no campo elétrico. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	164
Figura 95	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na indutância da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	165
Figura 96	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem as contribuições da força eletromagnética, força aerodinâmica e força proveniente do momento. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	165
Figura 97	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem as contribuições da força da gravidade e tensão superficial. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	166
Figura 98	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem variação paramétrica. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	167
Figura 99	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	168
Figura 100	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na velocidade de alimentação de arame. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	169
Figura 101	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na distância bico de contato e peça. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	170
Figura 102	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação no resistência do arco. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	171
Figura 103	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação no campo magnético. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	171
Figura 104	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na indutância da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	172

Figura 105	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo misto globular/curto-circuito: sem as contribuições da força eletromagnética, força aerodinâmica e força proveniente do momento. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	173
Figura 106	Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo misto globular/curto-circuito: sem as contribuições da força da gravidade e tensão superficial. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do <i>stick-out</i> , (d) Comprimento do arco.	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros identificados do sistema completo.	85
Tabela 2	Equipamentos utilizados no experimento de calibração dos transdutores de corrente LEM HTR 500-SB.	132
Tabela 3	Equipamentos utilizados no ensaio de calibração do transdutor de tensão LEM DVL 250.	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito integrado
DFBM	<i>Dynamic Force Balance Model</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
EGW	<i>Eletro–Gas Paw</i>
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GND	<i>Ground</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PIT	<i>Pinch Instability Theory</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SFBM	<i>Static Force Balance Model</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e	Seção transversal do eletrodo	[m]
B	Fluxo do campo magnético	[A/m]
B_D	Constante de amortecimento	[N.s/m]
$\vec{B}$	Fluxo do campo magnético	[A/m]
C_A	Coefficiente de resistência aerodinâmica	—
C_1	Constante associada ao aquecimento da poça de fusão pelo arco elétrico	[m ³ /As]
C_2	Constante associada ao aquecimento da poça de fusão pelo efeito <i>Joule</i>	[m ³ /VAs]
C_3	Constante associada a velocidade de fusão ao aquecimento da poça de fusão pelo arco elétrico	[m/(As)]
C_4	Constante associada a velocidade de fusão ao aquecimento da poça de fusão pelo efeito <i>Joule</i>	[1/(A ² s)]
E_A	Fator de comprimento do arco	[V/m]
F_A	Força aerodinâmica	[N]
F_{EM}	Força eletromagnética	[N]
F_G	Força gravitacional	[N]
F_M	Força exercida sobre a poça de fusão	[N]
F_m	Força oriunda do momento	[N]
F_V	Força dos jatos de vapor	[N]
f_z	Término variável da força eletromagnética	[N]
F_γ	Força de tensão superficial	[N]
f	Função de correção empírica do destacamento da gotas	—
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Aporte térmico	[J/m]
h	Fração parcial do R_D determinado por θ	[m]
I	Corrente de soldagem	[A]
I'	Incerteza da corrente de soldagem	[A]
I_{CC}	Corrente média do curto-circuito	[A]
l	Comprimento do cordão de solda	[m]
J	Densidade de corrente	[A/m ²]
K_D	Constante de flexibilidade (mola)	[N/m]
K_m	Ganho em regime permanente do motor	[m/Vs]
L_A	Comprimento do arco	[m]
L_{CTW}	Distância entre o bico de contato e o metal base	[m]
L_D	Deslocamento da gota na ponta do eletrodo	[m]

L_E	Comprimento do eletrodo em estado sólido	[m]
L_S	Indutância dos circuitos do sistema de soldagem	[H]
L_{SO}	Comprimento do <i>stick-out</i>	[m]
M	Inclinação da curva caracterísitca dinâmica da fonte	[V/A]
m_d	Massa da gota	[kg]
m_v	Massa vaporizada	[kg]
M_R	Taxa de fusão do arame	[kg/s]
p	Penetração da solda	[m]
P_D	Pressão média no centro da gota	[N/m ²]
P_S	Potência entregue pela fonte de energia	[W]
r	Reforço do cordão de solda	[m]
R	Resistência equivalente do conjunto na fase de curto-circuito	[Ω]
R_A	Resistência do arco	[Ω]
R_b	Raio da ponte (formato cônico)	[m]
R_D	Raio da gota	[m]
R_E	Raio do eletrodo	[m]
R_M	Taxa de deposição metálica	[kg/m]
R_S	Resistência dos condutores elétricos	[Ω]
R_{SO}	Resistência do comprimento de <i>stick-out</i>	[Ω]
R_1	Raio menor da massa transferida	[m]
R_2	Raio maior da massa transferida	[m]
t	Unidade de medida temporal	[s]
U_A	Tensão do arco	[V]
U'_A	Incerteza da tensão do arco	[V]
U_{CTW}	Tensão entre o bico de contato e a peça	[V]
U_{ARM}	Tensão de armadura do motor	[V]
U'_{ARM}	Incerteza da tensão de armadura do motor	[V]
U_{CC}	Tensão média do curto-circuito	[V]
U_S	Tensão de soldagem	[V]
U'_S	Incerteza da tensão de soldagem	[V]
U_{SO}	Tensão do <i>stick-out</i>	[V]
U_0	Constante de tensão do arco	[V]
U_1	Tensão do arco imediatamente antes do curto-circuito	[V]
U_2	Tensão no início do curto-circuito	[V]
V	Velocidade de alimentação do arame	[m/s]
V_F	Velocidade do fluxo entre a gota e a poça de fusão	[m/s]
V_d	Volume da gota	[m ³]
V_D	Velocidade de deslocamento da gota	[m/s]
V_G	Velocidade do gás	[m/s]
V_m	Velocidade de transferência de massa	[m/s]
V_M	Velocidade de fusão do eletrodo	[m/s]
V_R	Velocidade de viagem da tocha	[m/s]
V_0	Tensão a vazio	[V]

x_1	Deslocamento da gota	$[m]$
x_2	Velocidade da gota	$[m/s]$
x_3	Corrente de soldagem	$[A]$
x_4	Comprimento do eletrodo em estado sólido	$[m]$
x_5	Massa da gota	$[kg]$
x_6	Velocidade de alimentação do arame	$[m/s^2]$
γ	Módulo de tensão superficial	$[N/m]$
η	Eficiência da transferência de calor	$[\%]$
θ	Ângulo de condução de corrente no eletrodo	$[^\circ]$
Θ	Ângulo entre o eixo do arco e a vertical	$[^\circ]$
κ_e	Condutividade do eletrodo	$[1/(\Omega m)]$
μ_0	Constante de permeabilidade magnética do material	$[N A^2]$
ρ_e	Resistividade do eletrodo	$[\Omega m]$
σ_e	Densidade do eletrodo	$[kg/m^3]$
σ_g	Densidade do gás	$[kg/m^3]$
σ_v	Densidade do vapor	$[kg/m^3]$
φ	Ângulo da posição de soldagem	$[^\circ]$
τ_m	Constante de tempo mecânica do motor	$[s]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Motivação	4
1.2	Objetivos Específicos	6
1.3	Organização do Trabalho	6
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	Modos de Transferência Metálica	9
2.2	Revisão Bibliográfica	15
2.2.1	Modelagem Matemática do Processo MIG/MAG	15
2.2.2	Acoplamento dos Parâmetros nos Processos MIG/MAG	20
2.2.3	Trabalhos sobre Transferência Metálica Mista Globular/Curto-Circuito	25
3	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/- MAG	27
3.1	Modelagem da Transferência Metálica por Voo Livre	28
3.1.1	Forças Envolvidas na Transferência Metálica por Voo Livre	30
3.1.1.1	Força Gravitacional	30
3.1.1.2	Força Eletromagnética	31
3.1.1.3	Força oriunda do Momento	34
3.1.1.4	Força Aerodinâmica	35
3.1.1.5	Força dos Jatos de Vapor	35
3.1.1.6	Tensão Superficial	35
3.1.1.7	Força Resultante	36
3.1.2	Dinâmica do Deslocamento da Gota	37
3.1.3	Circuito Elétrico Equivalente da Fase de Arco	38
3.1.4	Tensão do arco	40
3.1.5	Comportamento do Eletrodo Sólido no Bico de Contato	41
3.1.6	Taxa de Fusão do Eletrodo	41
3.1.7	Dinâmica do Motor do Alimentador de Arame	44
3.1.8	Modelo da Transferência por Voo Livre	44
3.2	Modelagem da Transferência Metálica por Curto-Circuito	46
3.2.1	Circuito Elétrico Equivalente da Fase de Curto	48
3.2.2	Velocidade de Transferência de Massa na Fase de Curto-Circuito	49
3.2.3	Forças envolvidas na Fase de Curto-Circuito	51
3.2.4	Modelo da Fase de Curto-Circuito	53
3.3	Discretização dos Modelos Matemáticos	53
3.4	Crítérios de Destacamento da Gota	53

3.4.1	SFBM – <i>Static Force Balance Model</i>	54
3.4.2	DFBM – <i>Dynamic Force Balance Model</i>	54
3.4.3	PIT – <i>Pinch Instability Theory</i>	55
3.5	Condições de <i>Reset</i>	55
3.6	Modelo da Transferência Metálica por Modo Misto Globular/Curto-Circuito	57
4	EQUIPAMENTOS E SENSORES	60
4.1	Equipamentos de Soldagem	60
4.1.1	Fonte de Energia <i>Flextec 450</i>	60
4.1.2	Alimentador de Arames LF-33	60
4.1.3	Robô de Soldagem BUG-O	62
4.2	Sistema de Aquisição	62
4.2.1	Transdutor de Corrente LEM HTR 500-SB	62
4.2.2	Transdutor de Tensão LEM DVL 250	64
4.3	Fonte Simétrica de Alimentação	65
4.4	Sensor de Velocidade do Arame	69
4.5	Microcontrolador <i>Arduino Due</i>	71
5	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS	72
5.1	Parâmetros do Eletrodo	72
5.2	Parâmetros do Gás de Proteção	75
5.3	Parâmetros da Fonte de Energia e Cabos	75
5.4	Parâmetros do Arco Elétrico	77
5.5	Parâmetros Relativos a Fusão do Eletrodo	81
5.6	Parâmetros do Motor do Alimentador de Arame	83
6	VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS	84
6.1	Validação do Modelo da Transferência Metálica por Voo Livre	86
6.2	Validação do Modelo da Transferência Metálica por Curto-Circuito	91
6.3	Validação do Modelo da Transferência por Modo Misto Globular/Curto-Circuito	96
7	CONCLUSÃO	105
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICE A BREVE HISTÓRICO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO	127
	APÊNDICE B CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR LEM HTR-500 SB	132
	APÊNDICE C CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR LEM DVL 250	135
	APÊNDICE D AFERIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO MONTADO	138
	APÊNDICE E SIMULAÇÃO DO MODO GOTICULAR	143

APÊNDICE F ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA	146
7.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular	146
7.1.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular Frente à Variações nas Condições de Soldagem	149
7.1.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular Frente à Variações Paramétricas	153
7.1.3 Análise da Influência das Forças nas Dinâmicas da Transferência Metálica por Modo Globular	156
7.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Curto-Circuito	157
7.2.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Curto-Circuito Frente à Variações nas Condições de Soldagem	160
7.2.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Curto-Circuito Frente à Variações Paramétrica	162
7.2.3 Análise da Influência das Forças nas Dinâmicas da Transferência Metálica por Curto-Circuito	164
7.3 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular/Curto-Circuito	166
7.3.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular/Curto-Circuito Frente à Variações nas Condições de Soldagem	168
7.3.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular/Curto-Circuito Frente à Variações Paramétrica	170
7.3.3 Análise da Influência das Forças nas Dinâmicas da Transferência Metálica por Modo Misto Globular/Curto-Circuito	172
APÊNDICE G PRODUÇÃO ACADÊMICA	175
ANEXO A TERMINOLOGIA DA SOLDAGEM	183
ANEXO B INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE OS EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM	186
B.1 Equipamento de Soldagem	186
B.1.1 Fonte de Energia <i>Flextec</i> 450	186
B.1.2 Alimentador de Arames LF-33	188
B.2 Robô BUG-O MDS	191
B.2.1 Unidade de Acionamento Mestre MPD-1002	191
B.2.2 Módulo de Controle MDS-1005	193
B.2.3 Módulo de Controle Linear WPD-1100	194
ANEXO C LINKS PARA OS DATASHEETS DOS HARDWARES	195
ANEXO D IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DO ALIMENTADOR DE ARAMES	198

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem, embora complexo [1], está presente em várias áreas da indústria, desde simples procedimentos de união de estruturas metálicas até processos de alta complexidade como soldagem para equipamentos aeronáuticos e aeroespaciais [2]. Além disso, na maioria dos casos, os processos de soldagem podem ser considerados como uma parcela significativa dos custos de fabricação de um produto. Assim, a soldagem é um alvo de constante melhoria [3].

Como toda área da pesquisa e indústria, o ramo da soldagem tem sido aprimorada cada vez mais, graças ao desenvolvimento da eletrônica e da informática [4]. Esses avanços permitiram a regulação da tensão do arco elétrico, corrente de soldagem e outras dinâmicas inerentes ao processo de soldagem através de técnicas de controle modernas, tais como: robustas, adaptativas e inteligentes. Nesse viés, estratégias de controle mais sofisticadas têm sido aplicadas nos processos de soldagem, permitindo um ajuste paramétrico mais adequado, resultando em soldas de melhor qualidade, com boa aparência e penetração satisfatória. Para tal, modelos matemáticos têm sido desenvolvidos paralelamente ao longo de décadas, pois devido à natureza desses processos, que é altamente sensível à variações paramétricas, torna-se necessário uma análise do processo controlado por simulações previamente aos experimentos práticos, para evitar perda de material e estresse desnecessário ao *hardware*.

Atualmente é possível encontrar diversas modelos matemáticos na literatura. Alguns modelos englobam várias características do processo de soldagem, tais como: dinâmicas da fonte de energia, dinâmicas do arco elétrico, propagação de calor, formação e destacamento de gotas de solda, entre outros. Quanto mais dinâmicas são consideradas no modelo, maior a proximidade desse modelo com o comportamento dinâmico real do processo de transferência metálica. Entretanto, processos de soldagem possuem dinâmicas altamente acopladas e complexas.

Nos últimos anos, os processos de soldagem à arco têm sido amplamente empregados na união de metais em processos industriais, sendo o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), popularmente denominado MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), o mais utilizado [5–7]. Isto se dá ao fato das operações MIG/MAG poderem ser aplicadas na união de todos os metais comerciais e suas ligas [8–10]. Além disso, os processos MIG/MAG possuem diversas vantagens em relação aos demais processos de soldagem à arco, tais como: alta taxa de deposição de material, elevada penetração, ausência de escória pesada, possibilidade de soldagem em qualquer posição e de ser realizado com velocidades relativamente altas [11–13].

As pesquisas desenvolvidas na área da soldagem são diversas, partindo da modelagem matemática dos processos de soldagem propriamente ditos, controle dos parâmetros de soldagem e dos robôs soldadores para aumentar taxa de produção e assegurar a qualidade da solda até a automação total desses processos. Os trabalhos de automação completa do processo de soldagem, principalmente à arco protegido, tem a finalidade de afastar o soldador do ambiente de soldagem, pois esse ambiente é considerado altamente agressivo à saúde [4]. Algumas das razões que torna esse ambiente maléfico à saúde são: a radiação emitida pelo arco elétrico e a liberação de fumos tóxicos durante a soldagem. Esses fatores podem causar sequelas irreversíveis como cegueira e mau de *Parkinson* em casos de exposição por longos períodos [4]. Além disso, as operações do processo são fatigantes, tais como: regulamento dos parâmetros de soldagem, ajuste de distância entre tocha e peça, posicionamento do chanfro, guiar a tocha ao longo do chanfro durante a soldagem, supervisionar a qualidade do cordão de solda e atuar na correção do mesmo, dentre outras operações repetitivas que causam fadiga ao operador e consequentemente reduz a sua produtividade, reduzindo a qualidade da solda [4]. Alguns trabalhos que tem como objetivo a automação da soldagem são [14–18].

Para obter uma automação completa desses processos é necessário que controladores eficientes sejam implementados, para atuar na correção da transferência metálica como um operador experiente atuaria. Dada a complexidade do processo, é importante avaliar o desempenho desses controladores por simulações previamente sua aplicação experimental. Para tal, é essencial um modelo matemático o mais próximo possível do processo físico. Em processos de soldagem MIG/MAG há três modos de transferência metálica fundamentais: globular, curto-circuito e goticular (comumente chamada de *spray* ou aerossol). Existe ainda, os modos de transferência metálica mistos, ou seja, que ocorrem em zonas de transição entre os modos fundamentais. Esses modos de transferência metálica são ainda mais complexos, dada as incertezas inerentes à transição entre os modos de transferência metálica e sua faixa sensível de ajustes paramétricos. Os modos mistos são: globular/goticular, curto-circuito/goticular, globular/curto-circuito

e globular/goticular/curto-circuito e serão melhor descritos na seção 2.2. Esses modos apresentam menos aplicabilidade prática, entretanto para casos específicos são essenciais.

Dito isso, esse trabalho têm como proposta principal a modelagem do processo de soldagem MIG/MAG com transferência de massa em modo misto globular/curto-circuito. A modelagem matemática das dinâmicas do processo de transferência de massa nesse modo é complexa, pois esse modo de transferência de massa se encontra na transição de dois modos de transferência bem distintos, que é o modo por curto-circuito e o modo globular. Assim, as dinâmicas da transferência metálica são carregadas de incertezas, devido à imprevisibilidade da troca do modo de transferência de massa. Isso também torna o processo sensível à variações, complexo e susceptível a distúrbios, os quais podem afetar a estabilidade da transferência metálica. Devido à essa razão, há poucos trabalhos na literatura que abordam esse modo de transferência misto.

Como foi encontrada uma quantidade muito reduzida de trabalhos de modelagem e controle para esse modo misto, houve certa dificuldade para compreender como a transferência metálica ocorre nesse modo. Então, para propor o modelo matemático que o representasse adequadamente foi estudado extensivamente as transferências metálicas por modo globular e curto-circuito separadamente e, então, proposta interações entre as dinâmicas de ambos os modelos.

1.1 Motivação

No Brasil, com a expansão dos processos MIG/MAG na indústria, tem surgido uma tendência pela substituição do passe de raiz, antes executado por processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) por processos MIG/MAG e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), devido à alta produtividade desses processos [19]. Para os processos MIG/MAG existem três modos básicos de transferência metálica: curto-circuito, globular e goticular, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Entretanto, em todos os modos de transferência metálica, muitos fatores alteram o comportamento do processo e consequentemente a qualidade da solda. Um dos principais fatores que influencia no modo de transferência metálica é o gás de proteção. O gás que mais causa instabilidade ao arco elétrico e perdas de elementos de liga por oxidação é o Dióxido de Carbono (CO_2) puro, entretanto esse é o gás comercial mais barato [20]. A instabilidade do arco elétrico é uma das causas da produção de respingos excessivos durante a soldagem [21, 22].

No caso da utilização de gás de proteção com teor superior à 10% de CO_2 , a transferência globular pode ser repulsiva, consequentemente gerando grande volume

de respingos [23]. Em contrapartida, o CO_2 é o gás mais utilizado para soldagem de aços doces, em função da possibilidade de gerar um arco elétrico curto [24], podendo produzir excelente penetração. Aços doces ou de baixo carbono geralmente possuem teores de Carbono de até 0,25%, com 0,4 à 0,7% de Manganês e 0,1 à 0,5% de Silício, podendo conter teores residuais de Enxofre, Fósforo e outros elementos. Esse tipo de aço geralmente é utilizado no estado laminado, forjado ou cozido, sendo muito pouco usado no estado temperado e revenido. A maior categoria de aços doces é com baixo teor de Carbono, até 0,08% e com teor de até 0,4% de Manganês, usada para coberturas e revestimentos de peças e estruturas. Os demais aços doces, cujo teor de Carbono é superior à 0,08% com maiores teores de Carbono e Manganês são usados para produtos estruturais como placas, chapas, barras e peças estruturais [25]. Para soldagem de metais doces é requerido um baixo aporte térmico, o que pode ser obtido com a transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito, pois este modo combina características de dois dos modos de transferência metálica fundamentais.

Em relação às vantagens de cada modo de transferência pode-se citar para a transferência por curto-circuito: a possibilidade de realizar a soldagem em todas as posições [26], resfriamento rápido da poça de fusão e aplicabilidade em chapas finas [27]. Já para a transferência metálica por modo globular, as vantagens são: a velocidade de soldagem mais elevada e a possibilidade de utilizar CO_2 puro como gás de proteção, o que conseqüentemente torna o processo mais barato. Em contrapartida, as principais desvantagens desses modos são para a transferência por curto-circuito: a sensibilidade da estabilidade do arco elétrico, baixa produtividade [28], ocorrência de falta de fusão [29] e os respingos excessivos. Já as desvantagens da transferência globular são: a possibilidade de falta de fusão, penetração insuficiente ou reforço excessivo do cordão de solda [12], além da ocorrência de explosão da gota em baixas tensões e altas temperaturas [6, 30, 31]. Assim, o modo misto globular/curto-circuito opera com baixo aporte térmico e alta velocidade de soldagem, entretanto também opera com estabilidade do arco relativamente baixa e sujeito à diversas incertezas por se situar em uma região de transição de dois modos de transferência metálica muito distintos.

Dito isso, neste trabalho é proposta a modelagem matemática do processo de soldagem MIG/MAG por modo de transferência misto globular/curto-circuito, visto que esse modo de transferência é comumente utilizado para soldar metais doces, chapas finas e realizar acabamentos em posição plana. Como esse modo apresenta uma faixa de ajuste dos parâmetros operacionais muito sensível, a obtenção de um modelo matemático que represente essa transferência de forma adequada pode ajudar a identificar as limitações desse modo de transferência e facilita o entendimento dos fenômenos que ocorrem nesse modo de transferência metálica.

1.2 Objetivos Específicos

O objetivo principal desse trabalho é a utilização de modelos matemáticos que representam as dinâmicas inerentes ao processo de transferência metálica por modo globular e curto-circuito, independentemente, para representação do processo de transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito. Para tal, os objetivos específicos são listados a seguir:

- Apresentar uma revisão bibliográfica dos trabalhos que abordam a modelagem matemática das dinâmicas do processo de soldagem a arco;
- Relacionar as influências exercidas pelos parâmetros acoplados do processo MIG/MAG;
- Modelagem matemática das dinâmicas inerentes à transferência metálica por modo globular;
- Modelagem matemática das dinâmicas inerentes à transferência metálica por curto-circuito;
- Modelagem matemática das máquinas e consumíveis envolvidas no processo (fonte de tensão, cabos, motor do alimentador de arame, suprimento de gás de proteção e alimentação de arame, etc);
- Relacionar os modelos matemáticos para representação da transferência de massa em modo misto globular/curto-circuito em processos MIG/MAG;
- Identificação dos parâmetros do processo de soldagem, dos equipamentos necessários e consumíveis considerados na modelagem matemática;
- Validação experimental dos modelos matemáticos desenvolvidos para representar as dinâmicas do processo MIG/MAG com transferência em modo misto globular/curto-circuito.

1.3 Organização do Trabalho

Esse trabalho foi dividido em 7 capítulos. No primeiro capítulo foram introduzidos a contextualização e motivação para o desenvolvimento desse trabalho, bem como exposto o objetivo global e objetivos específicos dessa dissertação.

No Capítulo 2 é realizada a fundamentação teórica à respeito dos modos de transferência metálica nos processos de soldagem MIG/MAG. Também são discutidos os

trabalhos relacionados abrangendo a modelagem matemática de fenômenos inerentes ao processo MIG/MAG com transferência metálica pelos modos globular, curto-circuito, etc. Bem como é realizada uma discussão à respeito das relações entre as dinâmicas acopladas desses processos e deduzido um diagrama dessas interrelações paramétricas baseado em trabalhos experimentais encontrados na literatura. Este diagrama, juntamente ao texto que o fundamenta, é uma contribuição significativa para o entendimento das dinâmicas do processo MIG/MAG, onde são evidenciadas as relações de acoplamento entre seus parâmetros. Por fim, são discutidos os trabalhos relacionados especificamente à transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.

No Capítulo 3 são mostradas as modelagens matemáticas referentes às dinâmicas envolvidas na transferência de massa, bem como considerações sobre simplificações, critérios de destacamento da massa metálica em ambos os modos de transferência metálica (globular e curto-circuito). Também são discutidas as condições de *reset*, necessárias para intercambiabilidade dos modelos matemáticos de cada modo de transferência metálica para representar o modo de transferência misto globular/curto-circuito em simulações.

No Capítulo 4 são mostrados os equipamentos e sensores utilizados nesse trabalho, bem como a disposição desses equipamentos para aquisição dos sinais para identificação e validação dos modelos matemáticos.

No Capítulo 5 são explicados detalhadamente os ensaios realizados para identificação de todos os parâmetros necessários para simulação das dinâmicas envolvidas nas transferências metálicas modeladas.

No Capítulo 6 são mostradas as simulações dos modelos em comparação com experimentos realizados para validação dos modelos matemáticos, utilizando os parâmetros do capítulo anterior.

No Capítulo 7 são feitas as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Ao fim do trabalho, após as referências bibliográficas, foram inseridos apêndices das calibrações realizadas nos transdutores de corrente e tensão, bem como um experimento para aferição da calibração do sistema de sensoriamento montado e um breve histórico da soldagem à arco. Além disso, também foi mostrada uma análise de sensibilidade paramétrica das transferências por modo globular, curto-circuito e globular/curto-circuito. Esta análise objetiva mostrar as relações dinâmicas fortemente acopladas, observando os efeitos nas saídas do modelo. Também, foi posto nos apêndices uma simulação referente à

transferência metálica por modo goticular e disponibilizada uma lista de trabalhos publicados referentes ao conteúdo dessa dissertação e indiretamente relacionados à este trabalho.

Além disso, foi disposto nos anexos uma terminologia básica da soldagem, para facilitar a compreensão de alguns termos técnicos usados no trabalho, bem como informações adicionais sobre os equipamentos de soldagem utilizados neste trabalho. Por fim, em anexo, foram dadas sugestões de *links* para acessar os manuais de todos os equipamentos utilizados nos experimentos realizados e os testes de identificação dos parâmetros do motor do alimentador de arame.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo é destinado a sintetizar algumas informações fundamentais para discussão e compreensão das dinâmicas da transferência metálica nos processos de soldagem à arco. Assim, na Seção 2.1, os modos de transferência metálica são detalhados e na Seção 2.2, é apresentada uma extensa revisão bibliográfica.

2.1 Modos de Transferência Metálica

O modo de transferência metálica é um dos fatores mais relevantes nos processos de soldagem com deposição de material, pois influencia diretamente na qualidade estética e estrutural da solda [27]. Além disso, o modo de transferência de massa também é um fator influente à estabilidade do processo, capacidade de soldagem fora da posição plana, formato do cordão de solda, quantidade de respingos e geração de fumos [20, 23, 32].

O modo de transferência de massa é influenciado por diversos fatores, tais como: diâmetro do eletrodo, comprimento do *stick-out*, corrente de soldagem e sua polaridade, comprimento do arco elétrico, composição do gás de proteção e as características da fonte [12, 33–35].

Existe uma nomenclatura definida pelo *International Institute of Welding* que classifica os modos de transferência em três grupos: transferência por voo livre, transferência por contato e transferência protegida por escória. A seguir é mostrada a classificação definida em [1]:

1. Transferência por voo livre

(a) Globular

i. Gota

ii. Repelida

- (b) Aerossol (Goticular)
 - i. Projetada
 - ii. Aerossol em fluxo
 - iii. Rotacional
 - (c) Explosiva
2. Transferência por contato
- (a) Curto-circuito
 - (b) Sem interrupção
3. Transferência protegida por escória
- (a) Fluxo guiado
 - (b) Outros modos

O processo MIG/MAG permite transferência por modo globular, goticular e curto-circuito. Já os processos SMAW, GTAW e SAW (*Submerged Arc Welding*) se limitam aos modos explosivo, sem interrupção e fluxo guiado, respectivamente.

Em geral, esses modos já foram mostrados em alguns trabalho na literatura que avaliam a dinâmica da transferência de massa, principalmente com uso de fotografias e câmeras em alta velocidade [36]. A Figura 1 ilustra de forma aproximada a transferência de massa segundo apresentado por Lancaster [1].

Em [37, 38] foram descritas formas mistas de transferência de massa em processos MIG/MAG, dentre elas: curto-circuito/goticular, curto-circuito/goticular com alongamento, globular/goticular e globular/curto-circuito/goticular. Os autores verificaram experimentalmente que estes modos mistos de transferência de massa apresentam maior dificuldade para controle do processo de soldagem, pois são obtidos em zonas de transição entre dois ou mais modos de transferência, o que torna difícil o ajuste dos parâmetros de soldagem para sua aplicação.

Além destes modos de transferência metálica mistos, há também os modo misto globular/curto-circuito, que é utilizado em aplicações de soldagem de placas de metal doce e para acabamentos. Esse modo é utilizado para aplicações de requerem baixo aporte térmico, entretanto não é tão popular quanto os demais por ter uma taxa de deposição de material baixa. Esse modo em específico é o objetivo de estudo deste trabalho. Uma revisão específica dos trabalhos dedicados à esse modo de transferência metálica é dada no

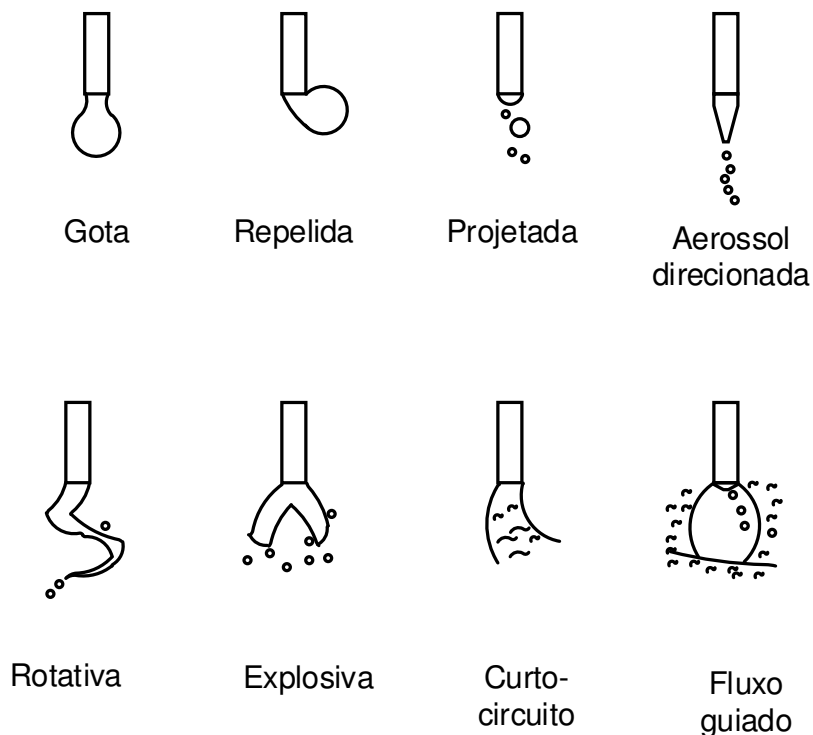


Figura 1: Modos de transferência metálica em processos de soldagem à arco segundo [1].

próximo capítulo, prévio a sua modelagem matemática.

Os modos de transferência de massa no processo MIG/MAG, operando em polaridade convencional, são obtidos pela variação da corrente de soldagem e tensão do arco, pois estas dinâmicas afetam diretamente o comprimento do *stick-out* [35, 39]. A relação entre corrente e tensão para obtenção dos modos de transferência é mostrada de forma aproximada na Figura 2.

Na Figura 2 são mostradas as relações entre corrente de soldagem e tensão do arco onde ocorrem os diferentes modos de transferência de massa no processo MIG/MAG, ressalta-se que essas regiões não são perfeitamente delineadas conforme as curvas mostradas, devido a dependência de diversas dinâmicas não lineares. Além disso, considerando que as curvas mostradas são aproximações das regiões de corrente e tensão para ocorrer esses fenômenos, ainda assim não é possível definir os intervalos de forma específica, pois diversos fatores influenciam na transferência metálica como a composição do eletrodo, que afeta diretamente a temperatura de fusão desse eletrodo e consequentemente a corrente de soldagem que o percorrerá.

A transferência de massa por modo globular ocorre com correntes amenas, mas com valores de tensão relativamente altos, fazendo com que o arco seja maior do que o

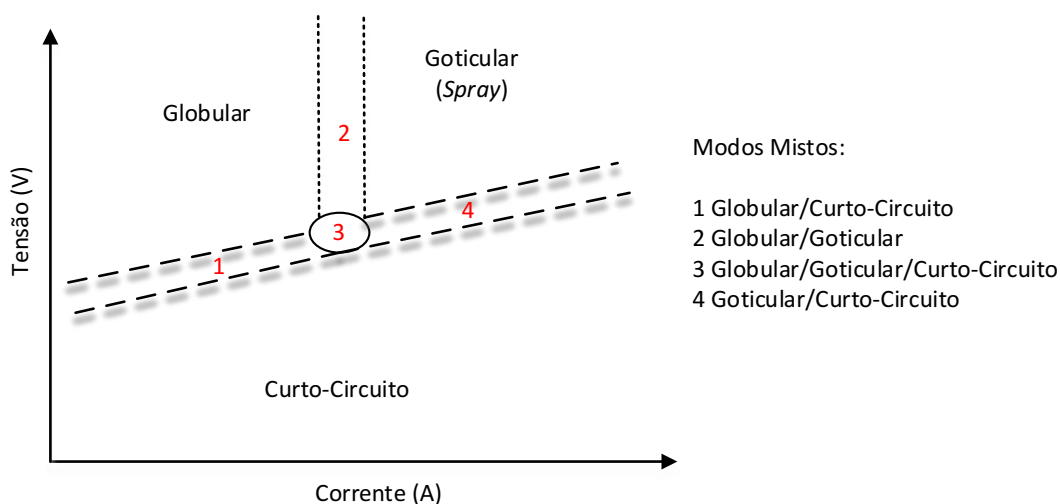


Figura 2: Regiões de ocorrência dos modos de transferência metálica em processos MIG/MAG: globular, goticula, curto-circuito e modos mistos.

arco produzido no modo de transferência de massa por curto-circuito [26, 27]. Nesse modo, a deposição é feita gota à gota, derretida na ponta do eletrodo e transferida para a poça de fusão principalmente devido à força gravitacional [12]. As gotas formadas na ponta do eletrodo possuem diâmetro superior ao diâmetro do eletrodo [22] e sua taxa de destacamento tem frequência de 1 à 100Hz [27]. A tensão superficial retém a gota na ponta do eletrodo até que essa gota tenha peso suficiente para ser destacada pela ação da força gravitacional.

Dentre as vantagens desse modo de transferência metálica pode-se citar a velocidade de soldagem, que pode ser elevada e a utilização de CO_2 como gás de proteção, o que torna o processo mais barato. A principal desvantagem desse modo de transferência é a sua limitação para soldagem em posição plana, pois depende da ação da gravidade para destacar a gota da ponta do eletrodo [6]. Os principais problemas desse modo de transferência ocorrem quando a tensão é muito baixa, fazendo o diâmetro da gota exceder o diâmetro do eletrodo excessivamente, consequentemente superaquecendo a gota até que a mesma exploda [6, 30, 31], e com isso causando muitos respingos. Ou ainda, se o arco for muito comprido pode ocorrer falta de fusão, penetração insuficiente e reforço excessivo do cordão de solda [12]. É recomendado que o gás de proteção seja quase todo inerte em sua composição para que ocorra esse modo de transferência. Em [40], foi mostrado que a utilização de gases de proteção com teor de CO_2 superior à 10% pode causar repulsão das gotas, quando isso ocorre alguns autores nomeiam esse modo de transferência globular repelida.

Já no modo goticula (aerossol ou *spray*), o diâmetro das gotas é reduzido, devido ao aumento da corrente elétrica que produz esse efeito [27, 41], ou seja, as gotas de solda são

finas e rapidamente transferidas à poça de fusão sob ação das forças eletromagnéticas inerentes ao arco elétrico. Recentemente, o termo aerossol tem sido substituído pelo termo goticular, pois foi observado que o fenômeno não se comporta exatamente como um aerossol, mas sim com deposição gota à gota, com pequenos diâmetros e em alta frequência.

O modo goticular ocorre em correntes mais elevadas que o modo globular. Existe uma zona de transição entre essas dois modos de transferência metálica, dados por uma faixa de corrente, denominada corrente de transição. Essa transição é diretamente proporcional à tensão superficial do eletrodo líquido e inversamente proporcional ao diâmetro desse eletrodo [42]. Para obter esse modo de transferência é necessário que o eletrodo seja o terminal positivo e a corrente seja direta acima da corrente de transição. Esse modo misto globular/goticular é tipicamente obtido quando utilizado gases de proteção compostos principalmente por Argônio [23].

As principais vantagens do modo goticular são: alta produtividade, baixa produção de respingos, produz soldas com boa aparência e é um processo estável [12]. Entretanto, devido às altas correntes requeridas para ocorrência dessa transferência metálica, a poça de fusão gerada é grande, o que torna esse modo inadequado à chapas muito finas, pois pode danificar as peças por excesso de penetração [43]. Além disso, é inadequado para soldagem fora da posição plana [12, 13, 27] e gera altos teores de fumos.

No modo de transferência metálica por curto-circuito, a gota que se forma na ponta do eletrodo toca a poça de fusão antes que a ação da força gravitacional e demais forças que contribuem para o destacamento da mesma desprendam a gota do eletrodo. No momento em que ocorre esse contato um curto-circuito é gerado, pois uma ponte é formada entre o eletrodo e a poça de fusão e o arco se extingue temporariamente. Assim, o metal é transferido para a poça de fusão pela ação da tensão superficial e das forças magnéticas envolvidas no fenômeno [23]. A transferência de massa por curto-circuito é caracterizada pelos seguintes passos [32, 44]:

1. O arco elétrico é formado entre o eletrodo e a poça de fusão;
2. O eletrodo é aquecido e a gota de metal é formada na ponta do eletrodo ainda sólido;
3. A gota cresce até que seu diâmetro seja maior que o diâmetro do eletrodo sólido;
4. Quando a gota cresce e toca na poça de fusão, uma ponte é formada entre o eletrodo e a poça de fusão e um curto-circuito ocorre, transferindo a massa;
5. Assim que o curto-circuito finaliza o arco elétrico é reestabelecido;
6. Outra gota começa a se formar dando início a um novo ciclo.

Esse modo de transferência ocorre em baixa tensão e correntes mais amenas em relação aos demais modos, geralmente entre 15 a 22V e 30 a 300A, respectivamente [45] e com frequência de transferência de 20 à 200Hz [46–48]. Durante o curto-circuito, a corrente é elevada de forma abrupta e a transferência pode ocorrer de forma explosiva, gerando muitos respingos. Geralmente é utilizado um eletrodo com os menores diâmetros, de 0,8mm a 1,2mm [44], o que implica em uma poça de fusão pequena, possibilitando seu resfriamento rápido, indicado para soldagem de chapas finas e fora da posição plana [5]. Em [29], foi mostrado que a maior estabilidade para o processo, em termos de regularidade de transferência metálica, com transferência por curto-circuito ocorre quando o desvio padrão dos curtos-circuitos é mínimo.

Esse modo de transferência de massa tem como vantagens: a possibilidade de realizar a soldagem em todas as posições [26], resfriamento rápido da poça de fusão e aplicabilidade em chapas finas [27]. Entretanto, os curtos-circuitos podem afetar a estabilidade do arco elétrico, além de gerar muitos respingos e ter uma produtividade baixa [28], bem como ocorrer falta de fusão [23].

Há também o modo por transferência pulsada. Este modo consiste em controlar a frequência dos curtos-circuitos, através de fontes especiais, obtendo assim o modo de transferência de massa por curto-circuito pulsado. Para obter esse curto-circuito pulsado é necessário que a fonte permita que se altere a corrente de forma que a corrente tenha um valor de base (corrente base) e outro valor de pico (corrente de pulso) para caracterizar a pulsação [27]. Existem fontes que permitem a configuração de uma única frequência de pulsação e fontes mais sofisticadas, chamadas de fontes sinérgicas, que combinam de forma automática a corrente de base e de pulso para qualquer valor regulado pelo ajuste da velocidade de alimentação do arame. Nesse modo a corrente é mantida em um valor alto, chamada de corrente de pulso ou base, por tempo suficiente para permitir a formação e o destacamento de uma gota [28]. Assim que a gota é destacada, a corrente é reduzida até um valor relativamente baixo ao valor de corrente anterior, mas ainda assim sendo suficiente para manter o arco aberto, essa corrente é chamada de corrente base [49, 50].

As principais vantagens desse modo de transferência são relacionados a redução do aporte térmico, nível de tensões residuais, energia, custo do gás de proteção, confiabilidade na soldagem de passe de raiz, possibilidade de soldagem fora da posição plana, redução ou ausência de respingos e boa geometria do cordão de solda [12, 51–54]. Como desvantagens pode-se citar a complexidade da operação e necessidade de equipamentos especiais, o que implica em um custo mais elevado para realizar a operação [13].

Mais detalhes a respeito dos modos de transferência metálica e outras classificações

podem ser encontrados em trabalhos dedicados à esse nicho de pesquisa, tais como: [55–64].

2.2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica dividida em três subseções. Inicialmente, na Subseção 2.2.1, são discutidos os trabalhos relacionados que trataram de forma parcial ou integralmente à respeito da modelagem matemática dos fenômenos que ocorrem nos processos de soldagem e análise do comportamento dinâmico dos mesmos.

Já na Subseção 2.2.2 são discutidas as relações de acoplamento paramétrico dos modelos das transferências metálicas em MIG/MAG, pois sabe-se que as dinâmicas se afetam mutuamente. Para fundamentar essas relações, foram utilizadas diversas relações comprovadas experimentalmente por diversos autores e apresentado um diagrama direcionado para ilustrar essas relações mais claramente. O entendimento dessas relações facilita a compreensão das dinâmicas inerentes as transferências metálicas.

Por fim, na Subseção 2.2.3, são discutidos os poucos trabalhos encontrados na literatura que discutem especificamente a transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito. Para facilitar a compreensão de termos técnicos de soldagem, foi disposto no Anexo A, uma lista de termos técnicos para sanar dúvidas de leitores de outras áreas.

2.2.1 Modelagem Matemática do Processo MIG/MAG

Esta subseção é dedicada à contemplar alguns trabalhos que abordam a modelagem matemática dos processos de soldagem à arco MIG/MAG. Serão discutidos desde trabalhos que modelaram fenômenos específicos a trabalhos que desenvolveram modelos matemáticos abrangentes, cuja modelagem descreve diversas dinâmicas acopladas do processo de transferência metálica e de calor.

Como foi anteriormente mencionado, serão utilizados modelos matemáticos que representam dinâmicas dos modos de transferência metálica por modos individuais para representar um dos modo de transferência metálica misto, globular/curto-circuito. Assim os trabalhos discutidos nessa seção abordam diversas dinâmicas relacionadas à transferência metálica por modo globular ou curto-circuito, individualmente. A compreensão desses trabalhos foi fundamental para relacionar as dinâmicas entre ambos os modos de transferência metálica e com isso representar o modo misto globular/curto-circuito, mesmo que nem todas as dinâmicas desses modelos tenham sido utilizadas no modelo matemático proposto.

A transferência de calor é o que permite a coalescência do eletrodo e formação da poça de fusão. O calor é gerado por dois fenômenos: o aquecimento pelo efeito *Joule* e o aquecimento pelo calor do arco elétrico. No trabalho de Modenesi e Reis [65] foram desenvolvidos modelos que representem esses fenômenos e mostraram como esses fenômenos afetam a velocidade de fusão do eletrodo, considerando o uso de uma fonte de tensão contínua. Já em [66] foram modeladas as forças magnéticas que agem durante a transferência de metal para a poça de fusão.

A taxa de fusão do eletrodo é um fenômeno frequentemente estudado. Em [67], foi utilizado uma modelagem baseada na análise de regressão pelo método de *Taguchi* para predição da taxa de fusão do eletrodo. Outro trabalho com considerações detalhadas sobre a taxa de fusão, principalmente relativos à influência dos parâmetros de ajuste operacional de soldagem sobre essa taxa e a temperatura da gota, é [68]. No trabalho de Smartt e Einerson [69] foi desenvolvido um modelo matemático que permite predizer a taxa de fusão do eletrodo e a velocidade da transferência a partir da temperatura no processo. Nesse trabalho, as entradas são: o calor de gerado no processo, que é dado em função do comprimento do cordão de solda e sua massa, que por sua vez é dada em função da área seção transversal adicionada ao cordão de solda, também conhecido na literatura como reforço do cordão.

A taxa de fusão do eletrodo é uma dinâmica intimamente relacionado a transferência de calor. Em [70], a transferência de calor foi modelada pelo método das diferenças finitas, auxiliado por um algoritmo *simulated annealing* para otimização dos parâmetros do modelo. Para uma compreensão mais detalhada sobre como a taxa de fusão relaciona diversas dinâmicas do processo, destaca-se o trabalho escrito em duas partes por Kumar e colaboradores [71, 72], que desenvolveram modelos baseados na energia do arco elétrico para representar a transferência de calor. Também destaca-se o trabalho de Cho [73], que relacionou diversas dinâmicas relacionadas a energia e transferência de calor no processo MIG/MAG.

A taxa de fusão do eletrodo e a transferência de calor são estudadas em conjunto em [74], que modelou e simulou pelo método dos elementos finitos a taxa de deposição de massa em função das duas dinâmicas. De forma semelhante, em [75], as mesmas dinâmicas foram representadas, porém a otimização paramétrica foi realizada por aproximação fatorial. A modelagem do comportamento térmico e transferência de calor durante o processo de soldagem é também discutida em [76]. Além desses fenômenos, a análise tridimensional do calor no processo MIG/MAG é mostrada utilizando coordenadas limitadas em [77, 78]. Já Fan e Kovacenic [79] desenvolveram um modelo matemático para predição da transferência de energia no eletrodo, dinâmicas do arco elétrico e da

poça de fusão em modo globular. Para tal, foi utilizado o método do volume do fluido para transferência metálica. Além desses trabalhos, diversas outras relações acopladas a transferência de calor são modeladas em [80–83]. Dois trabalhos com extensa revisão da modelagem da transferência de calor e massa, taxa de fusão do eletrodo e dinâmicas do arco elétrico foram feitos por Lancaster em [84, 85].

Embora nessa dissertação não seja objetivo modelar a poça de fusão, alguns trabalhos dedicados à isso foram também revisados, pois os mesmos também tratavam da transferência de massa e fluxo de calor. Alguns trabalhos interessantes sobre esse tópico são [86–93].

O arco elétrico vem sendo estudados há muito tempo por diversos autores. Modelos teóricos e empíricos tem sido propostos ao longo dos anos. Inicialmente era considerada a tensão do arco apenas como a diferença entre a tensão ao término do arco e a tensão no *stick-out* [94, 95]. Entretanto, trabalhos mais recentes, como [7, 10, 96–98], descrevem as quedas de tensão ao longo do arco elétrico desde sua formação na ponta do *stick-out* até seu término na poça de fusão. Nos trabalhos [99–101] foram propostos modelos que representam as dinâmicas do arco elétrico baseado na corrente de soldagem e no comprimento do arco. Já em [1, 102], o modelo foi adaptado da equação de *Ayrton*, que relaciona o arco elétrico com a corrente de soldagem, comprimento do arco e outras quatro constantes provenientes de experimentos práticos. Em [103], foi mostrado que a queda de tensão no arco elétrico é a queda de tensão mais significativa no processo. Além disso, também foi mostrado que existe uma pequena queda de tensão entre o eletrodo e o bico de contato, que pode ser desprezada quando comparada a queda de tensão no arco elétrico.

A região anódica do arco elétrico também é estudada por muitos pesquisadores, pois essa região tem comportamento extremamente não linear e complexa. Alguns trabalhos dedicados à modelar o comportamento dessa região são [104–107]. As relações de acoplamento entre o arco elétrico e a gota formada na ponta do eletrodo são descritas matematicamente por Quinn e colaboradores [108], através das relações magnéticas e hidrodinâmicas do eletrodo fundido e o plasma. A radiação luminosa emitida pelo arco foi estudada por Wang, Li e Naka em [109], que desenvolveram um modelo matemático capaz de representar essa emissão luminosa.

No trabalho de Kim e Na [110, 111] foram propostos modelos para predição da corrente de soldagem acoplados a altura entre o bico de contato e o metal base, além das dinâmicas do arco elétrico e da fonte de energia. Em continuidade, em [41], os autores investiram na predição do tamanho das gotas destacadas, bem como em sua frequência de destacamento. Ao encontro desses trabalhos, em [112], foi desenvolvido um modelo

matemático para a predição do comprimento do *stick-out* baseado na taxa de fusão do eletrodo.

Os equipamentos de soldagem também receberam atenção em estudos de modelagem. Em [100] foi descrito matematicamente as dinâmicas da fonte de energia utilizada em processos MIG/MAG. Em [113], foram feitos modelos matemáticos no intuito de representar aspectos operacionais do processo MIG/MAG, quando operado por modo de transferência por curto-circuito. Esses modelos foram expandidos para transferência por voo livre em [6, 7].

As dinâmicas do curto-circuito e sua influência acoplada as demais dinâmicas são modeladas em diversos trabalhos, tais como [102, 114, 115]. Esses modelos incorporam características da fonte de alimentação, eletrodo e arco elétrico. Nesses trabalhos as variações no comprimento do eletrodo em estado sólido foram relacionadas à velocidade de alimentação do arame e a taxa de fusão. Além disso, considerações à respeito da ponte que se forma entre o eletrodo e a poça de fusão no início de cada curto-circuito também foram feitas. Ainda, um modelo para predição da variação dos parâmetros do curto-circuito, considerando efeitos da tensão superficial e força eletromagnética, foi proposto.

As transferências metálicas por voo livre, globular e goticular, têm a característica de transferência de massa sem ocorrência de curto-circuito, com isso ocorre o destacamento da massa e a transferência metálica ocorre literalmente por voo livre. Os trabalhos [8, 116], desenvolveram modelos para transferências metálica por voo livre e validaram seus modelos através de experimentos que sincronizavam a dados elétricos com fotografias de alta velocidade. Nesses modelos é possível prever o tamanho e a frequência de destacamento das gotas de solda.

Em [10] foi desenvolvido um modelo para análise do comportamento da corrente de soldagem, tensão e comprimento do arco de forma acoplada. Já em [117], foi descrito matematicamente vários fenômenos, cujas dinâmicas são fortemente relacionadas, tais como: o arco elétrico, fusão do eletrodo, formação da gota, destacamento e transferência das gotas para a poça de fusão e considerações sobre a dinâmica do fluxo do metal. De modo semelhante, em [118, 119] foram relacionadas as dinâmicas do arco elétrico e da formação das gotas de solda. De forma semelhante, em [120] foi descrita matematicamente a formação das gotas e dinâmicas inerentes à transferência de massa. Além disso, foi agregado ao modelo numérico métodos de entalpia, efeito da viscosidade e o volume do fluido quando submetido às forças eletromagnéticas, gravitacional e tensão superficial.

Modelos mais sofisticados, com a finalidade de relacionar a interdependência das variáveis do processo MIG/MAG, foram implementados considerando multiplicidade de entradas e saídas, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Alguns trabalhos que relacionam diversas dinâmicas de forma acoplada são [42, 121–125]. Entretanto, alguns autores realizam simplificações para tornar esses modelos MIMO em modelos SISO (*Single Input Single Output*), além de considerar algumas entradas constantes. Alguns exemplos de trabalho que simplificam esses modelos são [121, 126–128].

Esses modelos MIMO em geral compreendem as não-linearidades do processo de soldagem à arco, por não serem simplificados. Para eliminar esses termos não-lineares, alguns autores utilizam linearização por realimentação de estados sobre as dinâmicas modeladas. São exemplos de trabalhos que realizam essas simplificações os seguintes trabalhos [122–129].

O processo MIG/MAG é bem descrito como um sistema de quinta ordem nos trabalhos [123, 125, 130–132] cujas variáveis de estado resultante da modelagem são: deslocamento, velocidade e massa da gota, comprimento do eletrodo em estado sólido e corrente de soldagem. As entradas desses modelos são a velocidade de alimentação do arame e a tensão da fonte de alimentação. Já as saídas são a tensão do arco e a corrente de soldagem.

Baseado nos modelos de quinta ordem citados, em alguns trabalhos como [126–128, 133] foram apresentadas reduções desse modelo de quinta ordem para modelos de segunda ordem, que descrevem apenas as dinâmicas dominantes no processo. Ou seja, essa simplificação é fundamentada pela consideração apenas das dinâmicas mais influentes para o processo, identificadas previamente em testes experimentais. Esses trabalhos consideraram como variáveis dominantes a corrente de soldagem e o comprimento do eletrodo em estado sólido no bico de contato para avaliar as dinâmicas do arco elétrico.

Recentemente, foi apresentado nos trabalhos [122, 124, 134, 135] uma expansão do modelo de quinta ordem para um modelo de sexta ordem, o qual inclui a dinâmica do motor do alimentador de arame, geralmente um motor de corrente contínua. Esse novo modelo adiciona uma sexta variável de estado, a velocidade de alimentação do arame, que antes era uma das variáveis de controle. Nesse modelo, as entradas são a tensão da armadura do motor e a tensão da fonte e as saídas continuam sendo a tensão do arco e a corrente de soldagem.

2.2.2 Acoplamento dos Parâmetros nos Processos MIG/MAG

Conforme mencionado anteriormente, as dinâmicas nos processos de soldagem à arco são altamente acopladas. Isso acarreta em um alto nível de complexidade ao processo e dificulta o entendimento de cada dinâmica que ocorre durante a transferência de massa. Tendo isso em vista, também foram estudados trabalhos da literatura cujo foco era a análise da influência da variação dos parâmetros do processo de soldagem sobre as dinâmicas do processo. Assim, através da compreensão de diversos trabalhos experimentais, as relações paramétricas foram analisadas e organizadas em um diagrama direcionado, que será discutido posteriormente, para facilitar a visualização das relações de acoplamento paramétrico dos modelos matemáticos dos processos MIG/MAG.

Os parâmetros de soldagem são todas as variáveis que influenciam na qualidade e quantidade da solda produzida [136]. Esses parâmetros podem ser fixos ou ajustáveis e são fortemente acoplados [2], com isso existe uma correlação temporal de dependência entre essas variáveis, o que torna muito difícil alterar um parâmetro sem afetar outros parâmetros, bem como a solda resultante [27, 136]. Os parâmetros fixos são aqueles que são definidos antes de iniciar o processo de soldagem por possuírem características mecânicas e metalúrgicas bem definidas. Já os parâmetros ajustáveis podem ser alterados antes e durante o processo de soldagem.

Os parâmetros fixos são as características do eletrodo, a composição do gás de proteção, a taxa de vazão do gás, a geometria do chanfro e as propriedades do metal base. Por outro lado, os parâmetros que podem ser alterados durante o processo de soldagem são diversos, tais como: velocidade da alimentação do arame, velocidade e ângulo de soldagem, tensão da fonte, distância entre o bico de contato e peça, entre outros.

Os parâmetros de saída do processo de soldagem são divididos basicamente entre características do cordão de solda e características do arco elétrico. Os parâmetros do arco são a sua tensão, a corrente de soldagem e emissões luminosas, acústicas e eletromagnéticas. Já os parâmetros do cordão são divididos em características internas e externas. A geometria externa do cordão é constituída pela largura l e reforço r , já a geometria interna do cordão é constituída pela penetração p da solda [137]. A Figura 3 ilustra essas características.

Nos trabalhos [42, 138] foram postos esforços para identificar as relações de acoplamento das dinâmicas do processo de soldagem a arco, entretanto poucas relações paramétricas foram identificadas nesses trabalhos. Assim, neste trabalho foram agregadas novas relações às relações previamente identificadas nos trabalhos de [42, 138], baseado em trabalhos experimentais encontrados na literatura e discutidos a seguir.

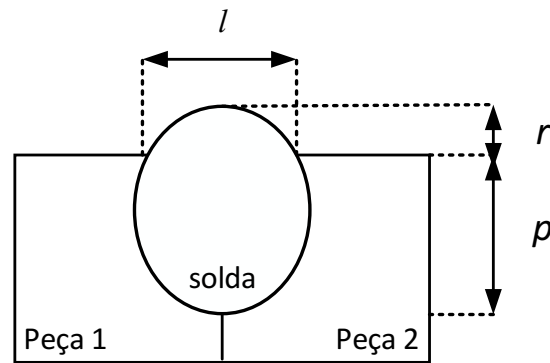


Figura 3: Geometria do cordão de solda formado, onde l , r e p são largura do cordão de solda, reforço da solda e penetração da solda, respectivamente.

Os parâmetros de entrada do processo, que geralmente são fixos, são:

- Diâmetro do eletrodo;
- Ângulo da tocha;
- Distância entre bico de contato e peça;
- Velocidade de alimentação do arame;
- Velocidade de soldagem.
- Tensão da fonte;
- Composição do gás;
- Polaridade dos terminais da fonte;

As dinâmicas mais afetadas durante o processo são:

- Corrente de soldagem;
- Comprimento do *stick-out*;
- Modo de transferência de massa;

Se o processo de soldagem for realizado por um robô de soldagem linear, a distância entre bico de contato e a peça pode ser considerada constante durante o processo, se a peça de trabalho apresentar uma superfície uniforme. A velocidade de alimentação do arame pode ser constante ou variável.

Alguns dos parâmetros identificados como saída são:

- Emissões luminosas;
- Geometria do cordão de solda formado (altura e largura);
- Profundidade de penetração da solda;
- Volume de material depositado;
- Defeitos na solda;
- Emissões acústicas;
- Geração de fumos;

A Figura 4 mostra as relações identificadas através de uma vasta revisão da literatura dos processos de soldagem à arco MIG/MAG. No diagrama são utilizadas setas e cores para facilitar a visualização das relações de acoplamento paramétrico. Isto é, a seta indica que a alteração de um determinado parâmetro afeta outros parâmetros especificados pela direção da seta. Já as cores foram utilizadas para evitar sobreposição das setas que saem de cada parâmetro de entrada. Por exemplo, a variação do parâmetro velocidade de soldagem afeta simultaneamente a geometria do cordão, penetração e volume de material depositado. Note que as três setas que saem do parâmetro velocidade de soldagem são roxas e direcionadas para os parâmetros que serão afetados pela sua variação. Em seguida são feitos comentários à respeito das relações de acoplamento das variáveis do processo, provenientes do estudo de trabalhos experimentais que permitiram a construção desse diagrama de relações paramétricas.

A magnitude da corrente de soldagem tem uma relação direta com a quantidade de calor transferido para a peça de trabalho, logo a corrente determina a taxa de deposição de massa, além de afetar diretamente a profundidade de penetração, altura e reforço do cordão de solda formado [12, 21, 45]. Quando a corrente for muito elevada pode propiciar um cordão alto, estreito e sujeito à mordeduras e se for uma corrente muito baixa pode tornar o arco elétrico instável [12]. A relação da corrente de soldagem com a velocidade de alimentação de arame é unidirecional, ou seja, ambas variam no mesmo sentido [27, 44, 139].

Em relação à velocidade de soldagem, conforme a mesma é reduzida diminui ou até mesmo elimina a probabilidade de ocorrência de porosidade no cordão de solda, entretanto se a velocidade de soldagem for muito baixa, pode gerar trincas e deposição

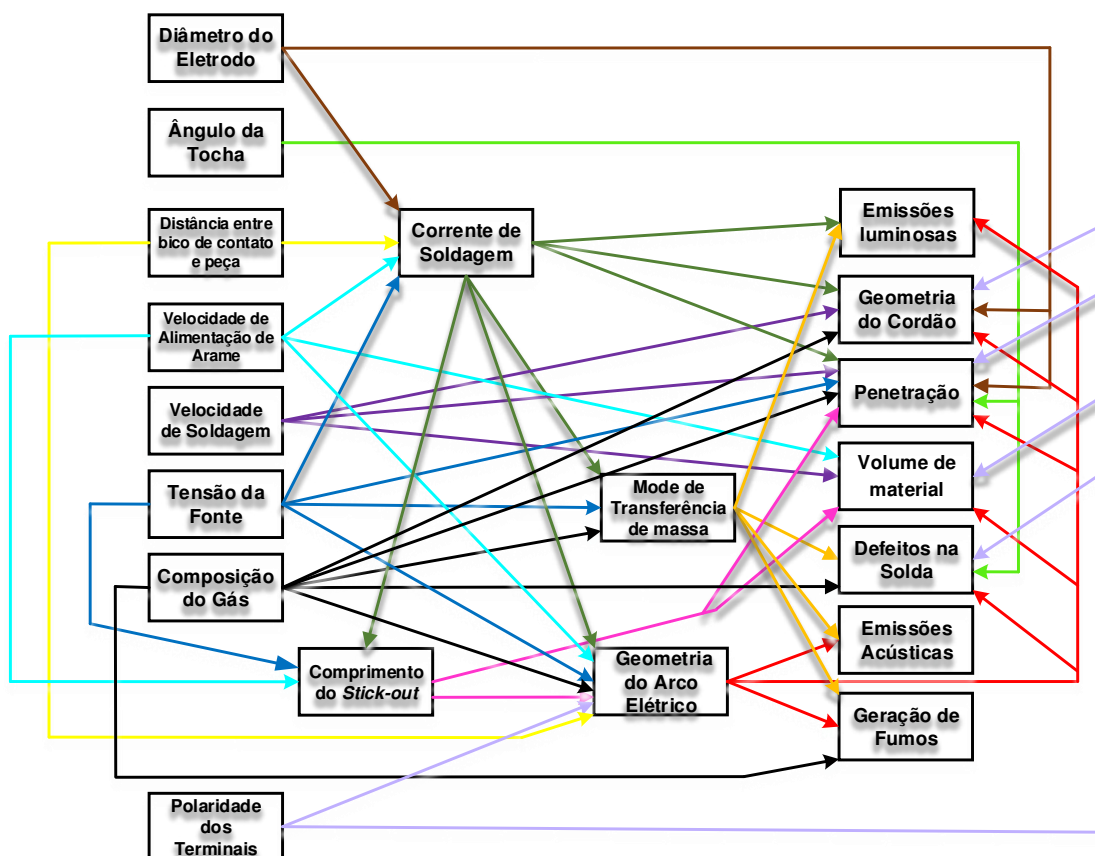


Figura 4: Relação de acoplamento dos parâmetros nos processos MIG/MAG, sendo a influência de cada parâmetro sobre os demais mostrada através de setas direcionadas com uma cor definida para cada parâmetro.

excessiva de solda. Por outro lado, se a velocidade de soldagem for muito elevada, pode não ocorrer o preenchimento adequado do volume de solda, além da possibilidade de gerar mordeduras na solda [12]. Assim, mantendo demais parâmetros constantes, em operações de soldagem sem material de adição, a velocidade de soldagem é inversamente proporcional a penetração da solda [140].

Em consideração ao comprimento do arco elétrico pode-se afirmar que está diretamente relacionado à sua tensão [2] e essa tensão afeta diretamente a largura e o formato do cordão de solda. Ou seja, se a tensão do arco for baixa, isto poderá gerar um reforço excessivo e cordão estará sujeito à trincas, por outro lado, se for uma tensão elevada, o cordão pode ficar largo ou com reforço insatisfatório [12, 139, 141]. Entretanto, a tensão não influencia tanto na penetração da solda [32]. Porém, a tensão do arco depende diretamente da tensão ajustada na fonte e influencia na estabilidade de transferência de massa [142].

Também é válido ressaltar a influência do diâmetro do eletrodo. Avaliando a influência

de diferentes raios do eletrodo na taxa de fusão, em [143] foi mostrado a taxa de fusão é independente do raio do eletrodo, mas diretamente afetada pela velocidade de alimentação do eletrodo. Ainda, foi observado que quanto maior for esse diâmetro, maior será a capacidade desse eletrodo suportar a corrente de soldagem que o percorre. Também em relação ao eletrodo, se durante o processo o comprimento eletrodo sólido no bico de contato, (*stick-out*), aumentar demasiadamente, a corrente de soldagem aumentará, e consequentemente a penetração também aumentará [24, 51]. As características químicas do eletrodo juntamente com a composição do gás de proteção também exercem influência na formação do cordão de solda [22].

O ângulo de posicionamento do bico de contato em relação ao metal base também influencia na qualidade da solda, interferindo na geometria, penetração e rugosidade do cordão de solda formado. Já a distância entre o bico de contato e peça influencia de forma direta no reforço da solda e de forma inversa à largura do cordão de solda [2]. Ainda, quanto maior for essa distância, menor será estabilidade do arco [44] e a corrente de soldagem, mantendo demais parâmetros inalterados [144]. Além disso, se essa distância for muito grande, poderão ocorrer falhas na proteção do arco e da solda pelo gás de proteção [12].

A estabilidade do arco elétrico depende do comprimento do arco, composição do gás de proteção, principalmente em relação à concentração de O_2 , características da fonte de alimentação, corrente de soldagem e velocidade de alimentação de arame [145]. A tensão gerada pela fonte, a velocidade de alimentação do arame e a corrente de soldagem influenciam diretamente a ignição do arco elétrico, já o comprimento do *stick-out* influencia a dinâmica do comprimento desse arco [24].

Os gases de proteção utilizados no processo de soldagem também influenciam no formato do cordão de solda. Em [21], foi mostrado que os gases de proteção podem requerer um ajuste fino dos parâmetros operacionais de soldagem na fonte de soldagem. Foram utilizados dois gases de proteção: $Ar + 25\%CO_2$ e CO_2 puro e nos experimentos foi mostrado que a qualidade do cordão formado para esses dois gases pode ser a mesma, desde que os parâmetros de soldagem sejam adequadamente configurados na fonte de soldagem. De forma geral, a geometria dos cordões de solda obtidos quando o gás de proteção utilizado foi CO_2 apresentou mais suavidade, entretanto isso acarretou em uma regulação mais delicada, pois o uso de CO_2 puro de forma descuidada pode gerar muitos respingos, acarretando em grande perda de material. Ainda nesse trabalho foi mostrado que o tipo de gás não influencia significativamente na taxa de crescimento da corrente de soldagem. Ainda, os gases de proteção afetam a regularidade do processo, mas não afetam as taxas de subida e descida de corrente para que ocorra os curtos-circuitos quando

mantida o efeito indutivo constante [27].

Também foi visto em [49, 131] que a polaridade que condiciona a constante de proporcionalidade, relativa ao aquecimento do ânodo ou cátodo, depende do tipo de conexão elétrica da pistola de soldagem com a fonte de alimentação. Se a pistola é conectada ao terminal positivo da fonte de alimentação, obtêm-se um arco mais estável, transferência metálica mais suave, menos salpicos, cordão mais uniforme e boa penetração da solda em relação à conexão ao terminal negativo [11, 146]. Entretanto, a ligação com polaridade direta, ou seja, com o eletrodo ligado ao terminal negativo, também conhecida por CC- apresenta baixa penetração, maior taxa de fusão do arame e maior quantidade de respingos [11, 131]. Além disso, quando a pistola é conectada ao terminal negativo da fonte de alimentação, a gota possui um raio maior e o arco tende à desestabilizar. Entretanto, não pode-se afirmar que um método de conexão seja superior ao outro, pois dependem do eletrodo usado na soldagem, bem como o gás de proteção utilizado para realizar a operação, podendo inclusive obterem resultados equivalentes [11].

Além destas relações há ainda a questão da geração de fumos [147–150], provocado pela composição dos gases e potencializado dependendo do modo de transferência de massa, sendo o modo globular o maior gerador de fumos, em relação ao modo por curto-circuito ou goticular. Em se tratando de emissões luminosas [151, 152], a corrente é o elemento principal que varia essas emissões [153]. Já as emissões acústicas são provenientes dos curtos-circuitos [154–157].

Portanto, pode-se concluir que a geometria do arco elétrico e a corrente de soldagem são os elementos mais acoplados as demais dinâmicas presentes na soldagem, o que torna seu estudo conjunto algo de suma importância.

2.2.3 Trabalhos sobre Transferência Metálica Mista Globular/Curto-Circuito

Nas duas subseções anteriores foram discutidos trabalhos referentes à modelagem matemática das dinâmicas inerentes aos processos MIG/MAG, bem como as relações de acoplamento das dinâmicas. As informações das seções anteriores são a base para relacionar os modelos individuais utilizados conjuntamente para representar a transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.

Conforme mencionado anteriormente, há poucos trabalhos relativos à esse modo misto de transferência metálica em específico na literatura. Os trabalhos encontrados, de modo geral, analisam esse modo de transferência de forma experimental, isto é, através de experimentos pela variação das condições operacionais e materiais utilizados, sem

descrição matemática detalhada do processo. À seguir são discutidos esses trabalhos.

No trabalho de Scotti e colaboradores [158] foi identificado experimentalmente a existência de uma região de transição para a transferência por modo misto de transferência metálica entre o modo globular e o modo curto-circuito, cuja transferência ocorria em baixa frequência para correntes amenas e comprimento do arco elétrico reduzido.

Nesse modo misto, a transferência metálica ocorre tanto por voo livre quanto por contato [46]. Isto é, a transferência metálica é predominantemente dada por voo livre (modo globular) [159], entretanto ocorrem em curtos-circuitos, caracterizando a transferência metálica por contato, de forma mais espaçada temporalmente do que os curtos que ocorrem na transferência metálica por curto-circuito [5]. Os curtos-circuitos ocorrem quando a gota cresce o suficiente para tocar a poça de fusão, criando uma ponte entre o eletrodo e a poça de fusão.

O ajuste de parâmetros operacionais para obtenção do modo misto globular/curto-circuito apresenta uma maior dificuldade para regular os parâmetros de soldagem, devido à sua alta sensibilidade e instabilidade por estar na transição entre dois modos de transferência tão diferentes. Esta sensibilidade gera dificuldade do ajuste e controle, além de tornar difícil o diagnóstico das causas da instabilidade [10].

No trabalho [159], experimentos foram realizados e observações sobre os modos de transferência globular, curto-circuito e misto globular/curto-circuito. Neste trabalho, os autores mostraram que o modo misto apresenta uma taxa de transferência metálica superior ao modo globular, mas inferior ao modo curto-circuito. Além disso, foi ressaltado que a transferência mista é de difícil identificação experimental para velocidades de alimentação de arame altas.

Também através de experimentos, em [64], foi mostrado que a transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito transfere a massa de forma aleatória, ou seja, ora por voo livre e ora por curto-circuito. Além disso, os autores enfatizaram que esse modo de transferência é inerentemente instável.

Por fim, ressalta-se que não foram encontrados trabalhos dedicados à modelagem matemática da transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

Os processos de soldagem à arco são caracterizados por serem sistemas não-lineares, variantes no tempo, inerentemente multivariáveis, com forte acoplamento dos parâmetros de soldagem e por possuírem incertezas à cada variação das condições de soldagem [36, 160–163]. Em [164] foi afirmado que a complexidade dos processos à arco está na interação dos materiais, metalurgia, química e física.

Esses processos podem ser controlados por mais de um parâmetro, como a corrente de soldagem, comprimento do arco e velocidade de soldagem [160]. De modo geral, a poça de fusão aumenta se a corrente é incrementada ou também pela diminuição da velocidade de soldagem. Já quando o comprimento do arco aumenta, a tensão do arco e a potência também aumentam, entretanto a distribuição de energia do arco é descentralizada, portanto decrementando a eficiência do arco [160]. Assim, a escolha da atuação do controle nem sempre é uma tarefa simples, pois depende não somente de um ajuste estreito de parâmetros, mas também do material do metal base o qual será soldado.

Este capítulo é dedicado à ilustrar a modelagem do processo de soldagem à arco com transferência por modo globular, curto-circuito e como relacionar esses modelos para representação da transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito. Essa modelagem será separada em algumas seções maiores com pequenas subseções, para facilitar a compreensão das dinâmicas que compõem esses modelos.

A primeira seção é dedicada à modelagem da transferência metálica por voo livre, ou seja, desde as dinâmicas envolvidas na formação da gota na ponta do eletrodo até seu destacamento, sem que o eletrodo toque a poça de fusão. Esse modelo pode representar a transferência metálica por modo globular, goticular e globular/goticular. Já a segunda seção abrange a transferência metálica por curto-circuito, onde é formada uma ponte entre o eletrodo sólido e a poça de fusão.

Em seguida, na terceira seção, é mostrado como fazer a comutação entre os modelos matemáticos. Por fim, são discutidos os critérios que permitem simular as condições para ocorrência de transferência metálica e como tratar as dinâmicas dos modelos após o destacamento de massa.

Diversos trabalhos abordando modelagem foram utilizados como referências para chegar à esses modelos, entretanto alguns tiveram maior contribuição para obter informações sobre as relações físicas e elétricas do processo de soldagem como [65, 106, 107, 120, 122–124, 126, 127, 131, 132, 135, 165–170].

3.1 Modelagem da Transferência Metálica por Voo Livre

A união dos metais no processo MIG/MAG é dada pela transferência de calor e massa. Esses fenômenos podem ocorrer por três meios: transferência por voo livre (globular, goticular ou globular/goticular), por contato (curto-circuito) ou de forma mista, onde pode ocorrer transferência tanto em voo livre quanto por contato.

Esta seção mostra a modelagem matemática da transferência por vôo livre. No modo de transferência globular, a gota de solda é formada na ponta do eletrodo e a gota cresce até que as forças que atuam sobre seu crescimento sejam superiores à tensão superficial. Nesse momento, a gota é transferida para a poça de fusão sem que ocorram curtos-circuitos durante esse fenômeno.

A Figura 5 mostra a formação da gota na ponta do eletrodo. Ao longo do texto, o período de tempo referente ao fenômeno de crescimento da gota será chamado de fase de arco, pois durante todo esse período, o arco é mantido aberto, sem ocorrência de curto-circuito.

Durante a fase de arco o eletrodo é alimentado continuamente e fundido para formar a gota na ponta do eletrodo. O comprimento de eletrodo em estado sólido no bico de contato L_E é proporcional a velocidade de alimentação do arame. Na prática, a velocidade de alimentação do arame é equivalente a taxa de fusão do eletrodo.

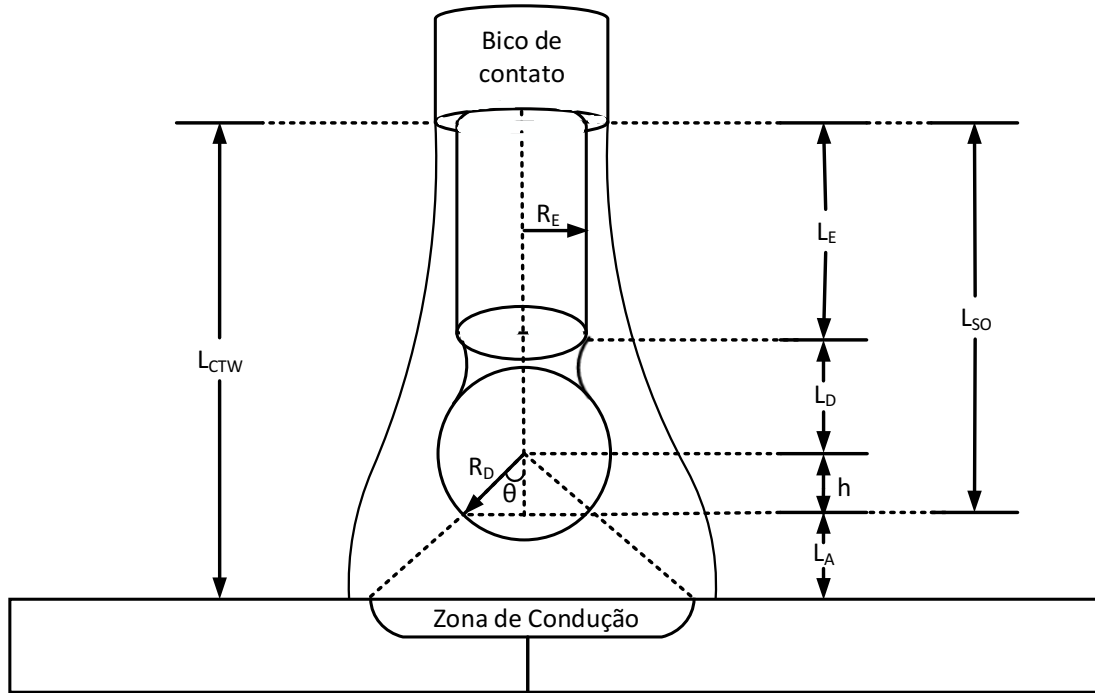


Figura 5: Diagrama da formação da gota na ponta do eletrodo.

onde:

h	Fração parcial do R_D determinado por θ	$[m]$,
L_A	Comprimento do arco	$[m]$,
L_{CTW}	Distância entre o bico de contato e o metal base	$[m]$,
L_D	Deslocamento da gota na ponta do eletrodo	$[m]$,
L_E	Comprimento do eletrodo em estado sólido	$[m]$,
L_{SO}	Comprimento do <i>stick-out</i>	$[m]$,
R_D	Raio da gota	$[m]$,
R_E	Raio do eletrodo	$[m]$,
θ	Ângulo de condução de corrente no eletrodo	$[^\circ]$.

As forças que atuam sobre a gota formada não são equilibradas, com isso uma distância entre o extremo do eletrodo em estado sólido e o centro da gota é gerado, dada por L_D . Ou seja, essa distância L_D é o deslocamento da gota na ponta do eletrodo. Além disso, também foi definido um comprimento do raio da gota diretamente afetado pelo ângulo de condução de corrente no eletrodo θ , mostrado em (1).

O ângulo de condução influencia na largura do cordão de solda formado e na força eletromagnética. Por fim, o comprimento efetivo de eletrodo após o bico de contato L_{SO} , também conhecido na literatura por *stick-out*, é o comprimento de eletrodo energizado, equivalente ao somatório dos comprimentos do eletrodo em estado sólido L_E , da fração de raio da gota definido pelo ângulo de condução h e do deslocamento da gota na ponta do

eletrodo L_D [167], conforme (2).

$$h = R_D \cos(\theta) \quad (1)$$

$$L_{SO} = L_E + L_D + h \quad (2)$$

O raio da gota cresce conforme o eletrodo é fundido, pois é influenciado pela quantidade de massa dessa gota. Considerando que o formato da gota é esférico, então essa grandeza é dada por [127, 131],

$$R_D = \sqrt[3]{\frac{3m_d}{4\pi\sigma_e}} \quad (3)$$

onde:

m_d	Massa da gota	$[kg]$,
t	Unidade de medida temporal	$[s]$,
σ_e	Densidade de massa do eletrodo	$[kg/m^3]$.

3.1.1 Forças Envolvidas na Transferência Metálica por Voo Livre

As forças que atuam na gota, quando a transferência de massa é realizada de modo globular ou goticular são: a força gravitacional F_G , a força eletromagnética F_{EM} , a força aerodinâmica F_A , a força dos jatos de vapor F_V , a tensão superficial F_γ e a força proveniente do momento F_m [46, 131, 171]. As subseções à seguir expõem a influência de cada força.

3.1.1.1 Força Gravitacional

A força da gravidade é ilustrada em (4) e é influenciada pela inclinação da posição de soldagem Θ em relação à vertical. Quando o arco de solda está perpendicular à peça de soldagem, a equação é simplificada e resulta em (5). A Figura 6 mostra a relação do ângulo de soldagem frente a atuação da aceleração da gravidade [127].

$$F_G = m_d g \cos(\Theta) \quad (4)$$

$$F_G = m_d g \quad (5)$$

onde:

g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$,
Θ	Ângulo entre o eixo do arco e a vertical	$[^\circ]$.

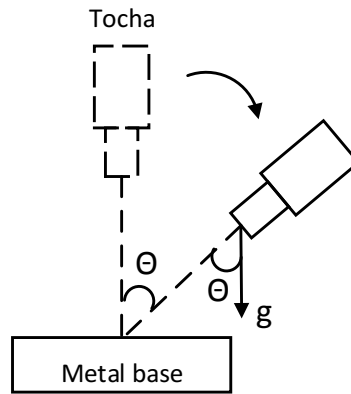


Figura 6: Relação entre ângulo de soldagem Θ e aceleração da gravidade g .

3.1.1.2 Força Eletromagnética

A força eletromagnética é proveniente do fluxo de corrente dentro do eletrodo, incluindo a gota. Essa força gera um campo magnético ao redor do eletrodo que atravessa.

Essa força é calculada pela lei de *Lorentz*, mostrada em (6), pois depende do sentido do fluxo de corrente de soldagem que passa pela gota formada na ponta do eletrodo [132].

$$F_{EM} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (6)$$

onde:

F_{EM}	Força eletromagnética	[N],
J	Densidade de corrente	[A/m ²],
B	Fluxo do campo magnético	[A/m].

o termo F_{EM} é referido como estresse de *Maxwell* e pode ser reescrito conforme (7).

$$F_{EM} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times B) \times B \quad (7)$$

ou ainda:

$$F_{EM} = -\frac{1}{2\mu} \nabla(B^2) + \frac{1}{\mu} (B \cdot \nabla) B \quad (8)$$

A equação (8) significa que se o caminho da corrente for paralelo ao eletrodo, o primeiro termo orienta a força eletromagnética em direção ao interior da gota radialmente. Entretanto, se o caminho da corrente diverge ou converge, a força eletromagnética terá

um componente para o interior e para o exterior da gota. Além disso, o segundo termo da equação expressa a força rotacional que age dentro da gota. O detalhamento dessas relações podem ser encontradas em [1, 131].

A força rotacional é cancelada pela força de oposição quando presente em um corpo rígido e simétrico. Entretanto, a gota não é rígida, apenas rotacional, mas como a taxa de deposição é consideravelmente mais rápida que a constante de tempo da contribuição rotacional, então esse termo pode ser desprezado [172].

Em [173], essa força foi derivada e analisada detalhadamente. Entretanto, em [131, 135] foi observado que partes dessa equação podem ser simplificadas. Assim, integrando-se (6) em relação a corrente que atravessa a gota e assumindo que a densidade de corrente na gota é uniforme, têm-se [174]:

$$F_{EM} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} f_z \quad (9)$$

onde:

μ_0	Constante de permeabilidade magnética do material	$[4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^2],$
I	Corrente de soldagem	$[A],$
f_z	Término variável da força eletromagnética	$[N].$

Segundo [126, 127, 132, 175], o parâmetro f_z é dado por (10).

$$f_z = \ln \left(\frac{R_D \sin(\theta)}{R_E} \right) - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos(\theta)} + \frac{2}{(1 - \cos(\theta))^2} \ln \left(\frac{2}{1 + \cos(\theta)} \right) \quad (10)$$

O sentido do fluxo de corrente determina o sentido da F_{EM} sobre a gota. Assim, quando o ângulo de condução θ está próximo de zero, a F_{EM} retém a gota. A partir de um ângulo limite de condução, essa força contribui para o destacamento da gota da ponta do eletrodo. A Figura 7 ilustra o sentido da F_{EM} influenciado pelo ângulo de condução [132].

Foi gerado um gráfico em uma simulação com valores hipotéticos para mostrar a influência do ângulo de condução sobre a força eletromagnética. Foram inferidos os seguintes valores para o raio do eletrodo e o raio da gota: $0,005m$ e $0,006m$, respectivamente e os ângulos de condução foram 30° , 60° e 90° . A corrente foi variada de 0 a 300 A. A Figura 8 mostra essa relação.

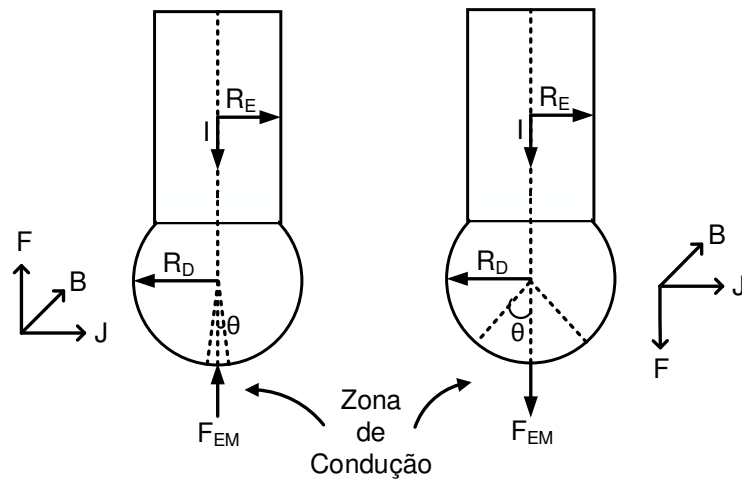


Figura 7: Sentido da força eletromagnética influenciado pelo ângulo de condução.

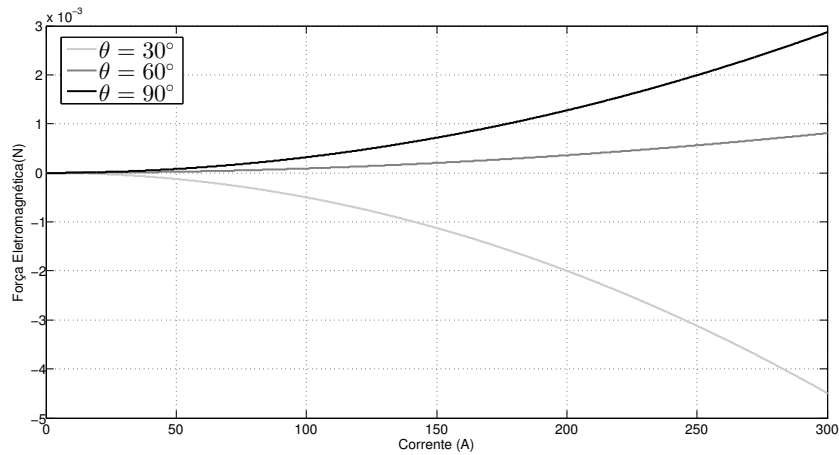


Figura 8: Influência da corrente na força eletromagnética.

Nesse experimento é possível observar que a magnitude da força eletromagnética aumenta junto com a corrente. Também é possível observar que a zona de condução proveniente dos ângulos de condução 60° e 90° resultam em uma força positiva, com corrente divergente, enquanto que o ângulo de 30° resulta em uma força negativa, induzindo a força à convergência. Um segundo experimento foi feito, mantendo os valores hipotéticos dos raios e variando o ângulo de condução de 0° à 90° para observar o comportamento da variável f_z . A Figura 9 mostra essa relação.

Nesse experimento o ângulo limite de condução encontrado foi 54° . Disso pode-se concluir que se o ângulo de condução for superior à 54° , então a F_{EM} favorece o destacamento da gota. Não há valores usuais para que esse ângulo destaque a gota, uma vez que isso varia com a composição do material e diâmetro do eletrodo, bem como fatores externos que alteram as dinâmicas acopladas a corrente.

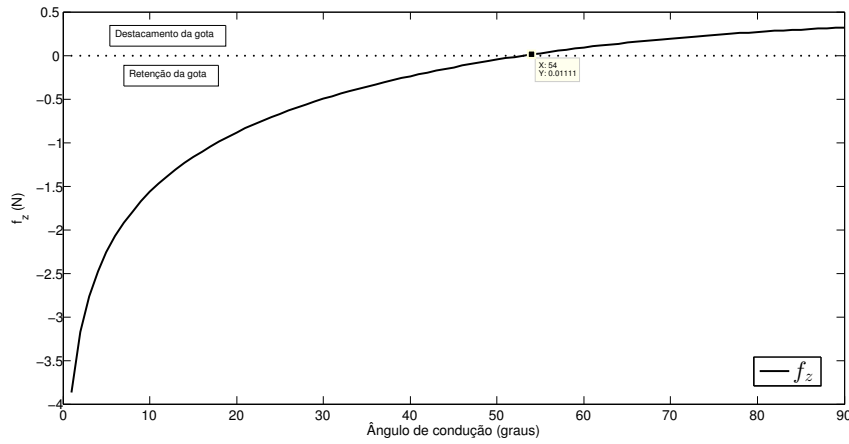


Figura 9: Influência do ângulo de condução no parâmetro f_z .

Ressalta-se também que a F_{EM} não depende da posição de soldagem matematicamente, porém a mudança da inclinação da posição de soldagem altera a geometria da formação da gota, que por sua vez altera a zona de condução da corrente de soldagem e com isso afetando a F_{EM} [167].

3.1.1.3 Força oriunda do Momento

A força oriunda do momento F_m surge pela variação da massa da gota. Ou seja, essa força é provocada pela variação de massa [168, 176, 177]. Assim, essa força é derivada pelas variações de momento no pingente da gota.

O trabalho [166] detalha o equacionamento da mudança de momento no pingente. A equação final que representa essa força é dada por:

$$F_m = V \frac{dm_d}{dt} \quad (11)$$

ou ainda:

$$F_m = M_R \sigma_e V \quad (12)$$

onde:

m_d	Massa da gota	$[kg]$,
M_R	Taxa de fusão do arame	$[kg/s]$,
V	Velocidade de alimentação do arame	$[m/s]$,
σ_e	Densidade do eletrodo	$[kg/m^3]$.

3.1.1.4 Força Aerodinâmica

A força aerodinâmica da atmosfera F_A , ou força de arrasto, atuante ao redor e internamente ao arco. Essa força induz a aerodinâmica da gota e contribui para seu destacamento da ponta do eletrodo [41, 177, 178].

A força aerodinâmica é gerada em função do gás de proteção utilizado no processo de soldagem. O equacionamento dessa força é mostrado em (13).

$$F_A = 0,5C_A(\pi R_D^2)V_G^2\sigma_g \quad (13)$$

onde:

C_A	Coeficiente de resistência aerodinâmica	0,44,
V_G	Velocidade do gás	[m/s],
σ_g	Densidade do gás	[kg/m ³].

3.1.1.5 Força dos Jatos de Vapor

A força dos jatos de vapor é proveniente da aceleração térmica das partículas de vapor dentro do arco de solda e se opõem ao destacamento da gota [131]. O vapor é gerado em torno do arco devido a corrente com valores elevados.

Essa é uma das forças mais complexas e recentemente tem sido alvo de pesquisas em processos de soldagem à arco. Essa força pode alterar a temperatura do arco, causando mudanças na condutividade do eletrodo e propriedades do arco elétrico [179].

Considerando que a temperatura na superfície de soldagem é uniforme [180], então pode-se descrever a contribuição dessa força como (14).

$$F_V = \frac{m_v}{\sigma_v} I J \quad (14)$$

onde:

m_v	Massa vaporizada	[kg],
σ_v	Densidade do vapor	[kg/m ³].

3.1.1.6 Tensão Superficial

A tensão superficial F_γ é uma propriedade dos líquidos e age entre as fases do material [181]. No caso do processo de soldagem, essa força age entre a fase sólida do eletrodo e a fase líquida da formação da gota e é fundamental para o processo de formação da gota e

transferência metálica. Quando dos meios coexistem, essa força age na região de contato de ambos direcionada para o interior do volume a que pertencem [20].

No caso da formação da gota, o metal somente assume o formato de gota devido à ação da tensão superficial, pois essa força age no sentido de reduzir a energia superficial livre ao mínimo, assim, os líquidos assumem a forma esférica [20, 182, 183].

Essa força se opõe ao destacamento da gota que já em estado líquido do ponto em que esta retida no eletrodo em estado sólido [184]. O cálculo da tensão superficial pode ser feito pela lei de *Tate*, que relaciona diretamente o peso máximo da gota e o raio da ponta líquida que a forma [41], conforme (15). Note que a um parâmetro f , que é uma função de correção empírica do destacamento da gotas [132, 185].

$$F_\gamma = 2\pi R_E \gamma f \quad (15)$$

onde:

F_γ	Tensão superficial	$[N]$,
f	Função de correção empírica	$[-]$,
γ	Módulo de tensão superficial	$[N/m]$.

3.1.1.7 Força Resultante

A força da gravidade, a força eletromagnética, a força aerodinâmica e a força oriunda do momento contribuem para o destacamento da gota na ponta do eletrodo, já a força dos jatos de vapor e a tensão superficial se opõem a esse destacamento. Essas forças podem ser relacionadas através da segunda Lei de *Newton*, mostrada em (16). Assim, a aceleração da gota A_D é dada por (17).

$$\sum \vec{F} = m \vec{a} \quad (16)$$

onde:

$\vec{a}$	Aceleração	$[m/s^2]$,
$\vec{F}$	Forças	$[N]$,
m	Massa	$[kg]$.

$$A_D = \frac{1}{m_d} (F_G + F_{EM} + F_A + F_m - F_V - F_\gamma) \quad (17)$$

A Figura 10 mostra a relação de todas as forças simultaneamente na gota, para facilitar a visualização.

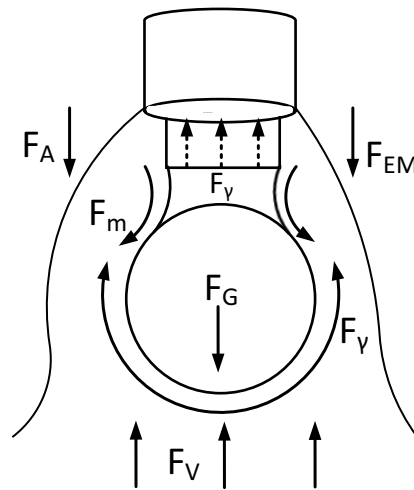


Figura 10: Relação das forças que atuam na formação da gota.

A tensão superficial é utilizada em alguns critérios de destacamento da gota, os que consistem em monitorar e comparar a magnitude do somatório das forças atuantes na gota ao valor da tensão superficial, que se opõe ao destacamento dessa massa, conforme será explicado nas próximas seções. Portanto, quando escolhido alguns desses critérios de destacamento a influência da tensão superficial não é incluída diretamente no somatório das forças atuantes na gota. Assim (17) é reescrita como (18).

$$A_D = \frac{1}{m_d} (F_G + F_{EM} + F_A + F_m - F_V) \quad (18)$$

3.1.2 Dinâmica do Deslocamento da Gota

Como foi dito, as forças atuantes sobre a gota são desequilibradas e este fenômeno desloca a gota da ponta do eletrodo. Diversos trabalhos abordam esse deslocamento de diferentes maneiras. Esse deslocamento é geralmente chamado de pingente na literatura.

Uma das maneiras de modelar esse pingente é comparando-o à um sistema mola-amortecedor, como em [126, 127, 166], dentre outros. Essa abordagem descreve o desprendimento da gota da ponta do eletrodo submetido às forças externas.

A Figura 11 mostra o pingente formado entre a gota e o eletrodo, a aplicação do sistema mola-amortecedor no pingente e o diagrama de corpo livre da gota submetida às forças externas e a atuação do amortecedor e mola.

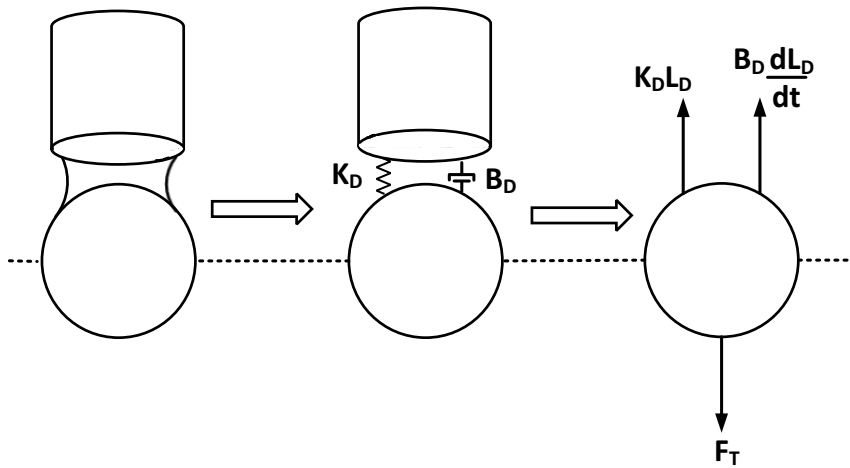


Figura 11: Diagrama de corpo livre do pingente aproximado a um sistema mola-amortecedor.

A dinâmica do pingente é formulada por (19).

$$m_d \frac{d^2 L_D}{dt^2} = F_T - B_D \frac{dL_D}{dt} - K_D L_D \quad (19)$$

onde:

B_D Constante de amortecimento $[Ns/m]$,

K_D Constante de flexibilidade (mola) $[N/m]$.

Algumas variações mais complexas desse modelo foram feitas, conforme mostrado em [172]. Entretanto, por mais complexa que seja a modelagem do arco, sempre há um grau de inacurácia nesse fenômeno, pois esse pingente apresenta um comportamento caótico [166].

3.1.3 Circuito Elétrico Equivalente da Fase de Arco

A fase de arco pode ser representada através de um circuito elétrico equivalente, conforme mostrado na Figura 12. Nesse circuito são considerados a fonte de alimentação elétrica, com os cabos que conduzem a corrente elétrica do terminal negativo (catodo), que é o metal base ao terminal positivo (ânodo), que é a tocha ou bico de contato propriamente dito.

A corrente flui do eletrodo para a peça através do arco elétrico. Os cabos devem ser considerados na modelagem pois a corrente que flui por eles é alta, com isso a queda de tensão nesses cabos não é tão pequena a ponto de ser desprezada.

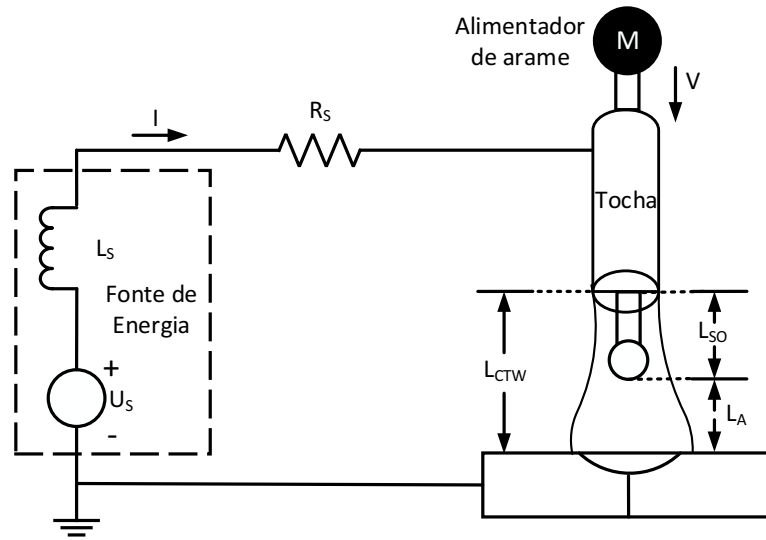


Figura 12: Circuito elétrico equivalente à fase de arco.

onde:

- L_S Indutância dos circuitos do sistema de soldagem [H],
- R_S Resistência dos condutores elétricos [Ω],
- U_S Tensão da fonte de energia [V].

Aplicando-se a lei de *Kirchoff* no circuito mostrado na Figura 12, obtêm-se:

$$U_S = L_S \frac{dI}{dt} + R_S I + U_A \quad (20)$$

onde U_A é a tensão do arco. Também foi adicionado à resistência dos condutores elétricos R_S e a resistência do comprimento de *stick-out* R_{SO} . Há também a resistência entre o bico de contato e o eletrodo, mas foi visto em alguns trabalhos, como [10], que essa resistência possui um valor muito baixo em relação às demais resistências, podendo ser desprezado. Então, reformulando a equação anterior têm-se:

$$U_S = L_S \frac{dI}{dt} + (R_{SO} + R_S) I + U_A \quad (21)$$

A resistência do *stick-out* pode ser modelada como a resistividade do eletrodo pelo comprimento total de eletrodo incluindo a gota. Sendo que a posição da gota é dada tendo como referência a ponta do eletrodo sólido no bico da tocha. Essa resistência é dada por:

$$R_{SO} = \rho_e \left[L_E + \frac{1}{2} (R_D + L_D) \right] \quad (22)$$

sendo ρ_e a resistividade do eletrodo em [Ω/m].

Existe uma pequena resistência dentro do bico de contato, onde o cabo ânodo é conectado, que gera uma queda de tensão muito pequena. Entretanto, como foi visto em [131, 186], essa resistência pode ser desprezada, já que geralmente seu valor é muito pequeno em relação às demais resistências presentes no processo, bem como a resistência entre o bico de contato e o eletrodo.

3.1.4 Tensão do arco

A tensão do arco é a queda de tensão mais significativa no processo. Para pequenas correntes a tensão do arco é quase a mesma tensão da fonte. Mas para altas correntes, a tensão da fonte deve ter um valor significativamente maior para compensar as quedas de tensão e a indutância para troca de corrente [131].

Nesse trabalho foi considerada as tensões da região catódica e anódica junto com a tensão da coluna central do arco como um único elemento, visto que a separação dessas tensões é mais importante quando se quer avaliar exclusivamente o comportamento do arco elétrico, ao invés da influência desse arco como um todo na dinâmica do processo de soldagem.

A tensão do arco é dada por:

$$U_A = U_0 + R_A I + E_A L_A \quad (23)$$

onde:

E_A	Fator de comprimento do arco	$[V/m]$,
L_A	Comprimento do arco	$[m]$,
R_A	Resistência do arco	$[\Omega]$,
U_0	Constante de tensão do arco	$[V]$.

O comprimento do arco é dado por:

$$L_A = L_{CTW} - L_{SO} \quad (24)$$

relembrando que o L_{SO} é dado por:

$$L_{SO} = L_D + L_E + h \quad (25)$$

Retornando à tensão do arco, pode-se escrever esse parâmetro como:

$$U_A = U_0 + R_A I + E_A (L_{CTW} - L_{SO}) \quad (26)$$

A constante U_0 representa as zonas carregadas do ânodo e cátodo, assim omite-se os termos que representariam a queda de tensão dada por essas regiões separadamente e é conhecida como constante de tensão do arco.

Ainda, quanto maior for a corrente elétrica que flui pelo arco, maior o número de colisões dos elétrons dentro da região da coluna do arco e consequentemente maior a queda de tensão no arco formado [166]. Essa queda de tensão é representada pela resistência R_A .

Essas colisões de elétrons explicam a relação entre o comprimento do arco e a sua tensão, pois quanto maior for o arco, maior será o caminho percorrido pelos elétrons e íons, com isso maior a probabilidade de ocorrer colisões e como dito, quanto mais colisões maior a tensão do arco.

3.1.5 Comportamento do Eletrodo Sólido no Bico de Contato

O comprimento do eletrodo em estado sólido L_E varia pela diferença entre a velocidade de alimentação do arame V e a taxa de fusão do eletrodo M_R .

Assumindo que o eletrodo possui volume cilíndrico e que sua densidade é uniforme independentemente da variação de temperatura, então pode-se calcular o L_E por (27) enquanto estiver em estado sólido, pois quando o eletrodo passa do estado sólido para o estado líquido assumido forma esférica devido ao efeito da tensão superficial que age entre as fases, conforme citado anteriormente.

Assim, têm-se a seguinte expressão [123, 135]:

$$\frac{dL_E}{dt} = V - \frac{M_R}{\pi R_E^2} \quad (27)$$

3.1.6 Taxa de Fusão do Eletrodo

A taxa de fusão do eletrodo é dada pela relação das variáveis de entrada determinam a transferência de calor ou aporte térmico H , a resistência do arco R_A , a taxa de deposição metálica R_M e a taxa fusão do arame M_R [131, 167].

Em (28) é mostrado o aporte térmico, já em (31) é mostrada a taxa de deposição do material fundido e em (32) é mostrado a resistência do arco.

$$H = \frac{\eta P_S}{V_W} \quad (28)$$

Como a fonte de calor é o arco, então a energia do calor pode ser reescrita como (29).

$$H = \frac{U_{SO} I}{V_W} \quad (29)$$

Então, pode-se afirmar que as equações que representam o calor do arco [167], são dadas de (30) a (32).

$$H = \frac{\eta I (U_{SO} + U_A)}{V_W} \quad (30)$$

$$R_M = \frac{M_R}{V_W} \quad (31)$$

sendo a resistência do arco dada por:

$$R_A = \frac{U_A}{I} \quad (32)$$

onde:

H	Aporte térmico	$[J/m]$,
I	Corrente de soldagem	$[A]$,
P_S	Potência entregue pela fonte de energia	$[W]$,
R_M	Taxa de deposição metálica	$[kg/m]$,
U_{SO}	Tensão do <i>stick-out</i>	$[V]$,
V_W	Velocidade de soldagem	$[m/s]$,
η	Eficiência da transferência de calor	$[\%]$.

Segundo [131], valores típicos do fator de eficiência η para GMAW variam de 0,66 à 0,85.

A corrente de soldagem I que atravessa o arco de solda é o elemento gerador de calor para derreter o eletrodo. Segundo [22, 123, 187], a taxa de fusão do arame M_R é dada por (33).

$$M_R = C_1 I + C_2 L_E \rho_e I^2 \quad (33)$$

onde:

- C_1 Constante associada ao aquecimento da poça de fusão pelo arco elétrico $[m^3/As]$,
 C_2 Constante associada ao aquecimento da poça de fusão pelo efeito Joule $[m^3/VAs]$.

Ainda, foi visto em [10, 166, 170] que a taxa de fusão do eletrodo também pode ser dada em função da velocidade de fusão do eletrodo. Ou seja:

$$M_R = \pi R_E^2 V_m \quad (34)$$

onde a velocidade de fusão do eletrodo V_m é dada por:

$$V_m = C_3 I + C_4 L_E I^2 \quad (35)$$

onde:

- C_3 Constante associada a velocidade de fusão ao aquecimento da poça de fusão pelo arco elétrico $[m/(As)]$,
 C_4 Constante associada a velocidade de fusão ao aquecimento da poça de fusão pelo efeito Joule $[1/(A^2s)]$,
 V_m Velocidade de fusão do eletrodo $[m/s]$.

As constante C_3 e C_4 podem ser calculadas através de (36) e (37) [10, 32, 188], respectivamente.

$$C_3 = \frac{U_A}{\sigma_e A_e H} \quad (36)$$

$$C_4 = \frac{\rho_e}{\sigma_e A_e^2 H} \quad (37)$$

onde:

- A_e Seção transversal do eletrodo [m].

Vale ressaltar que essas equações também são válidas para a transferência de massa por curto-circuito, entretanto no momento do curto-circuito, o primeiro termo de (35) é zerado, pois o arco é extinto [10].

3.1.7 Dinâmica do Motor do Alimentador de Arame

Também foi considerada a dinâmica do motor do alimentador de arame. Entretanto, essa dinâmica foi considerada de forma simplificada, pois o comportamento mecânico do motor é predominante ao comportamento elétrico. Ou seja, quando a indutância de armadura é muito pequena, então a constante de tempo elétrica pode ser considerada desprezível em relação a constante de tempo mecânica.

Assim, baseado em modelos como dos trabalhos [122, 124, 134, 135], o comportamento do motor de corrente contínua do alimentador de arame é dado por (38). A modelagem completa desse motor é facilmente achada na literatura, devido à isso, não foi inserida seu desenvolvimento, somente mostrado o modelo simplificado que foi utilizado.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau_m}(K_m U_{ARM} - V) \quad (38)$$

onde:

K_m	Ganho em regime permanente do motor	$[m/(Vs)]$,
U_{ARM}	Tensão de armadura do motor	$[V]$,
τ_m	Constante de tempo mecânica do motor	$[s]$.

3.1.8 Modelo da Transferência por Voo Livre

Para simplificar o comportamento da formação da gota, assume-se as seguintes hipóteses como verdadeiras e que o processo de soldagem é estável, assim como [167]:

- A fase de arco termina quando o comprimento de *stick-out* for maior ou igual a distância entre o bico de contato e o metal base, ou seja, $L_{SO} \geq L_{CTW}$;
- O raio do volume inicial da gota é igual ao raio do eletrodo;
- O volume da gota aumenta esfericamente em relação a diferença de velocidade de alimentação do arame V e a taxa de fusão do eletrodo M_R ;
- A densidade do eletrodo σ_e permanece constante diante de variações de temperatura;

As variáveis de estados escolhidas para equacionar o modelo matemático da formação da gota na ponta do eletrodo na fase de arco são:

x_1	Deslocamento da gota na ponta do eletrodo	$[m]$,
x_2	Velocidade da gota	$[m/s]$,
x_3	Corrente de soldagem	$[A]$,
x_4	Comprimento do eletrodo em estado sólido	$[m]$,
x_5	Massa da gota	$[kg]$,
x_6	Velocidade de alimentação do arame	$[m/s]$.

As entradas dos modelos são:

u_1	Tensão da fonte	$[V]$,
u_2	Tensão do motor do alimentador de arame	$[V]$,
u_3	Distância entre bico de contato e peça	$[m]$.

As saídas dos modelos são a corrente de soldagem e a tensão do arco elétrico, que são dinâmicas que caracterizam de forma clara os modos de transferência metálica. Além disso, essas dinâmicas são mensuráveis pelo sistema de aquisição montado, para aquisitar resultados experimentais.

y_1	Corrente de soldagem	$[A]$,
y_2	Tensão do arco	$[V]$.

Então:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (39)$$

De (17) e (19), define-se x_2 :

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{x_5} (F_G + F_{EM} + F_A + F_m - F_V - F_\gamma - K_D x_1 - B_D x_2) \quad , \quad x_2 > 0 \quad (40)$$

Substituindo (22) e (26) em (21) e reorganizando para que a $\dot{I}$ esteja isolado, têm-se:

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = \frac{1}{L_S} [u_1 - (R_S + R_A)x_3 - U_0 - E_A(u_3 - x_4)] + \\ - \frac{1}{L_S} \left[\left(x_1 + x_4 + \left(\frac{3x_5}{4\pi\sigma_e} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \rho_e x_3 \right] \end{aligned} \quad (41)$$

Para x_4 , faz-se a substituição de (33) em (27), obtendo-se:

$$\dot{x}_4 = x_6 - \frac{C_1 x_3 + C_2 \rho_e x_4 x_3^2}{\pi R_E^2} \quad (42)$$

Para expressar a massa é utilizada a taxa de fusão do eletrodo, pois a taxa de fusão representa a velocidade de deposição mássica do eletrodo à poça de fusão. Sendo assim, x_5 é dado por:

$$\dot{x}_5 = (C_1 x_3 + C_2 \rho_e x_4 x_3^2) \sigma_e \quad (43)$$

E de (38), têm-se:

$$\dot{x}_6 = \frac{K_m u_2 - x_6}{\tau_m} \quad (44)$$

As entradas e saídas do modelo são mostradas em (45) e (46), respectivamente

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_S \\ U_{ARM} \\ L_{CTW} \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ U_A \end{bmatrix} \quad (46)$$

3.2 Modelagem da Transferência Metálica por Curto-Circuito

Se o eletrodo toca a poça de fusão por intermédio da gota, imediatamente a fase de arco é encerrada e a fase de curto-circuito é iniciada. Ou seja, o início do curto-circuito ocorre quando a gota fundida toca à peça e forma uma ponte com o eletrodo que permanece sólido no bico de contato.

A fase de curto-circuito é inerentemente instável, devido aos repetidos eventos de extinção e reignição do arco [107]. Essa fase ocorre somente em duas ocasiões: quando a transferência metálica é dada por curto-circuito ou por modo misto que ocorra contato aleatório. Ou seja, quando na transferência metálica hora a transferência é dada por voo livre (globular ou goticular) e hora é dada por curto-circuito.

A fim de simplificar a modelagem da fase de curto-circuito assume-se que quando há o evento do curto-circuito, então a transferência de massa ocorre exclusivamente nesta

fase. Para tal, são admitidas verdadeiras as seguintes hipóteses assim como assumidas em [29, 102, 132].

- A área de contato entre a gota em estado líquido e a poça de fusão é igual a área do eletrodo;
- O formato geométrico da gota líquida que une o eletrodo e a poça é esférico;
- A evolução do volume da gota é proveniente do efeito *Pinch* e da lei de *Laplace–Young*;
- A superfície da poça de fusão permanece plana ao longo do processo de soldagem;
- A transferência de massa é estável;
- A velocidade de fluxo dentro da ponte e a pressão dentro da poça de fusão são negligenciadas.

A Figura 13 ilustra a evolução esperada da transferência de massa, assumindo a hipótese de que a evolução do volume da gota é determinada pelo efeito *Pinch*.

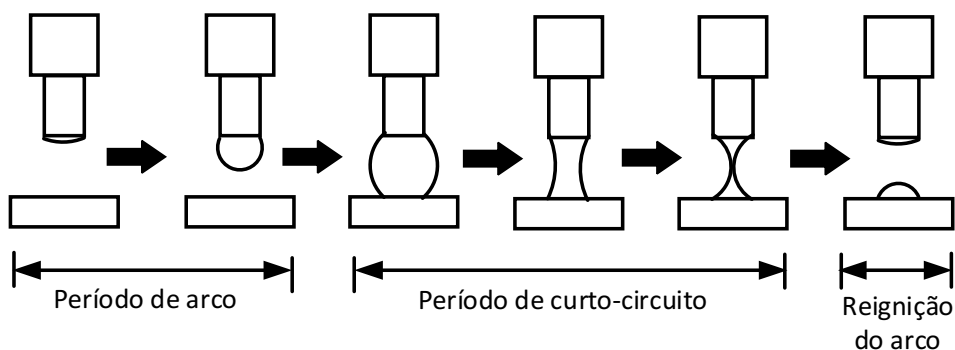


Figura 13: Evolução da transferência metálica por curto-circuito, enfatizando os períodos de arco e curto-circuito.

Na fase de curto-circuito o comprimento do *stick-out* é igual a distância do bico de contato e o metal base, ou seja, $L_{SO} = L_{CTW}$. Assim, os parâmetros do arco elétrico como seu comprimento, resistividade e tensão são nulos, pois não há arco [189]. A Figura 14 contempla o diagrama da fase de curto-circuito.

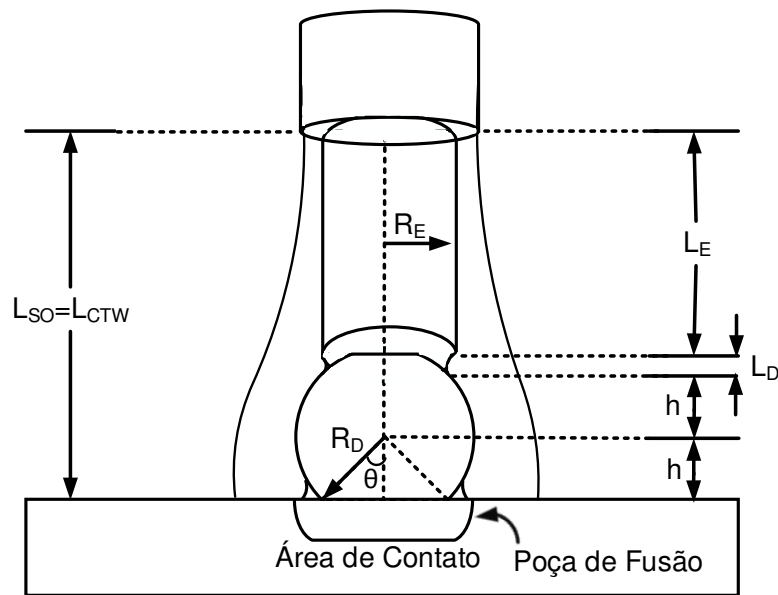


Figura 14: Diagrama da fase de curto-circuito.

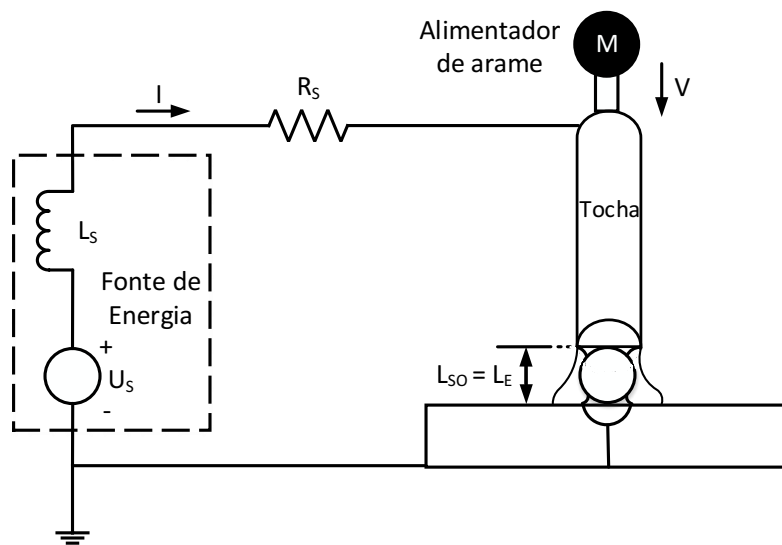


Figura 15: Circuito equivalente da fase de curto-circuito.

3.2.1 Circuito Elétrico Equivalente da Fase de Curto

Assim como foi feito na fase de arco, a fase de curto é representada através de um circuito elétrico para sua análise. A Figura 15 mostra o circuito equivalente desta fase.

Aplicando-se a lei de *Kirchoff* no circuito da Figura 15, obtêm-se:

$$U_S = L_S \frac{dI}{dt} + (R_S + R)I \quad (47)$$

sendo que R é a resistência equivalente à soma das resistências do eletrodo em estado sólido, deslocamento da gota e do comprimento da gota que faz a ponte entre a poça de fusão e o eletrodo sólido. O comprimento dessa ponte é equivalente a $2h$.

3.2.2 Velocidade de Transferência de Massa na Fase de Curto-Circuito

A pressão média no centro da gota P_D é determinada pela pressão gerada pelo efeito *Pinch* em função do raio da ponte (ou raio menor como é tratada em algumas literaturas) da massa transferida R_1 , juntamente com a pressão gerada pela tensão superficial da gota em função dos raios menor e maior da massa transferida [131, 167].

A Figura 16 ilustra os raios da transferência de massa, onde o R_1 é o raio da ponte formada entre o eletrodo sólido e a poça de fusão e R_2 é o raio determinado pelo volume e altura da ponte. Matematicamente, esses raios são os raios principais de uma curvatura e pertencem a planos perpendiculares entre si. Nesse caso a curvatura é a ponte que pode ser aproximada a uma cilindro, com isso R_2 tende ao infinito, considerando que o mesmo é muito maior que R_1 [190]. Quando esses raios alcançam seu comprimento mínimo possuem o mesmo tamanho, que é igual ao raio do eletrodo [170].

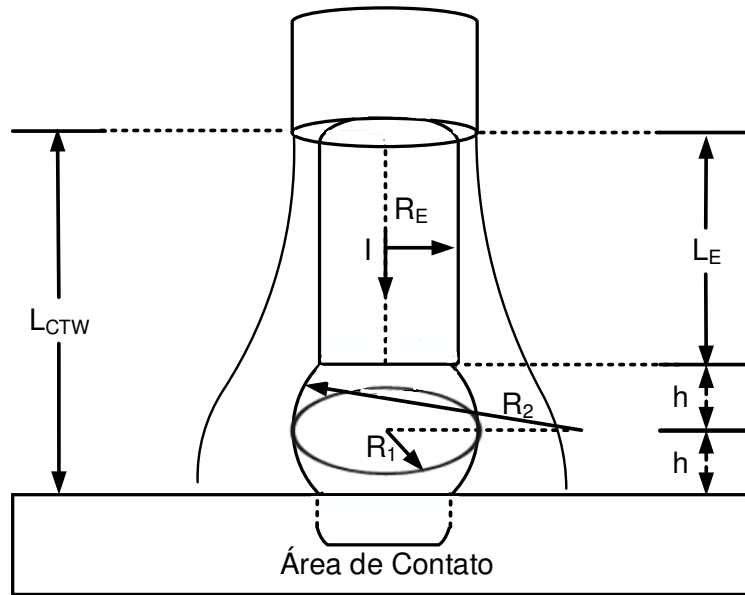


Figura 16: Raios dominantes da transferência metálica por curto-circuito.

O efeito *Pinch* pode ser considerado como uma força de constrição sobre o eletrodo. Essa força surge devido a formação do campo magnético gerado pelo fluxo de corrente que atravessa o eletrodo e é direcionada para o centro do eletrodo, através da força de *Lorentz*.

A equação (48) evidência essas relações e em (49) é mostrado o efeito da Lei de Laplace [60, 191], ou Lei de Laplace–Young, como também é conhecida. Essa lei relaciona

a variação de pressão na superfície que separa dois fluídos de naturezas distintas com as forças de ligação molecular.

$$P_{pinch} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_1^2} \quad (48)$$

$$P_\gamma = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (49)$$

onde:

R_1 Raio menor da massa transferida [m],

R_2 Raio maior da massa transferida [m].

Com isso, P_D é dado por:

$$P_D = P_{pinch} + P_\gamma \quad (50)$$

ou seja:

$$P_D = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_1^2} + \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (51)$$

A velocidade de transferência de massa V_M é obtida aplicando-se a equação de *Bernoulli* na equação de P_D , mostrada em (51). Assim:

$$V_M = \sqrt{\frac{2}{\sigma_e} (P_D + \sigma_e g h \cos(\varphi))} \quad (52)$$

Como pode ser notado em (52), o ângulo da posição de soldagem φ também possui influência sobre a velocidade de transferência de massa.

A velocidade do fluxo entre o eletrodo e a poça de fusão V_F pode ser calculada pela equação de continuidade dos fluídos, que rege a conservação de volume de líquido que entra em uma região e flui para outra, assumindo que no caminho não haverá nenhum sumidouro.

Então, aplicando o princípio da continuidade dos fluídos, obtêm-se (54).

$$V_M(\pi R_1^2) = V_F(\pi R_E^2) \quad (53)$$

resultando em:

$$V_F = \frac{V_M R_1^2}{R_E^2} \quad (54)$$

As velocidades V_M e V_F são mostradas na Figura 17.

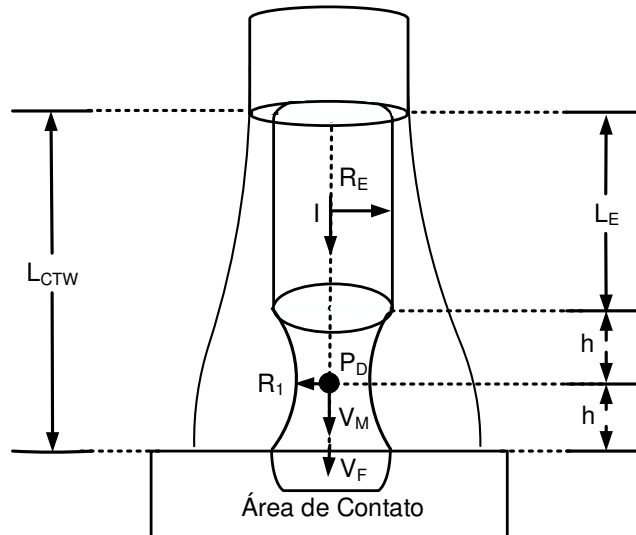


Figura 17: Velocidades associadas à transferência metálica durante um curto-circuito.

3.2.3 Forças envolvidas na Fase de Curto-Circuito

As forças que influenciam significativamente a transferência de massa durante o curto-circuito são somente algumas das mesmas forças envolvidas na formação da gota na fase de arco. Essas particularidades são ressaltadas a seguir.

Primeiramente, a força gravitacional age de forma equivalente em ambos os modos de transferência, ou seja, facilitando o destacamento da massa em fusão. Para o processo de soldagem linear, essa afirmação é consistente, entretanto, ressalta-se que para soldagem com transferência metálica por curto-circuito com posições sobre a cabeça, a força da gravidade se opõem à essa transferência, devido à localização da poça de fusão. Neste trabalho é estudado o caso de soldagem linear, então a força da gravidade contribui a transferência metálica.

A segunda força discutida é a tensão superficial F_γ . Essa força não exerce tanta influência durante o curto-circuito quanto exerce durante a transferência por voo livre. Entretanto, mesmo as forças de menor influência serão consideradas na simulação.

Em seguida, a força aerodinâmica, que é a força de arraste do jato de plasma, é questionada por alguns autores como [41, 184]. Esses autores alegam que essa força não influencia a transferência metálica por contato, ou influencia tão pouco à ponto de ser desconsiderada, sendo importante apenas na transferência por voo livre. Isto é fundamentado sobre a alegação que essa força é proveniente da diferença de pressão entre a região arco/gota e arco/peça [20], portanto não abrange o curto-circuito.

Já a força proveniente do momento é uma força mais influente na formação da gota, pois está associada à deslocamento do metal líquido, em espaço livre, na ponta do eletrodo sólido. Bem como a força dos jatos de vapor, que empurram a gota contra o eletrodo sólido em transferência por voo livre.

E finalmente a força eletromagnética, que também contribui a transferência metálica. O campo elétrico $\vec{E}$ tem origem na diferença de potencial entre as partículas internas à gota, enquanto a corrente de soldagem a percorre essa gota. Entretanto, a diferença de potencial entre essas partículas é muito pequena, considerada até mesmo desprezível [107, 167], pois o campo elétrico formado é tão pequeno que a força eletromagnética tende a ser nula durante os curtos-circuitos. Com isso a força governante nesse momento é a tensão superficial.

A Figura 18 mostra essas forças.

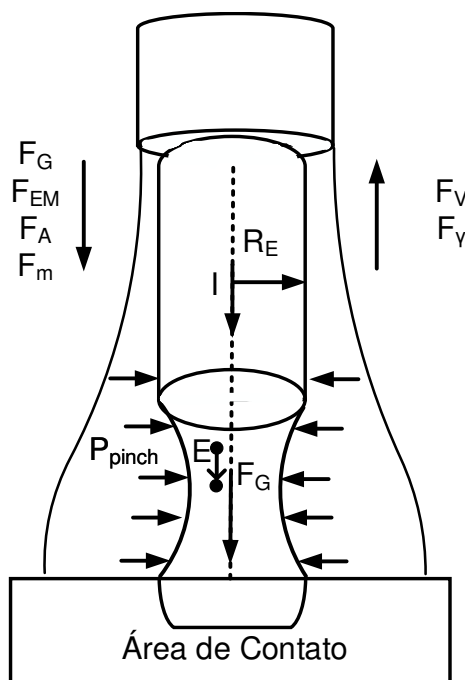


Figura 18: Forças atuantes na transferência metálica durante um curto-circuito.

3.2.4 Modelo da Fase de Curto-Circuito

As variáveis de estado utilizadas para equacionar o modelo matemático da transferência metálica por curto-circuito são as mesmas variáveis utilizadas para representar a transferência metálica por voo livre, bem como as entradas e saídas do modelo. Assim:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (55)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{x_5} (F_G + F_{EM} + F_A + F_m - F_V - F_\gamma) \quad , \quad x_2 > 0 \quad (56)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L_S} \left[u_1 - R_S x_3 - \left(x_1 + x_4 + \left(\frac{3x_5}{4\pi\sigma_e} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \rho_e x_3 \right] \quad (57)$$

$$\dot{x}_4 = x_6 - \frac{C_1 x_3 + C_2 \rho_e x_4 x_3^2}{\pi R_E^2} \quad (58)$$

$$\dot{x}_5 = \left(C_1 x_3 + C_2 \rho_e x_4 x_3^2 - \left[\pi R_1^2 \sqrt{\frac{2}{\sigma_e} (P_D + \sigma_e g h \cos(\varphi))} \right] \right) \sigma_e \quad (59)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{\tau_m} (K_m U_2 - x_6) \quad (60)$$

3.3 Discretização dos Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos propostos foram discretizados pelo método de *Euler*. Com esta discretização, as dinâmicas são simuladas em passos de tempo k , amostrados em uma taxa de amostragem T_s de $5kHz$.

O termo derivativo é discretizado da seguinte forma:

$$\dot{x}(t) = \frac{x(k) - x(k-1)}{T_s} \quad (61)$$

onde t é o tempo contínuo.

3.4 Critérios de Destacamento da Gota

Nesta seção será dada atenção para o fenômeno de destacamento da gota. Foram encontrados na literatura três critérios para simular o destacamento de material: SFBM (*Static Force Balance Model*), DFBM (*Dynamic Force Balance Model*) e PIT (*Pinch Instability Theory*).

Esses critérios são necessários para simular o destacamento da massa [166]. Isto é, são as condições para que ocorra a transferência metálica em cada modo de transferência metálica citado anteriormente. Nesta seção serão discutidos os 3 critérios mais utilizados e qual sua aplicabilidade mais adequada.

3.4.1 SFBM – *Static Force Balance Model*

O critério de destacamento da gota por SFBM é dado pela comparação do somatório das forças externas à tensão superficial exercidas na gota [192, 193]. Portanto, o SFBM não considera a dinâmica do pingente da gota, sendo o critério de destacamento dado pelo rompimento da massa exclusivamente se a força total exercida na gota superar a tensão superficial, ou seja, o destacamento ocorre se:

$$F_T > F_\gamma \quad (62)$$

Vale ressaltar que para utilização deste critério de destacamento é necessário remover a influência de F_γ da dinâmica de x_2 , caso contrária haverá incoerência nos resultados.

3.4.2 DFBM – *Dynamic Force Balance Model*

O DFBM é uma variação do SFBM, descrito em [194], que inclui a força oriunda da inércia no critério de destacamento. Essa modificação resulta na seguinte equação que condiciona o rompimento da gota:

$$F_T + m_d \ddot{L}_D > F_\gamma \quad (63)$$

Esse critério é o mais apropriado para transferência por modo globular, pois considera a dinâmica do pingente da gota, representando de forma mais verossímil a interação entre forças até o momento de destacamento.

Vale ressaltar que para utilização deste critério de destacamento, também é necessário remover a influência de F_γ da dinâmica de x_2 , caso contrária haverá incoerência nos resultados.

3.4.3 PIT – Pinch Instability Theory

Diferentemente dos critérios mostrados anteriormente o critério PIT é baseado no limite do raio da gota. Ou seja, se o raio da gota exceder um limite crítico em que há a retenção a gota, então a gota é destacada do eletrodo [195, 196]. Assim, têm-se:

$$R_D > R_{lim} \quad (64)$$

onde:

$$R_{lim} = \frac{\pi(R_D + R_E)}{1,25 \left(\frac{L_D + R_D}{R_D} \right) \sqrt{\left(1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 \gamma (R_D + R_E)} \right)}} \quad (65)$$

e o raio da gota, como já tinha sido mostrado anteriormente é dado por:

$$R_D = \sqrt[3]{\frac{3m_d}{4\pi\sigma_e}} \quad (66)$$

Esse critério de destacamento é plausível para simular as condições de destacamento de massa em processos à arco com transferência por curto-circuito, pois o efeito *Pinch* é muito forte nesses processos, devido às altas correntes e os critérios SFBM e DFMBM não levam em consideração esse fenômeno. Além disso, a consideração das dimensões do raio do volume transferido vão ao encontro às considerações do raio da ponte, utilizados para determinar o início e término da fase de curto-circuito, mencionado nas hipóteses assumidas no início da seção de modelagem da fase de curto-circuito.

Após o destacamento de massa, alguns autores consideram que parte desse eletrodo fundido permanece na ponta do eletrodo sólido, devido ao efeito *Pinch*. Nos trabalhos [131, 166, 197] foi mostrado um modelo para estimar o volume do material destacado para a poça de fusão, conforme (67).

$$V_d = \frac{m_d}{2\sigma_e} \left(1 + \frac{1}{1 + 10^{-\kappa V_D}} \right), \text{ com } \kappa = 100s/m \quad (67)$$

3.5 Condições de Reset

Para realizar as simulações adequadamente, é necessário tratar o destacamento da massa. Para tal, são consideradas as condições de *reset*, após o destacamento de cada gota, em modo globular, rompimento da ponte entre o eletrodo e a poça de fusão, em curto-circuito ou ambos, em modo misto globular/curto-circuito. Em outras palavras, é

dada uma condição de *reset* para as variáveis de estado dos modelos à cada vez que a solda é transferida para a poça de fusão. Foram utilizados dois critérios de *reset*: um para o modo globular e outro para o curto-circuito.

A condição de *reset* para o destacamento de massa por modo globular utilizado é uma combinação das condições de destacamento propostas nos trabalhos [131, 166, 168]. A condição resultante, a partir das equações discretas dos modelos, é mostrada a seguir:

$$x_1(k+1) = 0; \quad (68)$$

$$x_2(k+1) = 0; \quad (69)$$

$$x_3(k+1) = x_3(k) + \frac{u_2(k) - U_0 - E_a(L_{CTW} - x_4(k))}{R_a + R_s + R_l(k)} - \frac{u_2(k) - U_0 - E_a(L_{CTW} - x_4(k))}{R_a + R_s + R(k-1)} \quad (70)$$

$$x_5(k+1) = \frac{x_5(k)}{2} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-100 \cdot x_2(k)}} \right) \quad (71)$$

Apenas com essa condição de *reset*, algumas dinâmicas internas do modelo demonstraram incoerências com o que deveriam resultar, baseado em resultados consultados na literatura. Então, para melhor representação dessas dinâmicas também propôs-se o *reset* de x_4 , reduzindo parcialmente seu tamanho, pois sabe-se que eletrodo retrai após a transferência metálica tanto por modo globular, quanto curto-circuito [180]. Essa condição corrigiu adequadamente todas as dinâmicas internas e é mostrada a seguir:

$$x_4(k+1) = \frac{3}{4}x_4(k) \quad (72)$$

O valor de 75% do tamanho anterior é apenas uma aproximação, que fez os resultados simulados se aproximarem mais aos resultados experimentais. Indica-se a averiguação dessa influência mais detalhadamente em trabalhos futuros, que serão discutidos nas conclusões.

Por fim, a velocidade de alimentação de arame x_6 deve ser mantida, pois não é afetada pelo destacamento de massa. Isto é:

$$x_6(k+1) = x_6(k) \quad (73)$$

A condição de *reset* para o destacamento de massa por curto-circuito utilizado é uma combinação das condições de destacamento propostas nos trabalhos [131, 166, 168]. A condição resultante é mostrada a seguir:

$$x_1(k+1) = 0; \quad (74)$$

$$x_2(k+1) = 0; \quad (75)$$

$$x_3(k+1) = x_3(k) + \frac{u_2(k) - U_0 - E_a(L_{CTW} - x_4(k))}{R_a + R_s + R_l(k)} - \frac{u_2(k) - U_0 - E_a(L_{CTW} - x_4(k))}{R_a + R_s + R(k-1)} \quad (76)$$

$$x_5(k+1) = \frac{x_5(k)}{2} \left(1 + \frac{1}{1 + e^{-100 \cdot x_2(k)}} \right) \quad (77)$$

Assim como para o *reset* em modo globular, a dinâmica de x_4 também foi tratada da mesma forma.

$$x_4(k+1) = \frac{3}{4}x_4(k) \quad (78)$$

bem como a dinâmica de x_6 :

$$x_6(k+1) = x_6(k) \quad (79)$$

3.6 Modelo da Transferência Metálica por Modo Misto Globular/Curto-Circuito

Assim, têm-se dois modelos matemáticos que são interagidos para representar as fases do processo de soldagem MIG/MAG que pode ocorrer quando ajustado para a transferência de modo misto.

Ressaltando que a formação da gota ocorre durante a fase de arco, ou seja, enquanto o comprimento de *stick-out* for menor que a distância entre o bico de contato e o metal base, podendo ser destacada sem que ocorra o curto-circuito. A partir do momento em que esses comprimentos se igualam, ou seja, a distância entre a gota e a poça de fusão é nula, é iniciada a fase de curto-circuito e se mantém nessa fase enquanto o raio do volume de massa transferida for maior do que zero. Assim, a fase de curto-circuito somente acaba

quando a ponte entre o eletrodo e a poça de fusão é rompida. Foram considerados dois critérios para o destacamento de massa: o critério DFBM para a fase de arco e o critério PIT para a fase de curto-circuito.

A Figura 19 mostra a interação entre os modelos e os critérios de destacamento da massa e na Figura 20 são mostrados de forma compacta as variáveis de entrada e saída dos modelos desenvolvidos, bem como as dinâmicas do processo.

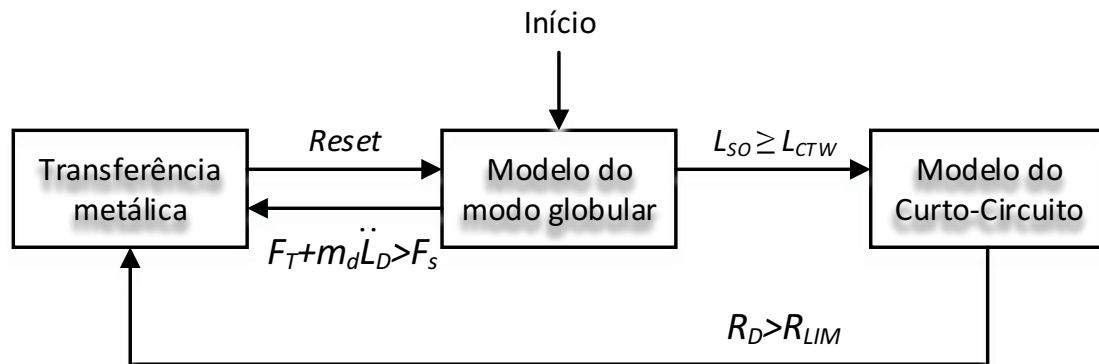


Figura 19: Diagrama de comutação entre os modelos matemáticos sujeitos aos critérios DFBM (para transferência metálica em modo globular) e PIT (para transferência metálica durante um curto-circuito) para representação da transferência metálica em modo misto globular/curto-circuito em processos MIG/MAG.

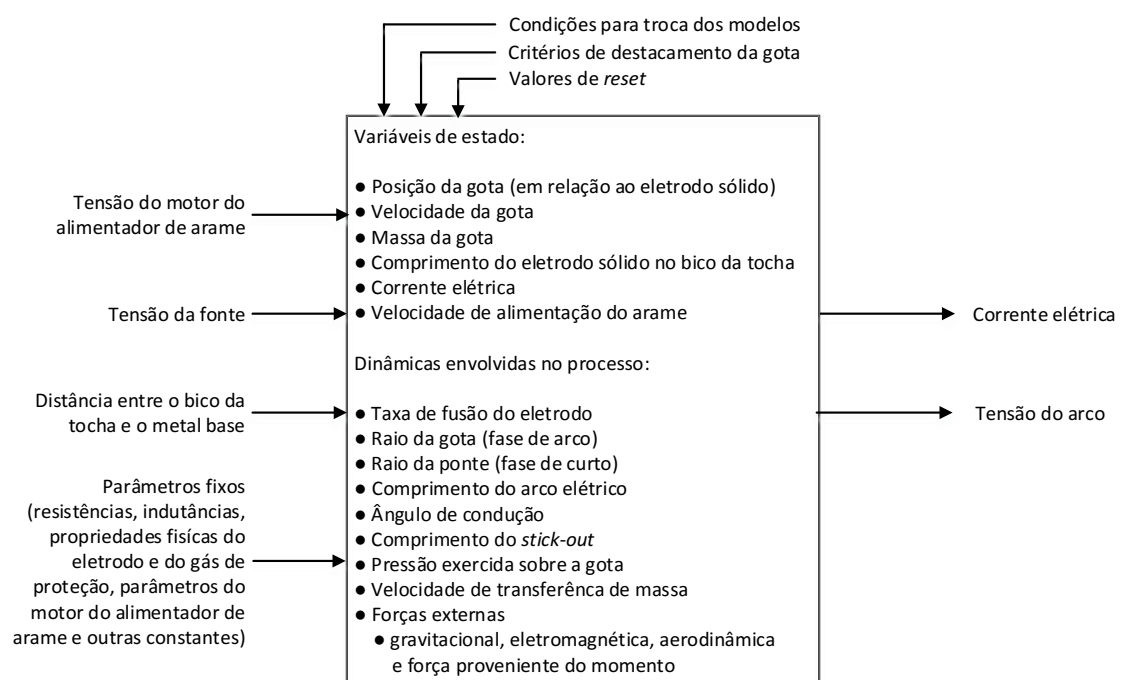


Figura 20: Relação dos parâmetros de entrada (à esquerda), dinâmicas internas (dentro do bloco) e saída (à direita) do modelo (representado pelo bloco) e as condições requeridas para comutação entre modelos, critérios de destacamento de massa e condição de *reset* das variáveis (acima) após cada destacamento de massa.

4 EQUIPAMENTOS E SENSORES

Neste capítulo serão mostrados os equipamentos utilizados nos experimentos de soldagem e o sistema de aquisição montado para captação de sinais das máquinas. Estes equipamentos serão utilizados para validação do modelo proposto e comparação de resultados obtidos em simulação com resultados experimentais. Informações adicionais sobre o equipamento de soldagem é mostrado no Anexo B. No Anexo C são indicados sugestões de *links* para os *datasheets* de todos equipamentos utilizados nos experimentos.

4.1 Equipamentos de Soldagem

Nessa seção será dado enfoque aos equipamentos de soldagem utilizados: fonte de soldagem, alimentador de arame e o robô de soldagem linear.

4.1.1 Fonte de Energia *Flextec 450*

A fonte de energia utilizada é uma *Flextec 450*, produzida pela *Lincoln Electric*. Esta fonte permite a realização de processos MIG/MAG, TIG *Tungsten Inert Gas*, FCAW e SMAW. A tensão de entrada desse equipamento é trifásica e pode ser 380, 440 ou 575V, com potência nominal de 60%. A faixa de corrente de soldagem de 10 à 500A e a faixa de tensão da fonte é, quando operando em tensão constante, de 10 à 45V nominais. A Figura 21 ilustra esse equipamento.

4.1.2 Alimentador de Arames LF-33

O alimentador de arames LF-33 ou *Linc Feed 33* é produzido pela *Lincoln Electric*. O alimentador tem a função fornecer o eletrodo consumível continuamente durante a soldagem. Essa máquina pode operar em ambientes fechados ou abertos, entretanto não deve ser posicionada em superfícies com inclinação superior à 15°. Em ambientes fechados deve haver circulação de ar no ambiente onde está localizada. A Figura 22 ilustra esse equipamento.



Figura 21: Fonte de energia Flextec 450.



Figura 22: Alimentador de arames LF-33.

O alimentador de arames LF-33 permite ajustar a velocidade de alimentação de 1 a $20\text{m}/\text{min}$ com resolução de $0,1\text{m}/\text{min}$ e permite que o diâmetro do arame sólido seja de

0,6 a 1,6 mm e do arame tubular de 1,2 a 2,4 mm.

4.1.3 Robô de Soldagem BUG-O

O robô de soldagem linear utilizado foi o BUG-O MDS, produzido pela *Weld Tooling Corporation*. Esse robô é modular, o que permite a configuração de acordo com a aplicação. Além disso é portátil e flexível. Neste estudo, esse robô foi utilizado para manter a distância entre bico de contato e peça, bem como a velocidade de deslocamento da tocha constantes.

4.2 Sistema de Aquisição

Nesta seção serão mostrados os sensores que compõe o sistema de aquisição de tensão, corrente e velocidade do arame, bem como a fonte simétrica de alimentação construída para esses sensores.

4.2.1 Transdutor de Corrente LEM HTR 500-SB

Para medição da corrente de soldagem foi utilizado o transdutor de corrente por efeito *Hall* HTR 500-SB, produzido pela LEM. Esse transdutor mede correntes contínuas, alternadas e pulsadas com isolamento galvânica entre o circuito primário (de potência) e o circuito secundário (circuito eletrônico). A Figura 23 mostra esse equipamento.



Figura 23: Transdutor de corrente HTR 500-SB.

A corrente nominal medida no primário é de até 500 A, com *range* de medida de até ± 1000 A. Essa medida é convertida para uma saída entre ± 4 V. A tensão de alimentação desse transdutor é de $\pm 12 \dots 15$ V e consome uma corrente máxima de 20 mA. A Figura 24

mostra os pinos desse equipamento.

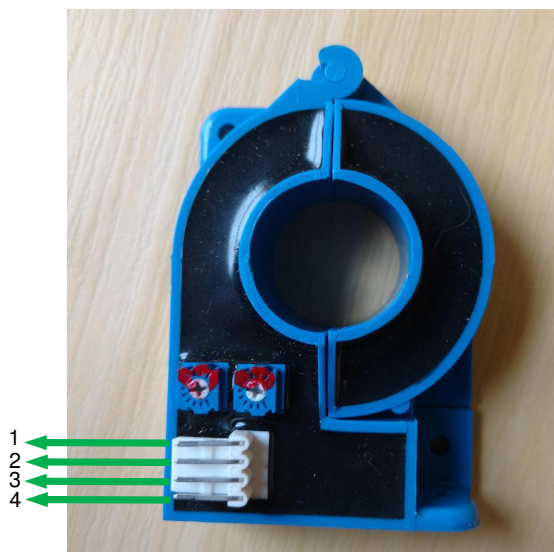


Figura 24: Pinos do transdutor de corrente HTR 500-SB.

Os terminais enumerados de 1 à 4 correspondem à tensão de entrada de $+12...15V$, $-12...15V$, saída de $\pm 4V$ e $0V$, respectivamente. A disposição desse transdutor no sistema de aquisição é mostrado na Figura 25 e a calibração é mostrada no Apêndice B.

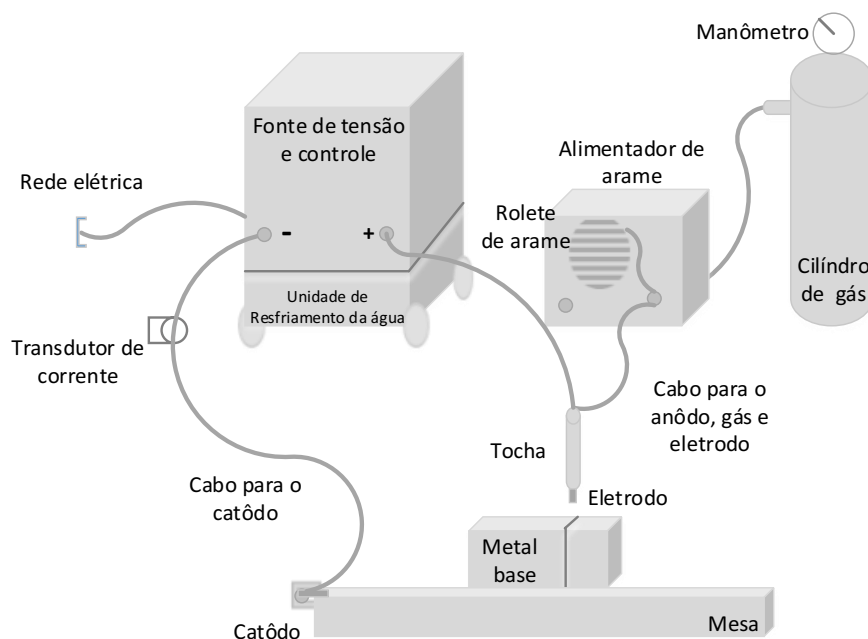


Figura 25: Disposição do transdutor de corrente no sistema de aquisição.

4.2.2 Transdutor de Tensão LEM DVL 250

Para medida da tensão do arco foi utilizado o transdutor de tensão DVL 250, também produzido pela LEM. Esse transdutor mede tensão contínua, alternada e pulsada com isolamento galvânica entre os circuitos primários e secundário. A Figura 26 mostra esse equipamento.

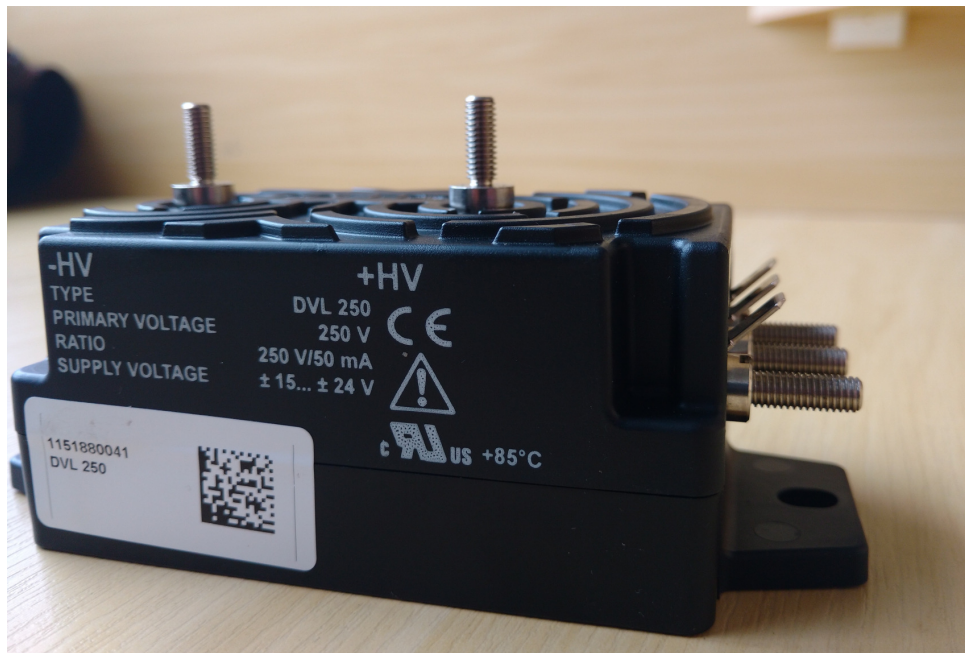


Figura 26: Transdutor de tensão DVL 250.

A tensão de alimentação desse transdutor é de $\pm 15V$ até $\pm 24V$ e mede até $375V$. A saída desse transdutor é de $\pm 75mA$. O erro de linearidade informado no *datasheet* é de no máximo $\pm 0,02\%$ de $250V$ à temperatura de 25° e a corrente de *offset* é de $50\mu A$. A Figura 27 mostra as conexões desse equipamento.

Na Figura 27, adaptada do *datasheet* desse transdutor, é mostrado os terminais $+HV$ e $-HV$, que representam os terminais de entrada da alta tensão e M é o terminal de saída seguido de um resistor R_m . A corrente de medida no secundário I_s será positiva se o terminal de alta tensão estiver ligado adequadamente, ou seja, no terminal $+HV$. A linha tracejada representa a barreira de isolamento galvânica. A disposição desse transdutor no sistema de aquisição é mostrada na Figura 28 e a calibração é mostrada no Apêndice C. Uma comparação das medidas aquisitadas com ambos os transdutores e um sistema comercial é mostrada no Apêndice D.

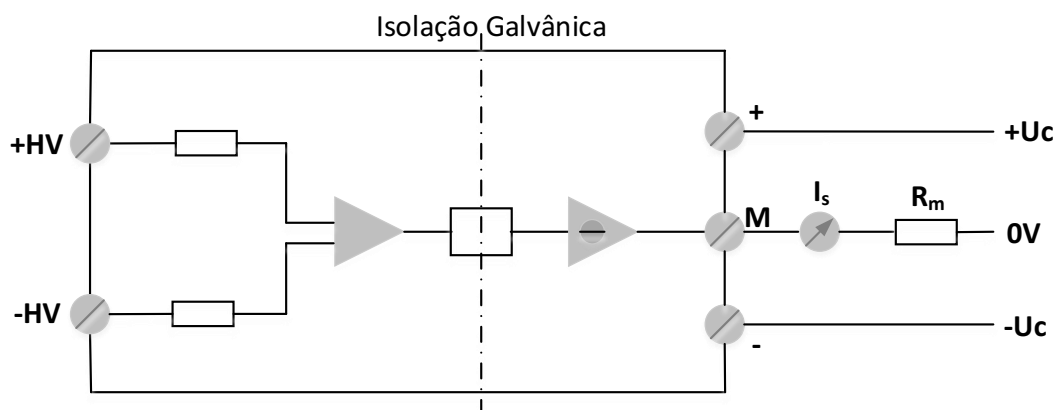


Figura 27: Conexões do transdutor de tensão DVL 250.

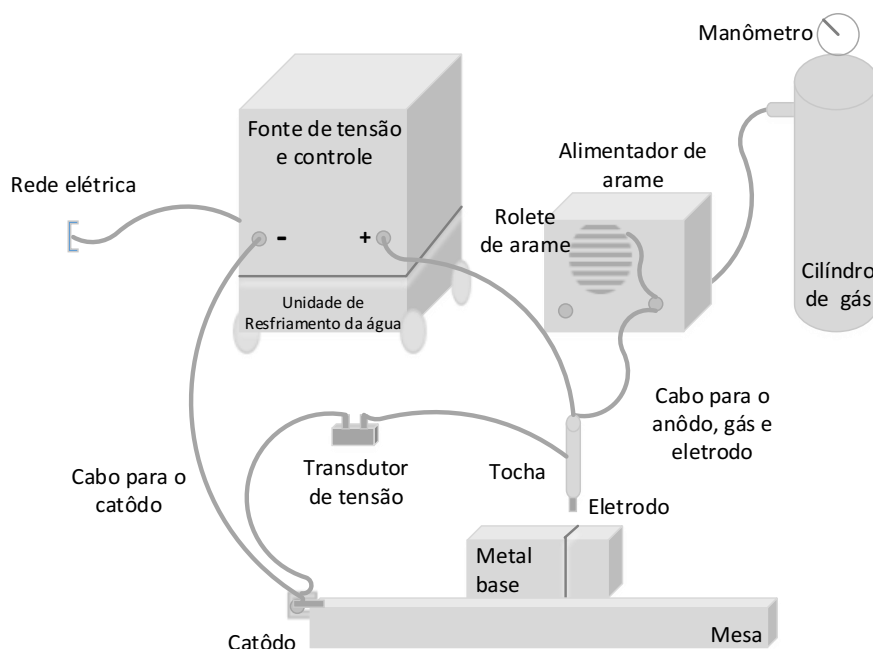


Figura 28: Disposição do transdutor de tensão no sistema de aquisição.

4.3 Fonte Simétrica de Alimentação

Para alimentar os transdutores de tensão e corrente foi construída uma fonte simétrica de alimentação. Essa fonte é responsável por produzir uma tensão estabilizada e contínua na saída, fornecendo $\pm 12V$ para o transdutor de corrente e $\pm 21V$ para o transdutor de tensão.

O transformador obtém $110V$ da rede elétrica no primário e rebaixa essa tensão no secundário para $15 + 15V$, estas tensões são retificadas por uma ponte retificadora, mostrada na Figura 29. Essa retificação é realizada para que tensões simétricas sejam atingidas em relação à saída do transformador, ou seja, um sinal de corrente alternada é

modificado em corrente contínua impedindo que haja mudança de sentido de fluxo de corrente elétrica.

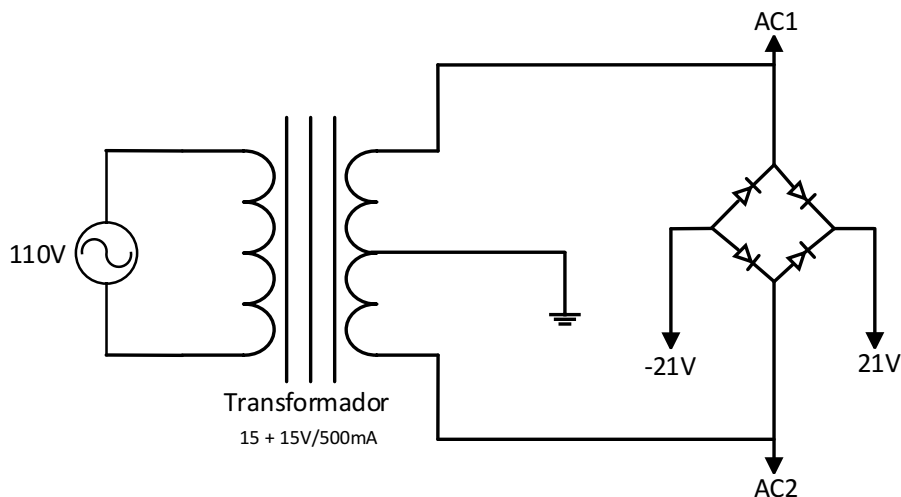


Figura 29: Diagrama do transformador com ponte retificadora.

A filtragem da tensão retificada é realizada por dois capacitores, um eletrolítico de $2200\mu F/25V$ e outro cerâmico de $100nF$. Já a regulação das tensões é feita por circuitos integrados chamados de reguladores de tensão.

A série 78 e 79 são comumente utilizadas para esta finalidade. O circuito integrado (CI) da linha 78 é aplicado em saídas positivas, conforme ilustrado na Figura 30 e o CI da linha 79 é aplicado em saídas negativas conforme ilustrado na Figura 31, com objetivo de se obter uma fonte simétrica de $12V_{cc}$.

Na saída dos reguladores existe um capacitor eletrolítico de $470\mu F/25V$, que serve para desviar possíveis ruídos.

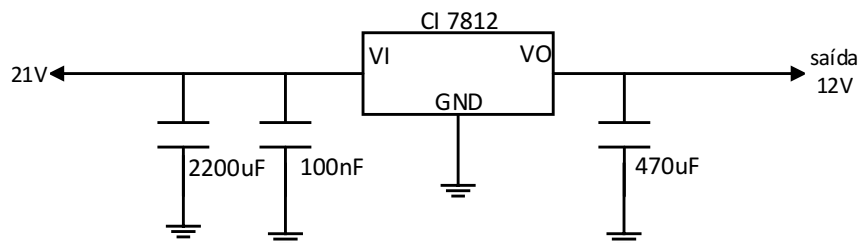


Figura 30: Diagrama do regulador de tensão 7812.

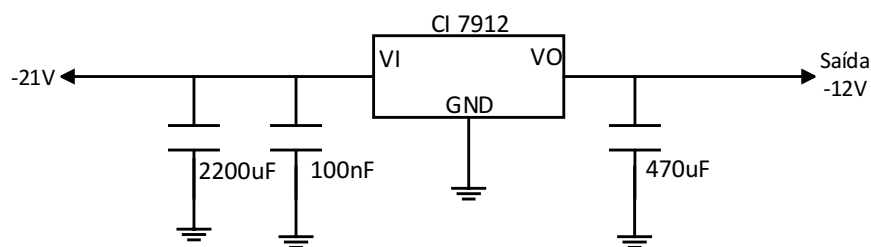


Figura 31: Diagrama do regulador de tensão 7912.

Foram utilizados os seguintes materiais para construção dessa fonte simétrica de alimentação:

- 1x Transformador de $15 + 15V/500mA$;
- 1x Ponte Retificadora Modelo MIC RS507;
- 1x CI 7812;
- 1x CI 7912;
- 2x Capacitores eletrolíticos de $2200\mu F/25V$;
- 2x Capacitores eletrolíticos de $470\mu F/25V$;
- 2x Capacitores cerâmicos de $100nF$;
- 3x Bornes.

Para construção apropriada da fonte foi desenvolvido o *layout* da placa, mostrado na Figura 32, no *software Proteus*, onde foi possível a visualização da construção tridimensional (3D) da fonte, mostrada na Figura 33.

Portanto, as características da fonte construída são:

- Tensão de entrada: $110VCA$;
- Tensões de saída: $\pm 12VCC$ e $\pm 21VCC$;
- Corrente máxima: $1A$ (Fornecido pelos reguladores de tensão).

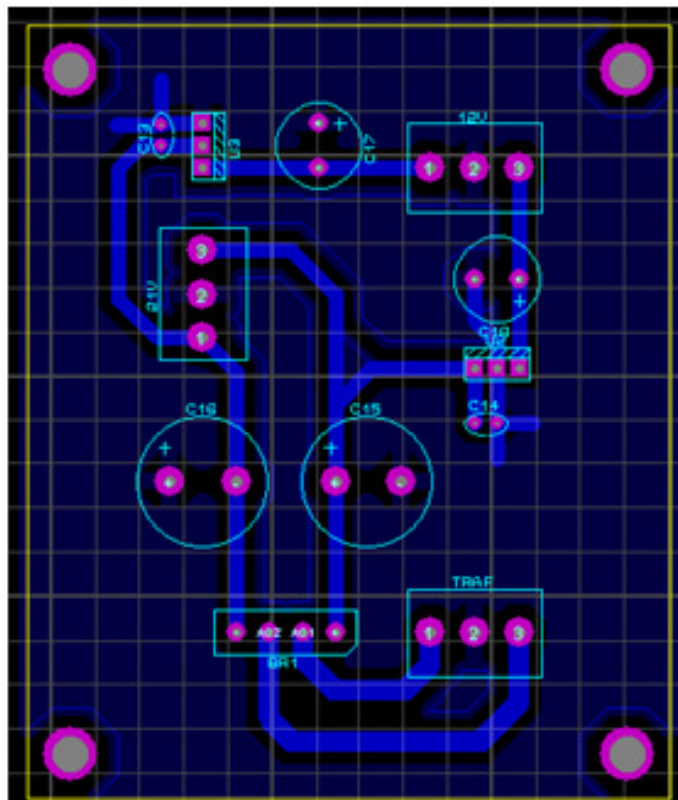


Figura 32: *Layout* do circuito da fonte simétrica.

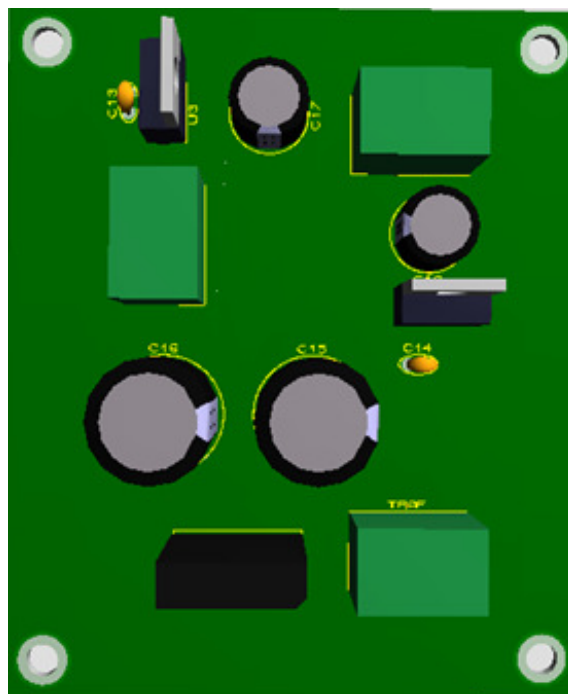


Figura 33: *Layout 3D* do circuito da fonte simétrica.

A fonte construída está ilustrada na Figura 34.

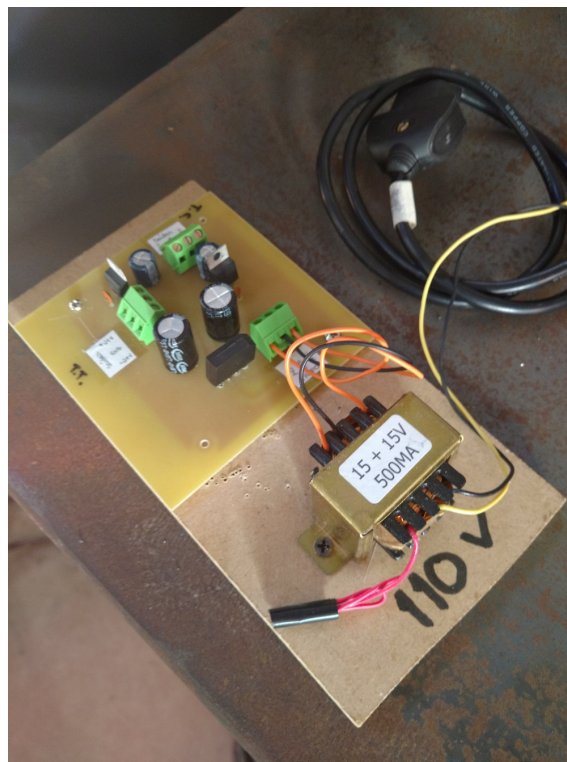


Figura 34: Fonte simétrica de alimentação construída.

4.4 Sensor de Velocidade do Arame

Para construção do sensor de velocidade do arame foi utilizado um *encoder* incremental E30 A1 A200 P–P, produzido pela S&E Instrumentos. Esse *encoder* possui resolução de 200 pulsos por volta e tem 3 canais.

Além disso, possui um eixo frontal com 22mm de comprimento e 8mm de diâmetro. Não possui retentor de vedação e possui grau de proteção IP60. Também vem com cabo de 2m acoplado à saída. A Figura 35 mostra esse *encoder*.

A carcaça do sensor de velocidade foi confeccionado por terceiros no LAPES (Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem), desta instituição. A Figura 36 mostra esse sensor já acoplado no alimentador de arame.

Um sistema com dois eixos girantes foi projetado e um dos eixos foi acoplado ao *encoder* enquanto o outro foi acoplado acima do eixo do *encoder*. Além disso, uma mola também inserida ao eixo cônico, com a finalidade de pressionar esse eixo ao arame, evitando que o arame não deslize.



Figura 35: *Encoder* utilizado no sensor de velocidade.

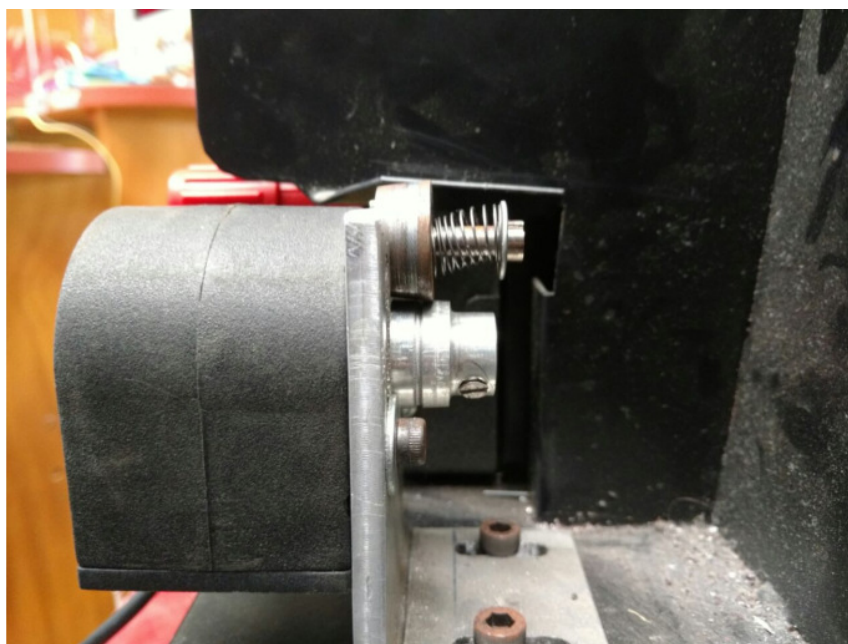


Figura 36: Sensor de velocidade acoplado no alimentador de arame.

A leitura da velocidade de alimentação do arame é dada da seguinte maneira: conforme o motor empurra o arame, o eixo do *encoder* é girado, gerando pulsos na saída do *encoder*. Esses pulsos são tratados por uma placa de prototipagem *Arduino*. A calibração desse sensor é mostrada no trabalho [198].

4.5 Microcontrolador Arduino Due

O microcontrolador utilizado foi o *Arduino Due*, que é baseado no Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU, de 32 *bits*. Essa placa possui núcleo com *clock* de 84MHz, memória *flash* de 512KB, acrescentado 96 KBytes de SRAM e controlador DMA (*Direct Memory Access*) que pode substituir a CPU em tarefas com uso intensivo de memória.

Além disso, possui 54 pinos de entrada e saída, dos quais 12 podem ser utilizados como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*), 12 entradas analógicas e 2 saídas analógicas. A alimentação dessa placa é de 3,3V.

A Figura 37 mostra o microcontrolador utilizado.

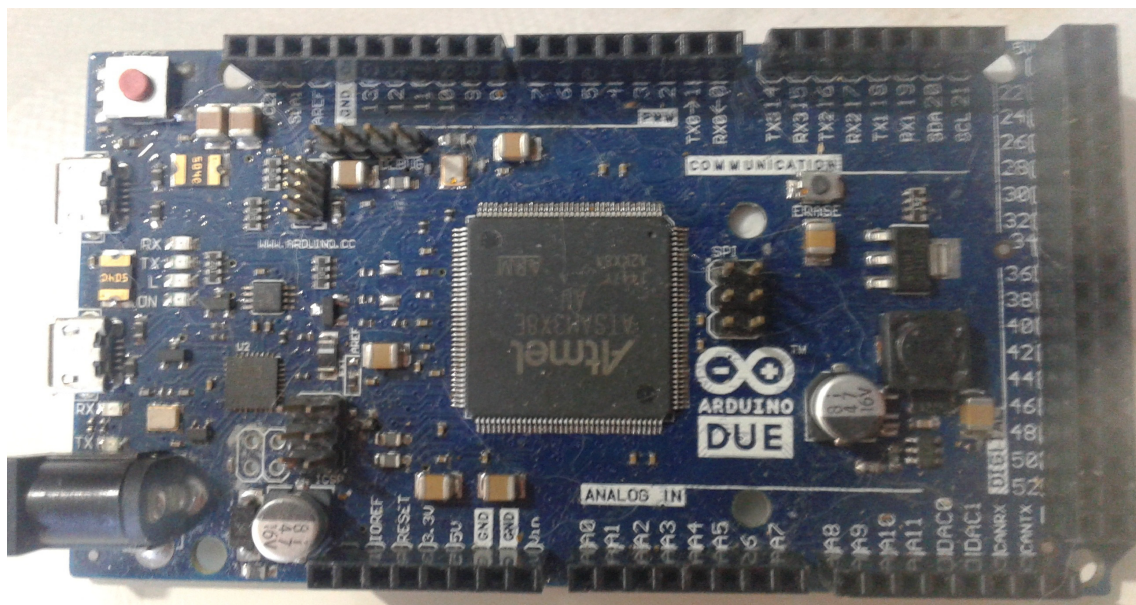


Figura 37: Microcontrolador Arduino DUE.

5 IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

Este capítulo é dedicado a mostrar os ensaios realizados em laboratório e os cálculos feitos para a identificação dos parâmetros necessários para validar o modelo, através de comparações de simulações e resultados práticos, que serão mostradas no capítulo 7. A disposição dos transdutores para aquisição dos sinais de corrente e tensão foi mostrada no capítulo anterior e a taxa de aquisição foi de $5kHz$. Os ensaios para calibração dos transdutores de corrente e tensão são mostrados nos Apêndices A e B, respectivamente. Em seguida, no Apêndice C é mostrada uma comparação das medidas obtidas pelo sistema montado e um sistema comercial.

Ressalta-se que a identificação dos parâmetros para validação dos modelos será feita com o uso de CO_2 puro, pois é o gás de proteção que causa mais irregularidades durante a transferência metálica no processo de soldagem. Assim, tornando o ajuste de parâmetros ainda mais sensível. Com isso, assume-se que se o modelo proposto consegue representar o processo mesmo quando utilizado o gás que o torna mais susceptível à incertezas, então esse modelo também representará adequadamente o processo de soldagem com gases menos influentes na transferências de massa.

5.1 Parâmetros do Eletrodo

O eletrodo utilizado para realizar a solda foi arame de aço Carbono AWS ER70S-6 com $1,2mm$ de diâmetro. Entretanto foi verificado se esse valor do diâmetro era mantido ao longo do eletrodo. Para tal, foi retirado $1m$ de eletrodo do rolo e foram realizadas medições em 15 pontos diferentes com um micrômetro. A média dessas medições foi de $1,18mm$. Logo, o raio do eletrodo é de:

$$R_E = 0,59 \text{ mm} \quad (80)$$

De posse do valor do diâmetro, a densidade do eletrodo foi obtida através da aplicação da fórmula de densidade:

$$\sigma = \frac{m}{V} = \frac{m}{AL} = \frac{m}{\pi r^2 L} \quad (81)$$

onde:

A	Área da seção transversal	$[m^2]$,	r	Raio	$[m]$,
L	Comprimento	$[m]$,	V	Volume	$[m^3]$,
m	Massa	$[kg]$,	σ	Densidade	$[kg/m^3]$.

Foi utilizado a mesma porção de eletrodo à qual foi feita as medições do diâmetro. Portanto, o comprimento foi de $1m$ e o massa dessa porção foi pesada em uma balança semi-analítica, $8,32g$. Com isso, foi calculada a densidade do eletrodo σ_e resultando em (82).

$$\sigma_e = 7,60798119 \frac{g}{cm^3} = 7607,98119 \frac{kg}{m^3} \quad (82)$$

Para obter a resistividade do eletrodo é utilizada a fórmula (83).

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (83)$$

onde R é a resistência.

Mas para utilizar essa fórmula é necessário ter conhecimento da resistência do eletrodo. Para tal, foram feitos testes com transferência metálica por curto-circuito e aquisitado os valores de corrente e tensão de soldagem, levando em consideração algumas afirmativas que foram observadas nos experimentos práticos de outros autores, como no trabalho de [113]. São elas:

1. O comprimento do eletrodo energizado (*stick-out*) durante o curto-circuito é igual a distância entre o bico de contato e a peça;
2. A resistência entre o bico de contato e o eletrodo é desprezível;
3. A resistência entre o eletrodo e a poça de fusão é desprezível.

A tensão na fonte foi regulada em $19V$ e a distância entre o bico de contato e a peça foi de $15mm$. Além disso, a velocidade de alimentação do arame foi de $3m/min$ e a velocidade de soldagem foi ajustada em $33cm/min$. Ainda a vazão do gás de proteção

regulada no manômetro em $15L/min$.

Usualmente, a velocidade de vazão do gás é ajustada para ser 10 vezes o valor do diâmetro do eletrodo. Entretanto, o valor mostrado no manômetro não é preciso. Assim, para que a vazão seja em torno de 10 vezes o valor do diâmetro do eletrodo na saída da tocha, a vazão é regulada no manômetro com um valor um pouco superior às 10 vezes o valor do diâmetro. Esse tipo de ajuste é obtido por experiência em campo pelos soldadores profissionais.

Foram realizados diversos ensaios aquisitando a corrente e tensão de soldagem, em curto-circuito, para calcular a resistência através da Lei de *Ohm*, mostrada em (84). As Figuras 38 e 39 mostram a tensão e corrente mensuradas em um dos ensaios, respectivamente.

$$V = RI \quad (84)$$

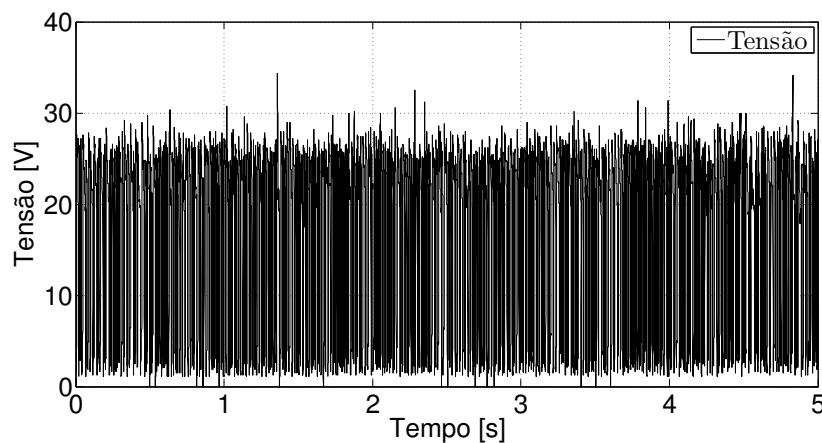


Figura 38: Tensão aquisitada com transferência metálica por curto-circuito.

A resistência média calculada nos ensaios foi de $0,0213\Omega$, com desvio padrão de $0,0057$.

Assim, considerando a resistência do eletrodo como $0,0213\Omega$ e sendo o comprimento do eletrodo em curto-circuito igual a distância entre o bico de contato e a peça ($15mm$) e a área desse eletrodo definida como a área de um círculo, pois o eletrodo é cilíndrico, com o diâmetro de $1,18mm$, a resistividade do eletrodo resulta em (85).

$$\rho_e = 1,5529 \times 10^{-6} \Omega m \quad (85)$$

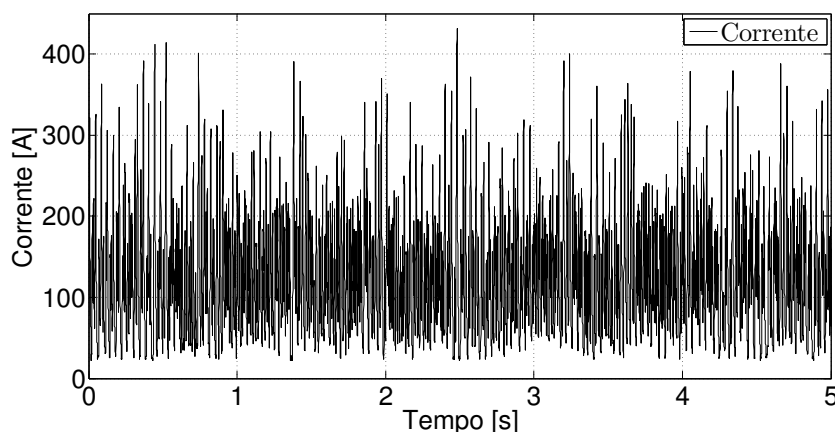


Figura 39: Corrente adquirida com transferência metálica por curto-circuito.

5.2 Parâmetros do Gás de Proteção

O parâmetro relevante do gás de proteção é a sua densidade, que influencia na força aerodinâmica. A temperatura do arco elétrico alcança valores muito elevados, assim esse parâmetro é frequentemente referenciado como densidade do plasma. Esse parâmetro equivale a $1,6 \text{ kg/m}^3$ [166].

5.3 Parâmetros da Fonte de Energia e Cabos

Os cabos e suas conexões impõe uma pequena resistência à condução da corrente de soldagem, desde a fonte até a tocha e vice-versa. Para medir essa grandeza foram feitos ensaios divididos em duas partes. Para calcular a resistência dos cabos foi medido a tensão e a corrente de soldagem, para então aplicar a Lei de *Ohm* sobre a média desses valores medidos.

A corrente foi mensurada no mesmo ponto para ambos cabos, pois a corrente circula nos cabos em série. Já a tensão foi obtida de duas formas: primeiramente foi adquirida a tensão entre o negativo da fonte de energia e a mesa e posteriormente foi adquirida a tensão entre o positivo da fonte de energia e o contato mais próximo ao cabo na tocha.

Os parâmetros ajustados para estes ensaios foram: 29V na fonte de energia, velocidade de alimentação de arame de 3 m/min , velocidade de soldagem de 32 cm/min , 15mm de distância entre o bico de contato e a peça e gás de proteção CO_2 puro com vazão regulada em 16 L/min . Com esta configuração obteve-se a transferência metálica mista globular/curto-circuito.

A resistência média calculada das diversos ensaios para o cabo entre o negativo da fonte de energia e a mesa foi de $0,0003\Omega$ com desvio padrão de $0,00015$ e para o cabo entre o positivo da fonte de energia e o contato mais próximo ao cabo na tocha foi de $0,0038\Omega$ com desvio padrão de $0,00083$.

A resistência dos cabos é a soma das resistências do cabo positivo e do cabo negativo. Portanto, a resistência dos cabos é dada por:

$$R_S = 0,0041\Omega = 4,1 \text{ m } \Omega \quad (86)$$

O segundo parâmetro da fonte de energia à ser identificado é a indutância da fonte. Para tal, pode-se utilizar a seguinte formulação [6]:

$$L_S = \frac{U_v - U_{CC} - MI_{CC}}{\frac{dI}{dt}} \quad (87)$$

onde:

I_{CC}	Corrente média do curto-circuito	[A],
M	Inclinação da curva característica dinâmica da fonte (<i>slope</i>)	[V/A],
U_{CC}	Tensão média do curto-circuito	[V],
U_V	Tensão a vazio	[V],
$\frac{dI}{dt}$	Taxa de subida da corrente	[A].

Para identificar o *slope* da fonte, é necessário realizar o seguinte experimento: com um voltímetro conectado entre os terminais positivo e negativo da fonte e estes conectados à placas metálicas imersas em uma solução salina, varia-se a tensão à vazio da máquina (ajustada em *hardware*) para impor uma variação da resistência imposta ao circuito elétrico [6]. Com os dados adquiridos, obtém-se as curvas características por regressão linear.

Entretanto, para realizar esse experimento é necessário variar a tensão à vazio da fonte reconfigurando a fonte, o que não é possível no modelo utilizado neste trabalho. Assim, a indutância da fonte utilizada nas simulações é um valor aproximado aos valores usuais de fontes de energia para processos MIG/MAG [123, 135, 168, 170].

$$L_S = 0,35 \text{ m } H \quad (88)$$

5.4 Parâmetros do Arco Elétrico

A resistência do arco é um parâmetro variável, pois depende da tensão do arco, a qual não é constante. Entretanto, para fins de simplificação das simulações, a maior parte dos autores utiliza um valor médio dessa resistência, como nos trabalhos [123, 135]. A resistência média do arco foi estimada através dos seguintes quatro passos:

- Aquisitar a tensão e a corrente de soldagem, em modo globular;
- Calcular a resistência total pela Lei de *Ohm*;
- Descontar a resistência dos cabos;
- Descontar a resistência do eletrodo.

Para obter a transferência metálica globular, os parâmetros foram regulados em 36V na fonte de energia, velocidade de alimentação de arame de 3,5m/min, velocidade de soldagem de 32cm/min e gás de proteção CO_2 puro com vazão regulada em 16L/min e a distância bico de contato e peça foi de 15mm.

Após diversos ensaios, a resistência média do calculada a partir dos dados adquiridos foi de 0,1365Ω. Como a resistência dos cabos é de 0,0041Ω e a resistência do eletrodo é 0,0213Ω, então a resistência média do arco elétrico fica em torno de:

$$R_A = 0,1111 \text{ } \Omega \quad (89)$$

Neste ponto vale ressaltar que no modo de transferência metálica, teoricamente, o arco elétrico é completamente extinguido. Entretanto, devido a influência de dinâmicas desconhecidas, o arco não é perfeitamente inexistente. Assim, há uma pequena tensão de arco associada à esse resquício de arco persistente, que pode inclusive ser lateral à ponte formada entre o eletrodo ainda sólido e a ponte de fusão.

Note na Figura 38 que há tensão de arco mesmo durante os curtos-circuitos. Isto significa que também há uma pequena resistência de arco associada à transferência metálica durante o curto-circuito. Como não foi encontrada uma metodologia para identificar esse parâmetro, utilizou-se um valor de resistência de arco durante os curtos-circuitos aproximado a valores da literatura [132, 167].

$$R_{Acc} = 0,035 \text{ } \Omega \quad (90)$$

O segundo parâmetro do arco elétrico à ser estimado foi o campo elétrico. Para tal, foi feita uma adaptação do ensaio mostrado em [6, 7]. Nesse ensaio, realiza-se dois ensaios com transferência metálica por voo livre com diferentes distâncias entre o bico de contato e peça. Também considera-se que o arco está sendo formado no centro da gota, pois hora o arco é formado junto à gota e hora é formado ao final da gota, conforme Figura 40. Além disso, considerou-se que as quedas de tensão e as resistências parasitas e do bico de contato se mantiveram constantes e desprezíveis. A estimativa do campo elétrico é dada por:

$$E = \frac{R_A L_{A1} I_1 - R_A L_{A2} I_2}{L_{A1} - L_{A2}} \quad (91)$$

Os índices 1 e 2 são referentes aos procedimentos utilizados, ou seja, com cada distância bico de contato e peça definido. Entretanto, nenhuma informação foi dada sobre como foi medido o volume da gota nem como foi medido o comprimento do arco elétrico nessas referências.

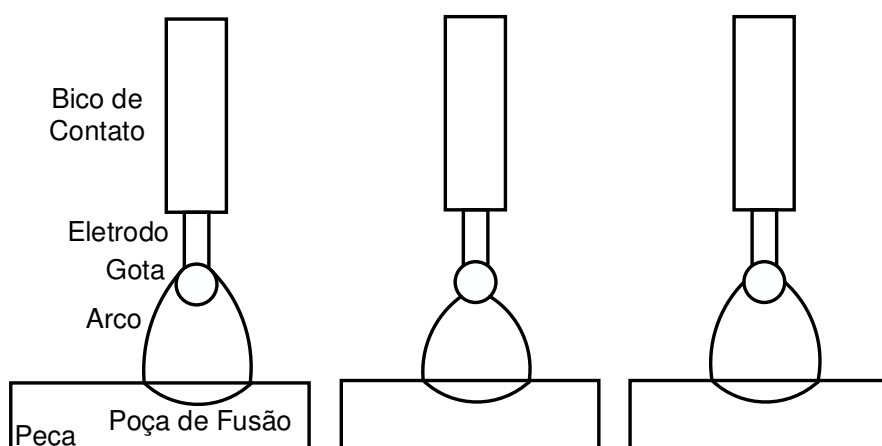


Figura 40: Suposições das posições iniciais da formação do arco elétrico.

Nesse trabalho será adotada a mesma metodologia, porém com algumas adaptações. A primeira adaptação consiste em considerar que a gota, sendo transferida em modo globular, terá um diâmetro equivalente à 150% o diâmetro do eletrodo e a segunda adaptação assume que comprimento do arco é igual à distância entre o bico de contato e a peça subtraído pelo raio da gota em seu volume máximo, conforme ilustrado na Figura 41.

Como o diâmetro do eletrodo é 1,18mm, então o diâmetro da gota com volume máximo suposto será de 1,7700mm. Consequentemente, o raio dessas gotas em volume máximo alcançará 0,8850mm.

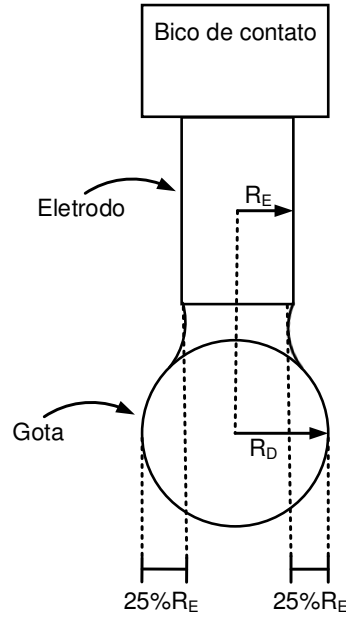


Figura 41: Suposição do volume máximo da gota.

Foram ajustadas duas distâncias entre bico de contato e peça: $18mm$ e $15mm$. Assim, os comprimentos de arco estimados para a primeira e segunda condição configuradas são $17,115mm$ e $14,115mm$, respectivamente.

Durante os experimentos, as correntes somente foram mensuradas após o arco ser estabilizado. Para esses ensaios os parâmetros foram regulados em $36V$ na fonte de energia, velocidade de alimentação de arame de $3,5m/min$, velocidade de soldagem de $32cm/min$ e vazão do gás de proteção regulada em $16L/min$.

As correntes de soldagem médias para distância entre bico de contato e peça de $18mm$ e $15mm$ foram aproximadamente $175A$ e $95A$, respectivamente. Assim, o campo elétrico estimado resultou em:

$$E = 32,04 \text{ N/m} \quad (92)$$

O último parâmetro identificado do arco elétrico é a sua constante de tensão, que é a soma da queda de tensão na zona anódica e na zona catódica. Para tal, foi realizado o ensaio mostrado em [113]. Em [113], o autor considera que o comprimento do arco é proporcional à tensão do arco para condições específicas. Considerando que a tensão no arco é dada por:

$$U_A = U_0 + (R_A + R_S + R_E)I + E_A L_A \quad (93)$$

Faz-se esse ensaio com transferência metálica por curto-circuito. Este experimento consiste em analisar dois momentos específicos desse processo: imediatamente antes do curto-circuito e no início do curto-circuito.

Com essas medidas de tensão, definidas como U_1 e U_2 para tensão imediatamente antes do curto-circuito e para tensão no início do curto-circuito, respectivamente, faz-se a seguinte relação [113]:

$$U_1 = \lim_{L_A \rightarrow 0} [U_0 + (R_A + R_S + R_E)I + E_A L_A] = U_0 + (R_A + R_S + R_E)I_1 \quad (94)$$

$$U_2 = (R_A + R_S + R_E)I_2 \quad (95)$$

onde I_1 e I_2 são as correntes no momento da aquisição de U_1 e U_2 , respectivamente.

É suposto que a corrente no momento da extinção do arco e no início do curto-circuito sejam iguais, bem como as resistências envolvidas. Com isso, pode-se aproximar a constante de tensão do arco como (96).

$$U_0 \approx U_1 - U_2 \quad (96)$$

A Figura 42 mostra um dos ensaios realizados, com esses dois momentos marcados.

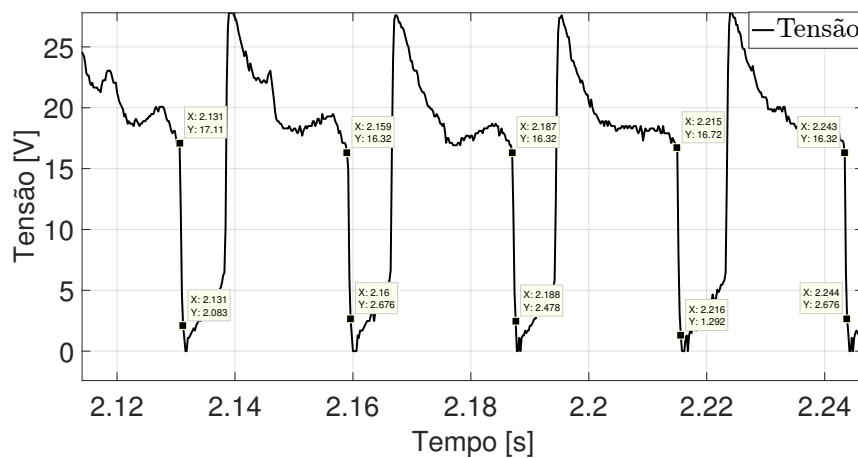


Figura 42: Identificação dos momentos imediatamente antes dos curtos-circuitos e no início dos curtos-circuitos.

Assim, usando a relação (96), a constante de tensão do arco aproximada foi de:

$$U_0 = 14,80 \text{ V} \quad (97)$$

5.5 Parâmetros Relativos a Fusão do Eletrodo

Os parâmetros relativos a fusão do eletrodo são as variáveis C_3 e C_4 , relativos ao aquecimento pelo arco elétrico e pelo feito *Joule*. Esses parâmetros também podem variar durante o processo, entretanto para fins de simulação serão tidos como constantes.

Para estimar essas constantes foram realizados ensaios com transferência metálica em curto-circuito e mista globular/curto-circuito. Inicialmente foram feitos ensaios com transferência metálica por curto-circuito e assumido as seguintes hipóteses como verdadeiras, assim como em [6, 7]:

1. A taxa de fusão está em equilíbrio, ou seja, a velocidade de fusão do eletrodo é igual a velocidade de alimentação do arame;
2. O comprimento do eletrodo energizado é constante e igual a distância entre o bico de contato e a peça.

A velocidade de fusão é dada por:

$$V_m = C_3 I + C_4 L_E I^2 \quad (98)$$

Entretanto, quando a transferência é dada em curto-circuito, pode-se assumir que o aquecimento do eletrodo energizado é dado exclusivamente pelo efeito *Joule* [167]. Isto é, o aquecimento causado pelo arco elétrico é nulo, devido a ausência de arco durante o curto-circuito. Com isso, reescreve-se (98) como (99).

$$V_m = C_4 L_E I^2 \quad (99)$$

Para calculá-lo, foram utilizados as mensurações de corrente de soldagem obtidas nos ensaios com transferência metálica por curto-circuito mostrados na seção 6.1. A corrente média foi de 116,6878A e a velocidade de alimentação do arame foi de $3m/min$.

Com isso, o valor médio de C_4 resultou em:

$$C_4 = 2,4534 \times 10^{-4} \text{ A}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (100)$$

Em seguida, foram realizados ensaios com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito e aquisitada a corrente. Para tal, ajustou-se a tensão da fonte em $29V$, a distância entre o bico de contato e a peça foi ajustada em $15mm$, a velocidade de alimentação do arame em $3m/min$ e a velocidade de soldagem em $33cm/min$.

Admitindo que o valor de C_4 é $2,4534 \times 10^{-4}$, então calcula-se os valores de C_3 a partir de (98), sendo I a corrente aquisitada em modo misto. Com isso C_3 resultou em:

$$C_3 = 1,5012 \times 10^{-4} \text{ m/(As)} \quad (101)$$

Com os valores de C_3 e C_4 é possível estimar as constantes de aquecimento C_1 e C_2 , necessárias para calcular a taxa de fusão, M_R , conforme mostrado em (33) e reescrito em (102). Pois, como já foi dito, foi mostrado em [10, 166, 170] que M_R também pode ser aproximada como (34), reescrito em (103).

$$M_R = (C_1 I + C_2 L_E \rho_e I^2) \sigma_e \quad (102)$$

$$M_R = \pi R_E^2 V_m \quad (103)$$

Portanto, os valores de C_1 e C_2 calculados foram:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1,6417 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{As} \\ C_2 &= 2,6830 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{VAs} \end{aligned} \quad (104)$$

Por fim, em relação a fusão do eletrodo, também foi mostrado na modelagem que conforme a gota aumenta seu volume, um pingente é formado entre o eletrodo sólido no bico de contato e a gota propriamente dita. Esta dinâmica foi aproximada à um sistema massa-mola. As constantes K_D e B_D foram utilizados da literatura [127, 135, 166, 168, 170]:

$$\begin{aligned} B_D &= 0,8 \times 10^{-3} \text{ Ns/m} \\ K_D &= 3,5 \text{ N/m} \end{aligned} \quad (105)$$

O módulo de tensão superficial também foi utilizado nas simulações com valor proveniente da literatura. Esse parâmetro varia de 0,9 a 1,8 N/m [172, 191, 199]. Foi utilizado:

$$\gamma = 0,9 \text{ N/m} \quad (106)$$

5.6 Parâmetros do Motor do Alimentador de Arame

A identificação dos parâmetros do motor do alimentador do arame foram feitas no trabalho [198]. Breves comentários a respeito são dados no Anexo D.

Os parâmetros de interesse desse motor são o ganho K_m e a constante de tempo mecânica τ_m .

$$\begin{aligned} K_m &= 0,75 \text{ m/(Vs)} \\ \tau_m &= 0,248 \text{ s} \end{aligned} \quad (107)$$

6 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Esta seção é dedicada à mostrar a validação dos modelos matemáticos desenvolvidos através de comparações entre resultados de simulações e resultados experimentais. Os parâmetros obtidos estão listados na Tabela 1.

Antes de prosseguir à validação, vale ressaltar alguns pontos: primeiramente a força referente aos jatos de vapor não foram consideradas nas simulações, pois não foram encontrados trabalhos que descrevessem procedimentos experimentais adequados para identificação dos parâmetros necessários a simulação.

E em segundo lugar e ainda mais importante, é realçar a complexidade do processo, pois o mesmo possui diversas dinâmicas fortemente acopladas entre si e na prática essas dinâmicas não se comportam perfeitamente, como é assumido através de hipóteses durante a modelagem matemática. Além disso, nos experimentos, há dinâmicas desconhecidas que causam incertezas na transferência metálica.

Assim, ocorrem nos experimentos alguns fenômenos, considerados bem definidos nas simulações, de forma quase aleatória. Por exemplo, no modo globular, a gota de solda transferida à poça de fusão possui diferentes raios à cada destacamento e pode não ser perfeitamente esférica, conseqüentemente sua massa varia à cada gota destacada, o que influencia diretamente no seu deslocamento no eletrodo e sua velocidade de deslizamento, o que por sua vez influencia o comprimento do *stick-out* e conseqüentemente a corrente de soldagem, que também afeta a tensão de arco e assim por diante.

Entretanto, mesmo assumindo essas simplificações, as simulações mostram as curvas de corrente de soldagem e tensão do arco conforme observado nos experimentos, utilizando os mesmos parâmetros operacionais definidos nos experimentos.

Tabela 1: Parâmetros identificados do sistema completo.

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
R_E	Raio do eletrodo	$0,59 \times 10^{-3}$	m
ρ_e	Resistividade do eletrodo	$1,5529 \times 10^{-6}$	Ωm
σ_e	Densidade do eletrodo	7607,98119	kg/m^3
R_S	Resistência dos cabos	$4,1 \times 10^{-3}$	Ω
K_m	Ganho do motor em regime permanente	0,75	$m/(Vs)$
τ_m	Constante de tempo mecânica do motor	0,248	s
L_S	Indutância da fonte	$0,35 \times 10^{-3}$	H
U_0	Constante de tensão do arco	14,80	V
R_A	Resistência do arco	0,1111	Ω
R_{Acc}	Resistência do arco (durante os curtos)	0,035	Ω
E_A	Campo magnético do arco	32,04	V/m
C_1	Constante associada ao aquecimento da poça de fusão pelo arco elétrico	$1,6417 \times 10^{-10}$	$m^3/(As)$
C_2	Constante associada ao aquecimento da poça de fusão pelo efeito <i>Joule</i>	$2,6830 \times 10^{-10}$	$m^3/(VAs)$
C_3	Constante associada a velocidade de fusão ao aquecimento da poça de fusão pelo arco elétrico	$1,5012 \times 10^{-4}$	$m/(As)$
C_4	Constante associada a velocidade de fusão ao aquecimento da poça de fusão pelo efeito <i>Joule</i>	$2,4534 \times 10^{-4}$	$1/(A^2s)$
σ_g	Densidade do gás	1,6	kg/m^3
K_D	Constante de flexibilidade	3,5	N/m
B_D	Constante de amortecimento	$0,8 \times 10^{-3}$	Ns/m
γ	Módulo de tensão superficial	0,9	N
g	Aceleração da gravidade	9,81	m/s^2
C_A	Coeficiente de arrasto	0,44	—
μ_0	Constante de permeabilidade magnética	$4\pi \times 10^{-7}$	NA^2

Dito isso, a validação dos modelos matemáticos utilizados para representar a transferência metálica de modo misto globular/curto-circuito foi dividida em 3 etapas:

1. Validação do modelo que representa a fase de arco, ou seja, quando ocorre transferência metálica por modo globular;
2. Validação do modelo que representa a fase de curto, ou seja, quando ocorre transferência metálica exclusivamente por curto-circuito;
3. Validação do modelo híbrido, ou seja, quando ocorre transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.

Foram utilizados a corrente de soldagem e a tensão de arco como referenciais para validação dos modelos matemáticos. Essas dinâmicas são as saídas dos modelos. Para tal, foram realizadas simulações com as condições de operação idênticas as condições de operação utilizadas nos experimentos e com os parâmetros identificados na Tabela 1. Não foram avaliadas as dinâmicas internas dos modelos em comparação com seu comportamento experimental, pois para poder analisá-las, se faz necessário de um aparato extra para filmagem direta da transferência metálica, conhecimento de técnicas de visão computacional para análise das dinâmicas inerentes à transferência metálica filmada e de técnicas e equipamentos auxiliares para aferir as forças e demais influentes do processo.

Uma análise das dinâmicas, em simulação, é mostrada no próximo capítulo. Também são consideradas variações paramétricas, para demonstração da sensibilidade das dinâmicas acopladas dos modelos. A análise experimental com filmagem desse processo é deixada a trabalhos futuros, como será melhor discutidas nas conclusões.

6.1 Validação do Modelo da Transferência Metálica por Voo Livre

Nesta seção é mostrada a validação do modelo matemático para transferência por voo livre. Neste trabalho esta transferência metálica é o modo globular.

Vale ressaltar que as mensurações utilizadas para validação de todos os modelos, foram realizadas após o processo entrar em regime de transferência metálica, ou seja, após se manter em uma condição estável. Logo, alguns oscilogramas desprezam os momentos iniciais. Para apresentar a mesma faixa de tempo mostrada nesses oscilogramas, os gráficos de simulação desprezam os momentos iniciais, pois partem de condições iniciais nulas, ou seja, não caracterizando o processo em regime, como é mostrado nos oscilogramas experimentais.

Ainda, enfatiza-se que para ter a confirmação de que o processo estava de fato estável, em todos os experimentos foi requisitada a presença de um engenheiro de soldagem para auxiliar na identificação das condições de regime de transferência e inclusive da seleção dos parâmetros operacionais.

As condições de soldagem para transferência globular foram: 18mm de distância entre o bico de contato e a peça, velocidade de alimentação de arame regulada em 3m/min, velocidade de deslocamento do robô ajustada em 33cm/min, velocidade do gás de proteção CO_2 de 16L/min e tensão da fonte de 36V. Além disso, com a utilização do robô BUG-O MDS, a tocha foi mantida perpendicular à poça de fusão, ou seja, φ igual a 1.

A Figura 43 mostra os oscilogramas de corrente de soldagem e tensão do arco obtidos experimentalmente com transferência metálica por modo globular, com uma taxa de amostragem de $5kHz$.

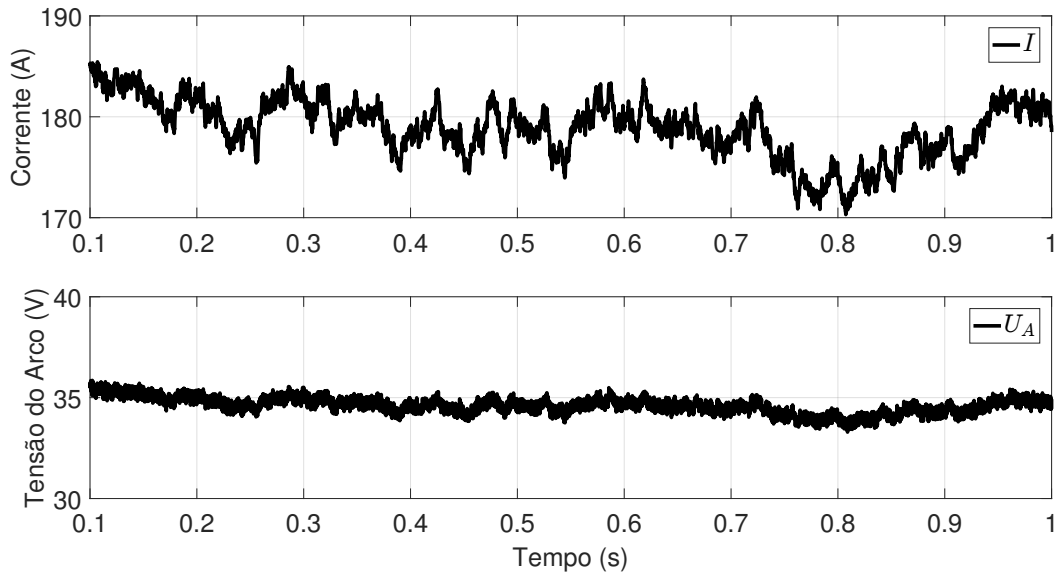


Figura 43: Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por modo globular.

Sabendo que após o processo em transferência metálica entrar em regime, a velocidade de alimentação de arame e a velocidade de fusão entram em equilíbrio, então esperaria-se que com isso a tensão de arco demonstrasse um comportamento constante. Entretanto, como pode ser visto na Figura 43, há uma variação tanto na corrente de soldagem quanto na tensão de arco. Isso se deve à diversos fatores inerentes à complexidade do processo anteriormente mencionados, bem como a influência das incertezas que afetam a formação e destacamento das gotas.

As médias de corrente de soldagem e tensão de arco identificadas nos experimentos, após entrar em regime, foram de $179A$ e $35,5V$, respectivamente.

O processo de validação foi realizado simulando as equações (39)–(44) e as dinâmicas auxiliares à esse modelo como tensão do arco, mostrada em (23), fração de raio da gota influenciada pelo ângulo de condução h e raio da gota R_D , mostrados em (1) e (3), respectivamente. Bem como a taxa de fusão do eletrodo M_R , mostrada em (33) (ou (34)–(35) se preferir) e as forças atuantes, mostradas em (4), (9), (12), (13) e (15).

O critério de destacamento da gota utilizado foi o DFBM, que considera o pingente característico à gota em formação, mostrado em (63), adequado para transferência por modo globular. As condições de *reset* dessas simulações são mostradas em (68)–(73).

Além disso, as condições iniciais das variáveis de estado foram consideradas nulas, salvo a massa da gota (x_5), que foi considerada praticamente nula (0,000001). Essa inicialização se faz necessária não nula pois está no denominador da equação de atualização de x_2 . Assim, se não nulo, na primeira iteração ocorrerá erro. Também ressalta-se que o ângulo de condução θ foi definido como $1,5708rad$ (90°) e o parâmetro de ajuste empírico f da força F_γ não foi alterado, ou seja, f igual 1. Ainda, para obter $3m/min$ de velocidade de alimentação de arame, a tensão do motor do alimentador de arame foi de $0,06785V$.

A simulação da transferência metálica por modo globular é mostrada na Figura 44. Relembrando que as curvas são mostradas após o processo entrar em regime de transferência, ou seja, os momentos iniciais foram omitidos pois partem de condições iniciais nulas, não caracterizando o processo de modo geral.

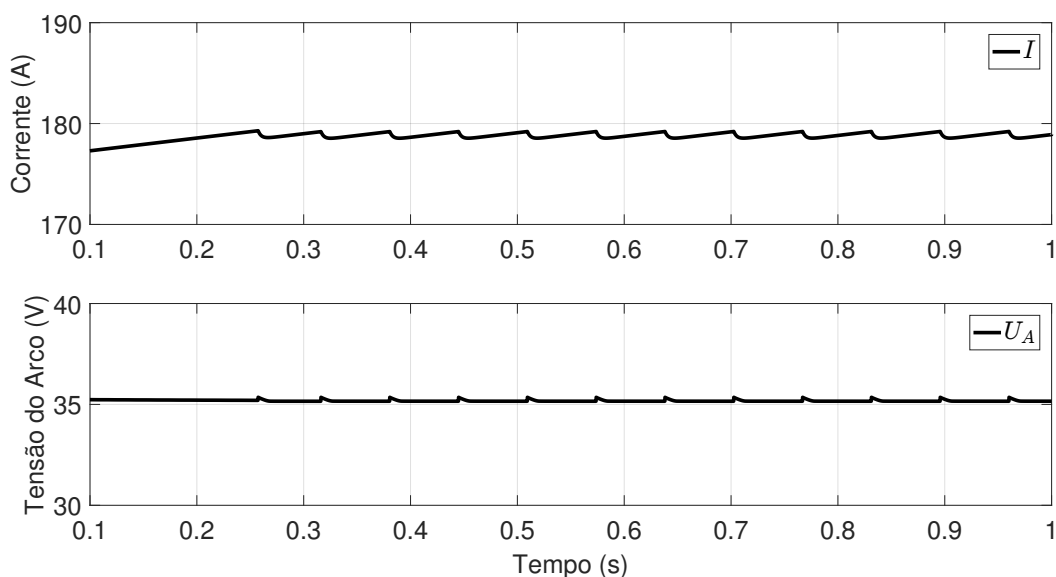


Figura 44: Simulação do processo de soldagem com transferência em modo globular.

Note que as curvas simuladas de corrente e tensão apresentam um comportamento regular e periódico. Isto ocorre devido ao fato de que não há incertezas afetando a transferência metálica na simulação da Figura 44. Entretanto, ainda assim, de modo geral as curvas representam as dinâmicas adequadamente, sendo que as médias da corrente de soldagem e da tensão de arco foram $179,64A$ e $35,13V$, respectivamente.

Para melhor aproximar o comportamento das dinâmicas simuladas ao comportamento real do processo foram inseridas incertezas em quatro dinâmicas: tensão da fonte U'_S , tensão de armadura do alimentador de arame U'_{ARM} , corrente de soldagem I' e tensão do arco elétrico U'_A , conforme ilustrado na Figura 45.

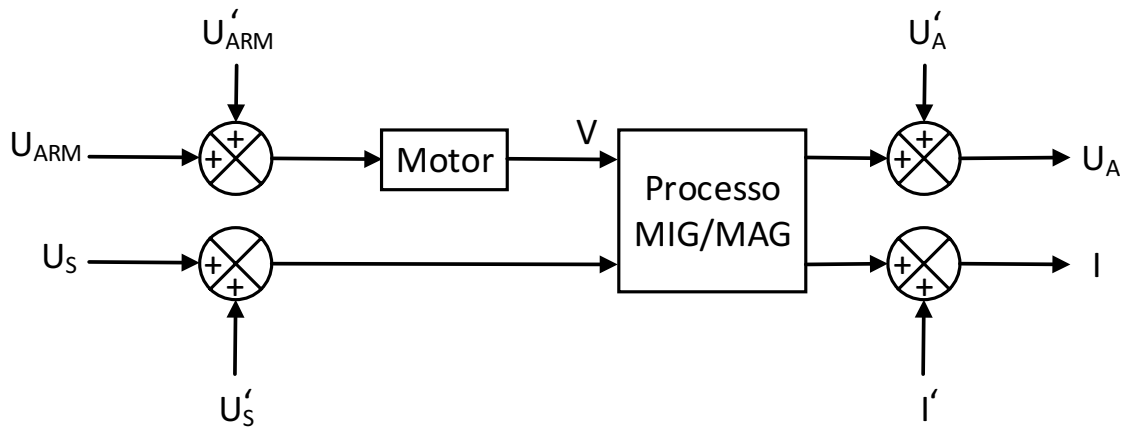


Figura 45: Inserção de incertezas no modelo matemático para simulação da transferência metálica por modo globular.

Os valores dessas incertezas são gerados aleatoriamente em função dos valores configurados para tensão da fonte e de armadura do alimentador, bem como da medida atual de corrente de soldagem e tensão de arco, dentro dos limites mostrado em (108).

$$\begin{aligned}
 U'_S &= \pm 0,1\% U_S \\
 U'_{ARM} &= \pm 0,01\% U_{ARM} \\
 I' &= \pm 0,4\% I \\
 U'_A &= \pm 1\% U_A
 \end{aligned} \tag{108}$$

O intervalo de valores foi definido empiricamente, através de uma extensa bateria de simulações, até que o comportamento simulado se aproximasse do comportamento real. Embora os valores mostrados em (108) sejam muito pequenos, a inclusão dessas incertezas permitiu representar a transferência metálica por modo globular de forma muito satisfatória, conforme é mostrado na Figura 46.

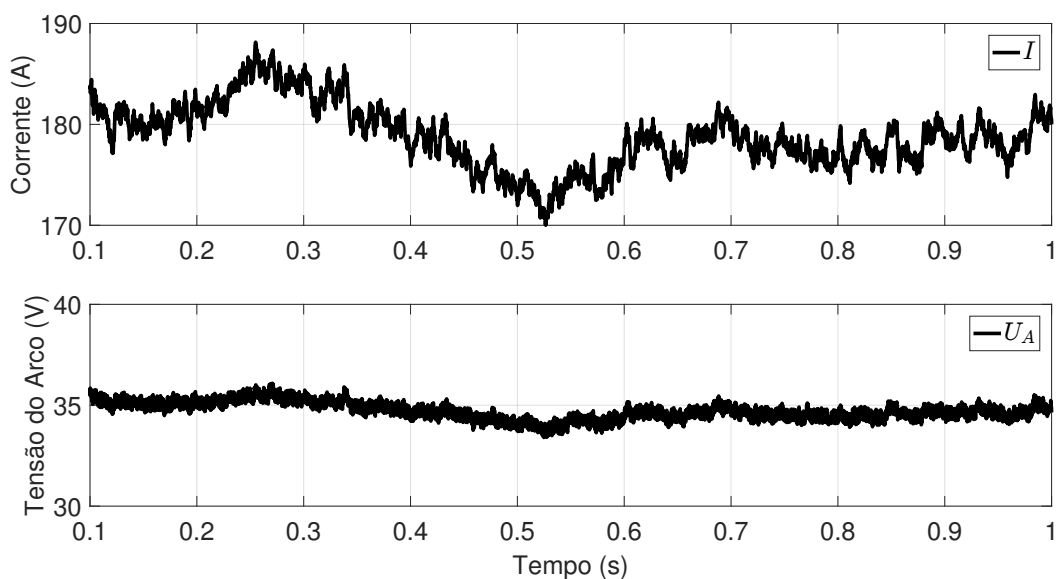


Figura 46: Simulação do processo de soldagem com transferência em modo globular considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.

Como pode ser observado na Figura 46, o comportamento do processo simulado demonstrou o mesmo comportamento verificado nos oscilogramas experimentais. Note que tanto a corrente de soldagem quanto a tensão de arco se mantêm dentro dos intervalos identificados experimentalmente. Além disso, as incertezas consideradas aproximam os comportamentos simulados da corrente de soldagem e da tensão do arco dos seus comportamentos reais. Para melhor visualização é mostrada a simulação e o resultado experimental lado a lado na Figura 47.

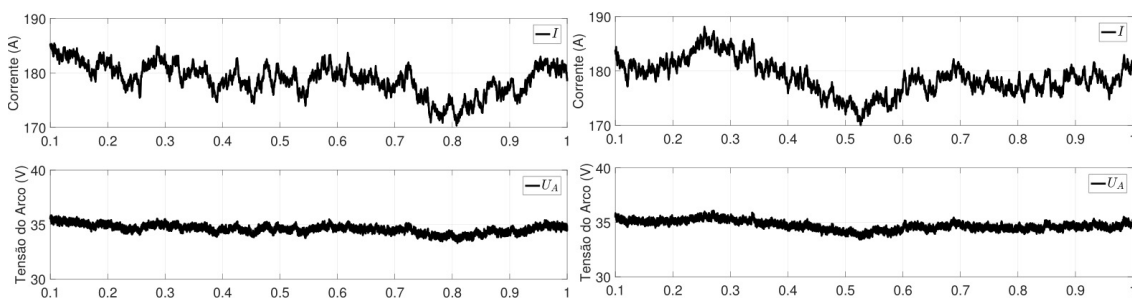


Figura 47: Validação do modelo da transferência metálica globular: (a) experimental e (b) simulação.

6.2 Validação do Modelo da Transferência Metálica por Curto-Circuito

Nesse modo de transferência, a gota cresce durante a fase de arco até que toque na poça de fusão e forme uma ponte entre o eletrodo ainda sólido e a poça de fusão. Quando essa ponte é formada, a fase de arco é encerrada e inicia-se a fase de curto. A fase de curto somente é extinta quando a ponte é rompida, permitindo que o arco seja rapidamente reaberto.

Na transferência metálica por curto-circuito estes dois fenômenos ocorrem de forma cíclica. Entretanto, conforme já foi comentado anteriormente, esse modo de transferência é intrinsecamente instável, justamente por causa dos curtos-circuitos que o caracterizam. Assim, essa instabilidade associada a influência de distúrbios externos e dinâmicas não conhecidas do processo, resultam em ciclos de arco aberto com períodos bem definidos, bem como não regularidade na corrente de soldagem, como será melhor discutido à seguir.

As condições de soldagem para obter essa transferência foram: $15mm$ de distância entre o bico de contato e a peça, velocidade de alimentação de arame regulada em $7m/min$, velocidade de deslocamento do robô ajustada em $33cm/min$, velocidade do gás de proteção CO_2 de $16L/min$ e tensão da fonte de $20V$. Além disso, com a utilização do robô BUG-O MDS, a tocha foi mantida perpendicular à poça de fusão, ou seja, φ igual a 1.

A Figura 48 mostra os oscilogramas de corrente de soldagem e tensão de arco obtidos experimentalmente com transferência metálica por curto-circuito, com uma taxa de amostragem de $5kHz$.

Nesses oscilogramas é claramente notável que a fase de curto é menor do que a fase de arco, ou seja, o arco passa mais tempo aberto do que o eletrodo em curto. Isso ocorre porque a gota demanda mais tempo para crescer do que para ser transferida para a poça de fusão. Note no oscilograma de tensão de arco que os intervalos de tempo em que a tensão está elevada são maiores do que os intervalos de tempo em que a tensão está próxima à zero. Nesse oscilograma também é possível notar que o arco não é completamente extinguido, visto que a tensão de arco nos momentos em que ocorrem os curtos-circuitos se aproximam muito à zero, mas não são de fato nulas. Isto indica que ainda há um pequeno comprimento de arco, deformado e fora de sua posição central, pois este espaço foi tomada pela ponte que se formou entre o eletrodo e a poça de fusão.

A não extinção completa do arco elétrico durante os curtos-circuitos é uma das dinâmicas desconhecidas do processo. Além disso, retomando a revisão da Seção 2.2.2, onde foi discutido que a geometria do arco elétrico afeta sua tensão sob influência

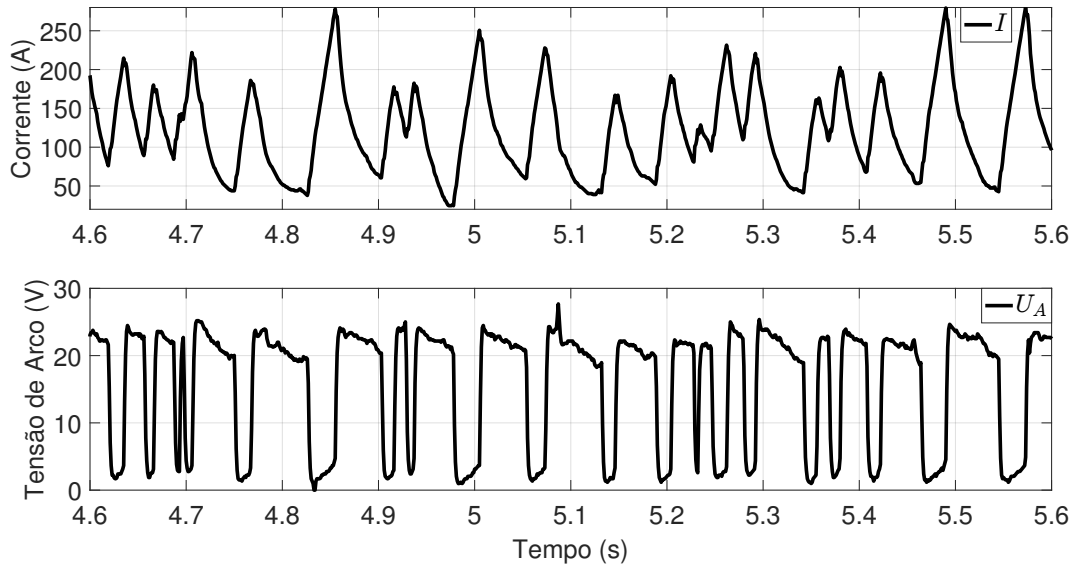


Figura 48: Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por curto-circuito.

de diversos parâmetros, entre eles a corrente de soldagem, que é uma das dinâmicas mais acopladas do processo. Note que a corrente de soldagem também apresenta um comportamento irregular, com picos de corrente variados à cada curto-circuito que variam 150 à 250A, bem como a corrente após o curto-circuito, que caem em torno de 130A, mas as vezes chega abaixo de 50A. De forma geral, pode-se observar que a corrente de soldagem para a maior quantidade dos curtos-circuitos está dentro de um intervalo 100 à 200A. Assim, esse será o critério para validar o modelo, bem como os valores da tensão de arco, que se mantém em torno de 21V durante a fase de arco e sua extinção durante os curtos-circuitos.

O processo de soldagem com transferência metálica por curto-circuito requer a simulação de ambos os modelos matemáticos compreensivos, ou seja, (39)–(44), exceto (40) que foi simulada de forma simplificada conforme mostrado em (109), e (55)–(60). Esse modelo também requer a computação das equações das dinâmicas auxiliares: tensão do arco, mostrada em (23), fração de raio da gota influenciada pelo ângulo de condução h e raio da gota R_D , mostrados em (1) e (3), respectivamente. Bem como a taxa de fusão do eletrodo M_R , mostrada em (33) (ou (34)–(35) se preferir) e as forças atuantes, mostradas em (4), (9), (12), (13) e (15). Também são computadas as pressões exercidas na gota/ponte e velocidade de transferência de massa, mostrados de (48)–(52).

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{x_5} (F_G + F_{EM} + F_A + F_m - F_V - F_\gamma) \quad , \quad x_2 > 0 \quad (109)$$

O critério de destacamento da gota utilizado foi o critério PIT, baseado no rompimento da ponte, dado em relação à um raio limite que se excedido permite a transferência metálica, mostrado em (64). Ainda, as condições de *reset* para o curto-circuito são mostradas em (74)–(79).

Além disso, as condições iniciais das variáveis de estado foram consideradas nulas, salvo a massa da gota (x_5), que foi considerada praticamente nula (0,000001). Essa inicialização é não nula pois está no denominador da equação de atualização de x_2 . Assim, se não nulo, na primeira iteração ocorrerá erro. Também ressalta-se que o ângulo de condução θ foi definido como $1,5184rad$ (87°) e a função de correção f de destacamento foi ajustada em 0,01. Ainda, para obter $7m/min$ de velocidade de alimentação de arame, a tensão do motor do alimentador de arame foi de $0,157V$.

Na Figura 49 é apresentada a simulação da transferência metálica por curto-circuito, sem inserção de incerteza, a razão para não inserção de incertezas nesse modelo especificamente será discutida em breve.

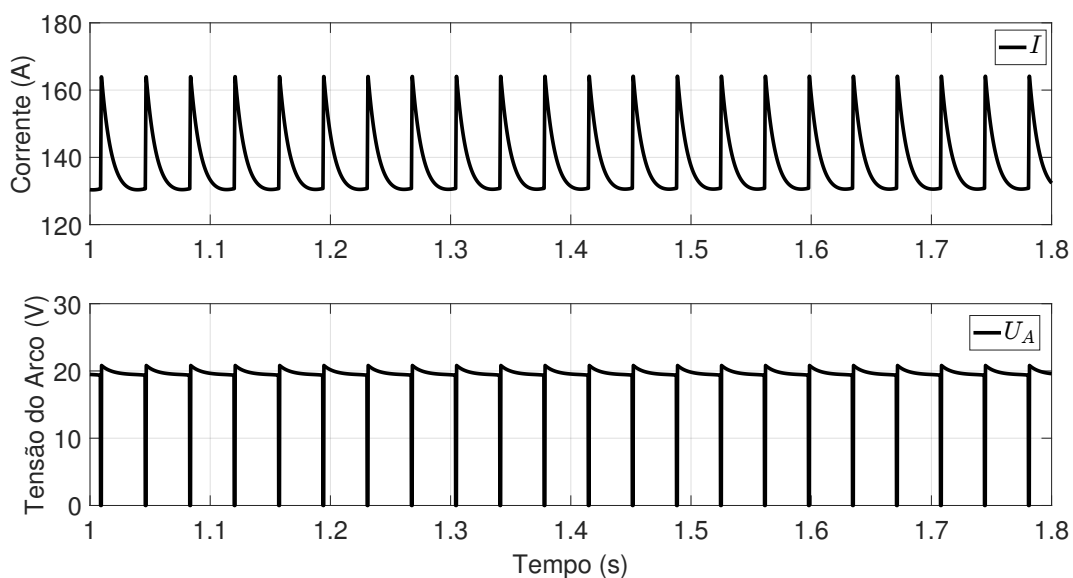


Figura 49: Simulação do processo de soldagem com transferência por curto-circuito.

Na Figura 49 pode-se identificar, tanto para corrente de soldagem quanto para tensão de arco, um comportamento muito similar ao comportamento experimental dessas dinâmicas. Note que a corrente de soldagem se mantém entre o intervalo de 100 a 200A, cujo havia maior concentração dos curtos-circuitos. Além disso, a tensão do arco corresponde de forma coerente, note que o período de arco aberto, onde a tensão de arco está elevada, é significativamente superior ao período de curto circuito, onde a corrente

de soldagem dá um pico e ocorre sua queda nos momentos em que os curtos-circuitos acontecem. Para melhor visualização é mostrada a simulação e o resultado experimental lado a lado na Figura 50.

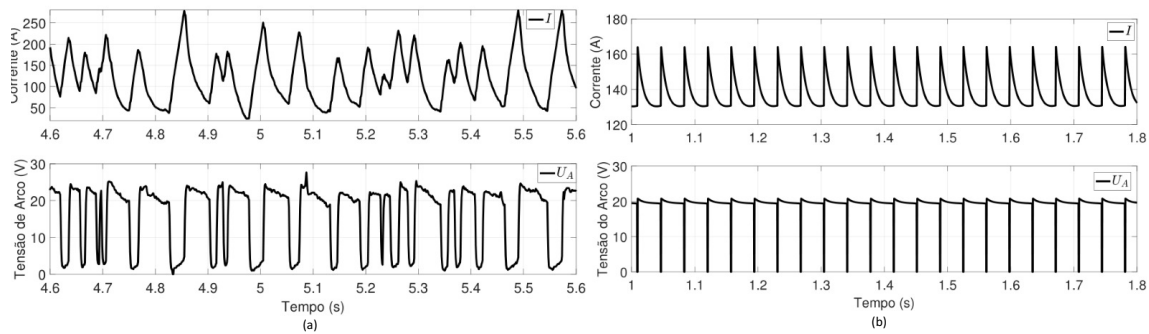


Figura 50: Validação do modelo da transferência metálica por curto-circuito: (a) experimental e (b) simulação.

Devido às incertezas que afetam o processo experimentalmente, além de sua instabilidade, que o torna ainda mais sensível à variação paramétrica, o modelo proposto não representou os diferentes picos na corrente de soldagem. Isto também se reflete na magnitude da tensão de arco. Foram realizadas diversas simulação para fazer considerações sobre a inserção de incertezas no modelo, assim como foi mostrado para o modelo globular. Entretanto, qualquer pequena variação nas condições de operação levaram o processo simulado rapidamente à instabilidade. Isso também reflete a realidade do processo físico, pois este modo de transferência metálica requer um ajuste bem definido de suas condições de operação. Essa sensibilidade paramétrica do modelo será discutido com mais detalhes no próximo capítulo.

Também ressalta-se que a grande variação nos picos da corrente de soldagem e frequência dos curtos-circuitos, nos experimentos, é consequência da composição do gás de proteção utilizado, 100%CO₂. Esse gás torna a transferência metálica mais instável e aumenta a geração de respingos. Assim, para que as curvas simuladas representem de forma mais verossímil essa transferência, indica-se, em trabalhos futuros, a utilização de um gás de proteção com menor concentração de CO₂. Conforme já foi mencionado, a escolha do uso de CO₂ puro como gás de proteção neste trabalho é dado por duas razões: menor custo e tentar representar o processo utilizando como nos experimentos o gás que torna a transferência metálica menos regular, observando o comportamento da corrente de soldagem e tensão do arco.

Vale ressaltar que é comum processos de transferência por curto-circuito terem sua transferência metálica regida por um controlador, reduzindo essas grandes diferenças entre os picos de corrente e frequência dos curtos-circuitos, o que tornaria a resposta mais próxima dos resultados simulados.

Portanto, assumindo que o modelo utilizado é adequado para representar o comportamento geral dos curtos-circuitos, para mostrar de forma mais detalhada a interação das dinâmicas acopladas corrente de soldagem/tensão do arco, que distinguem a fase de arco e fase de curto, serão mostrados gráfico em um curto período de tempo. Na Figura 51 são mostrados oscilogramas experimentais do momento de um curto-circuito e em seguida, na Figura 52, é mostrado um curto-circuito simulado.

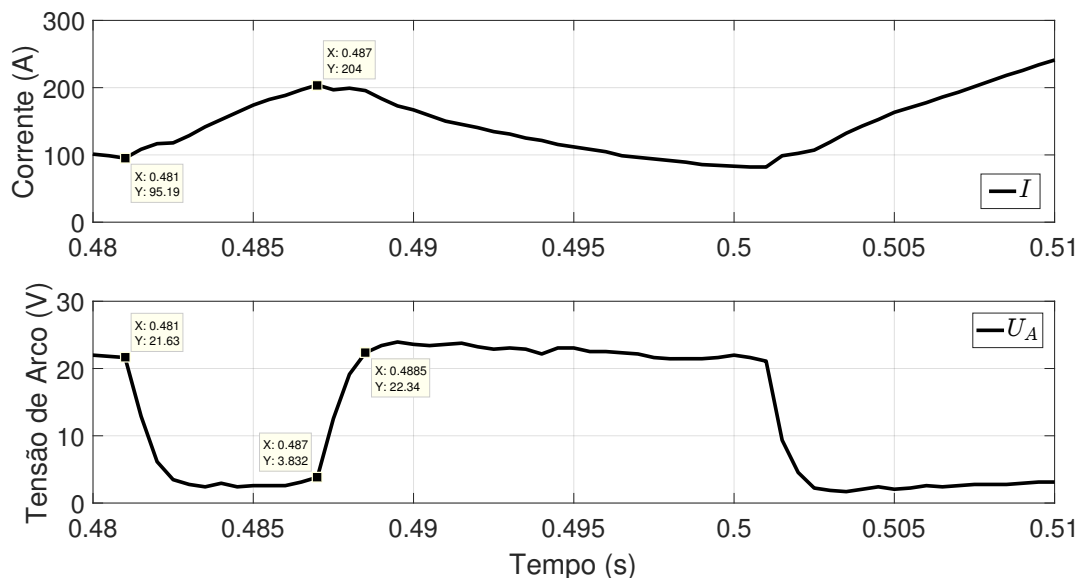


Figura 51: Oscilograma experimental de um único curto-circuito, para melhor visualização das fases de arco e curto.

Em ambos as Figuras 51 e 52 foram feitas marcações no início e fim do curto-circuito. Note que a fase de curto-circuito é significativamente menor que a fase de arco em ambas figuras. Observe também que o modelo responde adequadamente quando ocorre o curto-circuito, ou seja, a corrente de soldagem é elevada e a tensão de arco diminui, ambos de forma abrupta. Conforme foi mencionado, devido à instabilidade e incertezas durante o curto-circuito os valores de corrente de soldagem e tensão de arco variam irregularmente nos experimentos. Todavia, o modelo apresentou o comportamento de forma plausível, principalmente a tensão de arco.

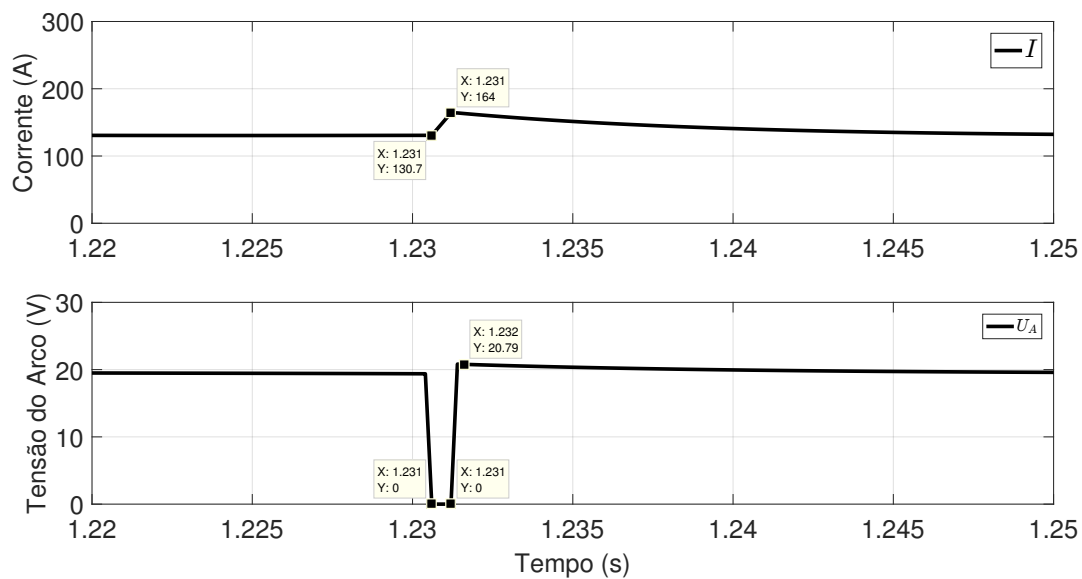


Figura 52: Simulação de um único curto-circuito, para melhor visualização das fases de arco e curto.

6.3 Validação do Modelo da Transferência por Modo Misto Globular/Curto-Circuito

O processo de soldagem MIG/MAG com transferência metálica mista globular/curto-circuito é um processo de transferência metálica complexo de representar matematicamente, pois encontra-se na transição de dois modos de transferência metálica nem distintos. Esse modo misto não apresenta características periódicas como o foram mostradas na transferência metálica por curto-circuito. Em maior parte do tempo, esse modo de transferência ocorre por modo globular. Os curtos-circuitos ocorrem sem uma regularidade, nem em frequência nem em magnitude do pico de corrente de soldagem.

Os curto-circuitos na transferência mista são influenciados principalmente por fatores externos que permitem que as gotas cresçam demasiadamente à ponto de tocar na poça de fusão ou ainda, influenciando a transferência de calor, necessária para a fusão do eletrodo, fazendo com que o eletrodo não seja fundido rápido o suficiente para que a gota seja destacada sem formar uma ponte entre eletrodo e poça de fusão.

As condições de soldagem para obter essa transferência foram: 15mm de distância entre o bico de contato e a peça, velocidade de alimentação de arame regulada em 3m/min, velocidade de viagem do robô ajustada em 33cm/min, velocidade do gás de proteção CO_2 de 16L/min e tensão da fonte ajustada em 25V. Além disso, com a utilização do robô BUG-O MDS, a tocha foi mantida perpendicular à poça de fusão, ou

seja, φ igual a 1.

A Figura 53 mostra os oscilogramas de corrente de soldagem e tensão de arco obtidos experimentalmente com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito, com uma taxa de amostragem de 5kHz.

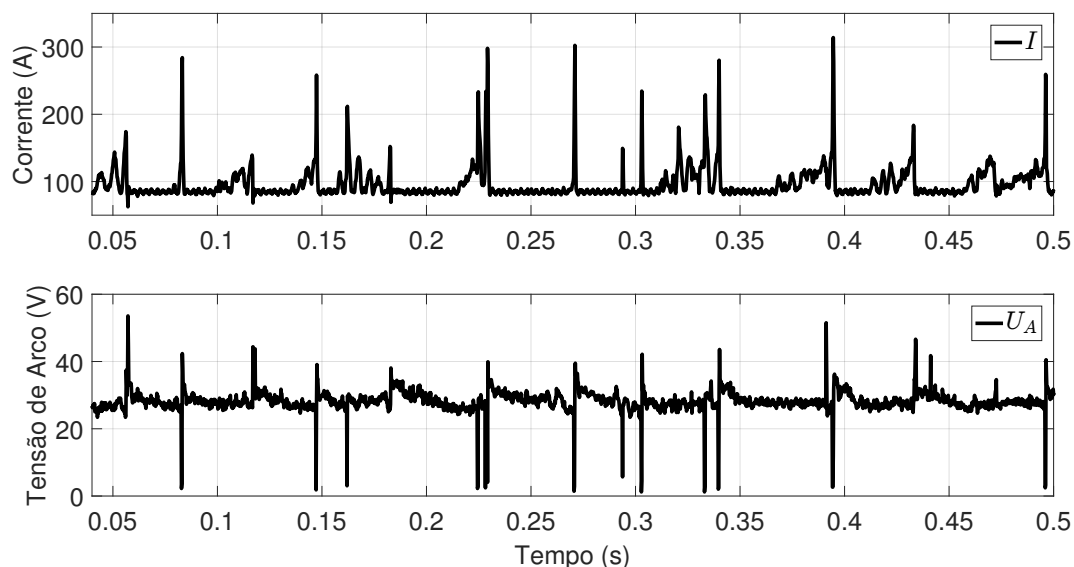


Figura 53: Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.

Na Figura 53 pode-se observar claramente que os curtos ocorrem de forma aleatória. Outro fator que colabora para as incertezas nesse processo é que esse modo de transferência metálica apresenta ainda mais sensibilidade em relação ao ajuste de parâmetros operacionais. Assim, qualquer dinâmica desconhecida que afete as dinâmicas de entrada do processo resultam em um resultado inesperado, que neste caso são os curtos-circuitos.

Para facilitar a visualização deste modo de transferência metálica e sua maior proximidade ao modo de transferência globular, na Figura 54 é mostrada essa transferência metálica em um período de tempo menor, de 0,1s.

Na Figura 54 pode-se observar que os curtos-circuitos ocorrem de forma inesperada e que nem ocorre aumento da corrente de soldagem sem a ocorrência do curto-circuito de fato, conseqüentemente não extinguindo o arco elétrico. Note que entre 0,1s e 0,12s ocorrem diversas elevações da corrente, como se um curto-circuito inicia-se antes mesmo que o anterior fosse completado, entretanto sem alcançar magnitude suficiente para extinguir a tensão do arco. Esse fenômeno associado com a imprevisibilidade da

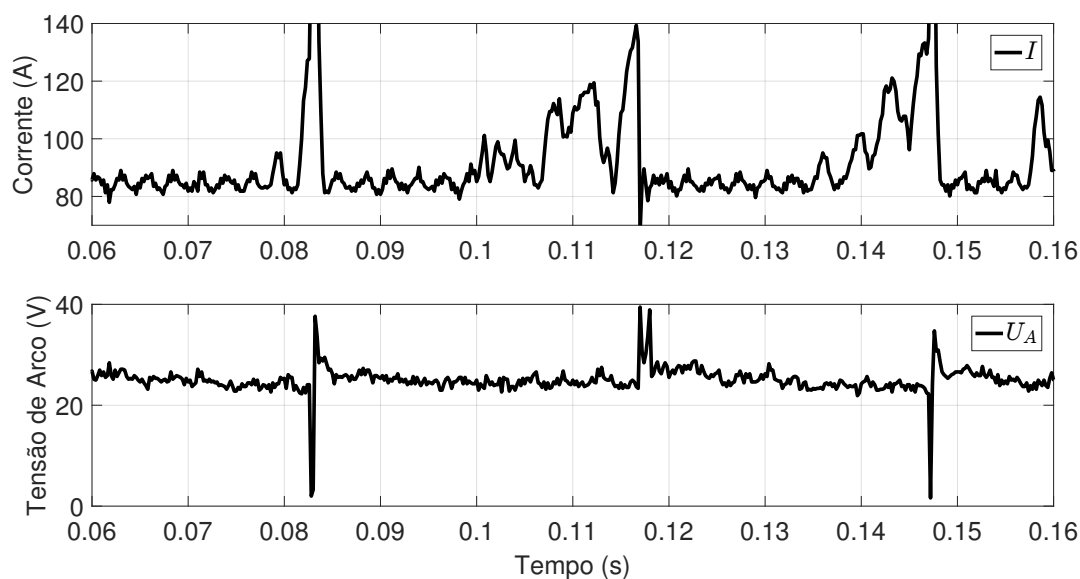


Figura 54: Oscilogramas experimentais de corrente de soldagem e tensão de arco com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito em um período de tempo menor.

ocorrência dos curtos-circuitos são a maior dificuldade para representação matemática do processo de transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.

De modo geral, pode-se observar na Figura 54 que o comportamento dessa transferência é mais próximo do modo globular do que curto-circuito, uma vez que a corrente passa a maior parte do tempo em torno de um ponto de operação, neste caso 80A. Isso também se reflete na tensão de arco, que se manteve em torno de 25V, salvo os momentos de curto-circuito.

Então, o comportamento da corrente de soldagem e da tensão de arco assumido para validação do modelo proposto para representar a transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito são: maior proximidade com o modo de transferência globular, mantendo-se em torno dos valores de operação acima identificados e ocorrência de curtos-circuitos aleatórios.

O processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito requer a simulação de ambos os modelos matemáticos compreensivos, ou seja, (39)–(44) e (55)–(60). Esse modelo também requer a computação das equações das dinâmicas auxiliares: tensão do arco, mostrada em (23), fração de raio da gota influenciada pelo ângulo de condução h e raio da gota R_D , mostrados em (1) e (3), respectivamente. Bem como a taxa de fusão do eletrodo M_R , mostrada em (33) (ou (34)–(35) se preferir) e

as forças atuantes, mostradas em (4), (9), (12), (13) e (15). Também são computadas as pressões exercidas na gota/ponte e velocidade de transferência de massa, mostrados de (48)–(52).

O critério de destacamento da gota utilizado foi o critério DBFM, mostrado em (64), pois a maior parte do tempo a transferência ocorre por voo livre, em modo globular. Foi assumido, assim como para a simulação da transferência por curto-circuito que quando ocorre um curto-circuito a massa é destacada ao término desse curto. Assim, as condições de *reset* para o destacamento por modo globular foram as condições mostradas em (68)–(73) e as condições de *reset* para o destacamento por curto-circuito são mostradas em (74)–(79).

Além disso, as condições iniciais das variáveis de estado foram consideradas nulas, salvo a massa da gota (x_5), que foi considerada praticamente nula (0,000001), conforme já foi explicado. O ângulo de condução θ foi definido como $1,5708rad$ (90°) e a função de correção f de destacamento foi ajustada em 0,1. Ainda, para obter $3m/min$ de velocidade de alimentação de arame, a tensão do motor do alimentador de arame foi de $0,06785V$.

Ainda, foram inseridas incertezas nos modelos, assim como foi feito para o modelo da transferência globular, mostrado em (45). Entretanto, os limites definidos foram:

$$\begin{aligned} U'_S &= \pm 0,1\%U_S \\ U'_{ARM} &= \pm 0,01\%U_{ARM} \\ I' &= \pm 0,1\%I \\ U'_A &= \pm 3\%U_A \end{aligned} \tag{110}$$

E por fim a aleatoriedade dos curtos-circuitos foi tratada da seguinte maneira: foi implementada uma função para gerar um número aleatório de 0 à 1, se o número gerado for superior a 0,96 então uma outra função gera um valor aleatório, também de 0 à 1, e o multiplica por 0,025. O segundo valor gerado é então adicionado ao raio da gota. Se esse raio resultante for maior ou igual a distância entre bico de contato e peça, então o curto-circuito é naturalmente computado.

Esse método conseguiu aproximar as saídas dos modelo ao que foi observado nos experimentos de modo geral. Entretanto, os curtos-circuitos com picos elevadíssimos de corrente ($> 200A$) não ocorreram em simulação, nem os pequenos curtos-circuitos sem extinção do arco elétrico. Esses curtos-circuitos ocorrem quando a gota de solda encosta na poça de fusão, porém sua massa não é transferida, devido à ação da tensão superficial, a qual contribui para a retenção da gota, de forma mais significativa que as forças que contribuem para sua transferência para a poça de fusão. Indica-se o estudo

dessas dinâmicas em trabalhos futuros, conforme será melhor discutido nas conclusões deste trabalho.

Na Figura 55 é mostrada a simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito no mesmo período de tempo mostrado no oscilograma experimental da Figura 54.

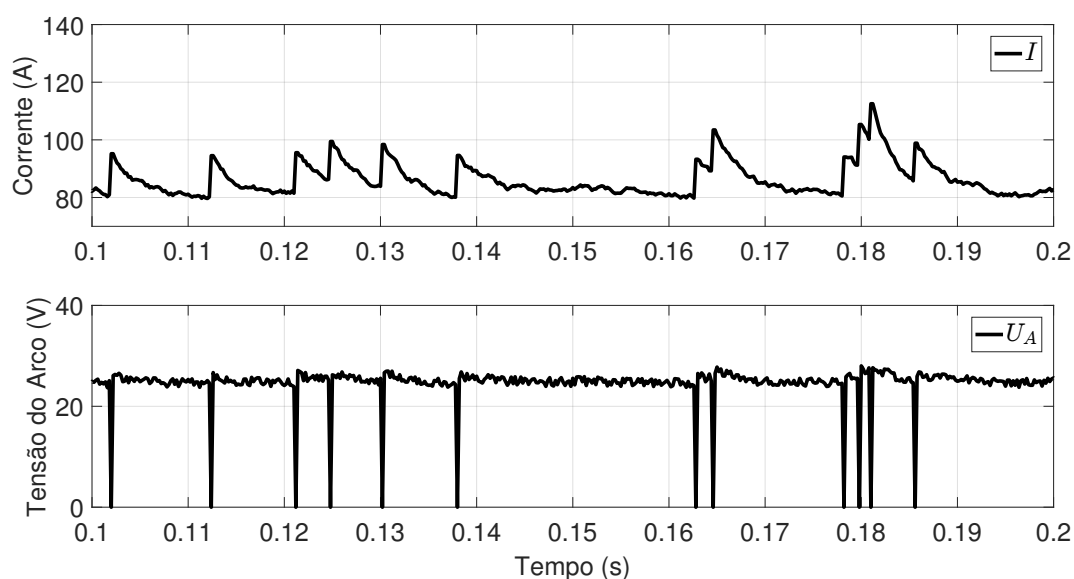


Figura 55: Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.

Como pode ser observado na Figura 55, a corrente de soldagem se manteve entre 80A e 90A, exceto nos momentos em que ocorreram os curtos-circuitos. Da mesma maneira, a tensão de arco ficou em torno dos 25V.

Para melhor visualização desse comportamento, nas Figuras 56 e 57 são mostrados períodos de tempo onde a transferência mista está ocorrendo predominantemente pelo modo globular, caracterizando essas grandezas, experimentalmente e em simulação.

Outra característica observada nos experimentos é a ocorrência de pequenos curtos-circuitos consecutivos, antes mesmo da corrente de soldagem reduzir ao valor dominante, quando a transferência ocorre predominante por modo globular.

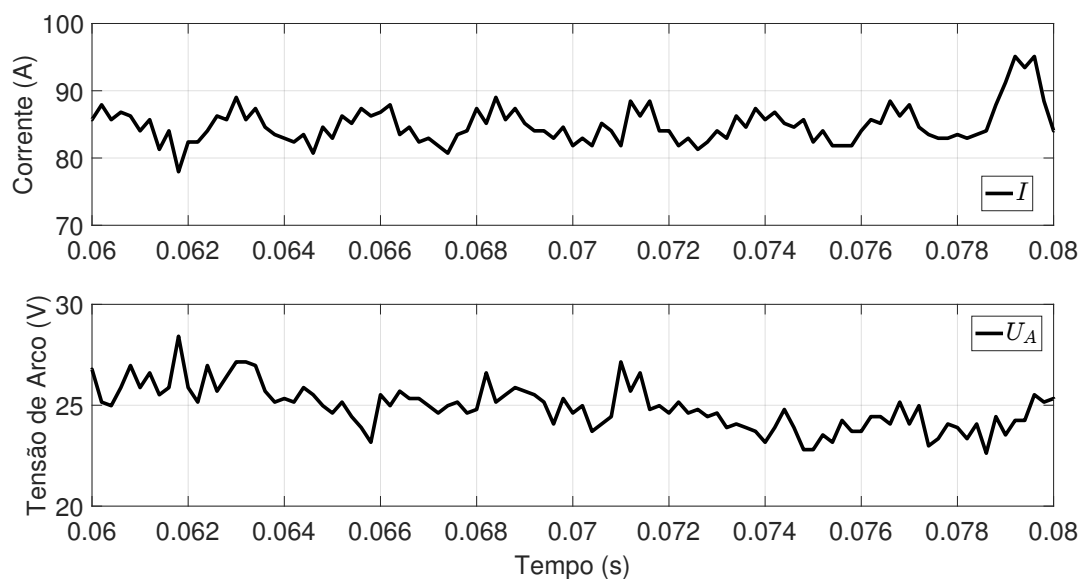


Figura 56: Oscilograma experimental do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo de forma predominante globular.

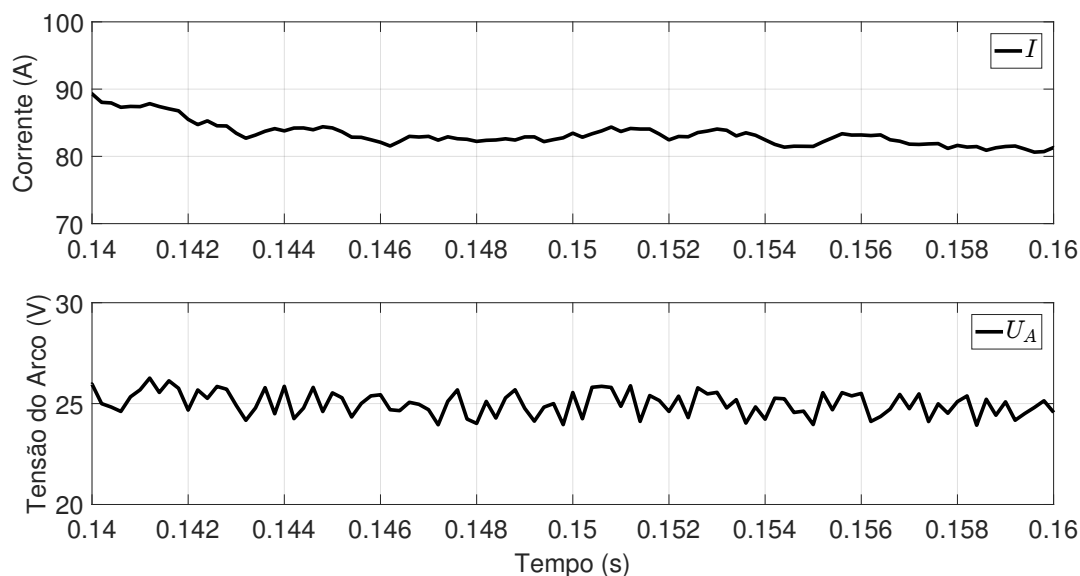


Figura 57: Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo de forma predominante globular, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.

Como já foi mencionado, este é um dos fenômenos que agrega dificuldade na representação desse processo, pois essas pequenas elevações sequenciais na corrente de soldagem, as vezes não causam a extinção do arco, conseqüentemente, nem sempre a tensão de arco é reduzida no momento do curto-circuito.

Na Figura 58 é mostrada um desses momentos, observado experimentalmente.

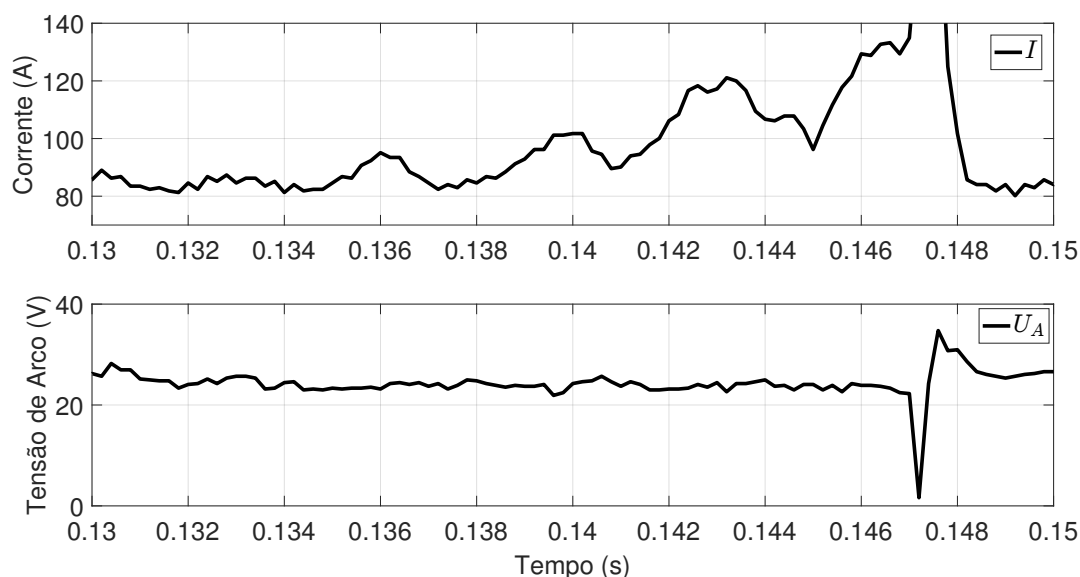


Figura 58: Oscilograma experimental do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo curto-circuito sobre curto-circuito.

Note que a corrente de soldagem é elevada quatro vezes, sem retornar à base de 80A. Entretanto, apenas quando ocorre o pico mais elevado de corrente de soldagem é que a tensão de arco é reduzida a quase zero. Este fenômeno é uma das incertezas enfatizadas ao longo do texto, que tornam a representação desse modo de transferência complexa.

Nas simulações, na Figura 59, também são observados os curto-circuitos consecutivos. Porém, como as dinâmicas da corrente de soldagem e tensão de arco são fortemente acopladas, o modelo matemático reflete isto instantaneamente. Isto é, o fenômeno dos pequenos curtos-circuitos consecutivos é observado nas simulações, entretanto, há uma queda na tensão de arco a cada curto-circuito, mesmo que esse curto-circuito apresente um pico de corrente reduzido.

Para representar esse fenômeno inerente à transferência metálica mista globular/curto-circuito, foi implementado uma lógica auxiliar que apenas permite a queda de tensão do arco se o pico de corrente do curto-circuito for maior que um limite pré-determinado. Para tal, estipulou-se o limite superior de 110A. A Figura 60 mostra essa simulação.

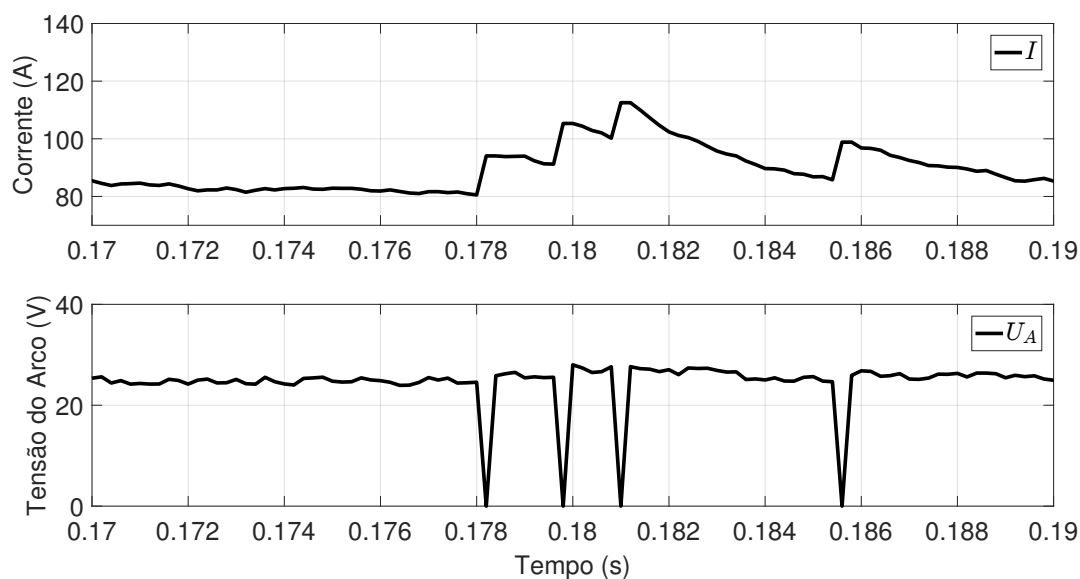


Figura 59: Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo curto-circuito sobre curto-circuito, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.

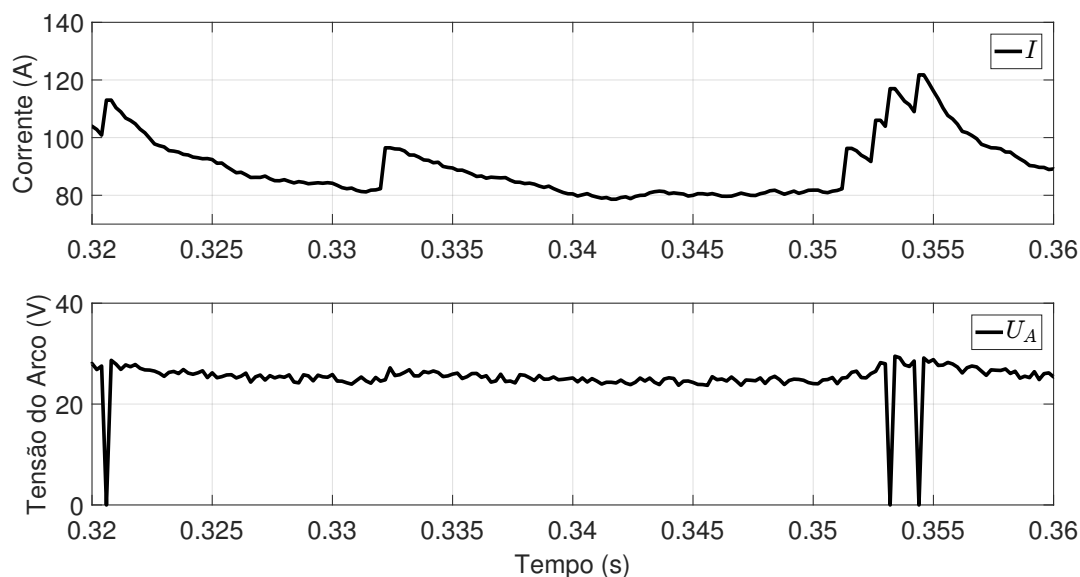


Figura 60: Simulação do processo de soldagem com transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito ocorrendo curto-circuito sobre curto-circuito sem a queda de tensão na tensão do arco durante os curtos-circuitos de pico de corrente inferiores, considerando as incertezas na tensão da fonte, tensão do alimentador de arame, corrente de soldagem e tensão do arco inseridas no modelo matemático.

Para melhor visualização dos comentários anteriores, na Figura 61 é mostrada,

lado a lado, um resultado simulado e o resultado experimental, onde é notável a predominância do modo globular e os curtos-circuitos sequências discutidos, em ambos os resultados. Assim, conclui-se que o modelo matemático proposto representa as dinâmicas dominantes da transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito.

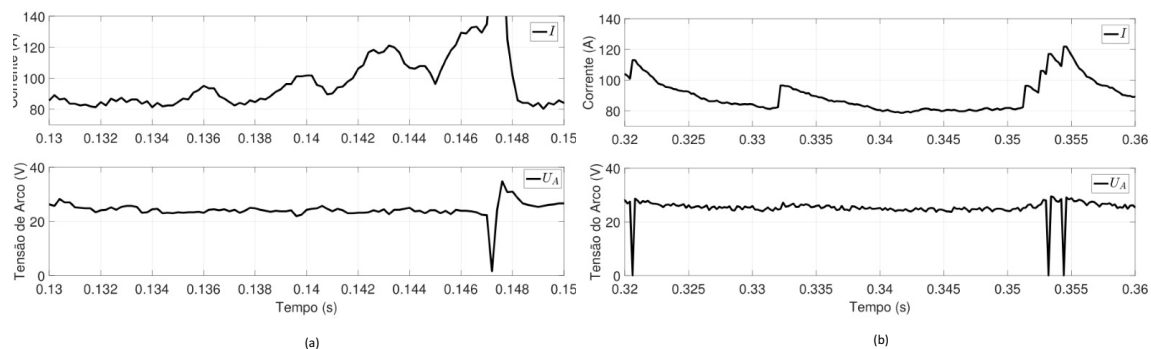


Figura 61: Validação do modelo da transferência metálica por modo mista globular/curto-circuito: (a) experimental e (b) simulação.

Ainda, como foi comentado sobre a sensibilidade dos modelos frente a variações paramétricas, diversas simulações foram realizadas para mostrar graficamente essas influências. No Apêndice F são mostrados os resultados de simulações para os três modos de transferência metálica de interesse deste trabalho: globular, curto-circuito e globular/curto-circuito.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram extensamente estudadas as dinâmicas inerentes ao processo de soldagem MIG/MAG e com base em trabalhos experimentais da literatura foram apresentadas as relações entre os parâmetros acoplados deste processo. Além disso, uma extensa revisão bibliográfica da modelagem matemática dos processos MIG/MAG e relações paramétricas foi apresentada.

Em seguida foram apresentados dois modelos matemáticos não-lineares e de alta ordem, também com parâmetros fortemente acoplados e variantes no tempo, para representar a transferência metálica por voo livre e a transferência metálica por curto-circuito, individualmente. Ambos os modelos matemáticos foram validados, comparando suas dinâmicas de saída simuladas com resultados experimentais obtidos através de ensaios. Essas dinâmicas foram a corrente de soldagem e a tensão do arco. Para realizar as simulações os parâmetros do processo foram identificados e as mesmas condições de operação dos ensaios foram impostas as simulações.

Então, foi proposto a utilização desses dois modelos matemáticos, juntamente com uma lógica para comutação entre ambos, para representar o modo de transferência metálica mista globular/curto-circuito em processos de soldagem MIG/MAG. Também foram propostos dois conjuntos de tratamento das dinâmicas após a ocorrência da transferência metálica, em simulações, baseado em critérios da literatura. A validação desse modelo também foi através da comparação de suas saídas com os dados experimentais sob as mesmas condições de operação e com os parâmetros identificados.

Por fim, foram realizadas diversas simulações para mostrar a sensibilidade do acoplamento paramétrico, bem como de seu ajuste operacional. Este estudo mostrou de forma mais clara as relações discutidas na revisão bibliográfica e parcialmente o que foi mostrado no diagrama de relações paramétricas no Capítulo 3.

Ainda, não foram feitos ensaios experimentais em modo de transferência goticular, pois o gás de proteção utilizado nos ensaios (CO_2 puro) inibe essa forma de transferência metálica, porém o modo de transferência metálica goticular é um modo de transferência por voo livre, assim como o modo globular. Então, o primeiro modelo validado pode ser utilizado para representar esse modo de transferência metálica também.

Algumas sugestões para trabalhos futuros são feitas a seguir:

- Utilização de câmeras de alta velocidade para analisar a transferência metálica mista globular/curto-circuito, sincronizado com sistema de aquisição de dados elétricos e de áudio, para estudar as dinâmicas desconhecidas desse processo;
- Avaliar a sensibilidade paramétrica experimentalmente, através de um sistema câmera de alta velocidade/sistema de aquisição de dados elétricos sincronizados para identificar influências ainda não descobertas;
- Avaliar experimentalmente a condição de *reset* do *stick-out*, para aferir a verossimilhança do valor proposto e, se necessário, corrigi-lo, para tornar o modelo ainda mais representativo desse processo físico;
- Estudo das incertezas e dinâmicas não modeladas que afetam a transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito, principalmente para averiguar quais as causas dos picos de corrente mais elevados e melhor representação dos curtos-circuitos sequenciais com pico de corrente mais amenos;
- Expandir o modelo proposto para representar o modo de transferência metálica globular/goticular/curto-circuito;
- Expandir o modelo proposto para representar as transferências metálicas em processos de soldagem híbridos, tais como *Laser Arc Hybrid Welding*, que combina o processo de soldagem a laser com o processo de soldagem MIG/MAG.

Além disso, os modelos desenvolvidos nesse trabalho podem ser utilizados para avaliar as técnicas de controle implementadas antes de testar no processo físico, evitando perda desnecessária de material. Assim, sugere-se também a implementação de um controle robusto dedicado a regulação da corrente de soldagem, para suprimir os picos mais elevados da corrente de soldagem durante a transferência metálica mista globular/curto-circuito.

REFERÊNCIAS

- [1] LANCASTER, J. F. The physics of welding. *Physics in technology*, IOP Publishing, v. 15, n. 2, p. 73–80, 1984.
- [2] SOUZA, C. I. d. *Análise comparativa dos processos de soldagem gmaw e fcaw com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal*. 2011. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- [3] SCHWEDERSKY, M. B. et al. Soldagem tig de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 16, n. 34, p. 333–340, 2011.
- [4] BROERING, C. E. *Desenvolvimento de sistemas para automação da soldagem e corte térmico*. 2005. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [5] SOUZA, D. et al. Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo mig/mag operando em curto-circuito. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 16, n. 1, p. 22–31, 2011.
- [6] SANTANA, I. J. d. *Modelamento Matemático do processo de soldagem GMAW*. 2010. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2010.
- [7] SANTANA, I. J.; MODENESI, P. J. Modelagem matemática do processo de soldagem gmaw-transferência por voo livre. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 16, n. 3, p. 213–222, 2011.
- [8] LOPERA, J. E. P. *Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW baseada em técnicas de processamento de imagens digitais e superfícies de resposta*. 2010. 137f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2010.

- [9] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Introdução à metalurgia da soldagem. *Apostila, Belo Horizonte: UFMG*, 2012.
- [10] MODENESI, P. J. et al. A piece of software to simulate operational characteristics of mig/mag welding. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 17, n. 1, p. 32–39, 2012.
- [11] SOUZA, D.; RESENDE, A. A.; SCOTTI, A. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo mig/mag. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 14, n. 1, p. 192–198, 2009.
- [12] BARBEDO, N. D. D. *Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica. 2011*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2011.
- [13] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. Introdução aos processos de soldagem. *Apostila, Belo Horizonte: UFMG*, 2006.
- [14] GIBSON, B. et al. Friction stir welding: process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 16, n. 1, p. 56–73, 2014.
- [15] ALCARAZ, P.; MANUEL, J. *Development and automation of a robotic welding cell Using machine vision in Halcon programming environment*. 2015. Relatório Final (Engenharia de Eletrônica Industrial e Automação) – Department di Tecnología Electrónica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Espanha. 2015.
- [16] STARKE, G. et al. Self-organization and self-coordination in welding automation with collaborating teams of industrial robots. *Machines*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 4, n. 4, p. 1–23, 2016.
- [17] KOLEVA, E. et al. Automation of the electron-beam welding process. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2016. v. 700, n. 1, p. 12012–12017.
- [18] MOSER, M.; PFEIFFER, M.; PICHLER, J. A novel domain-specific language for the robot welding automation domain. In: IEEE. *Proceedings of Emerging Technology and Factory Automation*. [S.l.], 2014. p. 1–6.
- [19] FELIZARDO, I. et al. Utilização de um sistema robótico para soldagem orbital de dutos com arame sólido e tubular. In: *Anais do XXXI Congresso Nacional de Soldagem*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–6.

- [20] SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; GOHR, R. Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo mig/mag por curto-circuito controlado (ccc)—uma revisão da literatura. parte 2 de 3: Formação da gota metálica, gases de proteção, mecanismos de penetração aporte térmico e aspectos econômicos. *Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 12, n. 1, p. 326–335, 2007.
- [21] DUTRA, J. C. Mig/mag—transferência metálica por curto-circuito—fontes de soldagem versus gases do arco. *Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 13, n. 1, p. 019–024, 2008.
- [22] MOREIRA, A. F. *Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW*. 2008. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2008.
- [23] FILHO, E. G. *Estudo da influência relativa das variáveis do processo de soldagem MIG-MAG (GMAW) no passe de raiz*. 2012. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal De Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- [24] BRACARENSE, A. Q. Gas metal arc welding. *Info Solda 4.0*, <http://www.infosolda.com.br/>, acessado em 01/04/2016.
- [25] CIMM. *Centro de Informação de Metal Mecânica*. 2016. http://http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6339-acos-carbono-estruturais#.WOQNH2nythE. [Online; acessado 01-Maio-2016].
- [26] QUITES, A. M. Introdução à soldagem a arco voltaico. *Soldasoft, Florianópolis*, 2002.
- [27] SOUZA, D. et al. Influência da tensão de soldagem e do gás de proteção sobre a correlação entre indutância e regularidade da transferência metálica na soldagem mig/mag por curto-circuito. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 16, n. 2, p. 114–122, 2011.
- [28] LIMA, E. et al. *Estudo da influência dos parâmetros de soldagem do processo eletrodo tubular na dureza da ZTA de um aço CrMo*, 2015. , v.1, n.1, 1–17, Unileste – MG.
- [29] HERMANS, M. J. M.; OUDEN, G. D. Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 61, n. 4, p. 137–141, 1999.
- [30] AWS. *Gas-metal arc welding. Welding Handbook*. 2.ed., v.6,. [S.l.], 1994.

- [31] WANG, G.; HUANG, P. G.; ZHANG, Y. M. Numerical analysis of metal transfer in gas metal arc welding under modified pulsed current conditions. *Metallurgical and materials transactions B*, Springer, v. 35, n. 5, p. 857–866, 2004.
- [32] MODENESI, P. J. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. *Apostila, Belo Horizonte: UFMG*, 2007.
- [33] NORRISH, J. *Advanced welding processes*. [S.l.]: Institute of Physics Publishing Bristol, United Kingdom, 1992.
- [34] SUBRAMANIAM, S. et al. Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 77, n. 1, p. 458–464, 1998.
- [35] LESNEWICH, A. Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding, part ii. *Control of metal transfer*, *Welding Journal*, American Welding Society, v. 37, n. 9, p. 418s–425s, 1958.
- [36] BINGUL, Z.; COOK, G. E. A real-time prediction model of electrode extension for gmaw. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 47–54, 2006.
- [37] PONOMAREV, V. et al. Investigation of the mechanism of short arc mig/mag welding metal transfer mixed modes. *International Journal for the Joining of Materials*, Ingeniorhojskolen Helsingor Teknikum, v. 16, n. 1, p. 65–70, 2004.
- [38] PONOMAREV, V.; SCOTTI, A. Investigation of the mechanism of long arc mig/mag welding metal transfer mixed modes provoked by inadequate dynamic features of the power source. *International Journal for the Joining of Materials*, Ingeniorhojskolen Helsingor Teknikum, v. 16, n. 1, p. 71–78, 2004.
- [39] FAN, H.; KOVACEVIC, R. Dynamic analysis of globular metal transfer in gas metal arc welding-a comparison of numerical and experimental results. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 31, n. 20, p. 2929–2941, 1998.
- [40] USHIO, M. et al. Effects of shielding gas on metal transfer. *Welding international*, Taylor & Francis, v. 9, n. 6, p. 462–466, 1995.
- [41] KIM, Y. S.; EAGAR, T. W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 72, n. 1, p. 269–278, 1993.
- [42] OZCELIK, S.; MOORE, K. L.; NAIDU, S. D. Application of mimo direct adaptive control to gas metal arc welding. In: IEEE. *Proceedings of the 1998 American Control Conference*. [S.l.], 1998. v. 3, p. 1762–1766.

- [43] CAMPOS, P. T. *Caracterização Mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e Arame Tubular (FCAW)*. 2005. 61f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. 2005.
- [44] FORTES, C.; ARAÚJO, W. *Arames tubulares*, 51f. Apostila ESAB BR, São Paulo, 2004.
- [45] MACHADO, I. G. Economia da soldagem. In: *Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 2, p. 999–1013.
- [46] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. [S.l.]: Artliber, 2008.
- [47] SMITH, A. A. Characteristics of the short-circuiting co₂-shielded arc. In: *Proceedings of Symposium on Physics of the Welding Arc*. [S.l.: s.n.], 1962. p. 75–91.
- [48] PESSOA, A. R. P. *Revestimento de Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG com Transferência por Curto-Circuito*. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- [49] CIRINO, L. M. *Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG*. 2009. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [50] PALANI, P. K.; MURUGAN, N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 172, n. 1, p. 1–10, 2006.
- [51] SILVA, R. H. G. *Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz*. 2005. 113f. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [52] GOHR, R. J. *Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG*. 2002. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [53] BAIXO, C. E. I. *Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco*. 1999. 169f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1999.

- [54] DIRENE, H. F.; SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C. Comparação do processo mig/mag em transferência por curto-circuito com controle de corrente (ccc) com o processo stt na soldagem de passes de raiz em dutos. *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*, v. 1, n. 5.
- [55] LUCAS, W.; IORDACHESCU, D.; PONOMAREV, V. Classification of metal transfer modes in gma. *IIW Doc*, IIW, v. 12, n. 1, p. 1859–1865, 2005.
- [56] VILARINHO, L. O. Modos fundamentais de transferência metálica naturais e controlados. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 10, n. 1, p. 14–19, 2007.
- [57] NORRISH, J. A review of metal transfer classification in arc welding. In: *Proceedings of Conf. IIW Doc*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 1769–1773.
- [58] IORDACHESCU, D.; QUINTINO, L. Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 202, n. 1-3, p. 391–397, 2008.
- [59] IZUTANI, S. et al. *Observation and classification of droplet transfer in gas metal arc welding*. Report – International Institute of Welding, 2006.
- [60] LOWKE, J. J. Physical basis for the transition from globular to spray modes in gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 42, n. 13, p. 135–204, 2009.
- [61] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in gma welding. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 212, n. 6, p. 1406–1413, 2012.
- [62] PAULO, S. S.; VILARINHOY, L. O.; VILELAZ, M. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. *International Journal for the Joining of Materials*, J.O.M., v. 12, n. 2, p. 48–59, 2000.
- [63] LIN, Q.; LI, X.; SIMPSON, S. W. Metal transfer measurements in gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 34, n. 3, p. 347–353, 2001.
- [64] FERRARESI, V. A.; FIGUEIREDO, K. M.; ONG, T. H. Metal transfer in the aluminum gas metal arc welding. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, SciELO Brasil, v. 25, n. 3, p. 229–234, 2003.
- [65] MODENESI, P. J.; REIS, R. I. A model for melting rate phenomena in gma welding. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 189, n. 1, p. 199–205, 2007.

- [66] JONES, L. A.; EAGAR, T. W.; LANG, J. H. Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 31, n. 1, p. 93–106, 1998.
- [67] AGHAKHANI, M.; MEHRDAD, E.; HAYATI, E. Parametric optimization of gas metal arc welding process by taguchi method on weld dilution. *International journal of modeling and optimization*, IACSIT Press, v. 1, n. 3, p. 216–220, 2011.
- [68] ESSERS, W.; WALTER, R. Heat transfer and penetration mechanisms with gma and plasma-gma welding. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 60, n. 2, p. 37–42, 1981.
- [69] SMARTT, H. B.; EINERSON, C. J. A model for heat and mass input control in gmaw. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 72, n. 5, p. 217–229, 1993.
- [70] BJELIĆ, M. B. et al. Numerical modeling of two-dimensional heat-transfer and temperature-based calibration using simulated annealing optimization method: Application to gas metal arc welding. *Thermal Science*, v. 20, n. 2, p. 655–665, 2016.
- [71] KUMAR, A.; ZHANG, W.; DEBROY, T. Improving reliability of modelling heat and fluid flow in complex gas metal arc fillet welds – part i: an engineering physics model. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 38, n. 1, p. 119–126, 2004.
- [72] KUMAR, A.; DEBROY, T. Improving reliability of modelling heat and fluid flow in complex gas metal arc fillet welds – part ii: application to welding of steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 38, n. 1, p. 127–134, 2004.
- [73] CHO, M. H. *Numerical simulation of arc welding process and its application*. Tese (Doutorado em Engenharia da Soldagem) – Ohio State University, Columbus, USA, 2006.
- [74] BELLET, M.; HAMIDE, M. Direct modeling of material deposit and identification of energy transfer in gas metal arc welding. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Emerald Group Publishing Limited, v. 23, n. 8, p. 1340–1355, 2013.
- [75] SINGLA, M. et al. Parametric optimization of gas metal arc welding processes by using factorial design approach. *International Journal of Engineering Research and Applications*, Inderscience, v. 3, n. 2, p. 420–424, 2013.
- [76] TSAI, M. C.; KOU, S. Electromagnetic-force-induced convection in weld pools with a free surface. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 69, n. 6, p. 241–246, 1990.

- [77] KIM, J.-W.; NA, S.-J. A study on the three-dimensional analysis of heat and fluid flow in gas metal arc welding using boundary-fitted coordinates. *Journal of Engineering for industry*, ASME, v. 116, n. 1, p. 78–85, 1994.
- [78] USHIO, M.; WU, C. S. Mathematical modeling of three-dimensional heat and fluid flow in a moving gas metal arc weld pool. *Metallurgical and materials transactions B*, Springer, v. 28, n. 3, p. 509–516, 1997.
- [79] FAN, H. G.; KOVACEVIC, R. A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 37, n. 18, p. 2531–2544, 2004.
- [80] JÖNSSON, P.; WESTHOFF, R.; SZEKELY, J. Arc characteristics in gas-metal arc welding of aluminum using argon as the shielding gas. *Journal of applied physics*, AIP, v. 74, n. 10, p. 5997–6006, 1993.
- [81] ZHU, P.; RADOS, M.; SIMPSON, S. W. A theoretical study of a gas metal arc welding system. *Plasma Sources Science and Technology*, IOP Publishing, v. 4, n. 3, p. 495–500, 1995.
- [82] HAIDAR, J.; LOWKE, J. Predictions of metal droplet formation in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 29, n. 12, p. 2951–2960, 1996.
- [83] HAIDAR, J. An analysis of the formation of metal droplets in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 31, n. 10, p. 1233–1244, 1998.
- [84] LANCASTER, J. F. The physics of fusion welding. part 1: The electric arc in welding. In: IET. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. [S.l.], 1987. v. 134, n. 5, p. 233–254.
- [85] LANCASTER, J. F. The physics of fusion welding. part 2: Mass transfer and heat flow. In: IET. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. [S.l.], 1987. v. 134, n. 6, p. 297–316.
- [86] ROSENTHAL, D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. *Transactions of the ASME*, ASME, v. 68, n. 2, p. 849–866, 1946.
- [87] CHRISTENSEN, N.; DAVIES, V. d. L.; GJERMUNDSEN, K. Distribution of temperatures in arc welding. *British Welding Journal*, British Welding Research Association, v. 12, n. 2, p. 54–75, 1965.
- [88] LEVIN, P. A general solution of 3-d quasi-steady-state problem of a moving heat source on a semi-infinite solid. *Mechanics Research Communications*, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 151–157, 2008.

- [89] MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Curso de metalurgia da soldagem. *Laboratório de Soldagem e Ensaios Não Destrutivos/DEM/UFMG. Belo Horizonte*, 1992.
- [90] HEIPLE, C. Mechanism for minor element effect on gta fusion zone geometry. *Welding journal*, v. 61, n. 4, p. 97s–102s, 1982.
- [91] HALMOY, E. The pressure of the arc acting on the weld pool. *Arc Physics and Weld pool Behavior, The Welding Institute*, v. 1, n. 1, p. 259–266, 1979.
- [92] TEKRIWAL, P.; MAZUMDER, J. Finite element analysis of three-dimensional transient heat transfer in gma welding. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 67, n. 5, p. 150–156, 1988.
- [93] SHAHI, A. S.; PANDEY, S. Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 196, n. 1, p. 339–344, 2008.
- [94] HALMOY, E. Electrode wire heating in terms of welding parameters. Elsevier, p. 330–336, 1986.
- [95] HALMOY, E. Current–voltage process characteristics in gmaw. *IIW Document*, IIW, v. 1, n. 1, p. 212–773, 1990.
- [96] SCOTTI, A.; RODRIGUES, C. E. A. L. Determination of the momentum of droplets impinging on the pool during aluminium gmaw. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 14, n. 4, p. 336–343, 2009.
- [97] SHIWEI, Z.; JIANPING, H.; FENG, X. Modeling and simulating of short-circuit in gmaw. In: IEEE. *Proceedings of International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*. [S.l.], 2011. p. 1276–1281.
- [98] NAIDU, D. S. et al. Gas metal arc welding control: Part 1 – modeling and analysis. *Nonlinear Analysis, Methods and Applications*, Elsevier, v. 30, n. 5, p. 3101–3111, 1997.
- [99] XU, P.; RADOS, M.; SIMPSON, S. W. Circuit simulation for gas metal arc welding. *Science and Technology of welding and Joining*, Taylor & Francis, v. 4, n. 6, p. 341–346, 1999.
- [100] TERASAKI, H.; SIMPSON, S. W. Circuit simulation for gas metal arc welding system. In: *Proceedings of Midwest Symposium on Circuits and Systems*. [S.l.]: IEEE, 2004. p. 387–390.

- [101] SIMPSON, S. W. Metal transfer instability in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding & Joining*, Maney Publishing, v. 14, n. 4, p. 262–273, 2013.
- [102] CHOI, J. H.; LEE, J. Y.; YOO, C. D. Simulation of dynamic behavior in a gmaw system. *Welding Journal*, v. 80, n. 10, p. 239S–246S, 2001.
- [103] JÖNSSON, P. et al. Power characteristics in gmaw: Experimental and numerical investigation. *Welding journal*, v. 74, n. 3, 1995.
- [104] CHOI, S.; KIM, Y.; YOO, C. Dimensional analysis of metal transfer in gma welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 32, n. 3, p. 326–334, 1999.
- [105] WASZINK, J.; HEUVAL, G. V. de. Arc physics and weld pool behavior. *The Welding Institute*, p. 223–240, 1979.
- [106] CHOI, S. K.; YOO, C. D.; KIM, Y. S. Dynamic simulation of metal transfer in gmaw, part 1: Globular and spray transfer modes. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 77, p. 38–44, 1998.
- [107] CHOI, S. K. et al. Dynamic simulation of metal transfer in gmaw-part 2: short-circuit transfer mode. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 77, p. 45–51, 1998.
- [108] QUINN, T. P. et al. Coupled arc and droplet model of gmaw. *Science and Technology of Welding & Joining*, Maney Publishing, v. 10, n. 1, p. 113–119, 2013.
- [109] WANG, Q. L.; I, P. J. L.; NAKA, M. Arc light sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed gmaw process. *Welding Society Papers*, Japan Welding Society, v. 15, n. 3, p. 415–424, 1997.
- [110] KIM, J.; NA, S. A study on prediction of welding current in gas metal arc welding part 1: Modelling of welding current in response to change of tip-to-workpiece distance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Sage Publications, v. 205, n. 1, p. 59–63, 1991.
- [111] KIM, J.; NA, S. A study on prediction of welding current in gas metal arc welding part 2: Experimental modelling of relationship between welding current and tip-to-workpiece distance and its application to weld seam tracking system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Sage Publications, v. 205, n. 1, p. 64–69, 1991.
- [112] QUINN, T. P.; MADIGAN, R. B.; SIEWERT, T. A. An electrode extension model for gas metal arc welding. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 73, n. 10, p. 241–248, 1994.

- [113] MODENESI, P. J. et al. Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem gmaw com transferência por curto-circuito. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 16, n. 1, p. 12–21, 2011.
- [114] KIM, D.; RHEE, S. Design of a robust fuzzy controller for the arc stability of co/sub 2/welding process using the taguchi method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, IEEE, v. 32, n. 2, p. 157–162, 2002.
- [115] KANG, M. J.; RHEE, S. The statistical models for estimating the amount of spatter in the short circuit transfer mode of gmaw. *Welding Journal, American Welding Society*, v. 80, n. 1, p. 1–8, 2001.
- [116] LOPERA, J. E. P.; ALFARO, S. C. A.; MOTTA, J. Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem gmaw. *Revista Soldagem e Inspeção*, ABS, v. 17, n. 4, p. 335–346, 2011.
- [117] HU, J.; TSAI, H.-L.; WANG, P. C. Numerical modeling of gmaw arc. Springer, v. 1, n. 1, p. 69–74, 2007.
- [118] HU, J.; TSAI, H.-L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. part i: The arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 50, n. 5, p. 833–846, 2007.
- [119] HU, J.; TSAI, H.-L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. part ii: The metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 50, n. 6, p. 808–820, 2007.
- [120] WANG, F. et al. Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 36, n. 9, p. 1143–1152, 2003.
- [121] SCHIANO, J. L.; ROSS, J. H.; WEBER, R. A. Modeling and control of puddle geometry in gas metal-arc welding. In: IEEE. *of Proceedings 1991 American Control Conference*. [S.l.], 1991. p. 1044–1050.
- [122] BERA, M. K.; BANDYOPADHYAY, B.; PAUL, A. K. Integral sliding mode control for gmaw systems. In: ELSEVIER. *Proceedings of Dynamics and Control of Process Systems*. [S.l.], 2013. v. 10, p. 337–342.
- [123] BERA, M. K.; BANDYOPADHYAY, B.; PAUL, A. K. Robust nonlinear control of gmaw systems – a higher order sliding mode approach. In: IEEE. *Proceedings of International Conference on Industrial Technology*. [S.l.], 2013. p. 175–180.
- [124] BERA, M. K. et al. Discrete-time sliding mode control of gmaw systems using infrequent output measurements. In: IEEE. *Proceedings of European Control Conference*. [S.l.], 2013. p. 3736–3741.

- [125] ABDELRAHMAN, M. Feedback linearization control of current and arc length in gmaw systems. In: IEEE. *Proceedings of the 1998 American Control Conference*. [S.l.], 1998. v. 3, p. 1757–1761.
- [126] THOMSEN, J. S. Feedback linearization based arc length control for gas metal arc welding. In: IEEE. *Proceedings of 2005 American Control Conference*. [S.l.], 2005. p. 3568–3573.
- [127] THOMSEN, J. S. Control of pulsed gas metal arc welding. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, Inderscience Publishers, v. 1, n. 2, p. 115–125, 2006.
- [128] KHATAMIANFAR, A.; FATEH, M. M.; FARAHANI, S. S. On sliding mode control of the manual gas metal arc welding process. In: IEEE. *Proceedings of International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. [S.l.], 2008. p. 3570–3575.
- [129] JALILI-KHARAAJOO, M. et al. Robust nonlinear control of current and arc length in gmaw systems. In: IEEE. *Proceedings of Conference on Control Applications*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 1313–1316.
- [130] OZCELIK, S. An animated matlab/simulink tool for gas metal arc welding control experimentation. In: IEEE. *Proceedings of the 1998 American Control Conference*. [S.l.], 1998. v. 3, p. 1767–1771.
- [131] OZCELIK, S.; MOORE, K. *Modeling, sensing and control of gas metal arc welding*. [S.l.]: Elsevier, 2003.
- [132] PLANCKAERT, J. et al. Modeling of mig/mag welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies. *Applied Mathematical Modelling*, publisher=Elsevier, volume=34, number=4, pages=1004–1020, year=2010,.
- [133] BAZARGAN-LARI, Y.; EGHTESAD, M.; ASSADSANGABI, B. Study of internal dynamics stability and regulation of globular-spray mode of gmaw process via mimo feedback-linearization scheme. In: IEEE. *Proceedings of International Conference on Intelligent Engineering Systems*. [S.l.], 2008. p. 31–36.
- [134] ANZEHAEE, M. M.; HAERI, M.; TIPI, A. R. D. Gas metal arc welding process control based on arc length and arc voltage. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Control, Automation and Systems*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 280–285.
- [135] ANZEHAEE, M. M.; HAERI, M. Welding current and arc voltage control in a gmaw process using armarkov based mpc. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 19, n. 12, p. 1408–1422, 2011.

- [136] GARCIA, R. P. *Uma avaliação dos processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos, usando consumível para aço estrutural*. 2010. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2010.
- [137] KIM, L. S. et al. Development of an intelligent system for selection of the process variables in gas metal arc welding processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 18, n. 2, p. 98–102, 2001.
- [138] WEZENBEEK, H. C. F. M. *A system for measurement and control of weld pool geometry in automatic arc welding*. 132f. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Technische Universiteit, Eindhoven.
- [139] GOMES, E. B. *Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi*. 2006. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- [140] MIRANDA, C. H. *Influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobre cabeça*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.
- [141] BRACARENSE, A. Q.; HORIZONTE, B. Processo de soldagem por arame tubular – fcaw. *Apostila, Belo Horizonte: UFMG*, 2000.
- [142] REZENDE, G. M. C. d. et al. Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem mig/mag por curto-circuito. *Revista Soldagem & Inspeção*, ABS, v. 16, n. 2, p. 98–103, 2011.
- [143] SANTOS, T. F.; OLIVEIRA, M. A.; DUTRA, J. C. Estudo da taxa de fusão de arames de aço carbono no processo mig/mag. In: *Anais do XXVIII Congresso de Soldagem*. [S.l.]: ABS, 2002.
- [144] DOBIGNIES, A. A. *Estudo do rendimento de deposição de material na soldagem MIG/MAG em condições de transferencia metálica por curto-circuito forçado*, 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Setor de Tecnologia, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2009.
- [145] MODENESI, P. J.; NIXON, J. H. Arc instability phenomena in gma welding. *Welding Journal*, American Welding Society, v. 73, n. 9, p. 219–224, 1994.
- [146] MOGROVEJO, M. G. *Investigação e desenvolvimento do processo MIG/MAG com arame adicional*. 2014. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

- [147] HILTON, D. E.; PLUMRIDGE, P. N. Particulate fume generation during gmaw and gtaw. *Welding & Metal Fabrication*, Surrey Publication, v. 59, n. 10, p. 555–559, 1991.
- [148] QUIMBY, B. J.; ULRICH, G. *Fume formation rates in gas metal arc welding*. Dissertação (Mestrado) — University of New Hampshire, 1997.
- [149] PIRES, I.; QUINTINO, L.; MIRANDA, R. M. Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. *Materials & design*, Elsevier, v. 28, n. 5, p. 1623–1631, 2007.
- [150] PIRES, I. et al. Fume emissions during gas metal arc welding. *Toxicological and Environ Chemistry*, Taylor & Francis, v. 88, n. 3, p. 385–394, 2006.
- [151] YOO, C. D.; YOO, Y. S.; SUNWOO, H. K. Investigation on arc light intensity in gas metal arc welding. part 1: relationship between arc light intensity and arc length. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Sage Publications, v. 211, n. 5, p. 345–353, 1997.
- [152] WEGLOWSKI, M. S. Modeling and analysis of the arc light spectrum in gmaw. *Welding Journal*, AWS, v. 87, n. 8, p. 212–218, 2008.
- [153] DENNIS, J. H. et al. The effects of welding parameters on ultra-violet light emissions, ozone and crvi formation in mig welding. *The Annals of occupational hygiene*, Elsevier, v. 41, n. 1, p. 95–104, 1997.
- [154] CARLSON, N. M.; JOHNSON, J. A.; SMARTT, H. B. Sensing of metal-transfer mode for process control of gmaw. Springer, v. 1, n. 1, p. 1965–1972, 1990.
- [155] ROCA, A. S. et al. New stability index for short circuit transfer mode in gmaw process using acoustic emission signals. *Science and Technology of Welding and Joining*, Taylor & Francis, v. 12, n. 5, p. 460–466, 2007.
- [156] GRAD, L. et al. Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 44, n. 5, p. 555–561, 2004.
- [157] CAYO, E. H.; ALFARO, S. C. A. Gmaw process stability evaluation through acoustic emission by time and frequency domain analysis. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, ICI Publishers, v. 34, n. 2, p. 157–64, 2009.
- [158] SCOTTI, A.; CLARK, D. E.; KENNEY, K. Mapeamento da transferência metálica em mig com aço inoxidável. In: *Anais do VI Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 1–10.

- [159] NOGUEIRA, R.; BOHÓRQUEZ, C.; ZANELLA, I. G. Comparação da estabilidade do arco e da variabilidade da geometria de soldas obtidas pelos processos mig/mag e arame tubular. *Soldagem & Inspeção*, ABS, v. 20, p. 191–204, 2015.
- [160] LÜ, F. L. et al. A model-free adaptive control of welding pool dynamics during arc welding. In: IEEE. *Proceedings of Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, [S.l.], 2008. p. 591–595.
- [161] PAUL, A. K. Robust product design using sosm for control of shielded metal arc-welding (smaw) process. *Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 63, n. 6, p. 3717–3724, 2016.
- [162] ZHANG, J.; WALCOTT, B. L. Adaptive interval model control of arc welding process. *Transactions on Control Systems Technology*, IEEE, v. 14, n. 6, p. 1127–1134, 2006.
- [163] SUZUKI, A.; HARDT, D. Application of adaptive control to in-process weld geometry regulation. In: IEEE. *Proceedings of 1987 American Control Conference*. [S.l.], 1987. p. 723–728.
- [164] JUNFENG, W.; CHUNLONG, D. Control method analysis based on welding process. In: IET. *Proceedings of International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence*. [S.l.], 2012. p. 705–708.
- [165] BERA, M. K.; BANDYOPADHYAY, B.; PAUL, A. Variable gain super-twisting control of gmaw process for pipeline welding. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, American Society of Mechanical Engineers, v. 137, n. 7, p. 74501–74508, 2015.
- [166] THOMSEN, J. S. *Advanced control methods for optimization of arc welding*. 2004. 203f. Tese (Doutorado em) – Department of Electronic Systems, Automation and Control, Aalborg University, Dinamarca. 2004.
- [167] CAYO, E. H. *Modelagem e controle da soldagem orbital através do processo GMAW-S*. 2013. 127f. Tese (Doutorado em Sistemas Mecatrônicos) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- [168] TIPI, A. D. The study on the drop detachment for automatic pipeline gmaw system: free flight mode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 50, n. 1–4, p. 137–147, 2010.

- [169] TIPI, A. R. D.; PARIZ, N. Improving the dynamic metal transfer model of gas metal arc welding (gmaw) process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 76, n. 1–4, p. 657–668, 2015.
- [170] TIPI, A. D. The study on the drop detachment for automatic pipeline gmaw system: short-circuit mode. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 50, n. 1, p. 149–161, 2010.
- [171] LISKEVYCH, O. *Estudo da influência do teor de CO₂ na regularidade da transferência de metal e estabilidade do processo MIG/MAG*. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- [172] JONES, L. A.; EAGAR, T. W.; LANG, J. H. A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode. *Journal of physics D: Applied physics*, IOP Publishing, v. 31, n. 1, p. 107–123, 1998.
- [173] AMSON, J. Lorentz force in the molten tip of an arc electrode. *British Journal of Applied Physics*, IOP Publishing, v. 16, n. 8, p. 1169–1179, 1965.
- [174] WEGLOWSKI, M. S.; HUANG, Y.; ZHANG, Y. M. Effect of welding current on metal transfer in gmaw. *Archives of Materials Science and Engineering*, ICI Publishers, v. 33, n. 1, p. 49–56, 2008.
- [175] LI, K.; WU, C. Mechanism of metal transfer in de-gmaw. *Journal of materials science & technology*, Elsevier, v. 25, n. 3, p. 415–20, 2009.
- [176] WATKINS, A. D.; SMARTT, H. B.; JOHNSON, J. A dynamic model of droplet growth and detachment in gmaw. *International trends in welding science and technology*, p. 993–997, 1992.
- [177] MOORE, K. L. et al. Gas metal arc welding control: Part i: Modeling and analysis. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, Elsevier, v. 30, n. 5, p. 3101–3111, 1997.
- [178] WEGLOWSKI, M. S.; HUANG, Y.; ZHANG, Y. M. An investigation of metal transfer process in gmaw. *Engineering Transactions*, Institute of Fundamental Technological Research, v. 56, n. 4, p. 345–362, 2008.
- [179] MURPHY, A. B. The effects of metal vapour in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 43, p. 01–31, 2010.
- [180] FIGUEIREDO, K. M. *Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio*. 2000. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica),

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

- [181] CAMARGO, L. G. et al. Proposta e análise de dispositivo para otimização do destacamento da gota na soldagem mig/mag. *Soldagem & Inspeção*, Directory of Open Access Journals, v. 21, n. 1, p. 83–91, 2016.
- [182] OGINO, Y.; HIRATA, Y. Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded gmaw. *Welding in the World*, Springer, v. 59, n. 4, p. 465–473, 2015.
- [183] MOREIRA A R; GOMEZ, A. R. . A. A. L. F. R. K. P. A. P. M. F. M. V. A. C. A. R. G. B. Líquidos: Mudanças de estado e propriedades coligativas. salvador. unifacs. *Apostila, Química Geral, UNIFACS, 1999.*
- [184] SLANIA, J. Determination of the conditions for stable transfer of metal from the electrode to the molten pool during mag-welding with short-circuiting and pulsating arcs. *Welding international*, Taylor & Francis, v. 10, n. 11, p. 849–852, 1996.
- [185] HARKINS, W. D.; BROWN, F. The determination of surface tension (free surface energy), and the weight of falling drops: The surface tension of water and benzene by the capillary height method. *Journal of the American Chemical Society*, ACS Publications, v. 41, n. 4, p. 499–524, 1919.
- [186] ZHU, P.; SIMPSON, S. W. *Theoretical study of a consumable anode in a gas metal welding arc*. ASM International, Materials Park, OH (United States), 1996.
- [187] NORRISH, J.; RICHARDSON, I. F. Metal transfer mechanisms. *Welding and Metal Fabrication*, TRB, v. 56, n. 1, p. 17–23, 1988.
- [188] REIS, R. I.; LEMOS, E. A.; MODENESI, P. J. Fusão do arame na soldagem gmaw com fonte de corrente constante. In: *Anais do II Congresso Brasileiro de Engenharia da Fabricação*. [S.l.]: ABCM, 2003. p. 1–10.
- [189] MENESES, V. A. de; GOMES, J. F. P.; SCOTTI, A. The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit mag welding. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 214, n. 7, p. 1388–1397, 2014.
- [190] LUZ, T. d. S.; RODRIGUES, C. E. A. L.; FERRARESI, V. A. Observação do efeito pinch na soldagem mig/mag do arame aws er 309l. In: FEMEC/FU. *Anais do 14 Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. [S.l.], 2004. p. 1–8.

- [191] CHAPUIS, J. et al. Experimental analysis of droplet-gas interaction during gmaw process. In: ASM INTERNATIONAL. *Trends in Welding Research: Proceedings of the 9Th International Conference*. [S.l.], 2013. p. 448–452.
- [192] FAN, H. G.; KOVACEVIC, R. Droplet formation, detachment, and impingement on the molten pool in gas metal arc welding. *Metallurgical and materials transactions B*, Springer, v. 30, n. 4, p. 791–801, 1999.
- [193] FRANKLIN, G. F. et al. *Feedback control of dynamic systems*. [S.l.]: Addison–Wesley Reading, MA, 1994.
- [194] CHOI, J. H.; LEE, J.; YOO, C. D. Dynamic force balance model for metal transfer analysis in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 34, n. 17, p. 2658–2664, 2001.
- [195] ALLUM, C. Metal transfer in arc welding as a varicose instability. i. varicose instabilities in a current-carrying liquid cylinder with surface charge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 18, n. 7, p. 1431–1446, 1985.
- [196] ALLUM, C. Metal transfer in arc welding as a varicose instability. ii. development of model for arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, v. 18, n. 7, p. 1447–1468, 1985.
- [197] REUTZEL, E. W. et al. *Derivation and calibration of a gas metal arc welding (GMAW) dynamic droplet model*. [S.l.], 1996.
- [198] VIZZOTTO, R. A. *Método automático para identificação de parâmetros de uma máquina de solda*. 2016. 70f. Monografia (Engenharia de Automação), Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2016.
- [199] SUBRAMANIAM, S.; WHITE, D. R. Effect of shield gas composition on surface tension of steel droplets in a gas-metal-arc welding arc. *Metallurgical and materials transactions B*, Springer, v. 32, n. 2, p. 313–318, 2001.
- [200] OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. *Engenharia de soldagem e aplicações*. [S.l.]: LTC, 1982.
- [201] OLIVEIRA, V. V. *Metalurgia da soldagem*. 2010. 46f. 2010. Curso técnico de mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina, Joinville, 2010.
- [202] PEIXOTO, A. L. et al. Estudo das características econômicas e geométricas do processo de soldagem fcaw-cw. In: *Anais do VI Congresso de Engenharia Mecânica*. [S.l.]: ABCM, 2010. p. 1–9.

- [203] SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; GOHR, R. Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo mig/mag por curto-circuito controlado (ccc)—uma revisão da literatura. parte 1 de 3: Aspectos históricos e dos mecanismos de fusão do arame. *Revista Soldagem e Inspeção, ABS*, v. 12, n. 1, p. 237–243, 2007.
- [204] MACHADO, I. G. *Soldagem & técnicas conexas: processos*. [S.l.: s.n.], 1996.
- [205] LIMA, J. P. d. R. *Implementação de fios fluxados metal–cored em soldadura mecanizada*, 2008. 139f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2008.
- [206] HENDERSON, D. E. *Adaptive control of an arc welding process*. [S.l.], 1990.
- [207] PERKINS, W.; WEBER, R. A. Adaptive control of temperature in arc welding. *Control Systems, IEEE*, v. 14, n. 4, p. 4–12, 1994.
- [208] VERDELHO, P. et al. An electronic welder control circuit. In: *IEEE. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998*. [S.l.], 1998. v. 2, p. 612–617.
- [209] XU, G.; WU, C. Numerical analysis of weld pool geometry in globular-transfer gas metal arc welding. *Frontiers of Materials Science in China, Springer*, v. 1, n. 1, p. 24–29, 2007.

Apêndices

APÊNDICE A BREVE HISTÓRICO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO

A soldagem é a operação que tem por finalidade unir duas ou mais peças, assegurando que na junção dessas peças não haverá descontinuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas necessárias ao seu uso e desempenho [13]. Para tal, são utilizados diversas técnicas de realizar a solda, de acordo com a necessidade de proteção da união, bem como materiais e equipamentos utilizados no processo.

Porém, muito antes de haver qualquer tecnologia conhecida hoje em dia para realizar os processos de soldagem, já haviam rastros de união de metais, pois foram achados diversos artefatos que foram confeccionados através de brasagem, alguns sendo datados de cerca de 4000 anos atrás. Bem como a utilização dos recursos de soldagem por forjamento, também datadas a muito tempo, cerca de 3000 anos [200].

O processo de soldagem à arco como é conhecido atualmente teve sua origem a partir do descobrimento do arco elétrico e da sintetização do gás Acetileno. Essas técnicas tiveram sua evolução impulsionada para serem utilizadas em processos de fabricação durante a Primeira Guerra Mundial. Assim, de forma sintética, ressaltam-se os seguintes marcos históricos dessa evolução [9, 12, 13, 22, 201–205]:

- 1801 – *Sir Humphey Davis* descobriu o gás Acetileno e produziu um arco com uma bateria e dois eletrodos de carvão. Nomeou esse arco de chama voltaica;
- 1837 – *D. de Richemont* descobriu a chama oxihídrica;
- 1885 – *N. Bernardos* e *S. Olsewski* patentearam o processo de soldagem por arco elétrico com eletrodo de carvão;
- 1886 – *E. Thomson* inventou o processo de soldagem por resistência;
- 1889 – *Zerner* utilizou dois grafites para gerar o arco elétrico e o defletir em direção a junta de solda;

- 1889 – *N.G. Slavianoff* e *C. L. Coffin* substituíram o eletrodo de grafite por eletrodo metálico e patentaram o processo de soldagem a arco com eletrodo de metal;
- 1895 – *Goldschmidt* descobriu a solda termite;
- 1900 – *A. P. Strohmenger* melhorou a estabilidade do arco elétrico com a introdução de argila no eletrodo revestido, definida por alma;
- 1901 – *E. Fouché* e *C. H. Picard* desenvolveram o primeiro maçarico industrial para soldagem oxiacetilênica;
- 1903 – *Goldschmidt* descobriu a solda aluminotérmica;
- 1904 – *C. H. Picard* desenvolveu maçarico para oxicorte;
- 1907 – *O. Kjellberg* desenvolveu o eletrodo revestido;
- 1910 – *O. Kjellberg* patenteou o eletrodo revestido;
- 1919 – *C. J. Halsag* introduziu a corrente alternada nos processos de soldagem;
- 1920 – Início dos processos de soldagem a arco elétrico;
- 1920 – *P. O. Nobel* desenvolveu um equipamento para alimentação contínua de eletrodo, utilizado sem proteção a arco;
- 1925 – Foi desenvolvida a soldagem por centelhamento;
- 1926 – *Lungumir* desenvolveu a soldagem por Hidrogênio atômico;
- 1926 – *H.M. Hobart* e *P.K. Denver* utilizam gás inerte como proteção do arco elétrico;
- 1930 – Foram criadas as primeiras normas para eletrodo revestido nos Estados Unidos da América;
- 1930 – *B. S. Robiniff* patenteou o processo de soldagem a arco submerso;
- 1935 – *Kennedy* desenvolveu os processos de soldagem com eletrodo de Tungstênio;
- 1935 – *J. D. Creeca* e *S. S. Scott* desenvolveram a soldagem por prisioneiro;
- 1940 – *R. K. Hopkins* desenvolveu e patenteou o processo de soldagem por eletroescória;
- 1941 – *R. Meredith* e *V. H. Pauleka* desenvolveram o processo de soldagem TIG, porém foi inicialmente chamado de *Heliarc*;

- 1948 – *H.F. Kennedy* e *A. Muller* desenvolveram o processo de soldagem à arco com gás inerte;
- 1950 – Foram desenvolvidos os processos de soldagem por feixe de elétrons na Alemanha e França;
- 1951 – Foram feitas as primeiras adições de Oxigênio nos gases de proteção inertes;
- 1953 – *K. V. Lyubavskii* e *N. M. Noovoshilov* desenvolveram o processo de soldagem com gás ativo CO_2 ;
- 1954 – *A. A. Bernard* criou o processo de soldagem à arco com proteção gasosa de CO_2 utilizando arames com fluxo interno (*dualshield*);
- 1957 – *A. A. Bernard* patenteou o processo de soldagem com arame tubular e proteção gasosa;
- 1957 – *R. M. Gage* criou e patenteou as primeiras aplicações do processo de soldagem a plasma convencional;
- 1957 – Foram desenvolvidos os processos de soldagem por feixe de elétrons e por fricção;
- 1958 – Foi utilizado pela primeira vez o processo de soldagem por eletro-escória na Rússia;
- 1959 – *G. G. Landis* e *D. M. Patton* desenvolveram o processo de eletrodo tubular auto-protegido (*innershield*);
- 1960 – Foi desenvolvido o processo de soldagem à *laser* nos Estados Unidos da América;
- 1960 – Popularizou o modo de transferência metálica por aerossol;
- 1960 – *W. Krieweth* e *K. Dohm* criaram o processo de soldagem por eletrogás;
- 1965 – No *The Welding Intitute*, como é conhecido atualmente, foi aplicada corrente pulsada na soldagem;
- 1966 – Foi desenvolvido o processo de soldagem a *laser*;
- 1970 – Foram aplicados os primeiros robôs nos processos de soldagem;
- 1970 – Foi iniciado o uso de circuitos integrados nas fontes de soldagem;
- 1975 – Início da comercialização das fontes de soldagem com corrente contínua controladas analogicamente, baseadas em transistores de baixa potência;

- 1980 – Foram introduzidos transistores de potências nas fontes de soldagem e tecnologia inversora.

A partir de 1980, com as novas tecnologias foi possível a aplicação de controle através de computadores, permitindo regulagem fina dos parâmetros do processo. Com isso, surgiram as fontes sinérgicas e foi expandida as aplicações com robôs para soldagem à arco.

Atualmente não existe uma classificação universalmente aceita para os processos de soldagem, pois o número destes processos evolui dinamicamente, devido as pesquisas nessa área. São conhecidos mais de 50 processos de soldagem com aplicações industriais [13]. Cada classificação se baseia em diferentes fatores da física, química ou outros fatores como elemento agrupador desses processos. Os fenômenos físicos da soldagem são complexos, pois são associados à diversos tópicos da física simultaneamente, tais como: eletricidade, magnetismo, calor, luz e som [131].

Os processos de soldagem à arco compreendem à um grupo de processos de soldagem que utilizam um arco elétrico como fonte de calor para unir os metais. Esse arco é mantido entre um eletrodo cilíndrico, maciço ou fluxado, e o metal base. Os processos à arco mais comuns são os seguintes: GMAW, SMAW, GTAW, FCAW, SAW, EGW (*Eletro-Gas Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*).

O processo GMAW (MIG/MAG) é fundamental para muitos processos industriais [36, 125, 130, 206] e é um dos processos mais produtivos em operações manufatureiras [129]. Com isso, aliado à versatilidade e mobilidade dos equipamentos necessários para essa soldagem, esse processo ganhou mais popularidade que os demais, sendo atualmente o processo de soldagem mais encontrado na indústria [36, 42, 122–124, 126, 127, 129, 130, 206].

Nesses processos, a união dos materiais é realizada pela coalescência de um eletrodo metálico consumível e o metal base [121, 207], sem aplicação de pressão [131]. Além do eletrodo consumível é necessário o suprimento de um gás de proteção. O gás de proteção, ou mistura de gases, que atua no arco e na poça de fusão, pode ser ativo ou inerte, ou seja, participa ou não como elemento de adição à solda. Se for utilizado um gás inerte, como Argônio ou Hélio, o processo é chamado MIG (*Metal Inert Gas*) e se for utilizado um gás ativo, como Dióxido de Carbono puro ou misturas de Argônio, Hélio e Dióxido de Carbono, o processo é chamado MAG (*Metal Active Gas*) [44, 49, 208]. Experimentalmente, sempre a interação do gás com a solda, assim esses processos são comumente chamados de MIG/MAG.

As principais vantagens do processo MIG/MAG são: possibilidade de soldar qualquer metal comercial e suas ligas, a taxa de deposição e a velocidade de soldagem é consideravelmente maior que outros processos como o processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), ausência de escória pesada e possibilidade de formar longos cordões de solda devido à alimentação contínua de eletrodo e penetração profunda [12, 13].

Entretanto, como todo processo de soldagem, este processo também apresenta algumas desvantagens, tais como: o equipamento de soldagem embora portátil, é pesado, complexo e apresenta dificuldades para aplicação em ambientes pequenos. Além disso, como o resfriamento da poça de fusão ocorre rapidamente, podem ser geradas trincas na solda [12, 180], bem como uma quantidade elevada de respingos durante soldagem [13]. Também ressalta-se a limitação do ambiente de trabalho, que precisa ser isolado de correntes de ar, devido a necessidade do uso de gás de proteção para proteger a poça de fusão das contaminações atmosféricas.

APÊNDICE B CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR LEM HTR-500 SB

Os equipamentos utilizados para a calibração do transdutor de corrente LEM HTR-500 SB foram:

Tabela 2: Equipamentos utilizados no experimento de calibração dos transdutores de corrente LEM HTR 500-SB.

Equipamento	Modelo
Transdutor de corrente	LEM HTR 500-SB
Osciloscópio	<i>Tektronix TDS 2012B</i>
Microcontrolador	<i>Arduino Due</i>
Fonte de soldagem	<i>TransPuls Synergic 5000 MV</i>
Computador	i5 2,30GHz

Para que o transdutor de corrente faça a medida da corrente, este transdutor deve envolver o cabo o qual deseja-se medir a corrente. Neste experimento, o cabo de interesse é o cabo que conduz a corrente proveniente da fonte de energia até a tocha de soldagem, conforme ilustrado no esquema da Figura 62.

Ressalta-se que um transdutor é um dispositivo capaz de transformar uma forma de energia em outra, ou seja, a saída do transdutor de corrente é dada em tensão, de 0 à 4V. Esta tensão não danifica o microcontrolador utilizado, com isso é possível ligar a saída do transdutor de corrente diretamente ao microcontrolador. Também foi medida essa diferença de tensão com um osciloscópio.

Assim como será mostrado para a calibração do transdutor de tensão, os referenciais de terra (GND) do transdutor, do microcontrolador e da fonte de alimentação do transdutor devem ser compartilhados. Isto minimiza os ruídos e evita flutuações. A Figura 62 contempla o circuito elétrico e as ligações entre os equipamentos para realização do experimento de calibração do transdutor de corrente.

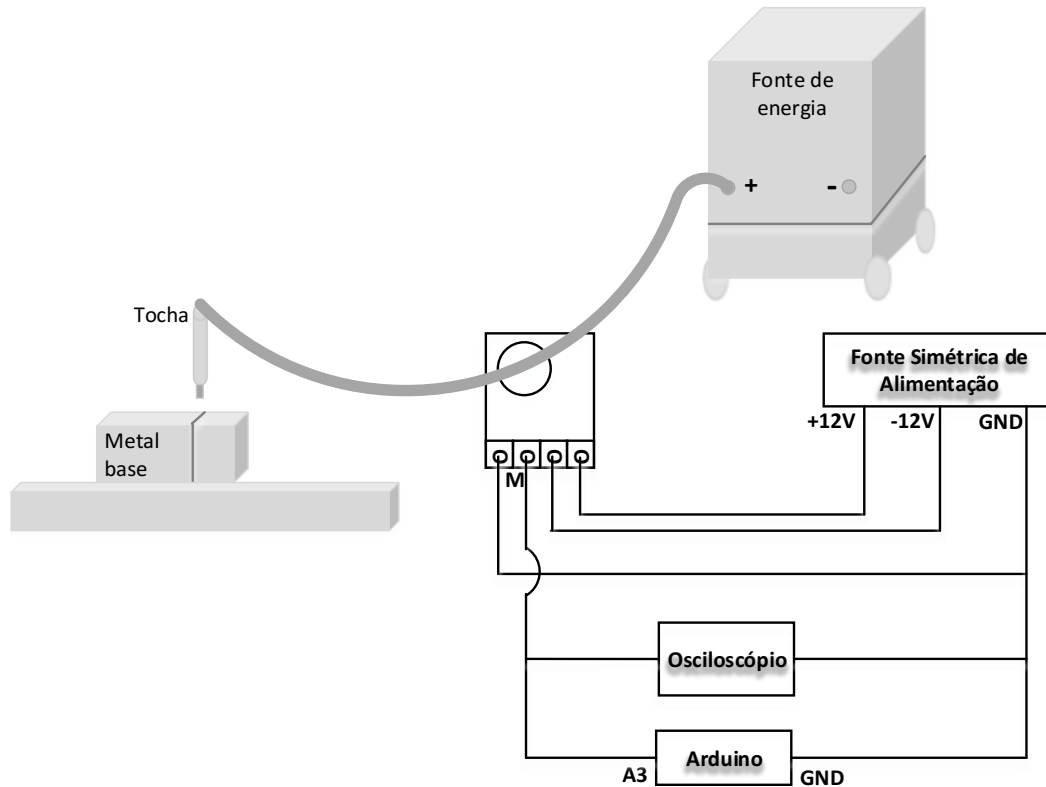


Figura 62: Esquema das ligações entre equipamentos para realização do experimento de calibração do transdutor de corrente LEM HTR-500 SB, onde M é o pino de saída do transdutor, A3 é uma porta analógica do *Arduino* e GND é o referencial do terra.

A tensão de saída do transdutor de corrente, amostrada com $5kHz$ utilizando a biblioteca de interrupções *DueTimer2* do *Arduino*, foi captada pelo microcontrolador é convertida em valores digitais, de 0 à 1023. Assim, após tratar os dados mensurados, foi obtida a seguinte equação que relacionem a corrente mensurada com o valor digital que trata a tensão de saída do transdutor:

A equação obtida para a calibração do transdutor de corrente em função dos valores digitais, foi:

$$I_{mensurada} = 0,529 \times valor\ digital \quad (111)$$

A equação de calibração que relaciona a corrente mensurada com a tensão de saída do transdutor de corrente é dada por:

$$I_{mensurada} = 111,8 \times V_{saida} + 0,08252 \quad (112)$$

O comportamento de relação entrada-saída do transdutor de corrente é linear, conforme pode ser observado na Figura 63.

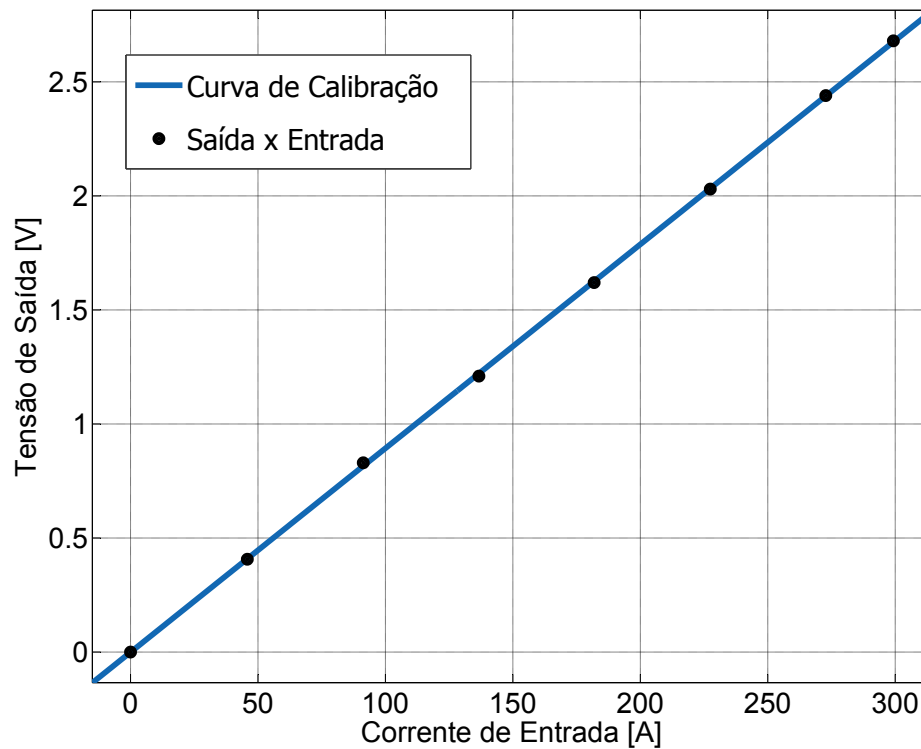


Figura 63: Curva de calibração do transdutor de corrente.

Como foram postos reguladores de tensão para alimentação na fonte simétrica construída, não é necessário testar exaustivamente a repetitividade do transdutor de corrente frente a variações da tensão de alimentação.

No Apêndice D é mostrada uma comparação entre o sistema de aquisição montado e um sistema de aquisição comercial, realizada com intuito de obter um *ground truth*.

APÊNDICE C CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR LEM DVL 250

Para a calibração do transdutor de tensão LEM DVL 250 foram utilizados os seguintes equipamentos:

Tabela 3: Equipamentos utilizados no ensaio de calibração do transdutor de tensão LEM DVL 250.

Equipamento	Modelo
Transdutor de tensão	LEM DVL 250
Osciloscópio	<i>Tektronix</i> TDS 2012B
Multímetro	<i>Minipa</i> ET-1002
Fonte de Alimentação	<i>Minipa</i> MPC 3003D
Fonte de Alimentação	<i>Intrutherm</i> FA-3030
Microcontrolador	<i>Arduino Due</i>
Computador	i5 2,30GHz

Nesse experimentos as fontes de alimentação foram ligadas em série, permitindo que a tensão mensurada pelo transdutor alcançasse 120V. Vale ressaltar que o terra das fontes de alimentação, do transdutor, da fonte operando em 20V e do microcontrolador estavam sendo compartilhados, para obter o mesmo referencial de terra (GND). Na Figura 64 é mostrado o circuito elétrico dessas ligações.

Um resistor de 120 Ω foi posto no canal de medida do transdutor de tensão para evitar danos ao microcontrolador. A inserção deste resistor limitou sua medida até 208,3V, entretanto, como este equipamento será utilizado para medir a tensão do arco, que não ultrapassará 70V em nenhuma condição, então esse resistor não inviabiliza o uso do transdutor.

A tensão de entrada foi proveniente de duas fonte de alimentação em série, variando a tensão de 10 em 10V combinados de forma aleatória entre as fontes. Essa medida foi verificada por um multímetro. A corrente de saída do transdutor gera uma tensão sobre o

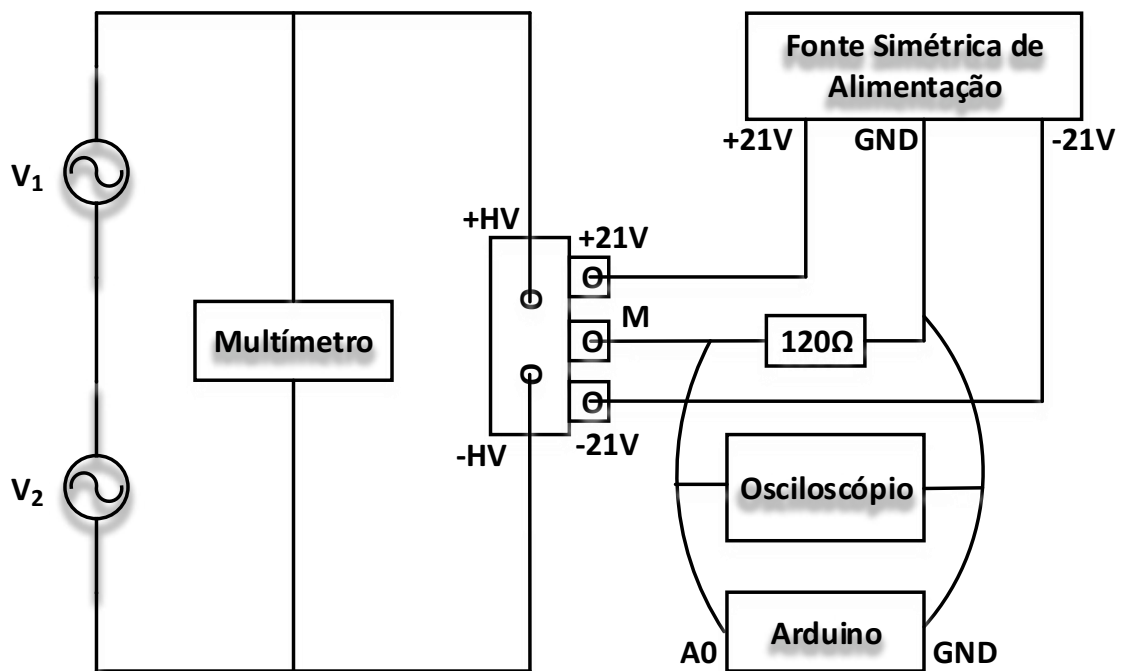


Figura 64: Esquema das ligações entre equipamentos para realização do experimento de calibração do transdutor de tensão LEM DVL 250, onde M é o pino de saída do transdutor, A0 é uma porta analógica do *Arduino*, GND é o referencial do terra, HV indica as ligações de entrada do transdutor de tensão e V_1 e V_2 indicam as fontes de alimentação.

resistor posto no canal de medida e essa tensão foi captada pelo microcontrolador. Essa tensão também foi monitorada por um osciloscópio. Os dados foram amostrados numa frequência de $5kHz$ utilizando a biblioteca de interrupções *DueTimer2* do *Arduino*.

A tensão do resistor foi convertida em valores digitais, de 0 à 1023, no microcontrolador. Portanto, esses dados foram tratados para obter uma equação que relaciona o valor digital com a tensão mensurada pelo transdutor. Essa equação é mostrada a seguir:

$$V_{mensurada} = 0,2036 \times \text{valor digital} \quad (113)$$

Já a equação de calibração do transdutor em relação à sua corrente de saída é dada por:

$$\text{corrente de saída} = 0,0002052 \times \text{tensão de entrada} \quad (114)$$

A relação entre a tensão de entrada e a corrente de saída do transdutor de tensão se mostrou linear, conforme ilustrado na Figura 65.

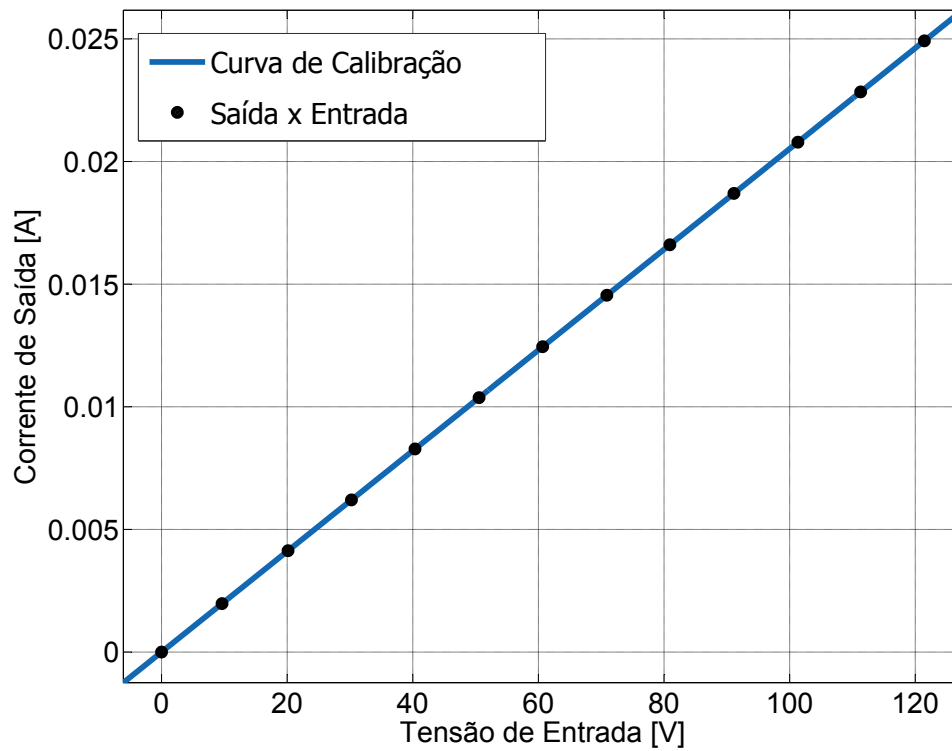


Figura 65: Curva de calibração do transdutor de tensão LEM DVL 250.

No Apêndice D é mostrada uma comparação entre o sistema de aquisição montado e um sistema de aquisição comercial, realizada com intuito de obter um *ground truth*.

APÊNDICE D AFERIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO MONTADO

Para fins de comparação e de avaliação da confiabilidade da calibração realizada aos transdutores, foram feitos ensaios de aquisição dos dados de corrente de soldagem e tensão do arco, simultaneamente, com o sistema de aquisição montado e um sistema de aquisição comercial. O sistema de aquisição comercial utilizado foi SAP 4.0, produzido pela IMC Soldagem e emprestado gentilmente pelo LAPES (Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem) desta instituição.

Os parâmetros regulados para esses ensaios foram: 19V na fonte de tensão, velocidade de alimentação de arame de $3m/min$, 15mm de distância entre o bico de contato e a peça e a velocidade de deslocamento do robô de $32cm/min$. Esses parâmetros resultaram em transferência metálica por curto-circuito.

A aquisição dos dados foi feita com amostragem de $5kHz$ para ambos sistemas de aquisição. As coletas de dados de ambos os sistemas de aquisição foram iniciados um pouco antes de iniciar a soldagem, pois seria muito difícil iniciar ambos sistemas de aquisição exatamente no mesmo momento.

Após coletados os dados foi definido um meio para contornar esse obstáculo de sincronia, que consiste em iniciar a comparação dos valores exatamente a partir do momento em que ocorre a tensão a vazio. Ou seja, os sistemas aquisitam os dados com valores nulos, prévios ao início do curto-circuito, que são descartáveis, até que se identifique o momento em que a tensão é elevada ao máximo que a máquina pode fornecer. Esse valor de tensão é a tensão à vazio e esse fenômeno sempre ocorre antes no início do processo de soldagem.

Assim, esse evento é o gatilho que define o início da comparação dos valores mensurados. Os valores foram comparados até 5s após identificar a tensão à vazio. As Figuras 66 e 67 mostram a comparação da tensão e corrente mensuradas com esses 2 sistemas de aquisição.

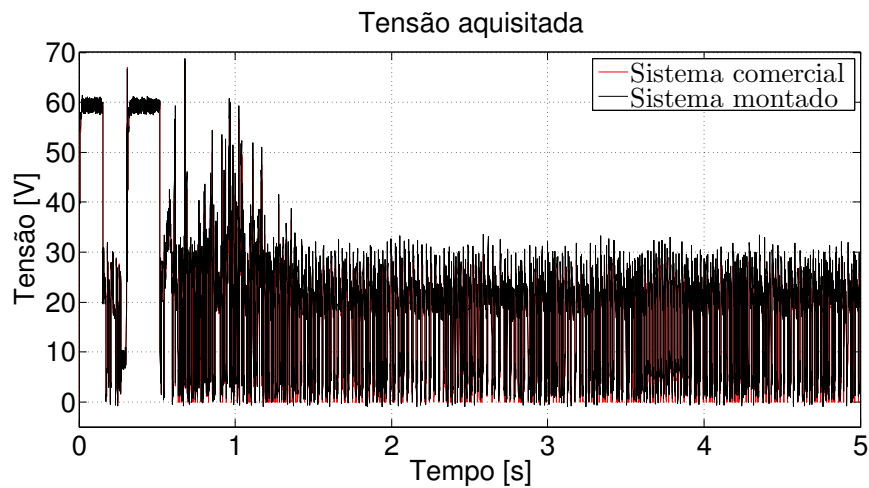


Figura 66: Comparação dos valores de tensão adquirida pelo sistema de aquisição montado e sistema de aquisição comercial.

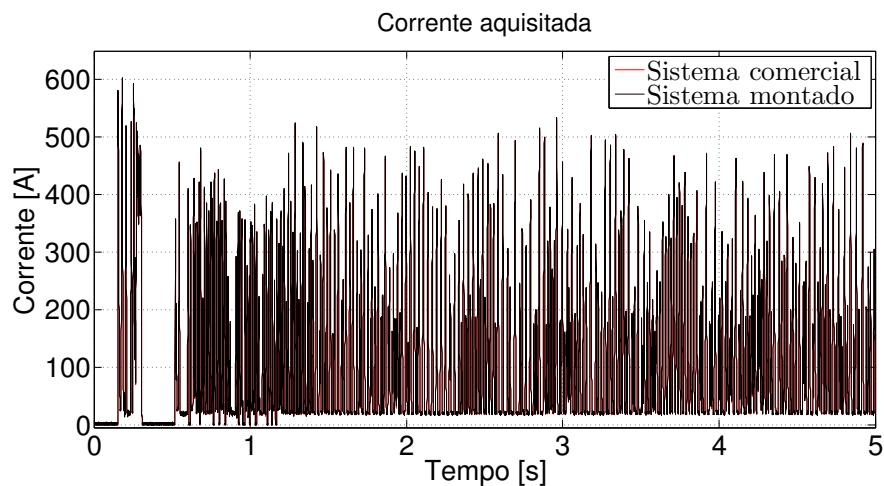


Figura 67: Comparação dos valores de corrente adquirida pelo sistema de aquisição montado e sistema de aquisição comercial.

Os valores médios obtidos para o sistema montado foram $109,1543A$ e $19,6203V$ e os valores médios obtidos com o sistema de aquisição comercial foram $108,6576A$ e $18,8274V$, em geral uma diferença bem pequena.

As Figuras 68 e 69, mostram parte das curvas apresentadas na comparação anterior de forma aproximada, com a transferência já estável, ou seja, após o processo entrar em regime permanente.

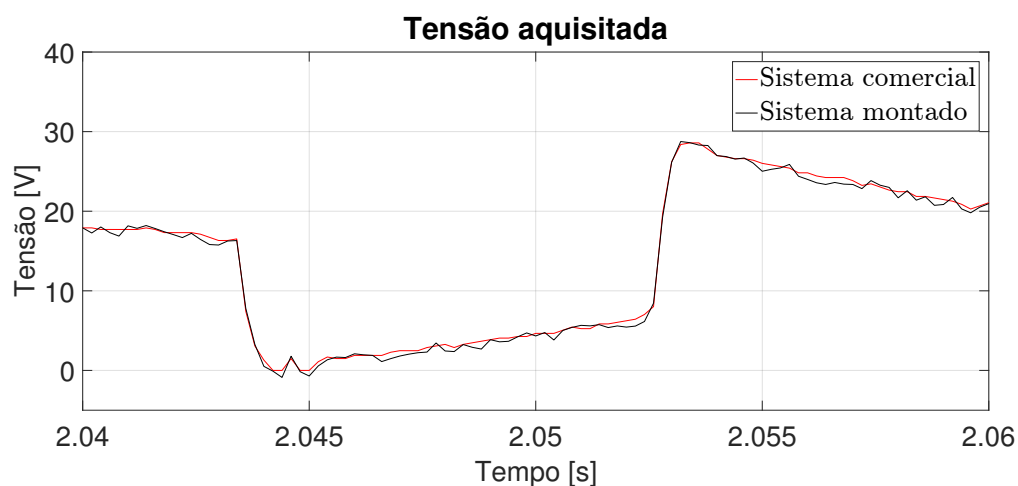


Figura 68: Aproximação de 2 centésimos de segundo da curva de comparação dos valores de tensão adquirida pelos dois sistemas de aquisição.

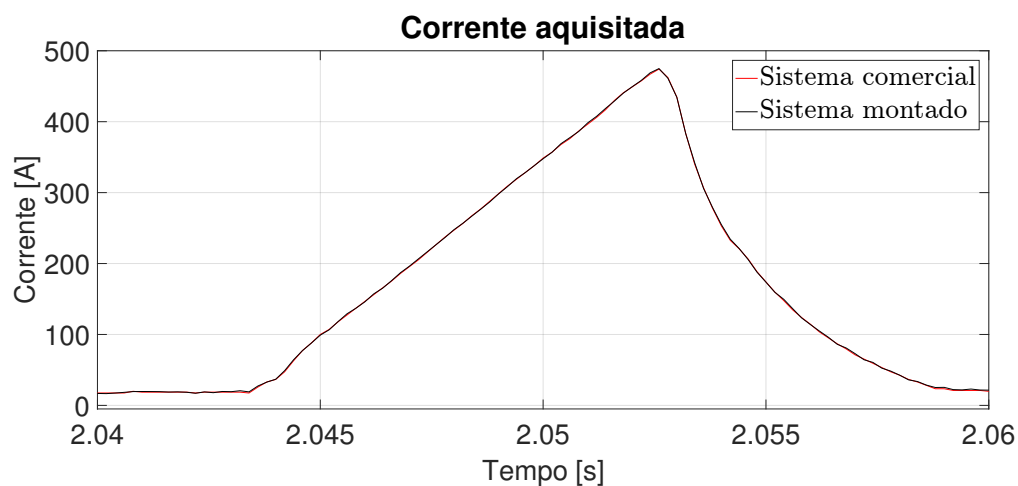


Figura 69: Aproximação de 2 centésimos de segundo da curva de comparação dos valores de corrente adquirida pelos dois sistemas de aquisição.

Nesses gráficos com aproximação fica mais claro as diferenças nas medidas adquiridas. Evidentemente haveria alguma diferença entre os valores, pois não foram calibrados em relação ao mesmo equipamento padrão. Os gráficos dos erros de medição, usando como referência o sistema comercial de mensuração, são mostrados nas Figuras 70 e 71.

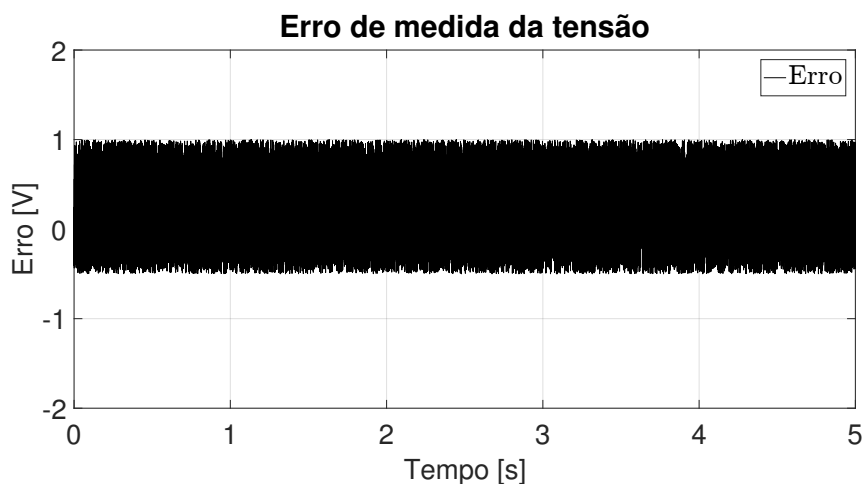


Figura 70: Erro de medida de corrente mensurada pelo sistema de aquisição montado em comparação a corrente aquisitada pelos sistemas de aquisição comercial.

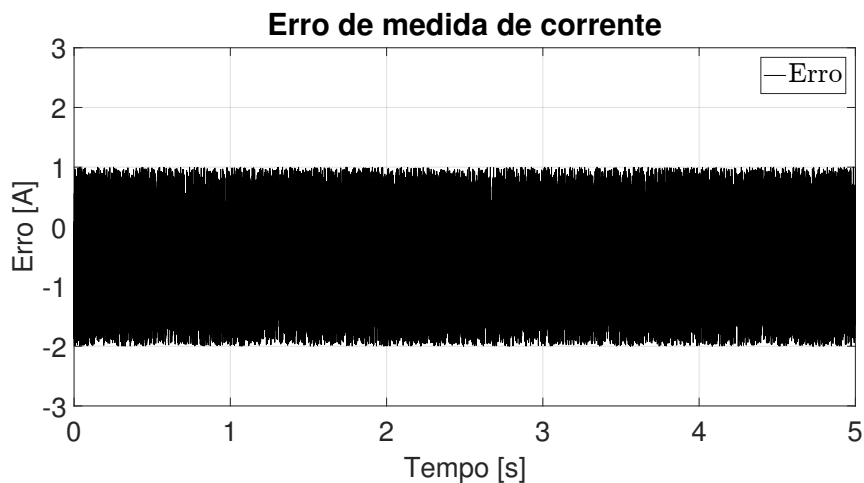


Figura 71: Erro de medida de tensão mensurada pelo sistema de aquisição montado em comparação a tensão aquisitada pelos sistemas de aquisição comercial.

Como pode ser observado, o erro é pequeno ao longo dos 5s aquisitados, se situando em torno de 1V no máximo da medida de tensão e em de 1 à 2A de corrente. Para melhor visualização desta informação, também é mostrado o erro de mensuração da tensão e corrente nos 2 centésimos de segundos mostrados em aproximação anteriormente, nas Figuras 72 e 73, respectivamente.

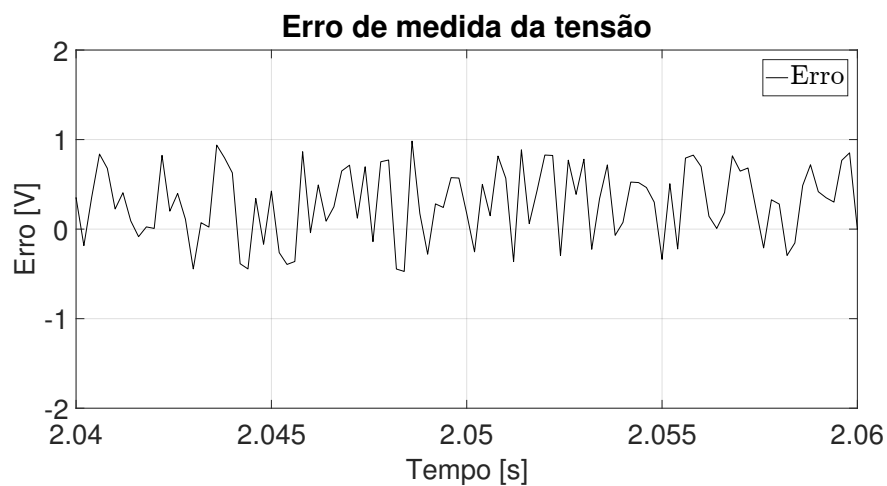


Figura 72: Aproximação de 2 centésimos de segundo do erro de medida de corrente mensurada com sistema montado em comparação a corrente aquisitada pelos sistemas de aquisição comercial.

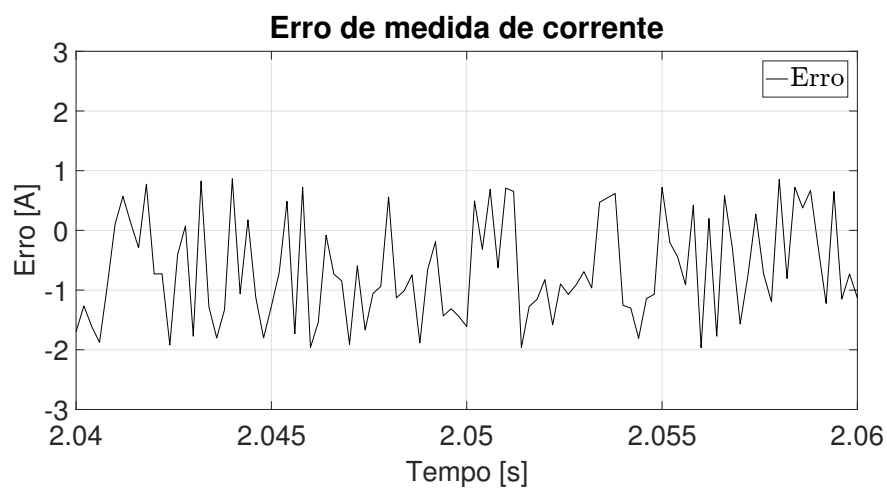


Figura 73: Aproximação de 2 centésimos de segundo do erro de medida de tensão mensurada com sistema montado em comparação a tensão aquisitada pelos sistemas de aquisição comercial.

Os desvios padrões dos erros calculados foram $0,4311V$ e $0,8672A$, para tensão e corrente, respectivamente.

APÊNDICE E SIMULAÇÃO DO MODO GOTICULAR

Conforme foi mencionado, o modelo da transferência por voo livre pode ser utilizado para representar a transferência metálica por modo goticular e globular/goticular. Entretanto, essa validação não foi realizada neste trabalho pois o gás de proteção utilizado na identificação dos parâmetros dos demais modos de transferência inibe a transferência metálica goticular. Entretanto, à nível ilustrativo, uma simulação para representar a transferência metálica por modo goticular é mostrada neste Apêndice.

Os parâmetros utilizados para essa simulação são os mesmos mostrados na Tabela 1, exceto a resistência do arco elétrico R_A , que foi reduzida para $0,0618\Omega$.

As condições operacionais definidas foram: $18mm$ de distância entre o bico de contato e a peça, velocidade de alimentação de arame regulada em $3m/min$, velocidade de deslocamento do robô ajustada em $33cm/min$, velocidade do gás de proteção CO_2 de $16L/min$ e tensão da fonte de $45V$. Além disso, com a utilização do robô BUG-O MDS, a tocha foi mantida perpendicular à poça de fusão, ou seja, φ igual a 1.

Além disso, as condições iniciais das variáveis de estado foram consideradas nulas, exceto a massa da gota ($x_5 = 0,000001$). O ângulo de condução θ foi definido como $1,5708rad$ (90°) e o parâmetro de ajuste empírico f da força F_γ não foi alterado, ou seja, f igual 1. Ainda, para obter $3m/min$ de velocidade de alimentação de arame, a tensão do motor do alimentador de arame foi de $0,06785V$.

As Figuras 74 e 75 mostram algumas das dinâmicas da transferência metálica por modo goticular.

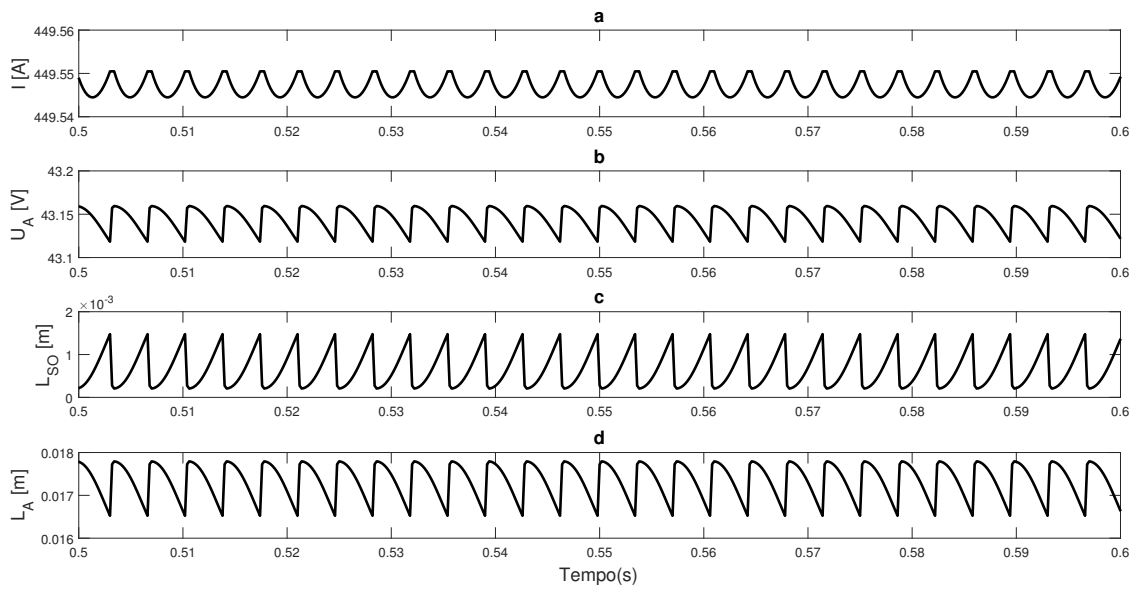


Figura 74: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo goticular: (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

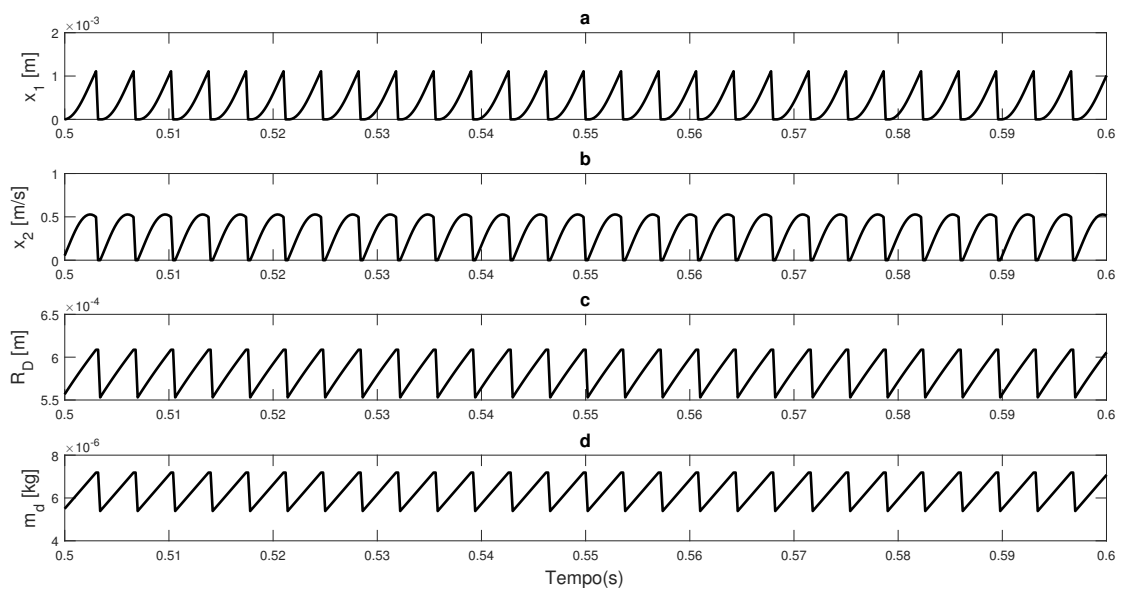


Figura 75: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo goticular: (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como pode ser notado na Figura 74, devido ao aumento da tensão da fonte, a corrente de soldagem aumentou significativamente para valores próximos à 450A. Esse faixa de valores acima entre 300 e 500A é característico da transferência metálica por modo goticular.

Note, também na Figura 74, que o comprimento de arco e, consequentemente, o comprimento do *stick-out* são reiniciados rapidamente. Isto significa que as gotas estão sendo transferidas de forma muito rápida para a poça de fusão do que os modos de transferência metálica anteriormente discutidos.

Para reforçar esse argumento, observe na Figura 75, que o raio da gota cresce apenas até uma grandeza de $10^{-4}m$, enquanto na transferência metálica por modo globular e curto-circuito alcançava valores de $10^{-4}m$. Consequentemente, essa redução no raio da gota transferida reflete em gotas com menos massa. Note que agora as gotas transferidas para a poça de fusão apresentaram massa em torno de $7 \times 10^{-6}kg$.

Assim, pode-se concluir que o modelo também pode ser utilizado para representar a transferência metálica por modo goticular. Entretanto, indica-se que a identificação dos parâmetros seja inteiramente refeita com um gás apropriado para essa transferência metálica. Isso se faz necessário pois o gás de proteção pode interagir com outras dinâmicas e alterar algum parâmetro requerido para realizar a simulação.

APÊNDICE F ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Neste capítulo é apresentada uma análise da sensibilidade paramétrica dos modelos simulados. Para tal, são realizadas diversas simulações, variando condições operacionais e parâmetros dos modelos, para avaliar as consequências nas dinâmicas internas e saídas do modelo. Além disso, como diversos autores contestam a contribuição de algumas forças para modos de transferências específicos, também foram feitas simulações para verificar se o modelo proposto correspondia de acordo com a literatura.

Como o processo da transferência metálica por modo misto globular/curto-circuito é instável e a ocorrência dos curtos-circuitos é altamente imprevisível, então inicialmente será discutida a sensibilidade a variações paramétricas nos modelos de transferência metálica por modo globular e curto-circuito, separadamente. Isto dará um melhor entendimento entre as relações paramétricas e seus acoplamentos sem a imprevisibilidade do modo misto globular/curto-circuito.

Quanto à variação dos parâmetros operacionais e parâmetros identificados, ressalta-se que serão modificados um de cada vez. Ou seja, quando um parâmetro é variado, considera-se que todos os demais correspondem aos valores da Tabela 1, bem como as condições de operação de soldagem, que devem ser consideradas iguais ao que foi mencionado no início de cada seção.

7.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular

Nesta seção são mostradas as simulações referentes ao modelo de transferência metálica por modo globular. Primeiramente, são mostradas algumas dinâmicas, mais relevantes à análise, sem variação paramétrica e com as mesmas condições operacionais utilizadas na validação deste modelo.

A primeira configuração dos parâmetros operacionais para transferência globular é:

18mm de distância entre o bico de contato e a peça, velocidade de alimentação de arame regulada em $3m/min$, velocidade de deslocamento do robô ajustada em $33cm/min$, velocidade do gás de proteção CO_2 de $16L/min$ e tensão da fonte de $36V$. Além disso, com a utilização do robô BUG-O MDS, a tocha foi mantida perpendicular à poça de fusão, ou seja, φ igual a 1.

Além disso, as condições iniciais das variáveis de estado foram consideradas nulas, exceto a massa da gota ($x_5 = 0,000001$). O ângulo de condução θ foi definido como $1,5708rad$ (90°) e o parâmetro de ajuste empírico f da força F_γ não foi alterado, ou seja, f igual 1. Ainda, para obter $3m/min$ de velocidade de alimentação de arame, a tensão do motor do alimentador de arame foi de $0,06785V$.

Nas Figuras 76 e 77 são mostradas algumas das dinâmicas mais acopladas do processo de transferência metálica. O acoplamento paramétrico entre corrente de soldagem e tensão do arco foi discutido na validação dos modelos matemáticos. Entretanto, vale a pena incluí-los nos gráficos para melhor discussão das demais dinâmicas.

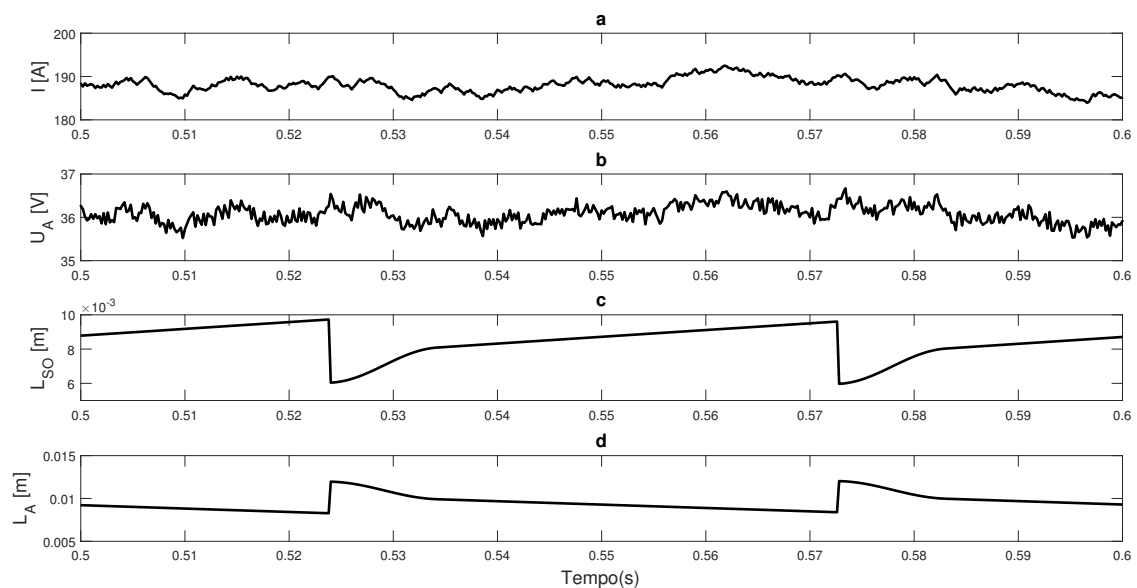


Figura 76: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: sem variação paramétrica. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Na Figura 76 são mostradas, além da corrente de soldagem e tensão do arco, os gráficos do comprimento do *stick-out* L_{SO} e comprimento do arco L_A . Note que essas duas dinâmicas são intimamente relacionadas. Conforme o comprimento efetivo, sólido e líquido (gota), do eletrodo cresce, o comprimento do arco diminui e vice-versa. Essa

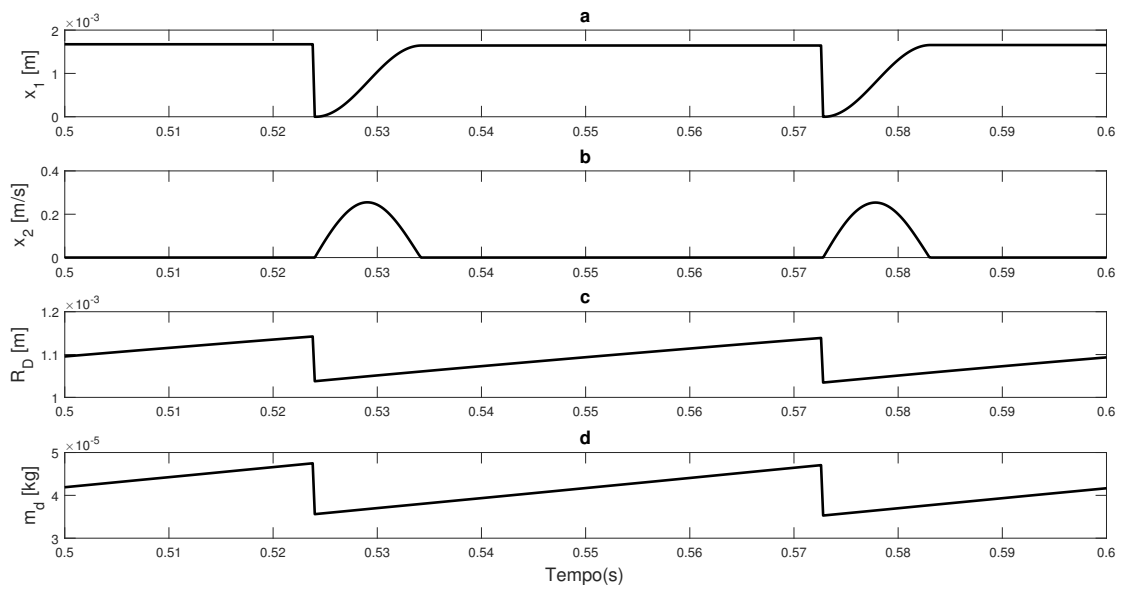


Figura 77: Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por voo livre: sem variação paramétrica. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.

relação é a mais lógica, pois conforme o volume da gota aumenta, espaço livre para formação do arco entre essa gota e a poça de fusão diminui, consequentemente tornando o comprimento do arco menor. Além disso, note que o comprimento de arco nunca ultrapassa a distância bico de contato peça configurada ($15mm$), como era esperado.

Em seguida, na Figura 77, são mostrados gráficos do raio da gota R_D e sua massa m_d , bem seu deslocamento x_1 e velocidade x_2 . Primeiramente, note que o raio da gota cresce até atingir um valor significativamente superior que o raio do eletrodo ($0,59mm$). O valor máximo atingido foi cerca de $1,1mm$, o que corresponde com outros trabalhos. Em [41, 209], foi mostrado que dependendo das condições operacionais e consumíveis, o raio da gota pode ter entre $0,8$ e $2mm$, antes de ser transferida para a poça de fusão.

Em se tratando da massa da gota formada, a escala também é a mesma da literatura, $10^{-5}kg$. Em [167], a massa varia entre $0,5$ e $2,5 \times 10^{-5}kg$, em curto-circuito. Como a transferência simulada é globular, o valor entre 3 e $5 \times 10^{-5}kg$, corresponde ao esperado, pois as gotas crescem mais até que sejam transferidas à poça de fusão.

As dinâmicas do deslocamento e velocidade da gota também são fortemente relacionadas. É notável que a partir do momento em que a gota começa a escorrer do eletrodo, formando o pingente, a velocidade desse deslocamento é correspondentemente incrementada.

Da mesma forma, quando a gota é transferida para a poça de fusão, o que restou de material não destacado é retraído para a posição onde uma nova gota começa a se formar. Consequentemente, a velocidade desse deslocamento reduz até que seja nula, pois a gota ainda muito pequena não está escorrendo pelo eletrodo, ou seja, ainda não foi formado o pingente que a segura.

Por fim, pode-se observar todas essas dinâmicas interagindo simultaneamente. Note que conforme o raio da gota aumenta, sua massa também aumenta. Quando essa gota alcança um certo peso, o pingente se forma, dando início ao seu deslizamento no eletrodo, o que altera sua posição e velocidade.

Da mesma forma, observa-se que com o aumento do raio do eletrodo, há aumento do comprimento do *stick-out* e com isso, redução do comprimento de arco. Quando uma gota é destacada, todas essas dinâmicas reagem simultaneamente.

Essas relações discutidas aparecerão em todas as simulações, incluindo os demais modos de transferência metálica. Então, não serão comentadas novamente. A seguir são variados os parâmetros operacionais para mostrar sua influência sobre o processo.

7.1.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular Frente à Variações nas Condições de Soldagem

Como a transferência por modo globular é marginalmente estável, devido a ausência de curto-circuito, o ajuste dos parâmetros operacionais não afeta de forma tão influente quanto nos demais modos de transferência. Alterando a tensão da fonte ou a velocidade de alimentação de arame, a principal mudança observada é no tempo para formar e destacar as gotas. Então, estas variações serão discutidas de forma breve.

O primeiro parâmetro operacional variado é a tensão da fonte. Se diminuir a tensão da fonte, espera-se que a corrente de soldagem também reduza e que menos material seja fundido, tornando as dinâmicas internas mais lentas. Assim, a tensão da fonte foi ajustada em 33V. Essa simulação é mostrada nas Figuras 78 e 79.

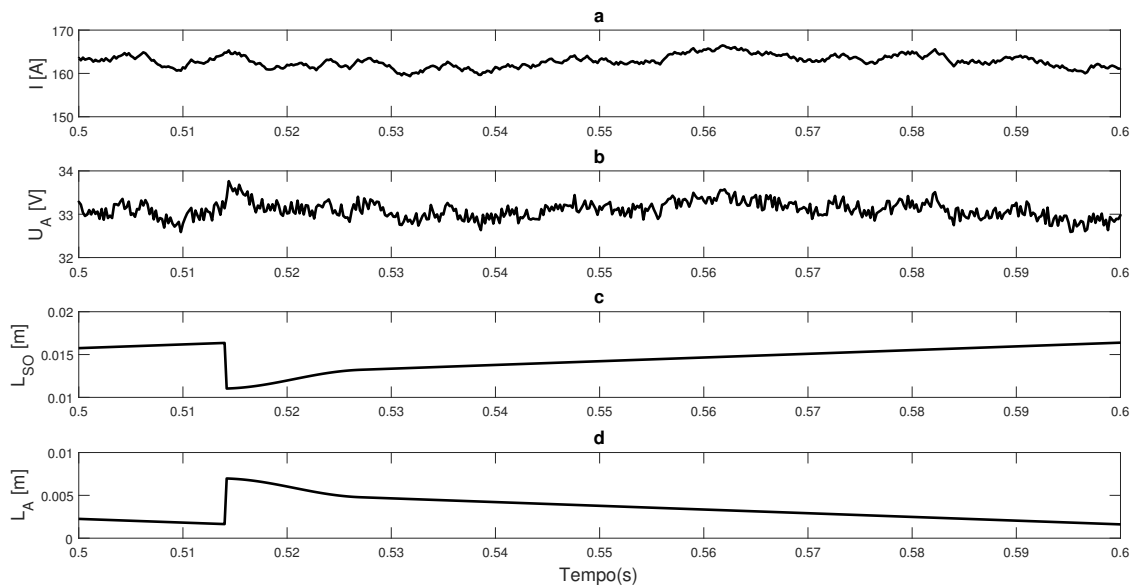


Figura 78: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

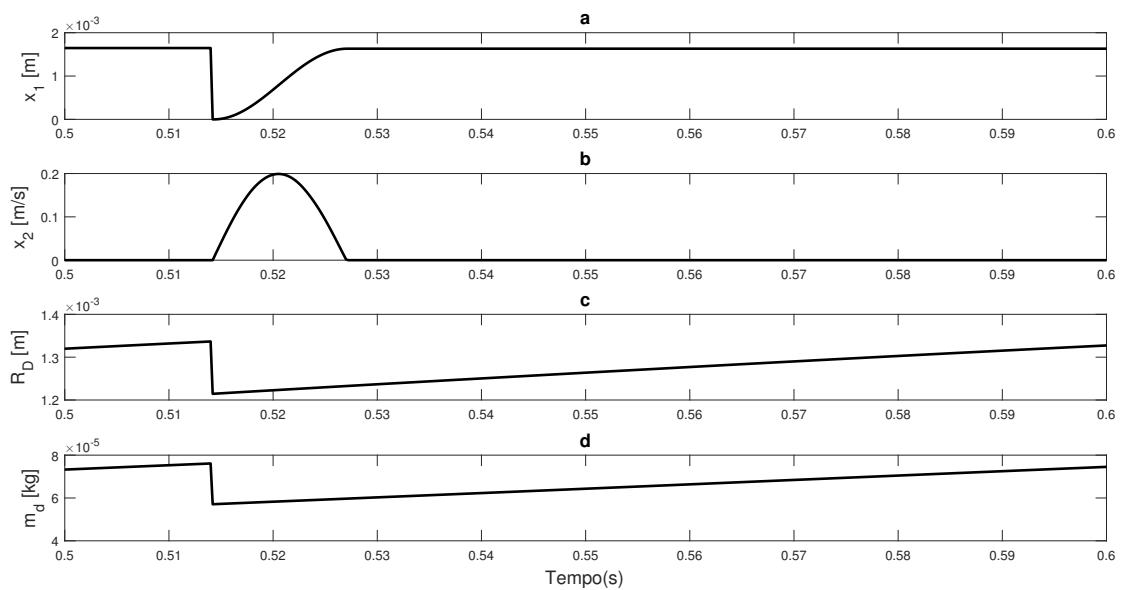


Figura 79: Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por voo livre: com variação na tensão da fonte. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.

Note que a corrente de soldagem foi reduzida, pois antes ficava em torno de 180A e com a redução da tensão da fonte de 36V para 33V, a corrente de soldagem ficou em torno de 165A.

Além disso, para o mesmo tempo de operação mostrado anteriormente, a gota demorou mais para alcançar o mesmo volume, como esperado. Observe que apenas uma vez o raio da gota atingiu seu máximo, permitindo a transferência da gota para a poça de fusão. Logo, as demais dinâmicas acompanharam essa desaceleração na transferência metálica.

Como aferido experimentalmente que $36V$ é a tensão máxima possível para obtenção da transferência globular com CO_2 , então não será mostrada aqui a simulação com incremento da tensão da fonte. Entretanto, se tivesse sido utilizado outro gás de proteção, seria possível obter o modo goticular com aumento da tensão da fonte. Para mostrar que o modelo da transferência por voo livre pode ser utilizado para representar a transferência goticular, simulações são mostradas e discutidas no Apêndice D.

A segunda condição de soldagem variada é a velocidade de alimentação de arame. Essa velocidade foi modificada de $3m/min$ para $4,5m/min$. Para tal, a tensão do motor do alimentador de arame foi ajustada em $0,1018V$. Essa simulação é mostradas nas Figuras 80 e 81.

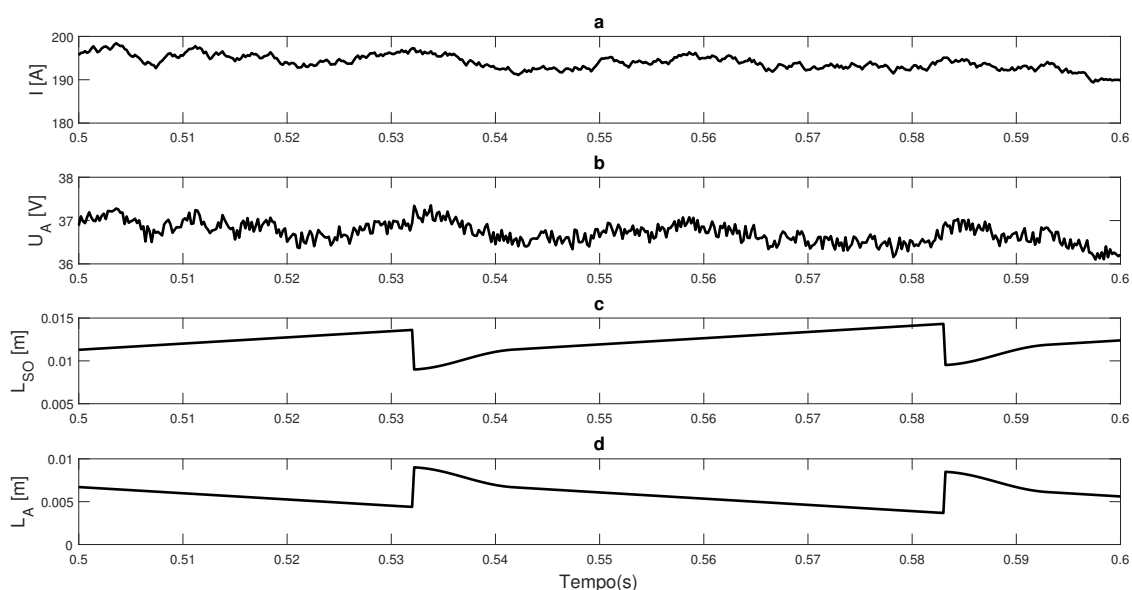


Figura 80: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na velocidade de alimentação do arame. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

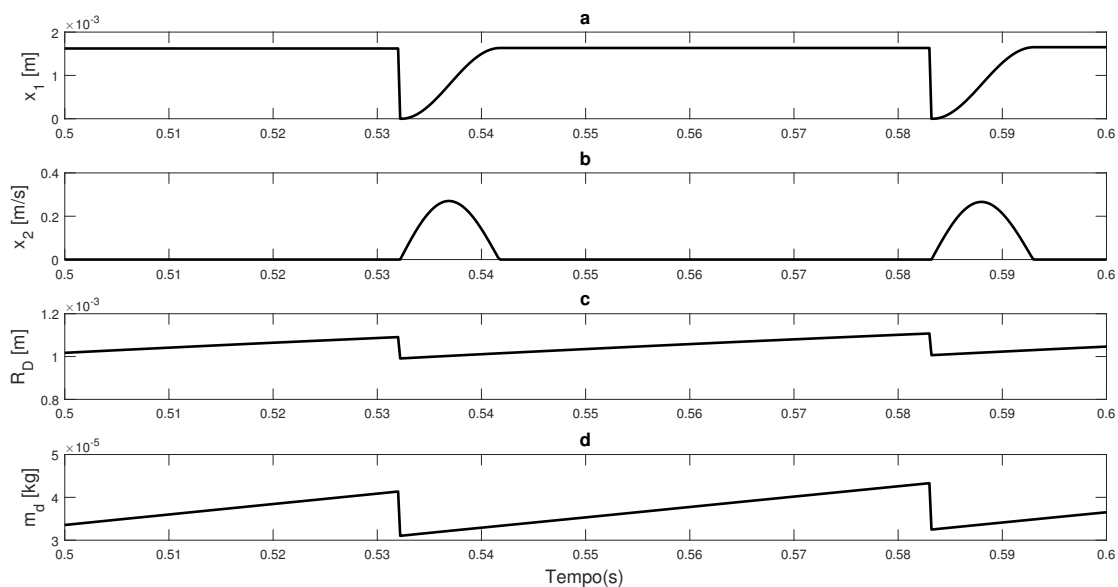


Figura 81: Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por voo livre: com variação na velocidade de alimentação do arame. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.

Na Figura 80 é notável que o aumento da velocidade de alimentação de arame força a corrente de soldagem à ser elevada. Isso é necessário para manter a taxa de fusão do eletrodo. Isto é, quanto mais eletrodo é alimentado, mais calor é necessário para fundi-lo e esse calor é obtido às custas da corrente de soldagem. Como esperado, o aumento da corrente de soldagem, aumenta a tensão do arco.

As demais dinâmicas novamente acompanharam as mudanças da mesma forma. Assim, por conveniência e para evitar repetição, deste ponto em diante será mostrado apenas o primeiro gráfico de cada simulação, que inclui a corrente de soldagem, tensão de arco, comprimento do *stick-out* e o comprimento do arco. O segundo gráfico será omitido pois, como foi mostrado, as demais dinâmicas acompanham o que varia no primeiro gráfico sempre da mesma forma.

O terceiro parâmetro operacional variado é a distância entre bico de contato e peça L_{CTW} . Essa distância foi modificada de $18mm$ para $21mm$. Essa simulação é mostrada na Figura 82.

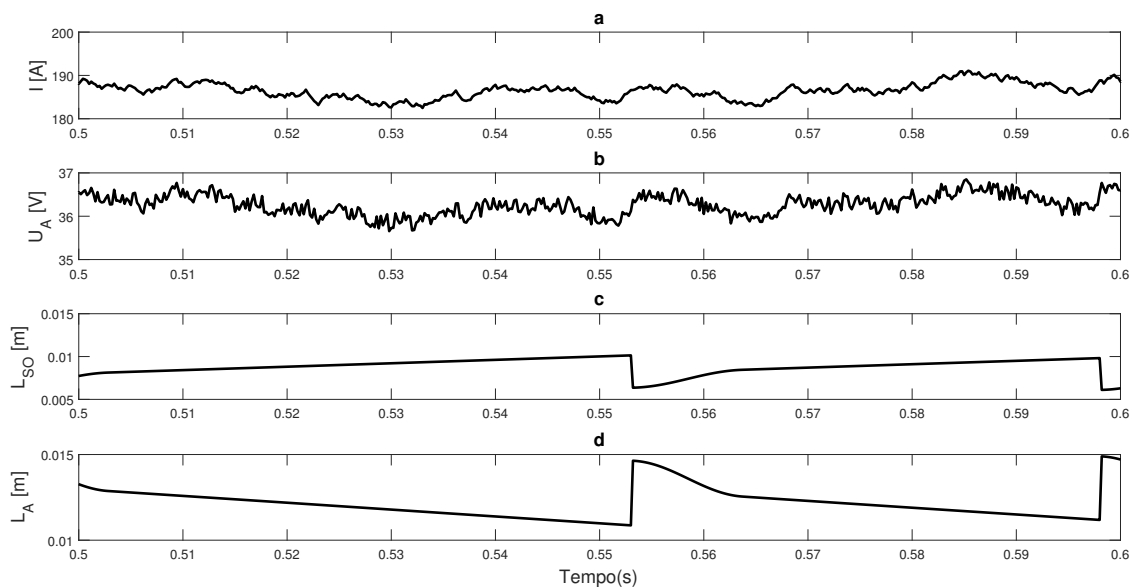


Figura 82: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na distância entre bico de contato e peça. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Na Figura 82 pode-se observar claramente que com o aumento da L_{CTW} , o comprimento do arco também aumentou. Isso é consequência do aumento de espaço livre entre o eletrodo em fusão e a poça de fusão. As demais dinâmicas se mantiveram equivalentes.

7.1.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular Frente à Variações Paramétricas

A variação dos parâmetros afeta de forma muito mais significativa as dinâmicas internas e saídas dos modelos do que a mudança nas condições operacionais. Isto se fundamenta pelo forte acoplamento de seus parâmetros.

Assim, se os parâmetros forem erroneamente identificados, o modelo não representará o processo de forma adequada. Para mostrar isso, alguns parâmetros serão alterados para analisar sua influência sobre as demais dinâmicas.

O primeiro parâmetro variado foi a resistência do arco. Esse parâmetro foi reduzido de $0,1111\Omega$ para $0,022\Omega$ [123]. A Figura 83 mostra essa simulação.

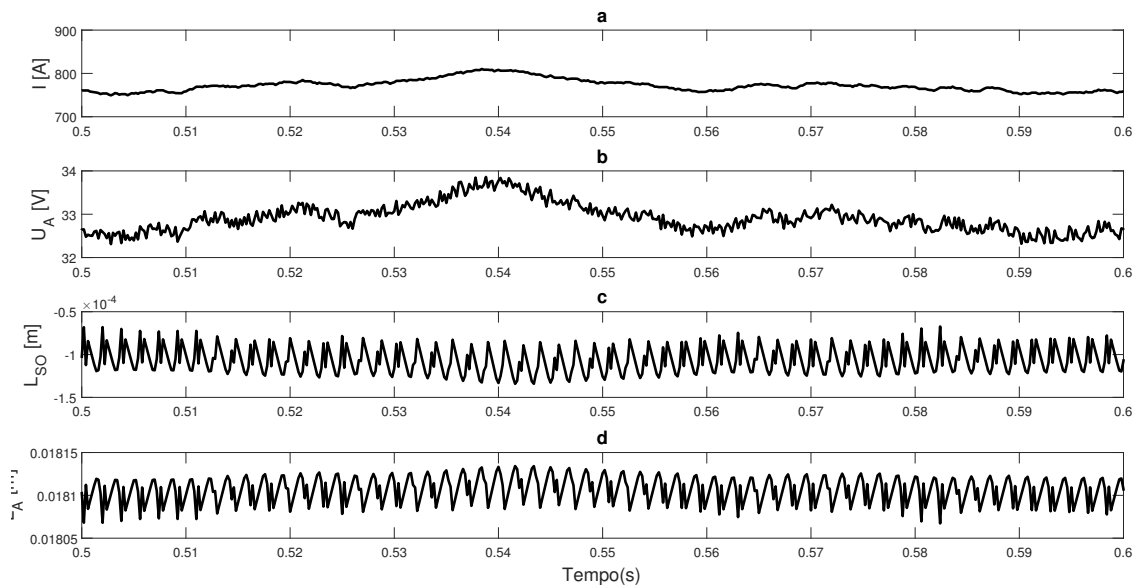


Figura 83: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na resistência do arco. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Note que manter a transferência metálica, a corrente de soldagem alcançou valores que excedem os limites da fonte utilizada. Da mesma maneira, as dinâmicas do comprimento do *stick-out* e do arco foram para valores não condizentes com o esperado. Os valores dessa simulação representam que o eletrodo está derretendo antes mesmo de sair do bico de contato ($L_{SO} < 0$) e as gotas são transferidas ainda muito pequenas, pois o arco está sempre em torno dos $18mm$, distância definida da L_{CTW} .

O segundo parâmetro variado é o campo magnético E_a . Esse parâmetro foi alterado de $62,0059N/m$ para $400N/m$ [135]. Essa simulação é mostrada na Figura 84.

Note, na Figura 84, que com a alteração do campo magnético, a corrente de soldagem tendeu a se afastar da média observada anteriormente. Isso se refletiu na tensão de arco, de forma amena, mas notável. Se o campo magnético for incrementado novamente, como por exemplo $1500N/m$ [123], todas as dinâmicas são descaracterizadas.

O terceiro parâmetro alterado foi a indutância da fonte. Esse parâmetro, se variado sutilmente, tem pouca influência na transferência por voo livre. Entretanto, para o modo curto-circuito sua variação é mais relevante. A indutância da fonte foi variada de $0,35 \times 10^{-3}H$ para $0,75 \times 10^{-3}H$ [167]. Essa simulação é mostrada na Figura 85.

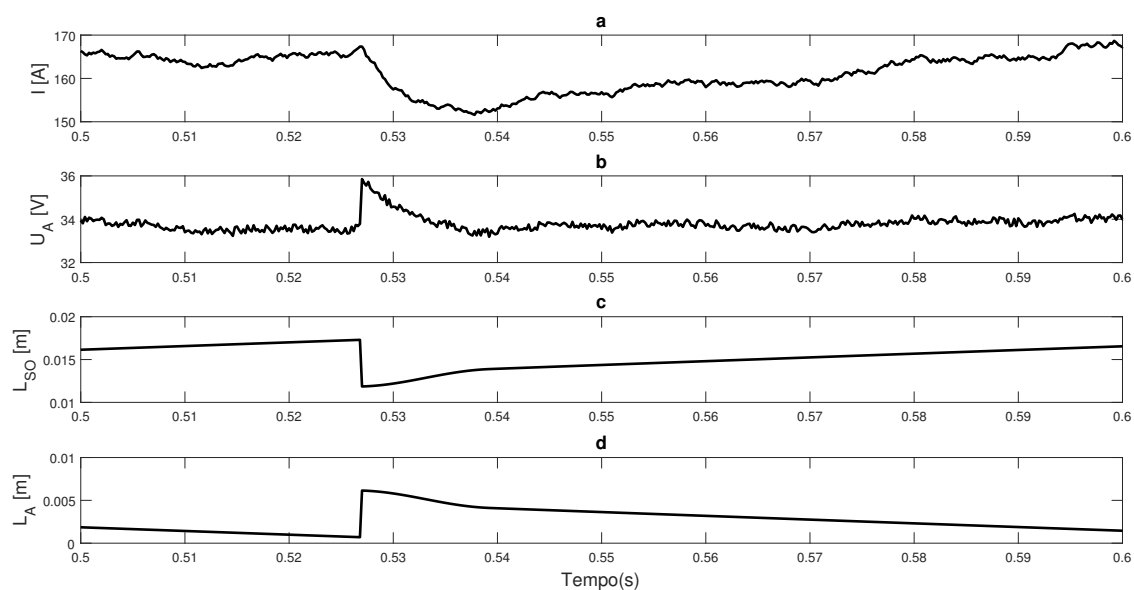


Figura 84: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na campo magnético. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

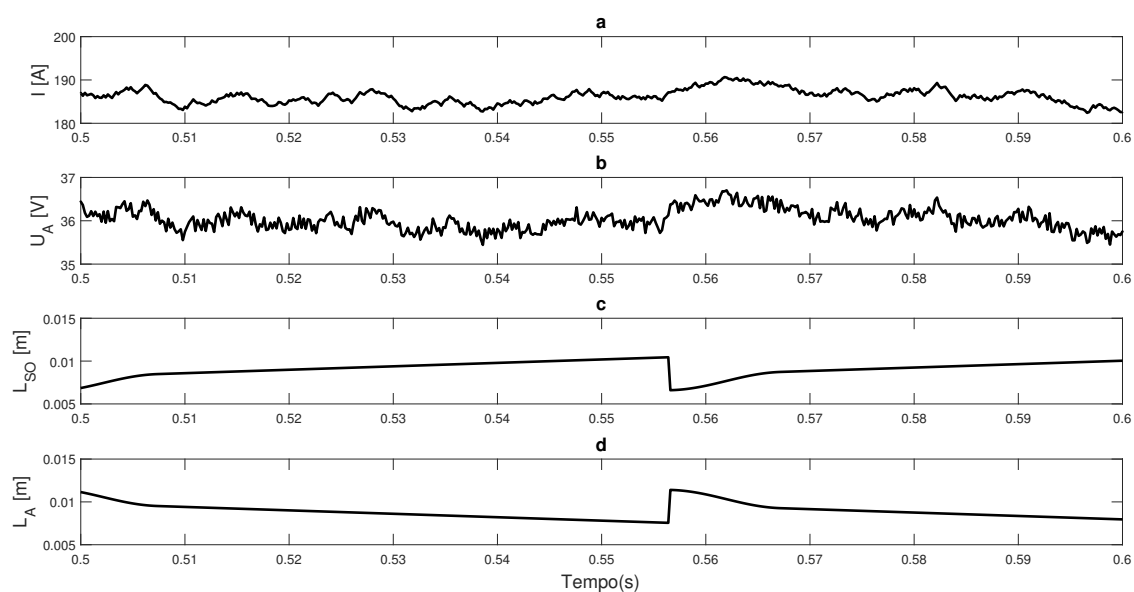


Figura 85: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por voo livre: com variação na indutância da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como pode ser observado, a alteração do valor da indutância da fonte manteve a corrente de soldagem mais regular, isto é, não atingiu valores tão disparados da média.

7.1.3 Análise da Influência das Forças nas Dinâmicas da Transferência Metálica por Modo Globular

Conforme mencionado por diversos autores algumas forças governam a transferência metálica, enquanto outras apenas contribuem de forma muito sutil, podendo ser desprezadas nas simulações.

Para verificar se o modelo correspondia com a realidade, diversas simulações foram realizadas, sem variação paramétrica nem alteração das condições de operação, para verificar a influência de cada força.

Foi verificado que de fato, algumas forças contribuem de forma pouco expressiva, a ponto de ser muito pouco perceptível sua ausência nos gráficos gerados. Assim, para não tornar essa análise cansativa ao leitor, será mostrado apenas dois gráficos de análise das forças sobre cada transferência metálica.

O primeiro gráfico sempre mostrará a transferência metálica sob influência das forças governantes dessa transferência, sem as contribuições das demais forças. Já o segundo gráfico será sempre o contrário, isto é, com ausência das forças que governam a transferência metálica, mas considerando as contribuições das demais forças.

Assim, para a transferência metálica por modo globular foi verificado que de fato as forças dominantes na transferência metálica por modo globular são a força da gravidade, a força eletromagnética e a tensão superficial (considerada no critério de destacamento – DBFM). A Figura 86 mostra essa simulação.

Como pode ser observado na Figura 86, a transferência metálica se manteve muito próxima ao que foi apresentado considerando todas as forças na Figura 76. Assim, o segunda análise, mostrada na Figura 87, apresenta as dinâmicas da transferência metálica desconsiderando as contribuições da força da gravidade e da força eletromagnética.

Note que na Figura 87 embora a corrente de soldagem e a tensão de arco tenham se mantido dentro dos valores esperados, as dinâmicas internas do modelo não corresponderam adequadamente a transferência metálica, o que faz sentido, pois as forças que forçam o destacamento da gota não estão sendo consideradas.

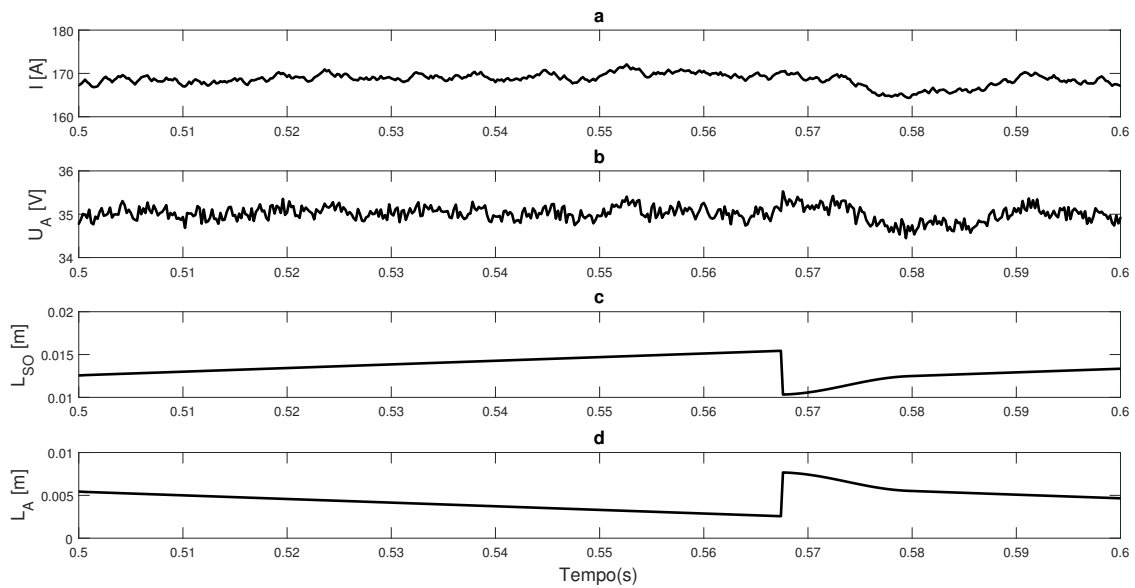


Figura 86: Análise da influência das forças na transferência por voo livre: desconsiderando influência da força aerodinâmica e força proveniente do momento. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

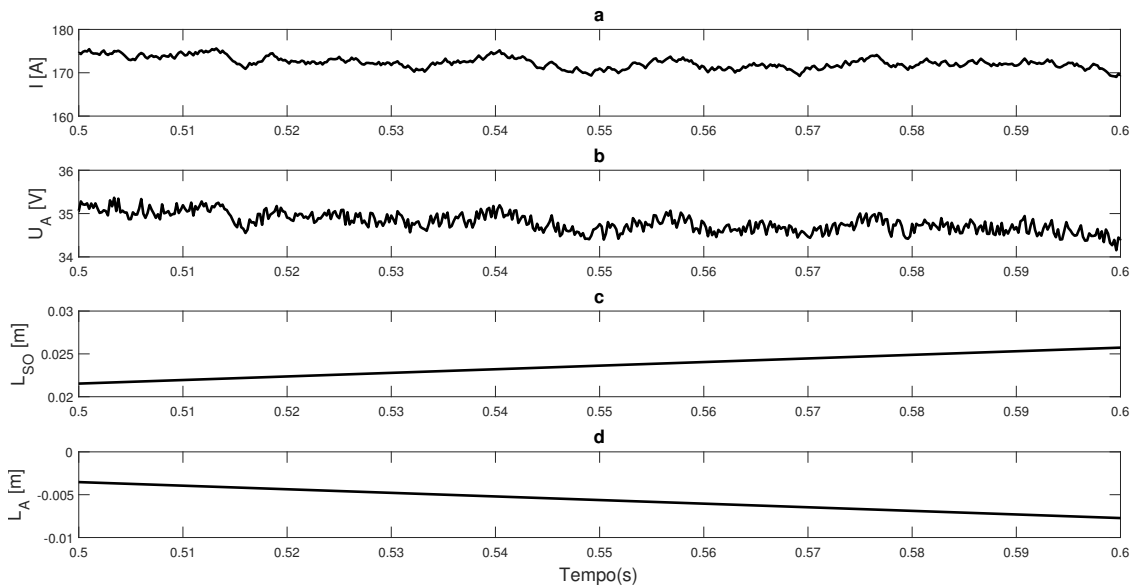


Figura 87: Análise da influência das forças na transferência por voo livre: desconsiderando influência da força da gravidade e força eletromagnética. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

7.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Curto-Circuito

Nesta seção são mostradas as simulações referentes ao modelo de transferência metálica por modo globular. Primeiramente, são mostradas algumas dinâmicas, mais

relevantes à análise, sem variação paramétrica e com as mesmas condições operacionais utilizadas na validação deste modelo.

A primeira configuração dos parâmetros operacionais para transferência globular é: $15mm$ de distância entre o bico de contato e a peça, velocidade de alimentação de arame regulada em $7m/min$, velocidade de deslocamento do robô ajustada em $33cm/min$, velocidade do gás de proteção CO_2 de $16L/min$ e tensão da fonte de $20V$. Além disso, com a utilização do robô BUG-O MDS, a tocha foi mantida perpendicular à poça de fusão, ou seja, φ igual a 1.

Além disso, as condições iniciais das variáveis de estado foram consideradas nulas, exceto a massa da gota ($x_5 = 0,000001$). O ângulo de condução θ foi definido como $1,5184rad$ (87°) e a função de correção f de destacamento foi ajustada em 0,01. Ainda, para obter $7m/min$ de velocidade de alimentação de arame, a tensão do motor do alimentador de arame foi de $0,157V$.

As Figuras 88 e 89 mostram essa simulação.

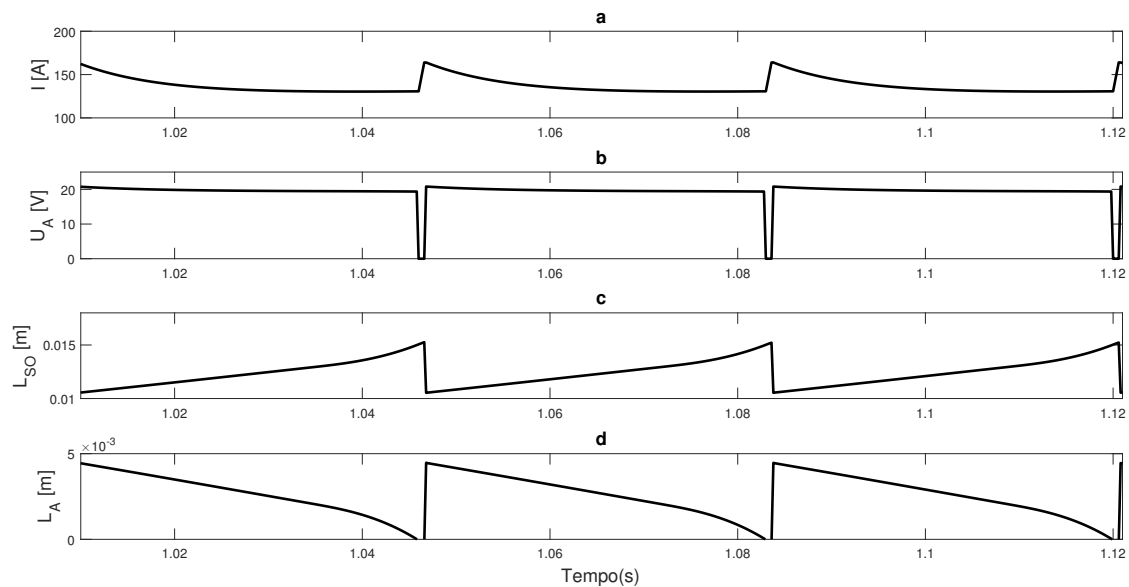


Figura 88: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem variação paramétrica. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

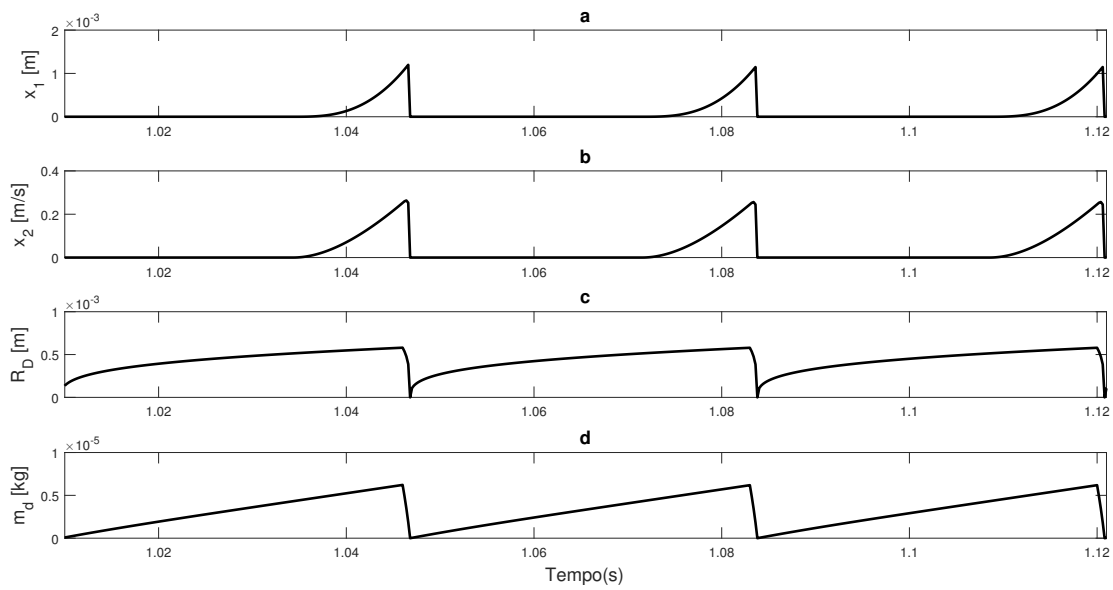


Figura 89: Análise em simulação de algumas dinâmicas internas do modelo da transferência por curto-circuito: sem variação paramétrica. (a) Deslocamento da gota na ponta do eletrodo, (b) Velocidade da gota, (c) Raio da gota, (d) Massa da gota.

Na Figura 88 é mostrado as relações entre a corrente de soldagem, tensão do arco, comprimento do *stick-out* e comprimento do arco. Durante a fase de arco, a gota cresce continuamente, isso pode ser observado no comprimento do *stick-out*, que cresce até o momento que ocorre o curto-circuito. No momento em que o curto-circuito inicia, isto é, quando a gota toca na poça de fusão ainda em contato com eletrodo, uma ponte é formada. Note que, neste momento, o comprimento efetivo L_{SO} é igual a distância bico de contato peça L_{CTW} e o arco é extinguido.

Assim que a fase de curto inicia a transferência metálica é iniciada. Note, na Figura 89, que por não ser considerada a dinâmica do pingente, o deslocamento da massa somente inicia na fase de curto. Consequentemente sua velocidade de deslocamento também. Em relação aos valores dessas dinâmicas, foi verificado os valores simulados são próximos à valores da literatura, como [167].

Por fim, observe que a fase de curto somente encerra quando o raio da ponte R_D é rompido. Foi utilizado a mesma variável do raio da gota para representar o raio da ponte, pois são dinâmicas complementares. Isto é, o raio da gota representa a evolução da gota antes do curto-circuito, e em seguida, quando a ponte é formada, seu raio inicial é exatamente igual ao raio da gota no momento que esta gota tocou a poça de fusão.

Assim como foi feito para a análise das dinâmicas no modo globular, a partir deste ponto serão mostradas apenas as dinâmicas do primeiro gráfico, pois as demais dinâmicas se comportaram sempre de acordo com as variações das que estão sendo discutidas.

7.2.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Curto-Circuito Frente à Variações nas Condições de Soldagem

Diferentemente da transferência metálica por modo globular, a transferência metálica por curto-circuito é inerentemente instável. Assim, até mesmo o ajuste dos parâmetros operacionais é sensível.

O primeiro parâmetro operacional variado é a tensão da fonte. A tensão da fonte foi alterada de 20V para 25V. Essa simulação é mostrada na Figura 90.

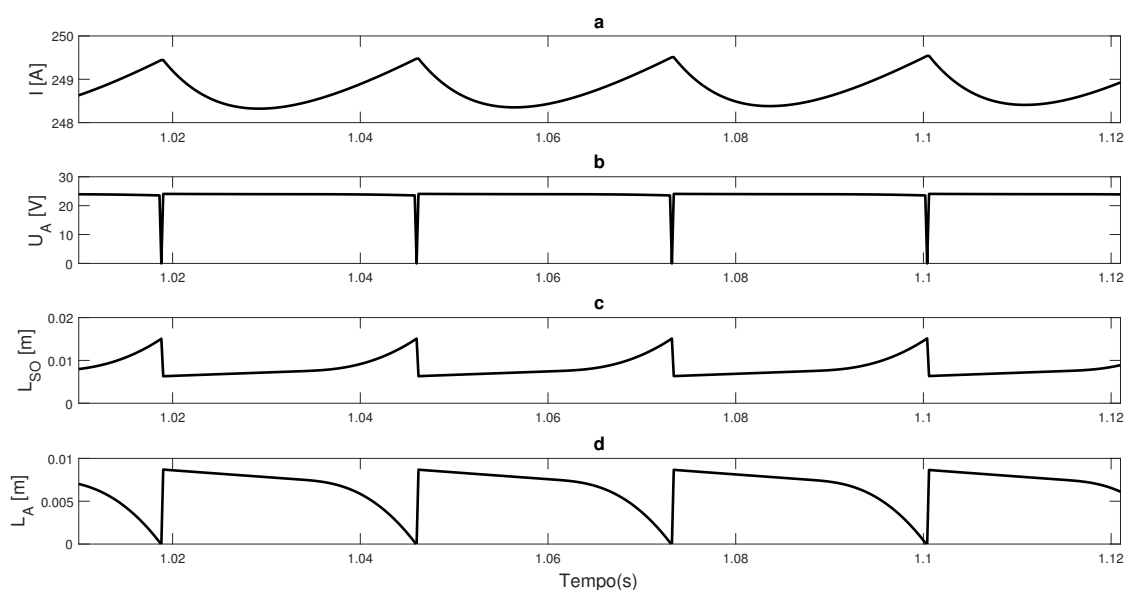


Figura 90: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Note que com o aumento da tensão da fonte, a corrente de soldagem aumentou significativamente, entretanto deixou de representar a transferência metálica por curto-circuito. Isso é um comportamento esperado, pois foi verificado experimentalmente que acima de 20V a transferência metálica se aproximava cada vez mais do modo globular.

De modo contrário, a redução da tensão da fonte ainda mantém a transferência metálica por curto-circuito. Entretanto, se não diminuir a velocidade de alimentação do arame, uma redução na tensão da fonte induz a transferência à instabilidade, descaracterizando a transferência. Isso ocorre devido a falta de calor para fusão do eletrodo.

O segundo parâmetro operacional alterado foi a velocidade de alimentação de arame. Essa velocidade foi modificada de $7m/min$ para $1,5m/min$. Para tal, a tensão do motor do alimentador de arame foi ajustada em $0,0339V$. Essa simulação é mostrada na Figura 91.

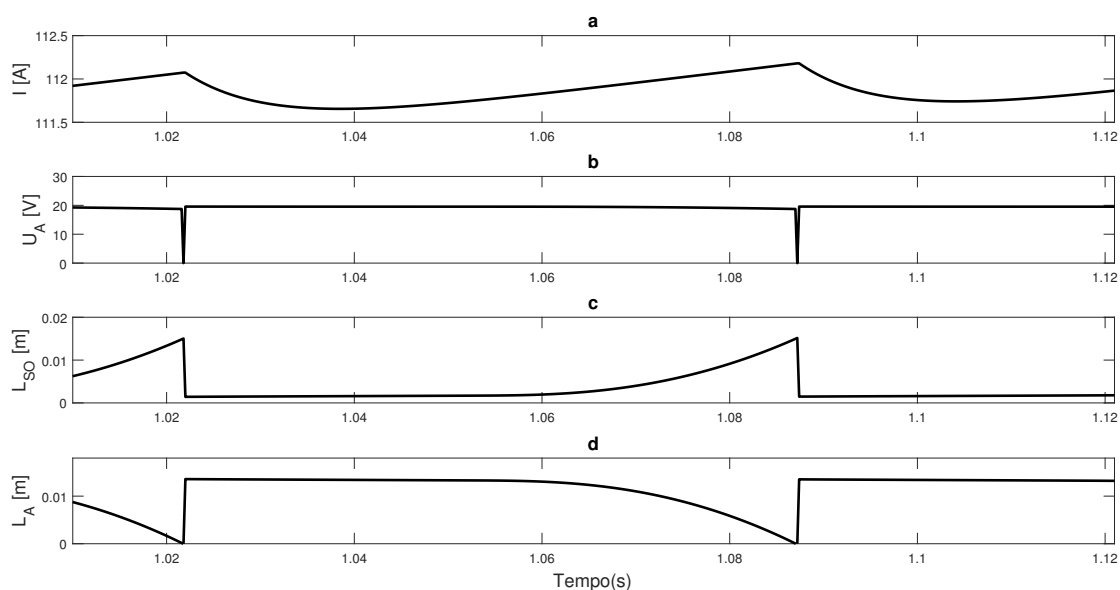


Figura 91: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Com a redução da velocidade da alimentação de arame, a gota cresce mais devagar, consequentemente, o comprimento do *stick-out* demora mais à tocar a poça de fusão. Assim, há um menor número de curtos-circuitos, conforme pode ser observado na redução de vezes que o arco foi extinguido.

O terceiro parâmetro operacional variado foi a distância bico de contato e peça. Essa distância foi alterada de $15mm$ para $20mm$. Essa simulação é mostrada na Figura 92.

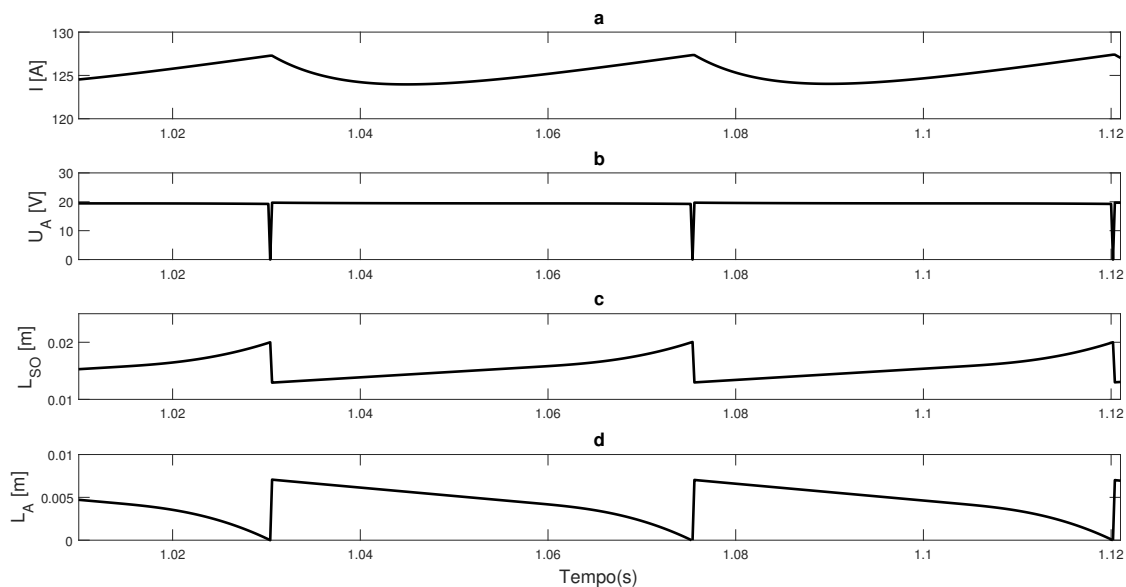


Figura 92: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como pode ser observado na Figura 92, com o aumento da distância bico de contato e peça, com o aumento da distância bico de contato e peça, a gota precisa crescer mais até que toque a poça de fusão, para ocorrência do curto-circuito e consequentemente a transferência metálica. Essa mudança também afetou a corrente de soldagem, pois como o espaço livre para gota crescer é maior, há mais tempo entre a formação e o destacamento da gota, logo, menos calor é requerido para fusão do eletrodo, o que implica em uma corrente de soldagem mais amena.

Essa distância pode ser alterada dentro de um certo limite, pois se incrementada para 25mm por exemplo, a transferência passa a ocorrer em modo globular, pois a gota fica pesada o suficiente para a gravidade destaca-la antes de tocar a poça de fusão. Além disso, se diminuir essa distância indiscriminadamente, ocorrem curtos-circuitos demais e a transferência metálica torna-se instável, novamente descaracterizando o processo.

7.2.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Curto-Circuito Frente à Variações Paramétrica

O primeiro parâmetro variado foi a resistência do arco. Esse parâmetro foi reduzido de $0,1111\Omega$ para $0,022\Omega$ [123]. A Figura 93 mostra essa simulação.

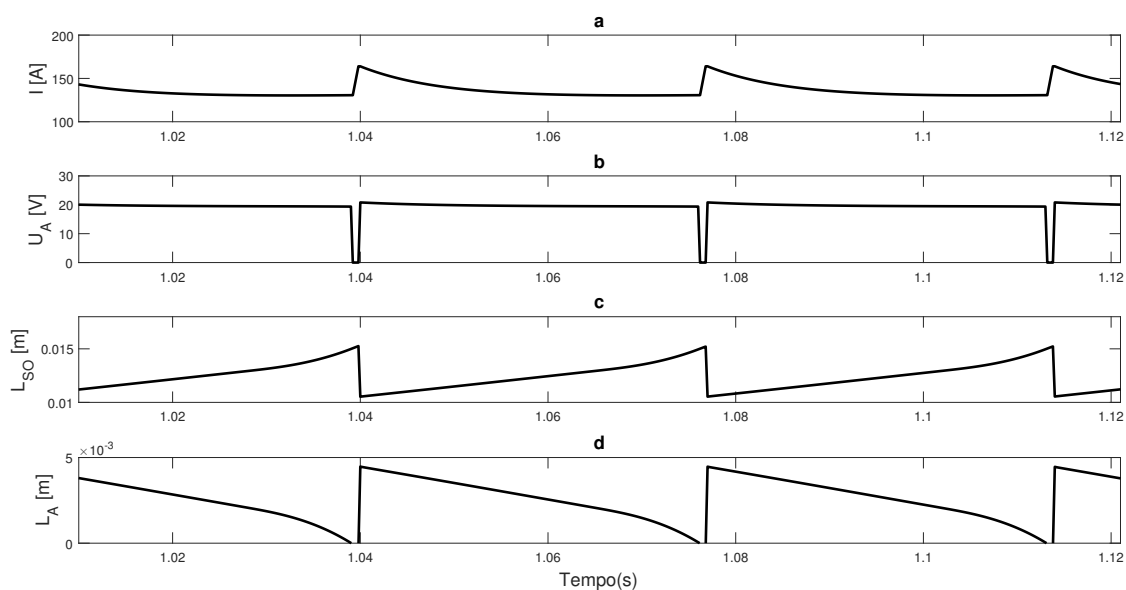


Figura 93: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na resistência do arco. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como pode ser observado na Figura 93, a variação da resistência do arco influenciou de forma sutil as dinâmicas na transferência metálica por curto-circuito. Esse comportamento era esperado, pois neste modo de transferência, considera-se que a massa será destacada exclusivamente ao fim do curto-circuito. Assim, a influência da variação da resistência do arco é mais relevante quando a transferência ocorre em voo livre.

O segundo parâmetro variado é o campo magnético E_a . Esse parâmetro foi alterado de $62,0059 N/m$ para $62,0059 \times 10^{-2} N/m$. Essa simulação é mostrada na Figura 94.

Como pode ser observado na Figura 94, a redução do campo elétrico afetou pouco as dinâmicas do processo de transferência metálica. Entretanto, o aumento do campo elétrico para qualquer valor superior ao identificado, descaracteriza todas as dinâmicas da transferência metálica.

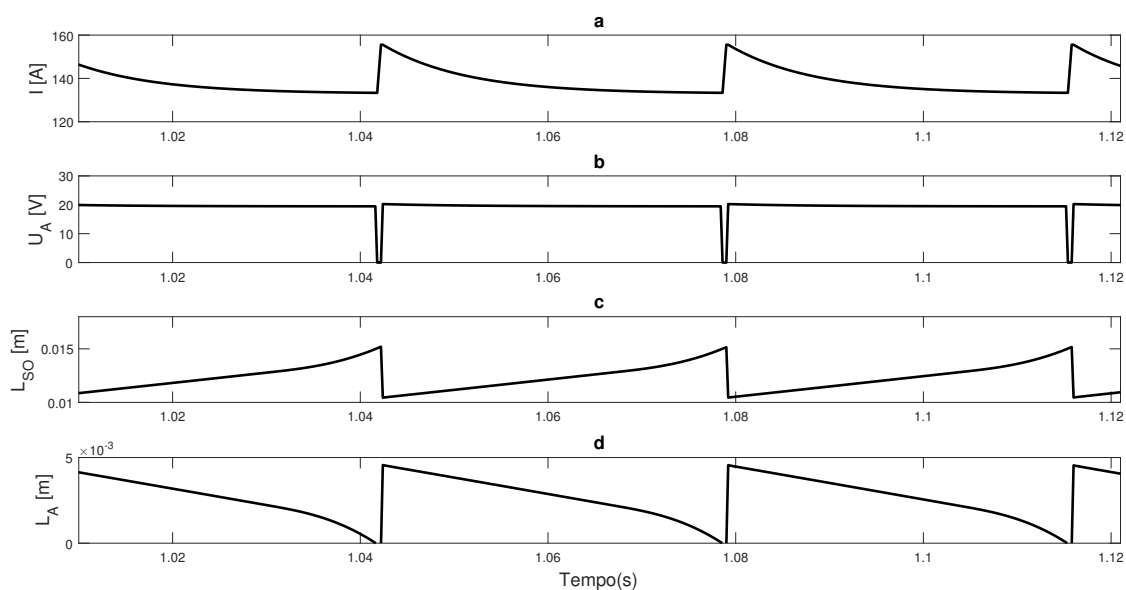


Figura 94: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação no campo elétrico. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

O terceiro parâmetro alterado foi a indutância da fonte. Esse parâmetro, se variado sutilmente, tem pouca influência na transferência por voo livre. Entretanto, para o modo curto-circuito sua variação é mais relevante. A indutância da fonte foi variada de $0,35 \times 10^{-3} H$ para $0,35 \times 10^{-4} H$. Essa simulação é mostrada na Figura 95.

Note que com a mudança da indutância da fonte, a corrente de soldagem alcançou picos de até $250 A$ para manter a transferência estável, o que não foi observado nos experimentos.

7.2.3 Análise da Influência das Forças nas Dinâmicas da Transferência Metálica por Curto-Circuito

Após série de simulações, foi verificado que a força mais significativa na transferência metálica por curto-circuito é a força da gravidade e a tensão superficial. Evidentemente foi mantida as dinâmicas referentes às pressões exercidas na ponte formada entre o eletrodo e a poça de fusão.

A Figura 96 mostra a simulação considerando apenas as contribuições da força da gravidade e da tensão superficial.

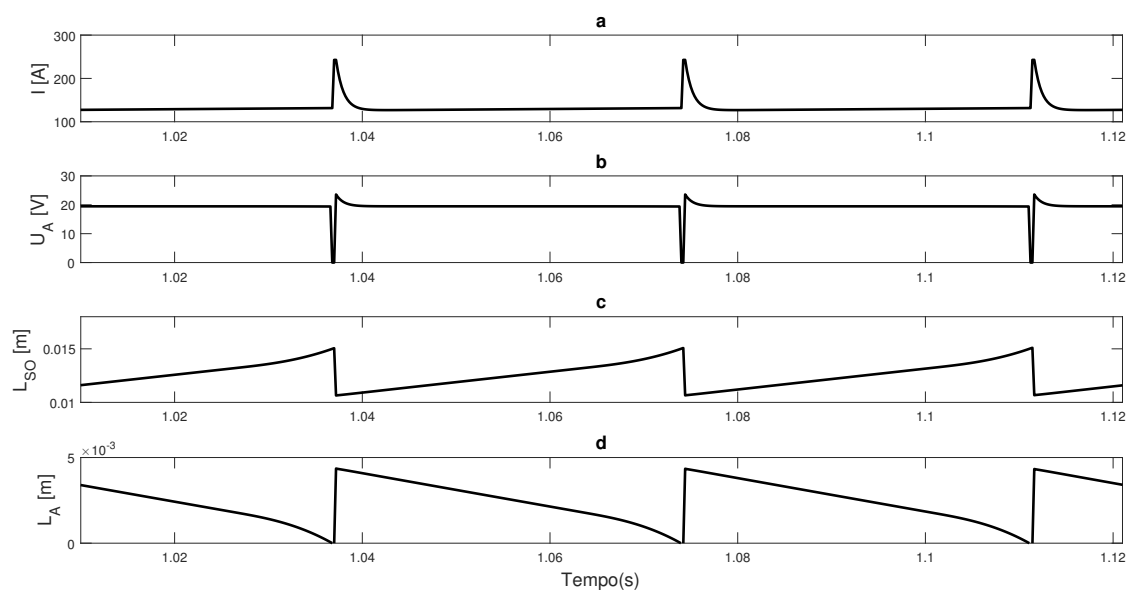


Figura 95: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: com variação na indutância da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

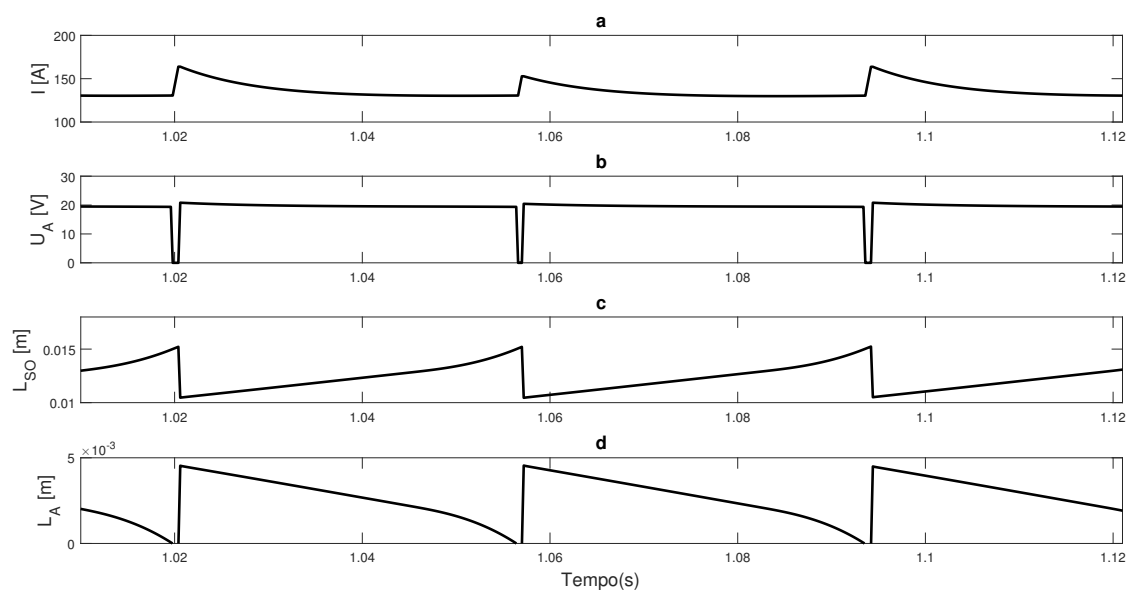


Figura 96: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem as contribuições da força eletromagnética, força aerodinâmica e força proveniente do momento. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como pode ser observado na Figura 96, mantendo as forças que governam o curto-circuito as dinâmicas apresentaram comportamento muito similar ao que foi visto com a contribuição de todas as forças, mostrado na Figura 88. Assim, foi também realizada

uma simulação desconsiderando as forças governantes, mostrada na Figura 97.

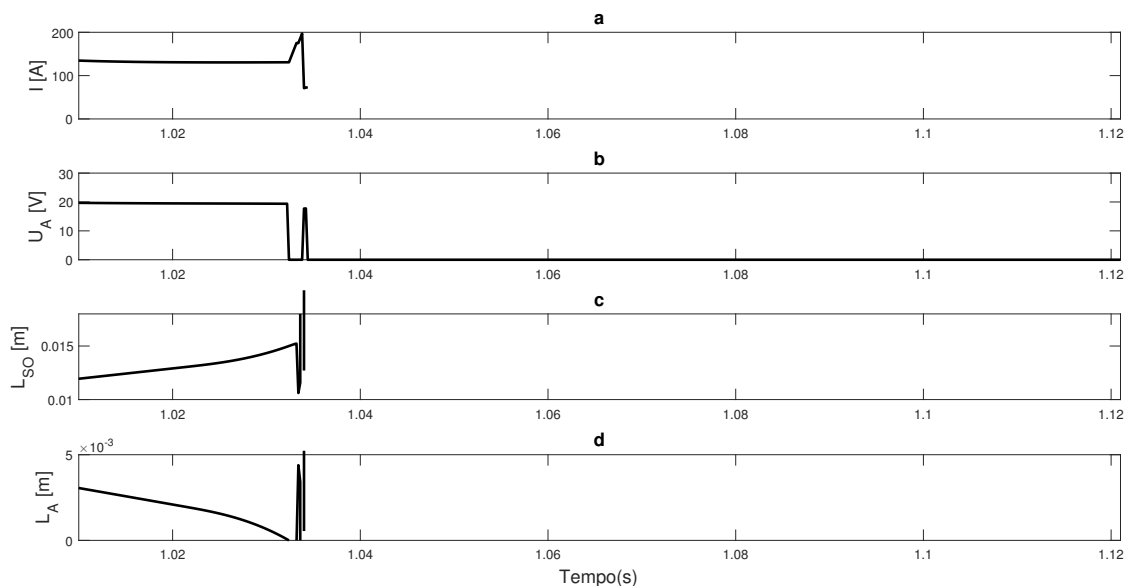


Figura 97: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem as contribuições da força da gravidade e tensão superficial. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Note, na Figura 97, que desconsiderando as forças que governam a transferência metálica por curto-circuito, as dinâmicas tenderam à valores complexos, que não condizem com a realidade, como esperado.

7.3 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular/Curto-Circuito

Nesta seção são mostrados os efeitos da variação das condições operacionais e dos parâmetros quando a transferência ocorre por modo misto globular/curto-circuito.

Nas seções anteriores foi mostrada o efeito dessas variações quando a transferência metálica ocorria por modo globular ou curto-circuito. De modo geral, as mesmas influências anteriores serão observadas nas análises desta seção, pois a transferência metálica mista globular/curto-circuito possui as características fundamentais de ambas as transferências metálicas.

A primeira configuração dos parâmetros operacionais para transferência mista globular/curto-circuito é: $15mm$ de distância entre o bico de contato e a peça, velocidade

de alimentação de arame regulada em $3m/min$, velocidade de viagem do robô ajustada em $33cm/min$, velocidade do gás de proteção CO_2 de $16L/min$ e tensão da fonte ajustada em $25V$. Além disso, com a utilização do robô BUG-O MDS, a tocha foi mantida perpendicular à poça de fusão, ou seja, φ igual a 1.

Além disso, as condições iniciais das variáveis de estado foram consideradas nulas, exceto a massa da gota ($x_5=0,000001$). O ângulo de condução θ foi definido como $1,5708rad$ (90°) e a função de correção f de destacamento foi ajustada em 0,1. Ainda, para obter $3m/min$ de velocidade de alimentação de arame, a tensão do motor do alimentador de arame foi de $0,06785V$.

A Figura 98 mostra algumas dinâmicas dessa simulação.

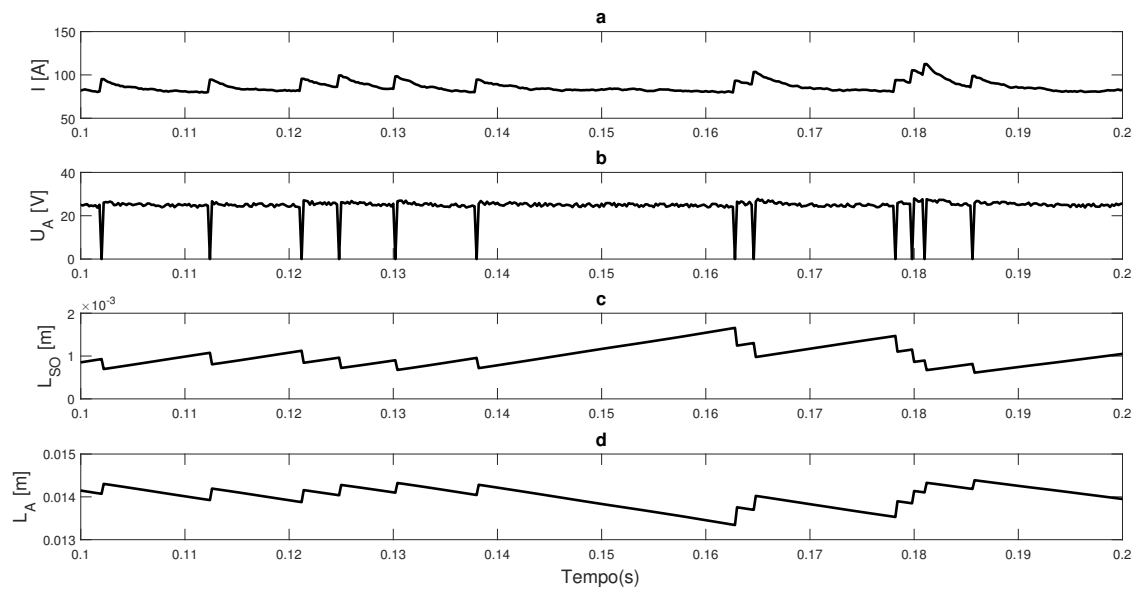


Figura 98: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por curto-circuito: sem variação paramétrica. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como pode ser visto na Figura 98, as gotas são destacadas com diferentes tamanhos. Note que o comprimento do *stick-out* varia consideravelmente, desde menos que $1 \times 10^{-3}m$ até quase $2 \times 10^{-3}m$. Evidentemente, isso afeta o comprimento do arco. A relação da corrente de soldagem arco elétrica já foi discutida no capítulo de validação e as demais dinâmicas serão omitidas pois se comportam exatamente como foi discutido nas duas seções anteriores frente as variações impostas.

7.3.1 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular/Curto-Circuito Frente à Variações nas Condições de Soldagem

Nesta seção são mostradas o efeito da variação das condições de soldagem sobre algumas dinâmicas na transferência metálica mista globular/curto-circuito.

A primeira condição de soldagem alterada foi a tensão da fonte. Esse parâmetro foi alterado de 25V para 35V. Essa simulação é mostrada na Figura 99.

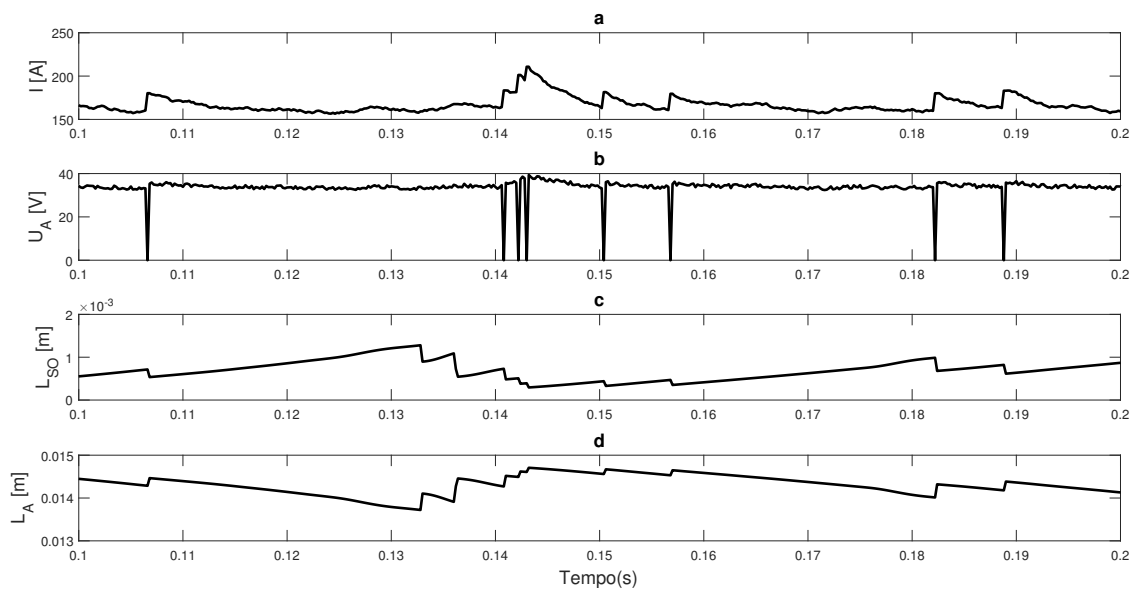


Figura 99: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na tensão da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como esperado, o aumento da tensão da fonte fez com que a corrente de soldagem alcançasse valores mais altos do que apresentado quando ajustada com tensão inferior. Note que mesmo com aumento da tensão da fonte não houve mais material fundido transferido para a poça de fusão, pois a velocidade de alimentação de arame foi mantida a mesma.

A segunda condição de soldagem variada é a velocidade de alimentação de arame. Essa parâmetro foi alterado de $3m/min$ para $1m/min$. Para tal, a tensão do motor do alimentador de arame foi ajustada em 0,0224V. Essa simulação é mostrada na Figura 100.

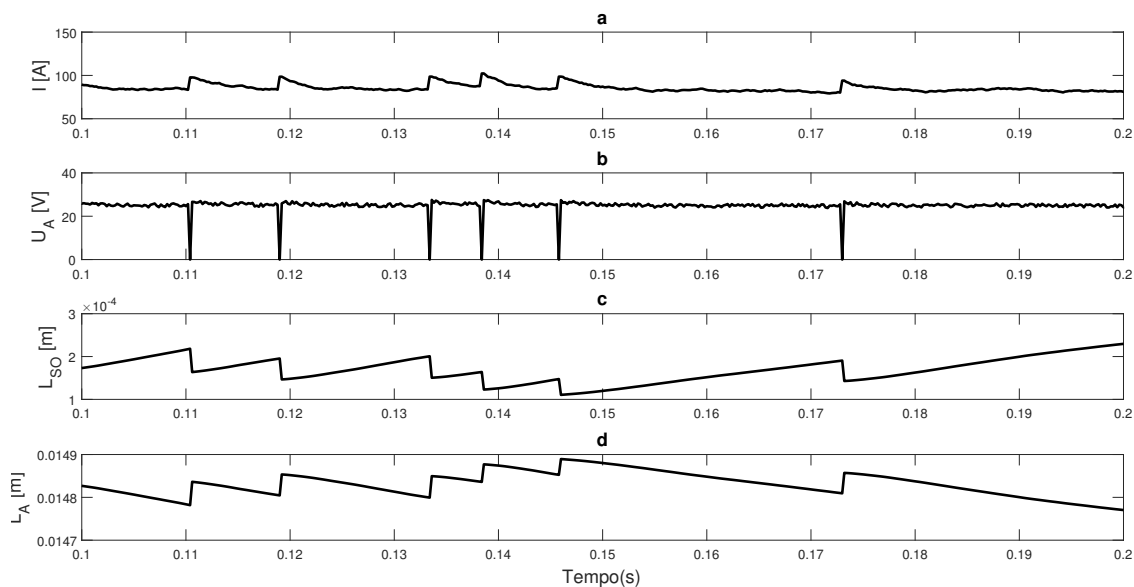


Figura 100: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na velocidade de alimentação de arame. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

A redução da velocidade de alimentação do arame tornou a transferência metálica mais próxima ao modo globular. Note que os curtos-circuitos que ocorreram são mais amenos e a corrente se manteve em torno dos 90A. Além disso, não foram observados curtos-circuitos sobre curtos-circuitos, conforme já discutido anteriormente.

A terceira condição de soldagem alterada foi a distância bico de contato e peça. Essa distância foi alterada de 15mm para 25mm. Essa simulação é mostrada na Figura 101.

Note, na Figura 101, que com o aumento da distância bico de contato e peça não ocorreram mais curtos-circuitos, pois mesmo com a gota crescendo bastante, essa gota foi transferida para a poça de fusão antes de toca-la ainda presa ao eletrodo. Observe que o comprimento do *stick-out* não diminui para valores próximos a zero nenhuma vez, tampouco o arco foi extinguido. Assim, com essa mudança no distância entre bico de contato e peça fez com que a transferência metálica ocorresse puramente por voo livre.

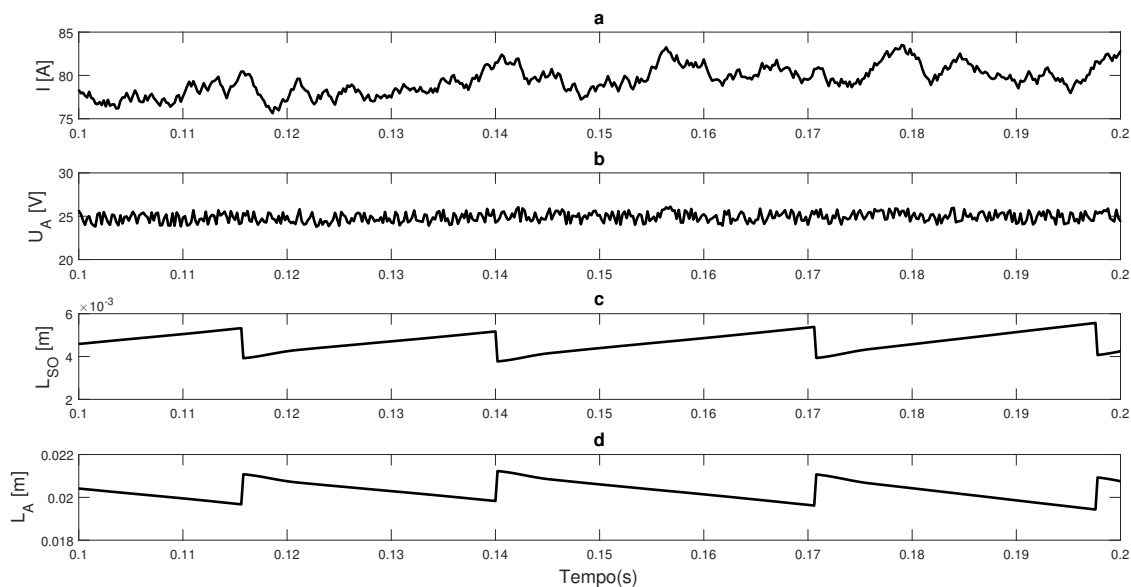


Figura 101: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na distância bico de contato e peça. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

7.3.2 Análise de Sensibilidade Paramétrica do Modelo da Transferência Metálica por Modo Globular/Curto-Circuito Frente à Variações Paramétrica

O primeiro parâmetro variado foi a resistência do arco. Esse parâmetro foi reduzido de $0,1111\Omega$ para $0,022\Omega$ [123]. A Figura 102 mostra essa simulação.

Note, na Figura 102, que essa mudança na resistência do arco fez a corrente de soldagem alcançar valores exorbitantes. Os valores da corrente de soldagem apresentados não condizem com a transferência metálica por curto-circuito. Além disso, note que em alguns momentos o eletrodo é fundido antes mesmo de sair do tocha ($L_{SO} < 0$).

O segundo parâmetro variado foi o campo magnético que foi alterado de $62,0059N/m$ para $400N/m$ [135]. Essa simulação é mostrada na Figura 103.

Note, na Figura 103, que a alteração do campo magnético fez com que a corrente de soldagem se torna-se bem mais amena. A corrente de soldagem predominante ficou em torno de $40A$. As demais dinâmicas não foram afetadas significativamente por esse aumento do campo magnético.

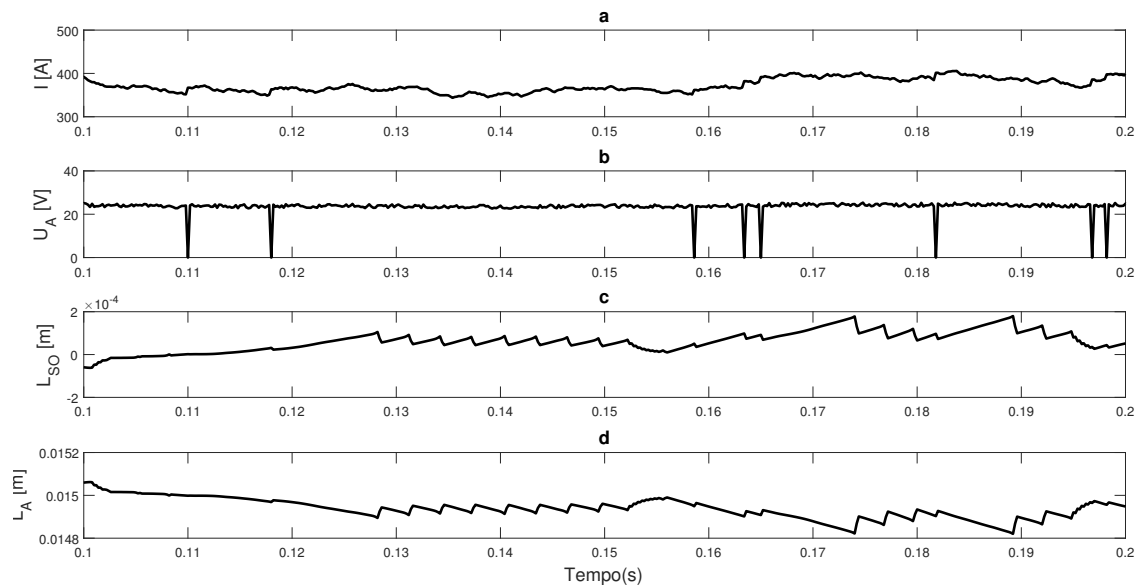


Figura 102: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação no resistência do arco. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

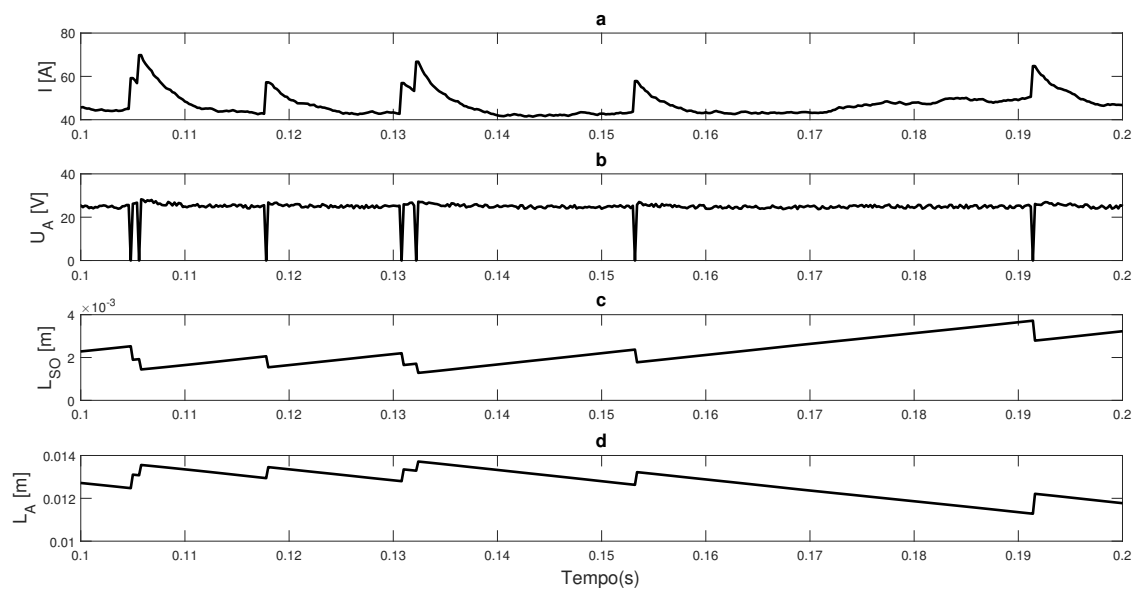


Figura 103: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação no campo magnético. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

O terceiro parâmetro variado foi a indutância da fonte. A indutância da fonte foi variada de $0,35 \times 10^{-3} H$ para $0,35 \times 10^{-4} H$. Essa simulação é mostrada na Figura 104.

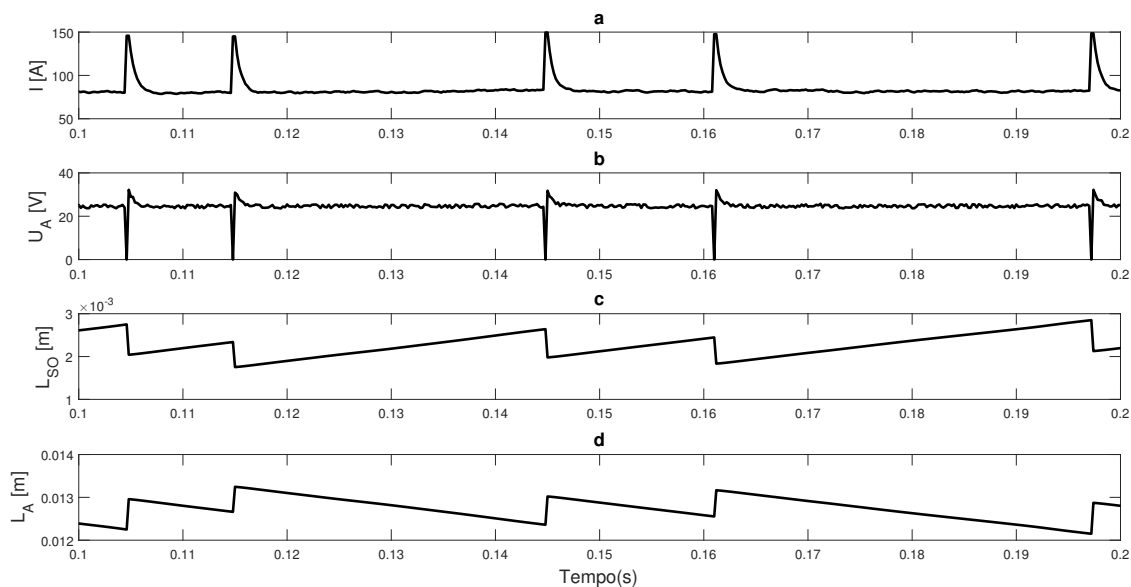


Figura 104: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência mista globular/curto-circuito: com variação na indutância da fonte. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Com a variação da indutância da fonte, pose-se observar claramente que os picos dos curtos-circuitos foram mais elevados. Entretanto, diferentemente do que foi visto experimentalmente nos oscilogramas da transferência mista, não ocorreram os curtos-circuitos de baixa intensidade.

7.3.3 Análise da Influência das Forças nas Dinâmicas da Transferência Metálica por Modo Misto Globular/Curto-Circuito

Assim como foi feito para as demais transferências metálicas, uma série de simulações foram realizadas para verificar quais as forças mais influentes quando ocorre a transferência metálica mista globular/curto-circuito.

Como as dinâmicas do modo globular são dominantes na transferência mista globular/curto-circuito é esperado que as forças dominantes dessa transferência sejam a força da gravidade, força eletromagnética e tensão superficial. De fato, essas foi verificado que essas são as forças mais influentes nesse modo de transferência metálica.

A Figura 105 mostra a simulação considerando apenas as contribuições da força da gravidade, força eletromagnética e da tensão superficial.

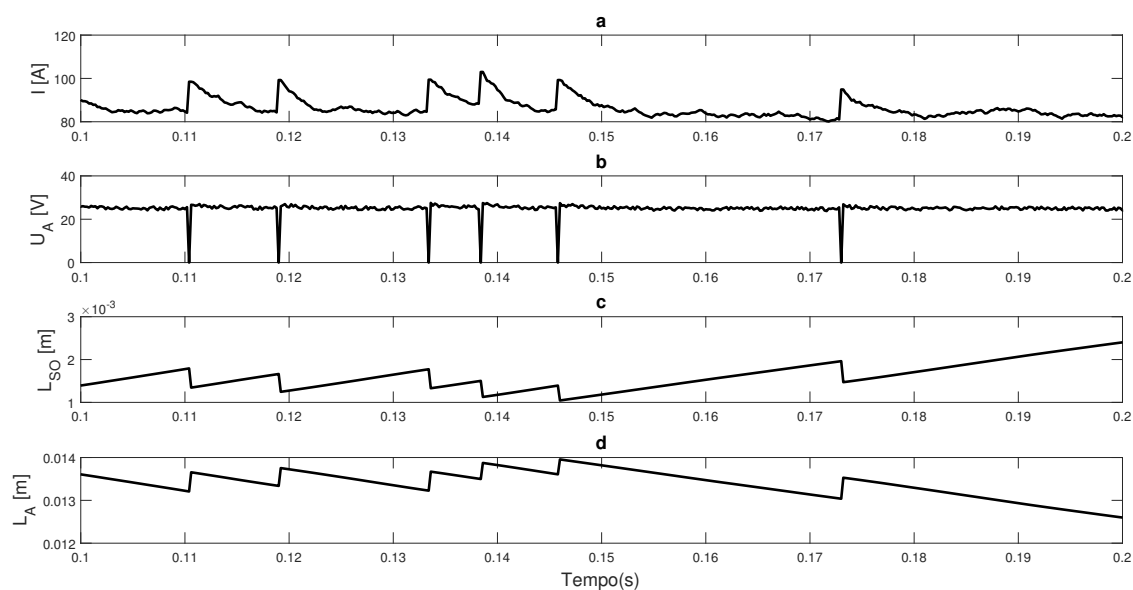


Figura 105: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo misto globular/curto-circuito: sem as contribuições da força eletromagnética, força aerodinâmica e força proveniente do momento. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

Como pode ser observado na Figura 105, mantendo as forças que governam a transferência mista, o mesmo comportamento das dinâmicas foram mantidos, isto é, curtos-circuitos aleatórios e curtos-circuitos ocorrendo antes mesmo da finalização do curto-circuito anterior. Além disso, a corrente de soldagem se manteve na mesma faixa de valores observada na Figura 98.

A segunda simulação, mostrada na Figura 106, mostra as dinâmicas desconsiderando as forças govenantes na transferência mista.

Como pode ser observado na Figura 106, a corrente de soldagem reduziu e não ocorreram curtos-circuitos consecutivos. Embora a transferência metálica observada ainda se aproxime do modo misto globular/curto-circuito, algumas de suas características inerentes não foram observadas.

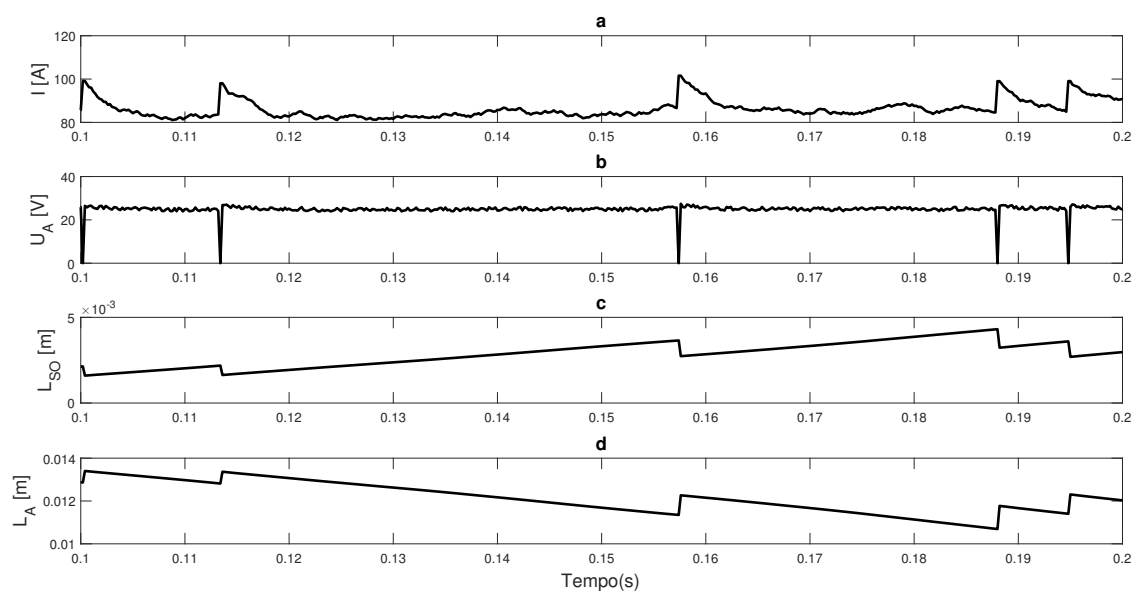


Figura 106: Análise em simulação de algumas dinâmicas do modelo da transferência por modo misto globular/curto-circuito: sem as contribuições da força da gravidade e tensão superficial. (a) Corrente de soldagem, (b) Tensão de arco, (c) Comprimento do *stick-out*, (d) Comprimento do arco.

APÊNDICE G PRODUÇÃO ACADÊMICA

A relação dos trabalhos do autor desta dissertação durante o período de mestrado relacionados à soldagem é mostrado a seguir.

TRABALHOS DIRETAMENTE LIGADOS À ESSA DISSERTAÇÃO

Artigos aceitos para publicação em periódicos indexados:

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoa Lang; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; BOTELHO, Silvia Silda da Costa. **A Non-Linear Coupled-Variables Model for Mass Transfer Modes in MIG-MAG Processes with Experimental Validation**. International Journal of Modelling, Identification and Control. Inderscience Publishers.

Artigos publicados em anais de conferências:

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoa Lang; BOTELHO, Silvia Silda da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **A Comprehensive Model for Miscellaneous Transfer Mass Mode in Gas Metal Arc Welding**. American Control Conference, Seattle, United States of America. 2017.

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoa Lang; BOTELHO, Silvia Silda da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Modelagem das dinâmicas da formação da gota e transferência de massa em processos de soldagem à arco**. XXI Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, Brasil. 2016.

Resumos expandidos publicados em mostras coletivas regionais

PAULA, Débora Debiaze de; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; LEIVAS, Eduardo do Amaral; MÓR, Jusoa Lang; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Projeto de Instrumentação para Medição de Corrente e Tensão em Processos de Soldagem**. CIC XXV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas. 2016.

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; VIZZOTTO, Rafael Andrei; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Modelagem de Processos de Soldagem à Arco**. EPG XVIII Encontro de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil. 2016.

TRABALHOS LIGADOS À ÁREA DE SOLDAGEM

A relação de trabalhos publicados que também integram a literatura da área de soldagem que são indiretamente relacionados a esta dissertação são mostrados a seguir.

Artigos aceitos para publicação em periódicos indexados:

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; ZAFFALON, Renan da Silva; WERHLI, Adriano Velasqui. **Machine vision in gas metal arc welding process: a case study**. Engevista.

Artigos publicados em anais de conferências:

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; ROSA, Rômulo Thiago Silva da; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; BOTELHO, Silvia Silva da Costa. **An Extended Kalman Filter State Estimation-Based Robust MRAC for Linear Welding Robot Motor Control**. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China, 2017.

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; ROSA, Rômulo Thiago Silva da; MÓR, Jusoan Lang; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; BOTELHO, Silvia Silva da Costa. **Velocity Regulation of a Linear Welding Robot by Unscented and Cubature Kalman Filter Output Estimation-Based Sliding Mode Control**. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China, 2017.

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Control of Linear Welding Robot Plant by Pole Placement Control Based on Discrete Kalman Filter**. International Symposium on Industrial Electronics. Edinburgh, Scotland, UK. 2017.

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Feedback Control Based on Estimators – A Performance Comparison Applied on Welding Robot Plant**. International Symposium on Industrial Electronics. Edinburgh, Scotland, UK. 2017.

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; PAULA, Débora Debi-aze de; FERREIRA, Andreyra Sárila Ramos; BOTELHO, Silvia Silva da Costa;

- AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Performance Comparison of Control Strategies Applied on Welding Robot Plant**. International Symposium on Industrial Electronics. Edinburgh, Scotland, UK. 2017.
- EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; BUENO, Munique dal Pupo; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Controle de Velocidade da Trama de um Robô Soldador por RMRAC e Redução dos Ruídos por Filtro de Kalman das Diferenças Centrais**. 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.
- EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; BUENO, Munique dal Pupo; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **RMRAC Aplicado ao Controle de Velocidade de um Sistema de Soldagem Robótico com Redução de Ruídos por Filtro de Kalman Estendido**. 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.
- EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; BUENO, Munique dal Pupo; PAULA, Débora Debiaze de; SCHNEIDER, Fernando da Fonseca; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Controle PID Incremental Aplicado à Regulação de Posicionamento do Módulo de Costura do Bug-O MDS 1005 e Atenuação de Ruídos por Filtro de Variáveis de Estados**. 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.
- EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; MÓR, Jusoan Lang; BUENO, Munique dal Pupo; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Controle por Estrutura Variável Aplicado à Regulação de Velocidade de um Sistema de Soldagem Robótico com Duas Abordagens de Atenuação de Ruídos Filtro de Kalman Unscented e Filtro de Kalman Cubatura**. 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.
- EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; MÓR, Jusoan Lang; BUENO, Munique dal Pupo; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Controle por Estrutura Variável Aplicado ao Controle da Costura de um Robô Soldador Combinado com Filtro de Kalman Gauss-Hermite**. 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.
- EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; BUENO, Munique dal Pupo; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Controle por Modos Deslizantes Baseado no Método do Controle Equivalente Aplicado à Regulação de Velocidade do Módulo Tractor e**

Controle de Posição do Módulo Weaver do Bug-O MDS 1005. 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.

FERREIRA, Andreyana Sárila Ramos; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; ROSA, SCHNEIDER, Fernando da Fonseca; Rômulo Thiago da Silva; BUENO, Munique dal Pupo; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Projeto e Implementação Experimental de um Controlador PI para Atuação na Malha de Velocidade de Deslocamento de um Robô Soldador.** 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.

FERREIRA, Andreyana Sárila Ramos; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; BUENO, Munique dal Pupo; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Rastreador Linear Quadrático Gaussiano Aplicado na Malha de Velocidade de Costura de um Robô de Soldagem Linear.** 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.

MÓR, Jusoan Lang; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; FERREIRA, Andreyana Sárila Ramos; SCHNEIDER, Fernando da Fonseca; PAULA, Débora Debiaze de; BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Modelagem e Controle de Velocidade de um Robô Soldador.** 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.

PAULA, Débora Debiaze de; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; SCHNEIDER, Fernando da Fonseca; BUENO, Munique dal Pupo; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Controle de Posição de um Robô Soldador por Controle por Realimentação de Estados Baseado em Alocação de Polos com Tratamento de Ruídos por um Filtro de Variáveis de Estado.** 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.

SCHNEIDER, Fernando da Fonseca; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; MÓR, Jusoan Lang; ROSA, Rômulo Thiago da Silva; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; **Controle de Posição para os Módulos de Costura e Deslocamento de um Robô Soldador - Simulação e Prática.** 10th Symposium on Power Electronics and Control, Santa Maria, Brasil, 2017.

MÓR, Jusoan Lang; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; PAULA, Débora Debiaze de; FERREIRA, Andreyana Sárila Ramos; BOTELHO, ROSA, Rômulo Thiago da Silva; Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir; DREWS JUNIOR, Paulo Lilles Jorge. **Regulação de Velocidade de um Robô Soldador com Controle Robusto Adaptativo por Modelo de Referência.** Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Porto Alegre, Brasil, 2017.

MÓR, Jusoan Lang; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; STEFFENS, Cristiano Rafael, LEONARDO, Bruno Quaresma, BOTELHO, Silvia Silva da Costa; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Uma contribuição para o controle de velocidade de um robô soldador**. XXI Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, Brasil. 2016.

WEISS, Atila A.; MÓR, Jusoan L.; SOARES, Luciane B.; STEFFENS, Cristiano R., DREWS-JR, Paulo L. J.; FARIA, Matheus F. de; EVALD, Paulo J. D. O.; AZZOLIN, Rodrigo Z.; FILHO, Nelson D. e BOTELHO, Silvia S. da C. **Automated Seam Tracking System based on Passive Monocular Vision for Automated Linear Robotic Welding Process**. 15th International Conference of Industrial Informatics. Emden, Germany. 2017.

Resumos expandidos publicados em mostras coletivas regionais

SCHNEIDER, Fernando da F.; EVALD, Paulo J.D.O.; MÓR, Jusoan L.; ROSA, Rômulo T.S.; PAULA, Débora D. de; AZZOLIN, Rodrigo Z. **Influência da não linearidade de folga no desempenho de um robô soldador**. XXVI Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

FERREIRA, Andreyana S.R.; EVALD, Paulo J.D.O.; MÓR, Jusoan L.; ROSA, Rômulo T.S.; PAULA, Débora D. de; AZZOLIN, Rodrigo Z. **Rastreador linear quadrático aplicado ao controle de deslocamento de um robô soldador**. XXVI Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

PEREIRA, Lucas C.M.; STEFFENS, Cristiano R.; ROSA, Rômulo T.S.; EVALD, Paulo J.D.O.; MÓR, Jusoan L.; ROSA, Vagner S.; **Sistema digital embarcado para automatização de robô de solda linear**. XXVI Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

FERREIRA, Andreyana S.R.; MÓR, Jusoan L.; EVALD, Paulo J.D.O.; ROSA, Rômulo T.S.; PAULA, Débora D. de; SCHNEIDER, Fernando da F.; BOTELHO, Silvia S.C. AZZOLIN, Rodrigo Z. **Controlador PI aplicado ao ajuste de velocidade de um sistema de costura em soldagem robótica**. XVI Mostra de Produção Universitária da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil. 2017.

SCHNEIDER, Fernando da F.; MÓR, Jusoan L.; EVALD, Paulo J.D.O.; ROSA, Rômulo T.S.; PAULA, Débora D. de; FERREIRA, Andreyana S.R.; BOTELHO, Silvia S.C.; AZZOLIN, Rodrigo Z. **Controlador proporcional aplicado ao controle de posição de um robô soldador com inserção de integrador na planta experimentalmente identificada**. XVI Mostra de Produção Universitária da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil. 2017.

PAULA, Débora D.de; EVALD, Paulo J.D.O.; MÓR, Jusoan L.; FERREIRA, Andreyana S.R.; SCHNEIDER, Fernando da F.; ROSA, Rômulo T.S.; BOTELHO, Silvia S.C. AZZOLIN, Rodrigo Z. **Projeto e simulação de um regulador de velocidade para um robô soldador com controle por alocação de polos**. XVI Mostra de Produção Universitária da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil. 2017.

SILVA, Renan Zafalon da; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; WERHLI, Adriano Velasque. **Revisão e projeto de visão computacional para análise do comportamento dinâmico de diversas variáveis inerentes à transferência metálica em processos de soldagem GMAW e FCAW**. ENPOS XVIII Encontro de pós-graduação da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil. 2016.

PAULA, Débora Debiaze de; FERREIRA, Andreyana Sárila Ramos; LEIVAS, Eduardo do Amaral; MÓR, Jusoan Lang; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Interface Digital para Controle Remoto de um Equipamento de Soldagem GMAW**. CIC XXV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil. 2016.

VIZZOTTO, Rafael Andrei; EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira; AZZOLIN, Rodrigo Zelir. **Utilização da ferramenta QFD para análise de equipamentos robotizados para soldagem em posição linear**. CIC XXV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil. 2016.

Sobre os eventos:

Sigla	Conferência	Qualis	H-Index
ACC	American Control Conference	—	43
IECON	Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society	B1	48
INDIN	IEEE International Conference on Industrial Informatics	B1	20
ISIE	IEEE International Symposium on Industrial Electronics	B2	20
LARS	Latin American Robotics Symposium	B3	—
SEPOC	Seminar on Power Electronics and Control	—	—
SBAI	Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente	B5	—
CBA	Congresso Brasileiro de Automática	—	—
EPG	Encontro de Pós-Graduação (FURG)	—	—
ENPOS	Encontro de Pós-graduação (UFPel)	—	—
MPU	Mostra de Produção Universitária (FURG)	—	—
CIC	Congresso de Iniciação Científica (UFPel)	—	—

Sobre os periódicos:

Periódico	Qualis	H-Index
International Journal of Modelling, Identification and Control	–	16
Engevista	–	6

Anexos

ANEXO A TERMINOLOGIA DA SOLDAGEM

Abertura de raiz: Menor distância que separa as peças a serem unidas;

Acetileno: Gás combustível composto por Carbono e Hidrogênio usada na soldagem e oxicorte;

Alma do eletrodo: Núcleo metálico de um eletrodo revestido;

Alicate porta eletrodo Dispositivo mecânico utilizado na condução de corrente elétrica durante a soldagem;

Ângulo de condução: Ângulo influenciado pelo raio do eletrodo e a corrente de soldagem que define a zona de condução;

Ângulo de soldagem: Ângulo entre o eixo do arco e a vertical, assumindo que a vertical é perpendicular ao eixo do arco;

Aporte de calor: Quantidade de calor transferida ao metal base por unidade de comprimento do cordão de solda;

Arco elétrico: Feixe de descargas elétricas formadas entre dois eletrodos e mantidas pela formação de um meio condutor gasoso chamado plasma;

Bico de contato: Componente metálico da tocha ou pistola por onde passa o eletrodo consumível, com função de conduzir a corrente elétrica energizando o eletrodo;

Bocal da tocha: Componente metálico instalado na extremidade da tocha, que tem a função de conduzir o fluxo de gás de proteção da solda.

Chanfro: Corte feito na junta para depositar a solda;

Cordão de solda: Volume de massa depositado no metal base através de um ou mais passes de solda;

Eletrodo revestido: Eletrodo metálico consumível revestido por compostos orgânicos e/ou minerais;

Eletrodo de Tungstênio: Eletrodo metálico não consumível usado em soldagem ou corte a arco elétrico, composto principalmente por Tungstênio;

Eletrodo tubular: Eletrodo metálico consumível que contém internamente compostos químicos que formam uma atmosfera protetora da solda, podendo ser utilizado proteção externa ou não;

Escória: Resíduo não metálico proveniente da dissolução do fluxo ou revestimento e impurezas não metálicas na soldagem;

Face da solda: Superfície oposta à raiz da solda;

Gás de Proteção: Gás ou composição de gases que foram a atmosfera protetora do arco elétrico e da solda para evitar contaminação proveniente de fatores externos;

Gás ativo: Gás ou composição de gases que foram a atmosfera protetora do arco elétrico e da solda, além de participar metalurgicamente da poça de fusão;

Gás inerte: Gás ou composição de gases que foram a atmosfera protetora do arco elétrico e da solda, porém não participa metalurgicamente da poça de fusão;

Junta: Região onde as peças serão unidas por soldagem;

Metal de adição: Metal adicionado na junta durante a soldagem;

Metal base: Peça de metal a ser soldada ou cortada;

Passe de acabamento: Passes superficiais para dar a aparência ao cordão de solda;

Passe de enchimento: Passes de enchimento do chanfro;

Passe de raiz: Passe mais profundo no chanfro;

Peça de trabalho: É o metal base;

Penetração da solda: Profundidade da solda medida entre a extremidade superior (face da solda) e a extremidade mais profunda da solda;

Poça de fusão: Volume de metal em estado líquido proveniente do metal de adição e do metal base antes da solidificação da solda;

Polaridade direta: Tipo de ligação para soldagem com corrente contínua, onde os elétrons deslocam-se do eletrodo para a peça. Nessa ligação, a peça é considerada como o polo positivo e o eletrodo como polo negativo;

Polaridade reversa: Tipo de ligação para soldagem com corrente contínua, onde os elétrons deslocam-se do eletrodo para a peça. Nessa ligação, a peça é considerada como polo negativo e o eletrodo como polo positivo;

Raiz: Região mais profunda do cordão de solda;

Reforço de solda: Metal de solda em excesso;

Solda: Resultado do processo de soldagem;

Soldagem: União de metais ou não-metais resultante de pressão ou do aquecimento dos materiais com ou sem aplicação de pressão e com ou sem utilização de metal de adição, além da participação ou não dos gases de proteção;

Taxa de deposição: Peso de material depositado por unidade de tempo;

Velocidade de alimentação do arame: Velocidade cujo arame é alimentado para a poça de fusão;

Velocidade de soldagem: Velocidade de deslocamento da poça de fusão durante o processo de soldagem;

Vôo livre: Modo de transferência metálica que ocorre no processo GMAW sem curto-circuito;

Zona termicamente afetada: Região do metal base que não foi fundida, mas cujas propriedades mecânicas e microestruturas foram alteradas devido à geração de calor do processo o qual o metal base foi submetido;

Zona de fusão: Região do metal base que sofre fusão durante o processo de soldagem.

ANEXO B INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE OS EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM

Neste Anexo são dadas informações adicionais sobre os equipamentos de soldagem, bem como do robô BUG-O MDS. Uma breve descrição de cada equipamento é dada e apontado sua localização no *hardware*.

B.1 Equipamento de Soldagem

À seguir são dadas as informações adicionais sobre os equipamentos de soldagem.

B.1.1 Fonte de Energia *Flextec 450*

Algumas características interessantes coletadas do manual do operador desse equipamento são: o alto fator de potência (0,95) e rendimento superior a 85%. Além disso, esse equipamento possui ventilação por demanda, ou seja, o dispositivo de resfriamento é acionado assim que o equipamento inicia o processo de soldagem e permanece ligado por mais 5 minutos após o término da soldagem, para garantir seu resfriamento.

A proteção térmica é dada por termostatos e a proteção de sobrecorrente é dada por um circuito de potência dedicado à impedir esse problema. Além disso, esse equipamento possui grau de proteção IP23, o que permite sua operação e armazenamento em áreas externas. Em relação ao tempo de operação, seu *duty cycle* é de 60%.

A interface desse equipamento pode ser vista na Figura 107.

1. Amperímetro digital: *display* digital que fornece a corrente de soldagem atual;
2. Potenciômetro de controle de saída: controla o valor de corrente na saída. Caso o controle remoto esteja selecionado, esse controle configura a máxima corrente de soldagem do dispositivo remoto;
3. Seletor de processo de soldagem;



Figura 107: Interface da fonte de energia *Flextec* 450

4. *Hot Start*: regula a corrente no início do processo de soldagem;
5. Seletor de controle local/remoto: seletor responsável pela escolha do controle no modo local ou modo remoto;
6. Voltímetro digital: *display* digital que fornece a tensão de soldagem atual;
7. Alças de transporte: alças destinadas a facilitar o transporte do equipamento;
8. Chave liga/desliga geral: seletor responsável por ligar e desligar a máquina;
9. Controle de força do arco: esse controle possibilita limitar a tensão máxima do arco;
10. Chave liga/desliga dos terminais de saída: seletor responsável por ligar e desligar os terminais de saída;

Na parte fechada da interface frontal da fonte de alimentação, localizada imediatamente abaixo da interface ilustrada anteriormente e mostrada na Figura 108, têm-se:

11. Terminais de saída de solda: terminais positivo e negativo de saída;
12. Fusível: é o *circuit break* da fonte;
13. Chave de polaridade do *display*: chave responsável pela escolha da polaridade adequada do voltímetro;
14. Conexão do cabo de controle do alimentador de arame: receptáculo do cabo do alimentador de arame;
15. Conexão do controle remoto: receptáculo do cabo do controle remoto.

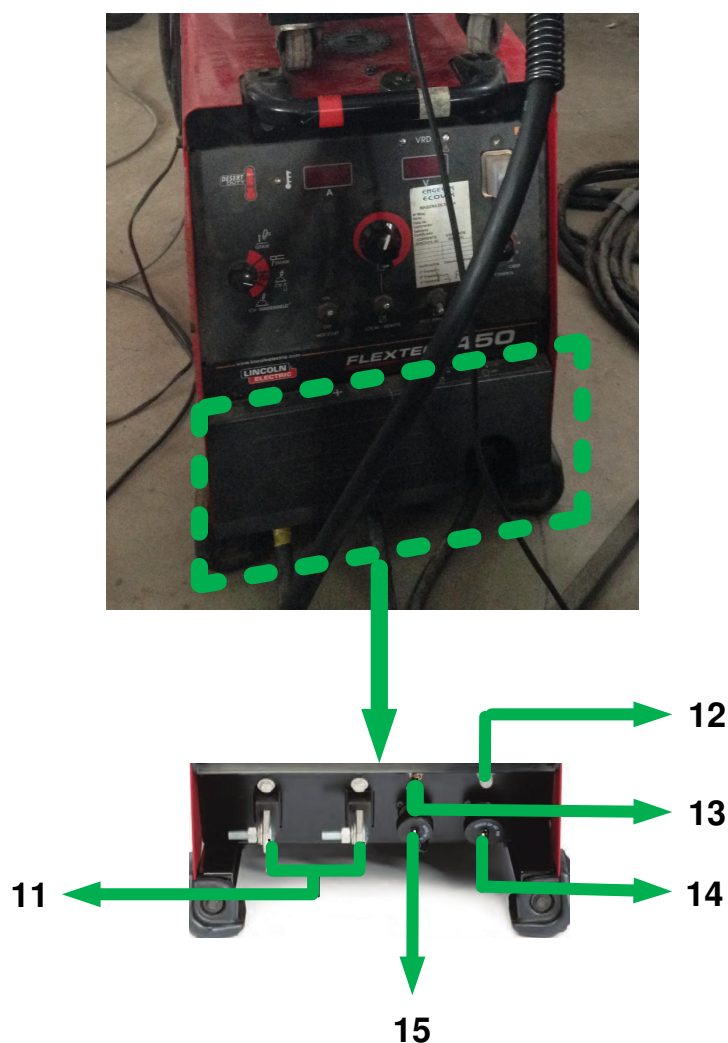


Figura 108: Interface fechada da fonte de energia *Flextec* 450

B.1.2 Alimentador de Arames LF-33

Assim como a *Flextec* 450, o LF-33 também possui grau de proteção IP23 e *duty cycle* de 60%. A interface frontal do LF-33 é mostrado na Figura 109.

1. Amperímetro digital: *display* digital da corrente de soldura atual;
2. Botão de controle WFS: permite controle da velocidade de alimentação do arame com resolução de $0,1m/min$ em um intervalo de $1,0m/min$ a $20m/min$;
3. Interruptor local/remoto: tem a finalidade de alternar o controle da tensão de saída pelo controle de saída da alimentação do arame para a unidade de controle remoto e vice-versa;
4. Acoplamento de conectores rápidos: necessário para tochas com aferrecimento a água;

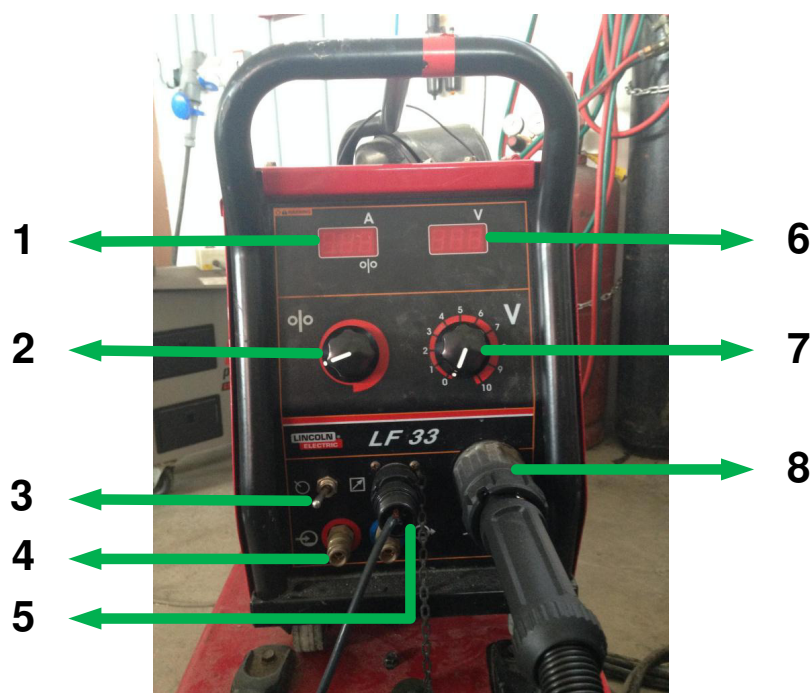


Figura 109: Interface frontal do alimentador de arames LF-33

- 5. Receptáculo do controle remoto: receptor do cabo do controle remoto;
- 6. Voltímetro digital: *display* digital da tensão de soldura atual;
- 7. Botão de controle da tensão de saída: ativa o controle contínuo da tensão de saída;
- 8. *EURO Socket*: é a conexão da tocha de soldagem.

Na parte traseira têm-se as conexões, conforme ilustrado na Figura 110.

- 9. Conector de *Amphenol*: conexão de 8 pinos para fonte de potência;
- 10. Conector de gás: conexão para a linha de gás;
- 11. Adaptador *Fast-Mate*: conector de potência de entrada;
- 12. Acoplamento de conectores rápidos: conector das linhas de água do refrigerador.

O painel de ajustes é mostrado na Figura 111.

- 13. Interruptor do modo de tocha: ativa a seleção do modo de tocha;
- 14. Interruptor *Cold-Inch/Gas Purge*: ativa o fio de alimentação ou fluxo de gás sem ligar tensão de saída;



Figura 110: Interface traseira do alimentador de arames LF-33



Figura 111: Painel de ajustes do alimentador de arames LF-33

15. Botão de controle de velocidade lenta do alimentador de arame: permite ajuste fino da velocidade de alimentação do arame antes de iniciar a soldagem, em um intervalo de 0,1 a 1,0 do valor pré-estabelecido no botão de controle WFS;
16. Botão do controle do tempo de *Bumback*: este botão permite o controle do tempo em que o eletrodo continuará a ser alimentado após o fim do processo de soldagem, para que haja arame na ponta da tocha para o início do próximo processo de soldagem em um intervalo de 8ms a 250ms.

O interior do alimentador é mostrado na Figura 112.

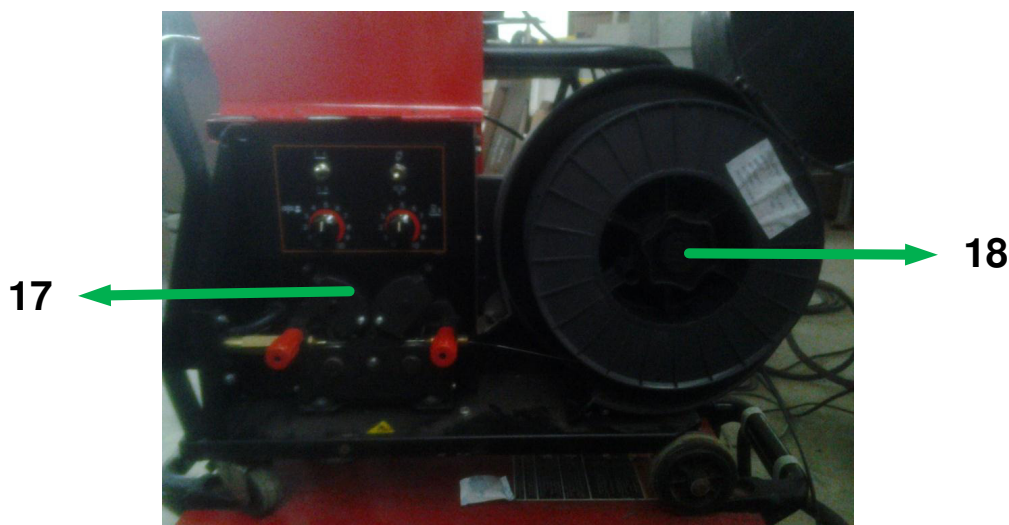


Figura 112: Interior do alimentador de arames LF-33

17. *Drive* de arame: esse *drive* de arame é de 4 roletes e é compatível com *drive* de roletes de $37mm$;
18. Suporte da bobina de arame: o suporte de bobina admite uma bobina de máximo $15kg$, podendo ser de plástico ou fibra para eixos de $51mm$.

B.2 Robô BUG-O MDS

Algumas características dos módulos do robô são discutidas a seguir.

B.2.1 Unidade de Acionamento Mestre MPD-1002

A unidade de acionamento mestre (*master drive unit*), também chamada de *tractor*, é responsável pela partida e movimentação do robô. Nessa unidade estão alocados o motor, placa de controle de velocidade, fonte de alimentação e embreagem. A Figura 113 mostra esse equipamento.

Essa unidade possui alto torque e baixa inércia do motor, o que permite partida e frenagem com precisão. A velocidade de viagem é de 2 à $120in/min$ ou 51 à $3048mm/min$, com capacidade de carga vertical de $27kg$ e capacidade de carga horizontal de $45kg$. Possui também um sistema de frenagem dedicado para casos de falha, bem como proteção de sobrecarga do motor, que desliga o motor se detectar carga excessiva. Além disso, possui controle em malha fechada para ajustar a velocidade e posição do robô em caso de aplicações repetitivas. As funções da unidade de acionamento mestre são mostrados na Figura 114 e enunciadas a seguir.



Figura 113: Unidade de acionamento mestre adaptado do Manual de instruções e manual de partes do BUG-O System

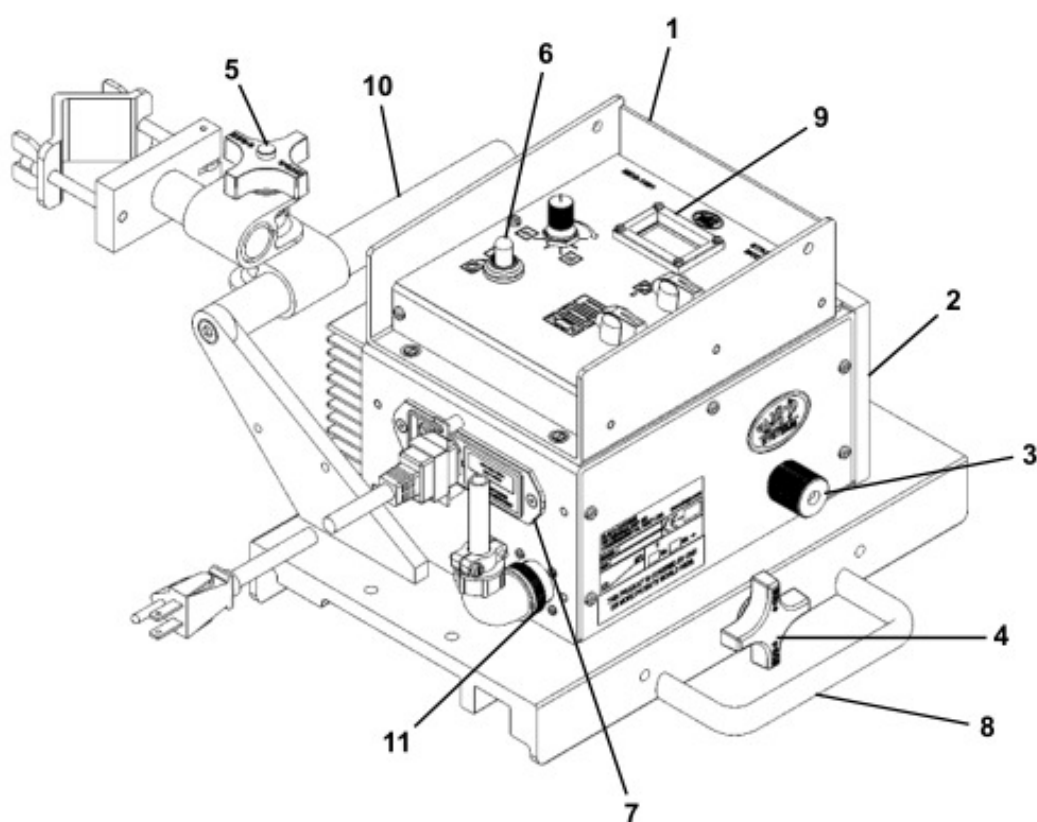


Figura 114: Esquema da unidade de acionamento mestre adaptado do Manual de instruções e manual de partes do BUG-O System

1. Módulo de controle: utilizado para controle dos parâmetros do robô;
2. Módulo de energia mestre: utilizado pelo usuário para reconfigurar o robô para diferentes aplicações;
3. Embreagem: permite o reposicionamento manual do transportador no trilho;
4. Botão de engajamento de rodas: permite o posicionamento do transportador em qualquer lugar do trilho;
5. Barra de montagem opcional com cabo de fixação: para manter os cabos de soldagem e os fios de contato afastados da superfície de trabalho.
6. Contato de liga/desliga;
7. Caixa de entrada do acionamento: onde está incluído o contato de ligar e desligar a máquina, bem como fusível de entrada de energia e o conector do cabo de alimentação;
8. Alça de transporte padrão: utilizado para transporte do equipamento;
9. Leitor de velocidade digital: *display* da velocidade de soldagem;
10. Alça de transporte opcional e barra de montagem;
11. Receptor remoto do contator de soldagem.

B.2.2 Módulo de Controle MDS-1005

O módulo de controle (*Weaver Control Module*) MDS-1005 regula a velocidade de viagem, sentido do *tractor*, ajuste da largura de tecimento (de 3 à 50mm) e da velocidade de tecimento. Além disso, permite selecionar o modo de tecelagem e a direção de pausa. A Figura 115 mostra esse controle.

Na Figura 115 são apontadas as funções de 1 à 11. Essas funções são descritas logo à seguir.

1. Altera a velocidade de deslocamento do robô;
2. Altera o tempo que o *weaver* fica parado no extremo esquerdo do trilho;
3. Altera a velocidade de deslocamento do *tractor*;
4. Chave que ativa/desativa o *tractor*;
5. *Display* que fornece a velocidade do *tractor*;



Figura 115: Módulo de Controle MDS-1005

- 6. Controle de movimento do *weaver*;
- 7. Altera o modo de tecimento;
- 8. Altera a amplitude do movimento do *weaver*;
- 9. Altera o tempo que o *weaver* fica parado no extremo direito do trilho;
- 10. Altera o sentido de movimento do *tractor*;
- 11. Chave que ativa/desativa a tocha.

B.2.3 Módulo de Controle Linear WPD-1100

O módulo de controle linear (*Linear Weaver*) WPD-1100 possui um motor com alto toque e baixa inércia, o que permite a precisão na partida e na frenagem do robô. Também possui controle independente para pausa à esquerda e a direita e controle em malha fechada da velocidade e posicionamento do robô. Além disso, permite o ajuste da tocha na posição desejada e possui proteção para sobrecarga.

ANEXO C *LINKS PARA OS DATASHEETS DOS HARDWARES*

Este anexo tem a finalidade de expor os meios de acesso aos *datasheets* ou informações pertinentes de todos os equipamentos utilizados, componentes eletrônicos necessários para construção do sistema de aquisição, além dos módulos do robô, máquina de solda e microcontrolador.

Datasheets da máquina de solda:

- *FlexTec 450* – <https://www.lincolnelectric.com/assets/servicenavigator-public/lincoln3/IM10062.pdf>
- *Linc Feed 33* – <http://servicenavigator.lincolnelectric.eu/files/docs/580.pdf>

Datasheets dos módulos do robô:

- *Master Drive Unit MPD-1002* – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/MDS_ipm_2_15_1423511987.pdf
- *Linear Weaver WPD-1100* – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/MDS_ipm_2_15_1423511987.pdf
- *Weaver Control Module MDS-1005* – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/MDS_ipm_2_15_1423511987.pdf
- *Automatic Height Control CAS-2050* – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/SpinArc_Bro_7_16_1468256221.pdf

- *Contact Tip* **WRT-403-20-075** – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/SpinArc_Bro_7_16_1468256221.pdf
- *Gas Nozzle* **WRT-401-4-75** – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/SpinArc_Bro_7_16_1468256221.pdf
- *Wire Liner* **WRT-415-116-10** – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/SpinArc_Bro_7_16_1468256221.pdf
- *Control Cables* **WRT-CC-15** – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/SpinArc_Bro_7_16_1468256221.pdf
- *Hi-Flex Rail* **FMD-2155** – http://www.bugo.com/administrator/files/downloadables/Rails_Att_Bro_3_15_1426597331.pdf

Datasheets dos transdutores e encoder do sensor de velocidade:

- **LEM DVL 250** – <http://www.lem.com/docs/products/dvl>
- **LEM HTR 500-SB** – <http://www.lem.com/docs/products/htr>
- *Encoder S&E E30 A1 A200 P-P* – <http://www.seinstrumentos.com.br/pdf/cat-encoders.pdf>
- **IMC SAP 4.0** – http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/manual_sap_v40.pdf

Datasheet do microcontrolador:

- *Arduino Due* – <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue>

Datasheets dos componentes eletrônicos e circuitos integrados utilizados na construção da fonte simétrica de alimentação:

- *Rectifier Bridge* – <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/58685/DCCOM/RS507.html>
- *Terminal Positive Regulators* – <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/85508/ETC/LM7812.html>
- *Terminal Negative Regulators* – <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/9045/NSC/LM7912.html>

Datasheets dos equipamentos auxiliares utilizados em ensaios de calibração:

- *Tektronix* **TDS2012B** – <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/TEKTRONIX-TDS2012B-Datasheet.pdf>
- *Minipa* **ET-1002** – <http://www.minipa.com.br/Content/Manuais/ET-1002-1103-BR.pdf>
- *Minipa* **MPC-3003** – <http://www.minipa.com.br/Content/Manuais/E2T3V2Z4-MPC-3003-3005-1101-BR.pdf>
- *Instrutherm* **FA-2030** – http://www.instrutherm.com.br/instrutherm/product.asp?template_id=60&old_template_id=60&partner_id=&tu=b&dept_id=2140&pf_id=03257&nome=Fonte+de+Alimenta
- *TransPuls Synergic* **5000 MV** – http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-CC077C00-3C3521C0/fronius_international/hs.xsl/79_5305_ENG_HTML.htm#.V5Jt56JY-7M
- *Hikari* **HA-3700** – <http://www.lojaraisa.com.br/alicat-amperimetro-digital-hikari-ha-3700.html#>

ANEXO D IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DO ALIMENTADOR DE ARAMES

Neste anexo é comentado de forma breve a identificação dos parâmetros do motor do alimentador de arame, pois essas informações estão disponíveis no trabalho [198].

A tensão do motor do alimentador de arame e sua velocidade foram coletadas com o sistema de mensuração montado. Para redução dos ruídos foi implementado um Filtro de Variáveis de Estado (SVF – *State Variable Filter*).

Os valores dos parâmetros de constante de tempo do motor e ganho em regime permanente foram estimados através de um algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (RLS – *Recursive Least Square*) sobre os dados obtidos experimentalmente.

A Figura 116 mostra a mensuração de tensão do motor de alimentação e da alimentação de arame obtida com a filtragem do SVF. Já na Figura 117 é mostrado a comparação entre a velocidade obtida pela primeira derivada do SVF e pelo algoritmo preditor RLS.

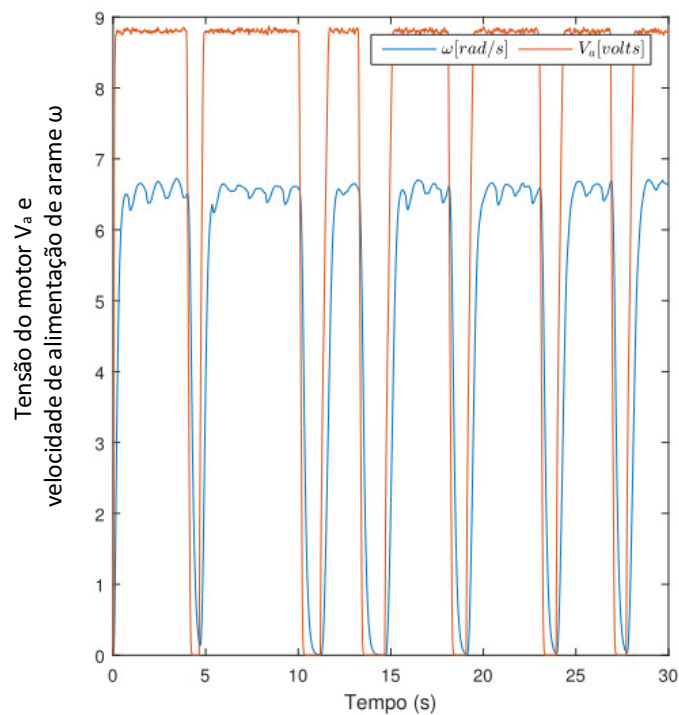


Figura 116: Mensuração da tensão do motor do alimentador de arame V_a e velocidade estimada da alimentação de arame ω obtida com SVF, adaptado de [198]

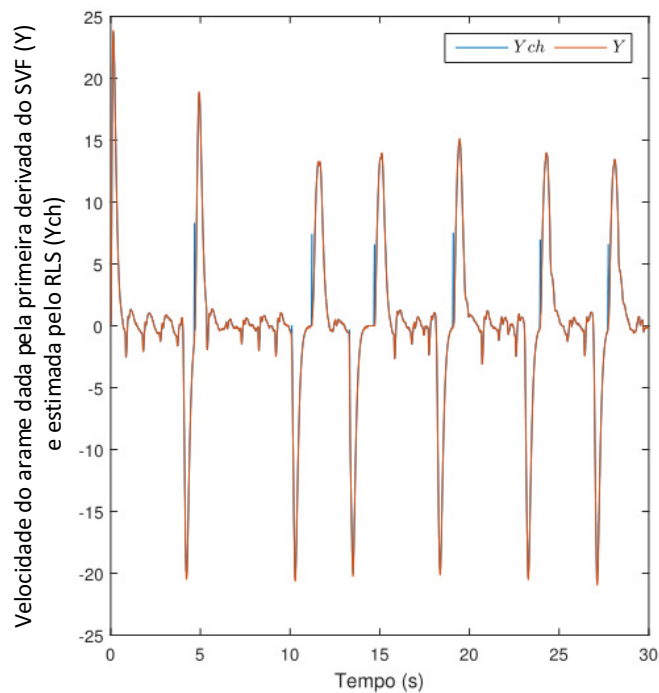


Figura 117: Velocidade do arame dada pela primeira derivada do SVF (Y) e estimada pelo RLS (Y_{ch}), adaptado de [198]

A convergência dos parâmetros estimados é mostrada na Figura 118.

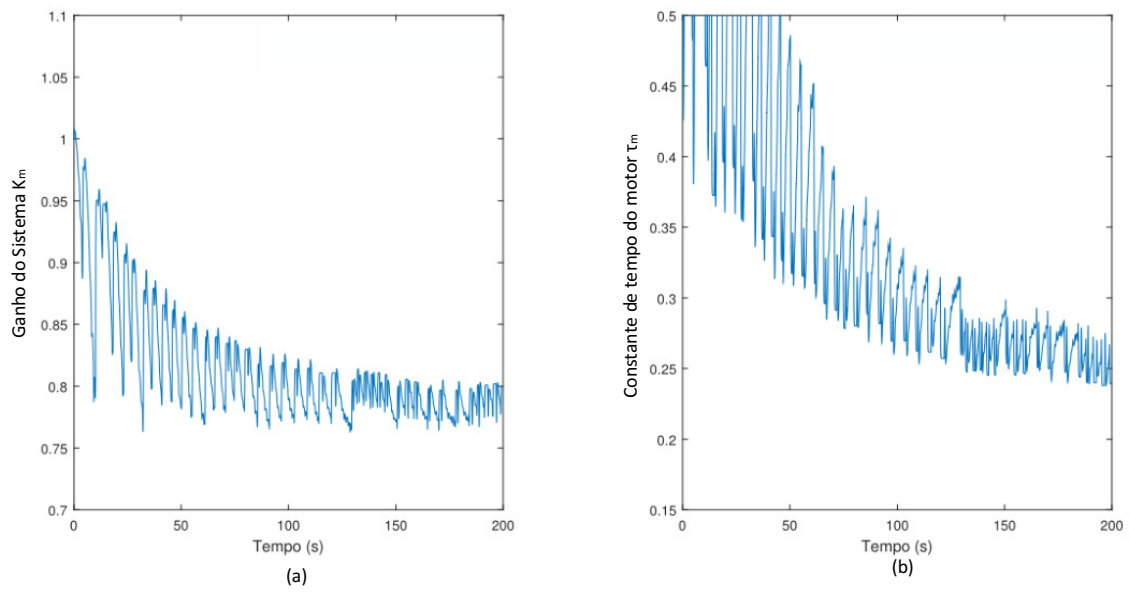


Figura 118: Convergência dos parâmetros estimados (K_m – ganho do motor e τ_m – constante de tempo do motor, à esquerda e à direita, respectivamente) pelo RLS, adaptado de [198]

Assim, os parâmetros estimados foram:

$$K_m = 0,75 \text{ [m/(Vs)]} \quad (115)$$

e

$$\tau_m = 0,248 \text{ [s]} \quad (116)$$