

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

NOVOS MÉTODOS DE CONTROLE DA SOLDAGEM MIG/MAG.

Tese submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
para a obtenção do grau de
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAUL GOHR JÚNIOR

Florianópolis, setembro de 2002

À minha esposa, Renata.
Aos meus pais, Marly e Raul.
À minha Avó Paulina e à tia Nelly.
Aos meus Irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, que além de um orientador e amigo, sempre será um desbravador e verdadeiro mestre.

Ao Eng. Larry Fiori Ollé, um grande amigo e mestre, incansável (*In memorium*).

Aos Engenheiros, Carlos E. I. Baixo, Erwin Teichmann, Moisés Alves de Oliveira, Victor Vergara, Carlos E. Broering e Paulo Armanini pela amizade e colaboração em diversos aspectos do trabalho.

A toda equipe do LABSOLDA, que é um verdadeiro time no campo da tecnologia da soldagem, em especial à Denise Donin, Pablo Arruda, Valério Quadros, Jean Vieira e Tiago Cunha.

Ao povo brasileiro, que apesar da adversidade e da dificuldade constrói este país e, ainda, colabora para o desenvolvimento tecnológico.

Ao CNPq por conceder a bolsa de Doutorado.

Ao curso de pós-graduação de engenharia mecânica de Santa Catarina, por me aceitar como aluno de tão renomada instituição.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xiv
SIMBOLOGIA	xv
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - SÍNTESE DE INFORMAÇÕES ANCORAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	6
2.1 - O Processo MIG/MAG	6
2.1.1 - O Processo MIG/MAG Convencional	11
2.1.2 - O Processo MIG/MAG Pulsado	15
2.1.3 - O Processo MIG/MAG com Duplo-Arame	20
2.1.4 – O Processo MIG/MAG com Corrente Alternada (CA)	23
2.1.5 – O Processo MIG/MAG Aplicado na Recuperação de Turbinas de Hidrelétrica	28
2.2 - O Processo TIG pulsado	30
2.3 - Sistema de Aquisição de Dados	32
2.4 - Controle Micro-Processado	41
2.5 - Fontes de Soldagem para o processo MIG/MAG	43
2.5.1 – Fontes de Soldagem Transistorizadas Analógicas	43
2.5.2 – Fontes de Soldagem Transistorizadas Chaveadas.	44
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 – Infra-estrutura.	51
3.1.1 - Sistema de Aquisição de Dados	51
3.1.2 - Plataforma de desenvolvimento de Controle Micro-Processado	53
3.1.3 - Fontes de Soldagem	57
3.1.4 - Equipamentos e instrumentos de apoio.	60
3.2 - Estratégia para Determinação da Viabilidade de Implementação das Modalidades Propostas através de Controle Micro-Processado	61

4 - RESULTADOS E ANÁLISE	63
4.1 - Engenharia de "Software"	63
4.2 – MIG/MAG Convencional	66
4.2.1 - Análise e modelagem da resposta dinâmica da corrente em uma fonte convencional.	66
4.2.2 - Desenvolvimento de um algoritmo de controle.	67
4.2.3 - Desenvolvimento de um circuito de simulação de arco.	69
4.2.4 - Ensaio prático	73
4.3 – MIG/MAG PULSADO normal	75
4.3.1 - Análise do comportamento do arco impondo corrente pulsada com controle da velocidade de arame .	76
4.3.2 - Desenvolvimento de um algoritmo de controle.	76
4.3.3 - Ensaio prático.	77
4.4 – MIG/MAG PULSADO com Pulsação Térmica	80
4.4.1 - Implementação da forma de onda para pulsação térmica.	81
4.4.2 - Influência da resposta dinâmica da velocidade de arame	82
4.4.3 - Ensaio prático	86
4.5 – MIG/MAG PULSADO Sinérgico:	91
4.5.1 - Determinação da forma de cálculo das variáveis de soldagem.	91
4.5.2 - Desenvolvimento de um algoritmo para implementação do sinérgico.	93
4.5.3 - Ajuste da altura do arco	94
4.5.4 - Ensaio prático	95
4.6 - MIG/MAG com Duplo Arame.	96
4.6.1 - Soldagem com Potencial Único.	97
4.6.2 - Soldagem com Potencial Isolado.	98
4.6.3 - Desenvolvimento de um programa no PC para soldagem com duplo arame no pulsado térmico.	100
4.6.4 - Ensaio Prático	101
4.7 – MIG/MAG com Corrente Alternada para o Alumínio.	106
4.7.1 - Desenvolvimento do algoritmo de controle para o MIG/MAG CA.	106
4.7.2 - Desenvolvimento de um Circuito para Manutenção do Arco.	108
4.7.3 - Ensaio prático	110

4.8 – MIG/MAG COM CURTO-CIRCUITO CONTROLADO.	112
4.8.1 – Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para redução da corrente no curto-circuito.	113
4.8.2 - Desenvolvimento do curto-circuito controlado via "software".	116
4.8.3 - Utilização da resistência do curto-circuito como indicativo de reignição.	123
4.8.4 - Análise da reignição usando-se como base a variação da resistência de curto-circuito.	130
4.8.5 - Metodologia para ajuste da altura do arco no curto-circuito controlado.	135
5 - CONCLUSÕES	140
5.1 - Com Relação às Modalidades de Soldagens Desenvolvidas.	140
5.2 - Com Relação à Comunicação entre as Fontes de Soldagem no Duplo-Arame.	141
5.3 - Com Relação à Abordagem do Desenvolvimento.	142
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Obtenção do arco voltaico no processo MIG/MAG. a) arco voltaico, b) equipamentos necessários.	8
Figura 2.2 - Forças envolvidas no processo de transferência.	9
Figura 2.3 - Modos de transferência metálica para o processo MIG/MAG. Curto circuito : A Globular : B - globular, C – repulsiva; Projeção : D – Projétil, E – Escoamento com fluxo goticular axial, F – Escoamento com fluxo goticular Rotativo;	10
Figura 2.4 – Forma de onda da tensão e da corrente na soldagem com MIG/MAG usando controle da tensão e transferência por curto-circuito.	12
Figura 2.5 – Sequência de separação da gota metálica na transferência por curto-circuito.	13
Figura 2.6 – Detalhe da transferência quando ocorre o curto circuito.	15
Figura 2.7 – Forma de onda da tensão e da corrente na soldagem com MIG/MAG pulsado com imposição de corrente.	16
Figura 2.8 – Detalhe da transferência no pulsado.	17
Figura 2.9 — Representação do sistema com potencial único.	21
Figura 2.10 — Representação do sistema com potencial único empregando duas fontes de potência.	21
Figura 2.11 — Representação de oscilograma de corrente, retratando o sincronismo na pulsação das fontes (pulsos ocorrendo simultaneamente).	22
Figura 2.12 — Representação esquemática dos sistemas com duplo arame com potenciais isolados.	22
Figura 2.13 - Representação esquemática do sincronismo dos pulsos entre as duas fontes (mestre e escrava) .	23

Figura 2.14– Formas de onda utilizadas para soldagem TIG CA.

a) Diagrama da forma de onda de corrente CA retangular com pulsação térmica.

b) Ilustração do efeito de retificação da forma de onda apresentada em a)

c) Corrente e tensão em uma soldagem com CA senoidal usando transformador.

d) Efeito de retificação na forma de onda apresentada em c) 25

Figura 2.15 - Forma de onda de corrente aplicada no MIG/MAG CA. 26

Figura 2.16 - Efeito da polaridade na penetração, forma do cordão e taxa de fusão do arame. 27

Figura 2.17 –Turbina tipo FRANCIS.

a) Foto da turbina. b) Aspecto de uma região cavitada. 29

Figura 2.18 – Efeito da forma de onda pulsada sobre o cordão de solda. 31

Figura 2.19 – Sistema de Aquisição e Controle. 34

Figura 2.20 - Sistema de Aquisição para Soldagem. 36

Figura 2.21 - Desenho esquemático do transdutor digital. 38

Figura 2.22 - Representação da influência dos cabos de saída da fonte de soldagem sobre a medição da tensão. a) diagrama esquemático b) formas de onda da tensão e corrente de saída. 39

Figura 2.23 – Ilustração de uma situação de curto-circuito na saída da fonte de soldagem via aterramento da rede elétrica. 41

Figura 2.24 - Estrutura de potência de uma fonte analógica. 43

Figura 2.25 - Estrutura de potência de uma fonte chaveada no primário. 45

Figura 2.26 - Estrutura de potência de uma fonte chaveada no secundário.

a) conversor de quatro quadrantes, b) conversor de um quadrante. 46

Figura 2.27 - Modelo idealizado do transistor em fonte de soldagem. 47

Figura 2.28 - Detalhe da ondulação da temperatura com controle tipo liga/desliga. 47

Figura 2.29 - Detalhe do controle de corrente. 48

Figura 2.30 - Corrente de 20 A, com ondulação de 40 A. 49

Figura 2.31 - Modelo aproximado do transistor em operação.

a) em condução b) bloqueado. 49

Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados. 52

Figura 3.2 – Sistema de Controle da Configuração A. 55

Figura 3.3 – Placa de aquisição e controle LPTAD. 55

Figura 3.4 – Configuração C composta pela placa Micro-controlada e placa base da DIGITEC.	56
Figura 3.5 – Sistema composto pelo PC104 + TC1+ LPTAD.	56
Figura 3.6 – Fontes de Soldagens utilizadas neste trabalho.	
a) ELMA, b) INVERSAL e c) DIGITEC	58
Figura 3.7 - Modelo de uma fonte de soldagem com entrada em corrente	58
Figura 4.1 - Diagrama de Classes de objetos.	64
Figura 4.2 - Protótipo da interface com o usuário montado no TOOLBOOK.	65
Figura 4.3 - Versão Final da Interface com o usuário para:	
a) Fonte de soldagem Micro-Processada e b) o PC.	65
Figura 4.4) – Modelo elétrico de uma fonte de soldagem convencional.	66
Figura 4.5 - Modelo do controle da tensão utilizando a entrada de corrente I_{Ref} .	67
Figura 4.6) Fluxograma do controle para o MIG/MAG convencional	
a) controle clássico,	
b) Controle com limitação de corrente e lógica de abertura do arco.	68
Figura 4.7) - Soldagem com CO2 puro no MIG/MAG convencional sem limite de corrente mínima.	69
Figura 4.8- Modelo de uma fonte de soldagem com entrada em corrente controlada por uma CPU.	70
Figura 4.9 - Circuito de simulação do arco.	70
Figura 4.10 - Formas de onda dos sinais de tensão e corrente no simulador, com diferentes indutâncias de subida (Ls) e descida (Ld).	
a) Ls e Ld médias, b) Ld elevada, c) Ld pequena e d) Ls elevada.	71
Figura 4.11) – Oscilogramas: a) item 1 da tabela 4.1 b) item 2 e c) item 3.	74
Figura 4.12) – Oscilograma para o item 4 da tabela 4.1.	75
Figura 4.13 - Fluxograma do algoritmo de controle do MIG/MAG pulsado.	77
Figura 4.14 – Sobreposição de um Oscilograma de corrente obtido com a fonte de soldagem ELMA, em preto, e parte de outro obtido pelo algoritmo de controle com a configuração C, em vermelho.	78
Figura 4.15 - Oscilogramas da abertura do arco na soldagem de alumínio com o MIG/MAG pulsado.	
a) com controle do curto-circuito, b) e c) sem controle do curto-circuito.	79
Figura 4.16 - Oscilograma de soldagem no Pulsado com arco curto. (sinérgico 100 A, 4%CO2, ER70S6 1.2 mm)	80
Figura 4.17 - Diagrama de sinais do pulsado com pulsação térmica.	82

Figura 4.18 – Pulsado com pulsação térmica com frações de período de transferência.	82
Figura 4.19 - Algoritmo da forma de onda do pulsado com pulsação térmica.	83
Figura 4.20 - Ensaio de soldagem com o pulsado com pulsação térmica com tempo de resposta da velocidade de arame em 700 ms.	84
Figura 4.21 - Ensaio de soldagem com o pulsado com pulsação térmica com tempo de resposta da velocidade de arame em torno de 100 ms.	85
Figura 4.22 - Depósito de soldagem com o processo MIG/MAG na posição sobre cabeça, utilizando arame-eletrodo tubular à base de cobalto, com as modalidades : a) convencional, b) pulsado com pulsação térmica.	86
Fig. 4.23 – Aplicação em campo do pulsado com pulsação térmica.a nível de desenvolvimento. Local : Galeria da hidrelétrica de Salto Santiago.	87
Fig. 4.24 – Esquema de soldagem no pulsado térmico com 3 fases.	88
Fig. 4.25 – Versão do equipamento de soldagem para soldagem de turbinas.	89
Fig. 4.26) – Fotos de partes da turbina soldadas com o pulsado com pulsação térmica.	90
Figura 4.27 – Representação esquemática da conversão de um comprimento de arame (Le) em uma gota metálica (Dg).	92
Figura 4.28 - Diagrama de blocos simplificado da determinação das variáveis de soldagem no processo MIG/MAG pulsado sinérgico.	94
Figura 4.29 – Conexão entre as fontes de soldagem no duplo arame com potencial único.	98
Figura 4.30 – Conexão entre as fontes de soldagem no duplo arame com potencial isolado.	99
Figura 4.31 – Menu de configuração para o Duplo arame apresentado no Display da Fonte.	99
Figura 4.32 – Interface com o usuário do programa para soldagem com o duplo arame operando no pulsado com pulsação térmica através do PC.	100
Figura 4.33 – Conexão entre as fontes de e o Micro-Computador.	101
Figura 4.34 – Oscilogramas para o duplo arame com potencial isolado com defasagem entre os pulsos de corrente. a) fonte escrava, b) fonte mestre.	102
Figura 4.35 - Oscilograma de tensão e corrente (nos dois arames) para o duplo arame no modo convencional com potencial único.	103
Figura 4.36 - Oscilograma de tensão e corrente (nos dois arames) para o processo duplo arame pulsado com potencial único.	104

Figura 4.37 - Soldagem com o duplo arame potencial isolado sem defasagem entre os pulsos de corrente. a) fonte 1, b) fonte 2	104
Figura 4.38 – Aspectos de cordões de solda em algumas situações ensaiadas com o duplo arame.	105
Figura 4.39 - Fluxograma do algoritmo de controle do MIG/MAG CA.	107
Figura 4.40 – Interface do programa para soldagem com o MIG/MAG CA.	108
Figura 4.41 - Diagrama esquemático dos circuitos de reabertura de arco.	
a) Estrutura de potência da fonte de soldagem INVERSAL.	
b) Versão baseada em fonte de tensão	
c) Versão baseada no princípio da conservação de energia.	109
Figura 4.42 – Oscilogramas de corrente e tensão na soldagem com MIG/MAG CA.	111
Figura 4.43 –Aspecto do cordão obtido com o MIG/MAG AC.	111
Figura 4.44 - Algumas das formas de ondas usadas no curto-circuito controlado que são apresentadas em a) [9] b) [10] c) [13] e d) [7].	112
Figura 4.45 - Diagrama esquemático de circuito de redução de corrente.	114
Figura 4.46 - Foto do protótipo do circuito de redução de corrente.	114
Figura 4.47 - Forma de onda da corrente usando o circuito de redução de corrente.	116
Fig. 4.48 - Proposta de forma de onda de corrente para curto circuito controlado	117
Fig. 4.49 - Algoritmo de controle do curto circuito controlado.	118
Figura 4.50 - Oscilogramas do ensaio 1.	120
Figura 4.51 - Oscilogramas do ensaio 4.	121
Figura 4.52 - Curto circuitos prolongados no ensaio 3.	122
Figura 4.53 - Representação da transferência da gota.	123
Figura 4.54 - Montagem feita nos testes referentes à determinação do comportamento da resistência do arame em função da corrente.	
a) arame em movimento b) arame parado.	124
Figura 4.55 - Variação da resistência do arame em diferentes correntes.	125
Figura 4.56 – Comparação da resistência do arame durante o curto (ensaio 2 tabela 4.3) e simulação do curto (item 8 tabela 4.5) .	127
Figura 4.57 - Comparação da resistência do arame durante o curto (ensaio 2 tabela 4.3) e simulação do curto (item 17 tabela 4.5) .	128

Figura 4.58 - Resistência do arame em função da corrente eficaz, para os itens da tabela 4.5 (triângulos itens de 1 a 4, quadrados itens de 5 a 8 e circunferências itens de 9 a 13).	129
Figura 4.59 - Representação das variáveis envolvidas na determinação de t_i .	130
Figura 4.60 – Tensão e corrente durante o curto circuito com detecção da reignição pela resistência. Reignição na, a) fase 4; b) fase 3 e c) fase 5.	134
Figura 4.61 – Soldagem com CO2 puro e controle de tensão na fase 1.	135
Figura 4.62 – Forma de onda no curto circuito controlado com corrente imposta.	136
Figura 4.63 – Gráfico das funções de $U_i \times I_{f5}$ (a) e $U_i \times t_{f5}$ (b).	137
Figura 4.64 - Os oscilogramas de corrente e tensão para o controle a três níveis.	139
Figura 6.1 – Outras forma de onda aplicáveis ao curto circuito controlado. a) controle da tensão na fase de arco, b) controle utilizado no trabalho com mais um patamar de corrente na fase de arco.	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características dos instrumentos e equipamentos utilizados para aquisição.	53
Tabela 3.2 - Características dos equipamentos e instrumentos usados para desenvolvimento dos controles das modalidades de soldagem.	57
Tabela 3.3 - Características das fontes de soldagem.	59
Tabela 3.4 - Características dos equipamentos e instrumentos de apoio	60
Tabela 4.1 – Ensaio de Soldagem no MIG/MAG convencional arame 1.2 mm.	75
Tabela 4.2 – Combinação de arames e gás implementados no sinérgico.	96
Tabela 4.3 - Variáveis e parâmetros utilizados nos primeiros ensaios.	119
Tabela 4.4 – Resultados da primeira bateria de ensaios.	124
Tabela 4.5 – Ensaio para determinação do comportamento da resistência durante um pulso de corrente, com arame E70S60 com diâmetro de 1.0 mm.	126
Tabela 4.6 – Resultado da análise do tempo disponível até ocorrer reignição a partir de um dado valor de resistência de curto-circuito (R_{ci}).	131
Tabela 4.7 – Determinação da função $U_i \times I_f^5$.	137
Tabela 4.8 – Determinação da função $U_i \times t_f^5$.	137

SIMBOLOGIA

ΔI - ondulação de corrente.

ΔI_s - Ondulação da corrente de soldagem.

ΔT_1 – tempo de ruptura para o arame de 1.0 mm.

ΔT_2 – tempo de ruptura para o arame de 1.2 mm.

Δt_d - tempo de descida.

Δt_s - tempo de subida.

ΔV_{Lc} – Ondulação da tensão sobre a indutância dos cabos de solda.

Ar+2 O₂ - Argônio com 2 % de oxigênio.

C1 - Constante experimental.

C5 - Argônio com 5 % de gás carbono.

C8 – Argônio com 8 % de gás carbono.

CA - corrente alternada.

C_{cc} – capacitor de curto-circuito do simulador.

C_f - capacitor de filtro.

C_p - capacitor do circuito de pulso de abertura de arco para o MIG/MAG CA.

D_e – Diâmetro do arame eletrodo.

D_g – Diâmetro da gota.

DBP – Distância entre bico de contato e a peça.

E1 - energia para o arme de 1.0 mm.

E2 - energia para o arme de 1.2 mm.

E_a - Tensão do arco.

E_{as} - Sinal de tensão do arco lido pela CPU.

EN - eletrodo negativo.

EP - eletrodo positivo.

E_r - tensão de saída da ponte retificadora.

F_c - frequência de chaveamento.

f_t – frequência de transferência.

I_{ap} - corrente de pulso após a abertura do arco.

I_b – corrente de base.

I_e - corrente eficaz.

I_{f1} - corrente na fase1 da forma de onda do curto-circuito controlado.

If2 - corrente na fase2 da forma de onda do curto-circuito controlado.

If3f - corrente final na fase3 da forma de onda do curto-circuito controlado.

If3i - corrente inicial na fase3 da forma de onda do curto-circuito controlado.

If4 - corrente na fase4 da forma de onda do curto-circuito controlado.

If5 - corrente na fase5 da forma de onda do curto-circuito controlado.

If6 - corrente na fase6 da forma de onda do curto-circuito controlado.

Im – Corrente média de soldagem.

In - corrente negativa.

Ip – corrente de pulso.

I_{Ref} - corrente de referência no simulador de arco.

is(t) – Corrente instantânea de soldagem.

Ism – Corrente média de soldagem.

I_{SRef} - corrente de referência de soldagem gerada pela CPU.

KA – relação entre as áreas dos arames de 1.2 mm e 1.0 mm.

Ka - constante de proporcionalidade da tensão lida pela CPU e a tensão de soldagem.

Ki - constante de proporcionalidade entre o sinal de controle de corrente gerado pela CPU e a corrente de soldagem.

k_{si} – constante de proporcionalidade entre a velocidade de arame e a corrente média de soldagem.

Lbp - distância entre o bico de contato e a peça.

Lc – Indutância do cabo de solda.

Ld – indutância de descida.

Ls - indutância de saída.

Ls – indutância de subida.

Ls - indutor de filtro de saída.

P1 – potência para o arame de 1.0 mm.

P2 – potência para o arame de 1.2 mm.

R% - aumento percentual da resistência inicial do arco.

Rc – Resistência do cabo de solda.

Rcc - resistência de curto-circuito.

Rcc1, Rcc2 – resistências de curto-circuito do simulador.

Rci - resistência que indica a iminência da reignição.

Ri - Resistência no início do curto-circuito.

Rim - Resistência no início do curto-circuito média.

Rrea – Resistência de reabertura de arco do simulador.

Rreg - Resistência de regime do simulador.

T – período de transferência no pulsado.

tap - tempo de pulso após a abertura do arco.

tb – tempo de base.

tb - tempo de bloqueio do transistor.

tc - tempo de condução do transistor.

tcc – Tempo que a chave 2 fica na posição P2 no simulador.

tf1 - tempo da fase1 na forma de onda do curto-circuito controlado.

tf2 - tempo da fase2 na forma de onda do curto-circuito controlado.

tf3 - tempo da fase3 na forma de onda do curto-circuito controlado.

tf4 - tempo da fase4 na forma de onda do curto-circuito controlado.

tf5 - tempo da fase5 na forma de onda do curto-circuito controlado.

tf6 - tempo da fase6 na forma de onda do curto-circuito controlado.

t_{fusão} – tempo para fusão de um arame submetido a corrente I_f.

ti - tempo até ocorrer a reignição a partir do momento que R_{cc} ficou maior que R_{ci}.

tn - tempo negativo.

tp – tempo de pulso.

trea - Tempo que a chave 1 fica fechada no simulador.

U_{as} - tensão de saída do simulador de arco.

U_{cc} - tensão de curto-circuito.

U_i - tensão no início do curto.

U_{ref} - tensão de referência.

U_{ri} - tensão de reignição.

V_a – velocidade de arame.

V_e – Volume do arame eletrodo.

V_F - volume fundido.

V_g – Volume da gota.

V_s(t) – Tensão instantânea na saída da fonte de soldagem.

Z - impedância.

RESUMO

Os processos de soldagem a arco elétrico, hoje conhecidos, já se encontram consolidados. Entretanto, dentro de uma concepção básica de processo, existem possibilidades que permitem avanços em relação ao que já existe. Estes avanços surgem em função das necessidades de melhorar, seja a qualidade dos produtos, seja a produtividade, utilizando a disponibilidade da moderna eletrônica e informática. No caminho do desenvolvimento de novas tecnologias, o presente trabalho representa uma das áreas de atuação do LABSOLDA

O enfoque deste trabalho é o processo MIG/MAG. No âmbito do mesmo, foram incorporados desenvolvimentos de outros processos de soldagem a arco. O trabalho também resultou em um aperfeiçoamento da instrumentação dos equipamentos de soldagem a arco elétrico.

Na ampliação da abrangência do processo MIG/MAG, pode-se citar o procedimento denominado Pulsado com Pulsação Térmica. Este combina duas frequências de pulsação, uma na frequência do MIG Pulsado, para controlar a transferência metálica, evitando a transferência por curto-circuito. Outra, na frequência do TIG, com variação dos valores médios da corrente, para controlar a poça de fusão e os fenômenos inerentes à fusão, à solidificação e aos mecanismos de expulsão das impurezas.

O processo Pulsado com Pulsação Térmica tem como objetivo a melhoria na qualidade dos depósitos de soldagem, executados em regiões cavitadas de turbinas hidráulicas. No entanto, este procedimento também vem sendo utilizado em outras aplicações com bastante sucesso. Para procurar flexibilizar o desenvolvimento deste e de outros procedimentos MIG/MAG, foi desenvolvido um circuito que permite a simulação do arco.

Ainda como exemplo de desenvolvimento, é apresentada neste trabalho a versão do MIG/MAG com Transferência por Curto-circuito Controlado, também chamada por outros autores de Transferência sob Controle da Tensão Superficial.

ABSTRACT

Current electric-arc welding processes are well developed. However, within the basic concept of the process, there are possibilities for advances in relation to the current situation. These advances arise in response to the need for improvement, either in the quality of products or in productivity, utilizing the modern electronics and informatics available. In seeking to develop new technologies, this study represents one of the performance areas of LABSOLDA.

The focus of this study is the MIG/MAG process. In this scope, developments were made incorporating other arc welding processes characteristics. The study also resulted in an optimization of the instrumentation of the electric-arc welding equipment.

In extending the reach of the MIG/MAG process, the procedure known as Pulsed with Thermal Pulsation may be mentioned. This combines two pulsation frequencies, one in the MIG Pulsed frequency, in order to control the metal transfer, avoiding short-circuit transfer. The other is in the TIG frequency, with variation in the average values of the current, in order to control the fusion puddle and the phenomena inherent to the fusion, solidification and impurity expulsion mechanisms.

The Pulsed with Thermal Pulsation process has as an objective the improvement of the quality of the welding deposits, laid down in regions of hydraulic turbines eroded by cavitation. Nevertheless, this procedure has also been successfully utilized in other applications. In an attempt to add flexibility to the development of these and other MIG/MAG procedures, a circuit which allows the arc simulation was developed.

As a further example of development, this study presents the MIG/MAG version with Transfer by Controlled Short-circuit, also known as Surface Tension Transfer, STT.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A evolução dos processos de soldagem nas últimas três décadas foi em função do desenvolvimento tanto a nível de conhecimento básico como de experiência de campo. Os processos foram marcadamente influenciados pela evolução da eletrônica, que, sob a conjunção da informática criou condições para um significativo controle da fonte calorífica, geradora das condições físicas para a formação de uma solda.

Isto mudou paradigmas e fez com que conceitos tivessem de ser revistos. Um dos muitos exemplos, é o fato de até dois anos atrás o processo MIG/MAG só funcionava com corrente contínua e hoje se verifica que um dos grandes avanços da tecnologia da soldagem é a soldagem MIG/MAG com corrente alternada.

As primeiras fontes de energia destinadas ao processo de soldagem MIG/MAG não possibilitavam um controle efetivo sobre a transferência metálica, o que contribuiu para que o processo MIG/MAG não fosse utilizado em várias aplicações industriais, em especial na soldagem de componentes estruturais considerados de responsabilidade.

Todavia, o fato do processo MIG/MAG possuir características de versatilidade, elevada produção e possibilidade de relativo controle da poça em qualquer posição e espessura, somado a sua relativa facilidade de automatização comparado a outros processos de soldagem a arco, fez com que a indústria não deixasse de considerá-lo, com reservada preferência, dentre os demais processos de soldagem a arco.

A preferência em utilizá-lo, traduzia-se numa necessidade de mercado, fazendo com que centros de pesquisas e indústrias buscassem continuamente novas soluções, tanto a nível de processo, quanto a nível de equipamentos. A evolução das soluções nesses dois campos caminhou lado a lado, tendo seu ápice com o aparecimento dos semicondutores de potência, ocorrida nos últimos anos. No campo dos processos foram desenvolvidos novos procedimentos e modalidades de soldagem. No campo dos equipamentos o principal avanço foi o aumento da resposta dinâmica de controle da corrente de soldagem, que permitiu um controle mais apurado das variáveis na soldagem com corrente pulsada e, também, viabilizou um ajuste contínuo da indutância da fonte na soldagem com curto-circuito.

O aumento do domínio sobre as variáveis de soldagem possibilitou que pesquisas relacionadas à transferência metálica fossem realizadas com maior precisão, resultando numa maior gama de informações sobre o processo MIG/MAG. Isso aumentou o campo de abrangência do mesmo, tornando-o mais popular.

Se por um lado estes avanços aumentaram as possibilidades de aplicação do processo de soldagem MIG/MAG. Por outro lado, o número de variáveis de soldagem, juntamente com a complexidade de ajustá-las, aliado ainda, a falta de preparo dos soldadores e pessoas ligadas à soldagem, colaboravam para que em muitas aplicações, em que o mesmo caberia perfeitamente, este não fosse utilizado.

A falta de preparo, aliado a interesses comerciais, faz com que determinados equipamentos sejam vendidos por pura questão de “marketing” e não com base na real potencialidade do equipamento.

A modernização das fontes apesar de ter melhorado a dinâmica de controle de corrente das mesmas, que é um dos fatores que influenciam na estabilidade do arco, não evitou a ocorrência dos problemas listados abaixo, em muitas aplicações do processo MIG/MAG convencional, com transferência por curto-circuito. Tais problemas são causados devido ao elevado grau de aleatoriedade da transferência metálica e do não controle temporal da energia sobre a poça metálica, como consequência tem-se:

- Elevado índice de salpicagens.
- Falta de fusão adequada.
- Geometria inconveniente do cordão de solda.
- Elevado índice de porosidades em determinados tipos de soldagem.
- Acabamento inadequado.
- Dificuldade de controle da penetração.

A soldagem com corrente imposta e pulsada com controle da velocidade de arame, possibilita uma transferência metálica sem salpicos, e também, devido a corrente média ser constante, apresenta boa homogeneidade de penetração e geometria do cordão de solda uniforme. Contudo, a imposição da corrente média ocasiona dificuldades de abertura do arco e de manutenção do equilíbrio entre a taxa de fusão e a alimentação do arame, que pode dar origem a curtos-circuitos, em consequência fazer surgir salpicos, como também, pode fazer com que o arco atinja o bico de contato, levando-o a fusão.

No sentido de estabelecer um equilíbrio entre a taxa de fusão e de alimentação do arame, a fim de manter a altura de arco constante, surgiram algumas formas de controle, destacando-se o chamado controle externo da velocidade de arame e o modo misto. Estas são baseadas na proporcionalidade que existe entre a tensão e a altura do arco. No caso do controle externo, ajusta-se uma tensão de referência de arco, sendo que o controle irá ajustar a velocidade do arame de forma que a tensão do arco fique igual a de referência. No modo misto, no lugar da corrente de pulso, é ajustada a tensão de pulso, dessa forma o controle irá ajustar a corrente de pulso e indiretamente a corrente média, a fim de que a tensão do arco no pulso torne-se igual à ajustada.

Entretanto, o controle externo possui problemas de instabilidade na abertura do arco. Já no modo misto, a corrente de pulso muitas vezes pode assumir valores incompatíveis com os necessários para transferir a gota, ocasionado instabilidade durante a soldagem.

Diante do quadro apresentado, como não existe uma modalidade de soldagem que seja uma solução universal a todos os problemas colocados, o presente trabalho concentrou-se em tratar estes problemas usando métodos de controle computacionais através de algoritmos, tendo como objetivos gerais:

- Criar métodos de controle do arco voltaico, da transferência metálica e da poça de fusão para equacionar as deficiências citadas.
- Equacionar os métodos criados de forma a diminuir o número de variáveis a serem ajustadas (sistema sinérgico).
- Consolidar os métodos criados em um equipamento de soldagem.
- Demonstrar os benefícios da utilização de métodos de controle computacionais e de conceitos de engenharia de “software”, na solução de problemas relativos ao controle e à complexidade de ajuste das modalidades de soldagem.

Para atingir os objetivos propostos foram desenvolvidas, além das modalidades curto-circuito controlado e pulsado sinérgico, previstas inicialmente no exame de qualificação, as modalidades: pulsado com pulsação térmica, corrente alternada (CA) e duplo arame.

Os objetivos específicos para cada modalidade são:

- Curto-Circuito Controlado: Produzir soldas em passe de raiz com melhor qualidade e repetibilidade do que o obtido pelo processo MIG/MAG convencional em correntes baixas e necessidade de altura de arco pequena.
- Pulsado Sinérgico: Reduzir a complexidade no ajuste das variáveis de soldagem no MIG/MAG pulsado.
- MIG/MAG CA: Produzir soldas de alta qualidade em chapas finas de alumínio com o controle da temperatura da poça de fusão, através do ajuste do tempo em cada polaridade do arco, utilizando-se uma forma de onda de corrente alternada retangular com três níveis de corrente.
- Pulsado com pulsação térmica: Resolver problemas de acabamento superficial com escorrimento metálico, falta de fusão e excesso de porosidades, que ocorrem na soldagem de recuperação de turbinas hidráulicas erodidas por cavitação, com a utilização de arames tubulares ao cobalto em diferentes posições de soldagem.
- Duplo Arame: Resolver problemas de desequilíbrio de corrente das fontes na soldagem com potencial único e criar um meio de sincronizar os pulsos de corrente na soldagem com potencial isolado.

Este trabalho abrangeu além da área de soldagem, as áreas de eletrônica, computação e metrologia, devido sua característica multi-disciplinar.

Sem o apoio decisivo do LABSOLDA e de sua equipe seria difícil desenvolver um trabalho tão abrangente. A experiência adquirida na área, pelo LABSOLDA, ao longo dos anos, foi determinante na realização do presente trabalho. Atualmente, o mesmo, concentra esforços em pesquisas com os processos MIG/MAG, TIG e PLASMA, realizando estudos sobre a estabilidade do arco, transferência metálica, variáveis e parâmetros de soldagem, a fim de estabelecer procedimentos de soldagem adequados para várias aplicações e materiais. Para isso, ao longo desses anos foram desenvolvidos fontes de soldagens [1,2 e 3], sistemas computadorizados para aquisição e controle [4] e uma série de instrumentos para medição de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás.

O LABSOLDA sempre defendeu o desenvolvimento de tecnologias nacionais, pois além do domínio da tecnologia evitar a importação, esta permite que as pesquisas sejam desvinculadas das características do equipamento, possibilitando que modificações e atualizações sejam realizadas de acordo com as necessidades que surgem durante as atividades de pesquisa. Com esta visão o LABSOLDA

realizou seus primeiros desenvolvimentos, procurando sempre promover a integração entre os trabalhos de pesquisas. Mesmo com recursos escassos, foram gerados uma grande quantidade de instrumentos, equipamentos e informações sobre os processos de soldagens a arco. Assim, criou-se uma espécie de ambiente de desenvolvimento auto-sustentado do ponto de vista tecnológico, proporcionando a formação de doutores, mestres, graduandos e técnicos. As tecnologias hoje produzidas pelo laboratório de soldagem podem ser encontradas em diferentes instituições de pesquisas e indústrias.

CAPÍTULO 2

SÍNTESE DE INFORMAÇÕES ANCORAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para realização do presente trabalho foram necessários estudos dos processos de soldagem MIG/MAG e TIG e, também, das tecnologias utilizadas nas fontes de soldagem e nos sistemas de aquisição e controle.

Referente ao processo de soldagem MIG/MAG, neste capítulo, foram analisados alguns fenômenos envolvidos na transferência metálica e na regularidade da mesma, nas modalidades de soldagem curto circuito convencional e pulsado.

O processo TIG foi incluído neste capítulo devido a alguns de seus fundamentos serem utilizados nas modalidades de soldagem MIG/MAG pulsado com pulsação térmica e MIG/MAG com corrente alternada.

Além disso, foram realizados estudos da modalidade de soldagem MIG/MAG duplo arame, voltados a produzir conhecimentos sobre as tecnologias aplicadas a esta modalidade e a gerar as condições necessárias para possibilitar a condução de pesquisas com este processo em um trabalho de mestrado [5] e outro de doutorado [6].

2.1 - O Processo MIG/MAG

Conceitualmente, o processo MIG/MAG pode ser descrito como um processo de soldagem a arco, que utiliza eletrodo consumível contínuo e insuflamento de gás. O gás é fornecido por uma fonte externa, sendo responsável por criar o ambiente em que se forma o arco e por proteger da oxidação a poça de fusão e as gotas metálicas em transferência.

Inicialmente desenvolvido para a soldagem de alumínio, logo o processo MIG/MAG converteu-se em um método de manufatura eficiente para união de componentes em aço. Embora, hoje o processo MIG/MAG seja considerado uma ferramenta de manufatura eficiente, o início de sua utilização, na indústria, foi conturbado.

A impossibilidade de um controle efetivo sobre a transferência metálica contribuiu em muito para a sua não utilização em várias aplicações industriais, em especial na soldagem de componentes estruturais considerados de responsabilidade. Esta falta

de controle, induzida principalmente pela inexistência de fontes de energia apropriadas às características da transferência, conferiu ao processo MIG/MAG uma imagem negativa perante muitos usuários, que passaram a considerá-lo um processo “temperamental” e muito suscetível ao aparecimento de defeitos de fusão.

Na última década tem ocorrido uma reversão gradual desse quadro, em decorrência direta dos avanços tecnológicos de instrumentos e equipamentos aplicados ao processo de soldagem, tanto na pesquisa, quanto na indústria. Esses avanços permitiram a adoção de metodologias de controle da transferência, com base na realimentação do processo, através de informações fornecidas pelas próprias variáveis de soldagem. Porém, a quantidade de informações existentes sobre parâmetros e variáveis, mais adequados para determinadas aplicações, ainda é muito pequena, em função da complexidade e abrangência deste processo de soldagem.

As razões do interesse em aprimorar o processo para torná-lo menos suscetível ao aparecimento de falhas de deposição baseiam-se em vantagens, tais como:

- elevada quantidade de material depositado por tempo (kg solda / hora);
- relativa facilidade de mecanização ou automatização do processo;
- elevado ciclo de operação (tempo de arco aberto / tempo total de produção).

Fundamentalmente, a soldagem é realizada pela contínua alimentação de um arame (fig. 2.1), que é fornecido na mesma proporção da fusão. O arco voltaico produzido tem suas propriedades em estreita dependência das características da fonte de energia, que o alimenta, e das características do gás de proteção. A fonte controla a energia necessária para realizar a soldagem e o alimentador do arame é responsável pelo fornecimento do arame-eletrodo.

A tocha de soldagem e os cabos possuem três funções básicas: a de conduzir o gás até a região do arco, guiar o arame-eletrodo até o bico de contato e conduzir a corrente de soldagem da fonte até o bico de contato e a peça.

O arco é formado através do estabelecimento do contato (curto-circuito) entre o arame-eletrodo e a peça (fig. 2.1.a). O curto-circuito surgido produz a passagem de uma elevada corrente, causando um aquecimento ao longo do arame-eletrodo e na região de contato com a peça. Devido a este aquecimento com a consequente ruptura do curto-circuito, ocasionada pela fusão ocorrida em alguma parte do arame-eletrodo, o arco se estabelece. Esse instante é um dos pontos mais críticos da

soldagem, e um dos fatores que colabora para isso é a condição da ponta do arame. A situação mais favorável surge quando a ponta do arame tem uma forma pontiaguda, fazendo com que o arco se origine geralmente na região de contato. Um caso extremo ocorre quando fica uma gota fundida na ponta do arame, fazendo com que o arco se origine em outro ponto do arame, neste caso, geralmente a abertura é conturbada.

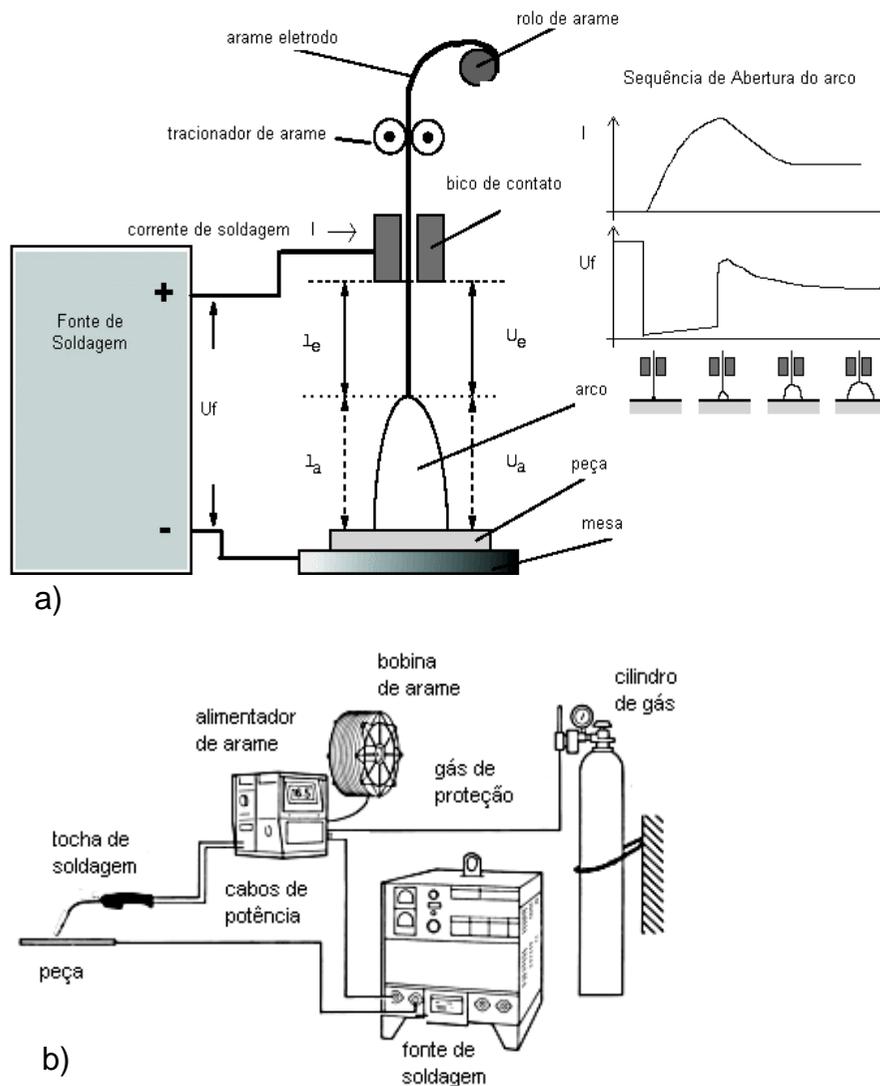


Figura 2.1 - Obtenção do arco voltaico no processo MIG/MAG.

a) – obtenção do arco voltaico, b) – equipamentos necessários.

Com o surgimento do arco, o arame, continuamente fornecido pelo alimentador, é transformado em gotas de metal fundido, as quais são transferidas para a peça, formando o cordão de solda. Nesse processo, parte da energia responsável pela fusão é devida ao efeito Joule, gerado pela passagem da corrente através do arame no trecho que fica entre o bico de contato e o arco, acarretando um preaquecimento

do mesmo. Entretanto, a maior parte da energia provém do próprio arco na região de contato entre o mesmo e a ponta do arame .

Embora, a concepção seja bem simples, o controle sobre o equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e a de sua fusão, de forma a se obter uma transferência metálica que garanta uma solda de boa qualidade com produtividade e repetibilidade, ainda é uma tarefa em aprimoramentos, pois os fenômenos envolvidos na transferência metálica são bastante complexos.

A transferência metálica no processo MIG/MAG se dá pela interação complexa de um conjunto de forças sobre a extremidade fundida do eletrodo, poça de fusão e arco voltaico. Apesar de existir um grande número de mecanismos envolvidos, normalmente são apresentados como fundamentais os que se originam a partir da ação das forças de origem eletromagnética, gravitacional e tensão superficial. A magnitude de cada força está sob influência direta das variáveis elétricas (tensão e corrente), da composição química do eletrodo e da peça, além da natureza do ambiente onde se forma o arco (atmosfera inerte ou ativa) [7].

A fig.2.2 apresenta um resumo das principais forças, descritas na referência [7], que atuam sobre o arco.

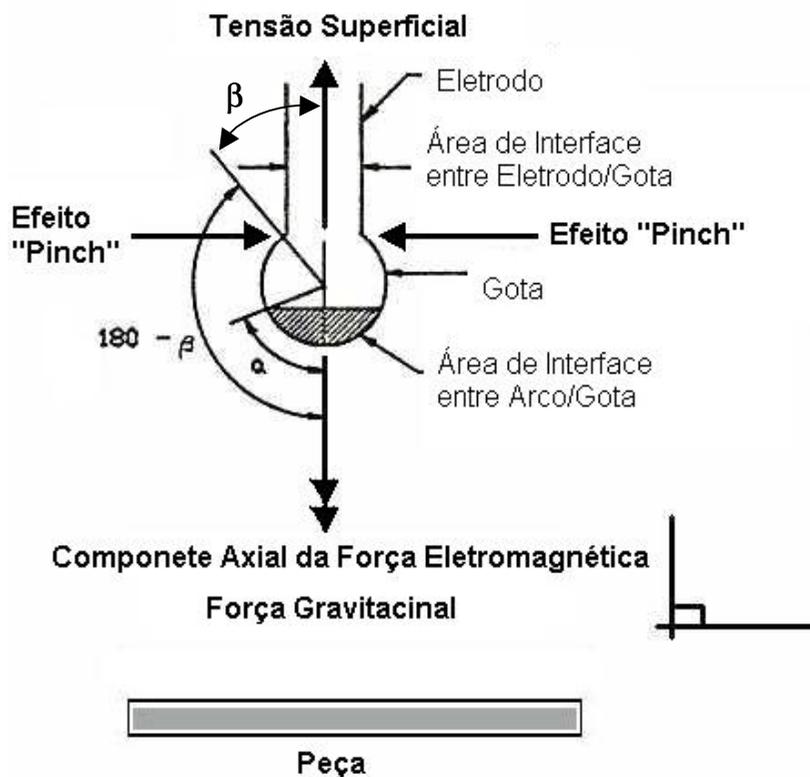


Figura 2.2 - Forças envolvidas no processo de transferência.

As forças eletromagnéticas são apontadas como sendo os principais agentes responsáveis pela transferência da gota em correntes elevadas, onde a componente axial atua como agente propulsor, que empurra a gota contra a peça e a radial como agente separador, que promove o desprendimento da gota do eletrodo.

Como foi visto, a transferência metálica é resultado de um conjunto de forças, e, dependendo dos valores destas e da corrente e tensão de arco, tem-se diferentes modos de transferência metálica. A fig. 2.3 mostra os diferentes modos de transferência metálica, de acordo com a classificação adotada pelo LABSOLDA.

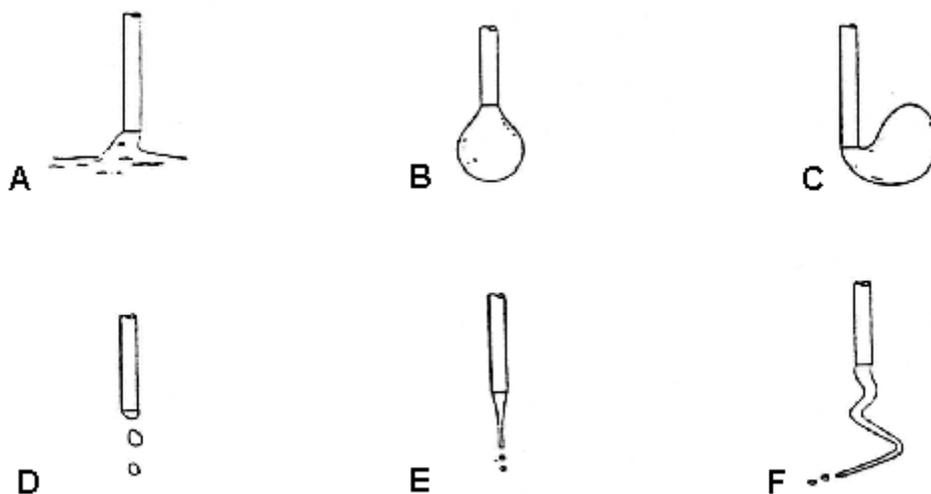


Figura 2.3 - Modos de transferência metálica para o processo MIG/MAG.

Curto-circuito : A

Globular : B - globular, C – repulsiva;

Projeção : D – Projétil, E – Escoamento com fluxo goticular axial,

F – Escoamento com fluxo goticular Rotativo;

A estabilidade do processo de transferência depende de inúmeros fatores, com maior dependência das características da fonte de energia, quando se opera na região do curto-circuito, pois a dinâmica do equipamento é fator decisivo para a citada estabilidade. À medida que se avança para a região de uma transferência livre de curtos-circuitos (correntes maiores), a influência das características do equipamento se torna menos importante.

Justamente para vencer as dificuldades de estabilidade e outras propriedades resultantes, desenvolveram-se, em vários institutos de soldagem, tecnologias para controlar o curto-circuito (curto-circuito controlado) ou para evitá-lo, mesmo em

correntes baixas (transferência com corrente pulsada, denominada de transferência por projétil).

2.1.1 - O Processo MIG/MAG Convencional

O processo de soldagem MIG/MAG convencional é o que utiliza a forma mais simples de equipamento. A fonte de energia é do tipo tensão constante, sendo a corrente uma variável dependente, fundamentalmente, da velocidade de alimentação do arame e das suas características físicas e químicas. Assim, as variáveis independentes e básicas, e que são previamente ajustáveis, são a tensão e a velocidade do arame-eletrodo. De acordo com o nível das mesmas e também, em dependência do tipo de gás de proteção, o processo apresenta diferentes configurações de transferência metálica. Fundamentalmente, pode-se caracterizar dois grandes grupos perfeitamente distintos e outros intermediários ou mistos. Os grupos perfeitamente distintos são: o dependente totalmente da ocorrência de curto-circuitos e o totalmente independente. Pertencem ao grupo da transferência independente da ocorrência de curto-circuitos, a transferência por escoamento goticular axial (fig. 2.3 E) e por escoamento goticular rotativo (fig. 2.3 F). Nestes, embora possa haver curto-circuitos entre a ponta do eletrodo e a poça metálica, causados por uma tensão relativamente baixa, não existe um efeito eficaz dos curto-circuitos sobre as forças de transferências. As formas de ondas da tensão e da corrente não sofrem sensível influência por fenômenos da transferência. Estes tipos de transferências ocorrem em altas densidades de corrente.

Pertencem ao grupo dependente da ocorrência de curto-circuitos a transferência por curto-circuitos quase regulares e as transferências globular e repulsiva. Na transferência por curto-circuitos quase regulares, as gotas só se desprendem do eletrodo se houver curto-circuito entre elas e a poça metálica (fig. 2.3 A). A transferência globular (fig. 2.3 B) é característica de uma situação mista, ocorrendo o desprendimento das gotas com e sem curto-circuito. A transferência repulsiva (fig. 2.3 C) não deixa de ser também uma transferência globular, porém ocorrem forças de repulsão em função de características provocadas por gases ricos em dióxido de carbono.

Para descrever de forma sucinta a transferência por curto-circuito à soldagem será considerada em regime permanente. Na figura 2.4, é mostrada a forma de onda

da tensão e da corrente típica para essa modalidade de transferência. Para melhor entendimento, a transferência será dividida em quatro etapas, fig. 2.5.

Na etapa A, a extremidade do eletrodo encontra-se no ponto mais afastado da poça de fusão e o arco possui o estado de maior nível energético, onde a corrente e a tensão atingem seus máximos. O valor da corrente é reduzido exponencialmente a fim de conduzir a tensão ao valor de referência (valor de tensão ajustado para soldagem), a uma taxa de decrescimento determinada através da indutância da fonte de soldagem. Essa etapa é responsável pela maior parcela na formação da gota metálica, produto da elevada taxa de fusão do arame.

Na etapa B, o arco inicia um período de estabilização, onde a tensão do arco tende ao valor de referência e, devido à redução da energia, a gota continua crescendo, porém com uma taxa menor.

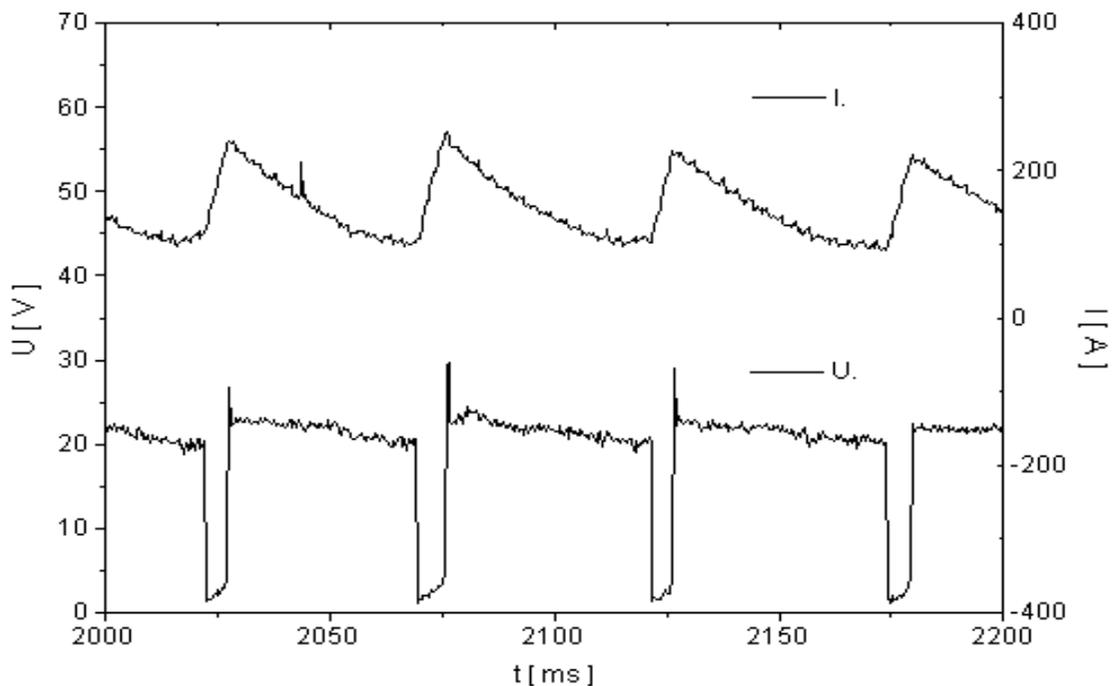


Figura 2.4 - Forma de onda da tensão e da corrente na soldagem com MIG/MAG usando controle da tensão e transferência por curto-circuito.

Na etapa C, em função do contato da gota com a poça de fusão (curto-circuito), parte da gota é transferida por tensão superficial. Este contato causa, também, uma elevação na corrente elétrica, fazendo com que as forças de origem eletromagnéticas aumentem a intensidade da pressão sobre o eletrodo e a massa fundida. A elevação do valor de corrente ocorre porque a fonte de soldagem tenta

restabelecer o valor da tensão de referência. Neste caso, também, a indutância é que determina a taxa de subida da corrente.

Na etapa D é iniciado o processo de constrição da parte restante da gota que forma a ponte de ligação entre o eletrodo e a peça. Uma das principais forças que atuam nesse momento é a eletromagnética (efeito “pinch”), sendo sua intensidade tanto maior quando maior o valor da corrente e menor a espessura da ponte. Como a corrente é cada vez maior, a força também acompanha esse aumento, reduzindo cada vez mais, a espessura da ponte. Com a redução da espessura da ponte, a força aumenta ainda mais. Isso causa uma espécie de realimentação, acelerando o processo de constrição.

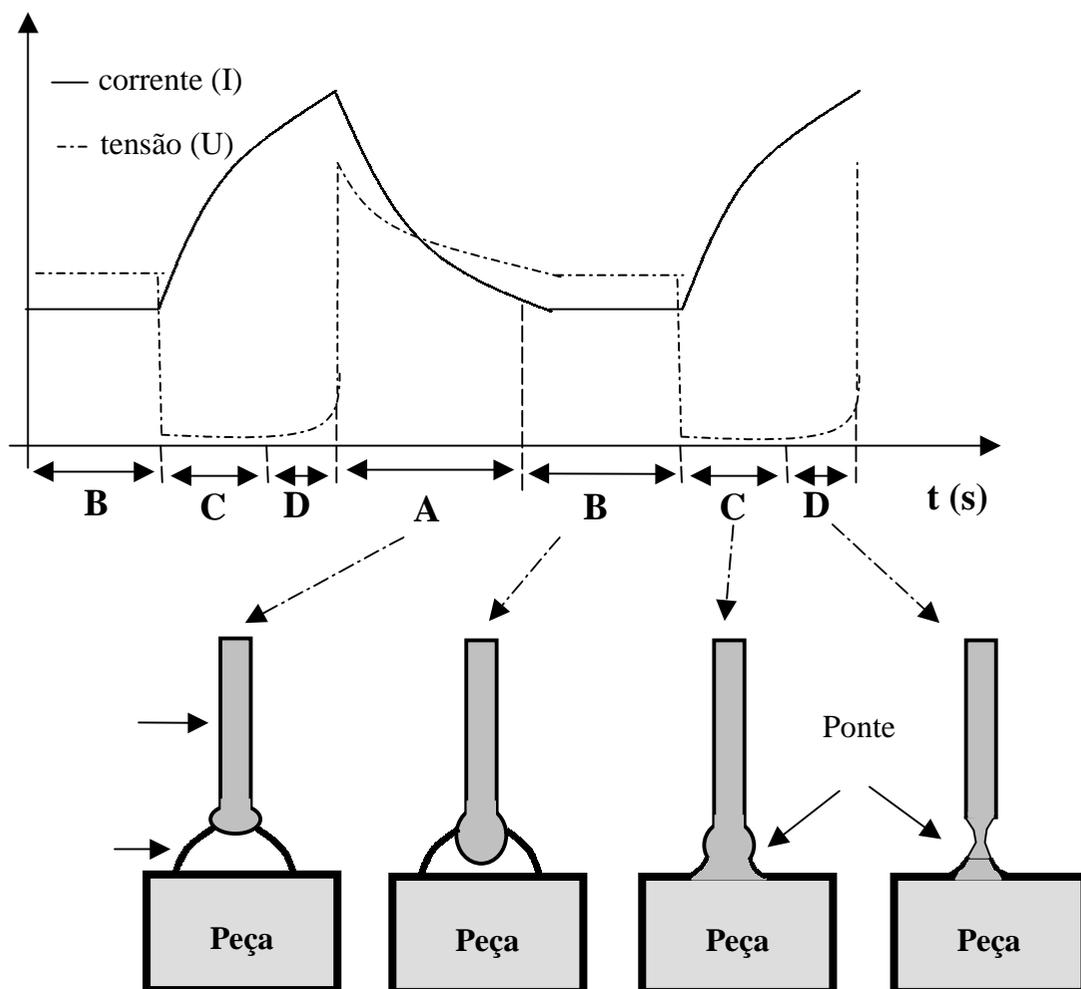


Figura 2.5 – Sequência de separação da gota metálica na transferência por curto-circuito.

A regularidade da transferência metálica está condicionada a um equilíbrio entre a velocidade com que o eletrodo é introduzido no arco e a taxa de formação e transferência das gotas à poça de fusão (taxa de fusão do eletrodo).

No processo por curto-circuito, a regularidade do processo de soldagem, bem como a formação de salpicos [8], estão fortemente relacionados à indutância de saída. Alguns equipamentos de soldagem permitem o ajuste do valor dessa indutância através da utilização de “taps”. Entretanto, para se obter um melhor resultado é primordial o ajuste contínuo do valor da indutância.

O ajuste contínuo da indutância não evita a ocorrência de salpico, apenas contribui para achar o ponto de operação, onde os mesmos são minimizados.

De acordo com a literatura [9,10] e observações práticas, os salpicos ocorrem freqüentemente no momento em que a gota toca a peça e durante a reignição do arco, Fig. 2.6. Quando a gota está na iminência de tocar na peça, a forma com que o arco distribui-se sobre a gota pode fazer com que a força eletromagnética (Fig. 2.2) atue no sentido de empurrar a gota para cima [7,11], projetando-a para fora da região da poça metálica dependendo do valor da corrente. Além disso, a passagem de corrente pela pequena área inicial de contato da gota com a peça, causa uma elevação pontual de temperatura e, conforme o valor da corrente, pode ocorrer à evaporação de metal fundido, provocando micro explosões. Estes dois eventos são apontados por gerar os salpicos de maior volume.

Durante a reignição do arco é descrito que são produzidos os salpicos finos, sendo apontados os fatores abaixo listados como principais causadores dos mesmos.

- Máxima densidade de corrente devido ao elevado valor da corrente e da pequena área da ponte, formada pelo metal fundido, entre a ponta do eletrodo e a peça. A elevada densidade de corrente provoca um superaquecimento do metal fundido com conseqüente explosão, que acaba expulsando parte do metal fundido em forma de salpicos.
- Grande pressão sobre a poça metálica, logo após a reabertura do arco com o rompimento da ponte, causada pela alta densidade de corrente passando por uma pequena região gasosa.
- Máximas forças eletromagnéticas, devido ao elevado valor da corrente e da pequena área da ponte.
- Força de escoamento muito grande, devido à gota estar toda em contato com a peça.

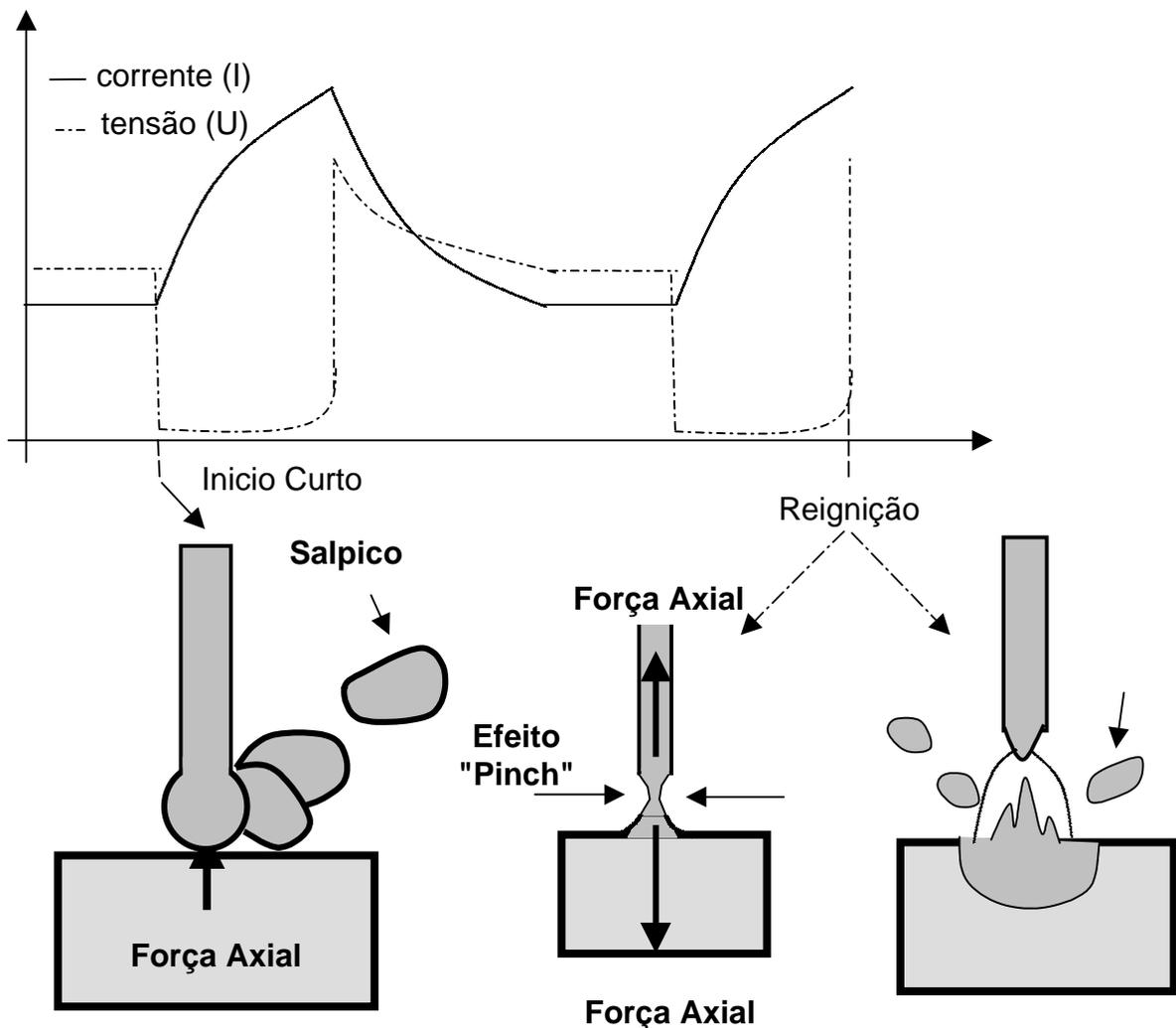


Figura 2.6 – Detalhe da transferência quando ocorre o curto-circuito.

Deve-se levar em consideração, que estas explicações tem como base um modelo matemático que possui simplificações e limitações [7,11,12], existindo ainda outras forças não consideradas. Porém, experimentos indicam que o controle da corrente no sentido de reduzi-la, no instante que a gota toca a poça e quando ocorre a reignição, apresentam excelentes resultados com relação à redução de salpicos [9,10,13,14,15].

2.1.2 - O Processo MIG/MAG Pulsado

A transferência por projétil é obtida com a utilização de dois níveis de corrente de soldagem diferenciados, denominados corrente de base e corrente de pulso, cada qual com seu respectivo tempo de duração (tempo de base e tempo de pulso). A figura 2.7 mostra um oscilograma de corrente e tensão, obtido em uma soldagem

no processo MIG/MAG com imposição de corrente pulsada. Todas essas variáveis (fig. 2.8) devem ser ajustadas de forma a produzir a cada pulso de corrente uma gota metálica.

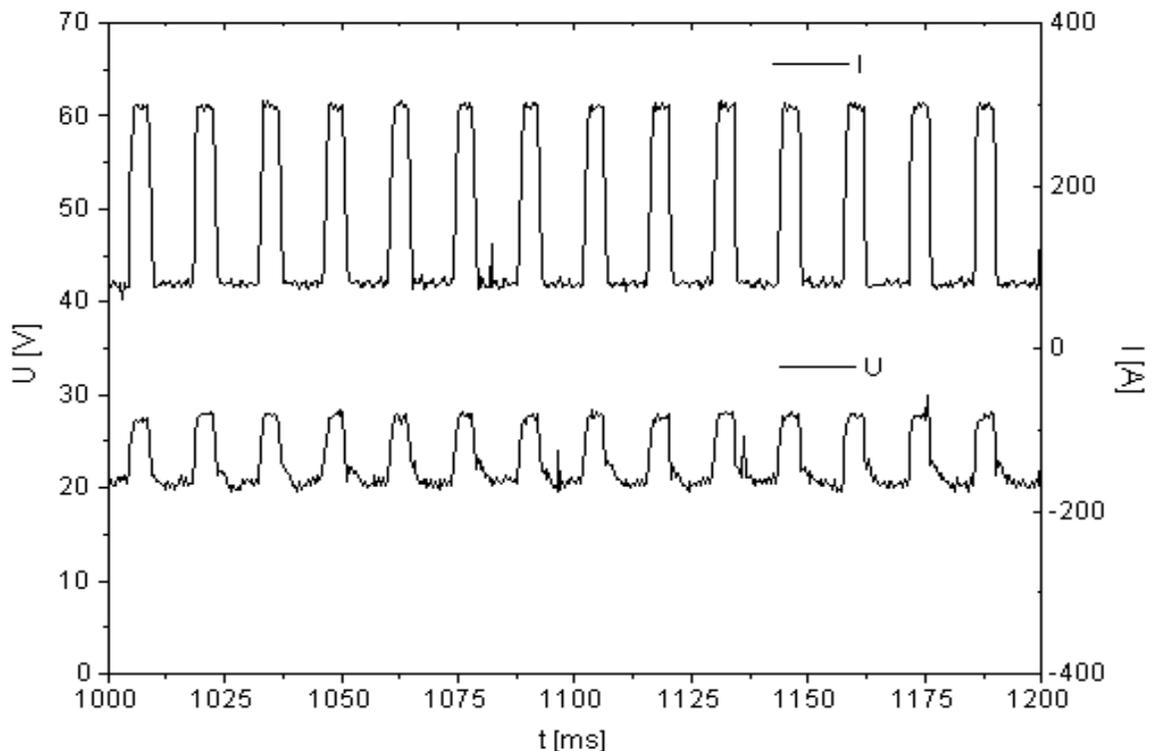


Figura 2.7 - Forma de onda da tensão e da corrente na soldagem com MIG/MAG pulsado com imposição de corrente.

Nesta filosofia, as funções das variáveis de soldagem são [16,17]:

- Corrente de pulso (I_p): esta deve possuir um valor acima de um nível mínimo (corrente de transição), de forma a promover o destacamento de uma gota. Esse valor de corrente depende basicamente do material e diâmetro do eletrodo e do gás de proteção.
- Tempo de pulso (t_p): depende do material e diâmetro do eletrodo e do gás de proteção, e deve ser ajustado juntamente com a corrente de pulso para produzir uma gota por pulso.
- Corrente de base (I_b): a mesma é ajustada para que se obtenha uma corrente média que equilibre a velocidade de fusão do arame com sua velocidade de alimentação. O valor da corrente de base é limitado em dois patamares, um

mínimo, abaixo do qual a manutenção do arco fica comprometida, ou seja, pode ocorrer a extinção do arco, e um máximo, acima do qual a transferência deixa de ser por projétil.

- Tempo de base (t_b): este deve ser ajustado conforme o diâmetro de gota pretendido de maneira que a soma do mesmo com o tempo de pulso, garanta a fusão de uma quantidade suficiente de arame para formá-la.

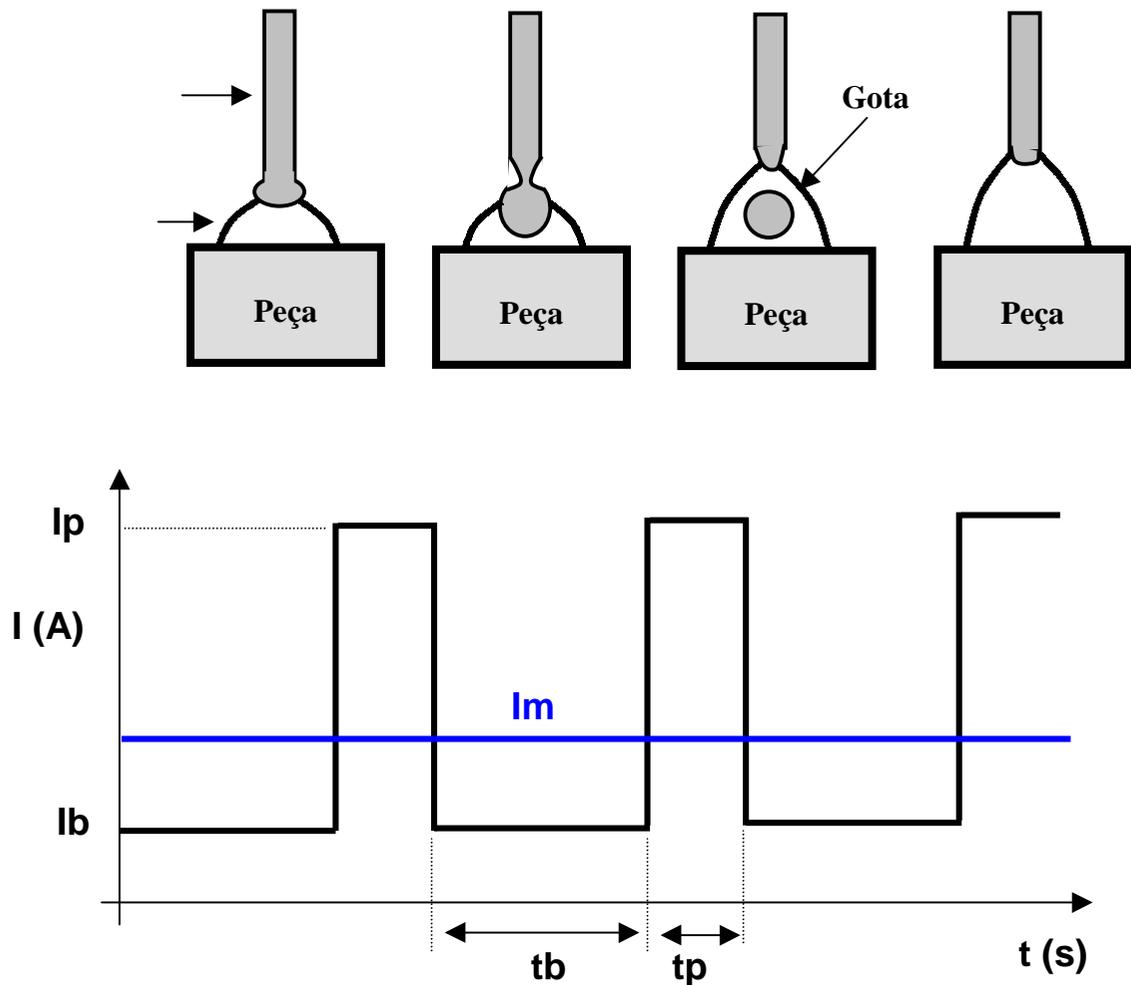


Figura 2.8 - Detalhe da transferência no pulsado.

A corrente de pulso e o tempo de pulso, são denominados parâmetros de destacamento de gota. A combinação adequada dessas duas variáveis gera um conjunto de forças que ocasiona o destacamento da gota. Deve-se observar que as mesmas permanecem inalteradas para uma dada situação de soldagem, pois estão atreladas às características do eletrodo e gás de proteção.

A soldagem com corrente pulsada tem o objetivo de produzir a transferência de uma gota de metal fundido por pulso. Desta maneira obtém-se uma transferência

metálica uniforme, mesmo com baixo aporte térmico (baixos valores de corrente média) e um melhor controle sobre a quantidade de material depositado na peça.

Este modo de transferência foi desenvolvido primordialmente para não haver contato físico entre o eletrodo e a peça. Na prática, se não houver a realimentação do processo, é muito difícil de se evitar totalmente o contato físico (curto-circuito). Este fato deve-se, basicamente a forma de onda de corrente ser imposta, ou seja, a mesma não sofre variações durante a soldagem, como ocorre quando se solda com o MIG/MAG convencional usando o controle de tensão. Desse modo, como a taxa de fusão é fundamentalmente dependente da corrente para uma dada condição de soldagem (distância entre o bico de contato e a peça, gás de proteção, tipo de arame eletrodo, material de base, etc ...), variações da condição de soldagem podem dar origem a curto-circuitos.

Com os curto-circuitos, além do surgimento de salpicos, o arco pode extinguir totalmente e o arame embolar (se enrolar). Isso pode acontecer entre o bico de contato e a peça, ou no tracionador do arame, ou em ambos. Nos arames de alumínio esse fato é muito comum.

A fim de evitar estes inconvenientes, pode-se fazer a realimentação das variáveis de soldagem (aumentando ou reduzindo a corrente média ou a quantidade de arame), de forma a manter o equilíbrio entre a velocidade de fusão e a velocidade do arame. Assim, surgiram o modo misto e o controle externo.

O modo misto difere do pulsado com corrente imposta por controlar a tensão de pulso durante o tempo de pulso, no lugar de impor a corrente de pulso. Com isso, a corrente de pulso, e conseqüentemente a corrente média, tornam-se dependentes da tensão de pulso e da altura do arco. Esse mecanismo é utilizado como uma forma de controle sobre a taxa de fusão do arame, reduzindo a possibilidade de curto-circuito. Por outro lado, a corrente de pulso pode assumir valores que não provoquem mais o desprendimento de uma gota por pulso, causando uma anomalia na transferência.

O modo pulsado com controle externo [16] difere do modo misto devido à necessidade do usuário ajustar a tensão de referência do arco no lugar da velocidade do arame. Esta forma de controle fundamenta-se na relação que existe entre a tensão do arco e sua altura. Partindo-se desse princípio, o controle ajusta a velocidade do arame, de modo que a tensão de arco estabilize em um valor igual ao ajustado para a tensão de referência. Desta maneira, está-se ajustando indiretamente a altura do arco. Então, caso ocorra alguma variação da mesma,

consequentemente na tensão do arco, o controle irá atuar sobre a velocidade do arame até que a tensão seja restabelecida. Com isso, o arco volta à altura original, evitando eventuais curto-circuitos ou fusões do bico de contato. Contudo, um fator negativo é a variação no diâmetro da gota, causada pelas alterações da velocidade do arame.

Dentro desse contexto, também existem outras duas formas de se modificar a corrente média usando a tensão do arco como variável sensível. Uma delas é através da modificação da corrente de base. Todavia, o uso da mesma é um tanto limitado, pois a mesma possui um limite mínimo abaixo do qual o arco torna-se instável. Outra forma é através da alteração do tempo de base.

Mesmo que contornados estes problemas, a aplicação em campo do processo pulsado é um outro ponto de dificuldade, principalmente devido a grande quantidade de variáveis a serem ajustadas e a falta de informações que relacionem estas variáveis em vasta gama de aplicações (vários tipos de eletrodos, material de base, gases, posições de soldagem, etc.), aliada ainda a falta de preparo da grande maioria dos soldadores, que por não conhecerem este processo, acabam criando vários obstáculos quanto a sua utilização. Em várias ocasiões, devido a trabalhos realizados pelo LABSOLDA além de suas fronteiras, observou-se que não somente os soldadores desconhecem este processo, mas também, muitas vezes há uma falta de entendimento, por parte de seus supervisores, do que é o PULSADO e a que se destina.

Com o objetivo de diminuir o grau de complexidade no ajuste das variáveis de soldagem, pode-se utilizar o conceito do MIG/MAG Pulsado Sinérgico. Este termo foi usado pela primeira vez pelo The Welding Institute no final da década de 70 para descrever um método particular de controle do processo MIG/MAG pulsado [18].

Uma proposta de definição de MIG/MAG Pulsado Sinérgico foi submetida ao IIW [18], que estabelece:

"Controle Sinérgico abrange qualquer sistema (aberto ou fechado) no qual um parâmetro de pulso de corrente significativa (ou velocidade de arame correspondente) é compensada de tal forma que uma condição de equilíbrio é mantida por uma faixa de velocidades de arame (ou níveis de corrente média)."

Resumidamente, pode-se dizer que o controle sinérgico tem como finalidade o ajuste automático das variáveis de soldagem de forma predeterminada, a partir de um conjunto mínimo de informações de entrada.

Dutra [16] apresenta algumas formas de se obter o controle sinérgico e descreve uma metodologia para determinação da constante de destacamento de gota (lp^{2*tp}), bem como, do equacionamento que relaciona a corrente com a velocidade de arame.

2.1.3 - O Processo MIG/MAG com Duplo-Arame

O processo MIG/MAG com dois arames caracteriza-se pela formação de um par de arcos elétricos entre uma única poça fundida e a extremidade de dois eletrodos consumíveis. Comparativamente à soldagem MIG/MAG convencional, as principais diferenças são caracterizadas pela maior taxa de deposição de material, possibilidade de soldagens com velocidades de deslocamento mais elevadas e menor aporte térmico sobre a peça, este último como conseqüência da utilização de velocidades de soldagem mais altas [6].

O processo apresenta duas variações principais: *MIG/MAG Duplo Arame Potencial Único* (fig 2.9) e *MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados* (fig 2.12). Na primeira, os eletrodos são submetidos ao mesmo potencial elétrico, uma vez que ambos estão em contato elétrico no bico da tocha. Nessa configuração pode-se empregar uma ou duas fontes de potência para a realização das soldagens. Na segunda, os eletrodos são isolados eletricamente e os arcos são mantidos por duas fontes de soldagem separadas. Uma vantagem dessa última configuração é a possibilidade de se atuar de forma independente sobre os parâmetros de soldagem de cada arco elétrico, conferindo-se funções distintas a cada um deles.

No sistema denominado potencial único, os arames podem ser conectados a uma única fonte de potência ou até mesmo a duas fontes, ficando assim sob o mesmo potencial elétrico. No entanto, quando se trata de uma única fonte de potência, essa deverá ser capaz de fornecer corrente suficiente para fundir ambos os arames simultaneamente, conforme a taxa de deposição de material requerida. Isso determina que a fonte de soldagem deverá fornecer um valor de corrente próximo do usado no arco submerso e, conseqüentemente, fica-se dependente de uma pequena quantidade de fornecedores de tais equipamentos.

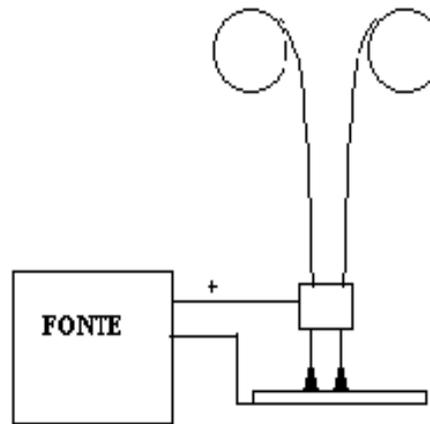


Figura 2.9 — Representação do sistema com potencial único.

Uma solução para isso é a utilização de duas fontes operando em paralelo (fig 2.10). Entretanto, isso faz surgir novos problemas. O primeiro surge quando se opera com corrente pulsada, onde a corrente das duas fontes deve pulsar ao mesmo tempo, caso contrário, como a corrente é dividida nos dois arames, cada um teria, teoricamente, a metade da corrente de pulso, prejudicando o destacamento da gota. Além disso, a não ocorrência dos pulsos ao mesmo tempo, faria com que os arames recebessem mais de um pulso de corrente em um mesmo período de transferência. Para se evitar tais problemas, existe a necessidade de um sincronismo entre ambas (fig 2.11).

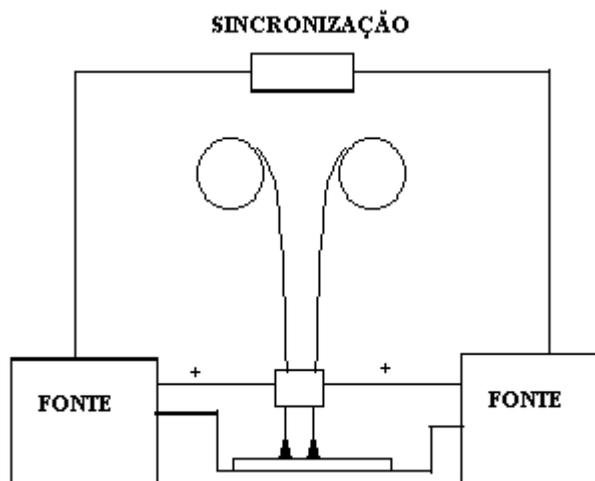


Figura 2.10 — Representação do sistema com potencial único empregando duas fontes de potência.

O segundo problema surge quando se opera com controle de tensão. Neste caso, apesar de não ser necessário um sincronismo, poderá haver um grande desequilíbrio na corrente que cada uma das fontes fornece. Teoricamente, quando se conecta duas fontes de tensão em paralelo com o mesmo potencial, a corrente

deveria ser a mesma nas duas. Porém, na prática, devido a diferenças na calibração da tensão de cada fonte, bem como, diferenças de resistências dos cabos e conexões, tal desequilíbrio acaba ocorrendo.

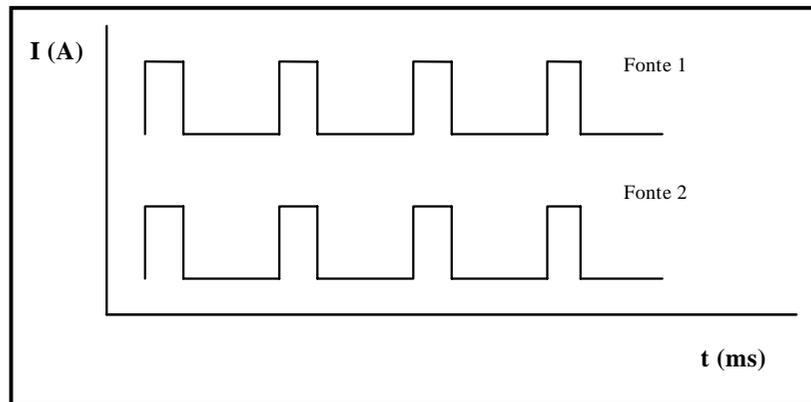


Figura 2.11 — Representação de oscilograma de corrente, retratando o sincronismo na pulsação das fontes (pulsos ocorrendo simultaneamente).

Outro fator negativo dessa configuração é a possibilidade da ocorrência de deflexões dos arcos, causado em decorrência da ação de forças eletromagnéticas que interagem entre eles (sopro magnético) devido a proximidade de ambos, o que pode levar à instabilidade do processo. Na tentativa de amenizar este inconveniente, alguns autores propõem a utilização de uma técnica que emprega a transferência metálica com corrente pulsada em ambas as fontes. Tal solução é aplicada no sistema com potencial isolado (fig 2.12). Nessa técnica, as fontes são ajustadas para operar com corrente imposta e interligadas para permitir uma defasagem sincronizada na pulsação de corrente (fig. 2.13).

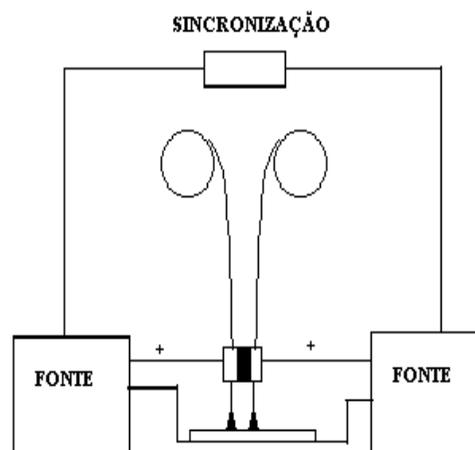


Figura 2.12 — Representação esquemática dos sistemas com duplo arame com potenciais isolados.

2001. Em tal data, presenciou-se uma demonstração de uma fonte de soldagem operando com essa modalidade. Os bons resultados observados em loco comprovaram a viabilidade da utilização deste processo. Este acontecimento animou a equipe do LABSOLDA, pois o empreendimento que estava sendo realizado, além de trazer mais informações sobre esta modalidade de soldagem, ainda pouco explorada, poderia resultar em sua utilização prática, aumentando o espectro de aplicação do processo MIG/MAG na soldagem de alumínio. Além disso, nesta ocasião estava-se definindo a possibilidade de um trabalho de doutorado com o tema em questão, sendo que este fato também colaborou para que o mesmo fosse iniciado.

Referente a este tema coube ao presente trabalho criar as condições operacionais e desenvolver formas de controle direcionadas a esta modalidade de soldagem.

Análise do processo MIG/MAG CA.

Nesta nova modalidade de soldagem, uma das maiores preocupações estava no momento que a corrente anula-se quando ocorre a mudança de uma polaridade para outra, causando a extinção do arco. No caso do TIG CA, a extinção pode ser definitiva ou não, dependendo principalmente de alguns fatores:

- da quantidade de óxido de alumínio sobre a peça;
- da dinâmica com que a corrente muda de uma polaridade para outra;
- da altura do eletrodo em relação à peça e;
- do diâmetro e composição do eletrodo;
- do gás de proteção.

Nos desenvolvimentos realizados anteriormente a este trabalho [21,22], referentes ao TIG CA, usando uma forma de onda retangular (figura 2.14a), que possui uma dinâmica de corrente elevada, quando o eletrodo passa da polaridade positiva para negativa, o arco reacende espontaneamente. Porém, no caso da passagem da polaridade negativa para a positiva, onde a peça torna-se o emissor de elétrons, existe a possibilidade de haver extinções do arco, as quais podem provocar um efeito denominado retificação (figura 2.14b), ou até mesmo a extinção definitiva. Para evitar que tais extinções ocorressem, foi criado um circuito de reignição do arco, que gera um pulso de alta tensão, na ordem de micro segundos,

entre o eletrodo e a peça na passagem da polaridade negativa para positiva, após a corrente se anular.

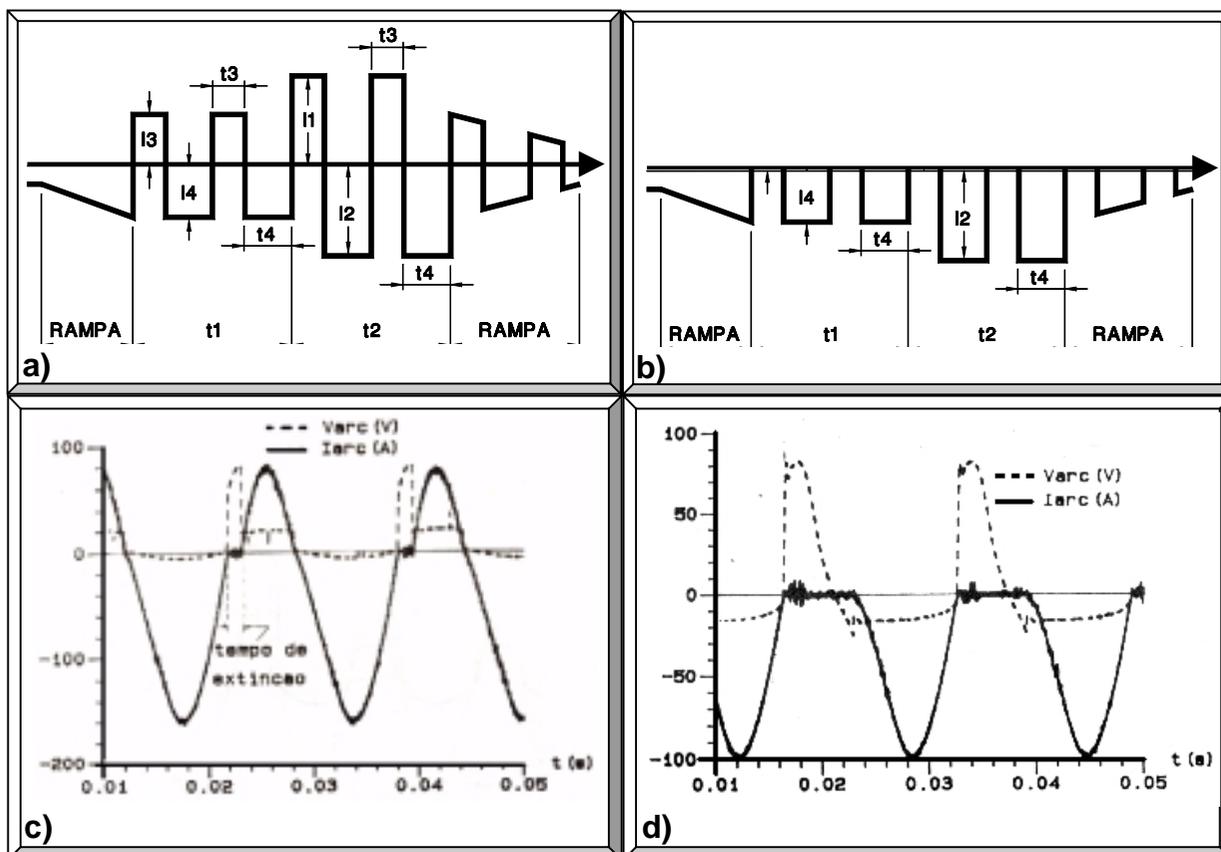


Figura 2.14 – Formas de onda utilizadas para soldagem TIG CA.

- Diagrama da forma de onda de corrente CA retangular com pulsação térmica.
- Ilustração do efeito de retificação na forma de onda apresentada em a).
- Corrente e tensão em uma soldagem com CA senoidal usando transformador.
- Efeito de retificação na forma de onda apresentada em c).

Alguns equipamentos mais simples utilizam apenas um transformador para obter a corrente CA, cuja forma de onda característica é senoidal [22], figura 2.14c. Como, neste caso, a dinâmica da corrente é bastante lenta para este tipo de aplicação, o arco, na grande maioria das vezes, não reacende espontaneamente na situação desfavorável (transição da polaridade positiva para negativa) e em alguns casos mesmo na situação mais favorável (transição da polaridade negativa para positiva). Isso pode causar a retificação apresentada na figura 2.14d, como também a extinção completa do arco. A solução mais comum para garantir a reignição do arco é a utilização de ignitores de alta frequência. Todavia, estes geram ruídos em alta tensão e frequência, que além de prejudicar o funcionamento de determinados

circuitos eletrônicos, principalmente os que utilizam microprocessador, podem causar danos a estes.

A diferença de estabilidade dos arcos, com as formas de ondas retangular e senoidal, demonstra a importância da resposta dinâmica da corrente, ou seja, quanto mais rápida a transição da corrente nas passagens de uma polaridade para outra, menor torna-se a dificuldade de reabertura.

Os resultados apresentados nas referências [9,19,20] são baseados na utilização da forma de onda de corrente apresentada na figura 2.15. A mesma apresenta duas características principais:

- Uma delas vem do MIG/MAG pulsado, que é o princípio de gerar uma gota por pulso. Neste caso, está-se referindo a soldagem com polaridade inversa (eletrodo positivo) que gera mais transferência de calor para a peça que na outra polaridade. Nesta forma de onda o pulso de corrente continua tendo como principal função o destacamento da gota.
- A outra, advém da soldagem com polaridade direta, (eletrodo negativo), que gera uma menor quantidade de calor na peça, comparada a gerada na soldagem com polaridade inversa. Assim, tem-se a possibilidade de atuar sobre o aquecimento da peça, através do ajuste de I_n (corrente negativa) e t_n (tempo que o eletrodo fica negativo). Por outro lado, quanto mais tempo o eletrodo fica na polaridade negativa maior é sua velocidade de fusão.

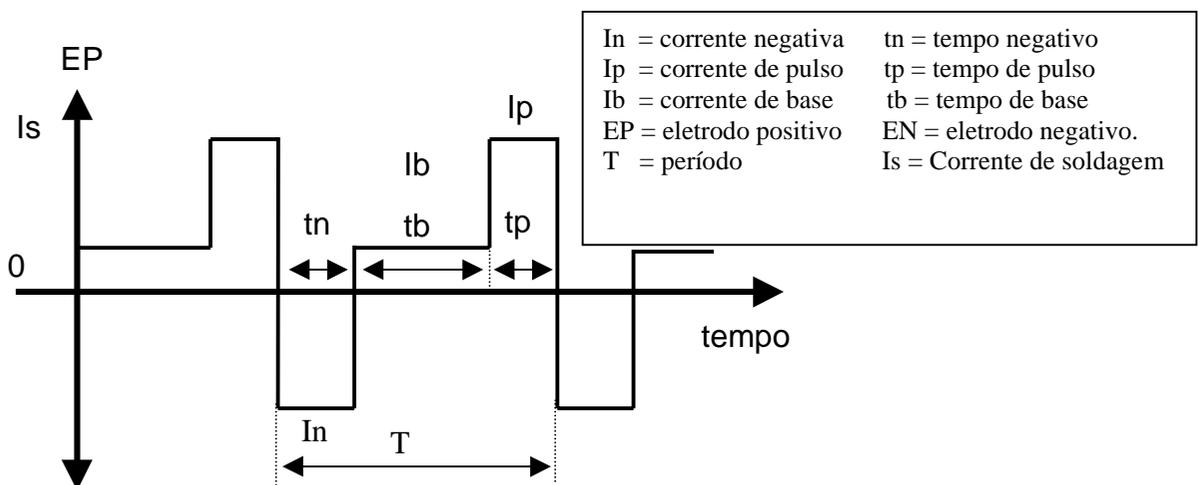


Figura 2.15 - Forma de onda de corrente aplicada no MIG/MAG CA.

O patamar intermediário, definido por I_b e t_b , tem a função balancear a energia entregue ao arco nas duas polaridades, já que t_p e I_p devem ser mantidos

constantes durante a soldagem, devido aos mesmos serem ajustados para promover o destacamento da gota.

Desta forma, através do ajuste da razão entre o período de eletrodo positivo e negativo, pode-se controlar a transferência de calor para a peça e a taxa de fusão do arame. Em [19] é apresentado um gráfico da velocidade de arame em função da corrente média (figura 2.16), que compara a soldagem CA com a pulsada na polaridade inversa. No caso da corrente CA, não faz muito fazer um gráfico em função da corrente média, como é apresentado na figura 2.16, a não ser que a parte negativa fosse rebatida para o lado positivo. De qualquer forma, apesar de não ter sido descrita a maneira com que a corrente média foi calculada, foi demonstrado que para um mesmo valor de corrente no MIG/MAG CA e no pulsado (polaridade inversa), tem-se em CA uma maior quantidade de material depositado e uma menor penetração, porém com um cordão mais convexo.

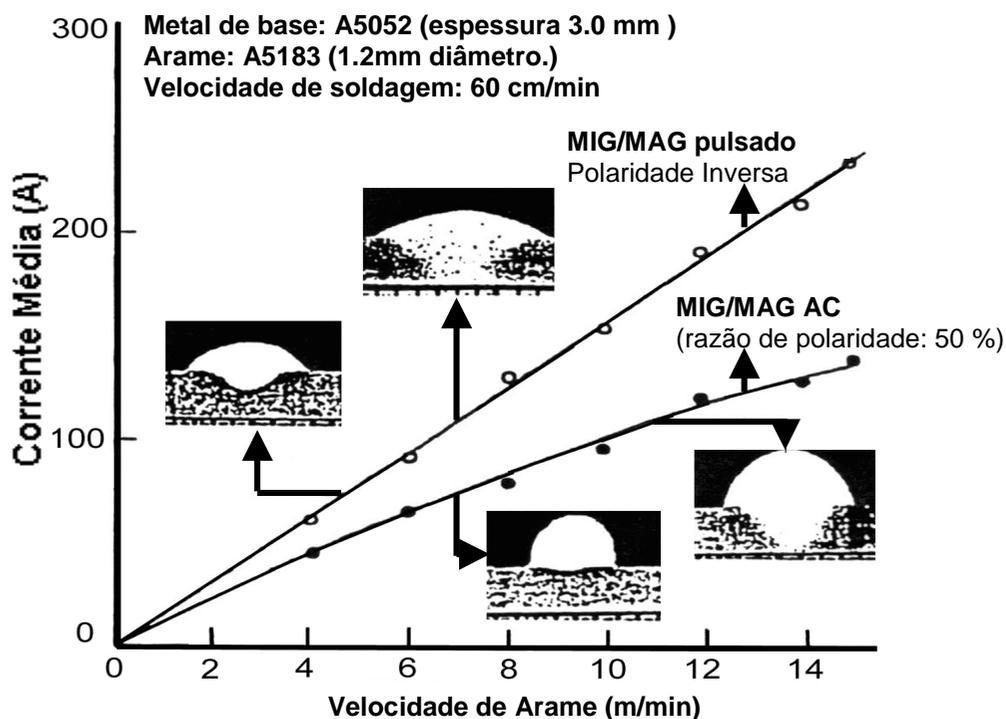


Figura 2.16 - Efeito da polaridade na penetração, na forma do cordão e na velocidade do arame [19].

Na análise feita acima foi identificada a necessidade de se ter uma dinâmica elevada na mudança da polaridade positiva para a negativa e um mecanismo para possibilitar a reabertura do arco, e também, desenvolver um controle que gere a forma de onda apresentada acima. A dinâmica elevada da corrente poder ser obtida

com a fonte de soldagem INVERSAL 300, projetada pelo LABSOLDA. Já a reabertura de arco e o controle da forma de onda foram objeto de estudo do presente trabalho e serão abordados nos itens 4.7.1 e 4.7.2.

2.1.5 – O Processo MIG/MAG Aplicado na Recuperação de Turbinas de Hidrelétrica.

Atualmente, a grande maioria das usinas hidrelétricas utiliza o processo de soldagem eletrodo revestido para recuperações de regiões da turbina erodidas por cavitação. Entretanto, à baixa produtividade do eletrodo revestido e o surgimento de arames ligados ao cobalto destinados ao processo MIG/MAG, levaram algumas empresas de geração de energia elétricas a o substituírem pelo MIG/MAG.

Estas empresas adotaram a modalidade de soldagem MIG/MAG convencional, por ser uma modalidade bastante difundida e de relativa facilidade de ajustes das variáveis de soldagem e, também, por possibilitar soldagem em diferentes posições. Entretanto, a quantidade de defeitos, principalmente em função do escorrimento da poça metálica, bem como a falta de procedimentos de soldagem adequados, acabam provocando a retirada de grandes quantidades do material depositado. Estes defeitos, além de aumentar o tempo total de reparo da turbina, continha um aspecto econômico importante, pois o custo do arme, estava na ordem de US \$100,00 por quilograma.

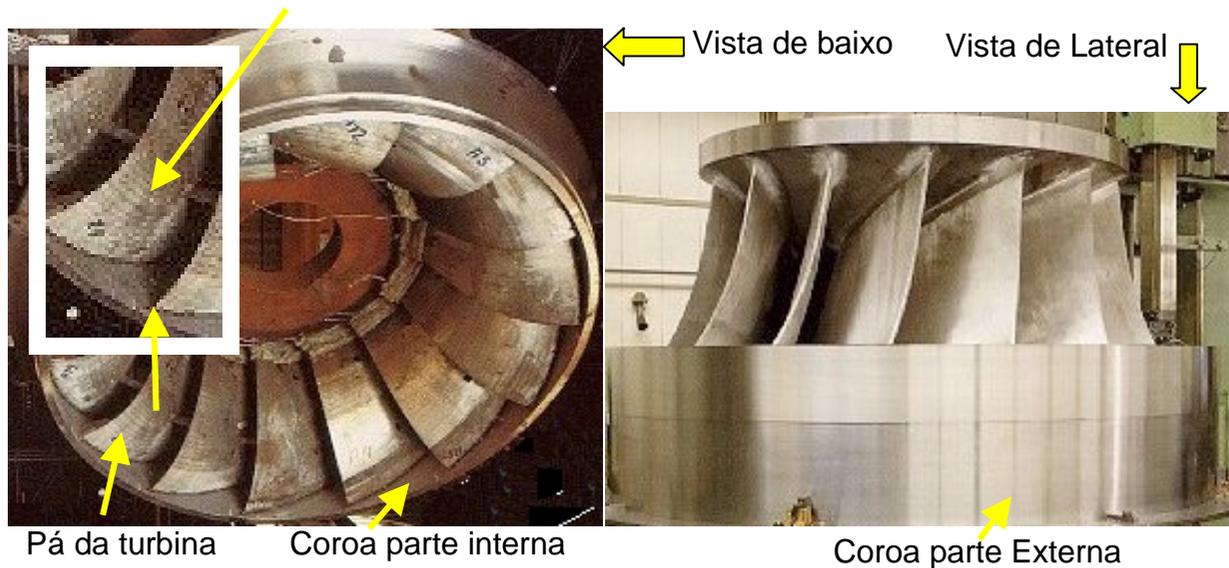
No sentido de melhorar o desempenho deste processo, visando aumentar a qualidade, diminuir o tempo de reparo e, também, reduzir a quantidade de material desperdiçado, é que se iniciaram os estudos referentes a este tema, em um trabalho cooperativo com uma empresa de geração de energia elétrica.

As regiões da turbina que sofrem erosão por cavitação, que devem ser recuperadas na forma original, podem ocorrer em diferentes posições da turbina, tanto na pá, quanto na coroa, exigindo do processo de soldagem a capacidade de soldar em qualquer posição. A figura 2.17a mostra uma foto de uma turbina do tipo Francis.

A operação de reparo consiste em preencher com solda as regiões cavitadas. Na figura 2.17b é apresentado o aspecto de uma região cavitada. Cada região cavitada é preparada previamente para que seja feita a soldagem. O preenchimento é feito através de vários passes de solda, um paralelo ao outro, sendo geralmente necessária mais de uma camada. Muitas vezes, são necessárias operações de

esmerilhamento para remover partes da camada soldada, devido ao aparecimento de defeitos de soldagem ou escolha inadequada das variáveis de soldagem. Para obtenção da forma original da turbina a superfície final da área soldada é usinada

Região de maior incidência de cavitação



por esmerilhamento, seguindo a forma delineada por gabaritos padrões.

a)



b)

Figura 2.17 –Turbina tipo FRANCIS.

a) Foto da turbina. b) Aspecto de uma região cavitada.

Os arames ligados ao cobalto são fabricados na forma tubular, devido aos mesmos possuírem uma série de elementos de ligas, impossibilitando a obtenção na forma sólida, fazendo com que seja utilizado uma maior velocidade de alimentação do arame comparado à usada no arame sólido. O arame tubular exige cuidados para

que a pressão aplicada nos roletes, que o desloca, não o deforme. Normalmente são utilizados roletes ranhurados para compensar a menor pressão nos roletes.

Com o intuito de melhorar o desempenho do processo MIG/MAG para esta aplicação, conforme descrito acima, foi realizada uma primeira tentativa com o MIG/MAG pulsado, devido ao mesmo garantir uma boa estabilidade do arco em diferentes posições de soldagem.

Os arames testados foram o Hidroloy e o Cavitec, mas constatou-se que o primeiro não se prestava para corrente pulsada, devido às características físicas de seu arco não produzir as condições necessárias para desprender a gota segundo os princípios do pulsado. Também ficou patente que o MIG/MAG pulsado promove um melhor acabamento do cordão e menor índice de porosidade, quando equiparado ao MIG/MAG com transferência por curto-circuito.

Entretanto, a produtividade (quantidade de material depositado por hora) ficou abaixo das expectativas, pois, acima de uma determinada velocidade de arame, a energia empregada gerava uma poça metálica muito fluída, provocando o escorrimento do material, situação que justamente deveria ser evitada.

Assim sendo, na perspectiva de aumentar a produtividade do MIG/MAG pulsado, concebeu-se a modalidade de soldagem denominada MIG/MAG pulsado com pulsação térmica. Esta foi delineada inspirando-se no processo TIG pulsado, que será abordado no item 2.2, com a finalidade de obter um melhor controle sobre a energia entregue ao arco, permitindo um maior controle da poça de fusão [23].

2.2 - O Processo TIG pulsado.

O TIG com corrente pulsada, a partir da década de 80, com a evolução das fontes de soldagem, foi sendo aprimorado e já há alguns anos consagrou-se como um dos processos mais adequados na soldagem de materiais com pequena espessura, podendo ser aplicado em espessuras menores que 0,5 mm.

No processo de soldagem TIG, o calor necessário para efetuar a solda tem origem em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo permanente de tungstênio e a própria peça a ser soldada (fig 2.18).

O efeito dessa forma de onda, sobre o cordão de solda, é ilustrado na figura 2.18, resultando num cordão escamado, que pode ser comparado a um cordão constituído por vários pontos de soldas alinhados, onde os pontos são formados no pulso de corrente.

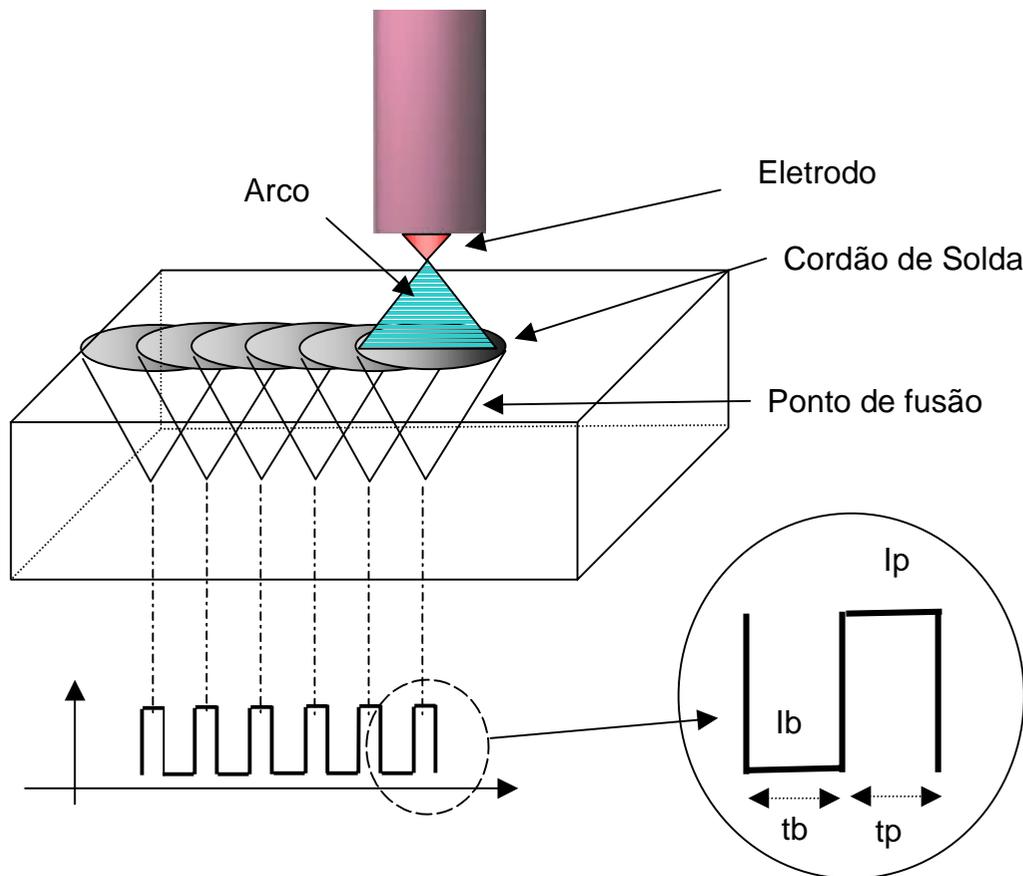


Figura 2.18) – Efeito da forma de onda pulsada sobre o cordão de solda.

O arco voltaico forma-se em meio a um gás inerte, que tem a função adicional de proteger da oxidação, tanto o eletrodo de tungstênio, quanto o metal fundido, além de facilitar a criação de um caminho ideal para a passagem da corrente de soldagem.

Neste processo, o objetivo do uso da forma de onda pulsada é distinta da usada no MIG pulsado. No MIG, a pulsação é destinada para controlar a transferência metálica, enquanto no TIG, a mesma tem como objetivo aumentar o controle sobre a poça de fusão.

No TIG, a corrente de pulso (I_p) e o tempo de pulso (t_p) são ajustados para fundir o material de base, de maneira a fornecer a penetração desejada. Por outro lado, a corrente de base (I_b) e o tempo de base (t_b) são ajustados visando à redução da corrente média ou eficaz, de maneira a diminuir o aporte térmico, o que resulta no melhor controle sobre a poça de fusão.

As principais vantagens do uso de corrente pulsada no processo TIG, apontadas pela literatura [24,25] são:

- a) Redução do aporte térmico;
- b) Maior controle da poça de fusão e da penetração;
- c) Menor distorção;
- d) Redução da zona termicamente afetada;
- e) A agitação da poça de fusão minimiza a ocorrência de porosidades;
- f) Redução da susceptibilidade a trincas a quente;
- g) Maior controle sobre a micro-estrutura;
- h) Possibilidade de uma estrutura de solidificação mais refinada;
- i) Maior controle sobre o cordão de solda e sua geometria;

Entretanto, o TIG com material de adição, quando comparado ao processo MIG pulsado, apresenta as seguintes desvantagens:

- a) Difícil mecanização, inviabilizando sua utilização em determinados tipos de juntas e em regiões de difícil acesso.
- b) Necessidade de parada para afiar o eletrodo.
- c) fora da posição plana o eletrodo fica mais susceptível a contaminação pelo material de adição.

2.3 - Sistema de Aquisição de Dados e Controle

A necessidade de aumento da produtividade e de uma repetibilidade de qualidade conduz a indústria a substituir as pessoas por máquinas em muitos tipos de tarefas. Entretanto, é muito difícil dotar as máquinas com as mesmas habilidades de um ser humano, pois este, ao executar qualquer tarefa, o faz de forma realimentada, praticando ações de controle pela sua observação e atuação. Então, para aumentar a eficácia da automatização, torna-se necessário conhecer a natureza dos fenômenos físicos envolvidos nos processos de fabricação, bem como, controlá-los. Para tanto, o sistema de aquisição de dados (SAD) é uma ferramenta indispensável a qualquer pesquisa desses fenômenos, que, também, pode atuar sobre o processo de fabricação com a inclusão da parte de controle (figura 2.19).

Atualmente existe uma série de sistemas de aquisição e controle destinados à operação de soldagem, com diferentes funções, tais como: guiar a tocha sobre a junta [26,27], determinar a geometria do junta [28], manter o comprimento do arco [29], controlar o tamanho da poça de fusão [30], monitorar as variáveis de soldagem [31,32,33,34,35], etc. No caso do presente trabalho, o sistema desenvolvido foi voltado a fazer a análise e controle das variáveis envolvidas na transferência metálica, o que permitiu e agilizou as pesquisas relativas aos fenômenos e processos de soldagem apresentados nos itens anteriores, e foi fundamental para realização dos desenvolvimentos dos métodos propostos.

Para garantir uma boa eficiência do SAD, foi necessário aprofundar os conhecimentos sobre o mesmo [36,37,38]. Na figura 2.19 é apresentado um diagrama básico que contém um bloco com os módulos que compõem o SAD e, também, outro bloco com os módulos necessários para realização do controle/comando do valor das variáveis do sistema.

A atuação sobre uma variável é definida, como comando se for um sistema em malha aberta, e como controle se for um sistema em malha fechada. A diferença entre os dois sistemas é que no malha fechada a variável é comandada em função do valor lido da própria ou de outra variável.

A função de cada módulo do bloco responsável pela aquisição (lado esquerdo da figura 2.19) é descrita a seguir:

- O *transdutor* é o módulo que está em contato com a grandeza física que está sendo medida. O mesmo gera um sinal proporcional ao valor da grandeza física, que pode ser mecânico, pneumático, elétrico ou outro. No caso do sistema de aquisição de dados os transdutores que mais interessam são os que geram um sinal elétrico.
- A *Unidade de Tratamento de Sinal (UTS)* tem a função de tratar (amplificar, filtrar, integrar, compensar, etc.) o sinal gerado pelo transdutor e, também, compatibilizá-lo com a interface de conversão de sinal analógico em digital.
- A *Interface de Conversão de Sinal Analógico em Digital*, transforma o sinal analógico gerado pela UTS em um sinal digital (números no sistema binário). Assim, o valor da grandeza física chega ao *computador*, que por sua vez o lê através de seus programas, interpretando-o e analisando-o.

Para, então, armazená-lo em disco, visualizá-lo no monitor de vídeo, utilizá-lo para gerar *ações de controle* (atuar sobre as grandezas físicas do processo em função do valor lido), etc. .

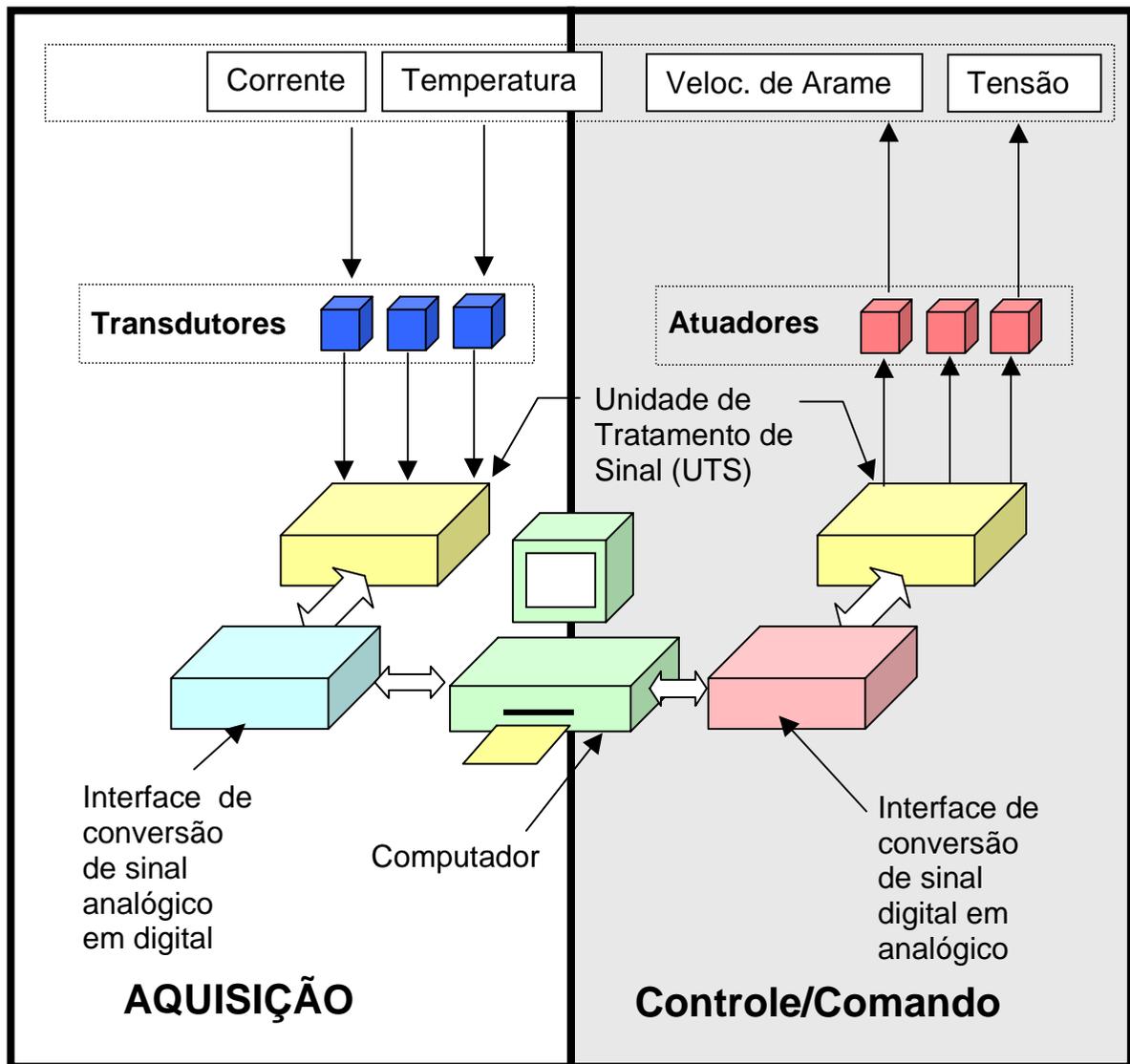


Figura 2.19 – Sistema de Aquisição e Controle.

No bloco responsável pelo controle/comando, no lado direito da figura 2.19, as ações de comando ou controle são dados numéricos, que percorrem o caminho inverso dos dados obtidos na aquisição. A função de cada módulo será descrita a seguir:

- A *interface de conversão de sinal digital em analógico* converte os dados numéricos gerados pelos programas do *computador* em sinais analógicos.

- A *Unidade de Tratamento de Sinal (UTS)*, tem praticamente a mesma função da apresentada para o bloco de aquisição, porém, o sinal a ser tratado é recebido da interface de conversão de sinal digital em analógico, que, também, o compatibiliza com módulo atuador.
- O *atuador* irá modificar o valor da grandeza física a partir do sinal analógico recebido da UTS.

Todo valor, referente a uma grandeza física, medido ou comandado contém erros, que são resultantes da soma dos erros introduzido em cada módulo percorrido pelo sinal da grandeza. Assim sendo, os módulos devem ser selecionados de acordo com os erros totais que serão admitidos. A análise da propagação de erros é uma tarefa complexa [36]. Assim, para determinação dos erros finais da grandeza física adota-se, na maioria dos casos, a calibração de todos os módulos do sistema como se fosse uma única unidade. Através da calibração os erros sistemáticos podem ser compensados, restando apenas os erros aleatórios e grosseiros.

A calibração do sistema como sendo uma única unidade pode ser feita basicamente de duas formas. Em uma das duas formas, valores padrões da grandeza física são aplicados no sistema que está sendo calibrado, os quais são correlacionados com os valores obtidos no mesmo. Um exemplo desta forma é a utilização de pesos padrões, com erros já determinados, para calibrar uma balança. Na outra forma, utiliza-se um sistema de medição padrão (SMP), que medirá o valor da grandeza que será aplicada no sistema que está sendo calibrado. Um exemplo deste modo de calibração é a utilização de uma balança padrão, com erros já determinados, para medir uma massa a ser utilizada na balança que se está calibrando. Tanto, os valores padrões, como o SMP devem ter, via de regra, erros dez vezes menores do que os erros finais que serão admitidos no sistema.

Em um SAD o sinal comandado ou medido contém, também, uma outra fonte de erro, que existe em função da resolução do conversor de sinal analógico em digital (CAD) e vice-versa (CDA). Assim, quando maior o número de bit de conversão menor será esta parcela de erro, ou seja, melhor será sua resolução. Por outro lado, quanto maior o número de bit maior o custo do conversor. Assim deve-se encontrar um equilíbrio entre o erro aleatório e o relativo à resolução do conversor em função do custo.

Um das características do presente trabalho é o desenvolvimento de um SAD para o processo MIG/MAG de soldagem, utilizando-se as próprias variáveis de

soldagem como grandezas que traduzem o comportamento do arco, com destaque para: corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás. Na figura 2.20 é apresentado um diagrama de blocos deste sistema.

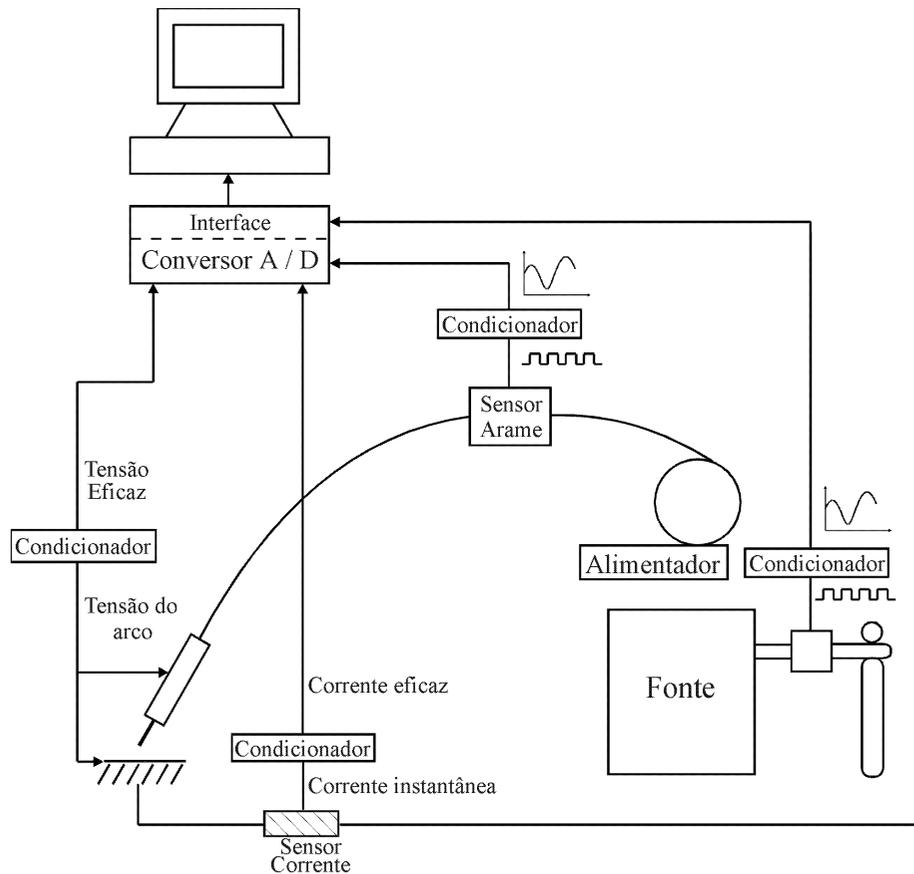


Figura 2.20 – Sistema de Aquisição para Soldagem.

No sistema de aquisição para soldagem, como em qualquer outro, faz-se necessário à determinação da natureza das variáveis envolvidas, o comportamento dinâmico das mesmas e os erros máximos permitidos, para que se possa especificá-lo de forma correta.

Conforme as especificações definidas para o sistema, é necessário o emprego de diferentes tipos de transdutores, unidades de tratamento de sinal (condicionador) e interfaces. A escolha de um ou outro dependerá de vários aspectos [36], tais como: sensibilidade, precisão, estabilidade, dinâmica, faixa de medição, erros, complexidade exigida da UTS para adequar o sinal que o transdutor produz, entre outras características.

Abaixo segue a descrição dos transdutores que foram utilizados neste trabalho para a aquisição das variáveis citadas acima, os erros dos instrumentos que

utilizam os mesmo são apresentados na tabela 3.1 do capítulo 3 (materiais e métodos):

a) *Transdutor de Efeito Hall para corrente*: é um dispositivo que pode ser utilizado, tanto para medir corrente alternada, como contínua. O mesmo possui uma resposta dinâmica excelente para aplicações em soldagem e ainda fornece sinal de saída isolado. Os transdutores comerciais possuem erros bastante aceitáveis para aplicação em soldagem, na ordem de 1% do valor medido. Este transdutor é utilizado no instrumento TC1, que mede também a tensão de arco.

Um outro sensor muito utilizado para medir a corrente de soldagem é o “SHUNT”, que é uma resistência de baixo valor em série com o circuito da corrente. Entretanto, devido o mesmo gerar valores de tensão na ordem de milésimos de Volts, os ruídos provocados pelo chaveamento das fontes de soldagem e variações de tensão devido a sua própria indutância, causadas pela ondulação da corrente (“ripple” intrínseco ao chaveamento), acabam interferindo no sinal de tensão gerado pelo “SHUNT”.

b) *Disco óptico para medir a velocidade de arame*: este gera um sinal digital em forma de pulsos, com frequência proporcional à velocidade do arame. Neste tipo de dispositivo, a resposta dinâmica é proporcional ao número de ranhuras do disco. A relação entre o valor da grandeza real e valor medido é descontínua e a resolução depende do número de ranhuras por volta, o mesmo também gera um sinal isolado. A figura 2.21 apresenta um dispositivo dessa natureza.

Um outro dispositivo para medir velocidade é o *tacogerador*, o qual gera um sinal de tensão analógico de acordo com a velocidade de rotação. Sua principal vantagem em relação ao disco óptico é a continuidade entre o valor da grandeza real e o valor medido. Entretanto, este tipo de dispositivo gera uma série de ruídos, que necessitam de filtragem, que pode prejudicar sua resposta dinâmica. Outras vantagens do disco óptico são: a não necessidade de conversão do sinal analógico em digital, pois o sinal já está na forma digital (0 e 1), a determinação da quantidade de arame consumido, que é feita através da simples contagem dos pulsos, e a necessidade de uma UTS mais simples do que a utilizada para o tacogerador. No caso do tacogerador a determinação da quantidade de arame consumido é mais complicada pois é obtida integrando-se a velocidade.

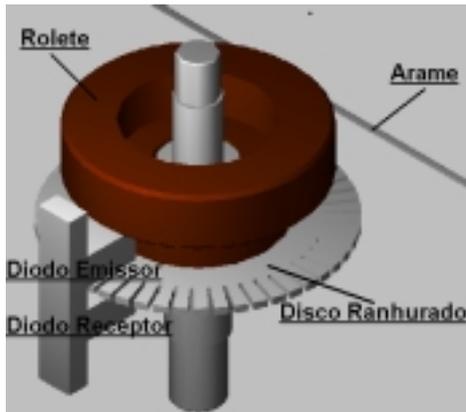


Figura 2.21 - Desenho esquemático do transdutor digital.

c) *Transdutores ópticos para medir vazão de gás*: um tipo de transdutor de vazão de gás, desenvolvido pelo LABSOLDA, é baseado numa turbina. O princípio de operação é semelhante ao de velocidade de arame. A vazão é obtida pela identificação do movimento das pás por um sensor óptico, o qual gera pulsos com uma frequência proporcional a velocidade de rotação, que é proporcional a vazão de gás. A vantagem desse dispositivo em relação a outros, destinados a este fim, é o custo. Uma das principais desvantagens é que o valor da vazão varia com a pressão, mas isto é inerente a todos os transdutores de vazão volumétrica, contrastando com aqueles de vazão mássica, mas que são incomparavelmente mais caros.

d) *Para tensão do arco*: não é necessário sensor, pois a grandeza já é um sinal elétrico. A mesma deve ser medida no ponto mais próximo possível do arco, para se evitar a queda de tensão ($i_s(t) \cdot R_c$) devido à resistência dos cabos (R_c) e a variação da tensão ($L_c \cdot di_s(t)/dt$) provocada pela indutância (L_c) dos mesmos cabos. Na figura 2.22 é apresentado um diagrama representando essa influência que os cabos exercem na saída da fonte de soldagem. Um exemplo disso é quando ocorre um curto-circuito no MIG/MAG convencional, ou a mudança da corrente da base para o pulso ou vice versa no MIG/MAG pulsado, momentos estes onde existem grandes variações de corrente, que causam variações bruscas na tensão de saída da fonte de soldagem resultantes da indutância. Caso não se tenha ciência disso várias são as situações que podem levar a interpretações erradas, ao se medir a tensão do arco na saída da fonte. Um exemplo é quando se está observando fenômenos que ocorrem com o arco através de sua tensão. Outro é quando se está fazendo um dado controle em função da tensão do arco.

Além disso, nos equipamentos de soldagem mais modernos, a tecnologia empregada no controle da corrente gera uma ondulação sobreposta à mesma (ΔI_s

figura 2.22b). Tal ondulação, devido à indutância dos cabos, gera também uma ondulação na tensão de saída (ΔV_s), que apesar de ser bastante inferior aquelas apresentadas no parágrafo anterior, em dadas aplicações não pode ser desprezada, como na observação do destacamento da gota pela tensão do arco.

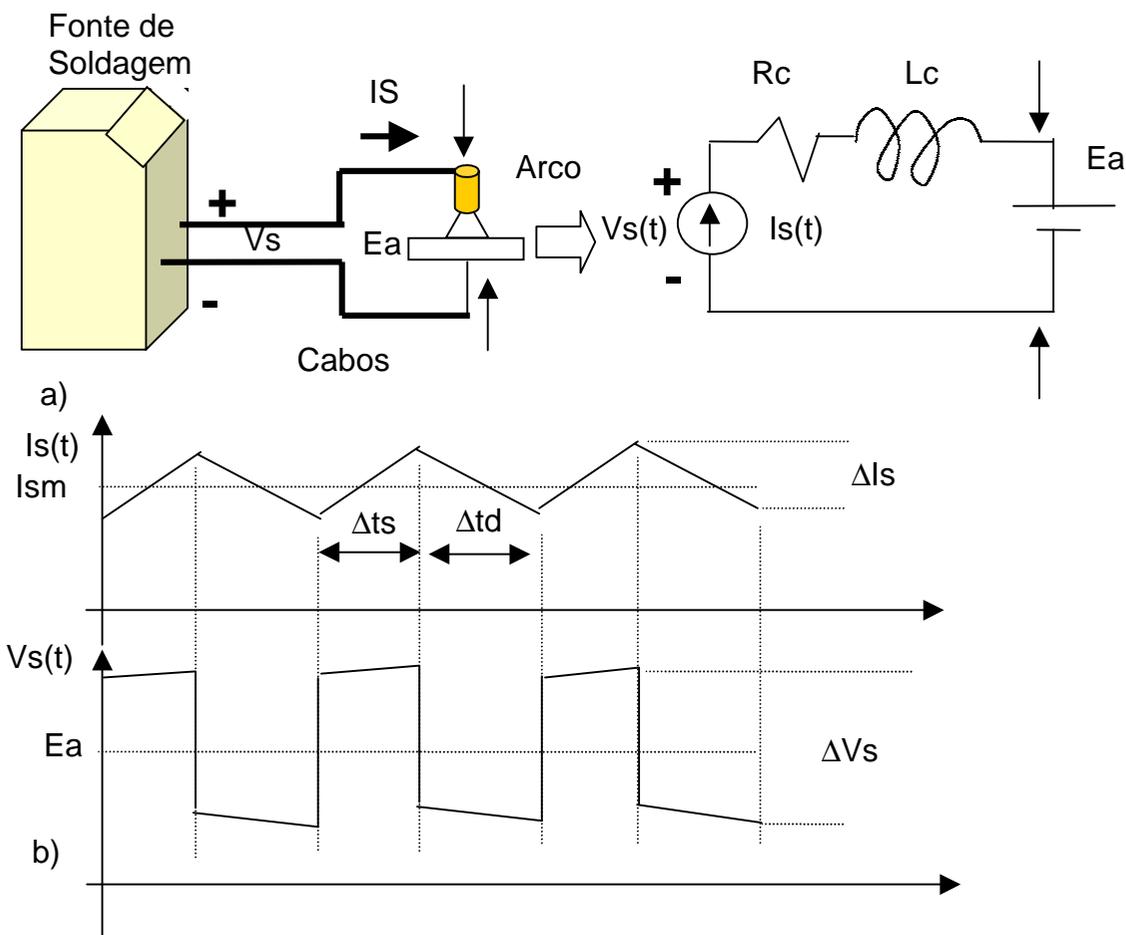


Figura 2.22 – Representação da influência dos cabos de saída da fonte de soldagem sobre a medição da tensão. a) diagrama esquemático, b) formas de onda da tensão e corrente de saída.

O valor da tensão de saída da fonte em função do tempo pode ser obtido com a equação 2.1 e a variação que a mesma sofre ΔV_s pode ser determinada usando-se a equação 2.2, considerando-se uma ondulação linear da corrente (ΔI_s) e $\Delta t_s \cong \Delta t_d$. Através da equação 2.2 percebe-se que quanto maior o valor de ΔI_s e da frequência de ondulação ($f = 1/[\Delta t_s + \Delta t_d]$), maior é a amplitude da ondulação da tensão sobre a indutância do cabo (ΔV_{Lc}), eq. 2.3.

Observando o que foi exposto, verifica-se que o ponto ideal para fazer aquisição é entre o bico de contato e a peça, pois a queda de tensão devido à

resistência ($R_c \cdot i_s(t)$) e a ondulação causada pela indutância ($L_c \cdot di_s(t)/dt$) não são somadas a tensão do arco (E_a). Todavia, na prática nem sempre é possível medir a tensão entre esses dois pontos, fazendo com que seja necessário considerar a influência dos cabos na tensão medida.

$$V_s(t) = E_a + L_c \cdot di_s(t)/dt + R_c \cdot i_s(t) \quad (2.1)$$

$$V_s = E_a + I_{sm} \cdot R_c \pm \Delta I_s \cdot (L_c / \Delta t_s + R_c/2) \quad (2.2)$$

$$\Delta V_{Lc} = L_c \cdot \Delta I_s / \Delta t_s \quad (2.3)$$

A queda de tensão sobre a resistência R_c pode ser compensada determinando-se o valor da resistência dos cabos, já a tensão V_s pode ser filtrada para suprimir suas variações. Entretanto, se deve considerar que os filtros reduzem a resposta dinâmica e introduzem atrasos no sinal medido, podendo mascarar variações da tensão do arco devido a fenômenos que deveriam ser identificados, por exemplo, o destacamento da gota.

Dentre os sinais analisados, a corrente e a tensão é que estão mais intimamente ligados ao comportamento do arco.

Para o controle da transferência é necessário se observar os valores instantâneos das duas, já com relação à estabilização do arco, como no controle externo, pode-se tomar como referência o valor médio ou eficaz.

Desta forma, a unidade de tratamento da corrente e da tensão deverá fornecer os valores instantâneos, médios e eficazes. No caso da tensão do arco, esta também deverá providenciar o isolamento galvânico da mesma para evitar problemas de terra comum. Existem várias situações que podem apresentar problemas de terra comum, algumas situações são difíceis de serem identificadas.

Um exemplo ilustrativo de terra comum entre equipamentos, que ocorre muito na prática, é quando a mesa de soldagem está aterrada, a saída positiva da fonte de soldagem ligada na mesa, a UTS da tensão não é isolada e o micro-computador está aterrado (fig. 2.23). Geralmente o borne negativo da leitura da tensão está ligado ao terra da fonte de alimentação interna da unidade de tratamento de sinal, e o terra da fonte de alimentação está ligado ao terra interno do micro através do cabo de conexão. Assim, caso o micro esteja aterrado na rede elétrica, tem-se um curto na saída da fonte de soldagem através do aterramento, devido ao terra interno do micro estar ligado ao seu gabinete e a mesa de soldagem estar aterrada. Essa

situação causa danos a todos os instrumentos e equipamentos por onde a corrente irá circular (linha vermelha pontilhada da figura 2.23), danificando conexão, trilhas das placas de circuito impresso, circuitos integrados, etc. .

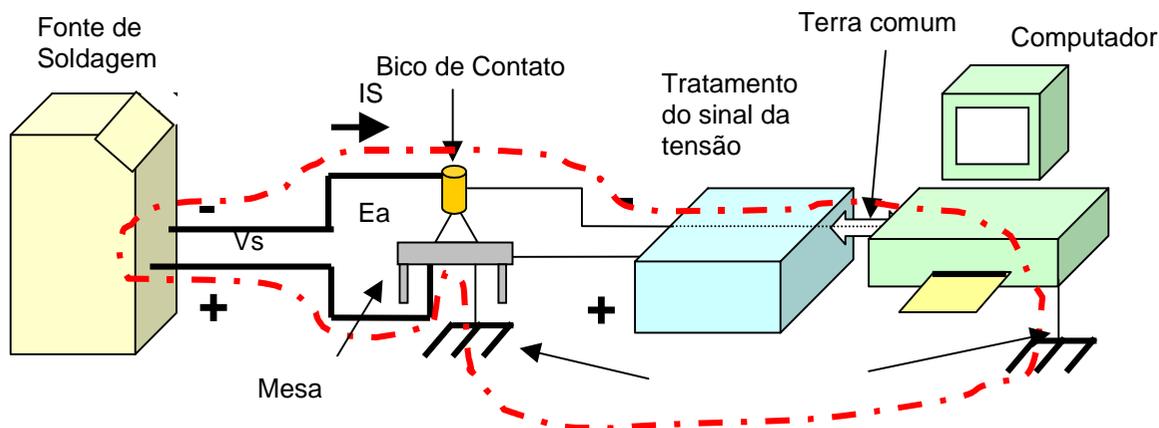


Figura 2.23 – Ilustração de uma situação de curto-circuito na saída da fonte de soldagem via aterramento da rede elétrica.

Como os sinais de corrente e tensão podem assumir qualquer forma de onda no tempo (fig. 2.4 e 2.7), é necessário considerar tal fato na obtenção do valor eficaz, pois alguns instrumentos de medida do valor eficaz são calibrados para uma forma de onda definida. Além disso, na obtenção do valor médio e eficaz é tomado como referência um período de tempo e são utilizados filtros, os quais acabam gerando uma defasagem entre o sinal real e o sinal tratado. Todos estes fatores devem ser observados no projeto das unidades de tratamento de sinais e dos algoritmos de controle.

2.4 - Controle Micro-Processado

O controle micro-processado é praticamente um sistema de aquisição e controle. Todavia, enquanto este último é mais voltado ao tratamento de sinais, com possíveis ações de controle, o controle micro-processado é um sistema mais compacto, destinado a exercer o controle sobre uma ou mais grandezas físicas, a partir de regras pré-estabelecidas.

Os desenvolvimentos que foram realizados, em grande parte, envolveram a utilização de controle ou comando de variáveis de soldagem. Através da análise realizada nos itens anteriores foi possível perceber que a soldagem é um processo relativamente complexo. Assim sendo, o bom senso conduziu a utilização de

algoritmos para fazer o controle e gerenciamento das informações pertinentes a cada aplicação. Por exemplo, a soldagem por curto-circuito com controle de tensão tem uma vasta abrangência, ou seja, pode ser utilizada em várias aplicações. Cada aplicação, do ponto de vista do controle, tem requisitos diferentes, os quais definem como deve ser o comportamento do processo, na abertura do arco, durante a solda, entre outros. Todo esse conjunto de fatores define as dinâmicas das variáveis e como o arco deve reagir nos momentos de instabilidades. No MIG/MAG pulsado, devido ao maior número de variáveis, a quantidade de requisitos torna-se maior e com o duplo-arame fica maior ainda. De uma forma geral, quanto mais os processos são aprimorados, maior é o número de variáveis para serem ajustadas.

Quando são elaborados circuitos analógicos para atender uma grande quantidade de requisitos, os mesmos ficam complexos e muitas vezes impraticáveis. Além disso, qualquer alteração em alguma função representa um reprojeto dos circuitos. Nesse tipo de situação, a utilização de sistemas micro-processados apresenta-se como uma opção muito vantajosa, pois os requisitos, as funções e alterações são implementados de forma mais simples através de algoritmos.

O controle micro-processado foi de fundamental importância para a condução dos trabalhos devido ao grau de complexidade dos controles desenvolvidos. Para otimizar os desenvolvimentos dos algoritmos de controle, aliaram-se técnicas de engenharia de "software" [39,40,41], com o intuito de facilitar a implementação dos novos métodos de controle do arco voltaico. Outro aspecto importante obtido com ela é a facilidade de se fazer atualizações.

Na implementação de programas, um dos aspectos importantes é a utilização de uma metodologia de abordagem do problema do ponto de vista computacional, a fim de se obter módulos de programa que facilitem a evolução, a reutilização, a manutenção e uma série de outras características que estão ligadas a metodologias de concepção de "software" e de sistemas.

A utilização das ferramentas de análises aplicadas à concepção de "software", além de ajudar no melhor entendimento do comportamento do sistema, também, permite que o "software" seja planejado para sofrer alterações e inclusões de novas funções, bem como, possibilita a utilização de funções já desenvolvidas por outros projetistas. Isso é importante para melhorar métodos de controle já desenvolvidos e criar novos métodos.

2.5- FONTES DE SOLDAGENS PARA O PROCESSO MIG/MAG.

As fontes de soldagem atingiram um elevado nível tecnológico em termos de eletrônica. Os avanços vão desde materiais aplicados na estrutura do equipamento a monitores de cristal líquido e módulos micro-processados de controle. As características que estas possuem influenciam diretamente sobre a soldagem [42,43,44]. Entretanto, com relação aos processos de soldagem, ainda existem muitos pontos a serem explorados para aumentar a performance dos mesmos, que estão ligados ao projeto e tipo de tecnologia empregada na fonte de soldagem.

Para este trabalho um dos pontos fundamentais, que a fonte de soldagem deveria possuir, era uma rápida velocidade de resposta da corrente de soldagem. Por esse motivo foi feita uma análise das fontes de soldagem transistorizadas, por possuírem, dentre as existentes atualmente no mercado, a maior velocidade de resposta de corrente. As fontes transistorizadas dividem-se em analógicas e chaveadas e serão abordadas nos próximos itens. Neste trabalho foram utilizados estes dois tipos de fontes de soldagem no desenvolvimento do curto-circuito controlado, para comparar o resultado obtido com cada uma delas.

2.5.1 – Fontes de Soldagem Transistorizadas Analógicas.

As primeiras fontes transistorizadas eram do tipo analógico, cujo diagrama da estrutura de potência é apresentada na fig. 2.24. Este tipo de fonte, devido aos transistores operarem na região linear, pode reproduzir qualquer tipo de sinal em sua saída [45], desde que esteja dentro de sua faixa de resposta.

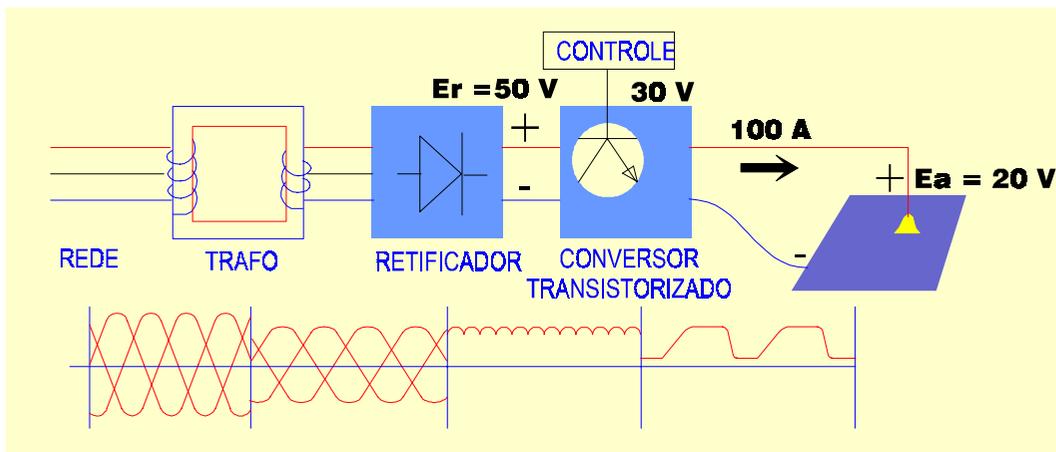


Figura 2.24 - Estrutura de potência de uma fonte analógica.

Uma das características de maior interesse nas fontes analógicas é a ausência de ondulação da corrente de saída, existentes nas fontes chaveadas, bem como, de ruídos gerados pelo chaveamento, sendo ideais para trabalhos de pesquisas.

Entretanto, atualmente as mesmas praticamente não são mais fabricadas devido ao seu baixo rendimento. O baixo rendimento é porque nesse tipo de fonte os transistores que controlam a corrente de saída (I_s) operam na região linear (fig. 2.24). Assim, para controlar a corrente de saída, os transistores devem absorver toda a diferença de tensão entre o arco (E_a) e a do retificador interno (E_r). E_r é praticamente a tensão a vazio. Desta forma, por exemplo, considerando-se uma tensão a vazio de 50 V, uma tensão de arco de 20 V e uma corrente de soldagem (I_s) de 100 A, sobre o transistor a tensão resultante é de 30 V. Como a corrente é a mesma no transistor e no arco, a potência perdida no transistor ($P = V * I = 30 * 100$) é de 3000 W. Nessa situação, a potência fornecida é 5000 W e a potência de arco é 2000 W, resultando num rendimento de 40%. Em outras situações o rendimento pode ser diferente. Porém, na maioria das aplicações, o rendimento não passa de 60%. A fim de reduzir essas perdas, foram desenvolvidas as fontes chaveadas, cujo rendimento geralmente supera 85%.

Como não existe um transistor que suporte toda essa perda, são utilizados centenas de transistores em paralelo e refrigeração a água dos mesmos.

2.5.2 - Fontes de Soldagem Transistorizadas Chaveadas.

As fontes de soldagem chaveadas [21, 44, 46, 47] se baseiam na utilização de técnicas de eletrônica de potência. A eletrônica de potência fundamenta-se na utilização do transistor como uma chave, com o intuito de diminuir as perdas no elemento semiconductor, que controla a corrente e, por conseguinte, aumentando o rendimento.

As estruturas de potência mais recentes empregadas nas fontes de soldagens utilizam transistores avançados, como MOSFET's e IGBT's. Tal fato permitiu um grande aumento da resposta dinâmica e redução de perdas no chaveamento, quando comparadas às usadas nas primeiras fontes chaveadas.

O chaveamento pode ser no primário do transformador, como mostra a fig. 2.25, o que deu origem ao nome fonte INVERSORA, ou no secundário fig. 2.26a e fig. 2.26b.

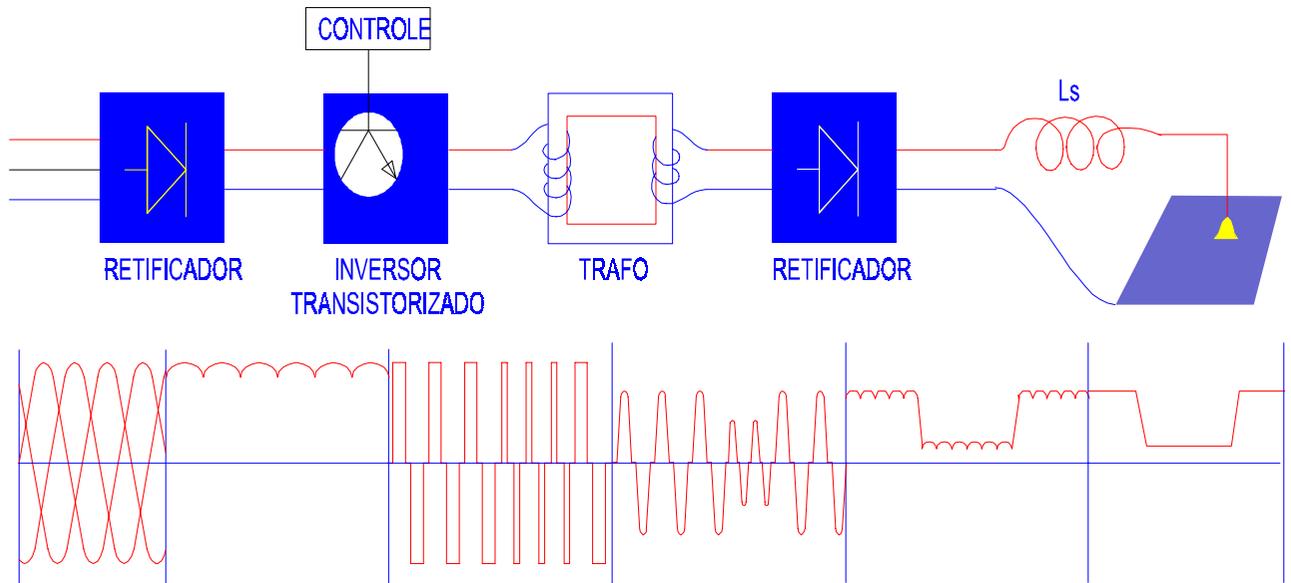
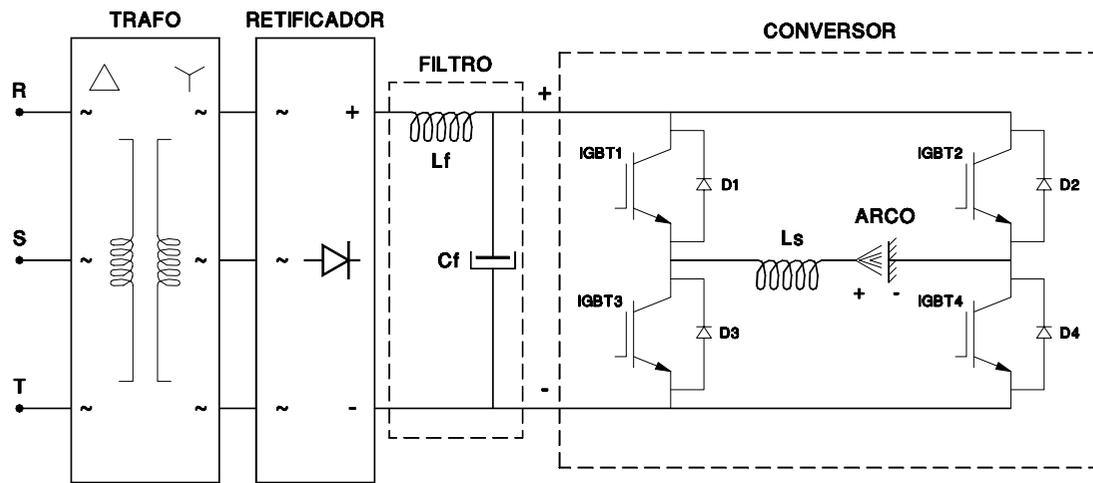


Figura 2.25 - Estrutura de potência de uma fonte chaveada no primário.

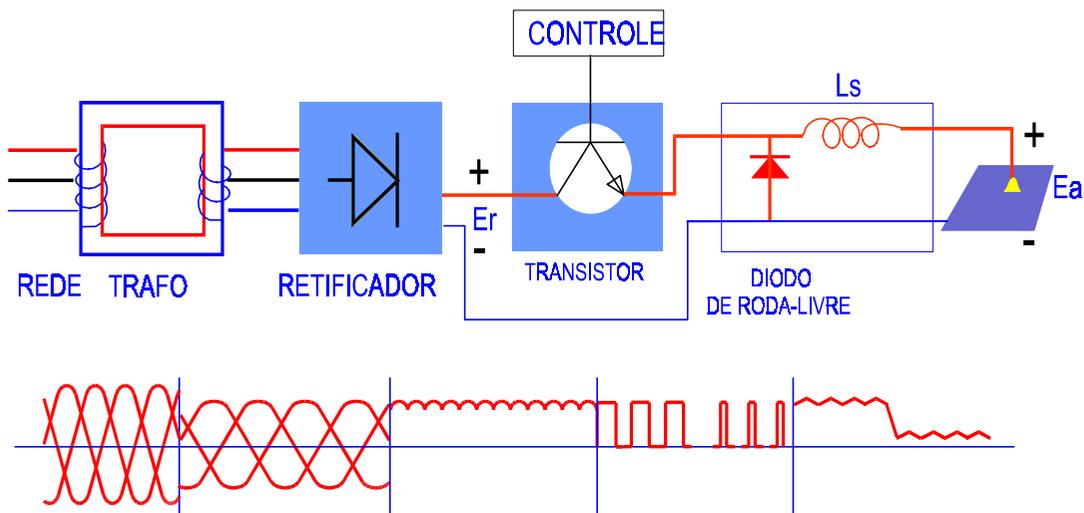
As fontes de soldagens chaveadas no secundário surgiram por primeiro do que as chaveadas no primário. Na estrutura básica das mesmas tem-se:

- Um transformador que reduz a tensão da rede a um nível adequado ao processo, tendo a função de fazer o isolamento da saída em relação à rede;
- Um retificador que transforma a tensão AC em DC;
- Um conversor que faz o controle da corrente e
- Um indutor de filtro de saída que limita a ondulação da corrente.

Na fig. 2.26a é apresentado um conversor de quatro quadrantes, que permite obter corrente alternada, já o conversor de um quadrante apresentado na fig. 2.26b, fornece apenas corrente contínua, contudo tem um custo bastante inferior, devido ao menor número de semi-condutores.



a)



b)

Figura 2.26 - Estrutura de potência de uma fonte chaveada no secundário.

a) conversor de quatro quadrantes, b) conversor de um quadrante.

As fontes chaveadas no primário (fig. 2.25), surgiram com o objetivo de reduzir o volume do transformador. Estas possuem:

- Um retificador de entrada que transforma a tensão da rede alternada em tensão contínua;
- Um inversor que transforma a tensão contínua em tensão CA de alta frequência e que também faz o controle da corrente de soldagem;
- Um transformador que faz o isolamento galvânico entre a rede e a saída da fonte e que, também, reduz a tensão a um nível que garanta a segurança do soldador;
- Uma segunda retificadora que transforma a tensão CA de alta frequência em tensão contínua e
- Um indutor de filtro para limitar a ondulação da corrente.

A maior vantagem do chaveamento no primário comparado ao chaveamento no secundário é a redução do tamanho do transformador, resultando em um menor volume e peso do equipamento. Também existe um leve aumento no rendimento, porque as perdas nos transistores no primário são menores que as dos transistores do secundário, devido a corrente do primário ser menor que a do secundário.

Alguns autores [14,44,48] descrevem que as fontes inversoras são mais eficientes do que as fontes que utilizam tecnologia de chaveamento no secundário. Entretanto, essas afirmativas não se confirmam. Na realidade existem fontes INVERSORAS mais eficientes que outras fontes, não pelo fato de serem INVERSORAS, mas por possuírem características diferentes, como novos modos de controle de arco, que também podem ser implementados em fontes chaveadas no secundário, o tipo de chaveamento utilizado não traz nenhum benefício adicional, apenas reduz volume e peso.

A técnica de chaveamento é uma forma de controle do transistor, onde o mesmo opera semelhante a uma chave liga e desliga, fig. 2.27. Como exemplo para entendimento desse controle, pode ser dado o controle de temperatura de um forno elétrico, onde um termostato liga as resistências do forno até que as mesmas atinjam a temperatura ajustada, fig. 2.28. Após isso, o mesmo desliga as resistências até que a temperatura caia a um nível abaixo desta. Percebe-se que nesse tipo de controle existirá sempre uma oscilação da temperatura em torno da desejada.

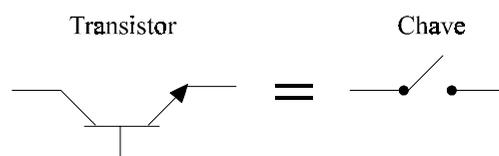


Figura 2.27 - Modelo idealizado do transistor em fonte de soldagem.

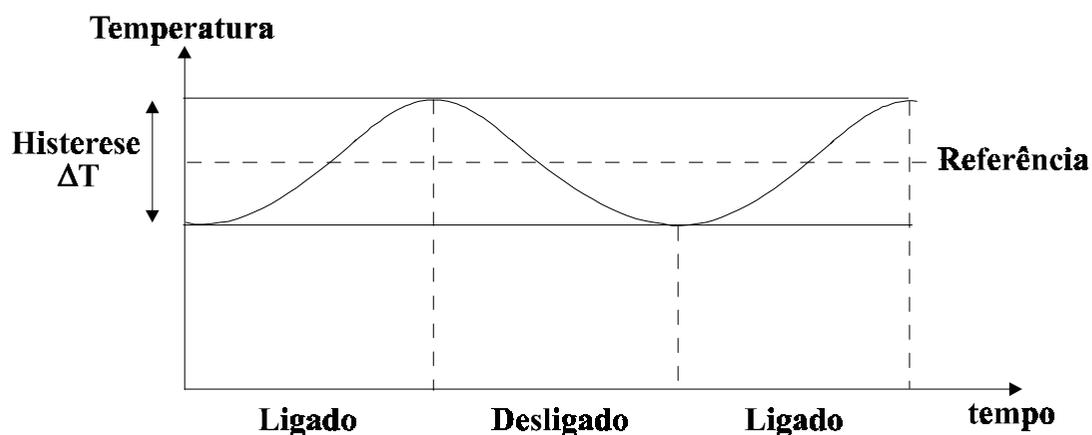


Figura 2.28 - Detalhe da ondulação da temperatura com controle tipo liga/desliga.

Nos equipamentos de soldagem que utilizam técnicas de chaveamento, o controle da corrente é semelhante ao exposto para o forno, conforme é apresentado na fig. 2.29. A velocidade de resposta e o nível da ondulação da corrente são pontos importantes no projeto de uma estrutura de potência destinada a fontes de soldagem, sendo que quanto menor a ondulação e maior a velocidade de resposta, tanto maior é o custo da estrutura. Na soldagem, uma ondulação em torno de 10 A é bastante aceitável. Alguns equipamentos, existentes no mercado, para reduzirem custos, permitem que a ondulação atinja valores superiores a 40 A .

Em determinadas aplicações, valores elevados de ondulação da corrente comprometem totalmente a estabilidade do arco. Como exemplo, quando se utiliza o processo de soldagem com corrente pulsada, a corrente de base em muitas situações deve ser baixa, em alguns casos, pode atingir valores em torno de 20 A. Deste modo, supondo uma ondulação de 40 A, mais ou menos 20 A em torno da de referência; quando a ondulação atingir -20 A em relação à de referência de 20 A, no arco a corrente será nula fig. 2.30, o que causará a extinção do arco. Além disso, em trabalhos de pesquisa relacionados a processos de soldagem, tais níveis de ondulação podem mascarar resultados, ocultar determinados fenômenos, em fim, trazer uma série de inconvenientes.

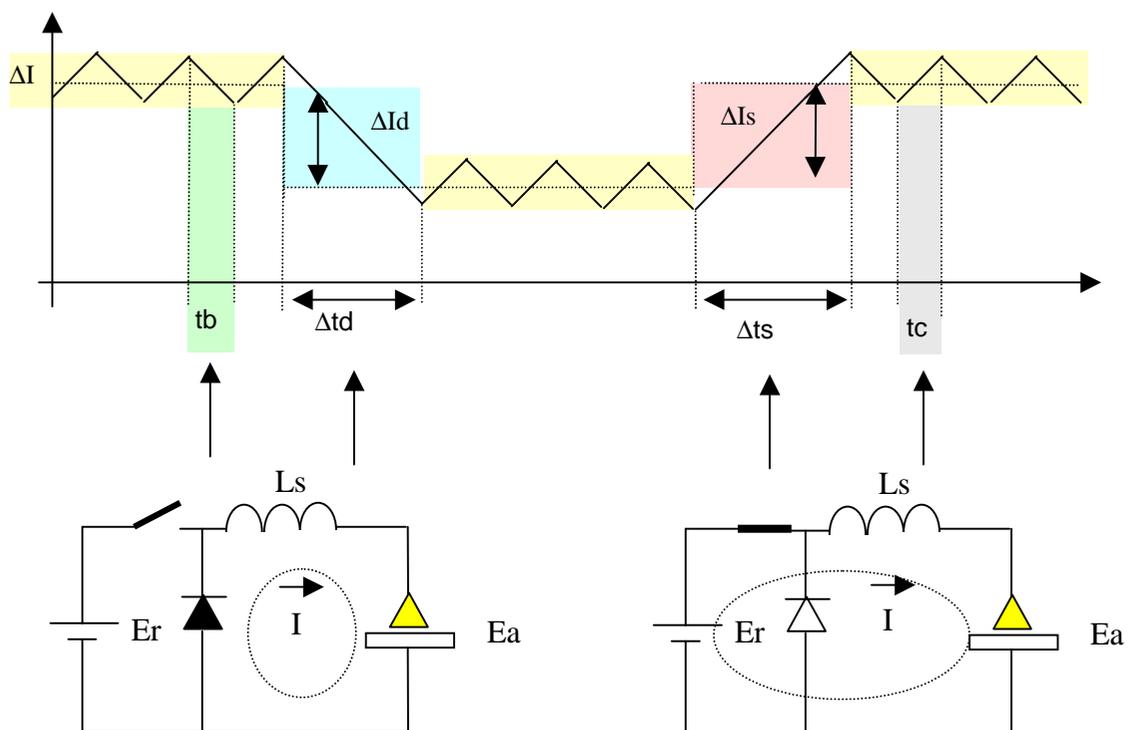


Figura 2.29 - Detalhe do controle de corrente.

Na prática, o transistor ao operar como uma chave fechada (em condução), fig. 2.31a, tem uma queda de tensão muito pequena, comparado ao que opera na região linear, resultando numa perda muito inferior, permitindo utilizar um único transistor com refrigeração a ar. Essas perdas são denominadas perdas em condução ($P_c = \Delta V_{sat} * I$). Já quando o mesmo está bloqueado (equivalente a uma chave aberta, fig. 2.31b), a corrente que passa pelo mesmo é insignificante, assim as perdas no bloqueio são desprezíveis, $P_b = V_{ce} * I = 0$.

Uma das conseqüências da utilização do chaveamento é o surgimento da ondulação da corrente. A amplitude da ondulação (ΔI) está basicamente relacionada com a frequência de chaveamento (F_c), com o valor do indutor de saída (L_s) e com a tensão a vazio (E_r) (tensão de saída da ponte retificadora).

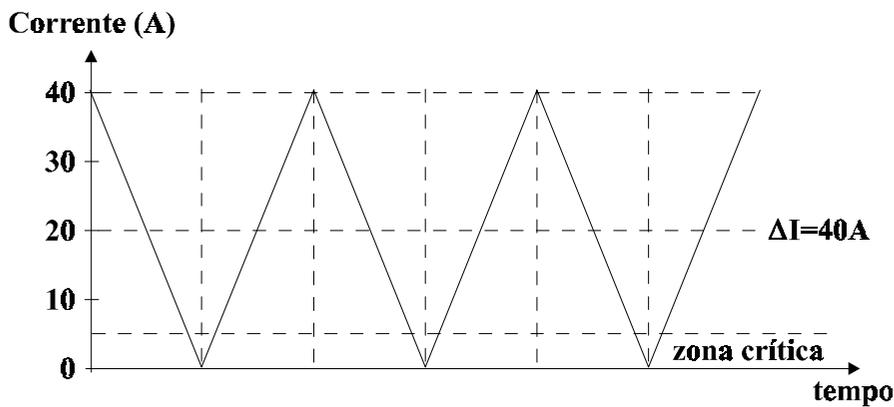


Figura 2.30 - Corrente de 20 A, com ondulação de 40 A.

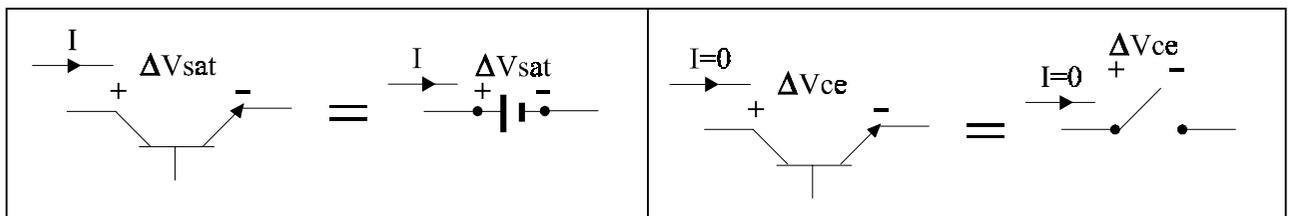


Figura 2.31 - Modelo aproximado do transistor em operação.

- a) em condução
- b) bloqueado.

O valor da ondulação pode ser determinado com boa aproximação pela eq. 2.4 para o conversor de quatro quadrantes, e pela eq. 2.5 para o conversor de um quadrante. Através da equação, observa-se que o mesmo depende do valor da indutância L_s , da tensão a vazio, da tensão do arco e da frequência de chaveamento.

A frequência de chaveamento, (F_c), eq. 2.6, é limitada pelas perdas máximas permitidas pelo semiconductor (IGBT, MOSFET), a qual resulta da soma das perdas

em condução, descritas acima, mais as perdas no chaveamento. As perdas no chaveamento ocorrem nos intervalos de tempo que a chave passa da situação aberta para fechada, e vice-versa, devido a corrente e a tensão não se anularem instantaneamente.

O valor do indutor define a resposta dinâmica da corrente. O cálculo de seu valor depende do tipo do conversor utilizado. Para o conversor de um quadrante, o valor do indutor pode ser obtido pela eq. 2.9 durante o intervalo em que a corrente sobe (fig. 2.29) ou pela eq. 2.10 quando ela desce (cai). Para o conversor de quatro quadrantes, o valor pode ser obtido, pela eq. 2.7, intervalo em que a corrente sobe ou, pela eq. 2.8, quando ela desce.

$$\Delta I = (E_r - E_a) / (L_s \bullet t_c) = (E_r + E_a) / (L_s \bullet t_b) \quad (2.4)$$

$$\Delta I = (E_r - E_a) / (L_s \bullet t_c) = E_a / (L_s \bullet t_b) \quad (2.5)$$

$$F_c = 1 / (t_c + t_b) \quad (2.6)$$

Onde: t_c = tempo de condução do transistor.

t_b = tempo de bloqueio do transistor.

E_a = tensão do arco

$$L_s = (E_r - E_a) / (\Delta I_s / \Delta t_s) \quad (2.7)$$

$$L_s = (E_r + E_a) / (\Delta I_d / \Delta t_d) \quad (2.8)$$

$$L_s = (E_r - E_a) / (\Delta I_s / \Delta t_s) \quad (2.9)$$

$$L_s = (E_a) / (\Delta I_d / \Delta t_d) \quad (2.10)$$

Observando-se as equações acima, pode-se perceber que, para o conversor de um quadrante, no caso da queda da corrente (eq. 2.10), quanto menor a tensão do arco (E_a), maior é o tempo que a corrente leva para cair. Para situação onde $E_a = 0$, o tempo de queda (t_d) é infinito. Na prática isso não ocorre porque esta equação foi obtida considerando-se os componentes ideais. Essa constatação pode ser um fator limitante quanto à escolha da fonte de soldagem para desenvolvimento das técnicas de controle de corrente.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS.

3.1 – Infra-estrutura.

3.1.1 - Sistema de Aquisição de Dados.

Um dos aspectos importantes do sistema de aquisição de dados, além da utilização tradicional na análise e tratamento das variáveis de soldagem, determinando-se fatores como a estabilidade do processo, a sua regularidade, etc., foi sua participação na etapa de testes dos algoritmos de controle, como ferramenta de depuração. Pois o mesmo permitiu averiguar se o comportamento das variáveis de soldagem, através da visualização das mesmas em forma de gráficos, estava de acordo com o previsto no projeto dos métodos de controle.

O sistema de aquisição de dados, apresentado na figura 3.1, foi desenvolvido pelo LABSOLDA, exceto o micro-computador que foi comprado, sendo grande parte do mesmo gerado no âmbito do presente trabalho. Fazem parte do conjunto:

- Instrumento para leitura da tensão e corrente - TC1.
- Idem para leitura da velocidade de alimentação do arame - MVA1.
- Idem para leitura da vazão de gás –MVG2.
- Placa de aquisição de dados INTERDATA III, instalada na parte interna do computador.

Os três instrumentos são os módulos de condicionamento de sinal com seus respectivos transdutores, já a placa INTERDATA III é a interface de conversão dos sinais analógicos em digitais.

Foram ainda desenvolvidos os "softwares":

OSCILOS4 e OSC2AR - Emulam um osciloscópio, o primeiro faz a leitura das quatro grandezas citadas acima. Já o segundo, faz a leitura dos sinais de corrente e tensão de duas fontes de soldagem, aplicado nos trabalhos referentes ao duplo arame.

PRCI – Foi utilizado no curto-circuito controlado para a análise da resistência entre o bico de contato e a peça durante o curto-circuito (resistência de curto circuito).

Estes “softwares” foram desenvolvidos para aquisição, análise e documentação das variáveis de soldagem adquiridas nas diversas etapas do trabalho.

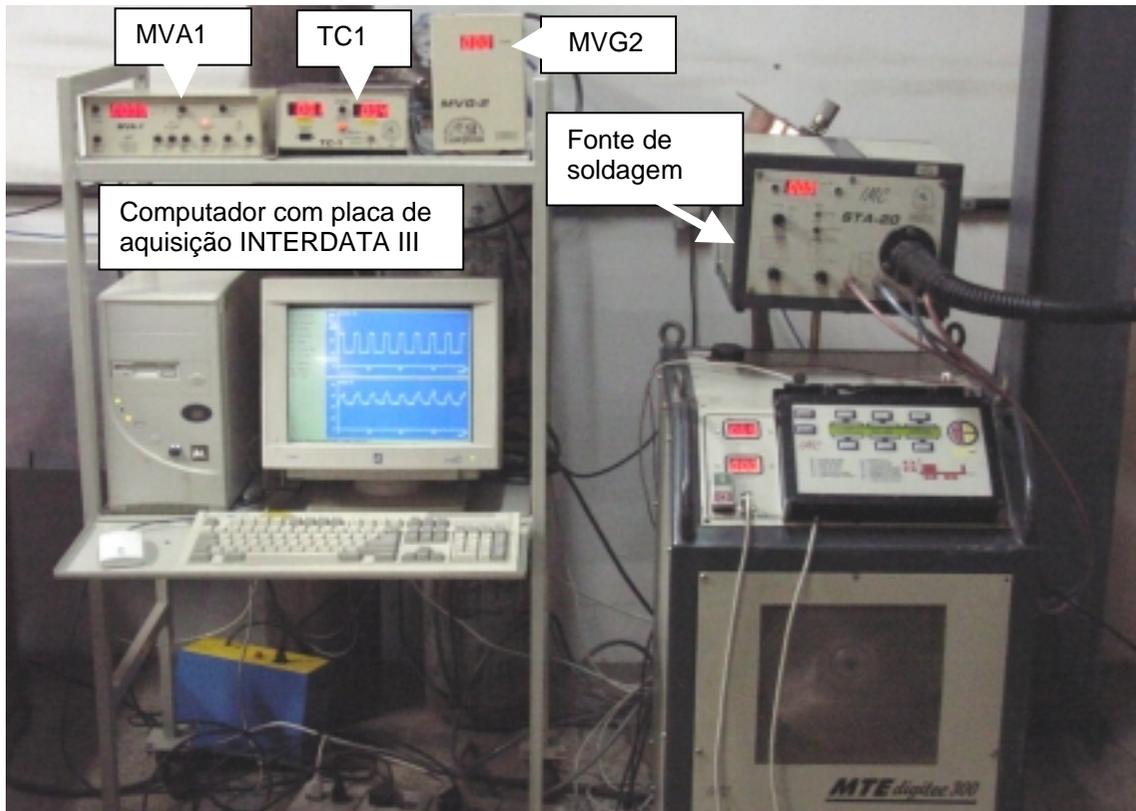


Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados.

Além da infra-estrutura apresentada, utilizou-se o programa ORIGIN[®] para tratamento de dados no WINDONS[®] e também, um osciloscópio com ponteira de corrente, para observação de fenômenos de curta duração, com tempo inferior a 100 micro segundos, que estavam fora da faixa de leitura do sistema de aquisição, tais como, determinação da dinâmica da resposta de corrente, tempos de atrasos entre os sinais enviados pelo controle e seus respectivos valores na saída.

As características dos instrumentos e equipamentos do sistema de aquisição utilizado neste trabalho são apresentadas na tabela 3.1

Tabela 3.1 - Características dos instrumentos e equipamentos utilizados para aquisição		
uC PC	MARCA	CPU 486DX4 100 MHz
TC1	IMC	Características da medida da corrente: Sensor de corrente de efeito HALL. Faixa de corrente de -600 a 600 A. Resolução : 1 A. Incerteza máxima: 1 % do valor analógico lido.
		Características da medida da tensão: Faixa de tensão de -60.0 a 60.0 V. Resolução : 0.1 V. Incerteza máxima: 0.6 % do valor analógico lido.
MVA1	IMC	Transdutor de velocidade : disco óptico 50 pulsos Faixa de leitura : 0.5 a 20.0 m/min Resolução : 0.1 m/min. Incerteza máxima: 3 % do valor analógico lido.
MVG1	IMC	Transdutor de vazão : tipo turbina com sensor óptico Faixa de leitura: 5.0 a 20.0 l/min Resolução : 0.1 m/min. Incerteza máxima: 3 % do valor analógico lido.
INTERDATAIII	IMC	16 entradas analógicas de -10 a 10V multiplexadas frequência máxima em 8 bits 40 kHz frequência máxima em 12 bits 30 kHz 8 saídas analógicas de -10 a 10V multiplexadas 8 entradas e 8 saídas digitais
Ponteira de Corrente	TEKTRONIX	Modelo: A6304XL Leitura de corrente -500 a 500 A.
Osciloscópio	TEKTRONIX	Modelo: TDS420 150 MHz / 100 MS/s

3.1.2 – Plataforma de desenvolvimento de Controle Micro-Processado.

No capítulo anterior foi possível se ter uma idéia da complexidade envolvida no controle do processo de soldagem MIG/MAG. Neste sentido, para permitir a realização dos diferentes desenvolvimentos propostos, foi programada uma metodologia de trabalho em etapas, a saber:

- I. Configurações A e B para testes de viabilidade de implementação em uma plataforma flexível, para determinação dos resultados preliminares.
- II. Configurações C e D para testes em protótipos, representado praticamente as condições reais de operação.

Cada configuração acima citada é descrita abaixo:

- A. Constituída por um computador PC, um instrumento de leitura de corrente e tensão TC1, linguagem de programação PASCAL e C++ e uma placa de aquisição de dados e controle INTERDATA III, que era conectada ao barramento interno do computador, figura 3.2.
- B. Utilizou-se praticamente a mesma infra-estrutura da configuração A, porém a INTERDATA III foi substituída por uma placa de aquisição e controle com conversor de alta velocidade conectada a saída paralela do micro, denominada LPTAD, figura 3.3. A mesma foi projetada durante este trabalho para ser utilizada nos desenvolvimentos e testes com curto-circuito controlado. A comunicação paralela foi escolhida para tornar compatível a conexão da placa, tanto com o PC padrão, quanto com o PC104.
- C. Protótipo da fonte de uma soldagem, denominada atualmente de DIGITEC, com duas unidades principais, a de potência e a de controle. Esta última foi que serviu de base para os testes práticos, sendo composta por uma CPU baseada em dois micro-controladores da família do 8051 (placa micro-controlada da DIGITEC) e um "hardware" específico de tratamento e/ou controle dos sinais de corrente, tensão e velocidade de arame (placa Base da DIGITEC). As duas placas são apresentadas na figura 3.4. Também fizeram parte as linguagens de programação C, FORTH e Assembly para o 8051.
- D. Composta por uma CPU padrão PC104, por um TC1 e contava também com a placa LPTAD, figura 3.5. Utilizou-se esta configuração para os testes de validação do curto-circuito controlado, já que nos estudos preliminares identificou-se que a CPU baseada no 8051 (configuração C) poderia não ter velocidade suficiente para identificar a reabertura do arco com antecedência. A proposição desta configuração tinha também o objetivo de se delinear uma nova versão de CPU para a fonte de soldagem DIGITEC.

A maior flexibilidade das configurações A e B foi obtida devido à utilização do PC, que conta com uma vasta quantidade de ferramentas em seus programas e que serviram de apoio aos desenvolvimentos, conferindo uma maior velocidade nas implementações realizadas.



Figura 3.2 – Sistema de Controle da Configuração A.



Figura 3.3 – Placa de aquisição e controle LPTAD.

Uma peculiaridade dessa plataforma de desenvolvimento foi à utilização de um protótipo de fonte de soldagem, que já foi concebido para ser um equipamento aplicável em ambiente industrial. O mesmo se constituiu em um verdadeiro

laboratório para realização dos testes práticos dos novos métodos, processos e técnicas de controle, em condições encontradas no chão de fábrica.

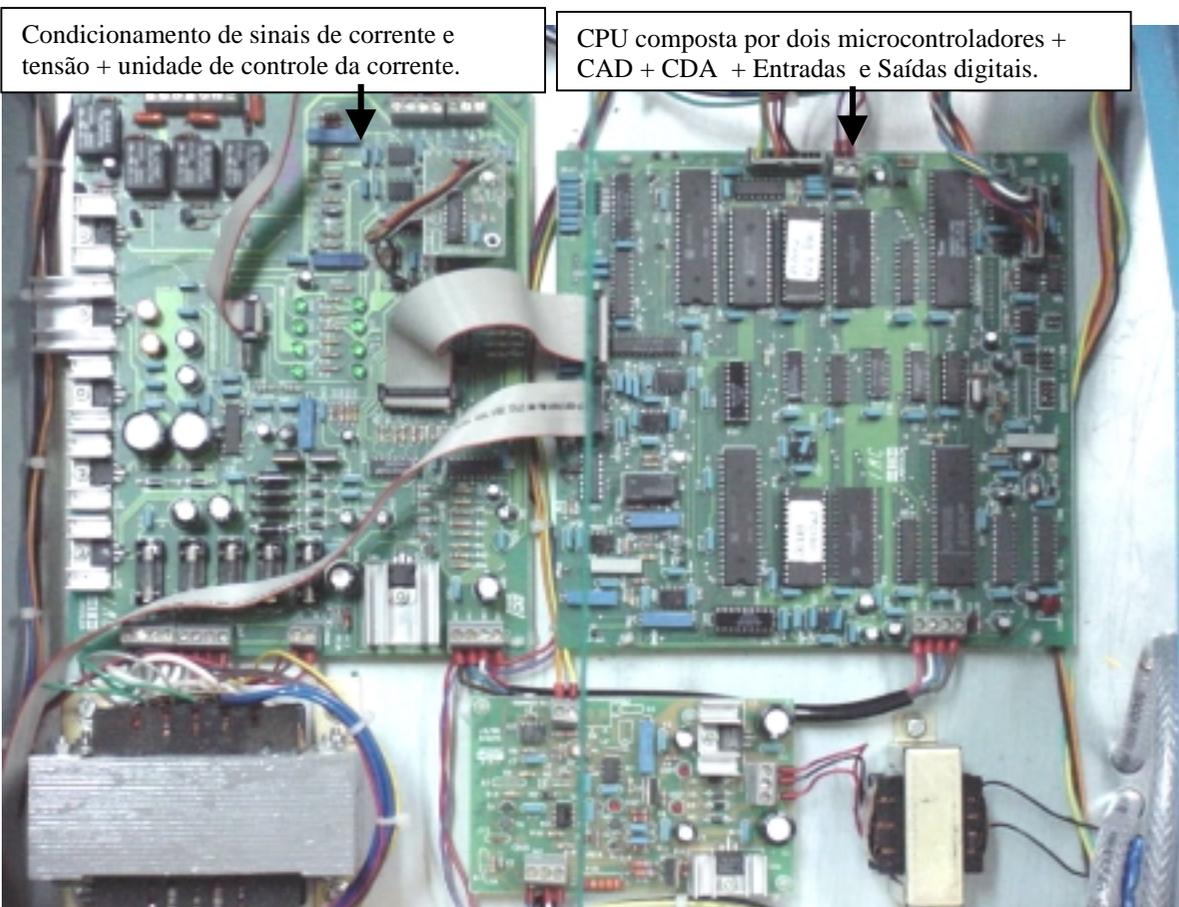


Figura 3.4 – Configuração C composta pela placa Micro-controlada e placa base da DIGITEC.

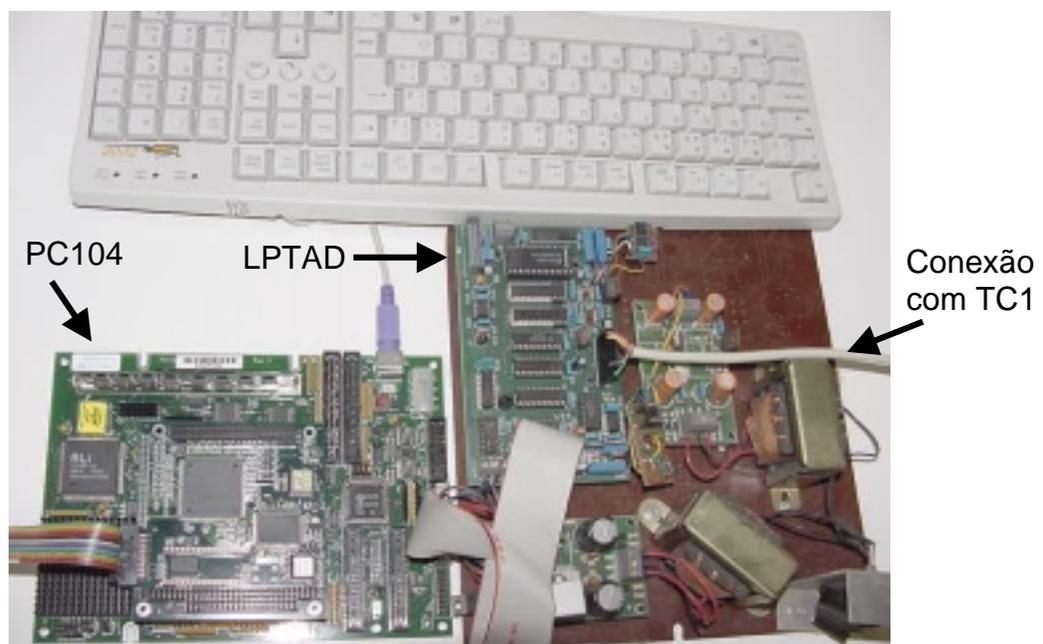


Figura 3.5 – Sistema composto pelo PC104 + TC1+ LPTAD.

As características dos instrumentos e equipamentos utilizados para dar suporte ao desenvolvimento do controle de cada modalidade de soldagem são apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características dos equipamentos e instrumentos usados para desenvolvimento dos controles das modalidades de soldagem.		
	Marca	Descrição
uC PC		Pentium 100 MHz
PC104	VersaLogic	VSBC-2 com CPU 586 133 MHz
TC1	IMC	CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DESSES INSTRUMENTOS SÃO AS MESMAS APRESENTADAS NA TABELA 3.1.
MVG2	IMC	
MVA1	IMC	
INTERDATAIII	IMC	16 entradas analógica de -10 a 10V multiplexadas freqüência máxima em 8 bits 40 kHz freqüência máxima em 12 bits 30 kHz 8 saídas analógicas de -10 a 10V multiplexadas 8 entradas e 8 saídas digitais
LPTAD	Desenv. Durante este trabalho	2 entradas analógicas de -10 a 10 V não multiplexadas de 500 kHz cada 2 saídas analógicas de -10 a + 10 V Comunicação via Paralela 8 entradas analógicas de 8 bits multiplexadas com freqüência máxima de 10 kHz conector de comunicação com a fonte DIGITEC

3.1.3 - Fontes de Soldagem

Neste projeto foram utilizados três modelos de fontes de soldagem (figura 3.6) que serão descritos abaixo.

- Fonte INVERSAL. - Fonte chaveada no secundário (2.5.2), com capacidade de operar com corrente alternada e disponibilidade de entrada para controle remoto. O controle interno é analógico. Esta fonte, juntamente com a configuração A do item anterior, formaram a bancada de ensaios de soldagem para os testes de viabilidade de implementação do controle micro-processado.

- Protótipo da fonte de soldagem DIGITEC. - Também uma fonte chaveada no secundário, porém com possibilidade apenas de operação com corrente contínua. O controle interno é feito através de uma CPU baseada em micro controladores. Esta constituiu a configuração C do item anterior, compondo uma bancada de ensaios de soldagem para fazer os testes de viabilidade prática do controle micro-processado.
- Fonte ELMA. - Fonte do tipo analógica (item 2.5.1) utilizada para os desenvolvimentos com curto-circuito controlado, devido à mesma possuir a vantagem de apresentar uma maior resposta dinâmica de corrente.

As três fontes tinham uma entrada de corrente (I_{Ref}) externa, cujo modelo para fins de controle é mostrado na figura 3.7 e as características das mesmas são apresentadas na tabela 3.3.

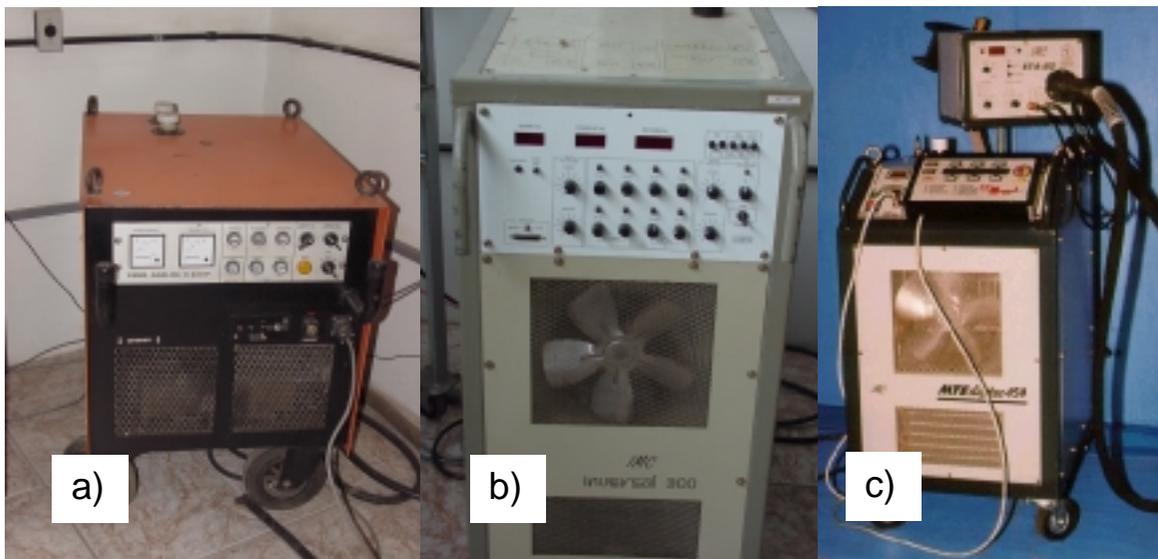
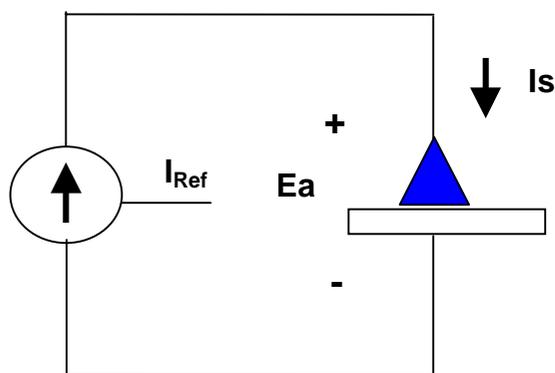


Figura 3.6 – Fontes de Soldagens utilizadas neste trabalho.

a) ELMA, b) INVERSAL e c) protótipo da DIGITEC



Onde:

$$I_s = K_{ia} * I_{Ref}$$

K_{ia} = constante que relaciona a corrente de soldagem com a de referência.

Figura 3.7 - Modelo de uma fonte de soldagem com entrada de corrente externa.

Tabela 3.3 - Características das fontes de soldagem		
	Marca	Descrição
INVERSAL	IMC	<p>Fonte chaveada no secundário</p> <p>Ondulação de corrente 7 A.</p> <p>Faixa de corrente de -450 a 450 A.</p> <p>Sistema analógico de controle.</p> <p>Tensão a vazio de 68 V.</p> <p>Fator de Trabalho 280 A 100 %</p> <p>Resposta ao degrau de corrente:</p> <p>Taxa subida média : 80 A / 100 us.</p> <p>Taxa descida média com arco: 50 A / 100 us</p> <p>Taxa descida média em curto: 130 A / 100 us</p> <p>Entrada para controle de Corrente, tensão e tempos.</p>
PROTÓTIPO DA DIGITEC	IMC	<p>Fonte chaveada no secundário</p> <p>Ondulação de corrente 7 A.</p> <p>Faixa de corrente de 5 a 450 A.</p> <p>Sistema micro-processado de controle.</p> <p>Tensão a vazio de 68 V.</p> <p>Fator de Trabalho 280 A 100 %</p> <p>Resposta ao degrau de corrente:</p> <p>Taxa subida média : 80 A / 100 us.</p> <p>Taxa descida média com arco: 50 A / 100 us</p> <p>Taxa descida média em curto: 75 A / ms</p> <p>Entrada para controle de corrente.</p>
ANALÓGICA	ELMA C400P	<p>Fonte analógica</p> <p>Faixa de corrente de 0 a 400 A.</p> <p>Sistema analógico de controle.</p> <p>Tensão a vazio de 60 V.</p> <p>Fator de Trabalho 320 A 100 %</p> <p>Resposta ao degrau de corrente:</p> <p>tempo de subida: 150 us</p> <p>tempo de descida: 150 us</p> <p>Entrada para controle de corrente e tensão.</p>

Os tempos de subida e descida da corrente da fonte ELMA independem do valor da tensão de arco, já os das fontes INVERSAL e DIGITEC dependem desta e podem ser calculados através das equações 2.7 à 2.10, considerando $L_s = 50 \mu\text{H}$ e $E_r = 68 \text{ V}$.

3.1.4 – Equipamentos e instrumentos de apoio.

Os equipamentos de apoio são apresentados na tabela 3.4, os quais auxiliaram nos ensaios e desenvolvimentos das diversas modalidades de soldagem.

	Marca	Descrição
TRATÍLOPE	IMC	Modelo : V1 Sistema de deslocamento de tocha Velocidade : 5.0 a 160.0 cm/min posicionamento : 0 mm a 9999 mm Resolução de velocidade: 0.1 cm/min. Resolução de posicionamento: 1 mm
Alicate de Corrente	ITT	Modelo: MX1200S Escala de corrente de : -200,0 a 200,0 A e -1000 a 1000 A Incerteza de Medição: 1.0 % do valor lido
Multímetro	TEKTRONIX	Modelo: DM252 6 ½ Dígitos.
SAP	IMC	Sistema de aquisição de dados portátil. Leitura de Corrente : -600 a 600 A. Resolução : 2.4 A. Leitura de Tensão : -60.0 a 60.0 V. Resolução : 0.24 V. Leitura de Velocidade de Arame por encoder de 500 pulsos : 0.0 a 20.0 m/min. Resolução : 0.01 m/min. Leitura de vazão de gás : 5.0 a 20.0 l/min. Resolução : 0.1 l/min.
Misturadores de Gás	WITT	ARGÔNIO + CO ₂ : (0 a 25 % CO ₂) (0 a 25 l/min) ARGÔNIO + O ₂ : (0 a 25 % O ₂) (0 a 60 l/min)

3.2 - Estratégia para Determinação da Viabilidade de Implementação das Modalidades Propostas através de Controle Micro-Processado.

Neste trabalho, foram desenvolvidas várias modalidades de soldagem para o processo MIG/MAG, as quais foram implementadas através de algoritmo. Em princípio, cada algoritmo poderia ser testado de forma independente, sem uma análise mais abrangente do ponto de vista computacional. Entretanto, como um dos objetivos era agrupar todas essas modalidades em um único equipamento, seria necessário um programa que gerenciasse o acesso a cada uma delas. Assim sendo, para otimizar as atividades referentes à programação, escolheu-se como metodologia de desenvolvimento a análise orientada a objeto, segundo conceitos de engenharia de "software".

Na fase inicial de desenvolvimento do software, onde são determinados os requisitos do sistema, foram analisados os processos de soldagem, abordados neste trabalho, do ponto de vista de programação, procurando-se identificar características comuns entre os mesmos, bem como, a interação desses com a fonte de soldagem, placa de aquisição e interface com o usuário.

Como se tratou de um trabalho envolvendo muitos processos de soldagem e conseqüentemente um grande número de variáveis, fez-se necessário o projeto de uma interface com o usuário. A concepção da mesma foi voltada à obtenção de uma interface simples e de fácil operação, porém que comportasse todas as necessidades dos processos, com o objetivo final de testar todo o sistema em um equipamento a nível industrial, constituído pelas configurações C e D. O ponto de partida foi o modelo utilizado nas interfaces de robôs, que utiliza "display" de cristal líquido e teclas.

Para verificar a viabilidade operacional da interface com o usuário adotou-se como metodologia a prototipação, onde se fez um protótipo da interface com o usuário utilizando-se a ferramenta de hipertexto TOOLBOOK, para simular as principais funções que a mesma deveria executar, antes de se partir para a concepção e implementação do programa e projeto do "hardware" da mesma. A prototipação é um modelo de desenvolvimento previsto na engenharia de "software", que permite ao usuário avaliar a funcionalidade do sistema e determinar situações não previstas em projeto.

No tocante aos métodos de controle, um dos primeiros passos consistiu em traduzir os controles analógicos do MIG/MAG convencional e pulsado para

linguagem algorítmica. Após, foi desenvolvido um circuito para simular o arco voltaico, de maneira a permitir que os primeiros testes dos algoritmos de controle fossem feitos sem a necessidade de soldagens.

Para cada modalidade de soldagem desenvolvida, após os primeiros testes com o simulador de arco, foram feitos uma série de testes de soldagem para avaliar o desempenho do algoritmo e fazer os ajustes que se revelassem necessários. Somente então, foram feitos os ensaios exploratórios, cujos aspectos analisados dependeram de cada modalidade. De uma maneira geral observou-se a estabilidade do arco, a geometria do cordão de solda e a quantidade de defeitos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 - Engenharia de "Software"

Durante o presente trabalho foram desenvolvidos vários "software's", aplicados ao tratamento dos dados e ao controle do processo, de forma que para um desenvolvimento mais eficiente dos mesmos foram utilizadas técnicas de engenharia de "software".

A análise orientada a objeto é uma dessas técnicas e baseia-se na obtenção dos diagramas de classes de objeto, fluxo de dados (DFD), estados e eventos, para descrever o que o "software" deverá executar. Todos esses diagramas foram obtidos para o protótipo do "software" de controle, onde as diferentes modalidades foram implementadas.

Na figura 4.1 são apresentadas as classes mais importantes que compõe o diagrama de classes. Este diagrama fornece as operações (métodos) disponíveis em cada classe. Os demais diagramas não trazem informações úteis ao leitor, tendo somente utilidade ao programador e, também, devido a ocuparem várias páginas os mesmos não foram apresentados.

No projeto da interface com o usuário, foram analisadas as modalidades de soldagem que seriam desenvolvidas, buscando-se identificar características semelhantes entre elas, na tentativa de se criar um padrão de comunicação com o usuário comum a todas elas. Também foram identificados os tipos de informações que o usuário deveria fornecer para cada uma das modalidades. Com isso, foi possível definir o aspecto físico do teclado e como seria o fluxo de informações, ou seja, como as mesmas seriam ingressadas através da interface.

Após a análise montou-se uma primeira concepção da interface com a ferramenta de hipertexto "toolbook" (figura 4.2), que foi composta por um conjunto de teclas e um "display" de duas linhas com 40 caracteres cada. Nela foram simuladas as principais operações que seriam necessárias, de forma a avaliar a facilidade de utilização, a legibilidade e se a mesma seria adequada ao campo da soldagem. Após a validação do protótipo, a interface definitiva foi projetada e construída. O resultado físico é apresentado na figura 4.3a, que foi composta por um "display" de cristal líquido, um conjunto de teclas e um micro-controlador, que se comunica com a

fonte através de uma RS485. Para facilitar a migração dos programas testados inicialmente nas configurações A e B (baseada no PC) para o da configuração C (baseada no micro-controlador 8031), implementou-se no PC uma interface semelhante à interface física (figura 4.3b).

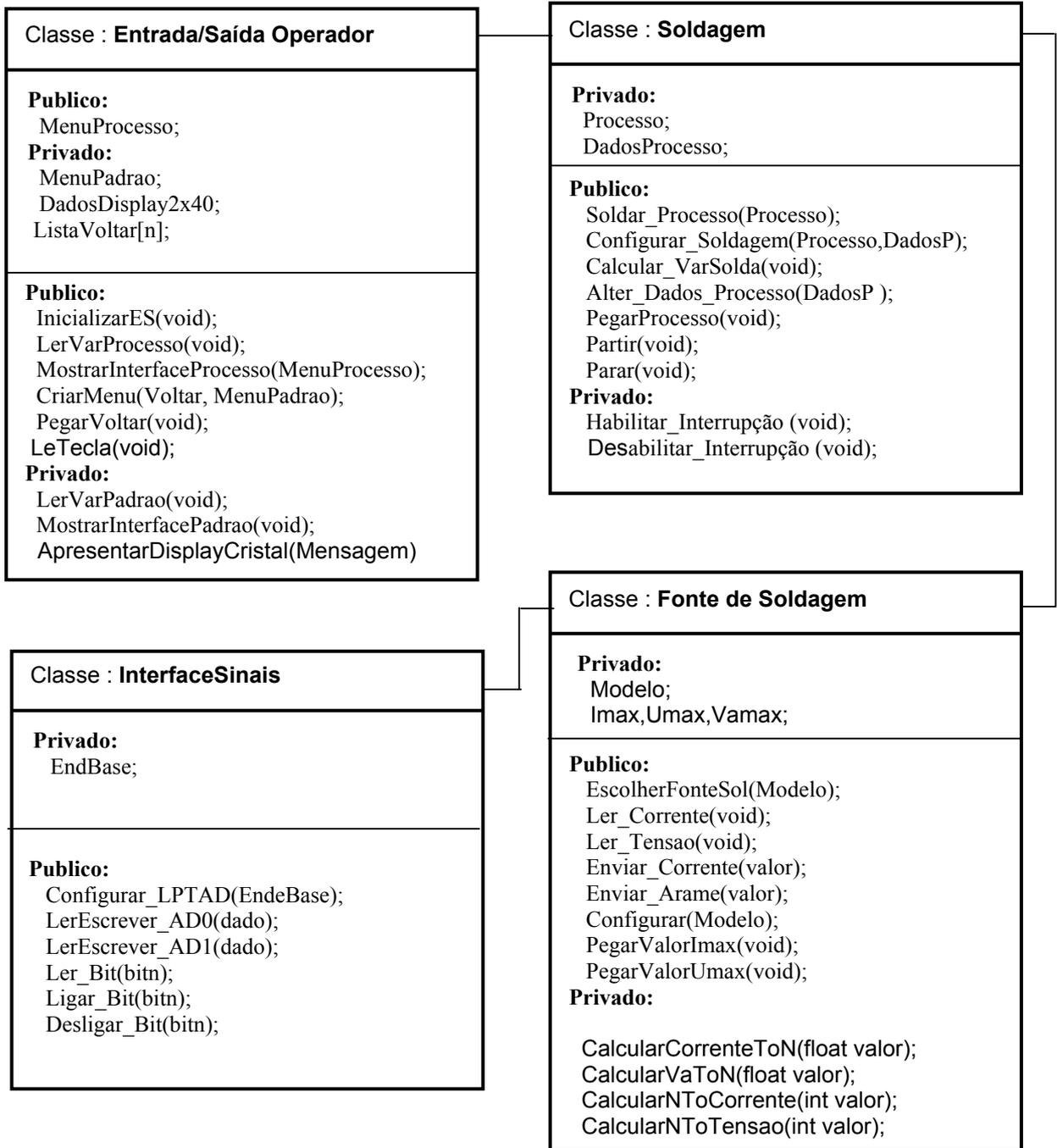


Figura 4.1 - Diagrama de Classes de objetos.

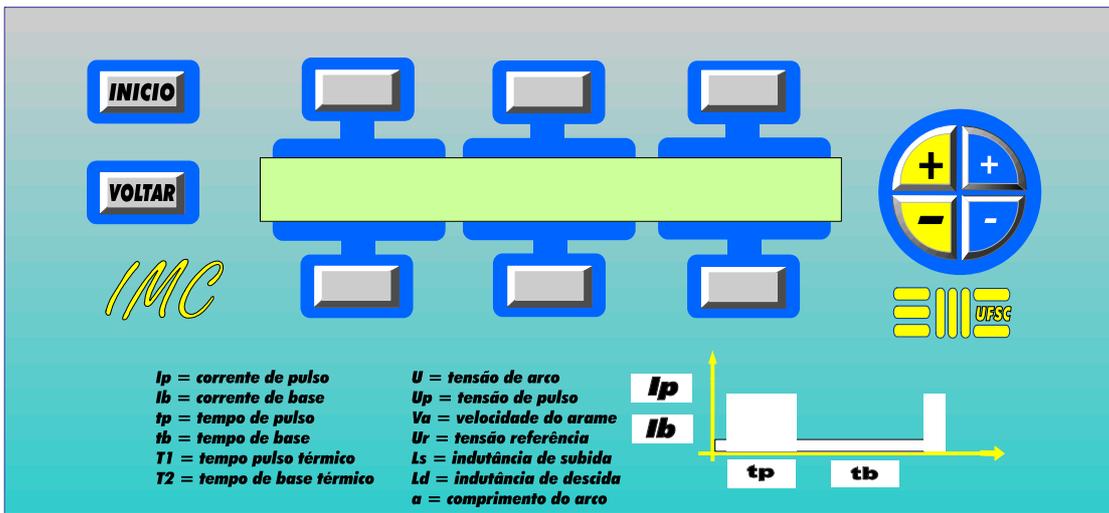


Figura 4.2 - Protótipo da interface com o usuário montado no TOOLBOOK.

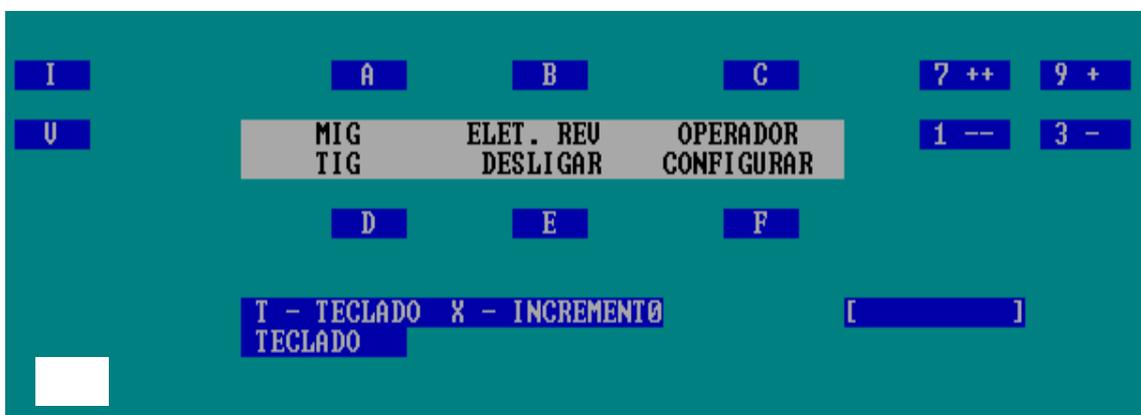
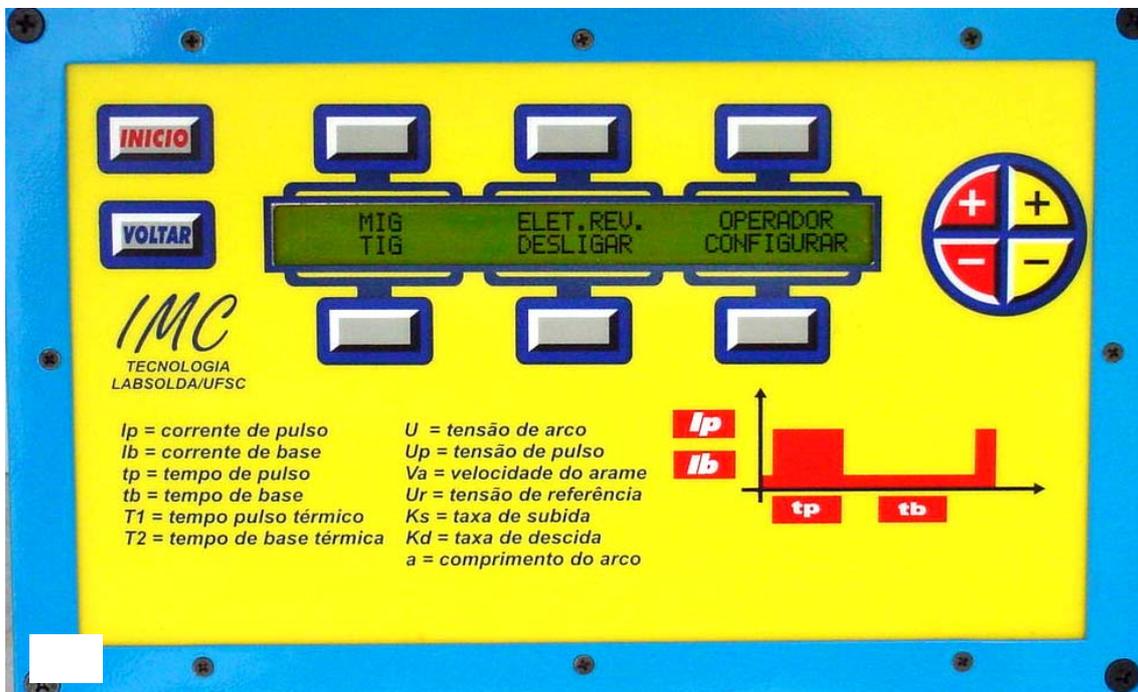


Figura 4.3 - Versão Final da Interface com o usuário para:
 a) Fonte de soldagem Micro-Processada e b) o PC.

4.2 – MIG/MAG Convencional

Um dos primeiros passos foi à implementação do MIG/MAG convencional, cujos objetivos foram obter o controle desse processo via sistema micro-processado, testar o circuito de simulação de arco e implementar uma função para melhorar a estabilidade do arco na soldagem com CO₂ Puro.

4.2.1- Análise e modelagem da resposta dinâmica da corrente em uma fonte convencional.

Através do estudo da estrutura de potência de um dos primeiros modelos de fonte de soldagem com característica de tensão constante, destinada ao processo MIG/MAG convencional, como também, através da análise de sua resposta dinâmica de corrente e tensão, quando submetida a uma determinada carga, chegou-se ao modelo elétrico mostrado na figura 4.4.

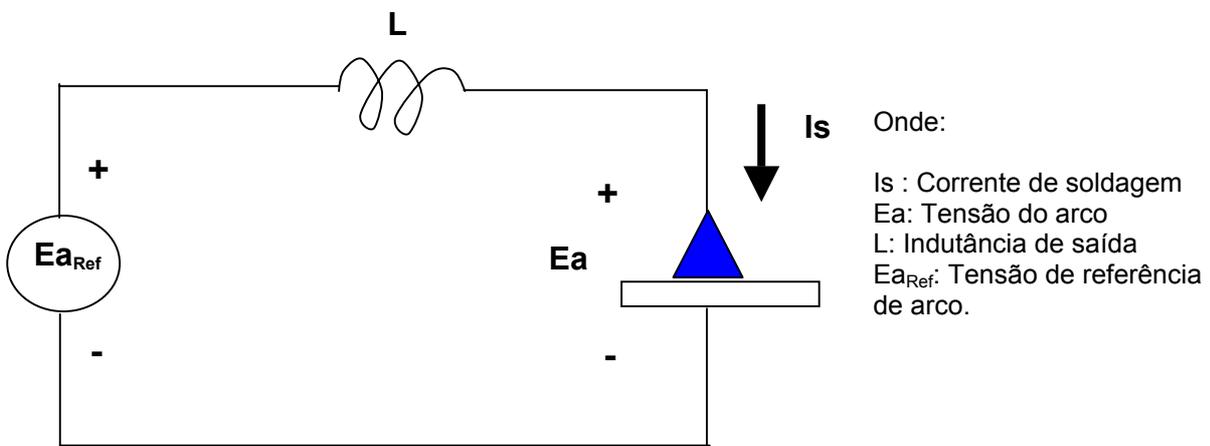


Figura 4.4 – Modelo elétrico de uma fonte de soldagem convencional.

Através desse modelo determinou-se a equação 4.1, que fornece o valor da corrente de saída (I_s) em função da tensão ajustada (E_{aRef}), da tensão do arco (E_a) e da indutância de saída (L).

$$I_s(t) = 1/L \int (E_{aRef} - E_a) dt \tag{ 4.1}$$

Onde:

I_s : Corrente de soldagem

L : Indutância de saída

E_a : Tensão do arco

E_{aRef} : Tensão de referência de arco.

Na seqüência, determinou-se o diagrama de controle da tensão do arco (figura 4.5 área dentro do quadrado pontilhado) para as fontes utilizadas neste trabalho, baseando-se no modelo das mesmas (figura 3.7) e na equação 4.1.

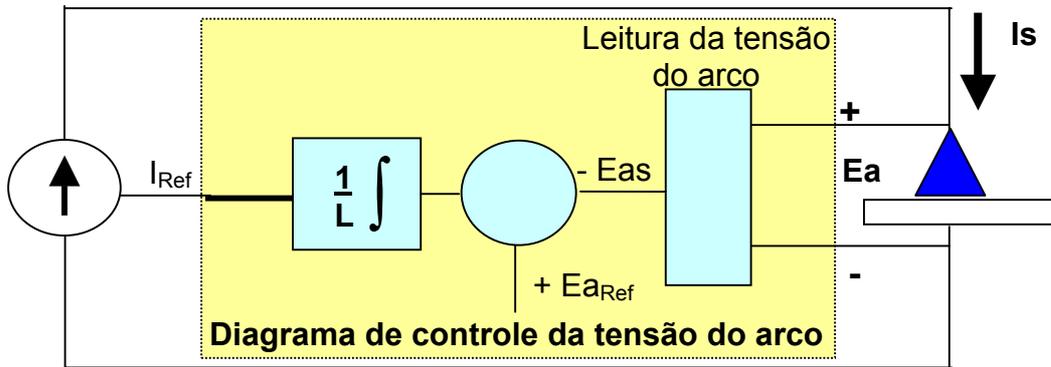


Figura 4.5 - Modelo do controle da tensão utilizando a entrada de corrente I_{Ref} .

4.2.2 - Desenvolvimento de um algoritmo de controle.

O algoritmo de controle da tensão do arco mostrado na figura 4.6a foi obtido transcrevendo-se o diagrama de controle da figura 4.5 em forma de algoritmo. O mesmo também poderia ser obtido, transformando a equação 4.1, no domínio do tempo, para a equação 4.2, no sistema amostrado (controle discreto). Para facilitar a demonstração, não foram considerados os ganhos inerentes aos circuitos de controle, com isso: $I_{Ref} = I_s$ e $E_{as} = E_a$. Assim, sendo I_{s0} igual a corrente I_s do intervalo de amostragem anterior, tem-se que a corrente I_s total é resultante da somatória de I_s em cada intervalo de amostragem. Então, se for considerado que Δt tende a zero, I_s resultante do algoritmo torna-se igual ao obtido na equação 4.1.

$$I_s = (E_{aRef} - E_a) * \Delta t / L + I_{s0} \tag{4.2}$$

Onde:

Δt = tempo de amostragem

I_{s0} = corrente na amostragem anterior

A partir do algoritmo do MIG/MAG convencional, foram feitas as alterações necessárias para operação com CO_2 puro. Estas foram determinadas através da observação dos oscilogramas de ensaios de soldagem com CO_2 puro, conforme apresentado na figura 4.7. Foi constatado que a tensão do arco levava um tempo maior para atingir o nível de referência, após o curto-circuito, comparado à soldagem com argônio e suas misturas. Essa falta de sensibilidade da tensão em função da

corrente, faz com que o controle convencional reduza a corrente até zero, na expectativa de baixar a tensão ao nível de referência, causando a extinção do arco.

Para solucionar esse problema, acrescentou-se no algoritmo de controle uma limitação do valor mínimo de corrente (I_{min}), conforme mostra a figura 4.6b.

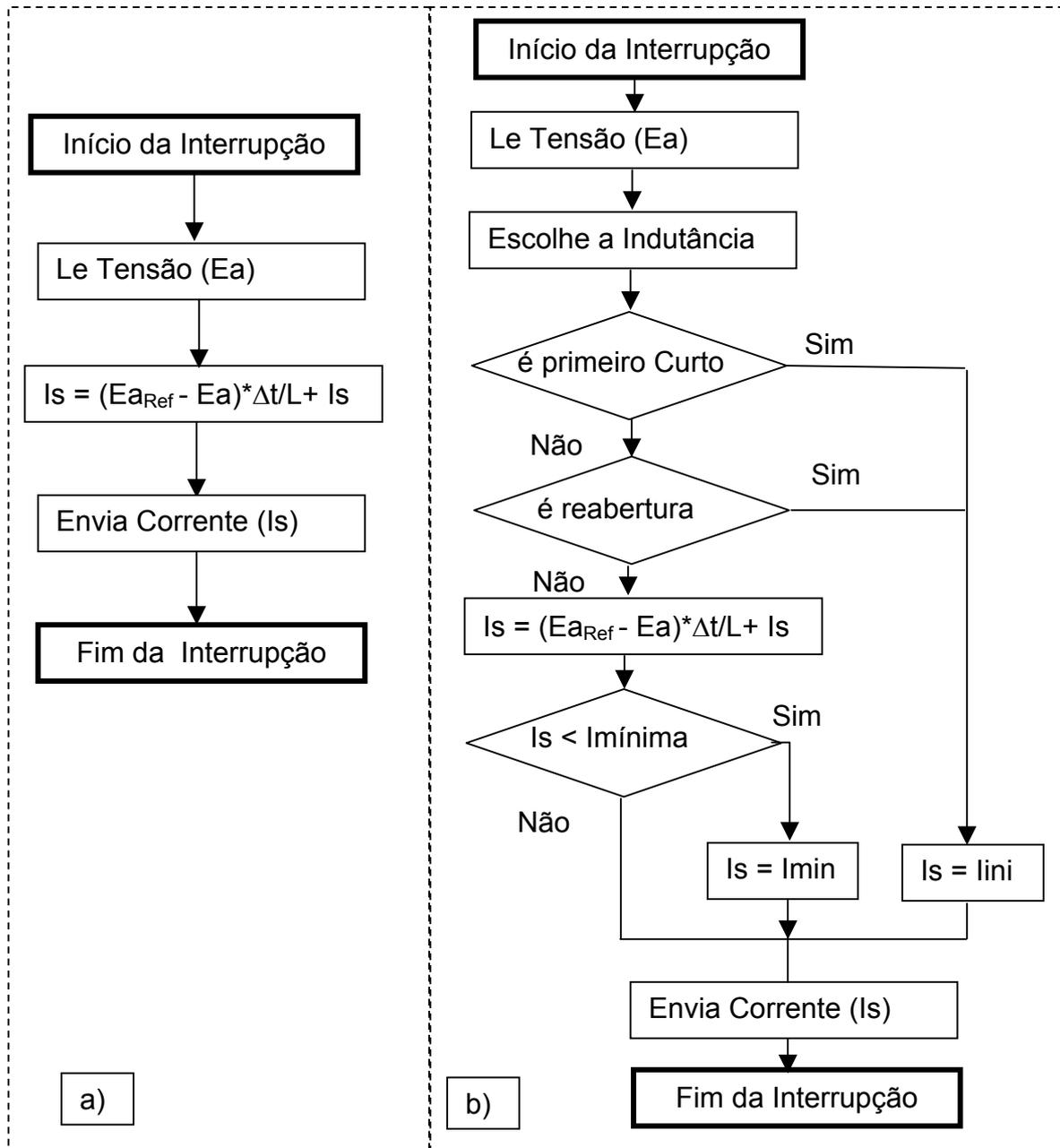


Figura 4.6 - Fluxograma do controle para o MIG/MAG convencional

- a) Controle clássico.
- b) Controle com limitação de corrente e lógica de abertura do arco.

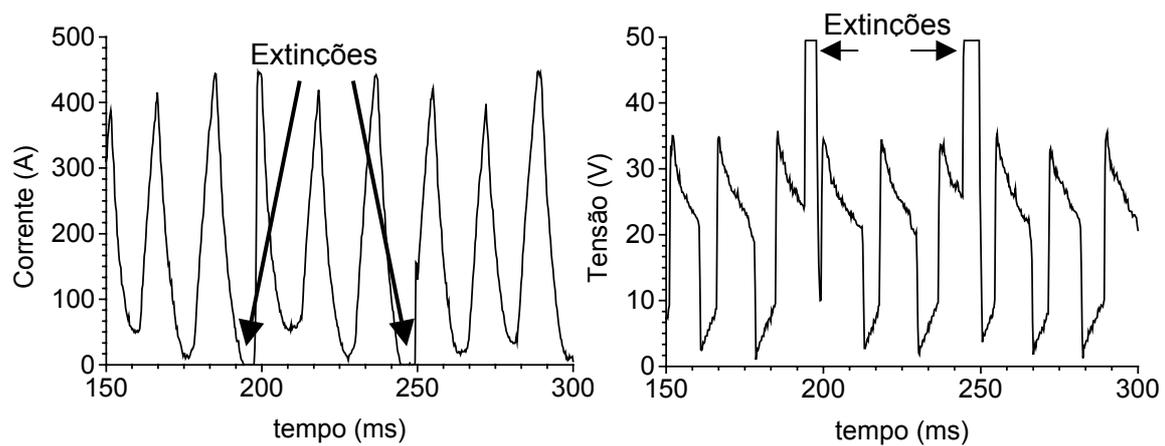


Figura 4.7 - Soldagem com CO_2 puro no MIG/MAG convencional sem limite de corrente mínima.

Ainda que este problema ocorra mais freqüentemente com o uso do CO_2 puro, também foi observado em algumas situações com o uso de argônio e suas misturas. Mesmo sendo bem menos freqüente, a sua ocorrência causa distúrbios no arco que podem levar ao aparecimento de falhas.

Outras melhorias feitas no MIG/MAG convencional foram à introdução da corrente de abertura do arco e do ajuste diferenciado das indutâncias de subida (L_s) e descida (L_d). A corrente de abertura (I_{ini}) visou facilitar a abertura do arco, pois na fonte convencional, na abertura a corrente inicia em zero e aumenta com uma taxa definida pela indutância de saída até o surgimento do arco. Já o ajuste diferenciado das indutâncias almejou a obtenção de um melhor controle da estabilidade do arco e da produção de salpicos.

Os ajustes das indutâncias, para facilitar a interpretação do soldador, foram implementadas de forma indireta através das variáveis K_s e K_d , as quais têm uma relação com o inverso das indutâncias ($k_s = 0.0036/L_s$, $k_d = 0.0036/L_d$), sendo apresentadas ao soldador como valores de 1 a 100. Assim, o soldador fica com a idéia de que quanto maior os valores de k_s ou k_d , mais rápida fica a resposta da fonte (indutância menor), e quanto menor os valores de K_s e K_d mais lenta esta fica (indutância maior). A escolha, entre um ou outro valor de indutância é feito pela comparação entre a tensão do arco e a de referência, sendo que se a tensão do arco for maior é escolhida a indutância de descida, caso contrário a de subida.

4.2.3 - Desenvolvimento de um circuito de simulação de arco.

De maneira a permitir o desenvolvimento do circuito de simulação do arco,

apresentado na figura 4.9, primeiramente analisou-se o comportamento dos sinais de corrente e tensão de uma soldagem no MIG/MAG convencional com transferência por curto-circuito. A análise foi feita em três momentos: durante o regime, durante o curto-circuito e logo após o curto-circuito cessar. Em seguida, verificou-se a interação da CPU com a fonte de soldagem e com o arco, figura 4.8.

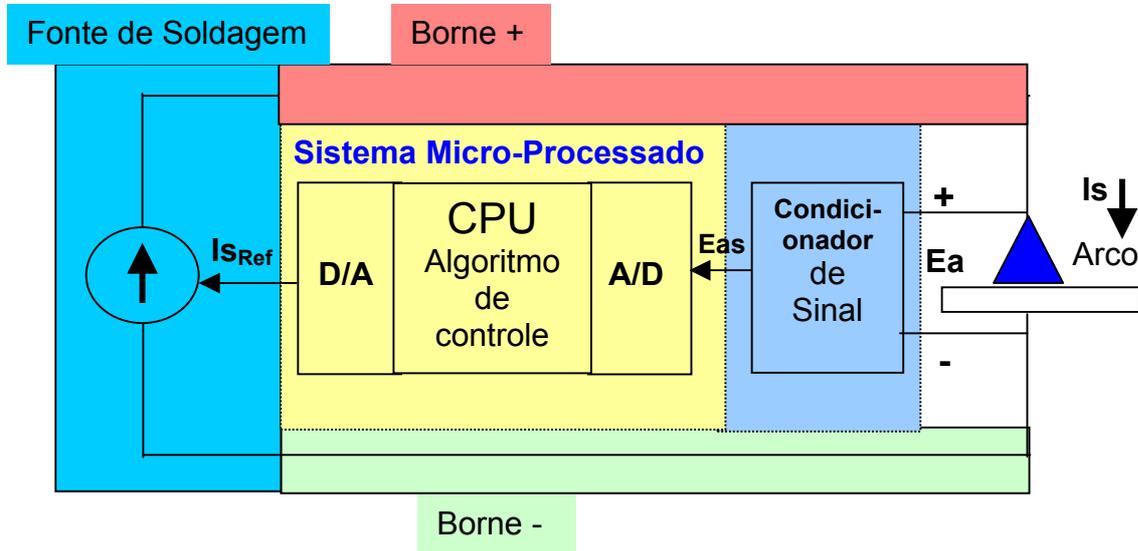


Figura 4.8 - Modelo de uma fonte de soldagem com entrada em corrente controlada por uma CPU.

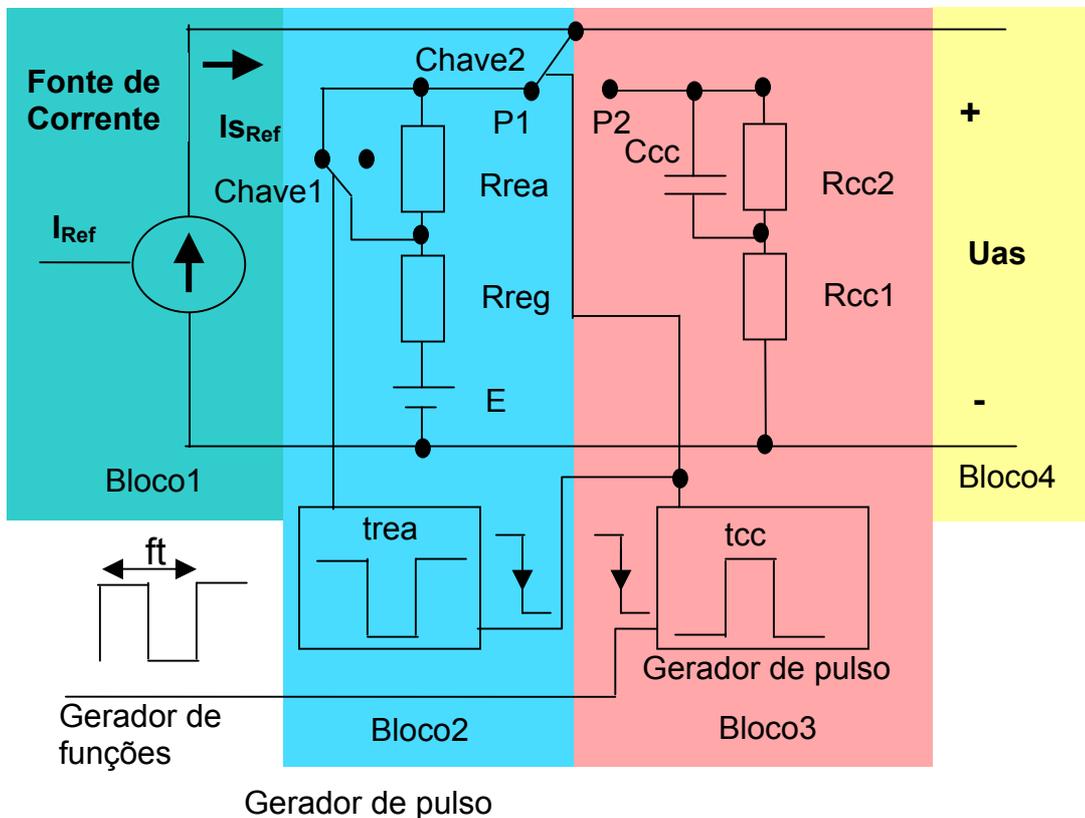


Figura 4.9 - Circuito de simulação do arco.

Este circuito foi dividido em 4 blocos. O bloco 1 é composto por uma fonte de corrente que executa a função da fonte de soldagem, onde a corrente produzida pela mesma é da ordem de milésimos de Amperes. O bloco 2 simula o período de arco aberto e o bloco 3 o de curto-circuito. No bloco 4, estão os pontos de medida da tensão, a qual é proporcional a do arco. O gerador de funções define a frequência de transferência f_t . Na figura 4.10 são mostradas as formas de ondas de tensão e corrente para diferentes valores de indutância, medidas no circuito de simulação de arco através do osciloscópio.

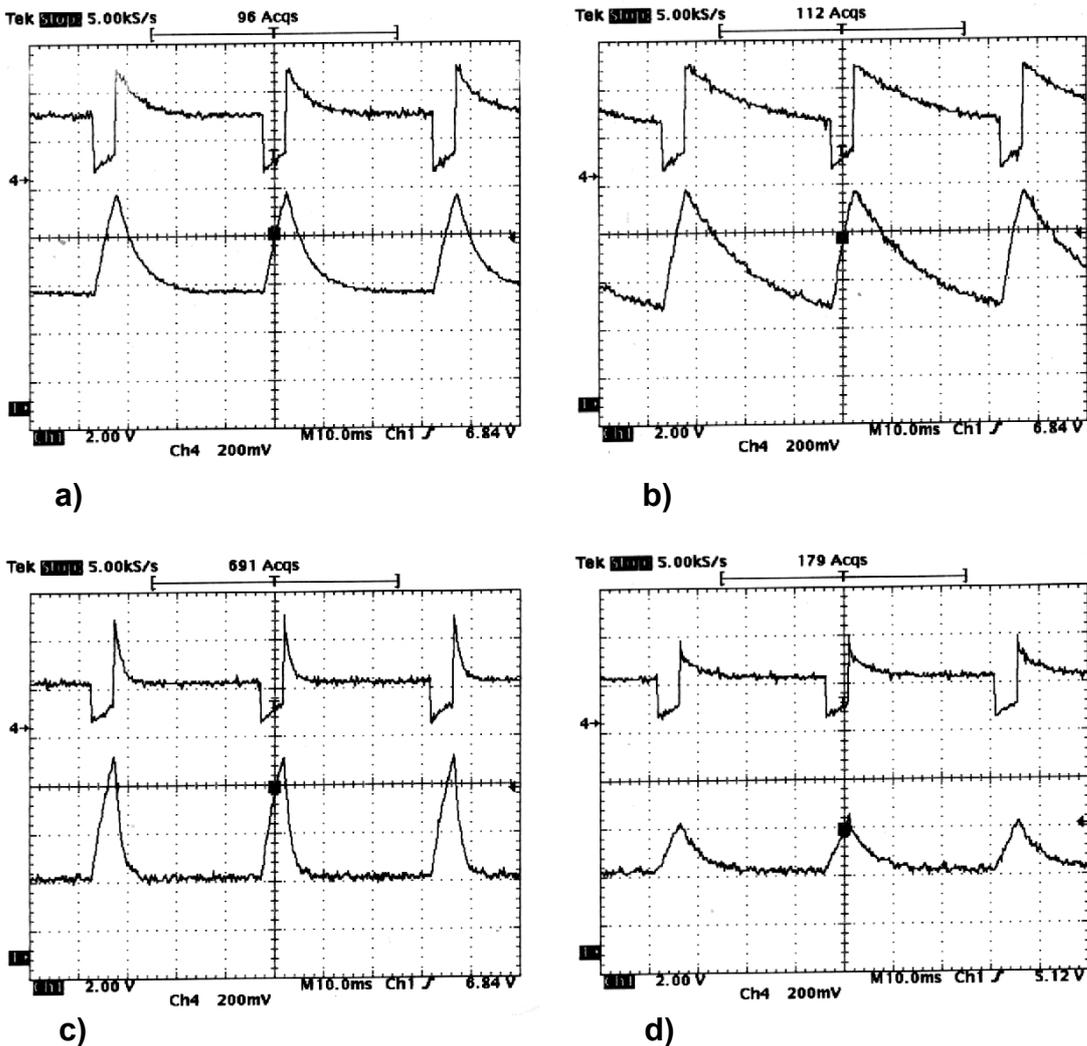


Figura 4.10 - Formas de onda dos sinais de tensão e corrente no simulador, com diferentes indutâncias de subida (L_s) e descida (L_d).

a) L_s e L_d médias, b) L_d elevada, c) L_d pequena e d) L_s elevada.

Descrição do funcionamento do circuito de simulação:

- i - Na transição de descida do sinal do gerador de função a chave 2 muda da posição P1 para P2, iniciando a simulação do curto-circuito. A chave 2 permanece nesta situação durante o tempo de curto-circuito t_{cc} , produzido pelo gerador de pulso do bloco 3.
- ii - Após o término de t_{cc} a chave 2 volta para posição P1, momento que é produzido o pulso invertido t_{rea} no bloco 2, abrindo a chave 1. O circuito equivalente obtido durante o tempo t_{rea} , simula o pico de tensão que ocorre em algumas situações de soldagem, no instante da reignição do arco.
- iii – Ao finalizar o tempo t_{rea} , é iniciada a simulação da principal fase do arco, que irá durar até que ocorra uma nova transição de descida do gerador de função, iniciando as etapas i, ii e iii.

A comunicação da CPU com a fonte de soldagem foi realizada através dos sinais $I_{S_{Ref}}$ (eq. 4.3) e E_{as} (eq. 4.4), os quais são proporcionais aos valores da corrente de saída (I_s) e da tensão de arco (E_a).

$$I_{S_{Ref}} = k_i \cdot I_s \quad (4.3)$$

$$E_{as} = k_a \cdot E_a \quad (4.4)$$

Onde : K_i e K_a são as constantes de proporcionalidades da corrente e da tensão respectivamente.

O valor dos componentes do circuito de simulação pode ser obtido através das equações 4.3 e 4.4, pois I_{sref} e E_{as} tornam-se iguais a I_{Ref} e E_{as} respectivamente, ao se ligar os sinais de comunicação da CPU ao do simulador. Por exemplo: o valor inicial da resistência de curto-circuito R_{cc1} pode ser obtido através dos valores de tensão do arco (E_{a_i}) e corrente de arco (I_{s_i}) no instante que inicia o curto-circuito (eq. 4.5).

$$R_{cc1} = k_a \cdot E_{a_i} / K_i \cdot I_{s_i} \quad (4.5)$$

4.2.4 - Ensaio práticos.

Segundo a estratégia de desenvolvimento adotada, a primeira etapa dos ensaios foi feita com a configuração A definida no item 3.1.2, que permitia uma maior flexibilidade no desenvolvimento dos algoritmos de controle, devido a versatilidade do PC e a utilização das linguagens de programação C e PASCAL. Após os reajustes necessários, em função dos resultados obtidos com a configuração A, o algoritmo de controle foi implementado na configuração C, inicialmente utilizando a linguagem Forth para o micro-controlador 8031 e mais recentemente na linguagem C destinada ao 8031. Esse mesmo procedimento foi adotado para todos os desenvolvimentos abrangendo as demais modalidades, e serão descritos no decorrer deste trabalho.

Primeiramente, optou-se pela linguagem Forth, pois, na época, não foi encontrado nenhum ambiente de desenvolvimento em C para o 8031 que integrasse editor, “debugger” e compilador. Entretanto, apesar do Forth, na época, ter apresentado maior velocidade de desenvolvimento, a legibilidade do programa tornou-se prejudicada com o aumento do tamanho do programa, fazendo com que as modificações ficassem complexas e demoradas. Com a evolução dos ambientes de programação em C para o 8031, decidiu-se fazer toda implementação novamente. O resultado foi impressionante. O que havia sido desenvolvido em FORTH durante quase 3 anos foi transcrito para C em pouco mais de 6 meses. Isso se deve, principalmente, a utilização das técnicas de engenharia de “software” abordadas no item 4.1, bem como, devido à preocupação que se teve em planejar o código em C dos programas feitos no PC para estudo de viabilidade, com o objetivo de reutilizá-los no 8031.

A validação do desempenho do algoritmo foi feita através de uma série de ensaios realizados por um soldador qualificado, usando os arames eletrodos ER70S6, ER5336, arames para cavitação (CAVITEC, CAVITALOY) e brasagem (BT513, BT511M da Brastak), procurando abranger situações comumente encontradas na prática e outras que já foram confrontadas no LABSOLDA. Na avaliação dos resultados foi verificado o comportamento dos oscilogramas de corrente e tensão, observados o aspecto e geometria da solda e ouvido o depoimento do soldador.

A influência da indutância sobre a corrente de soldagem é apresentada na figura 4.11 para três situações diferentes, listadas nos itens 1,2 e 3 da tabela 4.1. Já

a figura 4.12 mostra uma soldagem com CO₂ puro após a introdução da limitação da corrente mínima (I_{min}), item 4 da tabela.

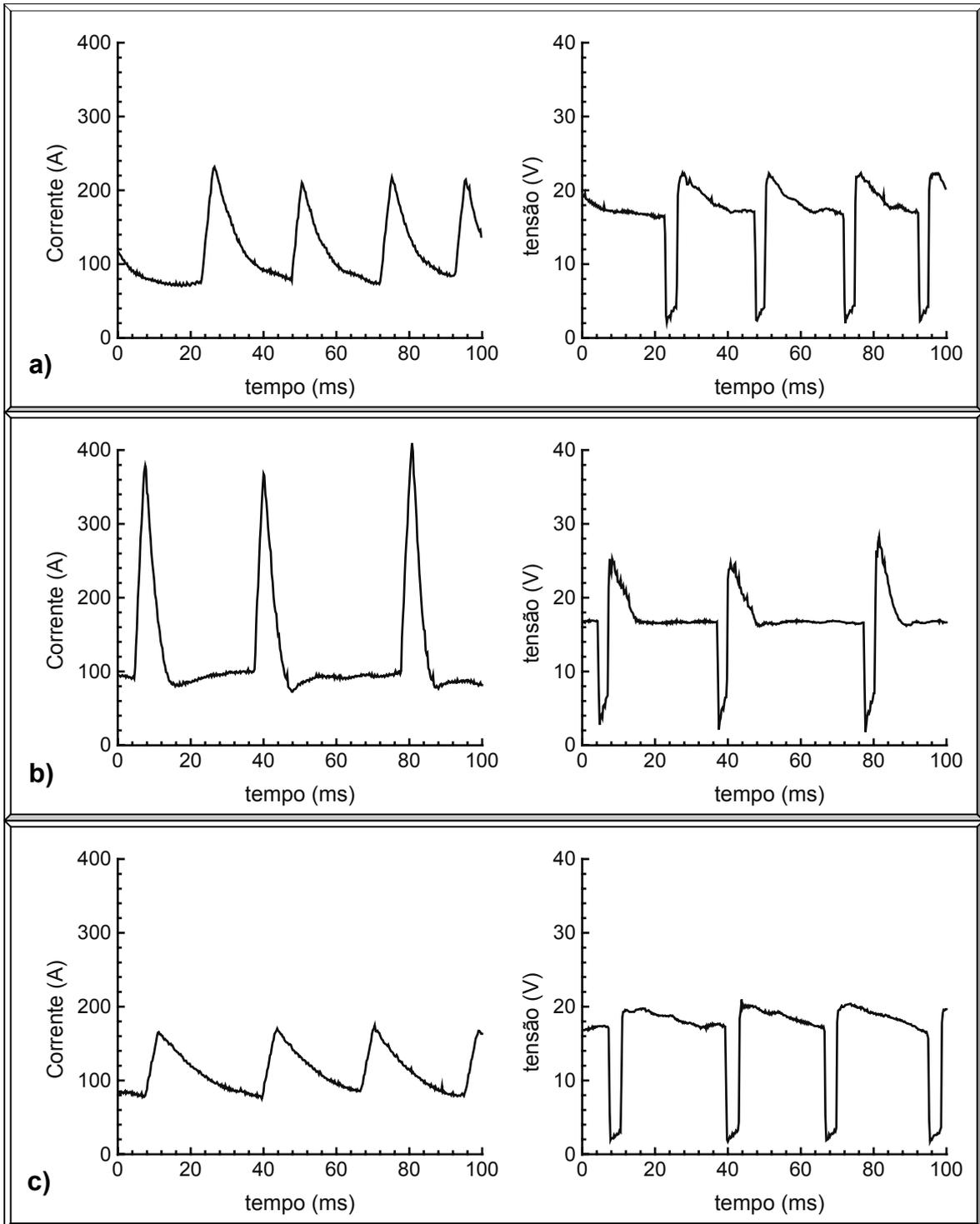


Figura 4.11 – Oscilogramas: a) item 1 da tabela 4.1 b) item 2 e c) item 3.

Tabela 4.1 – Ensaios de Soldagem no MIG/MAG convencional arame 1.2 mm.

Item	Arame	Gás	Tensão (V)	Vel. Arame (m/min)	Ks	Kd
1	ER5336	Argônio puro	16.5	7.0	10	10
2	ER5336	Argônio puro	16.5	7.0	25	25
3	ER5336	Argônio puro	16.5	7.0	5	5
4	ER70S6	CO ₂ puro	23.0	4.0	10	25

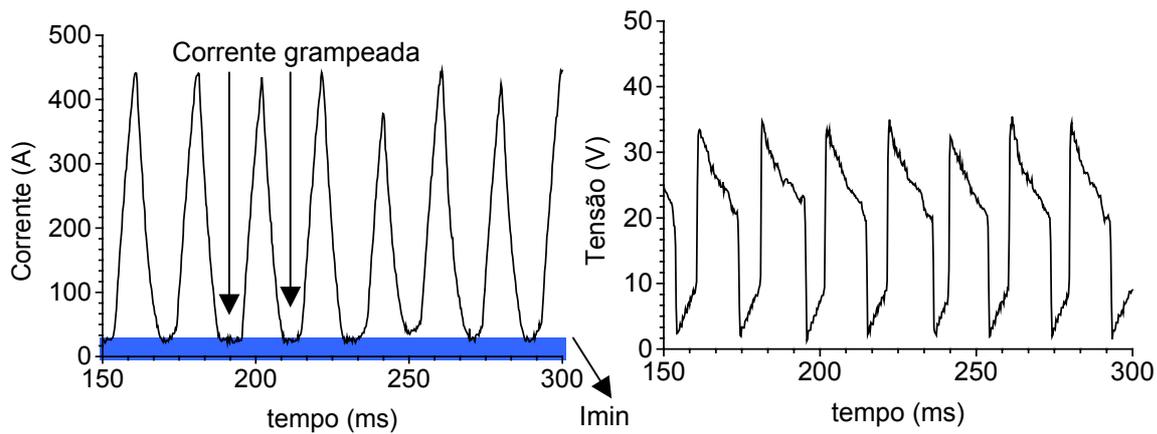


Figura 4.12 – Oscilograma para o item 4 da tabela 4.1.

Os resultados mais significativos foram obtidos na soldagem com CO₂ puro, principalmente devido à introdução do limite mínimo de corrente (I_{min}) (figura 4.12), evitando as extinções apresentadas na figura 4.7, e, também, por que à transferência metálica com este gás necessita de um ajuste mais apurado das indutâncias de subidas e descidas. Na figura 4.12, pode-se observar que a corrente foi grampeada no limite mínimo. Este aumento da estabilidade do arco, aliado ao ajuste diferenciado das indutâncias de subida e descida, permitiu uma maior liberdade de escolha dos valores de tensão e velocidade de arame, ou seja, obteve-se uma maior faixa de operação.

4.3 – MIG/MAG PULSADO normal

Para viabilizar os demais desenvolvimentos que serão apresentados nos próximos sub-capítulos, foi necessário implementar o MIG/MAG pulsado por “software”.

4.3.1 - Análise do comportamento do arco impondo corrente pulsada com ajuste da velocidade de arame.

Conforme foi apresentado no item 2.1.2, na soldagem com imposição de corrente e ajuste da velocidade de arame não existe o auto-ajuste da altura do arco como acontece no MIG/MAG convencional (controle da tensão). Isso faz com que a altura do arco aumente proporcionalmente ao aumento da distância entre o bico de contato e a peça (DBP), prejudicando o controle da poça de fusão e a forma do cordão. Já, quando a DBP é reduzida, como a altura entre a ponta do eletrodo e a peça torna-se menor, o arame acaba tocando na peça. Como consequência disso surgem curto-circuitos que, dependendo do tipo do arame, podem se prolongar e causar o enrolamento do arame.

Para evitar estas situações, desenvolveu-se uma técnica simples, porém eficiente, baseada no monitoramento da tensão do arco durante o período de base, que é apresentada no próximo item.

4.3.2 - Desenvolvimento de um algoritmo de controle.

A figura 4.13 apresenta o algoritmo de controle para o MIG/MAG pulsado, onde é possível se perceber a técnica utilizada para reduzir o tempo dos curto-circuitos ou eliminá-los. Pela lógica implementada caso a tensão decaia a um nível abaixo de um valor crítico, denominado tensão de curto-circuito (U_{cc}), é gerado um pulso de corrente de duração similar ao pulso de destacamento das gotas, mas de amplitude programável (I_{cc}).

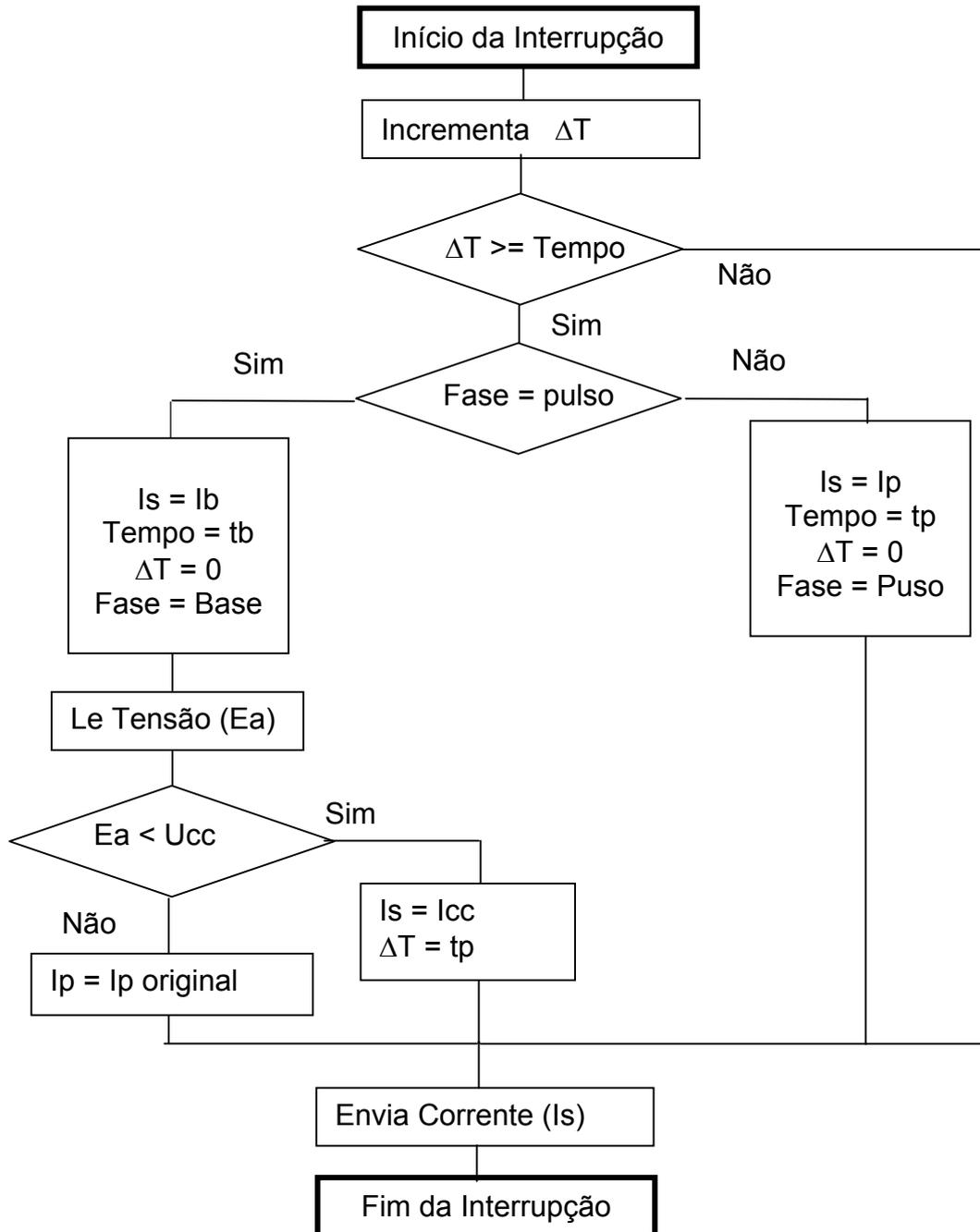


Figura 4.13 - Fluxograma do algoritmo de controle do MIG/MAG pulsado.

4.3.3 - Ensaios práticos.

Os primeiros ensaios foram realizados sem o controle de curto-circuito, cujo intuito foi testar a eficácia do algoritmo de controle, os quais revelaram que o mesmo produziu uma soldagem com comportamento idêntico aos obtidos nas fontes de soldagem INVERSAL e ELMA que utilizam controle analógico. A figura 4.14 mostra a sobreposição de um oscilograma de corrente obtido pela fonte ELMA, apresentado

na figura 8.9 da referência [16], e parte de outro, em vermelho, obtido com este algoritmo em condições iguais de soldagem.

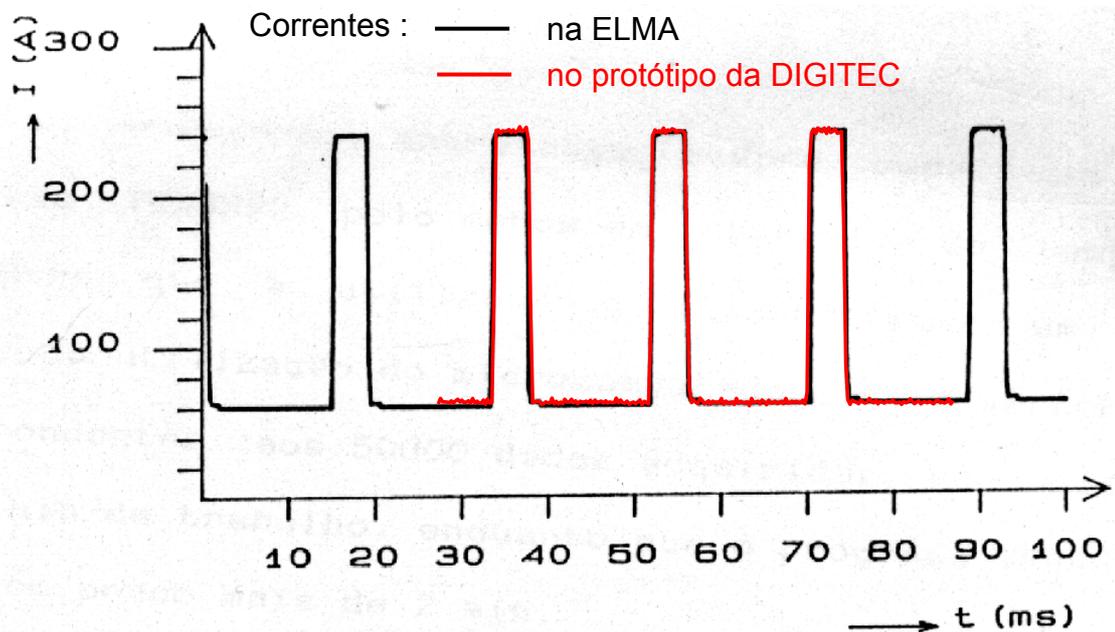


Figura 4.14 – Sobreposição de um Oscilograma de corrente obtido com a fonte de soldagem ELMA, em preto, e parte de outro obtido pelo algoritmo de controle com a configuração C, em vermelho.

Após, foram realizados ensaios de soldagem com arame de alumínio, para testar o controle da corrente durante o curto-circuito de abertura do arco. Esta escolha deve-se à dificuldade de soldá-lo no processo pulsado com imposição de corrente. Na figura 4.15a é mostrado uma soldagem com o controle de curto-circuito e, nas figuras 4.15b e 4.15c, sem este controle. No primeiro caso, com o controle de curto-circuito na abertura do arco, a soldagem foi executada com uma corrente média de 50 A, podendo-se perceber que quando o arame tocou na peça, instantaneamente, a corrente elevou-se, minimizando o tempo de abertura do arco. Nos outros dois casos, um com corrente média de 120 A e o outro com corrente de base e de pulso iguais a 160 A, após o arame tocar na peça, o mesmo permaneceu em curto, fazendo com que o arame ficasse enrolado em um emaranhado, junto ao bico de contato ou ao tracionador de arame.

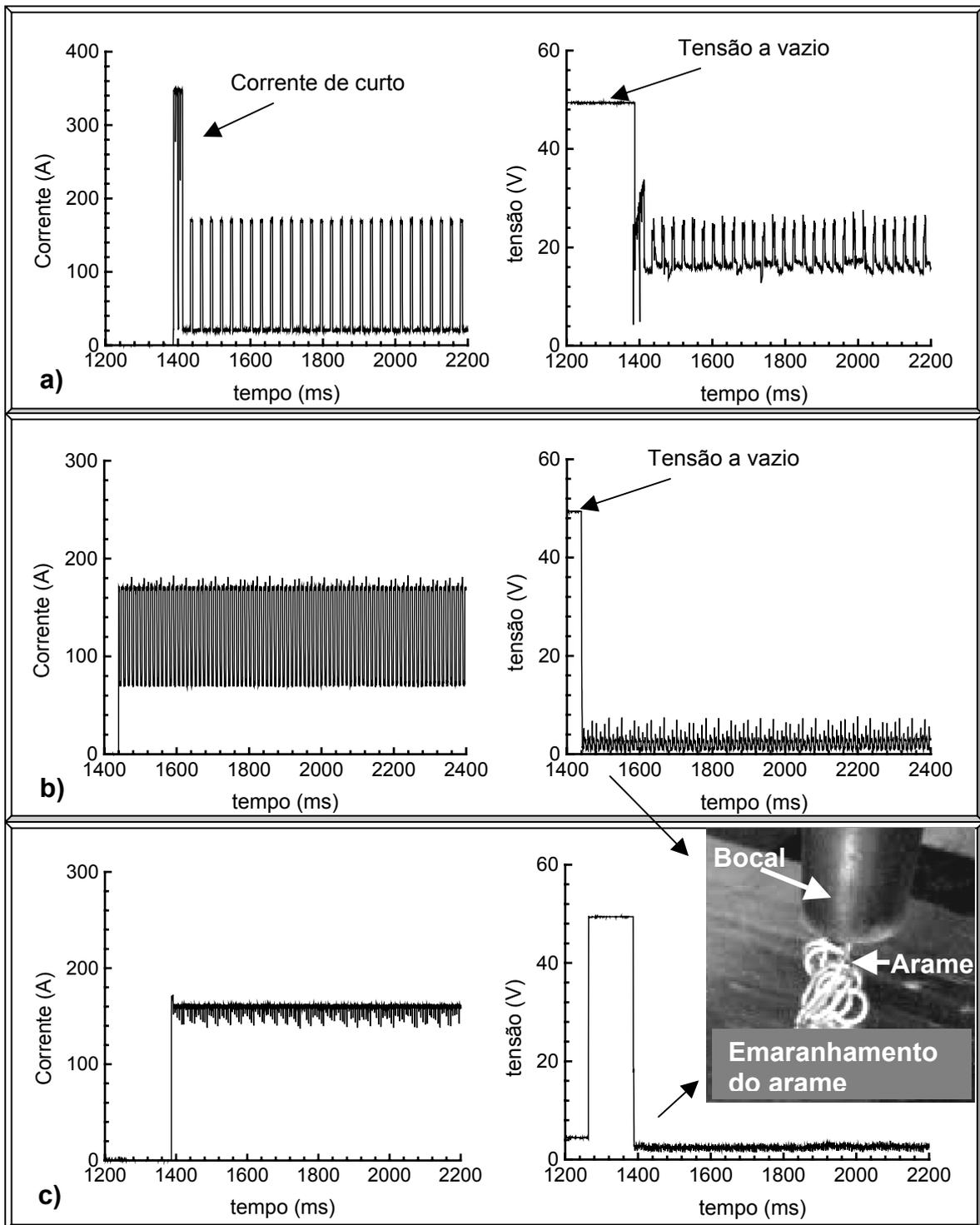


Figura 4.15 - Oscilogramas da abertura do arco na soldagem de alumínio com o MIG/MAG pulsado.

a) com controle do curto-circuito b) e c) sem controle do curto-circuito.

Um fato que comprova a eficiência da implementação realizada para evitar o prolongamento dos curto-circuitos pode ser observado no oscilograma da figura 4.16, onde os mesmos possuem um tempo muito pequeno. Isso se deve ao controle

tê-los identificados rapidamente (tensão do arco menor do que U_{cc}), gerando o pulso de corrente I_{cc} , antes que os curto-circuitos se consolidassem realmente.

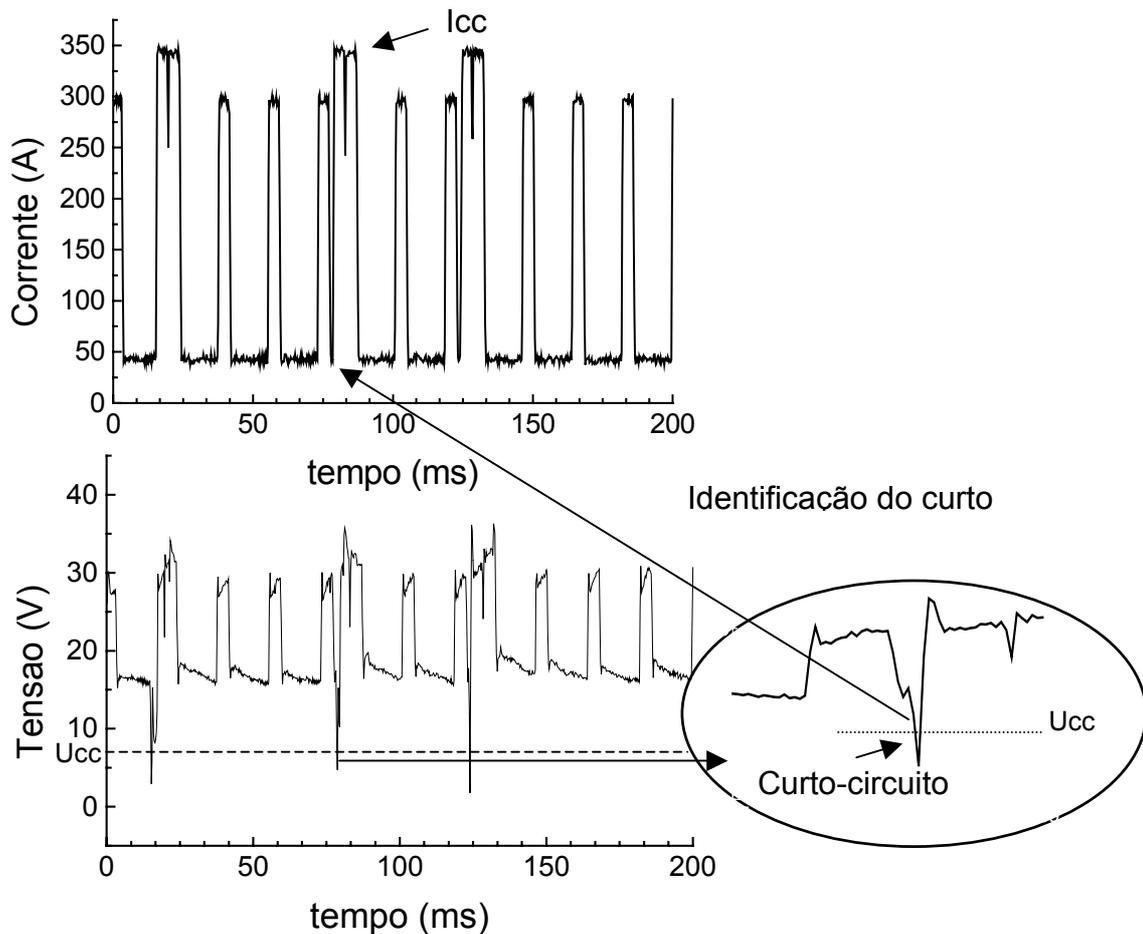


Figura 4.16 - Oscilograma de soldagem no Pulsado com DBP pequena.

(sinérgico 100 A, 4% CO_2 , ER70S6 1.2 mm)

4.4 – MIG/MAG PULSADO com Pulsção Térmica

A concepção dessa nova modalidade de soldagem surgiu devido a um trabalho cooperativo entre o LABSOLDA e uma empresa de geração de energia elétrica, destinado a obtenção de melhores resultados na recuperação de turbinas erodidas por cavitação.

O LABSOLDA iniciou as pesquisas com o MIG/MAG pulsado, devido ao mesmo garantir uma boa estabilidade do arco em diferentes posições de soldagem. Os arames testados foram o Hidroloy e o Cavitec, mas constatou-se que com o primeiro não se conseguia soldar com corrente pulsada e também ficou patente que o MIG/MAG pulsado promove um melhor acabamento do cordão e um menor índice

de porosidade, quando equiparado ao MIG/MAG com transferência por curto-circuito.

Entretanto, a produtividade (quantidade de material depositado por hora) ficou abaixo das expectativas, pois acima de uma determinada velocidade de arame, a energia empregada gerava uma poça metálica muito fluída, provocando o escorrimento do material.

Assim sendo, na perspectiva de aumentar a produtividade do MIG/MAG pulsado, concebeu-se a modalidade de soldagem denominada MIG/MAG pulsado com pulsação térmica. Esta foi delineada inspirando-se no processo TIG pulsado, com a finalidade de obter um melhor controle sobre a energia entregue ao arco, permitindo um maior controle da poça metálica [23].

4.4.1 - Implementação da forma de onda para o MIG/MAG pulsado com pulsação térmica.

Esta modalidade de soldagem contém os fundamentos da transferência metálica do MIG/MAG pulsado e o controle de energia do TIG pulsado. Os traços destas duas modalidades podem ser encontrados na forma de onda que foi concebida para este fim, figura 4.17. A transferência metálica é garantida através dos pulsos de corrente, como ocorre no MIG/MAG pulsado. A área em azul corresponde à pulsação da corrente média, que é feita em uma frequência mais baixa, semelhante a do TIG, quando equiparada a do MIG/MAG. Essa menor frequência permite que a pulsação da energia térmica imposta pelo arco, a qual deu origem ao nome dessa modalidade de soldagem (pulsado com pulsação térmica), se propague pela impedância térmica da região que compreende a poça metálica e suas proximidades. Durante a fase onde a média possui o maior valor denominou-se pulso térmico, e a outra foi denominada base térmica.

Para garantir o controle sobre a transferência metálica, nas duas fases a constante de destacamento de gota ($lp^2 * tp$) foi mantida inalterada.

Neste caso, como existem níveis médios de energia diferentes, foi necessário, também, o ajuste da velocidade de arame em conformidade com a corrente média de cada fase.

Para evitar que ocorressem frações de um período de transferência em cada fase, figura 4.18, implementou-se no algoritmo uma função para desprezá-las. Assim sendo, o tempo de cada fase pode diferenciar do tempo ajustado de até um período

de transferência. Todavia, esse erro é praticamente insignificante, já que os períodos de pulso e base térmicos são muito superiores ao período de transferência.

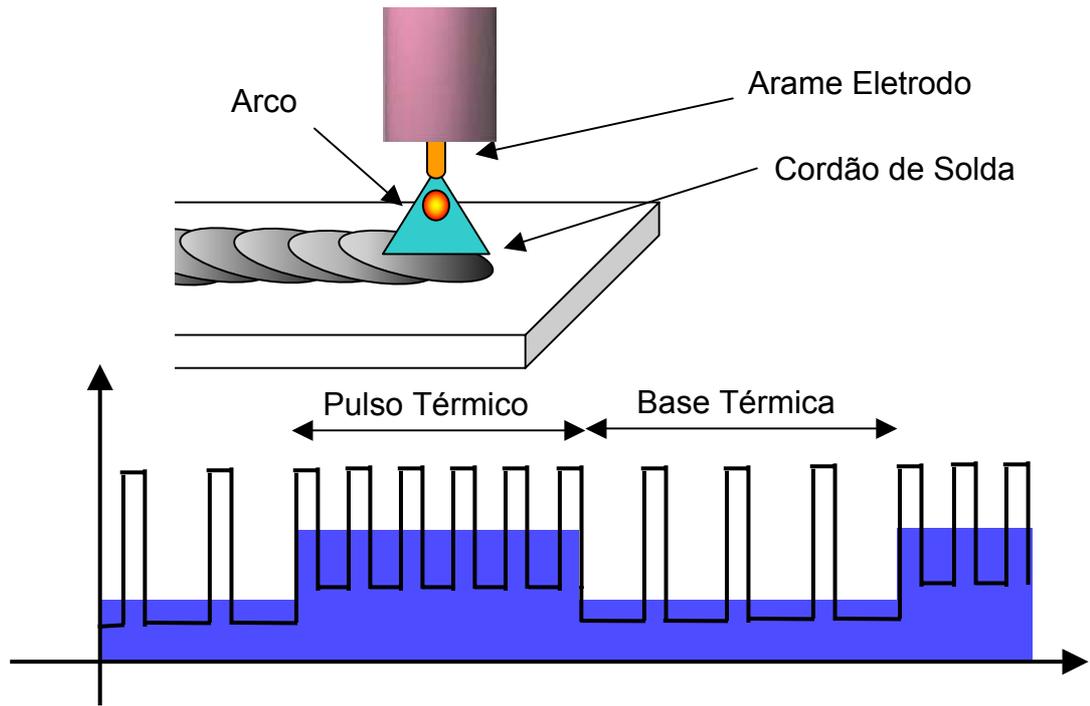


Figura 4.17 - Diagrama de sinais do pulsado com pulsação térmica.

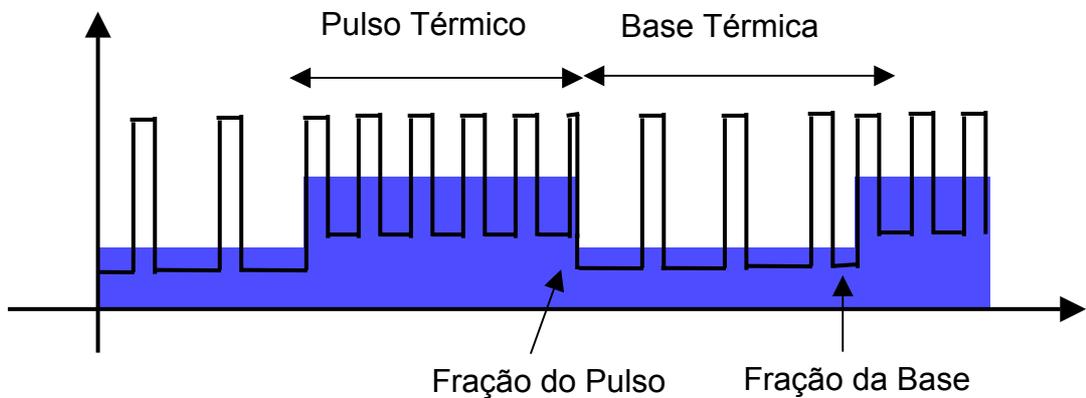


Figura 4.18 – Pulsado com pulsação térmica com frações de período de transferência.

A figura 4.19 mostra em forma de fluxograma o algoritmo que gera a forma de onda para o pulsado com pulsação térmica.

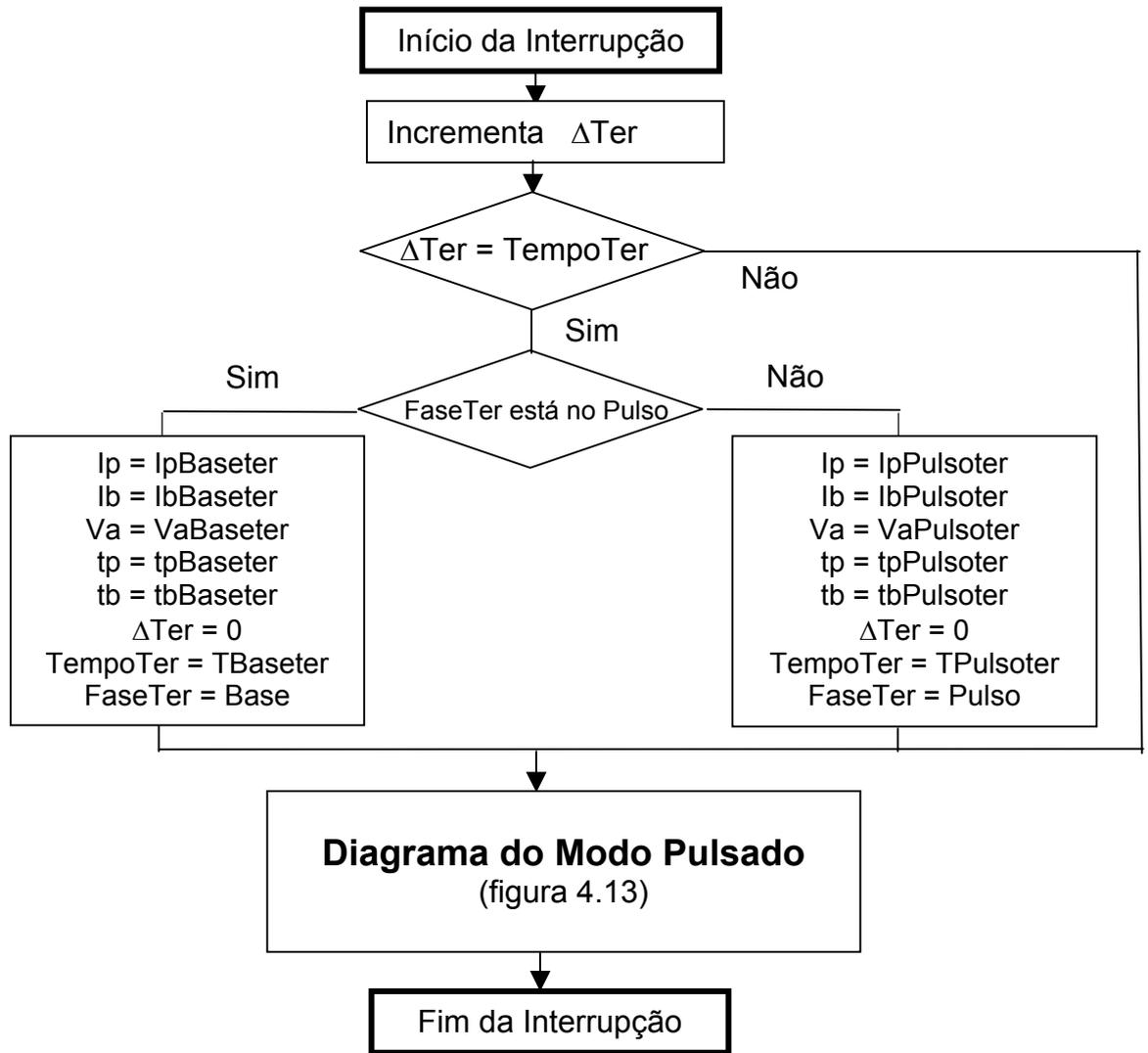


Figura 4.19 - Algoritmo da forma de onda do pulsado com pulsação térmica.

4.4.2 - Influência da resposta dinâmica da velocidade de arame

Nos primeiros testes de soldagem, foi observado que existiam grandes variações no comprimento do arco, principalmente no momento da transição do pulso térmico (PT) para a base térmica (BT) e vice-versa, as quais podem ser constatadas observando-se o desvio da tensão média em relação ao valor esperado, figura 4.20. Identificou-se que isso ocorria devido à resposta dinâmica lenta da velocidade do arame, aliada a mudança brusca da corrente média nos momentos das transições. A consequência era o surgimento de curto-circuitos na mudança do PT para BT, e o aumento da altura do arco na mudança da BT para o PT.

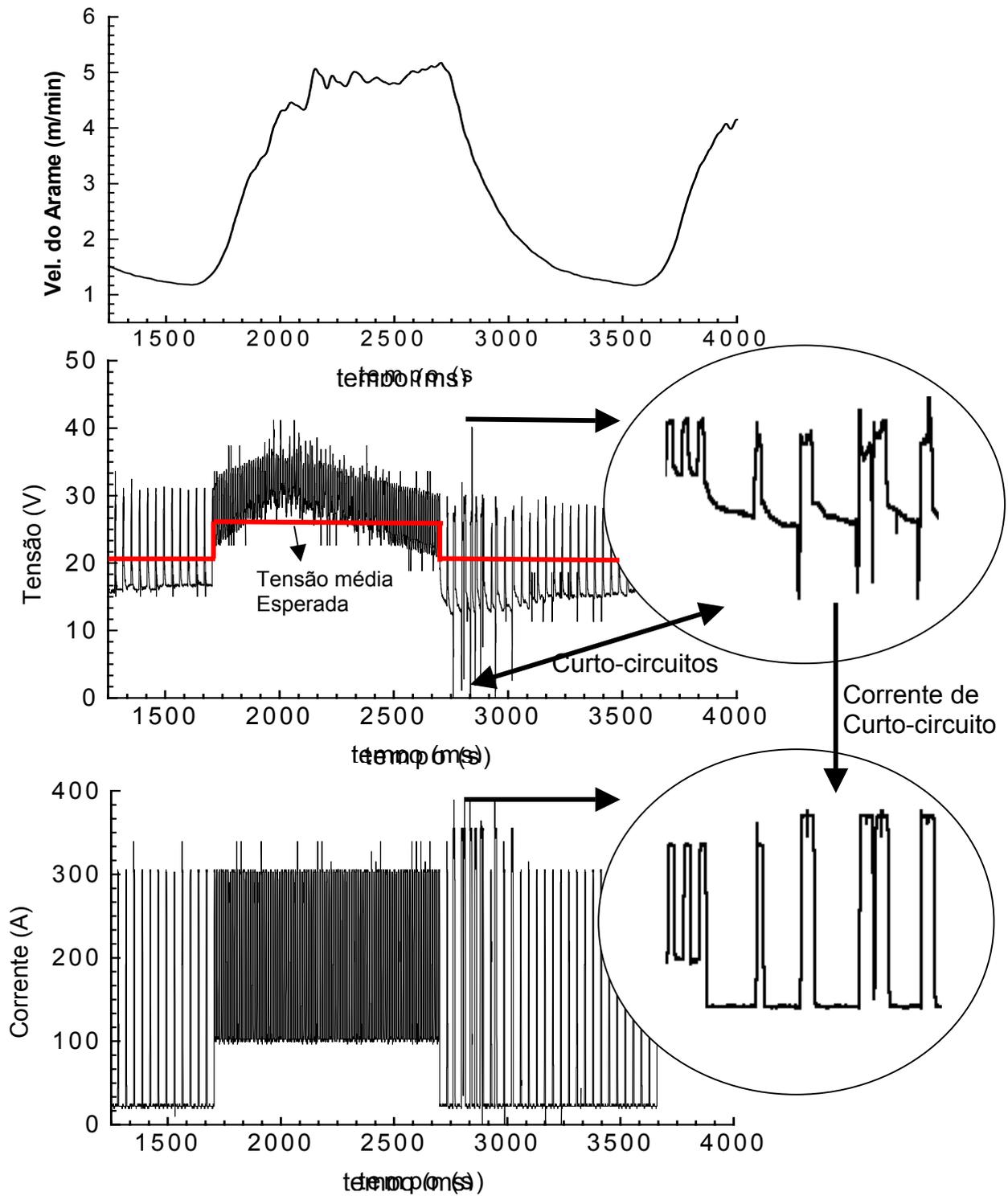


Figura 4.20 - Ensaio de soldagem com o MIG/MAG pulsado com pulsação térmica com tempo de resposta da velocidade de arame em 700 ms.

A solução para minimizar os inconvenientes causados pela resposta lenta do arame foi modificar o circuito de controle do cabeçote alimentador. Foi analisado que, para uma velocidade de resposta menor do que 200 ms, as perturbações no

arco não eram mais significativas, como pode ser observado através do gráfico da tensão na figura 4.21. Constatou-se que quanto mais se reduzia o tempo de resposta, mais instável ficava o controle da velocidade, sendo que se adotou uma resposta por volta de 100 ms para o novo circuito de controle projetado, admitindo-se um certo nível de oscilação, conforme é apresentado no gráfico da velocidade de arame da figura 4.21, que foi a realizado nas mesmas condições do ensaio com resposta lenta (figura 4.20).

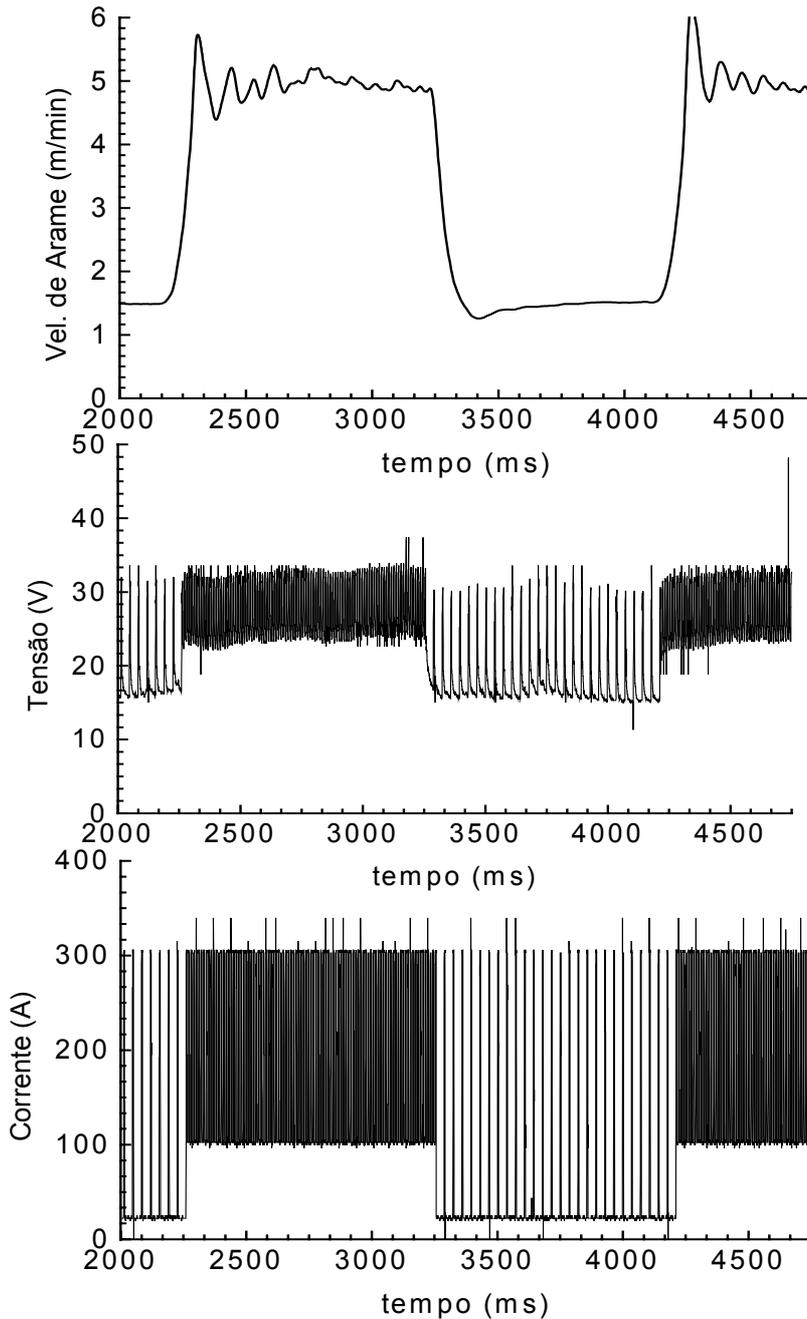


Figura 4.21 - Ensaio de soldagem com o MIG/MAG pulsado com pulsação térmica com tempo de resposta da velocidade de arame em torno de 100 ms.

4.4.3 - Ensaio práticos

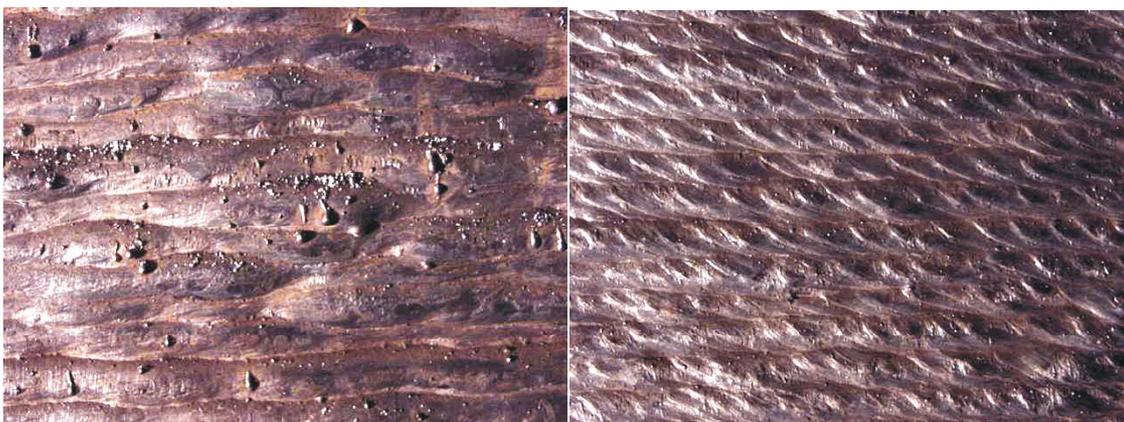
Segundo a estratégia experimental adotada, a primeira fase de ensaios práticos foi realizada usando a configuração A com uma fonte INVERSAL.

Os resultados obtidos estão descritos a seguir:

- Maior sustentabilidade da poça de fusão, o que propiciou um incremento da produtividade (cerca de 15 %) para um mesmo nível de qualidade de depósito.
- Um acabamento incomparavelmente superior ao MIG/MAG convencional (Figura 4.22) e mais repetitivo do que o pulsado normal, devido à própria cadência da pulsação que orienta o soldador.
- Eliminação quase que total de porosidade.
- Aumento da homogeneidade do material depositado, já que grande parte dos elementos de liga dos arames-eletrodos utilizados nestas aplicações não se encontram dissolvidos, mas se encontram na forma de pó no núcleo dos mesmos.

Das características citadas, a de maior relevância é a questão das porosidades. Acredita-se que sua eliminação se deva a fenômenos de mecânica dos fluidos, originada pelo forte efeito cíclico de aumento e diminuição da energia do arco.

A figura 4.22b mostra o aspecto do cordão obtido com o MIG/MAG pulsado com pulsação térmica.



a)

b)

Figura 4.22 - Depósito de soldagem com o processo MIG/MAG na posição sobre cabeça, utilizando arame-eletrodo tubular à base de cobalto, com as modalidades :

a) convencional, b) pulsado com pulsação térmica.

Aproveitando a oportunidade de uma parada para reparo de turbina na usina hidrelétrica de Salto São Tiago, foi levada a configuração A com uma fonte INVERSAL, juntamente com um sistema de aquisição de dados (fig. 4.23), para se fazer um teste dessa nova modalidade em condições reais.

A avaliação da aplicação em campo confirmou os resultados obtidos em laboratório. Além disso, o processo foi considerado de mais fácil manuseio pelos soldadores, comparado com os processo MIG/MAG pulsado normal e transferência por curto-circuito. Essa facilidade ocorreu porque, durante a fase de base térmica, tem-se uma espécie de pausa na deposição do material, permitindo ao soldador um maior controle sobre a soldagem. É certo que o soldador não teria tempo para executar alguma ação sobre o processo durante um único intervalo da base térmica. Entretanto, a sucessiva repetição da mesma, numa frequência equiparada a do TIG, permite ao soldador esse maior controle. Outro fator observado foi que a baixa frequência impõe um ritmo de soldagem ao soldador, fazendo com que o mesmo consiga manter melhor a velocidade de soldagem.

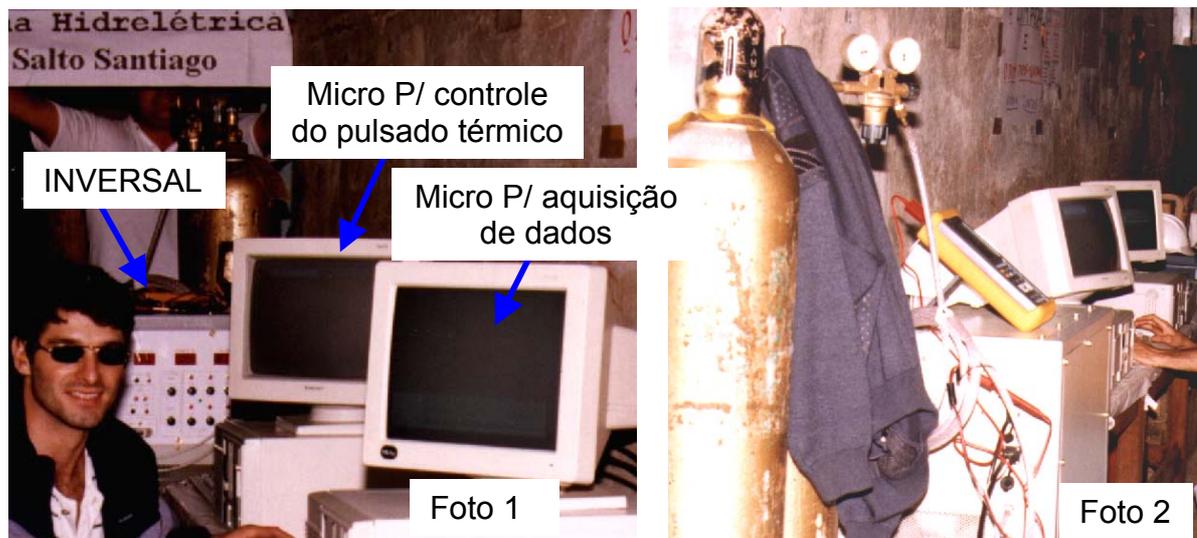


Figura 4.23 – Aplicação em campo do MIG/MAG pulsado com pulsação térmica em caráter de desenvolvimento. Local : Galeria da hidrelétrica de Salto Santiago.

Devido ao bom desempenho do MIG/MAG pulsado com pulsação térmica, uma empresa de geração de energia demonstrou-se disposta em adotá-lo como procedimento padrão na recuperação de pás de turbinas. Porém, a restrição imposta foi que o equipamento final fosse de fácil operação e compacto, já que foi estimada a utilização de quatro equipamentos dessa natureza e o sistema utilizado apresentava os seguintes pontos negativos:

- Necessidade de um computador, instrumentos de condicionamento de sinais e uma série de cabos e conexões ligados à fonte de soldagem, os quais não suportariam um trabalho contínuo em tal ambiente de soldagem.
- Volume ocupado pelo sistema era apreciável, considerando-se o espaço disponível no local onde fica a turbina, e a previsão de pelo menos quatro sistemas.
- Complexidade na manipulação e conexões das partes que compõem o sistema.
- Grande número de variáveis envolvidas nessa nova modalidade.

A preocupação em tornar realidade um equipamento de soldagem com o perfil imaginado pela empresa, já havia sido cogitado pelo LABSOLDA. Trata-se da configuração C já citada em 3.1.2. Assim sendo, para finalizar as atividades referentes ao MIG/MAG pulsado com pulsação térmica, realizou-se sua implementação na configuração C (DIGITEC), onde o algoritmo testado no PC (configuração A), foi transcrito, inicialmente, para linguagem FORTH destinada ao micro-controlador 8051.

Durante a aplicação em campo, verificou-se a necessidade de mais duas etapas de soldagem, uma inicial e outra final, que foram acrescentadas no algoritmo da DIGITEC, resultando no esquema de soldagem mostrado na figura 4.24. A etapa inicial teve como função permitir ao soldador iniciar a soldagem com um nível de depósito menor, de maneira a possibilitar um melhor posicionamento da tocha, e somente então dar início à etapa de soldagem. A etapa final destinou-se a obter um melhor acabamento no final do cordão. Isso, também reduziu a quantidade de defeitos e o acúmulo de material no início e final do cordão de solda.

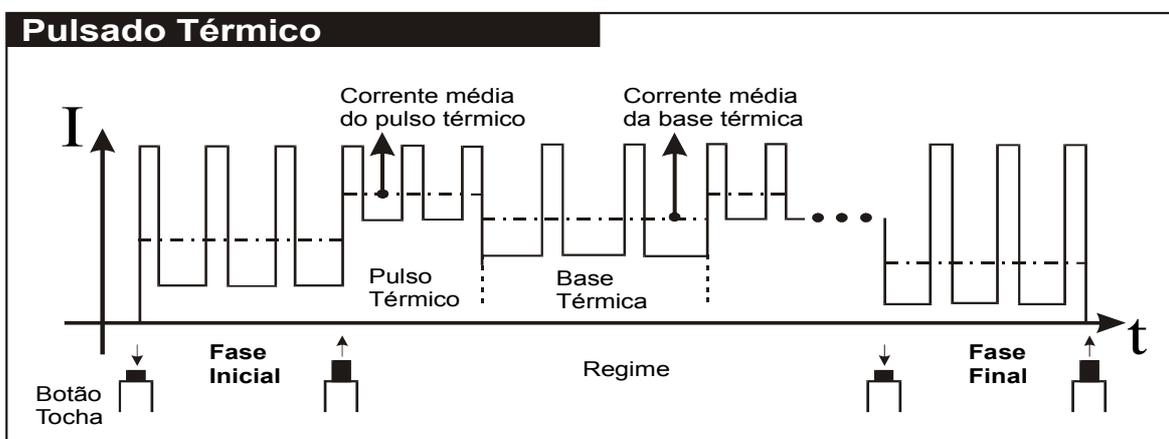


Fig. 4.24) – Esquema de soldagem no MIG/MAG pulsado com pulsação térmica com 3 fases.

Para a versão final do equipamento de soldagem, foram necessárias algumas modificações de ordem física, devido principalmente ao espaço restrito no local da turbina e a não ser permitido a utilização de tensões acima de 100 V, que era necessária para alimentação do mesmo. A solução encontrada foi deixar as fontes na galeria de acesso e fazer uma extensão de 20 m para o alimentador de arame e para o painel remoto (teclado/display). Isso fez com que fossem necessárias algumas adaptações no “hardware” e “software” para diminuir os efeitos de ruídos induzidos no painel de controle, bem como, ruídos e oscilações gerados no próprio cabo de solda devido ao seu grande comprimento. As alterações foram mais a nível de filtros, tanto de “software” como de “hardware”. A figura 4.25 mostra a versão final do equipamento e, a figura 4.26 o resultado de algumas soldagens na turbina.

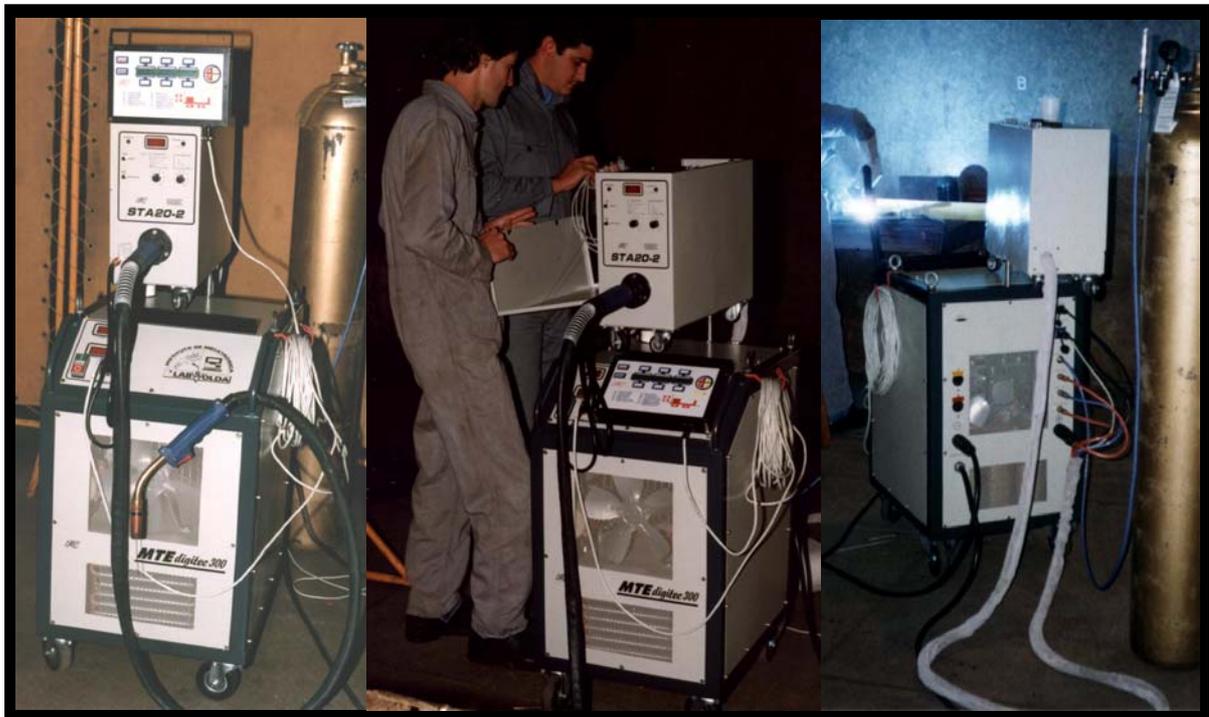


Fig. 4.25) – Versão do equipamento de soldagem para soldagem de turbinas.



Fig. 4.26) – Fotos de partes da turbina soldadas com o pulsado com pulsação térmica.

4.5 – MIG/MAG PULSADO Sinérgico.

Na análise feita previamente no item referente ao MIG/MAG pulsado, foi citada a falta de conhecimento sobre este processo por grande parte das pessoas que atuam na área de soldagem. Com a introdução do MIG/MAG pulsado com pulsação térmica, a complexidade de ajustes tornou-se ainda maior. Desta forma, o caminho para amenizar estas dificuldades foi o desenvolvimento do pulsado sinérgico, que foi abordado na parte final do item 2.1.2.

Atualmente existem algumas proposições para se obter a correlação entre as variáveis de soldagem de acordo com a aplicação, as quais apresentam diferentes graus de complexidade. A proposta implementada, apresentada no transcrito deste item, alvejou à obtenção de um conjunto de equações simples, visando sua utilização em micro controladores.

O desenvolvimento do sinérgico foi baseado nos resultados do trabalho realizado por Dutra [16], utilizando-se uma simplificação da equação que relaciona a velocidade de arame com a corrente de soldagem, cujos primeiros resultados foram apresentados em [17].

4.5.1 - Determinação da forma de cálculo das variáveis de soldagem.

A determinação das variáveis de soldagem no MIG pulsado, como já foi descrito, depende basicamente do tipo e diâmetro de arame e da formulação do gás de proteção.

As variáveis responsáveis pelo destacamento de gota t_p e I_p , bem como a função que relaciona a velocidade de arame (V_a) com a corrente média (I_m), são obtidas experimentalmente através de ensaios práticos. Dutra [16] apresenta algumas metodologias para a determinação de tais variáveis e funções. A determinação de I_p e t_p , proposta por Dutra, é feita através da análise da tensão do arco, que sofre um aumento no momento do destacamento da gota. Atualmente, existem sistemas mais modernos, baseados em filmagens do destacamento e na luminosidade do arco (sensores óticos). Tais sistemas permitem obter os parâmetros de forma mais segura, pois no outro caso, os resultados dependem da experiência e sensibilidade de quem está fazendo os ensaios, uma vez que a tensão do arco pode sofrer variações devido a outros fatores.

A função que relaciona a velocidade de arame (v_a) com a corrente foi simplificada para uma relação de proporcionalidade entre v_a e a corrente média (I_m), eq. 4.6.

$$V_a = k_{si} * I_m \tag{4.6}$$

Onde : k_{si} = coeficiente de proporcionalidade entre V_a e I_m .

As demais variáveis da forma de onda de corrente são obtidas pressupondo-se que toda quantidade de arame L_e , fig. 4.27, que passou através do bico de contato entre dois pulsos de corrente consecutivos (um período de transferência T), foi convertida em uma gota esférica. Desta forma, especificando-se o diâmetro da gota (D_g), pode-se calcular o volume da gota (V_g), através da eq. 4.7.

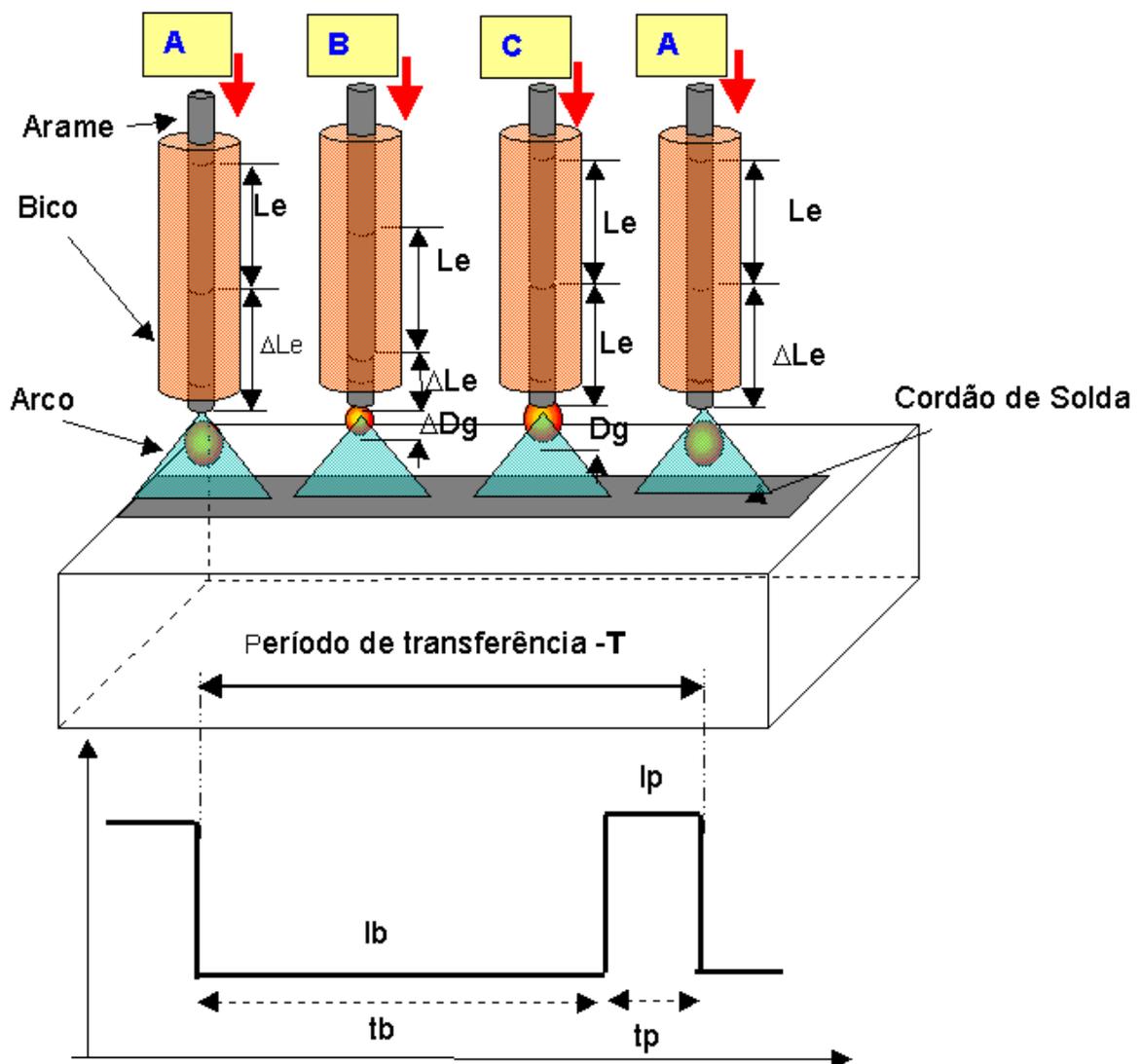


Figura 4.27 – Representação esquemática da conversão de um comprimento de arame (L_e) em uma gota metálica (D_g).

$$Vg = f(Dg) \quad (4.7)$$

Admitindo-se que todo o volume do arame (V_e) converteu-se na gota de diâmetro D_g , pode-se determinar o comprimento do eletrodo (L_e) necessário para isso, eq. 4.8 e 4.9:

$$L_e = f(V_e) = f(V_g) \quad (4.8)$$

Considerando-se que o arame é um cilindro e a gota uma esfera perfeita através da igualdade dos volumes, tem-se:

$$L_e = 2 \cdot D_g / 3 \quad (4.9)$$

Então, conhecendo-se a velocidade e comprimento do arame necessário para formar a gota, pode-se determinar o período de transferência da mesma (T), eq. 4.10.

$$T = L_e / V_a \quad (4.10)$$

Com isso, pode-se determinar o tempo de base (t_b), eq. (4.11).

$$t_b = T - t_p \quad (4.11)$$

Para finalizar, só restou o cálculo da corrente de base, que pode ser obtida isolando-se I_b da equação da corrente média, eq. 4.12.

$$I_b = [I_m \cdot (t_p + t_b) - I_p \cdot t_p] / t_b \quad (4.12)$$

4.5.2 - Desenvolvimento de um algoritmo para implementação do sinérgico.

Pode-se perceber que I_b (eq. 4.12), dependendo do valor de I_m selecionado, poderá ficar abaixo de um valor mínimo necessário para manutenção do arco ou até mesmo negativo. Neste caso, uma solução seria aumentar t_b e manter I_b no valor mínimo. Todavia, tal solução, apesar de evitar a extinção do arco, acaba resultando no aumento do diâmetro de gota. Desta maneira, decidiu-se restringir o valor da corrente média quando I_b tornava-se crítico.

O algoritmo que foi implementado é baseado em uma lista que contém o material, o diâmetro do arame e o gás de proteção, que estão agrupados em um mesmo elemento da lista. Na figura 4.28 isso é representado através de um diagrama de blocos. Cada elemento da lista está indexado aos seus respectivos parâmetros de destacamentos (I_p, t_p) e ao coeficiente de proporcionalidade entre a velocidade de arame e a corrente média (K_{va}).

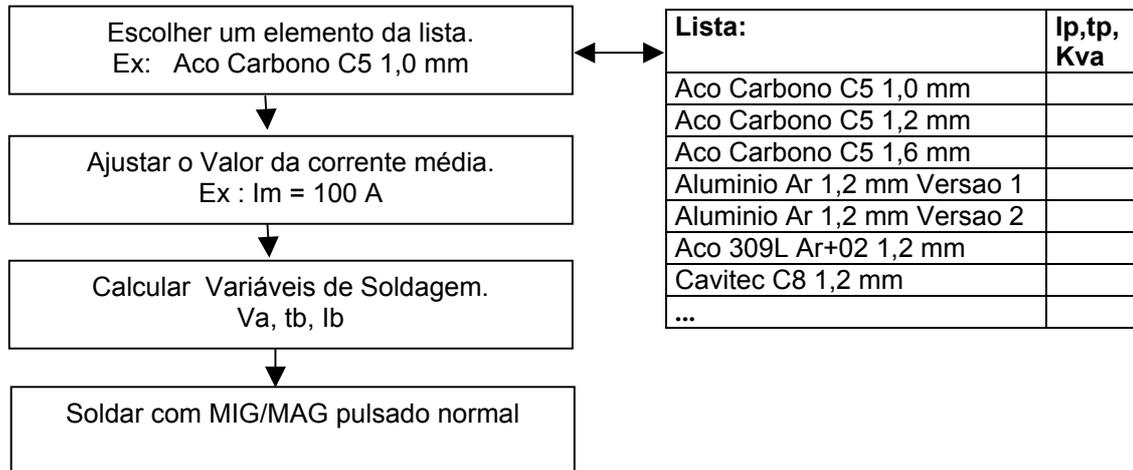


Figura 4.28 - Diagrama de blocos simplificado da determinação das variáveis de soldagem no processo MIG/MAG pulsado sinérgico.

O programa foi implementado de forma que o usuário somente necessite escolher um dos elementos da lista e a corrente média de soldagem, sendo as demais variáveis de soldagem calculadas pelo programa. Para controle da forma de onda foi utilizado o algoritmo do pulsado normal.

4.5.3 - Ajuste da altura do arco

Devido aos cálculos das variáveis de soldagem serem baseados em ensaios realizados sob determinadas condições, a soldagem pode não se repetir exatamente igual em outras circunstâncias, exigindo reajustes nos valores de V_a e I_m . Isso pode ocorrer devido à existência de variações no diâmetro do eletrodo (tolerância de fabricação), na composição do gás, na geometria das chapas, na distância entre o bico de contato e peça, no ângulo da tocha, na posição de soldagem, etc. .

Como não é possível prever todas essas situações, uma das soluções seria fazer uma correção da velocidade de arame em função da tensão do arco, ou usando algum outro tipo de sensor. No caso da utilização da tensão do arco como

sensor, poder-se-ia introduzir certas instabilidades, semelhante as que ocorrem com o controle externo no MIG/MAG com imposição de corrente, necessitando um trabalho de investigação mais detalhado sobre esse tema. Assim, a solução usada foi à introdução do conceito de ajuste de comprimento do arco, o qual é feito pelo usuário.

O ajuste do comprimento do arco é na realidade um reajuste da velocidade do arame, que é calculada em função da corrente média. Ao ser ajustado o mesmo em uma unidade positiva, está-se reduzindo a velocidade de arame em 0.1 m/min, e se for em uma unidade negativa a velocidade será aumentada em 0.1 m/min. Conceitualmente seria necessário fazer o recálculo das demais variáveis de soldagem para se manter o diâmetro de gota constante. Contudo, optou-se por não fazer o recálculo das mesmas, primeiramente porque a relação percentual entre o valor reajustado e o valor calculado é pequena, resultando em uma alteração muito pequena no diâmetro de gota, e também, porque quanto menos cálculos mais rápido torna-se o algoritmo.

4.5.4 - Ensaio práticos

Os ensaios com o sinérgico objetivaram verificar, através dos oscilogramas de corrente e tensão, se as variáveis de soldagem resultantes dos cálculos eram as mesmas lidas durante a soldagem. Aspectos ligados ao cordão de solda foram analisados somente por inspeção visual, uma vez que os valores das variáveis de soldagem gerados pelo programa eram fruto de um conjunto de experimentação prática, que levava tais aspectos em consideração, ou seja, o sinérgico é uma forma de se garantir a repetição de um conjunto de experimentos realizados previamente.

Foram determinados os equacionamentos para doze combinações diferentes de arames e gás de proteção, os quais estão listados na tabela 4.2.

Mesmo utilizando-se uma simplificação da equação que relaciona velocidade de arame com a corrente média, a altura do arco manteve-se praticamente constante para toda faixa de corrente média considerada usual. Nos casos onde o arco tendeu a aumentar ou a diminuir, pequenas correções na variável altura do arco (velocidade do arame) foram suficientes para deixá-lo na altura adequada.

Outro aspecto foi identificar se o termo altura de arco era usual e se seria compreendido pelos usuários da solda, que foi bem aceito, tanto pelos soldadores do Labsolda, como por uma série de soldadores que trabalham na recuperação de

pás de turbina, os quais estão acostumados a utilizar palavras como arco mais ou menos enterrado, mais quente ou mais frio, derreter mais ou menos, etc

Tabela 4.2 – Combinação de arames e gás implementados no sinérgico.

Aço Carbono C5 1,0 mm
Aço Carbono C5 1,2 mm
Aço Carbono C5 1,6 mm
Alumínio Ar 1,0 mm
Alumínio Ar 1,2 mm Versão 1
Alumínio Ar 1,2 mm Versão 2
Alumínio Ar 1,6 mm
Aço 309L Ar+02 1,2 mm
Cavitec C8 1,2 mm
E309L T1 C25 1,2 mm
Cavitalloy Ar+2 02 1,3 mm
Cavitalloy Ar+2 02 1,6 mm

O bom desempenho do pulsado sinérgico fez com que fosse implementada, também, uma versão do MIG/MAG pulsado com pulsação térmica no modo sinérgico. Os resultados da nova versão além de reduzir o número de variáveis, diminuiu muito a complexidade de ajuste do processo.

4.6 - MIG/MAG com Duplo Arame.

O LABSOLDA iniciou uma linha de pesquisa voltada a soldagem com o MIG/MAG destinado ao duplo arame em 1998. Como as informações sobre este processo eram quase inexistentes, optou-se pelo desenvolvimento de toda infraestrutura necessária para dar suporte aos estudos do duplo arame. A razão para isso foi à escassez de fornecedores de equipamentos para o duplo arame, além de tudo, tais equipamentos saem da fábrica com determinadas características que não podem ser alteradas, fator que limita muito a pesquisa. Outra razão, foi que através da experiência já adquirida pelo LABSOLDA em pesquisas com novos processos de soldagem, são desejáveis equipamentos que possibilitem modificações a nível de “hardware”, de forma a suprir as novas necessidades que surgem naturalmente durante um processo de pesquisa.

A linha de pesquisa do duplo arame envolvia, tanto o desenvolvimento de equipamentos com características especiais, como o estudo desse processo de soldagem. Assim, para um desenvolvimento mais otimizado deste processo, foi feita uma integração entre alunos de pós-graduação de cada uma dessas áreas, visando-se obter um resultado mais consistente. As áreas referentes aos desenvolvimentos do equipamento e das novas formas de controle fizeram parte do presente trabalho. A área voltada ao processo de soldagem, que teve também a análise e desenvolvimento de uma tocha de soldagem, teve um grande impacto na pesquisa sobre o duplo arame, resultando na defesa de uma dissertação de mestrado [5] e o início de uma tese de doutorado [6], que se encontrava em fase de finalização.

As pesquisas foram executadas em várias frentes, cada qual exigindo determinadas características do equipamento, as quais serão descritas nos itens subsequentes.

4.6.1 - Soldagem com Potencial Único.

Os primeiros testes com o MIG/MAG duplo arame foram executados com uma única fonte de soldagem, que teve sua capacidade máxima de corrente ampliada de 450 A para 500 A, o que possibilitou a soldagem com arames ER70S-6 de até 1.0 mm de diâmetro. Para diâmetros maiores seria necessário aumentar ainda mais o valor máximo da corrente da fonte, o que resultaria no projeto de uma nova unidade de potência para controle da corrente. Então para desviar do projeto dessa unidade, optou-se pela utilização de duas fontes de soldagem, que também seriam necessárias para soldagem com potencial isolado.

Conforme apresentado no item 2.1.3, quando são utilizadas duas fontes na soldagem com a modalidade duplo arame com potencial único, surgem dois problemas, o desequilíbrio de corrente em cada fonte, quando se opera no modo convencional, e a necessidade de sincronismo entre os pulsos de corrente de cada fonte, quando se opera no modo corrente pulsada.

A solução encontrada para os dois casos foi introduzir um conector em cada fonte de soldagem com os sinais de saída e entrada de referência de corrente (I_{ref}), conforme ilustrado na figura 4.29. Para isso, interceptou-se o sinal de referência de corrente que a CPU gerava para a placa de controle de corrente, colocando-se um relê comandado pela própria CPU, cuja função foi estabelecer se o sinal de corrente enviado ao controle seria o da CPU (operação local) ou um externo (operação

remoto). Desta forma, foi possível obter a mesma corrente de saída nas duas fontes, configurando-se uma das fontes com operação remoto (fonte2, escrava) e ligando-se seu sinal de referência de corrente de entrada (Iref. entrada) ao sinal de saída (Iref. saída) da outra fonte (fonte1 mestra).

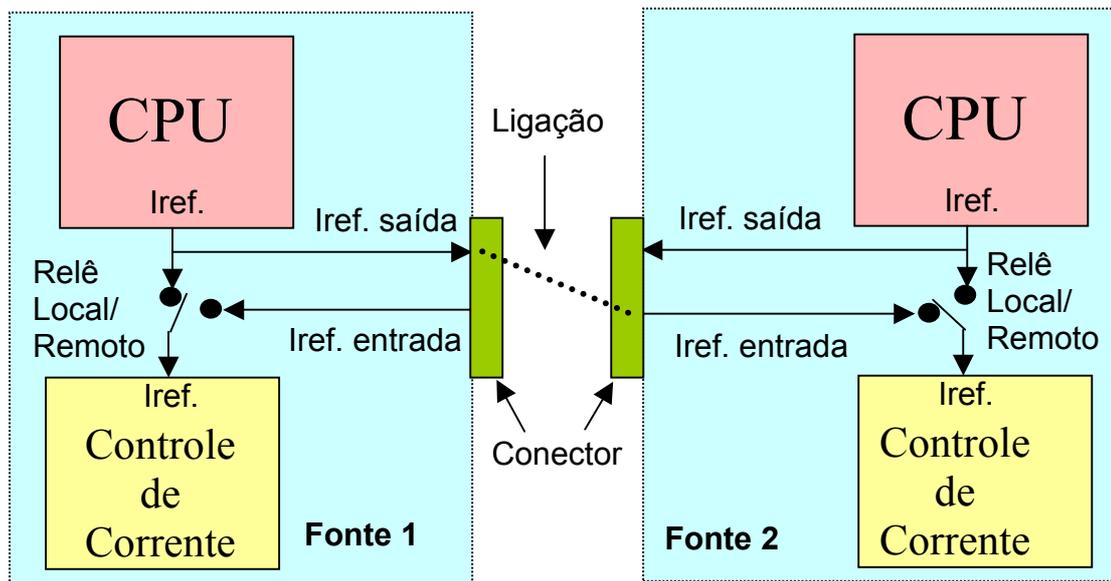


Figura 4.29 – Conexão entre as fontes de soldagem no duplo arame com potencial único.

4.6.2 - Soldagem com Potencial Isolado.

Na soldagem com potencial isolado, as duas fontes podem operar de forma independente, não necessitando da conexão local/remoto como no caso do potencial único. Apesar disso, quando se utiliza o pulsado, é necessário o sincronismo entre os pulsos de corrente, onde os pulsos podem ocorrer ao mesmo tempo ou com uma defasagem. Nesta configuração, o pulso de corrente de uma das fontes (fonte mestra) serve de referência para outra (fonte escrava), que por sua vez, gera seu pulso de corrente com a defasagem especificada, podendo ser ajustada de 0 a 50,0 ms, com resolução de 0,1 ms.

Para implementação do sincronismo entre as fontes foi necessário introduzir na CPU um circuito que permitisse a comunicação entre ambas, onde se escolheu a comunicação RS485 a dois fios, devido a menor sensibilidade a ruídos comparada com a RS232. Entretanto, de maneira a manter a flexibilidade do equipamento, introduziu-se no seu “software” a possibilidade de se optar entre um ou dois arames

e, ainda, qual seria a fonte mestra ou escrava. A figura 4.30 mostra um diagrama da conexão física e a figura 4.31 mostra os menus disponíveis ao usuário.

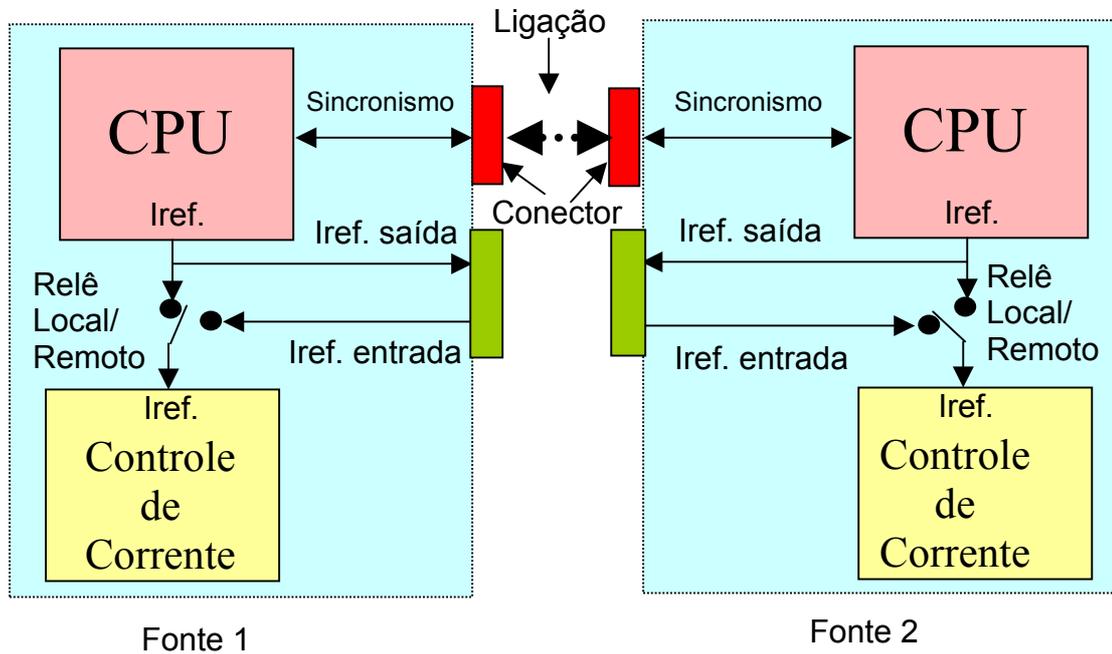


Figura 4.30 – Conexão entre as fontes de soldagem no duplo arame com potencial isolado.

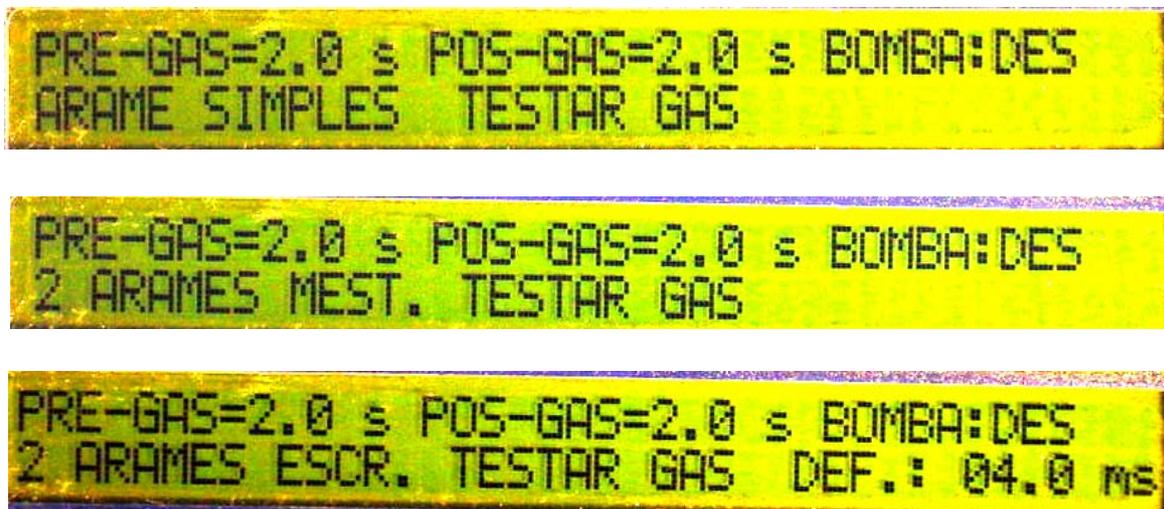


Figura 4.31 – Menu de configuração para o Duplo arame apresentado no Display da Fonte.

4.6.3 - Desenvolvimento de um programa no PC para soldagem com duplo arame no MIG/MAG pulsado com pulsação térmica.

A soldagem com duplo arame, usando a modalidade pulsado com pulsação térmica, foi implementada somente no PC devido ao grande número de variáveis envolvidas. Para isso foi feito um programa, cuja interface com o usuário é mostrada na figura 4.32, aproveitando a conexão implementada para o potencial único, destinada a controlar remotamente a fonte de soldagem (figura 4.29). O programa comunica-se com as fontes de soldagem através de duas placas INTERDATA, uma para cada fonte, gerando a referência de corrente para cada uma delas, já defasadas entre si. O programa, também, comanda as respectivas velocidades de arame. A figura 4.33 mostra um diagrama de conexão das fontes com o micro.

CORRENTE PULSO TERMICO			
coRrente de base - [A] :	32.00	tempo Base [ms] :	12.10
veLocidade araMe [m/min] :	6.80	tempo pulSo Termico [s] :	0.50
cor. med. sinerGico [A] :	119.72	vel. ara. maqu.2 [m/min] :	6.30
CORRENTE BASE TERMICA			
corrente de basE - [A] :	20.00	tempO base [ms] :	20.70
velocidade araMe [m/min] :	4.50	tempo base termIca [s] :	0.50
cor. med. siNergico [A] :	81.15	vel. ara. maqu.2 [m/min] :	4.20
GERAIS			
Corrente de pulso - [A] :	320.00		
tempo Pulso [ms] :	5.30		
dePasagem [ms] :	8.70		
Tensao de curto c. [V] :	12.00		
corrente De c.c. [A] :	350.00		
corrente media ini. [A] :	40.00		
tempo de rampa [s] :	1.00		

Figura 4.32 – Interface com o usuário do programa para soldagem com o duplo arame operando no MIG/MAG pulsado com pulsação térmica através do PC.

Inicialmente, era enviado para as duas fontes de soldagem o mesmo valor da velocidade de arame. Entretanto, foi observado que, conforme o posicionamento dos arames com relação ao sentido de movimento e/ou a posição de soldagem, era necessário o ajuste diferente de cada velocidade. Assim sendo, foi implementado este ajuste diferenciado de velocidade, bem como, introduziu-se no programa uma rampa de corrente média no início da soldagem, para aumentar o controle sobre a

formação da poça de fusão em posições fora da plana. Durante a rampa, as variáveis da forma de onda da corrente e a velocidade de arame foram calculadas usando as equações do sinérgico.

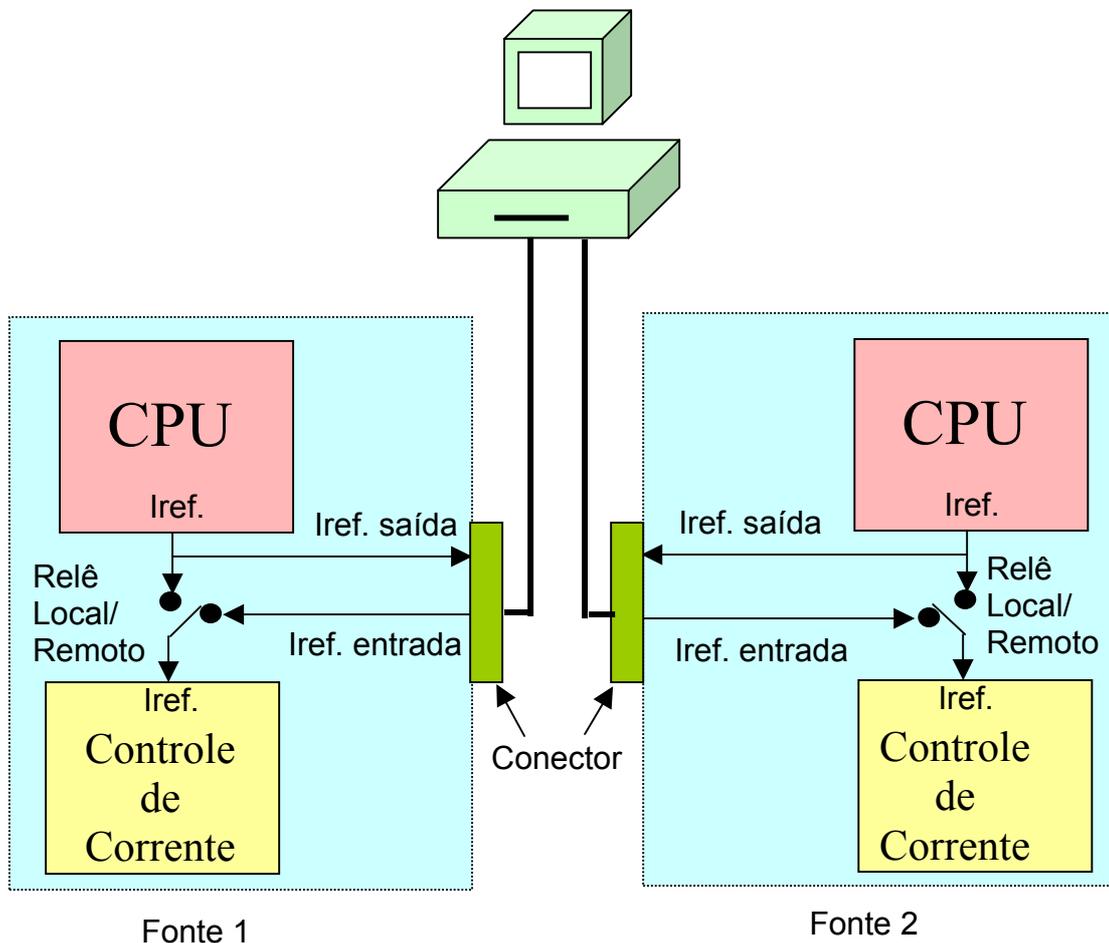


Figura 4.33 – Conexão entre as fontes de soldagem e o Micro-Computador.

4.6.4 - Ensaios Práticos

Os ensaios práticos foram realizados com o intuito de verificar questões de operacionalidade e desempenho. As questões ligadas ao processo de soldagem propriamente dito foram conduzidas por outros colaboradores [5,6], como já comentado anteriormente.

Com o duplo arame é possível se compor vários cenários diferentes, que resultam da combinação do tipo de tocha (potencial único ou isolado), da disposição dos arames (deslocando-se lado a lado, ou um na frente do outro), da modalidade de soldagem (convencional ou pulsado) e do tipo e diâmetro de arame.

Tanto nos ensaios com o potencial único como com o isolado, observou-se a necessidade de ajustes diferenciados na velocidade de arame de cada fonte. Esta diferença ocorria devido a vários aspectos, entre eles destacam-se: a interação entre os arcos, a posição dos eletrodos em relação à peça e à poça de solda, como também, diferenças de fabricação nos diâmetros dos eletrodos.

Na soldagem com duplo-arame existe a sobreposição dos dois arcos, cuja interação de um sobre o outro pode ser identificada através do oscilograma da tensão (figura 4.34) no processo pulsado com potencial isolado, utilizando-se a configuração mestre escrava com defasagem entre os pulsos de correntes de cada fonte. A figura 4.34 mostra as tensões e correntes das duas fontes de soldagem, onde a elevação da tensão do arco, em forma de uma pequeno pulso, durante o tempo de base revela a interação entre os arcos.

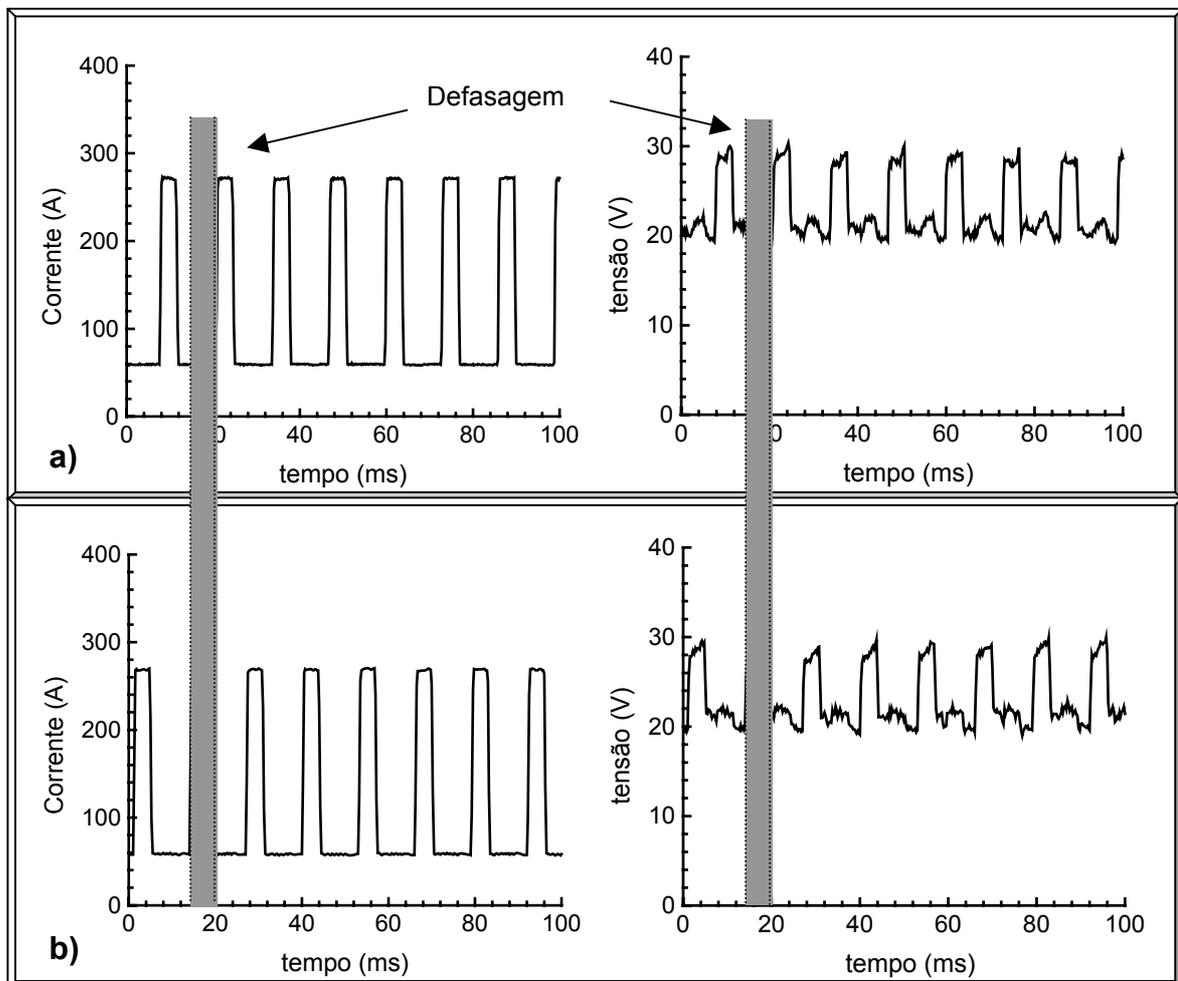


Figura 4.34 – Oscilogramas para o duplo arame com potencial isolado com defasagem entre os pulsos de corrente. a) fonte escrava, b) fonte mestre.

No caso da soldagem com potencial único, não é possível a percepção da interação entre os arcos através da tensão, devido aos dois arcos estarem submetidos ao mesmo potencial, fazendo com que a tensão lida seja igual nos dois arcos.

De uma forma geral, pode-se dizer que a tensão e a corrente de soldagem no duplo arame mantém o mesmo comportamento da soldagem com um único arame, tanto na modalidade de soldagem convencional como na pulsada. Isso pode ser constatado através das formas de ondas de corrente e tensão nas duas modalidades, como apresentado respectivamente nas figuras 4.35 e 4.36 para o potencial único, e nas figuras 4.37 e 4.34 para o potencial isolado.

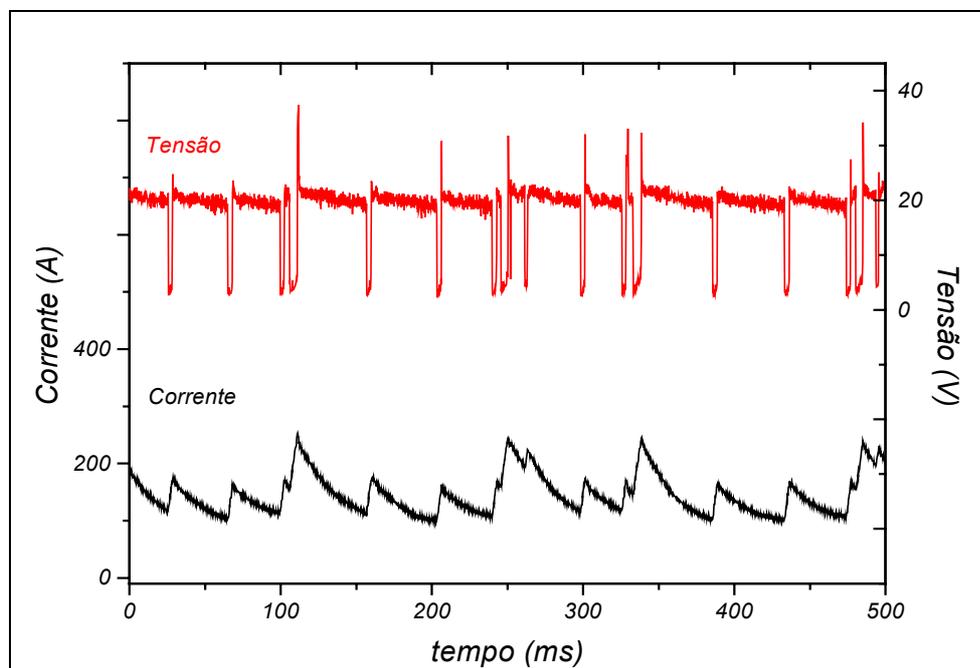


Figura 4.35 - Oscilograma de tensão e corrente (nos dois arames) para o duplo arame no modo convencional com potencial único.

Resultados referentes à análise exploratória do duplo arame com potencial único, utilizando as implementações abordadas neste item, são apresentados por Ramirez [5] e Motta [6].

Na figura 4.38 são apresentados os aspectos de cordões de solda em algumas situações ensaiadas.

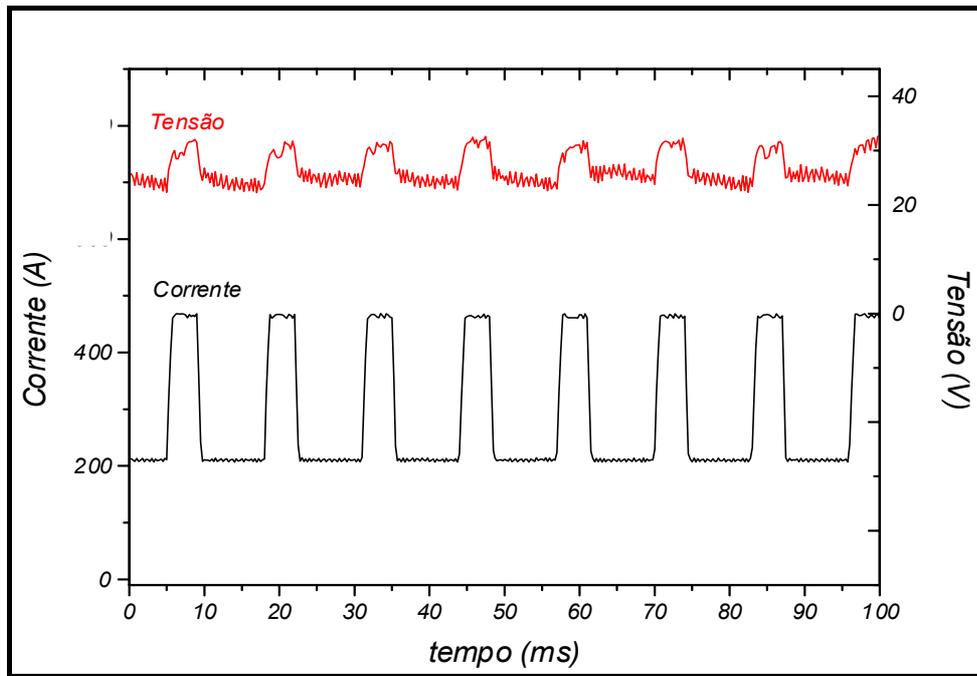


Figura 4.36 - Oscilograma de tensão e corrente (nos dois arames) para o processo duplo arame pulsado com potencial único.

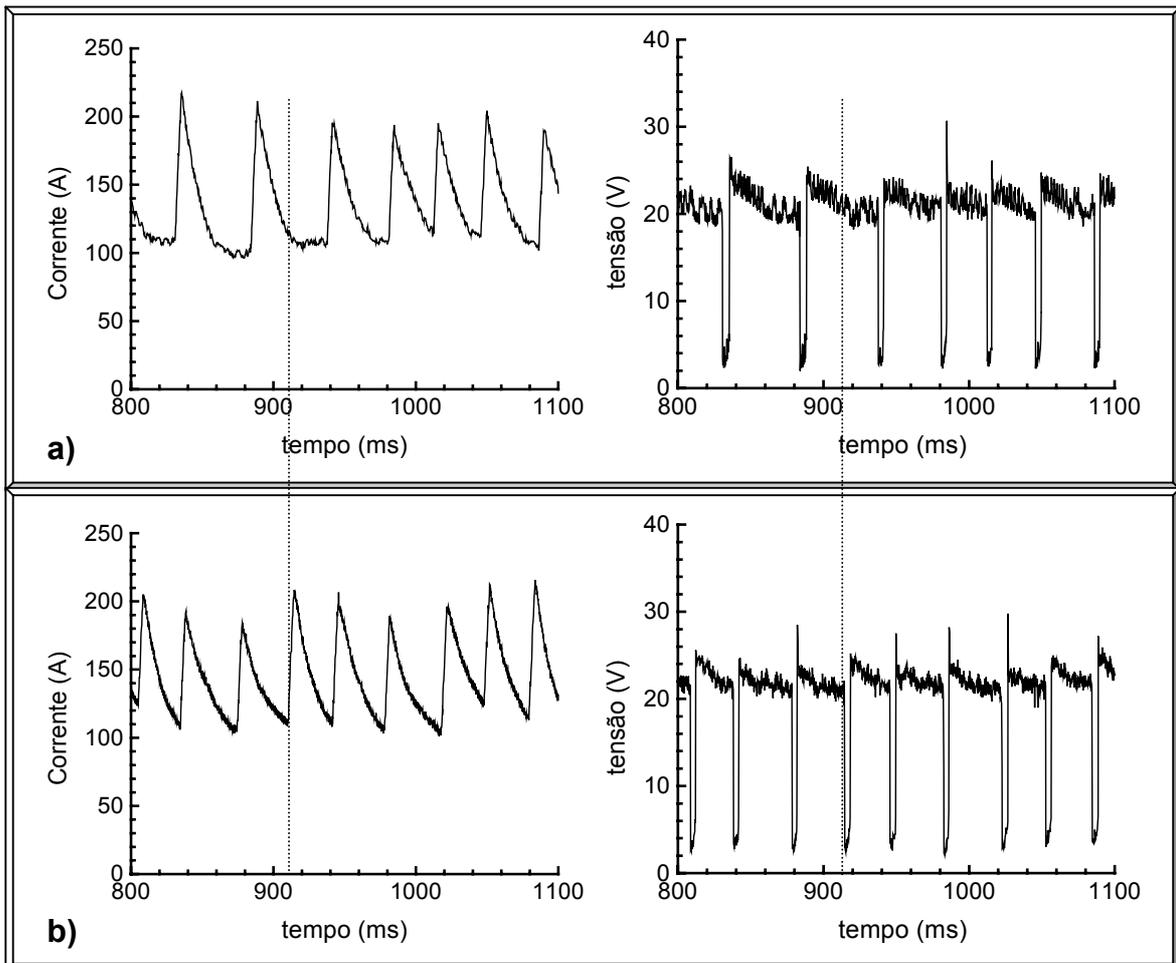


Figura 4.37 - Soldagem com o duplo arame potencial isolado no processo convencional. a) fonte 1, b) fonte 2

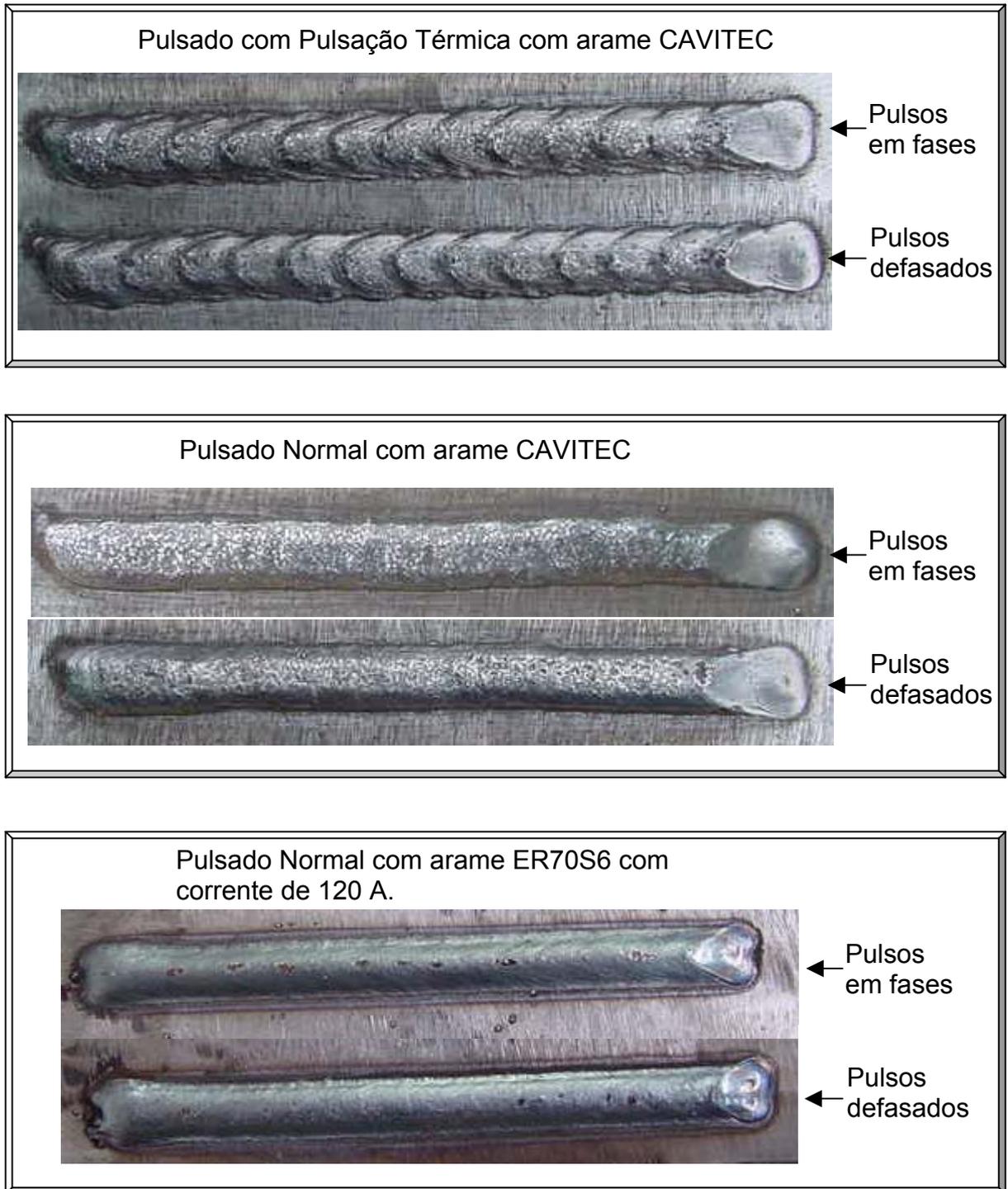


Figura 4.38 – Aspectos de cordões de solda em algumas situações ensaiadas com o duplo arame.

4.7 - MIG-MAG COM CORRENTE ALTERNADA PARA O ALUMÍNIO

Na análise deste processo, feita no sub-item 2.1.4, determinou-se à problemática desta modalidade de soldagem à nível de software e hardware. A partir das informações obtidas projetou-se o algoritmo de controle e um circuito de reabertura de arco, que são apresentados no decorrer deste item.

4.7.1 - Desenvolvimento do algoritmo de controle para o MIG/MAG CA.

O algoritmo de controle (figura 4.39) foi projetado, inicialmente, para produzir a forma de onda de corrente apresentada na figura 2.15. O mesmo possui, ainda, além de uma etapa de abertura do arco, que tem a mesma função da implementada no MIG/MAG pulsado, uma lógica que repete a etapa de abertura, caso haja alguma extinção ou curto-circuito prolongado.

Este programa foi implementado somente no PC, utilizando a configuração A, e foi projetado dentro do mesmo princípio de implementação do programa pulsado com pulsação térmica para o duplo arame, apresentado na figura 4.32. O mesmo não foi implementado no protótipo da DIGITEC (configuração C) por possuir uma estrutura de potência que não permite o uso de corrente alternada.

O programa para o pulsado com pulsação térmica, apesar deste não ter sido baseado na orientação a objeto, foi projetado com a preocupação de se fazer módulos de programas reutilizáveis, o que facilitou bastante a implementação do programa para o MIG/MAG CA, cuja interface com o usuário é apresentado na figura 4.40. Os módulos do programa MIG/MAG CA foram projetados, também, para possibilitar novas alterações no decorrer dos estudos desta modalidade.

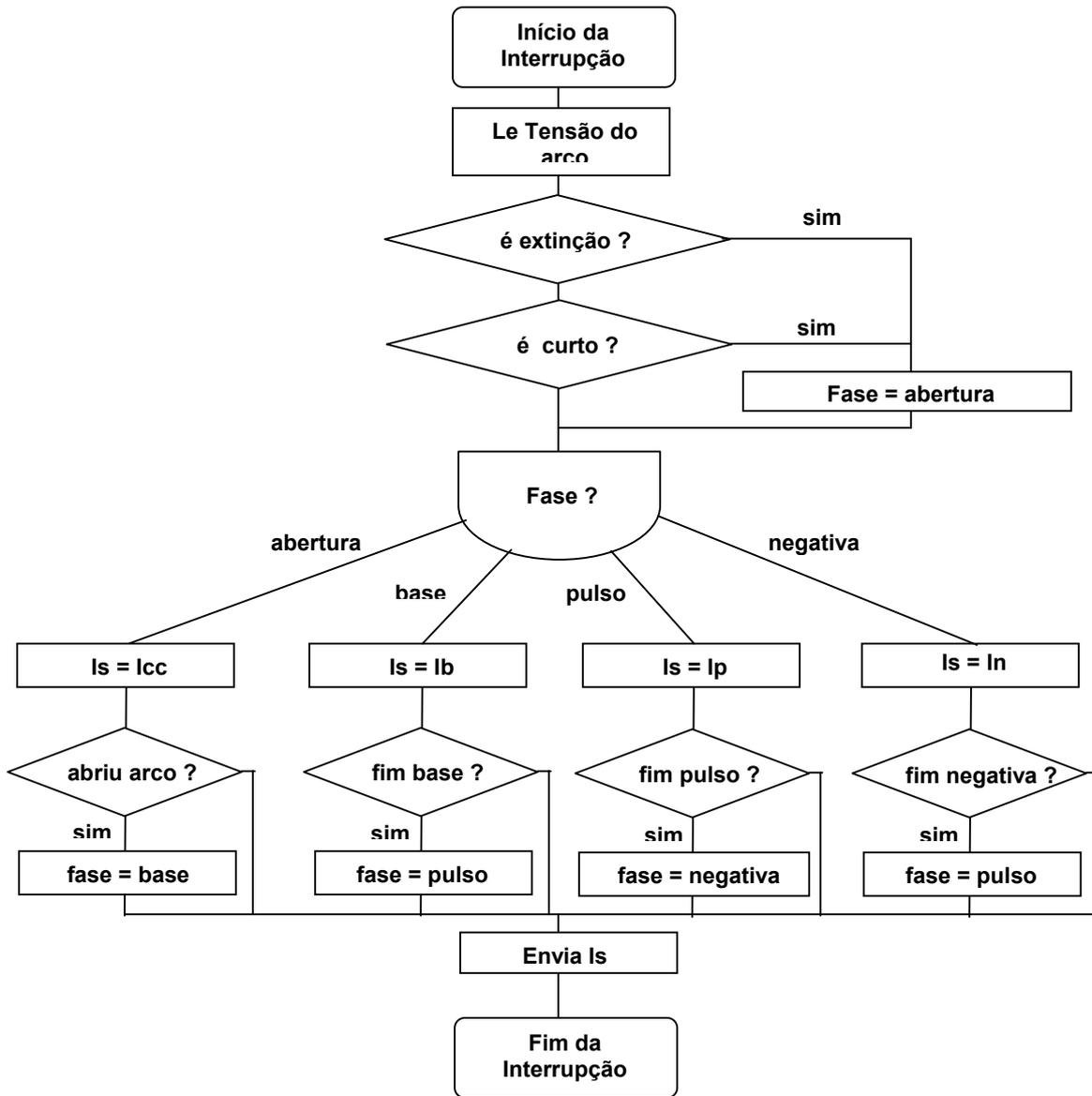


Figura 4.39 - Fluxograma do algoritmo de controle do MIG/MAG CA.

coRrente positiva	[A] :	170.00	tempo Positivo	[ms] :	3.00
Corrente negativa	[A] :	-15.00	tempo Negativo	[ms] :	20.00
corrEnte base	[A] :	15.00	tempo Base	[ms] :	27.00
veLocidade arame [m/min]	:	2.00			
GERAIS					
Tensao extinto	[V] :	45.00			
tensao curto	[V] :	8.00			
tensao Abertura	[V] :	15.00			
tempo extinto	[ms] :	0.70			
tempo curto	[ms] :	2.00			
tempo abertura	[ms] :	5.00			
Velocidade aprox	[%] :	80.00			
corrente De abert.	[A] :	240.00			

Figura 4.40 – Interface do programa para soldagem com o MIG/MAG CA.

4.7.2 - Desenvolvimento de um Circuito para Manutenção do Arco.

Inicialmente utilizou-se o circuito de reabertura de arco já existente para o TIG (área interna delimitada pela linha pontilhada da figura 4.41b), implementando-se, também, um pulso de alta tensão na passagem da polaridade positiva para a negativa. Entretanto, como os resultados não foram satisfatórios na soldagem com o MIG/MAG CA, foi necessário o projeto de um novo circuito de reignição (área interna delimitada pela linha pontilhada da figura 4.41b). Abaixo segue a apresentação do princípio funcional de ambos os circuitos testados.

Princípio de funcionamento.

Para efeito de análise da operação dos circuitos descritos no parágrafo anterior, são apresentados os diagramas esquemáticos dos mesmos na figura 4.41, onde as chaves representam semi-condutores. Cada um deles foi ligado aos bornes de saída da fonte de soldagem, conforme indicado pelas setas.

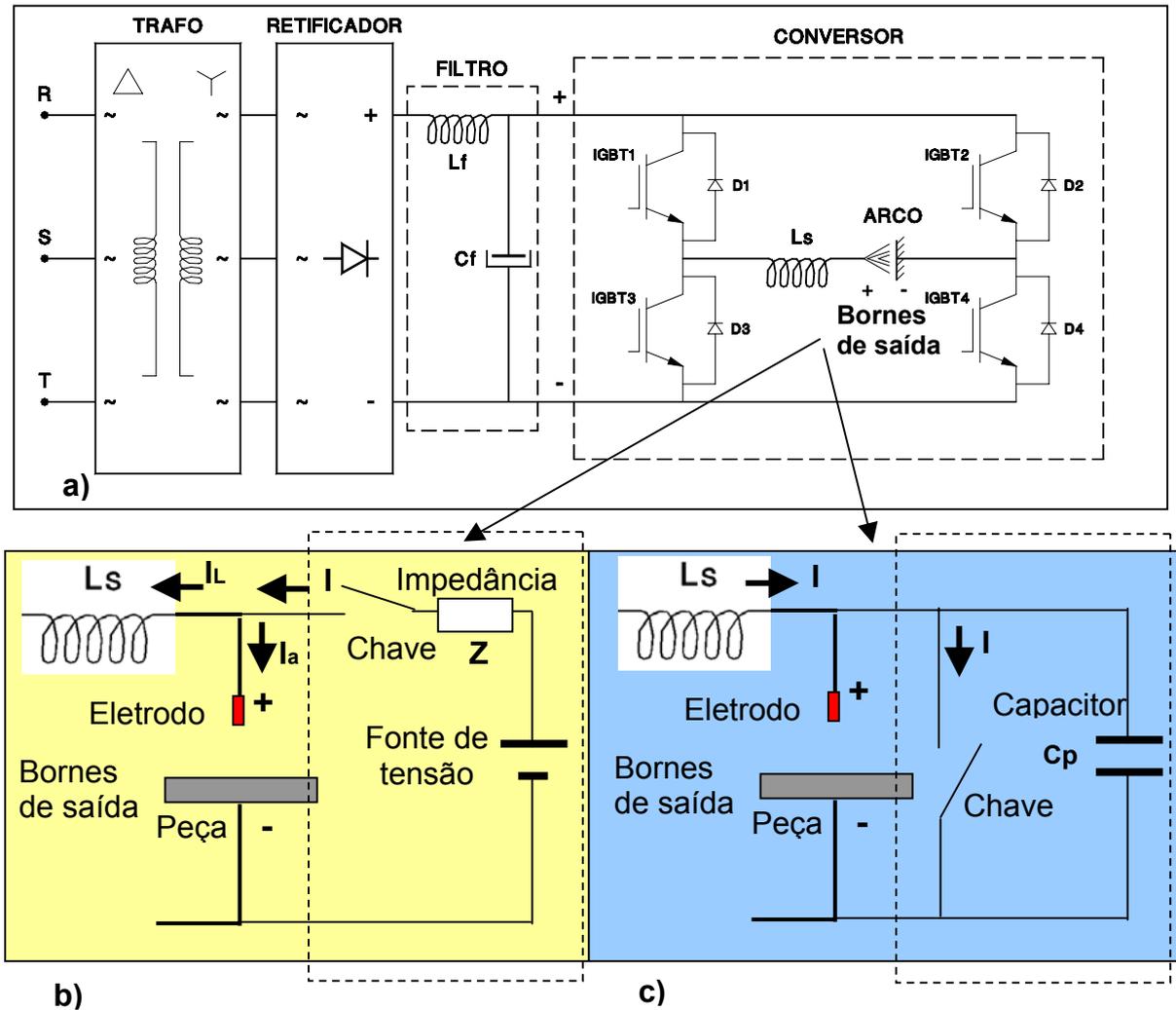


Figura 4.41 - Diagrama esquemático dos circuitos de reabertura de arco.

- a) Estrutura de potência da fonte de soldagem INVERSAL.
- b) Versão baseada em fonte de tensão
- c) Versão baseada no princípio da conservação de energia.

Circuito de reabertura para o TIG, adaptado para o MIG/MAG CA.

O pulso de alta tensão gerado pelo circuito do TIG era obtido de uma fonte de tensão de 600 V, conforme apresentado na figura 4.41b. Entretanto, devido à característica do conversor de potência, figura 4.41a, o pulso de tensão gerado pelo circuito de reabertura no momento da extinção, não era totalmente bloqueado pelo indutor de saída da fonte (L_s), desta forma parte de sua energia desviava-se para o capacitor C_f , como também uma porção dessa energia era absorvida pela impedância (Z) interna desse circuito. Isso acabava diminuindo o valor da tensão de

pulso sobre o eletrodo e a peça, inviabilizando sua utilização no MIG/MAG AC. Apesar disso, o mesmo operava satisfatoriamente no TIG.

Circuito de reabertura para o MIG/MAG CA.

O circuito projetado para esta finalidade, figura 4.41c, baseava-se no princípio da conservação de energia, que através do fechamento da chave, durante um determinado tempo, causava um curto entre os bornes de saída do conversor (saída da fonte de soldagem), fazendo com que a corrente circulasse através do indutor de filtro de saída (L_s). Ao abrir a chave, a energia armazenada em L_s transferia-se para o capacitor C_p , elevando a tensão sobre o mesmo. Assim sendo, foi necessário apenas sincronizar o fechamento da chave nos momentos de transições de uma polaridade a outra, instante que a corrente anula-se.

Como o capacitor C_p ficava em paralelo com os bornes da fonte, a tensão entre o eletrodo e a peça era a mesma de C_p . Desta forma, dimensionou-se o valor de C_p e o tempo que a chave permanecia fechada, de maneira a provocar uma tensão por volta de 600 V. Os ensaios apresentados em [9] demonstram que acima de 450 V, o índice de reacendimento do arco era praticamente 100% para CO_2 puro, já para argônio [19] descreve que 150 V é o suficiente. Entretanto, os mesmos não apresentaram nenhum diagrama esquemático do circuito de reignição que cada um utilizou, assim não foi possível fazer uma análise comparativa.

4.7.3 - Ensaio práticos

Os ensaios foram realizados com o intuito de verificar questões referentes a operacionalidade e manutenção do arco, apresentando um bom desempenho nestes aspectos. Entretanto, durante os ensaios observou-se uma dificuldade na manutenção da altura do arco, revelando uma possível necessidade de se incluir no programa um controle para corrigi-la, porém seria necessário um estudo dirigido para averiguar tal fato, que será abordado em um trabalho de doutorado direcionado ao MIG/MAG CA.

A abertura do arco deu-se de maneira satisfatória, sendo que para arames mais finos, para facilitá-la verificou-se a necessidade da utilização de velocidades de

aramé mais baixas durante a abertura. A figura 4.42 apresenta as formas de ondas de corrente e tensão no MIG/MAG CA e o aspecto do cordão na figura 4.43.

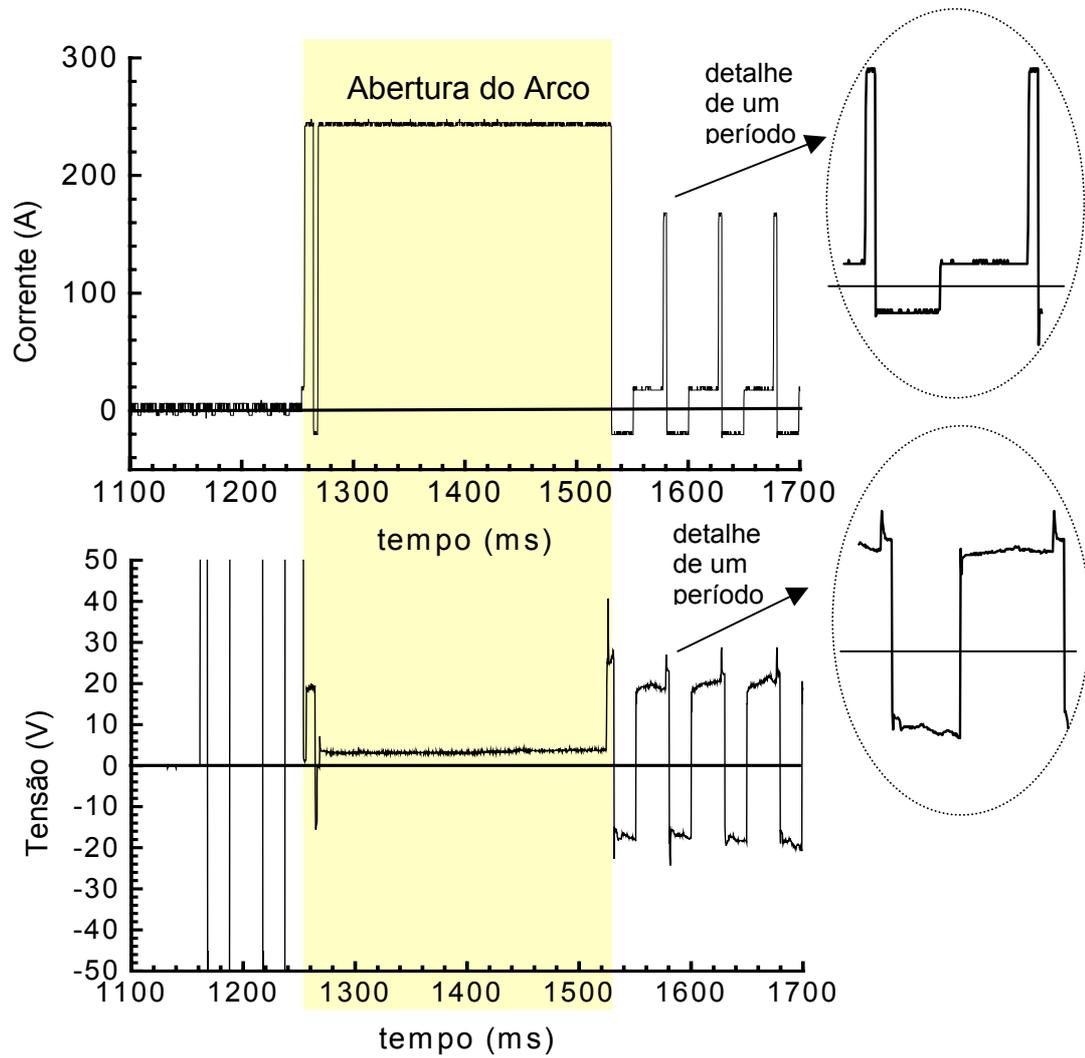


Figura 4.42 – Oscilogramas de corrente e tensão na soldagem com MIG/MAG CA.

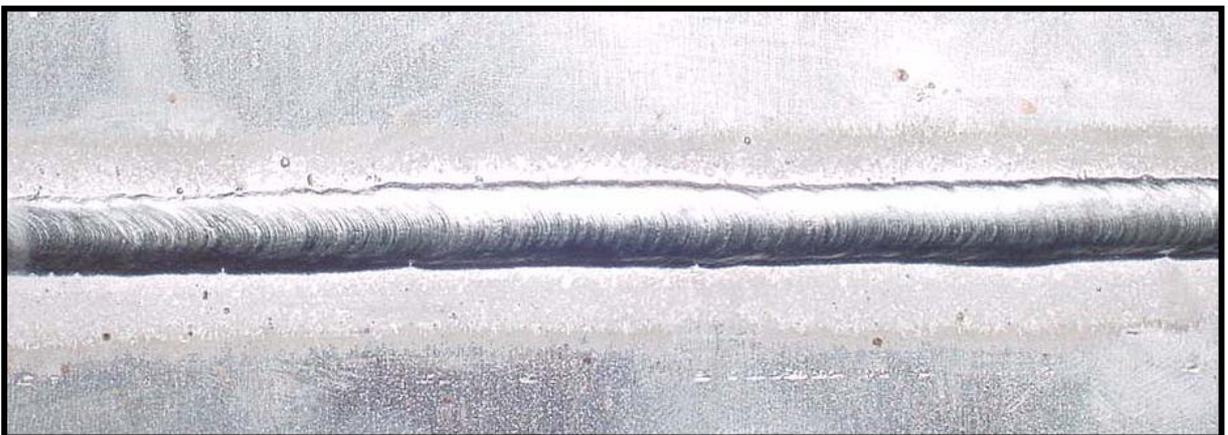
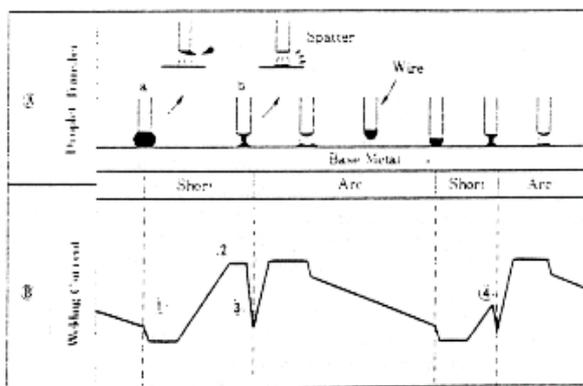


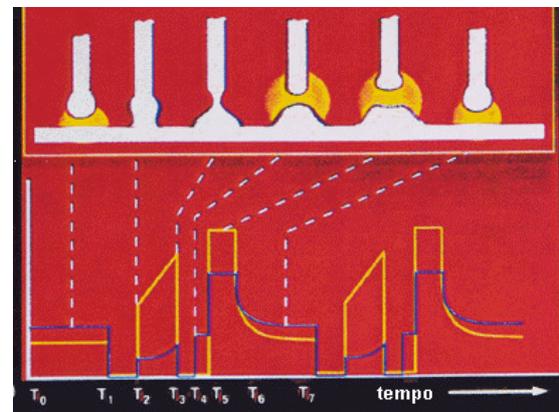
Figura 4.43 - Aspecto do cordão obtido com o MIG/MAG AC.

4.8 - MIG-MAG COM CURTO-CIRCUITO CONTROLADO.

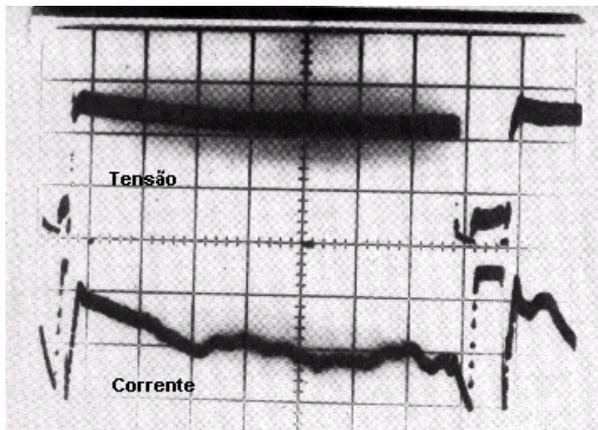
O curto-circuito controlado é uma forma de se obter a transferência por curto-circuito com níveis baixos de salpicos. O curto-circuito convencional, na maioria das aplicações, utiliza uma fonte de soldagem com característica estática de tensão constante (controle da tensão do arco), resultando numa forma de onda característica, como apresentado em alguns oscilogramas no item 4.2. Já no curto-circuito controlado, não existe nenhum padrão de forma de onda definida, o que existe são algumas propostas de formas de ondas [7,9,10,13,14,15] que dependem da cada técnica de controle utilizada (fig. 4.44).



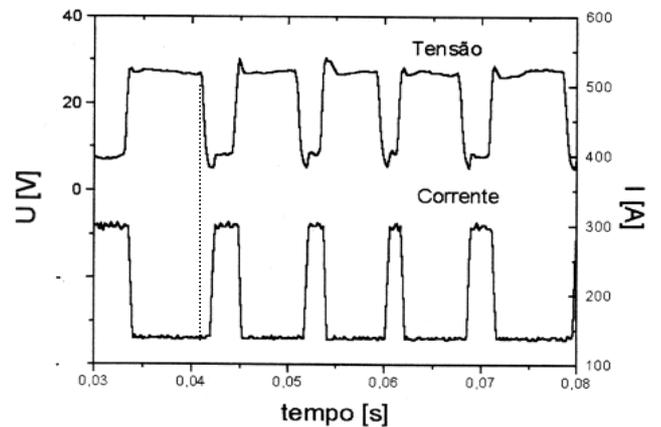
a)



b)



c)



d)

Figura 4.44 - Algumas das formas de ondas usadas no curto-circuito controlado que são apresentadas em a) [9] b) [10] c) [13] e d) [7].

Todas as técnicas baseiam-se em manter um valor baixo de corrente no instante final ou inicial do curto-circuito, ou em ambos, apontados como críticos com relação à produção de salpicos, conforme já descrito no capítulo 2. Devido a estas técnicas

serem pouco difundidas até o presente momento, quase não existem informações referentes aos valores que a corrente assume nos diferentes estágios da transferência metálica, bem como sobre a influência do tipo de tecnologia empregada na estrutura de potência que fornece a corrente de soldagem, e ainda sobre as limitações, vantagens e desvantagens em relação a outras modalidades de transferência metálica.

Um dos alvos da aplicação do curto-circuito controlado foi à soldagem com CO₂ puro, devido à tendência do nível de salpicos com este gás ser elevada quando se utiliza o curto-circuito convencional.

Quando a quantidade de salpicos gerada durante a solda é elevada, além dos gastos adicionais para removê-los, tem-se uma situação onde o soldador está sujeito a um maior desconforto e a uma maior dificuldade de visualização da poça de soldagem, que pode induzir o mesmo a produzir uma solda com defeitos.

Dentro desse contexto, foram analisadas duas formas de se reduzir a corrente no instante inicial e final do curto-circuito, uma delas baseada num dispositivo eletrônico (item 4.8.1) e a outra via controle da forma de onda através de algoritmo (item 4.8.2), utilizando a configuração B com a fonte de soldagem ELMA.

4.8.1 - Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para redução da corrente no curto-circuito.

O dispositivo eletrônico projetado (figura 4.45) tinha como principal objetivo reduzir a corrente de forma bastante rápida. Além do seu desempenho uma das motivações para confecção do mesmo estava na possibilidade de transformá-lo em um módulo independente, permitindo a operação com qualquer modelo de fonte de soldagem.

O protótipo do circuito desenvolvido, apresentado na figura 4.46, foi constituído por uma unidade de controle, por um IGBT (representado no circuito da figura 4.45 como uma chave) e por um comando de GATE, este último responsável pelo acionamento do IGBT.

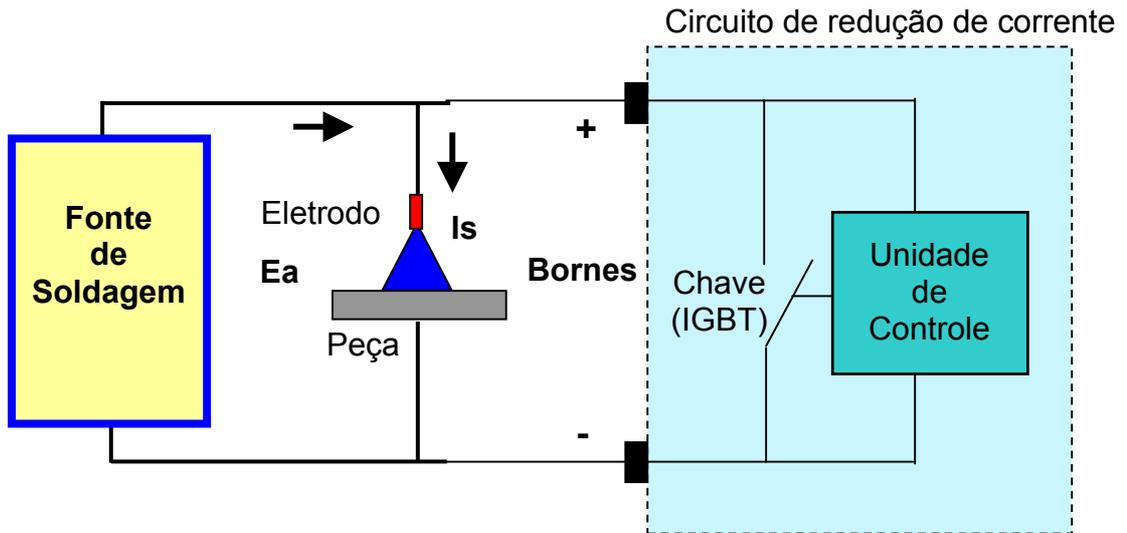


Figura 4.45 - Diagrama esquemático do circuito de redução de corrente.

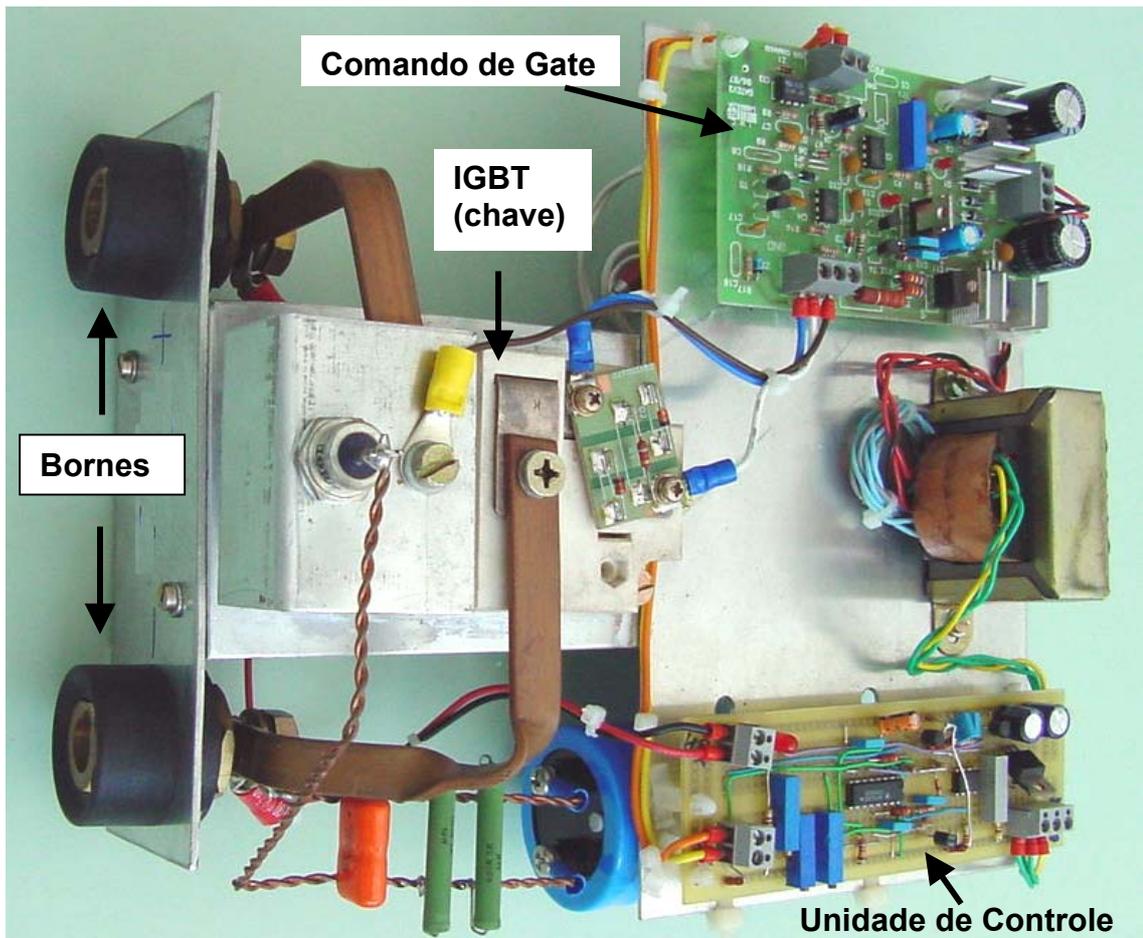


Figura 4.46 - Foto do protótipo do circuito de redução de corrente.

Princípio de funcionamento:

Para a unidade de controle, o início do curto (figura 4.47) acontece quando a tensão de saída da fonte de soldagem fica menor do que U_{cc} , e a reignição do arco, quando a mesma fica maior que U_{ri} . Nos dois casos a chave é fechada por um determinado tempo, colocando em curto a saída da fonte de soldagem, o que desvia rapidamente a corrente (I_s) para a chave, conseqüentemente anulando a corrente entre o eletrodo e a peça.

Nos ensaios de soldagem realizados com este circuito, foram identificados alguns aspectos que serão descritos a seguir.

- A taxa de redução da corrente, em detalhe na figura 4.47, foi menor do que a esperada devido à indutância dos cabos. Isto mostrou que os cabos seriam um fator limitante da dinâmica da corrente. Tal constatação foi importante no projeto do curto-circuito controlado via "software", pois se conhecendo isto foi possível determinar um valor inicial para o tempo de resposta da malha de controle, evitando que se fizesse uma malha de controle muito rápida (super dimensionada). Com isso, foram evitados gastos desnecessários com circuitos especiais de alta velocidade, utilizados na interface com a CPU (figura 4.8).
- Como o valor de U_{ri} no circuito de redução de corrente permanecia constante, quando ocorria um aumento da distância bico de contato peça (DBP), surgiam instabilidades na soldagem. Isso acontecia porque com o aumento da DBP, a queda de tensão sobre o eletrodo tornava-se maior, elevando a tensão de curto-circuito para um valor superior a U_{ri} , fazendo com que o circuito de controle achasse que houve a reignição. Desta forma, a chave era fechada e a corrente anulada antes do momento adequado, causando tais instabilidades.
- Ocorrência de várias extinções do arco no momento da reignição, seguidas de um novo processo de abertura do mesmo. Acreditou-se que as extinções ocorriam porque no momento que a gota desprendia-se, como não havia corrente circulando entre o eletrodo e a peça, o arco não reacendia espontaneamente. Todavia, como em outros momentos o arco reacendia, seria necessário usar um meio como filmagem da transferência, para determinar com mais consistência o que estava ocorrendo.

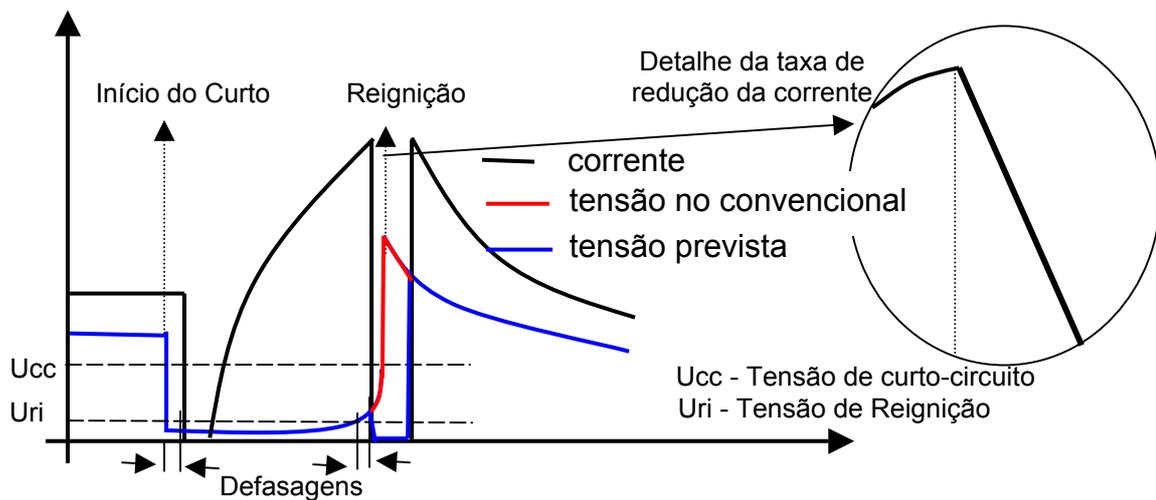


Figura 4.47 - Forma de onda da corrente usando o circuito de redução de corrente.

Dos aspectos descritos o primeiro é comum a todos os equipamentos de soldagem e não é possível evitá-lo. Entretanto, quanto ao segundo e terceiro aspectos, seriam necessárias alterações no projeto do dispositivo eletrônico descrito acima (figura 4.46), de maneira a fazer com que Uri ficasse dependente da DBP e a evitar que a corrente (I_s) seja anulada.

Mesmo que fossem feitas as alterações apontadas, existia uma incerteza quanto ao controle convencional (controle da tensão do arco) estabilizar o arco, operando juntamente com o circuito de redução de corrente. Desta forma, optou-se por continuar os desenvolvimentos referentes ao curto-circuito controlado via "software", que oferece maiores recursos, comparados aos obtidos com o controle analógico.

4.8.2 - Desenvolvimento do curto-circuito controlado via "software".

Durante a fase inicial do desenvolvimento do curto-circuito controlado via "software" tomou-se como base a forma de onda de corrente apresentada em [10], figura 4.44b, porém, com a proposição de utilizar uma rampa de corrente decrescente durante o curto. A figura 4.48 apresenta a forma de onda com a alteração proposta e a figura 4.49 o algoritmo de controle.

O intuito de fazer uma rampa decrescente durante o curto originou-se devido à existência das indutâncias dos cabos, constatadas no item anterior. Aliado a este fato foram previstos, também, atrasos a partir do momento da identificação da reignição até o instante que o sistema atue sobre a corrente, limitando a velocidade da malha de controle. Assim sendo, mesmo que fosse determinado com

antecedência o momento da reignição, já que existe tais atraso, considerou-se mais sensato utilizar a rampa decrescente, de forma a fazer com que o valor de corrente fosse o menor possível quando a reignição estiver para acontecer. Isso permite baixar a corrente da fase 3 para fase 4 em um tempo menor do que aquele que se tem com uma rampa crescente de corrente, uma vez que quanto menor o valor da corrente menor o tempo para reduzi-la, devido às limitações impostas pela indutância.

A descrição das fases que constituem a forma de onda proposta (figura 4.48) segue abaixo.

- FASE 1 : Nesta fase é realizado o controle da tensão do arco (U_{ref}) da mesma forma que foi feito para o modo convencional (item 4.2), onde se permitiu, também, o ajuste das indutâncias de descida e subida. O arco permanece nesta fase até que ocorra o curto-circuito, fazendo com que o tempo $tf1$ seja variável.
- FASE 2 : O curto-circuito é detectado quando a tensão do arco (U_a) torna-se menor que U_{cc} (figura 4.48), iniciando a fase 2, onde a corrente é reduzida para I_{f2} durante o tempo $tf2$, com a intenção de reduzir os efeitos da corrente sobre a gota apresentados em 2.1.1. O valor de $tf2$ deve ser suficiente para que o curto consolide-se de fato.

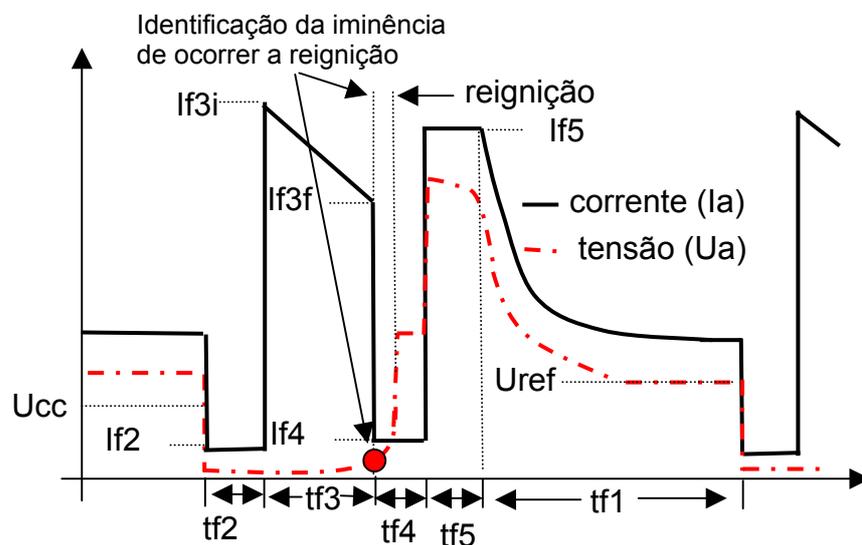


Fig. 4.48 - Proposta de forma de onda de corrente para curto-circuito controlado.

- FASE 3: Nesta fase é dado um pulso de corrente para desprender o restante da gota do arame. A corrente decresce de I_{3i} até I_{3f} , permanecendo em I_{3f} até que se identifique a iminência de ocorrer a

reignição, quando é iniciada a fase 4. Porém, se a reignição se tornar iminente durante a rampa de descida, também, é iniciada a fase 4. O tempo $tf3$ é somente uma referência para cálculo da rampa, desta forma o tempo total da fase 3 fica dependente do instante da reignição.

- FASE 4: Nesta fase a corrente é reduzida para I_{f4} durante $tf4$, de modo a evitar que a ponte líquida remanescente da gota, que mantém o curto entre o arame e a poça de solda, sofra os efeitos, também, já apresentados em 2.1.1.
- FASE 5: Nesta fase é dado um pulso de corrente de valor I_{f5} durante o tempo $tf5$, que tem a função de elevar a energia do arco, de maneira a aumentar a taxa de fusão do arame para afastar mais rapidamente a ponta do mesmo da poça, na tentativa de evitar que ocorra um novo curto logo após o início desta fase.

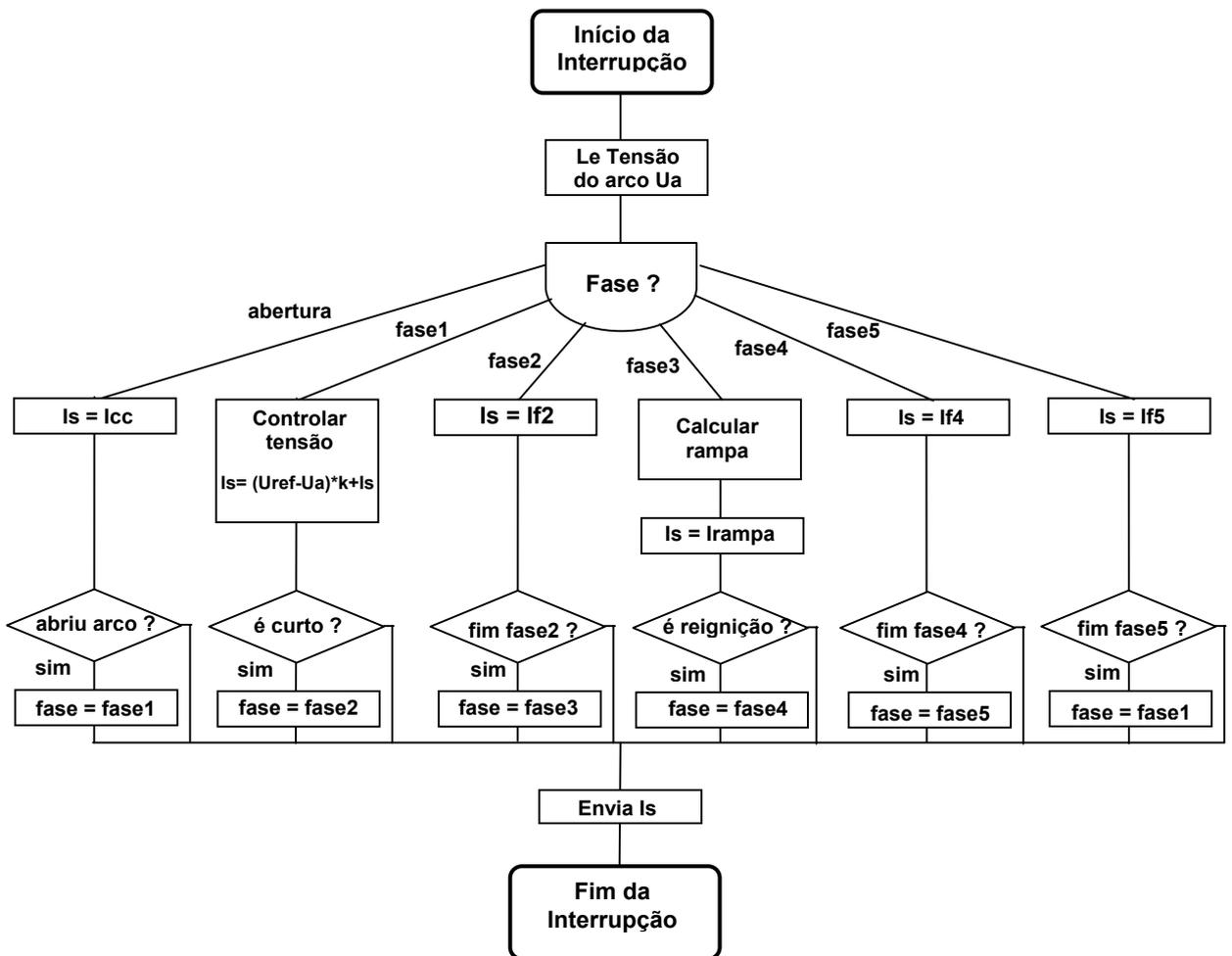


Fig. 4.49 - Algoritmo de controle do curto-circuito controlado.

A fase de abertura apresentada no fluxograma da figura 4.49 tem como objetivo facilitar a abertura do arco, que tem grande dependência das condições da ponta do arame eletrodo no momento que o mesmo toca a peça [49].

A identificação da reignição nos primeiros ensaios de soldagem foi feita da mesma forma que apresentado no item 4.8.1, através da comparação da tensão do arco com a tensão Uri. Estes ensaios visaram um primeiro contato com esta modalidade de transferência metálica, tendo como meta a determinação de variáveis e parâmetros de soldagem que resultassem em um arco estável, uma vez que havia um grande número de variáveis envolvidas neste processo e existiam poucas informações sobre as mesmas.

Por se tratar de uma modalidade de soldagem mais complexa do que as outras apresentadas, o circuito de simulação do arco foi de fundamental importância, permitindo que fossem feitos todos os testes lógicos e ajustes do algoritmo de controle, sem a necessidade de soldagem. A frequência de amostragem (interrupção) utilizada (20 kHz) resultou da análise do comportamento dinâmico da corrente observado no item 4.8.1 e da avaliação da dinâmica de corrente da fonte de soldagem ELMA.

Após, obtida uma situação de estabilidade, foram feitos os ensaios apresentados na tabela 4.3, com o objetivo de determinar um meio de detectar com antecedência o momento da reignição do arco, através da análise e tratamento dos sinais de tensão e corrente.

Tabela 4.3 - Variáveis e parâmetros utilizados nos primeiros ensaios.

Dados comuns:	
Arame	→ ER70S6 1.0 mm
Gás	→ CO ₂ .
Correntes	→ I _{f2} = 30 A, I _{f4} = 30 A e I _{f5} = 300 A.
Tempos	→ t _{f2} = 1 ms, t _{f3} = 3 ms, t _{f4} = 1 ms e t _{f5} = 2ms
Outras	→ U _{ref} = 20.0 V, U _{cc} = 15.0 V, U _{ri} = 10.0 V, V _a = 4.5 m/min, k _s = 15 e K _d = 15.
Ensaio 1: I _{3i} = 250 A, I _{3f} = 250 A e DBP = 15 mm.	
Ensaio 2: I _{3i} = 300 A, I _{3f} = 300 A e DBP = 15 mm.	
Ensaio 3: I _{3i} = 200 A, I _{3f} = 200 A e DBP = 15 mm.	
Ensaio 4: I _{3i} = 300 A, I _{3f} = 150 A e DBP = 15 mm.	
Ensaio 5: I _{3i} = 250 A, I _{3f} = 250 A e DBP = 11 mm.	
Ensaio 6: I _{3i} = 250 A, I _{3f} = 250 A e DBP = 20 mm.	

Nos ensaios 1, 2 e 3 utilizou-se um pulso de corrente retangular na fase 3, com a intenção de determinar o comportamento da tensão de curto-circuito sem a influência da variação da corrente causada pela rampa de descida. A figura 4.50 apresenta os oscilogramas para o ensaio 1. No ensaio 4 (figura 4.51) utilizou-se na fase 3 a rampa de corrente decrescente proposta, e nos ensaios 5 e 6 foram usadas DBP diferentes dos demais ensaios para se verificar sua influência sobre a tensão de curto-circuito.

Nos três primeiros ensaios, a tensão de curto-circuito teve o mesmo comportamento e, como a corrente era constante, representava o reflexo da variação da resistência de curto-circuito (figura 4.50c).

Apesar da tensão de curto no ensaio 4, apresentada na figura 4.51, ter uma forma distinta da apresentada na figura 4.50, a resistência em ambos ensaios teve o mesmo comportamento. A forma distinta da tensão (tensão decresce com o aumento do tempo de curto-circuito) foi devido à rampa decrescente de corrente.

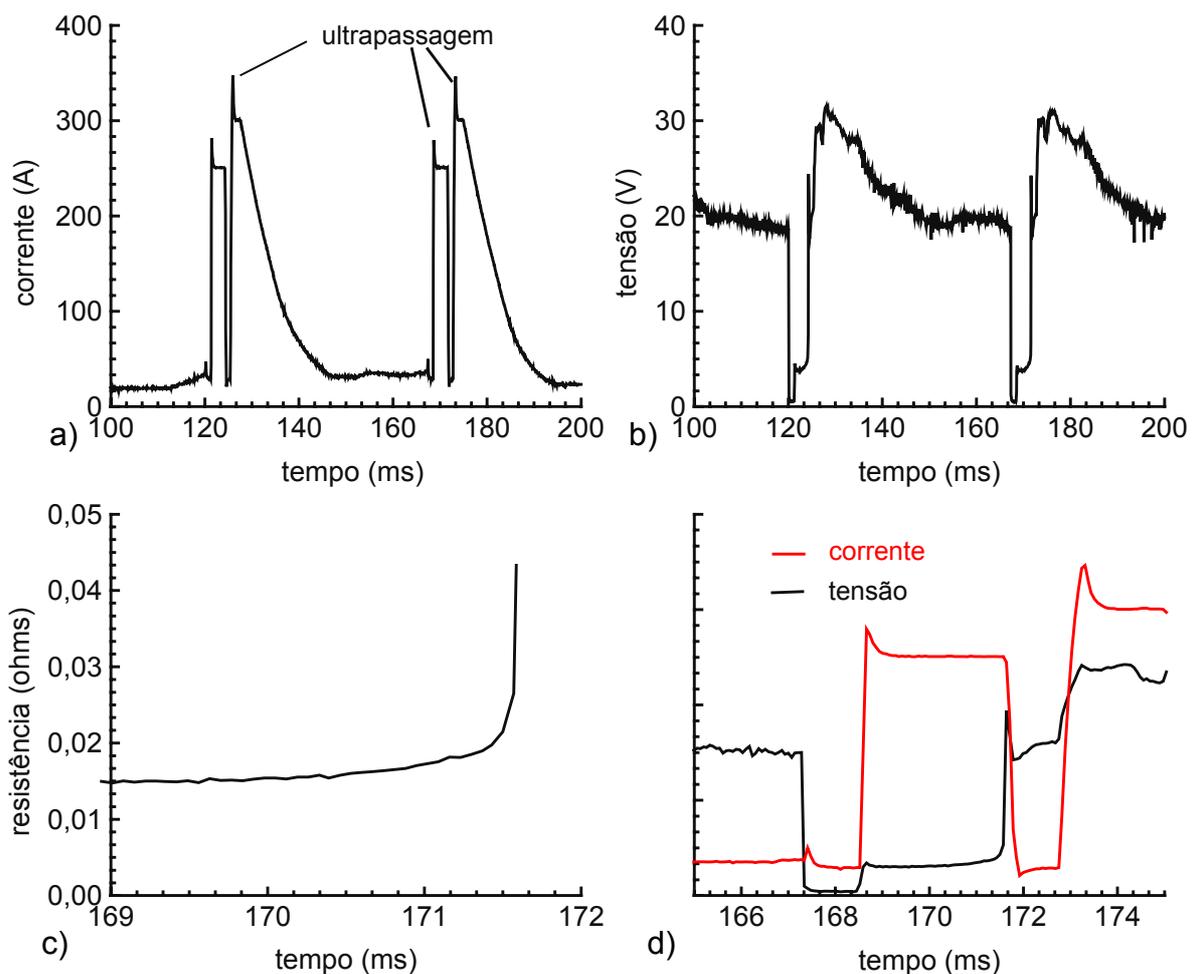


Figura 4.50 - Oscilogramas do ensaio 1.

Como a resistência do arco teve um comportamento semelhante em todos os ensaios, decidiu-se analisar a possibilidade de utilizá-la para detecção antecipada do momento da reignição. Esta análise será apresentada no próximo item.

Outra observação realizada foi o prolongamento de alguns curtos-circuitos nos ensaios 3 e 4, sendo que um deles é apresentado na figura 4.52. Embora não se tenha constatado isso nos ensaios com corrente mais elevada na fase 3, não se atribuiu a ocorrência desses curtos exclusivamente ao menor valor de corrente, pois os mesmos aconteciam de forma aleatória, o que poderia significar que a soldagem estaria operando em um ponto crítico, caso as variáveis das demais fases estivessem ajustadas em desarmonia com as da fase 3.

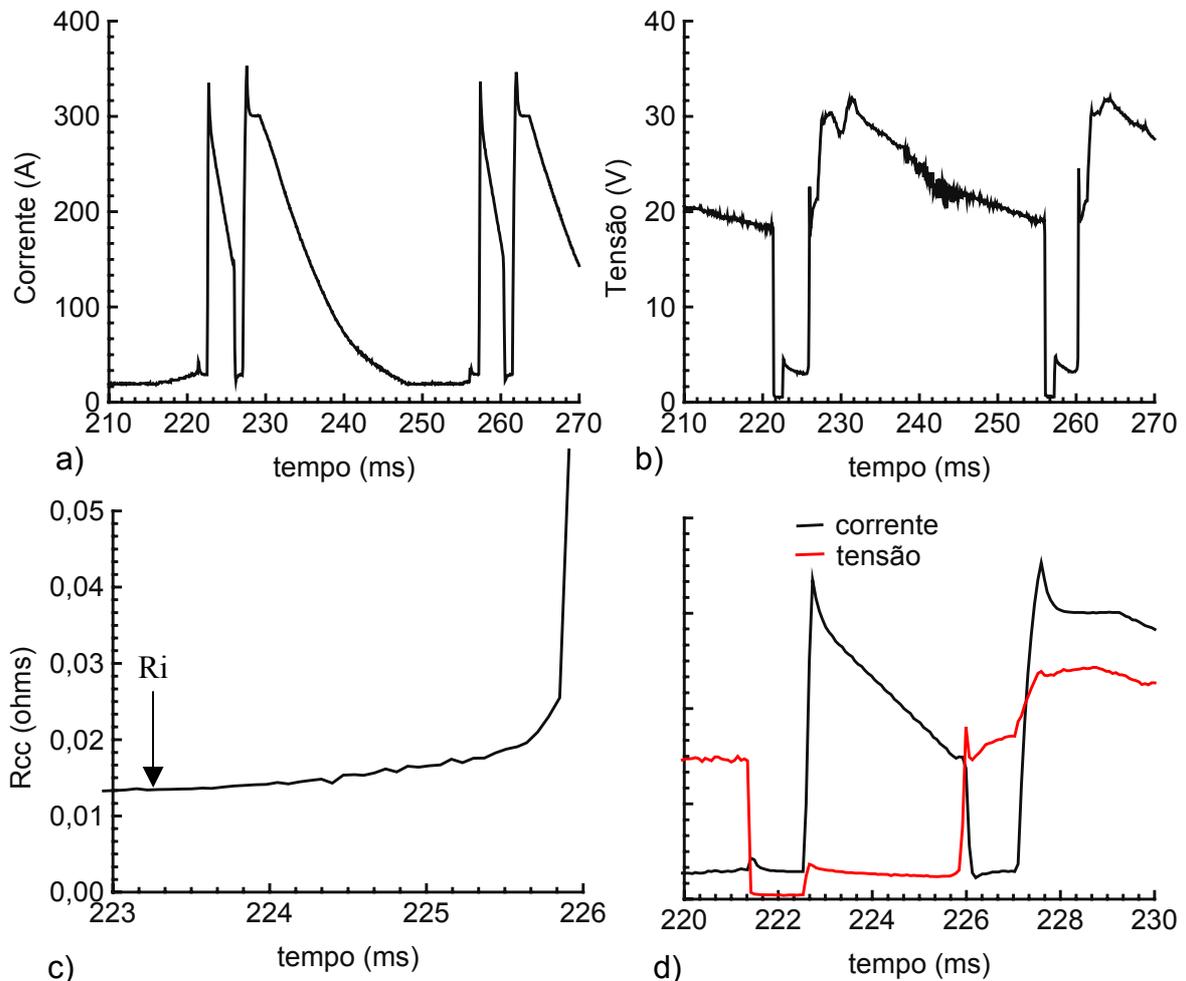


Figura 4.51 - Oscilogramas do ensaio 4.

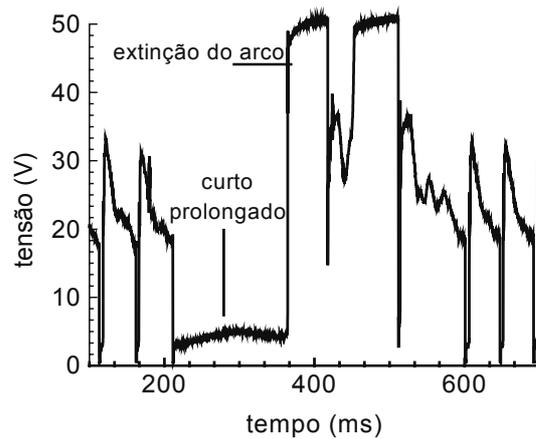


Figura 4.52 - Curtos-circuitos prolongados no ensaio 3.

Uma das possibilidades de determinar o que estava causando o prolongamento dos curtos, seria fazer uma filmagem da transferência. Um outro caminho, porém incerto e trabalhoso, seria tentar identificar se os curtos-circuitos prolongados estariam sendo causados devido a um ajuste inadequado das variáveis das demais fases com relação a corrente da fase 3. Como o LABSOLDA não possui o equipamento de filmagem e existiam vários outros aspectos a serem analisados, decidiu-se dar prosseguimento aos trabalhos, utilizando-se um valor de corrente na fase 3 que não causasse esse inconveniente.

Dentre os aspectos a serem analisados, estava também o próprio valor da corrente da fase 3 e sua influência sobre a quantidade de salpicos. No intuito de se reduzir a corrente de forma mais rápida possível, utilizou-se, além da rampa decrescente de corrente, uma dinâmica de corrente bastante elevada, que acabou causando as ultrapassagens (“overshoot”) apresentadas na figura 4.50.

Nos ensaios preliminares houve uma grande redução na quantidade de salpicos, o que chamava atenção para dois pontos. Um deles é que a dinâmica de corrente poderia ser inferior a aquela que estava sendo empregada. O outro ponto estava relacionado com a identificação da reignição, sendo que como em grande parte identificou-se-a após ela ter ocorrido, situação em que a corrente estava elevada, de forma que a reignição foi estabelecida sob corrente elevada durante o tempo transcorrido até que a corrente fosse reduzida. Se isso fosse verdadeiro, não seria necessário identificar com antecedência o curto. Porém, seria necessário se estimar o tempo para reduzir a corrente antes que houvesse a produção dos salpicos.

Mesmo obtendo-se ótimos resultados quanto a redução dos salpicos, continuou-se perseguindo a meta de baixar a corrente antes de ocorrer a reignição, de forma a se avaliar o quanto ainda seria possível melhorar os resultados.

4.8.3 - Utilização da resistência do curto-circuito como indicativo de reignição.

Através da análise do comportamento da resistência durante o curto, verificou-se que momentos antes de ocorrer a reignição a resistência de curto-circuito (R_{cc}) tende a aumentar exponencialmente. Assim, cogitou-se duas maneiras de se antecipar a reignição, a primeira baseada na derivada de RCC e a segunda em uma rela o entre RCC e seu valor nos instantes iniciais do curto-circuito (R_i) (figura 4.51c). Optou-se pela segunda maneira devido a mesma envolver uma menor quantidade de c culos. Assim sendo, estipulo-se como iminente a ocorrência da reignição quando RCC atingisse um valor superior ao seu valor no início da fase 3 (R_i) somado a um percentual ($R\%$). A equa o 4.13 define esse valor.

$$R_{cc} \geq R_i * (1 + R\%/100) \quad (4.13)$$

A varia o da resistência de curto-circuito, em uma observa o macroscópica, pode ser atribuída   redu o da área na região de contato entre o arame e a poça (constric o da gota, figura 4.53), e a eleva o da resistência por efeito Joule devido a corrente de curto I_{f3} .

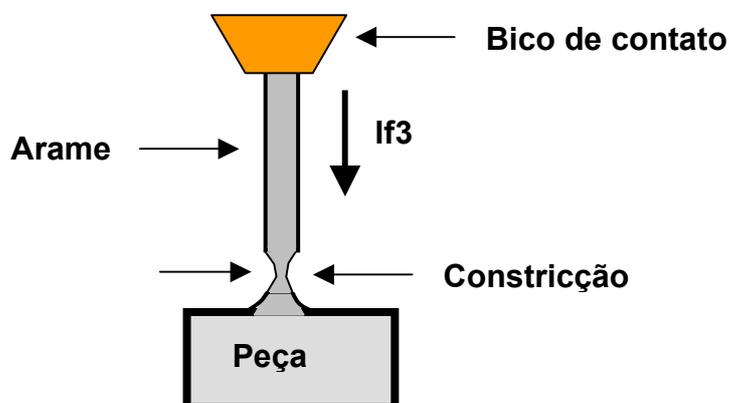


Figura 4.53 - Representa o do momento que antecede a reigni o.

A proposta de se utilizar a eq. 4.13, somente seria válida se a parcela de aumento da resistência por efeito Joule, fosse insignificante perante o aumento da resistência devido a constric o. Desta maneira, foram realizadas duas baterias de ensaios para determinar o perfil da varia o da resistência do arame em fun o do valor da corrente. Nas duas baterias a corrente foi aplicada em um trecho de arame de 15 mm de comprimento (figura 4.54). O procedimento adotado em cada uma delas será descrito a seguir.

Primeira bateria de ensaios - Nestes ensaios, aplicou-se um valor de corrente constante sobre o segmento de arame, até que o mesmo rompesse por fusão. Para cada valor de corrente repetiu-se três vezes o ensaio. Durante o ensaio o arame foi mantido estático (figura 4.54b). Utilizou-se dois diâmetros de arame (1.0 mm e 1.2 mm), conforme apresentado na tabela 4.4. Com os dados obtidos nas aquisições, foram calculados o tempo para rompimento (ΔT), a energia necessária (E) e a potência (P).

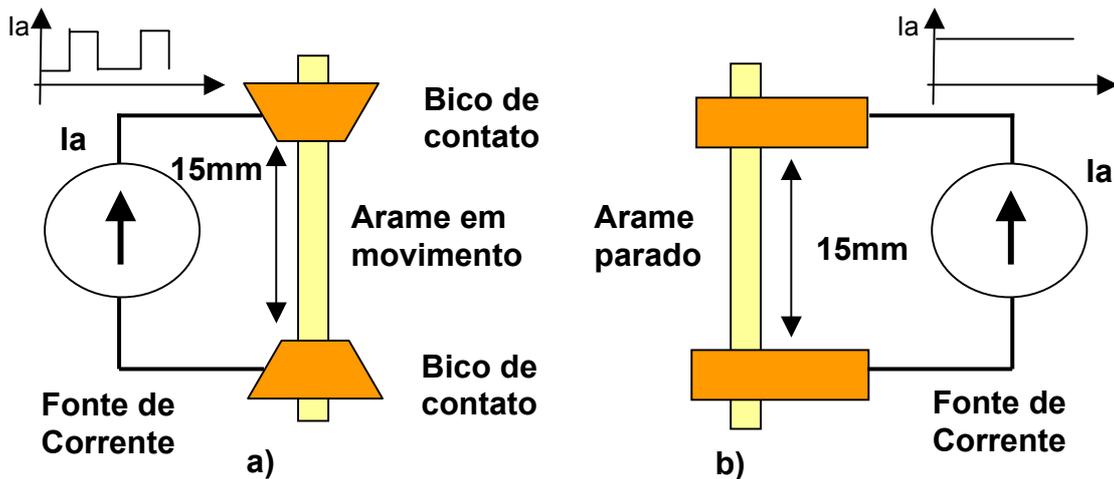


Figura 4.54 - Montagem feita nos testes referentes à determinação do comportamento da resistência do arame em função da corrente.

a) arame em movimento b) arame parado.

Os ensaios revelaram que a partir de um determinado valor de corrente, a energia fornecida para fundir um arame de mesmo diâmetro e comprimento é praticamente a mesma. Já abaixo desse valor, o tempo necessário para levar o arame à fusão tornava a parcela de energia perdida para o meio ambiente significativa, aumentando o valor da energia fornecida, como pode ser observado para corrente de 100 A na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados da primeira bateria de ensaios.

Ia (A)	Arame 1.0 mm ER70S6			Arame 1.2 mm ER70S6			Relações		
	E1 (J)	$\Delta T1$ (ms)	P1(W)	E2 (J)	$\Delta T2$ (ms)	P2(W)	E2/E1	$\Delta T2/\Delta T1$	P1/P2
100	158	710	223	220	1540	143	1,39	2,17	1,56
200	134	159	849	200	350	575	1,49	2,20	1,47
300	131	71	1834	197	150	1312	1,50	2,11	1,40
400	130	40	3270	196	84	2338	1,51	2,1	1,40

Considerando-se KA a relação entre as áreas dos arames de 1.2 mm e 1.0 mm ($KA = A2/A1$), pode-se fazer as seguintes aproximações:

$$E2/E1 = KA \tag{4.14}$$

$$P1/P2 = KA \tag{4.15}$$

$$\Delta T2/\Delta T1 = KA^2 \tag{4.16}$$

Para um determinado tipo de arame, nas situações onde as perdas para o meio ambiente são desprezíveis, conhecendo-se o tempo de fusão (t_0) com uma dada corrente (I_0), pode-se estimar o tempo para fundi-lo ($t_{\text{fusão}}$) com outro valor de corrente (I_f), usando-se a equação 4.17. Para isso considerou-se que, tanto o valor da energia ($E_0 = P_0 * t_0 = E_f = P_f * t_{\text{fusão}}$), quanto o valor médio da resistência não se alteram para diferentes valores de corrente.

A figura 4.55, apresenta o comportamento da resistência para um arame de 1.0 mm, com diferentes valores de corrente, desde o instante que a corrente é aplicada até o momento de seu rompimento por fusão. Através da observação das curvas, percebe-se que todas têm a mesma curva de variação de resistência, que independe do valor da corrente, somente variando o tempo até a fusão.

$$t_{\text{fusão}} = t_0 * (I_0/I_f)^2 \tag{4.17}$$

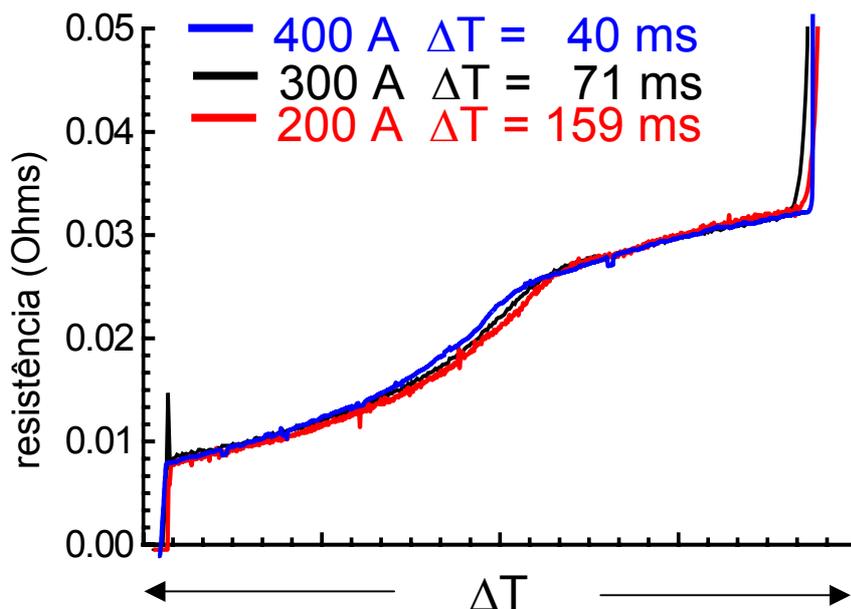


Figura 4.55 - Variação da resistência do arame em diferentes correntes.

Segunda bateria de ensaios: Esta se destinou a verificar o quanto a resistência do arame variaria durante os pulsos de corrente na fase 3, caso o arame permanecesse com o mesmo diâmetro (simulação do curto). Para isso, utilizou-se uma forma de onda de corrente pulsada e a configuração apresentada na figura 4.54a, que permitia o ensaio com o arame em movimento.

Foram realizados os ensaios apresentados na tabela 4.5, através dos quais constatou-se que a resistência sofre um leve aumento durante o pulso de corrente. As curvas em preto e verde da figura 4.56 demonstram essa constatação em dois ensaios diferentes, para o item 8 desta tabela. Nos demais ensaios o comportamento da resistência idêntico. Este aumento pode ser desprezado quando comparado ao aumento da resistência durante o curto na soldagem, como se percebe pelas curvas em vermelho e azul, obtidas no ensaio 2 da tabela 4.3.

Na figura 4.57 constatou-se que somente após 10 ms a resistência do arame na simulação, em verde e preto, atingiu um valor semelhante ao obtido antes de ocorrer a reignição, em azul. Como a taxa de variação da resistência na simulação permaneceu inalterada e obedeceu o comportamento da curva tracejada, obtida da figura 4.55 para o valor e tempo apresentado na figura 4.57, considerou-se que a variação da RCC em forma exponencial acontece devido a constricção da ponte metálica entre o arame e a poça de fusão.

Tabela 4.5 – Ensaios para determinação do comportamento da resistência durante um pulso de corrente, com arame E70S60 com diâmetro de 1.0 mm.

item	Va (m/min)	Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Rim (Ω)	Im (A)	Ie (A)
1	4,5	250	3	50	50	0,0126	63,0	79,3
2	4,5	250	3	50	25	0,0150	73,7	97,5
3	4,5	250	3	50	20	0,0174	78,7	104,9
4	4,5	250	3	50	15	0,0198	86,1	115,1
5	4,5	300	3	50	50	0,0138	66,1	89,2
6	4,5	300	3	50	25	0,0183	79,6	112,7
7	4,5	300	3	50	20	0,0191	85,5	121,6
8	4,5	300	3	50	15	0,0220	95	134,0
9	4,5	200	3	50	50	0,0120	59,8	69,6
10	4,5	200	3	50	20	0,0139	71,5	88,1
11	4,5	200	3	50	15	0,0155	77,3	96,0

12	4,5	200	3	50	10	0,0189	87,4	108,3
13	4,5	200	3	50	8	0,0199	93,6	115,3
14	4,5	300	3	30	100	0,0113	39,4	61,7
15	4,5	300	3	30	50	0,0130	46,9	79,1
16	4,5	300	10	50	75	0,0160	80,3	114,0
17	4,5	300	10	50	50	0,0218	95,6	135,4
18	4,5	300	10	30	100	0,0139	56,2	96,6
19	4,5	300	10	40	100	0,0147	65,1	99,9
20	4,5	200	10	50	50	0,0149	75,9	94,3
21	4,5	200	10	50	25	0,0196	94,5	116,6
22	6,0	300	3	50	50	0,0123	65,9	88,8
23	6,0	300	3	50	25	0,0147	79,4	112,4
24	6,0	300	3	50	20	0,0157	85,8	121,7
25	6,0	300	3	50	15	0,0183	95,0	134,3
26	6,0	300	3	50	10	0,0237	109,4	151,9

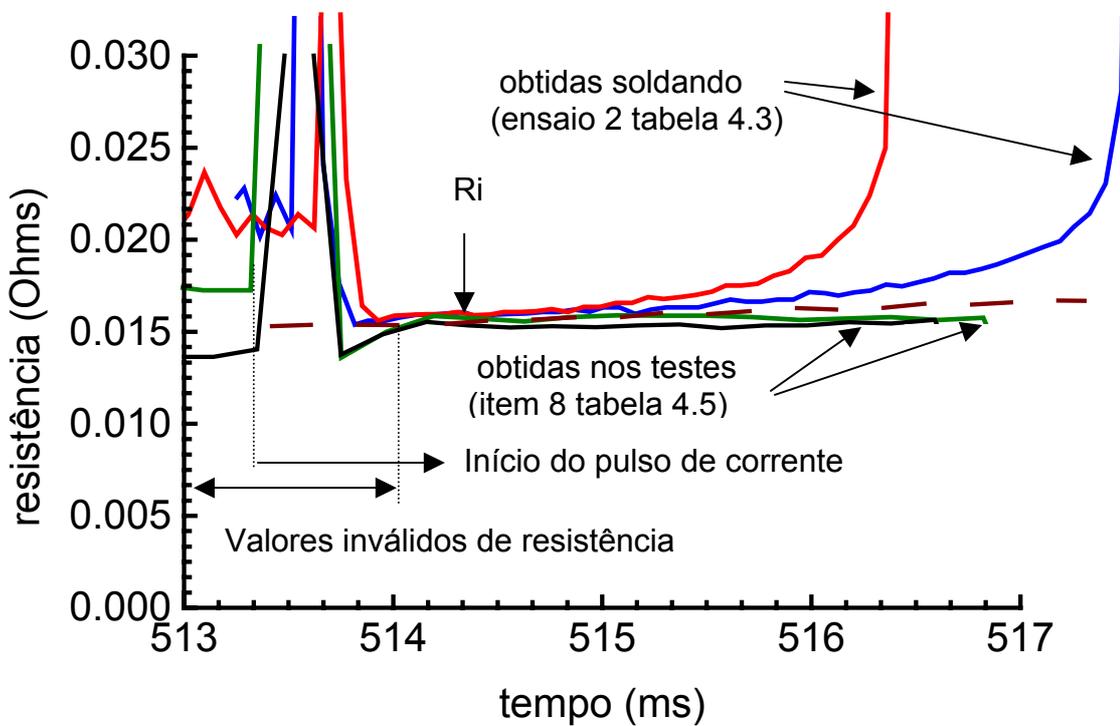


Figura 4.56 – Comparação da resistência do arame durante o curto (ensaio 2 tabela 4.3) e simulação do curto (item 8 tabela 4.5) .

A comparação entre o ensaio 2 da tabela 4.3 e os itens 8 e 17 da tabela 4.5 deu-se devido à semelhança entre os valores eficazes (133 A no ensaio 2, 134 A no item 8 e 135 A no item 17). Todavia, os valores da resistência durante os pulsos de corrente, para os itens 8 e 17 da tabela 4.5, foram um pouco superiores aos obtidos na soldagem (ensaio 2 tabela 4.3). Acreditou-se que isso tenha ocorrido porque a poça de soldagem acabava reduzindo a DBP. O valor obtido na soldagem seria correspondente a realizar os ensaios dos itens 8 e 17 com uma distância de 12 a 13 mm. Contudo, como se desejava, primordialmente, observar o perfil da variação da resistência, essa diferença não prejudicaria a análise. No entanto, para uma melhor visualização, as resistências (itens 8 e 17 da tabela 4.5) foram colocadas na mesma escala das obtidas na soldagem.

Nas figuras 4.56 e 4.57 existe um intervalo onde os valores de resistência são inválidos, devido a ruídos introduzidos na medida da tensão, causados pela transição da corrente da base o para pulso.

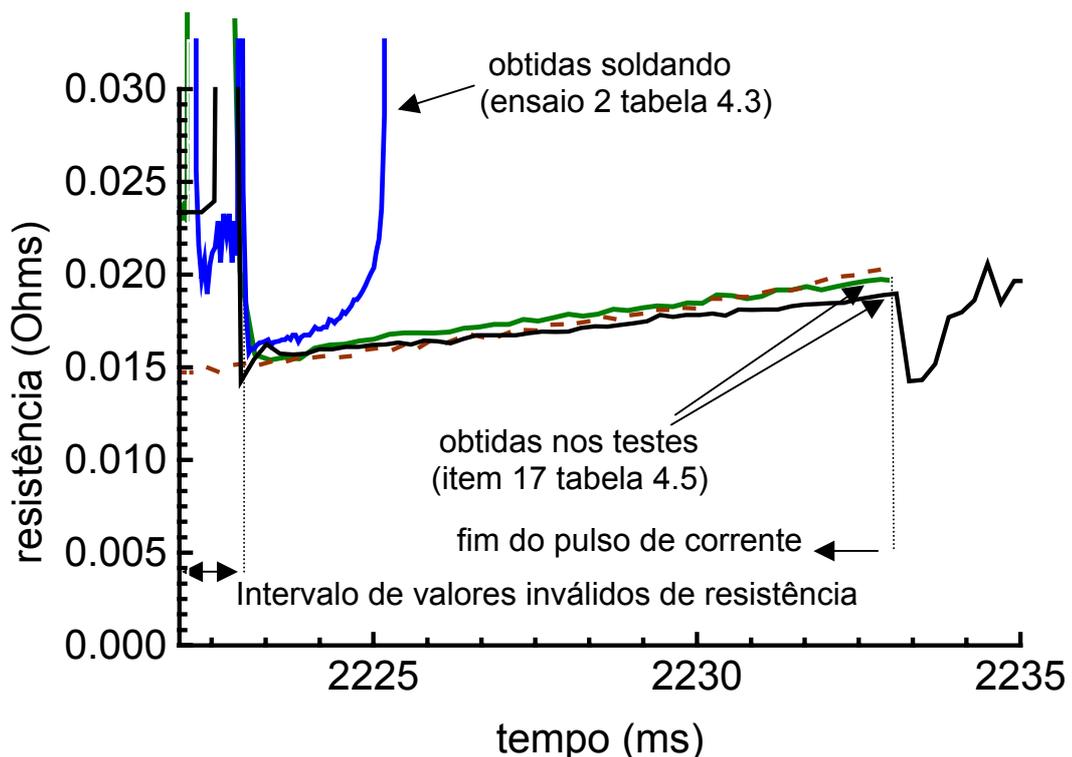


Figura 4.57 - Comparação da resistência do arame durante o curto (ensaio 2 tabela 4.3) e simulação do curto (item 17 tabela 4.5) .

O valor de R_{im} apresentado na tabela 4.5 foi obtido através do cálculo da média de R_i em cada pulso de corrente, durante um período de aquisição de 2

segundos.

Com os dados apresentados na tabela 4.5 foi possível verificar a existência de uma relação, com tendência linear, entre a resistência do arame e a corrente eficaz, para uma dada velocidade de arame. Na figura 4.58 são apresentados os pontos de resistência (R_{im}) e de corrente eficaz (I_e) para os itens de 1 a 4 sinalizados por triângulos, de 5 a 8 sinalizados por quadrados e de 9 a 13 por circunferências. A reta apresentada no gráfico foi linearizada para os itens de 5 a 8. Pode-se perceber que esta não seria a mais indicada para representar os outros dois conjuntos de pontos, ou seja, parece que cada situação ensaiada tem uma reta que melhor adapta-se. Entretanto, dependendo dos objetivos, seria factível considerar uma única reta para todas as situações, uma vez que o coeficiente de correlação desta reta passou de 0,97 a 0,95 considerando todos os pontos.

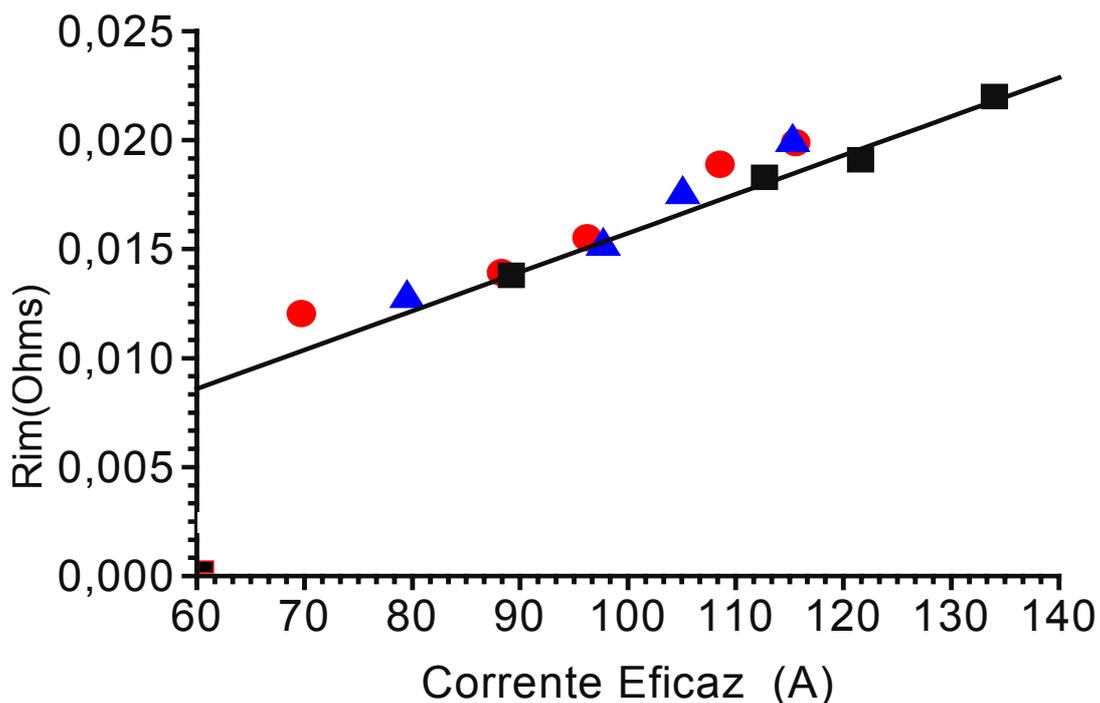


Figura 4.58 - Resistência do arame em função da corrente eficaz, para os itens da tabela 4.5 (triângulos itens de 1 a 4, quadrados itens de 5 a 8 e circunferências itens de 9 a 13).

4.8.4 - Análise da reignição usando-se como base a variação da resistência de curto-circuito.

Como ponto de partida para se determinar uma relação ($R\%$ na equação 4.13) entre o valor da resistência R_{ci} (valor da resistência de curto-circuito a partir do qual a reignição estaria para acontecer, figura 4.59) e o valor da resistência R_i (valor da resistência no início de curto-circuito), de maneira a utilizá-la no algoritmo de controle, foi feito um programa denominado PRCI para análise dos primeiros ensaios (tabela 4.3). O objetivo foi determinar em quanto tempo (t_i) ocorre a reignição, a partir do instante que RCC ultrapassa o valor de R_{ci} .

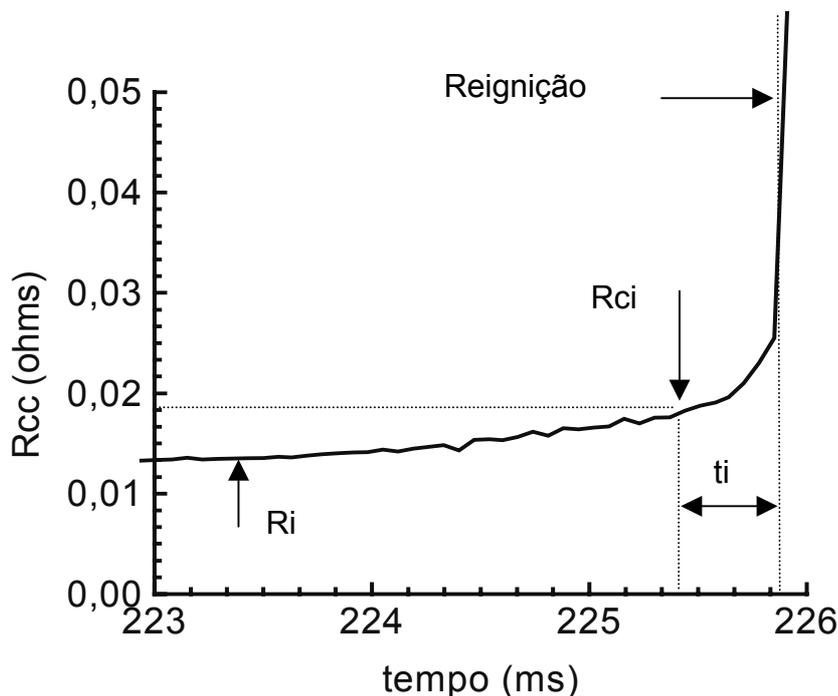


Figura 4.59 - Representação das variáveis envolvidas na determinação de t_i .

No programa PRCI foram calculados os valores médios, máximos e mínimos de t_i e o índice de reignição por intervalos de tempo, para valores de R_{ci} calculados em função de R_i especificando-se o valor de $R\%$ a partir de 20 %, com incrementos de 10%. Como resultado obteve-se as informações apresentadas na tabela 4.6. O valor de t_i , em cada curto-circuito, foi calculado medindo-se o tempo a partir do momento que a resistência instantânea do curto (RCC) tornou-se maior do que o valor de R_{ci} , até o instante da reignição do arco. Já o índice de reignição por intervalos foi determinado através da somatória dos curto-circuitos com t_i pertencente a um dado intervalo. Este índice foi obtido para os intervalos de tempo apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultado da análise do tempo disponível até ocorrer reignição (t_i) a partir de um dado valor de resistência de curto-circuito (R_{ci}).

Ensaio	R%	ti (tempo até reignição)			Incidência de reignição nos intervalos			
		médio (ms)	mínimo (ms)	máximo (ms)	0,04 - 0,1 (ms)	0,1 - 0,2 (ms)	0,2 - 0,3 (ms)	> 0,3 (ms)
1a	20	0,35	0,20	0,49	0	0	7	14
	30	0,18	0,07	0,28	1	9	11	0
	40	0,10	0,06	0,14	11	10	0	0
	50	0,08	0	0,14	17	2	0	0
1b	20	0,34	0,10	0,80	3	3	9	21
	30	0,16	0,05	0,25	3	21	12	0
	40	0,08	0,05	0,15	24	12	0	0
	50	0,06	0	0,10	21	6	0	0
2a	20	0,30	0,14	0,55	0	2	11	8
	30	0,16	0,06	0,34	3	10	7	1
	40	0,10	0	0,21	13	5	1	0
	50	0,07	0	0,14	17	1	0	0
2b	20	0,25	0,1	0,60	0	15	6	6
	30	0,12	0	0,35	15	9	0	3
	40	0,07	0	0,20	18	0	2	0
	50	0,07	0	0,15	15	3	0	0
3a	20	0,45	0,20	0,90	0	2	11	8
	30	0,25	0,06	0,41	3	10	7	1
	40	0,16	0	0,27	13	5	1	0
	50	0,11	0	0,21	17	1	0	0
3b	20	0,40	0,15	0,90	0	2	8	12
	30	0,19	0,05	0,70	6	10	4	2
	40	0,13	0,05	0,55	10	10	0	2
	50	0,11	0	0,50	14	2	0	2
4a	20	0,68	0,28	1,32	0	0	1	11
	30	0,40	0,14	0,76	0	1	3	8
	40	0,27	0,14	0,49	0	4	3	5
	50	0,18	0,07	0,42	2	5	4	1
	60	0,14	0,07	0,35	4	6	1	1
	70	0,10	0,06	0,28	8	3	1	0
	80	0,09	0	0,21	9	1	1	0
4b	20	0,71	0,15	1,30	1	0	2	20
	30	0,48	0,10	0,80	1	4	0	18
	40	0,30	0,10	0,70	2	6	4	12
	50	0,19	0,07	0,55	4	12	6	2
	60	0,12	0,05	0,30	6	16	2	0
	70	0,07	0,05	0,15	18	6	0	0
	80	0,06	0	0,10	18	2	0	0
5a	20	0,27	0,07	0,42	1	4	17	10
	30	0,18	0,07	0,28	2	14	16	0
	40	0,13	0	0,21	7	23	1	0
	50	0,09	0	0,14	23	8	0	0
5b	20	0,40	0,20	0,55	0	4	4	24
	30	0,27	0,10	0,40	2	8	12	10
	40	0,12	0,05	0,20	14	12	6	0

	50	0,08	0,05	0,15	24	8	0	0
6a	20	0,25	0,14	0,42	0	1	17	2
	30	0,13	0,06	0,21	6	12	2	0
	40	0,08	0	0,14	17	2	0	0
	50	0,07	0	0,07	13	0	0	0
6b	20	0,25	0,20	0,40	0	4	12	6
	30	0,14	0,10	0,25	16	2	0	0
	40	0,07	0,05	0,10	16	6	0	0
	50	0,05	0,05	0,10	22	0	0	0

A análise dos resultados possibilitou a previsão de algumas situações, que poderiam ocorrer ao ser implementada essa forma de controle, as quais seguem:

- Foi observado que com o arco mais longo a reignição tendeu a ocorrer com R% menor, pois o valor do tempo médio de reignição no ensaio 6 foi menor do que os dos ensaios 1 e 5, considerando-se R% de 30. Entretanto, são necessários mais ensaios para esclarecer melhor esta constatação.
- Para a rampa de corrente decrescente, o valor de R% tonou-se evidentemente maior no momento que antecede a reignição. Isso poderia estar acontecendo porque com a redução da corrente em forma de rampa, a força de constrição foi sendo reduzida, causando um desprendimento mais lento da gota, o que permitiu a captura de uma maior quantidade de pontos da resistência entre o bico e a peça antes de ocorrer a reignição.
- Para possibilitar um maior tempo para reduzir a corrente de I_{f3} a I_{f4} , poder-se-ia estabelecer um R% menor, que resulta em um t_i médio maior. Todavia, acredita-se que um t_i acima de um dado valor poderá fazer com que a gota não se desprenda do arame durante a fase 4. Com isso, como na fase 5 é dado um pulso de corrente I_{f5} , o arco reabrirá com corrente elevada, situação que justamente pretende-se evitar.

O tempo de resposta ajustado na fonte ELMA para baixar a corrente da fase 3 a fase 4, sem introduzir oscilações, foi de 100 μ s, que somado ao tempo de amostragem de 50 μ s, faria com que a identificação antecipada da reignição tivesse que ser feita com mais de 150 μ s antes desta ocorrer. Percebe-se que em média obter-se-ia um tempo praticamente igual ou superior para todos os ensaios com R% de 30 %. Em torno dessa média, existiam alguns tempos menores e outros maiores. No caso dos tempos menores, seria inevitável que o arco reabrisse com uma corrente maior do que a da fase 4. Já para os tempos maiores, existiria tempo suficiente para baixar a corrente antes da reignição do arco. Entretanto, se a

reignição for identificada com muita antecedência, a gota pode não se desprender, conforme já mencionado nas observações feitas no parágrafo anterior.

Outro fato verificado foi que em praticamente todos os ensaios observou-se ocorrências de t_i inferior a 100 us. Contudo, estas não ultrapassaram 10% do total. Assim sendo, se os salpicos que apareceriam na reignição fossem causados, exclusivamente, devido ao valor da corrente na reabertura, reduzir-se-iam os mesmos na ordem de 90%.

Com base nas informações obtidas verificou-se que a proposta de se identificar a reignição através da resistência de curto circuito era viável, a qual foi introduzida no algoritmo de controle apresentado na figura 4.49. Para maior flexibilidade, o R% foi implementado no programa como uma variável ajustável, já que com a quantidade de ensaios realizadas não foi possível se determinar uma relação entre o R% e as condições de soldagem.

Inicialmente, foram repetidos os primeiros ensaios apresentados na tabela 4.3 com essa nova forma de detecção da iminência de ocorrer a reignição, cujos resultados ficaram dentro do previsto. Na média, verificou-se que a reignição acontecia na fase 4 (figura 4.60a), havendo, também, reignições na fase 5 (figura 4.60.b) e algumas ainda na fase 3 (figura 4.60b). Observou-se, também, muitos casos onde a reignição ocorria enquanto a corrente migrava de I_{f3} para I_{f4} .

As reignições da fase 5 poderiam ser evitadas, fazendo com que a corrente permanecesse na fase 4 até que a mesma acontecesse. Porém, se esta não viesse a acontecer, o arame poderia continuar em curto e embolar. Uma solução para este último inconveniente seria estabelecer um tempo máximo para a fase 4. Outra forma, seria criar uma relação entre o valor da corrente no final da fase 3 e o da resistência de curto, de modo que na medida que a resistência aumentasse, a corrente diminuísse e vice-versa. Assim, quando houvesse a tendência do prolongamento do curto, situação em que a corrente já teria sido reduzida, nesta nova concepção a corrente voltaria a crescer.

Mesmo atingindo-se a meta de reduzir a corrente em grande parte das reignições, através da observação visual, ficou difícil mensurar os ganhos reais obtidos com esta nova forma de prever a reignição, quando comparados aos obtidos nos primeiros ensaios, nos quais a corrente era reduzida somente após ocorrer a reignição.

Outra etapa, foi implementar essa forma de onda no protótipo da DIGITEC, que possuía uma resposta dinâmica bem menor, resultante da soma do tempo de

amostragem de 200 us de sua CPU com sua taxa de descida de corrente, que durante o curto é superior a 1000 us. Mesmo nestas condições, obteve-se redução na quantidade de salpicos.

Como, até então, a forma de quantificar o nível de salpicos tinha sido através da observação ocular, de maneira a possibilitar uma análise mais consistente sobre o valor da corrente no instante da reignição e a relação com a redução dos salpicos, revelou-se necessária a utilização de outros meios como: filmagem, pesagem dos salpicos, etc. aliando-se métodos estatísticos.

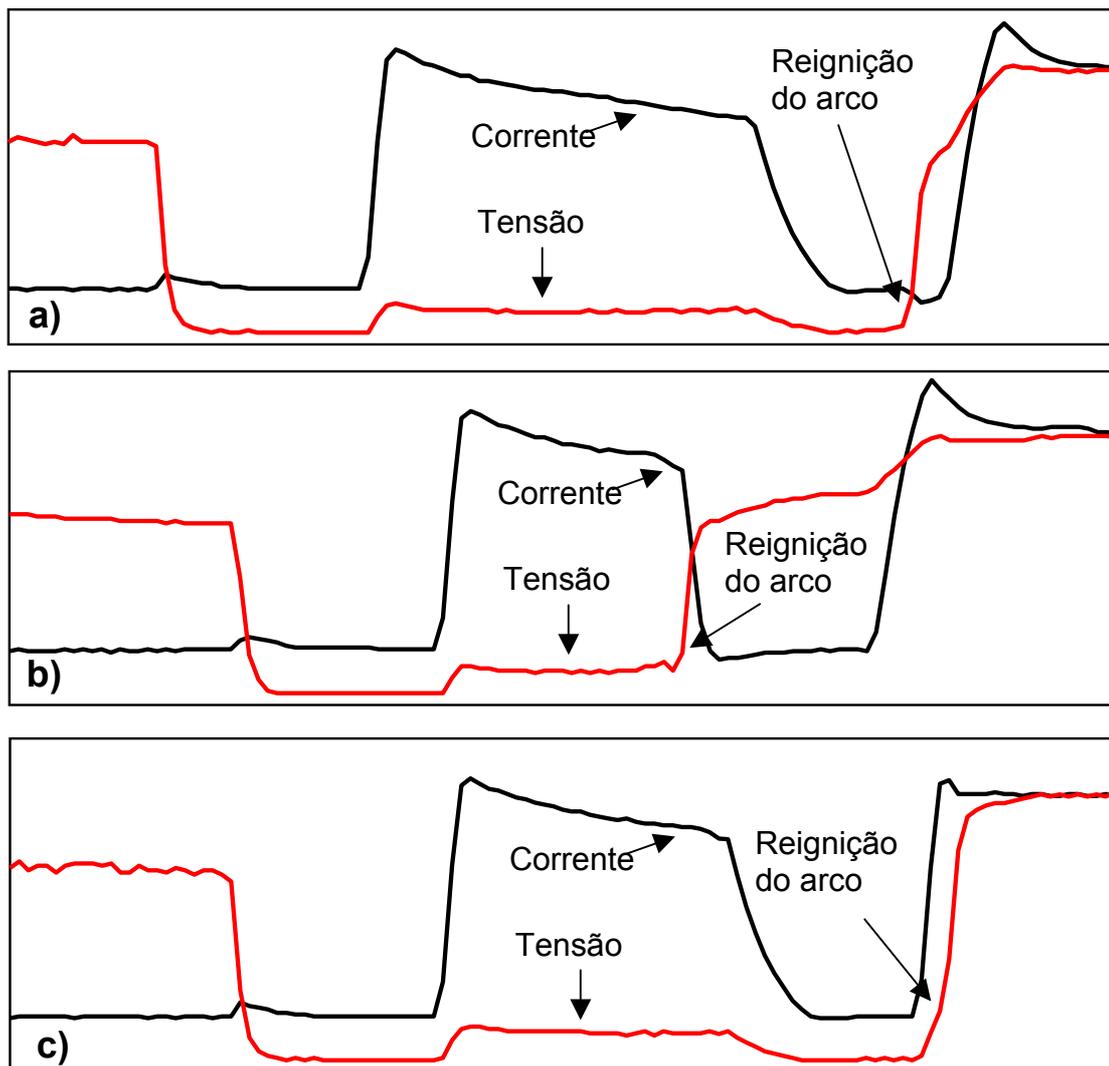


Figura 4.60 – Tensão e corrente durante o curto-circuito com detecção da reignição pela resistência. Reignição na, a) fase 4; b) fase 3 e c) fase 5.

Contudo, isso não foi realizado porque surgiu uma aplicação para o curto-circuito controlado em passes de raiz na soldagem de dutos, já que a quantidade de salpicos, resultante dos ensaios com o curto-circuito controlado na DIGITEC,

estavam dentro da permitida para esta aplicação. Assim, desviou-se o enfoque do trabalho sobre a produção de salpico e estabeleceu-se como prioridade encontrar e implementar um método de ajuste automático do comprimento do arco para o protótipo da fonte DIGITEC.

4.8.5 - Metodologia para ajuste da altura do arco no curto-circuito controlado.

A fase 1 da forma de onda inicialmente sugerida (figura 4.48), tinha como propósito estabilizar altura do arco através do controle da tensão de arco, de forma semelhante a que ocorre na modalidade de soldagem com corrente pulsada denominada modo misto. Entretanto, esta forma de controle apresentou-se ineficiente na soldagem com CO_2 puro, devido à tensão do arco ter menor sensibilidade à variação da corrente com este gás. Na figura 4.61, pode-se perceber esse fato, onde o controle reduziu a corrente até um valor limite, mesmo assim a tensão do arco permaneceu acima do valor de referência ajustado, resultando em um menor controle sobre a altura do arco.

Em busca de um controle mais eficiente da altura do arco, resolveu-se trabalhar com uma forma de onda com corrente imposta, visando amarrar a taxa de fusão à corrente média. A figura 4.62 mostra esta forma de onda, que foi denominada por Baixo [7] como controle a três níveis de corrente, onde o controle de tensão na fase 1 foi substituído por mais um nível de corrente I_{f1} . O termo três níveis refere-se às três correntes mais significativas, I_{f3} , I_{f5} e I_{f1} , que representam a maior parcela da corrente empregada na soldagem.

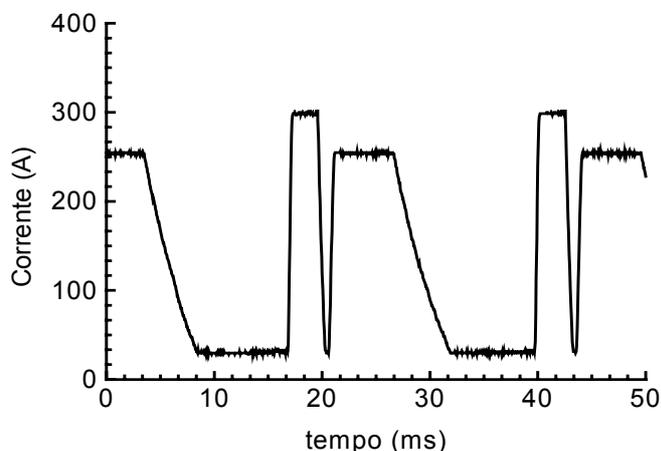


Figura 4.61 – Soldagem com CO_2 puro e controle de tensão na fase 1.

A obtenção do relacionamento das variáveis I_{f5} e t_{f5} em função da tensão U_i foi através de ensaios de soldagem para diferentes DBP, em uma dada velocidade de arame, com a utilização de CO_2 puro e arame ER70S-6 / 1.2 mm.

No primeiro caso, ajustou-se a I_{f5} até o arco ficar estável na DBP ensaiada, fixando-se t_{f5} em 5,9 ms. No segundo caso, repetiu-se este procedimento ajustando-se t_{f5} , fixando-se I_{f5} em 250 A. Nos dois casos, quando o arco ficava estável, fazia-se a aquisição do sinal de tensão, para posterior determinação de U_i .

O resultado obtido no primeiro caso foi uma tabela para cada velocidade de arame ensaiada, com os valores de I_{f5} e os respectivos valores de U_i . No segundo caso, obteve-se também uma tabela para cada velocidade de arame, porém com os valores de t_{f5} e os respectivos valores de U_i . Na tabela 4.7 são mostrados os valores de $I_{f5} \times U_i$ para a velocidade de arame de 2,6 m/min, e na figura 4.63a o gráfico correspondente. Já na tabela 4.8 são apresentados os valores de $t_{f5} \times U_i$, também, para velocidade de arame de 2.6 m/min, e na figura 4.63b o gráfico correspondente.

Tabela 4.7 – Determinação da função $U_i \times I_{f5}$.

U_i (V)	I_{f5} (A)
7,1	269
7,5	246
8,0	229
8,6	210

Tabela 4.8 – Determinação da função $U_i \times t_{f5}$.

U_i (V)	t_{f5} (ms)
5,2	12,9
5,7	8,9
6,5	5,9
8,5	3,9

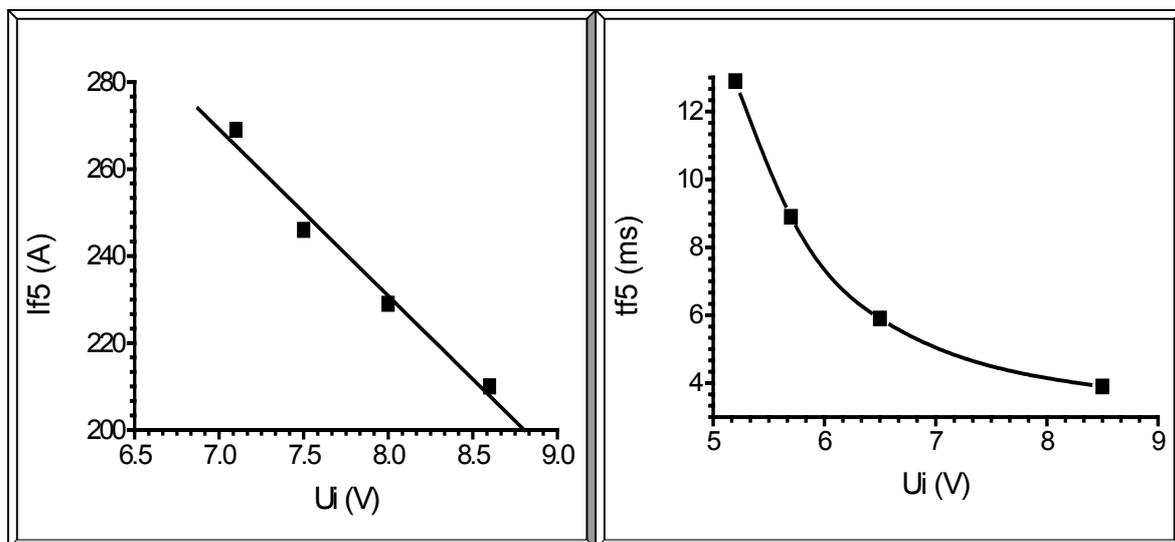


Figura 4.63 – Gráfico das funções de $U_i \times I_{f5}$ (a) e $U_i \times t_{f5}$ (b).

No primeiro caso, como se obteve uma equação linear, introduziu-se no algoritmo da fonte o ajuste de I_{f5} através desta equação. As equações para velocidades intermediárias (não ensaiadas), foram determinadas através da interpolação dos coeficientes das equações obtidas nos ensaios. O tempo t_{f5} (5,9 ms) foi calculado através da expressão 3.29 apresentada em [7], aqui transcrita como equação 4.18.

$$t_{ap} = VF / (C1 \cdot I_{ap}^2) \quad (4.18)$$

Onde: VF = Volume fundido

$I_{ap} = I_{f5}$

C1 = Constante experimental

$t_{ap} = t_{f5}$

No segundo caso, como a equação resultante não foi linear o ajuste de t_{f5} foi feito tabelando-se a referida equação, devido a limitações de processamento da CPU da fonte. Esta nova tabela continha para cada valor de tensão lido pelo conversor A/D do protótipo da DIGITEC, o respectivo valor de t_{f5} . O valor lido pelo conversor era um número de 0 a 255 (8 bit), para uma tensão de 0 a 50 V, o qual passou a ser o índice do vetor que continha a tabela. A nível de processamento, o “software” fica mais rápido com esta solução (utilização de vetor), do que fazer qualquer operação aritmética. Para velocidades intermediárias não foram feitas implementações no sentido de corrigir a relação entre U_i e t_{f5} , limitando-se, assim, a soldagem para as velocidades ensaiadas. A corrente I_{f5} de 250 A foi obtida através de uma média de picos de corrente de um ensaio com o MIG/MAG convencional.

Os resultados dos ensaios, já com o algoritmo fazendo as correções de t_{f5} ou I_{f5} para compensar a variação da DBP, demonstraram a viabilidade da utilização dessas duas formas de controle. Entretanto, a correção através do tempo t_{f5} permitiu um melhor controle do arco. Os ensaios revelaram, ainda, a necessidade de um conjunto de equações para a posição plana e vertical descendente, e um outro para a posição sobre cabeça.

A figura 4.64 apresenta os oscilogramas de corrente e tensão para o controle através de t_{f5} , nesta situação t_{f5} ficou em torno de 8 ms. Os demais dados foram:

Arame → ER70S6 1.2 mm

Gás → CO₂ puro

Correntes → $I_{f1} = 50$ A, $I_{f2} = 30$ A, $I_{f3} = 300$ A, $I_{f4} = 30$ A e $I_{f5} = 250$ A

Tempos → $t_{f2} = 1$ ms, $t_{f4} = 1$ ms

Outras → $U_{cc} = 15.0$ V, $R\% = 20$, $V_a = 3,6$ m/min,

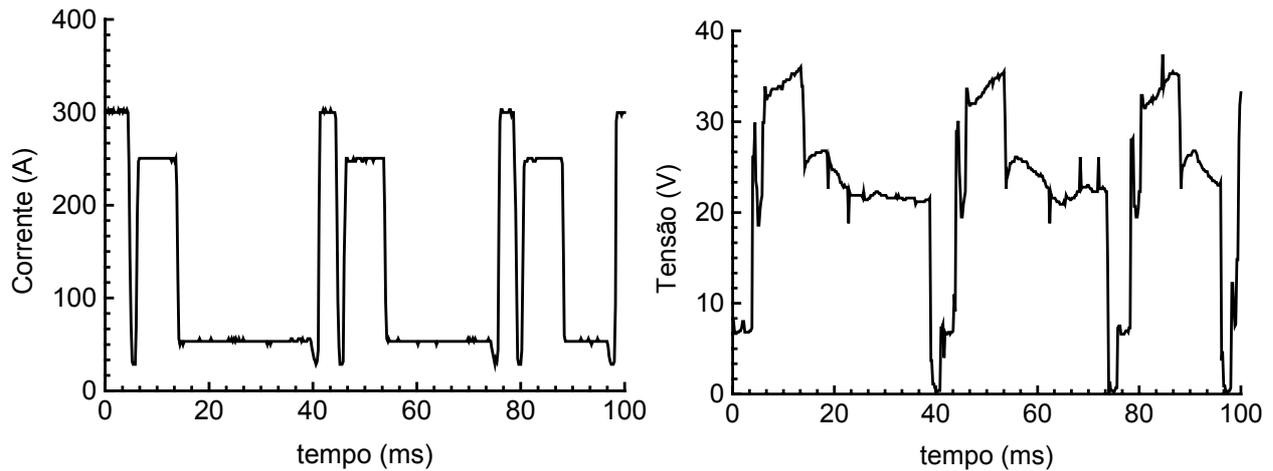


Figura 4.64 - Os oscilogramas de corrente e tensão para o controle a três níveis.

A abordagem referente a esta modalidade foi no sentido de comprovar a viabilidade de sua utilização e potencialidade, como também, demonstrar as vantagens e os recursos obtidos quando se faz o controle da soldagem através de um sistema micro-processado, cabendo ainda estudos mais aprofundados das diversas variáveis que compõem a forma de onda e influência destas na formação dos salpicos e estabilidade do arco. A exemplo disso, apesar dos valores atribuídos a t_{f5} e I_{f5} , em cada um dos dois casos analisados, terem resultado em soldas estáveis e aplicáveis na prática, não se pode afirmar que os mesmos tenham sido ajustados de maneira a dar o melhor resultado, o que, também, pode ser estendido para as demais variáveis que compõem a forma de onda.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Os objetivos propostos na introdução foram atingidos, como atesta os resultados apresentados no capítulo 4, cabendo aqui alguns destaques:

5.1 - Com Relação às Modalidades de Soldagens Desenvolvidas.

De todas as modalidades de soldagem realizadas neste trabalho, três delas merecem um destaque maior:

i - Modalidade de Soldagem Pulsado com Pulsação Térmica.

Como este foi um dos primeiros desenvolvimentos, coincidindo com o interesse de uma empresa geradora de energia elétrica na aplicação desta modalidade, o mesmo teve grande evolução durante o período que se realizou o presente trabalho. Uma das razões foi sua data de início, que possibilitou o seu acompanhamento em laboratório e no campo (usina hidrelétrica), por mais de 4 (quatro) anos, com alterações e inclusões de novas funções no controle do processo em virtude das necessidades surgidas. Outra razão, pode-se dizer que foi a especificação de metas e prazos para as atividades referentes à determinação dos procedimentos de soldagem, adequados à aplicação de recuperação de pás de turbinas.

O resultado final foi uma série de conquistas, muitas delas difíceis de serem colocadas no papel, e se vistas de forma separada não seriam percebidas. Muitas somente fazem sentido para quem participou dos desenvolvimentos em campo. Porém, a somatória de todas essas conquistas fizeram desta modalidade, pelo menos a nível de Brasil, a que reuniu as melhores características para aplicação de revestimento em turbina. Este trabalho cooperativo acabou contemplando todos os objetivos gerais traçados, culminando com a concepção da fonte de soldagem denominada DIGITEC.

ii - Modalidade MIG/MAG CA.

Esta modalidade apresentou boa estabilidade de arco nos ensaios realizados para testar o controle, permitindo a soldagem de chapas finas, antes não obtidas com o MIG/MAG pulsado normal. As perspectivas sobre o MIG/MAG CA são grandes, tanto que, recentemente, iniciou-se um trabalho de pós-graduação para explorar os potenciais desta modalidade. Porém, a utilização da corrente de curto circuito, nos momentos que o eletrodo tende ou toca na peça, não resultou no retomo da estabilidade do arco, como se obteve no MIG/MAG Pulsado.

iii - Modalidade Curto-circuito Controlado.

Esta foi à última modalidade desenvolvida e a mais complexa devido à quantidade de variáveis a serem ajustadas. Porém, a nível de controle, foram feitos dois grandes avanços, o primeiro consistiu em utilizar a resistência de curto circuito para se prever o momento da reignição. O segundo, em determinar uma forma de estabilização do arco, através do tempo ou da corrente, ambos da fase 5.

A importância de se determinar com antecedência a reignição do arco, continua sendo uma incógnita, e reside na questão do quanto que se pretende reduzir a quantidade de salpicos e quais benefícios isto traria. Nos ensaios realizados com a fonte de soldagem ELMA, que fornecia uma resposta rápida em corrente, a impressão visual que se teve é que a quantidade de salpicos era inferior a obtida com a DIGITEC. Entretanto, como a quantidade de salpicos com a DIGITEC também foi reduzida, considerando-se a utilização de CO₂ puro, são necessários mais estudos para se determinar as reais vantagens de se reduzir a corrente antes da reignição do arco.

5.2 - Com Relação à Comunicação entre as Fontes de Soldagem no Duplo-Arame.

O modo de conexão entre as fontes, apresentado no sub item 4.6.1, permite também a obtenção de um sistema para soldar com arco submerso que, dependendo da corrente necessária, possibilita a conexão de várias fontes de soldagem operando como escravas. Este tipo de configuração é interessante para instituições de ensino em soldagem, pois nos momentos em que não se faz uso do

arco submerso, cada fonte pode operar também de forma independente em quaisquer dos processos implementados em seu "software".

5.3 - Com Relação à Abordagem do Desenvolvimento.

A utilização de conceitos de engenharia de "software" para concepção dos programas implementados no âmbito deste trabalho, bem como a padronização da interface com o usuário, permitiram que os mesmos fossem elaborados de forma organizada, concisa, coerente e dinâmica, possibilitando que problemas referentes à implementação das técnicas de controle e da interface com o usuário fossem vistas de forma mais clara. Por fim, isto culminou com o delineamento do corpo do programa e de uma metodologia de desenvolvimento de "software", que foi utilizada na montagem dos programas, e ainda está sendo adotada sempre que uma nova modalidade é incorporada, tanto nos programas que executam no PC, como no que está na CPU embutida na fonte DIGITEC.

Outro fator importante e que agilizou muito os desenvolvimentos, foi à utilização do circuito de simulação de arco, uma vez que cada operação de soldagem exigiria um certo tempo de preparo, somado ao tempo despendido com situações não previstas e erros cometidos. Além disso, obteve-se uma redução de custos, pois com a substituição dos ensaios de soldagem pela simulação, não foram necessários materiais consumíveis, envolvimento de soldador e gastos com possíveis peças danificadas.

A forma de gestão adotada pelo LABSOLDA, que procura unir uma equipe de apoio aos pós-graduandos, tanto a nível técnico, como de engenharia, promovendo a integração entre os trabalhos de pesquisa conduzidos por estes, além de resultar numa ponte sólida entre a pesquisa e sua aplicação final, foi certamente um dos grandes fatores responsáveis pelo aglutinamento dos vários desenvolvimentos apresentados neste trabalho.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho abrangeu vários desenvolvimentos, que resultaram em uma grande quantidade de informações sobre as diferentes modalidades de soldagem abordadas e, também, em tecnologias convertidas em protótipos de instrumentos e de equipamentos destinados a soldagem. Esses desenvolvimentos abriram novas perspectivas de trabalhos e questões a serem analisadas com maior profundidade, a saber:

Para melhorar a abertura do arco vislumbrou-se duas maneiras, que podem ser utilizadas em todas as modalidades do MIG/MAG. Uma consiste em fazer o arame parar a partir do instante de seu toque na peça até que o arco forme-se, onde se espera diminuir o tempo do curto circuito inicial e, também, reduzir a possibilidade do arame enrolar. A outra consiste em se utilizar o mesmo princípio de abertura de arco por toque do TIG. Para tanto, a fonte de soldagem deve aplicar uma corrente baixa no momento que o arame toca a peça e o alimentador de arame deve recuá-lo, com a pretensão de que o arco abra suavemente, semelhante ao que ocorre com o TIG. Assim, após a abertura, inicia-se o controle sobre as variáveis de soldagem, segundo a modalidade selecionada. O objetivo desta última maneira de abrir o arco é o de abri-lo de forma menos conturbada, reduzindo-se a possibilidade de falhas no início do cordão. Porém, o tempo para se realizar este tipo de abertura pode ficar superior ao obtido normalmente, o que em algumas aplicações pode ser desvantajoso.

No controle da altura do arco do MIG/MAG AC sugere-se estudar a possibilidade de utilizar a tensão do arco como indicativo da altura do arco, uma vez que o algoritmo de controle desenvolvido para esta modalidade já faz a leitura desta variável. Isso, além de facilitar a implementação, reduziria os custos com instrumentação necessária para aquisição e tratamento, se fosse utilizada outra variável.

Nos eventuais curto-circuitos, que ocorrem no MIG/MAG com imposição de corrente, sugere-se verificar a possibilidade de se avaliar à distância contato peça medindo-se a resistência de curto circuito, e com isso, corrigir as variáveis de soldagem.

No curto-circuito controlado, apesar dos avanços referentes à determinação com antecedência da reignição do arco e da concepção de uma forma de se ajustar a altura do arco automaticamente, não foram obtidas maiores informações a respeito da relação entre a quantidade de salpicos e o valor da corrente no instante inicial e final do curto circuito. Assim, não foi possível relacionar os resultados obtidos com a redução da corrente no instante de início e de fim do curto circuito, e, ainda, responder em qual dos instantes tem-se a pior situação (maior quantidade de salpicos). Contudo, com a infra-estrutura concebida e informações geradas, tem-se as condições necessárias para realização desta análise, sugerindo-se os seguintes estudos:

- Analisar os efeitos da redução da corrente somente no início do curto circuito, somente no fim do curto-circuito e em ambos os momentos, sobre a formação dos salpicos e sobre a estabilidade do arco. O intuito dessa análise é se determinar em qual dos dois momentos é gerado mais salpicos.
- Comparar a quantidade de salpicos obtida com a redução da corrente antes e após a ocorrência da reignição, repetindo-se os ensaios para diferentes taxas de redução da corrente. O objetivo dessa comparação é o de esclarecer se a corrente deve ou não ser reduzida antes da reignição, e qual seria o tempo máximo para reduzi-la sem comprometer a diminuição dos salpicos. A alteração da taxa de redução de corrente na fonte ELMA pode ser feita com a simples alteração do filtro do sinal de entrada da corrente (corrente de referência). Já para as fontes INVERSAL e DIGITEC, se for necessário se aumentar a velocidade de resposta torna-se imperativo se modificar, ou o valor da indutância de saída L_s , ou o valor da tensão do secundário do transformador de potência, ou ambos.
- Estudar se existe uma relação entre as condições de soldagem e o valor de R%, com o intuito de possibilitar o ajuste automático do mesmo e, também, introduzir no algoritmo de controle um índice que quantifique o quanto a reignição esta ocorrendo com antecedência.

- ¶ Analisar a possibilidade de se utilizar a derivada da resistência de curto-circuito para identificação antecipada da reigitação no lugar do R%, e se esta teria alguma vantagem, uma vez que em termos de processamento exige-se mais tempo de CPU.

Recomenda-se fazer a filmagem em alta velocidade da transferência metálica, se possível em 20.000 quadros por segundo, o que é atingido em baixas resoluções por cameras especiais existentes no mercado atualmente, bem como, sincronizar o sinal da camera com a corrente e a tensão do arco, de maneira a buscar uma relação entre a forma com que a gota é transferida com essas duas variáveis.

Uma outra implementação a ser testada é fazer com que o programa estime quando o curto acontecerá, de forma que a corrente seja reduzida antecipadamente. Uma maneira de se alcançar isso, poderia ser através da determinação de um tempo de arco de referência, resultante da média dos tempos de arco, ou do tempo de arco de maior incidência ou ainda, calculá-lo, utilizando-se técnicas de inteligência artificial. Assim, o algoritmo reduziria a corrente para o valor da fase 2, quando o tempo de arco aberto atingisse o tempo de referência estimado, sendo que o tempo de referência estaria sempre sendo atualizado durante a solda.

Além das formas de ondas testadas no curto-cicuito controlado, deixa-se como sugestão mais duas variantes destas, uma obtida suprimindo-se a fase 5 da forma de onda apresentada na figura 4.48, que é mostrada na figura 6.1a, visando-se obter um maior período para o controle da tensão. A outra resulta na introdução da fase 6 na forma de onda apresentada na figura 4.62, como é mostrado na figura 6.1b, com o objetivo de se obter um patamar de corrente (I_{f6}) intermediário com maior poder de fusão e um patamar com corrente mais baixa (I_{f1}). Assim sendo, no momento do toque da gota com a peça, a corrente já estará baixa o suficiente para minimizar os efeitos sobre os salpicos, reduzindo, também, o tempo para baixar a corrente de I_{f1} para I_{f2} . Neste caso, o alvo é a supressão dos salpicos grosseiros, conforme foi descrito no capítulo 2.

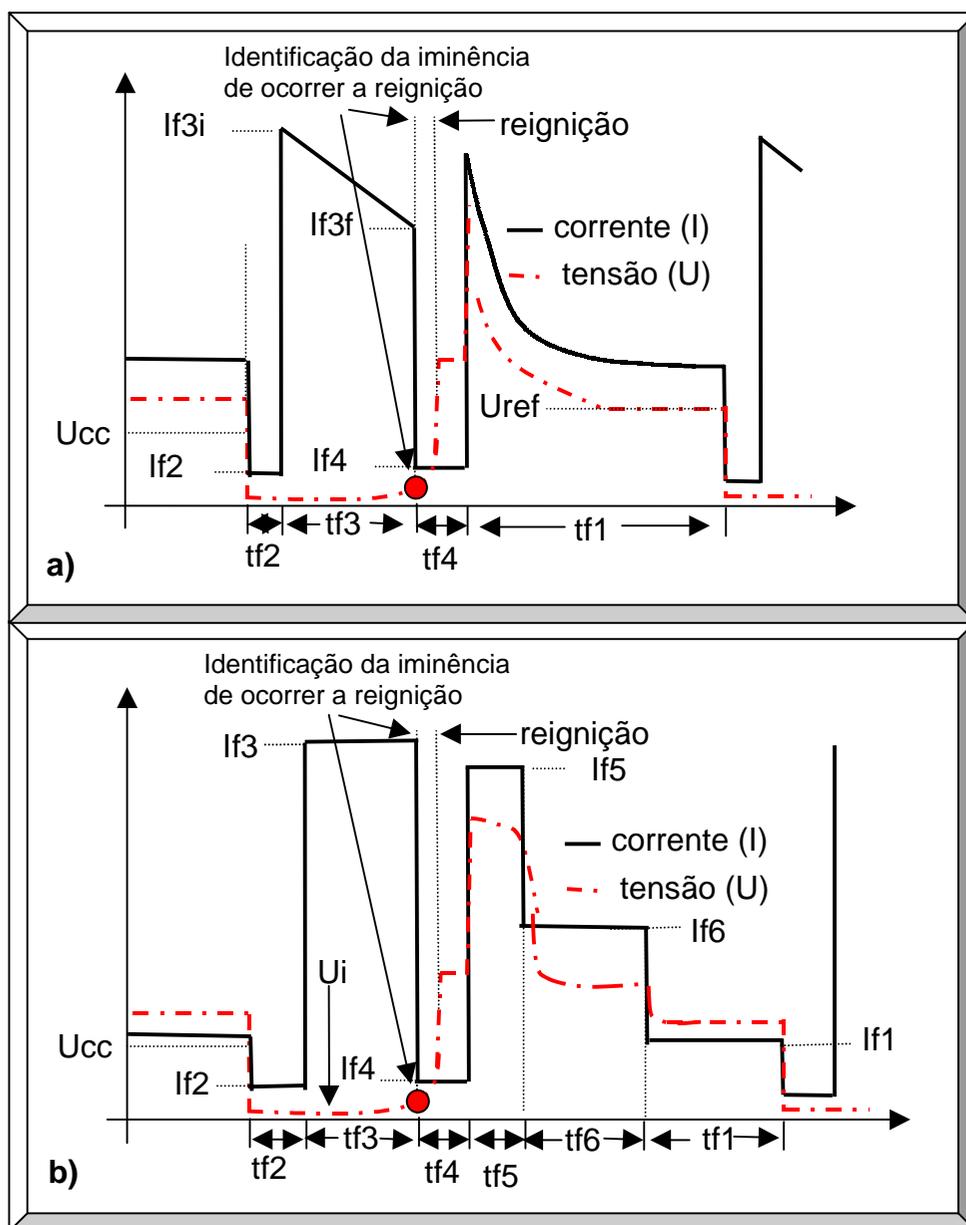


Figura 6.1 – Outras forma de onda aplicáveis ao curto-circuito controlado.

a) controle da tensão na fase de arco, b) controle utilizado no trabalho com mais um patamar de corrente na fase de arco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Bet, I. “Fonte de Corrente Constante Realizada a Transistores de Potência, com Forma de Onda do Tipo Retangular para Soldagem a Arco”, Dissertação de Mestrado - 1981 - UFSC.
- [2] – Xavier, P., W “ Estudo de uma fonte de Energia para Soldagem a Arco Submerso”, Dissertação de Mestrado - 1986 - UFSC.
- [3] – Gohr, Raul Jr. “Projeto e Realização de uma Fonte de Energia para Soldagem Multi-Processo”, Dissertação de Mestrado - 1992 - UFSC.
- [4] – DUTRA, J. C. – Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG. Tese de Doutorado, 1990. UFSC.
- [5] – Ramírez G., A. M. “Análise e Desenvolvimento do Processo MIG/MAG Duplo-Arame com Potencial Único”, Dissertação de Mestrado, 1999 -UFSC.
- [6] – Motta M. F. “Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo-Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimento” Tese de Doutorado, 2002 UFSC.
- [7] - Baixo, C. “Estudo da Soldagem MIG/MAG pela Técnica Hiperbárica a Seco” Tese de Doutorado, 1999 UFSC.
- [8] – Baixo C. , Dutra J. “Influência da taxa de variação da Corrente na Regularidade em Soldagem MIG/MAG por curto-circuito.” XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem ABS, Caixias do Sul, Brasil 1995 pp. 903-920.
- [9] – Tokuji Maruyama – Masashi Okada – Yukio Hida – Masahiro Honma – Tatsuji Minato “Current Waveform Control in Gas Shielded Arc Welding for Robotic Systems.” Kobelco Technology review n. 18 Apr. 1995, pp. 10-13.
- [10] –Stava, E. “A New, Low-Spatter Arc Welding Machine” Weld. J., January 1993, pp 25-29.
- [11] – Y. S. KIM and T. W. EAGAR “Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding” Weld. J., June 1993, pp. 269s-278s.
- [12] –Waszink, J. and Graat, L. “Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal.” Weld. J., v. 62, n. 4, 1983. pp.:108s-116s.
- [13] – Ogasawara T., Maruyama, T. Saito T., Sato M. and Hida Y. “A Power Source for Gas Shielded Arc Welding with New Current Waveforms.” Weld. J., March 1987, pp 57-63.

- [14] – Yamamoto H., Harada S. and Yasuda T. “The development of welding current control system for spatter reduction. V.4 n.5 pp.: 398-406”, 1990
- [15] – Nacey T. J. “Fourth-Generation Invertes Add Artificial Intelligence to the Control of GMA Welding.” Weld. J., January 1993 pp. 31-34.
- [16] – DUTRA, J. C. – Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG. Tese de Doutorado, 1990. UFSC.
- [17] – MAMANI, L., DUTRA, J. e GOHR, R. – Desenvolvimento de um Programa Computacional para o Controle Sinérgico do Processo de Soldagem MIG/MAG. Anais do XXII ENTS. ABS, Blumenau, Brasil, 1996. pp.: 401-410.
- [18] - Por John Norrish "O que é o MIG Sinérgico", revista Soldagem & Inspeção, N. 3. pp 16-18, 1995
- [19] – Technical Report – “Sensarc AL350 Penetration-controllable MIG Welding Power Source”, Factory Automation & Robotics Group, New Business Division – KOBE STELL (Kobelco), 1992.
- [20] – Yamamoto H., Harada S., Nishikawa W., Ueyama t. “MIG Welding of Aluminum – Processa and Power Source” DAIHEN Corporation, Research & Development DEP., Weldinf Mechatronics Group, 5-1 Minamisenrioka, Settu, Osaka, Japan, 1996.
- [21] – Gohr, Raul Jr. “Projeto e Realização de uma Fonte de Energia para Soldagem Multi-Processo”, Dissertação de Mestrado - outubro de 1992 - UFSC.
- [22] –Dutra J, Gohr R., Larry Fiori Ollé, Baixo C, “ Estabilidade do Arco voltaico TIG em Corrente Alternada”, XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 577-590, setembro de 1991.
- [23] – Jair Carlos Dutra, Raul Gohr Júnior, Larry Fiori Ollé, “O processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica” , Anais do XXI ENTS. ABS, Caixias do Sul, Brasil, 1995 pp.: 889-902.
- [24] – Luís Felipe Guimarães de Souza, M.Sc., COPPE/UFRJ, Ari Sauer Guimarães, D. Sc. , COPPE/UFRJ, “ Análise dos Parâmetros de Pulso do Processo TIG Pulsado “ , XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 611-628, setembro de 1991.
- [25] – Delgado, L. C. “Estudo do Processo de Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame”, 2000. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [26] – Katsunori Inoue, Mamoru Kawahara and Yoshiaki Arata “An Accurate Groove Position Detection Using Soft-Focused Imaging.” Transactions of JWRI is published by Welding Research Institute of Osaka University, Ibaraki, Osaka 567, Japan. V. 18 n. 1 pp.:43-50. 1989.
- [27] – Dutra J. , Rosa V. “O Arco Elétrico Como Sensor de procura de Junta” XXI – Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem– ENTS ABS, Caixias do Sul, Brasil 1995 pp. 807 -820.
- [28] – C.S. Wu. “Vision-Based Detemination of Welding Groove Geometry in MAG Welding Process” Berlin Technical Univesity, Institute of Joining and Welding, Berlin Germany. pp. 152-156, may 1994.
- [29] – Y. Suga, T. Suetomi and K. Kobayashi, “Fuzzy Control of Arc Length in Hyperbaric TIG Arc Welding”. International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 429-433 1993.
- [30] – K. S. Boo and H. S. Cho “A Fuzzy Linguistic Control Approach to then Control of Weld Pool Size in Gas Metal Arc Welding Processes” Welding and Joining Processes Vol. 51, pp. 73-84, ASME 1991 .
- [31] – Lucas W. “Instrumentation for Arc Welding-Process monitoring and power source validation.” Welding & Metal Fabrication, Nov/Dec 1994. pp.:415-420.
- [32] – Dutra, J. Baixo, C., Ollé, L. e Gohr, R. “Instrumentação para o Estudo da Trasnferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito.” Anais do XXI ENTS. ABS, Caixias do Sul, Brasil, 1995 pp.: 867-888.
- [33] – J. A. Johnson, N. M. Carlson, H. B. Smartt and D. E. Clark “Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode” AWS, April 1991 91s- 99s.
- [34] – LUCHTENBERG, H., BAIXO, C. e DUTRA, J. “Desenvolvimento de uma Nova Geração de Programas para Análise Estatística da Soldagem a Arco.” Anais do XXII ENTS. ABS, Blumenau, Brasil, 1996. pp.: 421-431.
- [35] – Shanmagam A., Raja A., Chandrasekhariah M. N. and Ramanarayanan V. “Stability Analysis of MIG Welding Process by Computer Modelling and Simulation” SOJOM – 91. pp. 673-679.
- [36] – Armando Albertazzi Gonçalves Jr., “Metrologia”, Apostila Parte I, LABMETRO/UFSC - 1999.
- [37] – Jacob Fraden, “Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs, and Applications” AIP Press – American Institute of Physiscs – 2nd Ed. 1997 (ISBN 1-56396-538-0).

- [38] – Ian R. Sinclair “Sensor and Transducers: a guid for technicians” HB Newnes – 2nd Ed. 1991 (ISBN 0-7506-0415-8).
- [39] – Jean-Marie Faries e Marcelo Pimenta “ Metodologia de Concepção de Software e Sistemas” , apostila agosto 1994.
- [40] – Paul Harmon “An Introduction to Object-Oriented Modeling”, Popkin Software & Systems, Inc, Livro, 1996-97.
- [41] –James Rumbaugh, Michael Blaha, Willian Premerlani, Frederick Eddy, Willian Lorensen “ Modelagem e Projeto baseado em Objetos”, 8^a edição, editora Campus. 1994.
- [42] – REHFELDT, D. “Assesment of the Caharcteristics of Power Sources for Metal-Active Gas Welding.” Schwei en und Schneidem, v. 38, n5, 1996.
- [43] – Baixo C. e Dutra J. “Influence of power Supply Dynamic Response on Underwater Wet Welding Arc Sability” International Conference on Offshore Mechanics and Artic Enginneering, 17 th OMAE Lisboa, 1998 .
- [44] – Ushio M., Yamamoto H. Nishida Y. and Mita T. “Recent Advances in Welding Power Systems for Automated Welding” Welding in the World IIW/IIS Vol. 34 pp. 185-191 – 1994.
- [45] – Eassa H. E., Cook G. E., Wells A. M. “A High Performance Welding Power Source and its Application” pp. 1241- 1244. 1981.
- [46] – Bet, I. “Fonte de Corrente Constante Realizada a Transistores de Potência, com Forma de Onda do Tipo Retangular, para Soldagem a Arco”, Dissertação de mestrado, UFSC, 1981.
- [47] – Baixo C. e Dutra J. “Desenvolvimento de uma Fonte de Energia Dedicada à Soldagem Submarina” I Workshop da Rede Cooperativa de Pesquisa em Tecnologia Submarina – COPPE/UFRJ 1998.
- [48] – Byrd, T. “Inverter Power Sources : An Efficient Alternative” Weld. J., January 1993 pp. 37-40.
- [49] – D. Farson, C. Conrardy, J. Talkington, K. Baker, T. Kerschbaumer and P. Edwards “Arc Initiation in Gas Metal Arc Welding” Weld. Journal pp. 315s-321s august 1998.