

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROCEDIMENTO COMPUTADORIZADO DE DETERMINAÇÃO, SELEÇÃO
E CONTROLE DE VARIÁVEIS NA SOLDAGEM MIG/MAG

TESE SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

JAIR CARLOS DUTRA

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1989

PROCEDIMENTO COMPUTADORIZADO DE DETERMINAÇÃO, SELEÇÃO
E CONTROLE DE VARIÁVEIS NA SOLDAGEM MIG/MAG

JAIR CARLOS DUTRA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA

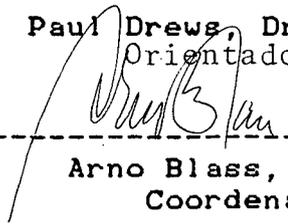
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SÓLIDOS,
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA DA UFSC.



Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.
Orientador



Paul Drews, Dr. Ing.
Orientador



Arno Blass, Ph. D.
Coordenador

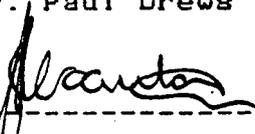
BANCA EXAMINADORA:



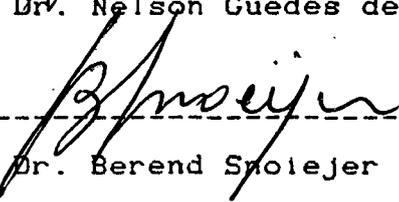
- Prof. Dr. Carlos Alberto Schneider



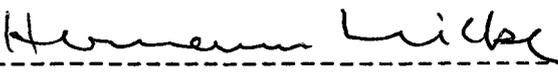
- Prof. Dr. Paul Drews



- Prof. Dr. Nelson Guedes de Alcantara



- Prof. Dr. Berend Spolejer



- Prof. Dr. Hermann Lucke

A

minha esposa, Arlete,
e minhas filhas, Caroline e
Fernanda, pelo carinho e
envolvimento na fase alemã
deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

- Ao povo brasileiro, pelo pagamento de meus salários no período de dois anos, quando cumpri atividades na República Federal da Alemanha.
- Ao DAAD pela concessão da bolsa, passagem e financiamento do curso de alemão.
- Ao CNPq, CAPES, FINEP, CENPES/PETROBRAS e EMC, pelo financiamento de equipamento e mão de obra.
- A toda equipe de colaboradores que trabalharam no projeto SISDATASOLDA.
- A Fundação CERTI, pelo apoio de pessoal.
- A meus pais, pelo contínuo convívio e apoio.
- A AGA S.A., pela cessão gratuita de gases especiais.
- Ao Prof. Dr. Ing. Carlos Alberto Schneider pela orientação.
- Ao Prof. Dr. Ing. Paul Drews pela orientação e viabilização de minha permanência por dois anos na Alemanha, durante os quais foi possível o estudo da língua alemã e a familiarização com técnicas microcomputadorizadas utilizadas no processo de soldagem MIG/MAG.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS	1
1.2 - EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA	7
1.3 - JUSTIFICATIVAS PARA O TRABALHO	9
1.4 - OBJETIVOS	14
2. ANÁLISE DO PROCESSO MIG/MAG	17
2.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS	17
2.2 - FONTES DE ENERGIA PARA O PROCESSO MIG/MAG	19
2.2.1 - Fontes Tiristorizadas	20
2.2.2 - Fontes Transistorizadas	22
2.3 - VARIÁVEIS DE SOLDAGEM EM CORRENTE PULSADA	26
2.4 - CONTUNDÊNCIA DE CONCEITOS E LACUNA TECNOLÓGICA ..	29
2.5 - AUTOMAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG	31
3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA	36
3.1 - ANTECEDENTES	36
3.2 - CRITÉRIOS E CONCEPÇÃO	38
4. MÓDULOS DO SISTEMA	44
4.1 - FONTES DE ENERGIA	44
4.1.1 - Circuito Gerador do Sinal de Referência da Corrente	47
4.2 - ALIMENTADOR DO ARAME	56
4.2.1 - Controle Externo	58
4.3 - DISPOSITIVO DE CONDUÇÃO DA PISTOLA DE SOLDAGEM ..	63
4.4 - INTERFACE MODULAR DE AQUISIÇÃO E CONTROLE	64
4.4.1 - Configuração dos Módulos	65
4.4.2 - Caracterização do "software" utilizado ..	69

5. MEDIDORES DE GRANDEZAS ELETRO-MECÂNICAS	71
5.1 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE E TENSÃO	72
5.2 - DESEMPENHO METROLÓGICO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE ...	75
5.3 - DESEMPENHO METROLÓGICO DA MEDIÇÃO DA TENSÃO	77
5.4 - MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO ARAME-ELETRODO	80
6. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DO ARCO COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO	82
6.1 - INTERPRETAÇÃO DE ESTABILIDADE DE ARCO	82
6.1.1 - Critério dos Soldadores	83
6.1.2 - Critério Proposto	84
6.2 - PROCEDIMENTO COMPUTADORIZADO PARA DETERMINAÇÃO DE ESTABILIDADE DE ARCO	86
6.3 - ESTABILIDADE DE ARCO EM FUNÇÃO DA TENSÃO E DA DI- NÂMICA DA FONTE	92
6.4 - CONSIDERAÇÕES GERAIS DA ANÁLISE	97
7. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE FU- SÃO DOS ELETRODOS	103
7.1 - DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO	104
7.2 - PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS DE CARACTERÍSTICAS DE FUSÃO EM SOLDAGEM COM CONTROLE POR TENSÃO	107
7.3 - PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS DE CARACTERÍSTICAS DE FUSÃO EM SOLDAGEM COM CONTROLE POR CORRENTE	114
7.4 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	117
8. METODOLOGIA DE ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA PARA A DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM COM CORRENTE PUL- SADA	119
8.1 - ALGORÍTMOS PARA ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA POR PROJÉ- TIL EM CORRENTE CONSTANTE	119

8.2 - ALGORÍTMO PARA ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA POR PROJÉ- TIL EM CORRENTE PULSADA.....	125
8.3 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	131
9. ALGORÍTMOS PARA O CONTROLE SINÉRGICO DO PROCESSO MIG/ MAG PULSADO	132
9.1 - CONTROLE SINÉRGICO SINCO	133
9.2 - CONTROLE SINÉRGICO SINVA	135
9.3 - CONTROLE SINÉRGICO SINTE	136
9.4 - CONTROLE SINÉRGICO SINCOEX	138
9.5 - CONTROLE SINÉRGICO NA SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS ..	139
10. CONCLUSÕES	142
BIBLIOGRAFIA	144

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	- Equipamento para soldagem MIG/MAG [1].....	2
Fig. 1.2	- Representação esquemática do extremo de uma pistola de soldagem MIG/MAG [1].....	3
Fig. 1.3	- Ilustração dos diversos modos de transferência metálica [2]	5
Fig. 1.4	- Oscilograma de soldagem com tensão de 23 V, taxa de crescimento da corrente de 92 A/ms, velocidade do arame-eletrodo de 4 m/min, gás cor- gon 18 e arame ER70S-6 de 1 mm	11
Fig. 1.5	- Oscilograma de soldagem com iguais condições da fig. 1.4, exceto na taxa de crescimento da cor- rente que é de 26 A/ms	11
Fig. 1.6	- Diferentes modos de modulação pretendidos do sistema [42]	16
Fig. 2.1	- Representação da corrente pulsada produzida por uma fonte tiristorizada	21
Fig. 2.2	- Diagrama de blocos de uma fonte de energia tran- sistorizada analógica [55].	24
Fig. 2.3	- Diagrama de blocos de uma fonte transistorizada chaveada no secundário [55]	24
Fig. 2.4	- Diagrama de blocos de uma fonte transistorizada chaveada no primário [55]	25
Fig. 2.5	- Corrente pulsada obtida de fontes transistori- zadas com exemplo da dependência entre a fre- quência de pulsação e a velocidade do arame ...	27
Fig. 2.6	- Representação esquemática de uma mesa de três	

	coordenadas com sensor óptico conectado a uma pistola de soldagem MIG [58]	34
Fig. 2.7	- Representação do sistema de procura de junta através do robô em juntas de topo [60]	35
Fig. 2.8	- Representação do sistema de procura de junta através do robô em juntas de ângulo [60]	35
Fig. 3.1	- Funções dos diferentes sistemas utilizados em processos de fabricação (DIN 19226) [57]	39
Fig. 3.2	- Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados, comando e controle de variáveis de soldagem concebido para esta pesquisa	40
Fig. 3.3	- Esquematização das saídas e entradas analógicas da IMAC	41
Fig. 4.1	- Painéis frontais das fontes de energia: a - tioristorizada; b - transistorizada	46
Fig. 4.2	- Diagrama lógico de controle da fonte transistorizada	46
Fig. 4.3	- Sinal do "circuito gerador do sinal de referência de corrente", para nível de corrente de base de 44 A e de pulso 240 A.	48
Fig. 4.4	- Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.3 com ensaio em curto-circuito .	49
Fig. 4.5	- Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.3 em ensaio com carga resistiva.	50
Fig. 4.6	- Oscilograma de soldagem em corrente pulsada utilizando-se o sinal de corrente conforme a fig. 4.3	50
Fig. 4.7	- Oscilogramas de soldagem com corrente pulsada utilizando-se o sinal de controle conforme a	

fig. 4.3	52
Fig. 4.8 - Sinal do circuito gerador do sinal de referência da corrente modificado	53
Fig. 4.9 - Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.8 em ensaio com curto circuito..	53
Fig. 4.10 - Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.8 em ensaio com carga resistiva.	54
Fig. 4.11 - Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.8 em ensaios com soldagem	54
Fig. 4.12 - Oscilogramas de soldagem com corrente pulsada utilizando-se o sinal de controle conforme a fig. 4.8	55
Fig. 4.13 - Alimentador do arame	57
Fig. 4.14 - Diagrama do alimentador do arame; relês K1 e K2 são comandados pelos relês K3 e K4 da IMAC, respectivamente	58
Fig. 4.15 - Diagrama de blocos da concepção inicial do controle externo	59
Fig. 4.16 - Diagrama de blocos do controle externo modificado	61
Fig. 4.17 - Oscilogramas de soldagem com fonte de imposição de corrente e controle externo	62
Fig. 4.18 - Idem fig. 4.17 com tensão média de 28V	62
Fig. 4.19 - Dispositivo de condução da pistola de soldagem	64
Fig. 4.20 - Esquema do conversor do dispositivo de condução da pistola de soldagem	65
Fig. 4.21 - Interface modular de aquisição e controle IMAC	66

Fig. 4.22 - Módulos da IMAC e suas interligações com o sistema	68
Fig. 4.23 - Diagrama de blocos de funcionamento do "Software" implementado na IMAC	69
Fig. 5.1 - Diagrama esquemático do sistema de medição com transdutor não isolado mostrando o caminho de um possível curto-circuito	72
Fig. 5.2 - Diagrama esquemático do sistema de medição utilizando transdutores isolados	74
Fig. 5.3 - Configuração geral do sistema de medição	74
Fig. 5.4 - Configuração do circuito de determinação dos valores eficazes, utilizando o circuito integrado AD536A [70]	75
Fig. 5.5 - Comparação entre o sinal da tensão do arco medido diretamente e medido pelo sensor "Hall" .	79
Fig. 6.1 - Oscilograma de soldagem com tensão de 18 V, taxa de crescimento da corrente 71 A/ms, velocidade do arame de 4 m/min, gás corgon 18 e arame ER70S-6 de 1 mm	84
Fig. 6.2 - Definição dos parâmetros dos oscilogramas	85
Fig. 6.3 - Diagrama de blocos simplificado do programa SOLTE	88
Fig. 6.4 - Oscilograma de uma onda triangular de 200 Hz lida pelo sistema de aquisição a uma frequência de 4206 Hz (opção 1)	89
Fig. 6.5 - Histograma dos picos de corrente conforme o oscilograma da fig. 6.4	90
Fig. 6.6 - Oscilograma de uma onda triangular de 200 Hz lida pelo sistema de aquisição a uma frequên-	

	cia de 13 KHz (opção 2)	91
Fig. 6.7	- Histograma dos picos de corrente conforme o oscilograma da fig. 6.6	91
Fig. 6.8	- Histogramas referentes ao ensaio retratado pelo oscilograma da fig. 6.1; (a) picos de corrente; (b) períodos de transferência; (c) duração da transferência	94
Fig. 6.9	- Histograma dos picos de corrente referente ao ensaio retratado pelo oscilograma da fig. 1.4 ..	96
Fig. 6.10	- Histograma dos picos de corrente referente ao ensaio retratado pelo oscilograma da fig. 1.5 ..	96
Fig. 6.11	- Variação do desvio padrão dos picos de corrente e do valor médio dos mesmos com di/dt em soldagem com tensão de 18 V	98
Fig. 6.12	- Variação do desvio padrão relativo dos picos de corrente com di/dt em soldagem com tensão de 18V	99
Fig. 6.13	- Variação do desvio padrão dos picos de corrente e do valor médio dos mesmos com di/dt em soldagem com tensão de 23 V	100
Fig. 6.14	- Variação do desvio padrão relativo dos picos de corrente em soldagem com tensão de 23V	101
Fig. 6.15	- Variação do desvio padrão dos picos de corrente com a tensão	102
Fig. 7.1	- Diagrama de blocos simplificado do programa ARCOAN	109
Fig. 7.2	- Tabela de dados obtidos com o programa ARCOAN .	111
Fig. 7.3	- Curvas de igual velocidade de arame eletrodo obtidas de ensaio através do programa ARCOAN .	113

Fig. 7.4	- Correlação da velocidade do arame-eletrodo com a corrente obtida pelo programa ARCOAN. Tensão: $U = 0,03 \cdot I + 19$	113
Fig. 7.5	- Diagrama de blocos simplificado do programa FUSAO 1	116
Fig. 7.6	- Função da velocidade do arame-eletrodo com a corrente, determinada com o programa FUSAO 1 ..	117
Fig. 7.7	- Quadro das velocidades de eletrodo medidas e calculadas para três condições de corrente pulsada. (* Dados a partir dos coeficientes α e β calculados dos valores médios de U e I (fig. 7.3); ** Idem, mas a partir de valores eficazes)	118
Fig. 8.1	- Diagrama simplificado dos programas TRASNP.....	122
Fig. 8.2	- Oscilograma da tensão em soldagem com arame ER70S-6 de 1 mm de diâmetro e 220 A	123
Fig. 8.3	- Histograma dos tempos de transferência em soldagem com 210 A	123
Fig. 8.4	- Histograma dos tempos de transferência em soldagem com 220 A	124
Fig. 8.5	- Histograma dos tempos de transferência em soldagem com 230 A	124
Fig. 8.6	- Diagrama de blocos do programa PULSO	127
Fig. 8.7	- Oscilograma de soldagem em corrente pulsada utilizando dados obtidos a partir dos histogramas.	128
Fig. 8.8	- Oscilograma de soldagem em corrente pulsada com os mesmos dados de pulso da fig. 8.7, exceto no diâmetro de gota (dg) e nas variáveis decorrentes disto	129
Fig. 8.9	- Oscilograma de soldagem em corrente pulsada com	

	variáveis de pulso adequadas para diâmetro de gota de 1,2 mm	130
Fig. 9.1	- Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINCO	134
Fig. 9.2	- Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINVA	136
Fig. 9.3	- Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINTE	137
Fig. 9.4	- Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINCOEX	139
Fig. 9.5	- Secção transversal do cordão de solda executado em chapa de 1 mm de espessura com o controle sinérgico SINCO utilizando-se corrente de 45 A	140
Fig. 9.6	- Vista longitudinal do cordão de solda executado em chapa de 1 mm de espessura com o controle sinérgico SINCO, utilizando-se corrente de 45 A	141

SIMBOLOGIA

a	comprimento do arco
A/D	conversor analógico/digital
CC	corrente contínua
CC+	corrente contínua com polaridade inversa (eletrodo no polo positivo)
C5	mistura gasosa de 5% de CO ₂ e 95% de argônio
CPU	designação em inglês de "central processing unit" para unidade central de processamento.
d	diâmetro do arame-eletrodo
D	função critério de destacamento de gota.
D/A	conversor digital-analógico
DM	diâmetro modal de gota.
DP	desvio padrão
DPI	desvio padrão dos picos de corrente
DPIR	desvio padrão relativo dos picos de corrente
dg	diâmetro de gota
f	frequência
I	corrente instantânea
IMAC	interface modular de aquisição e controle
I _{ef} , I _m	corrente eficaz e média respectivamente
I _p , I _b	corrente de pulso e de base respectivamente
K1, K2, K3, K4	relés 1, 2, 3 e 4
l	comprimento do eletrodo
MIG/MAG	designação em inglês de "metal inert gas" e "metal active gas" para o processo de soldagem que utiliza gás inerte e gás ativo, respectivamente,

	como atmosfera do arco voltaico
MPI	média dos picos de corrente
mv, cv	constantes para cálculo da tensão de referência em função da corrente em soldagem com corrente constante
NT	número de períodos
NP	número de picos
p	distância contato-peça (contato-obra)
RTC	relógio temporizador-contador
SRE	saída relé
T	período
t	tempo
tb, tp	tempo de base e de pulso respectivamente
TC	tempo de curto-circuito
TMT	período modal de transferência
TT	tempo total de aquisição
U	tensão
Uef, Um	tensão eficaz e média, respectivamente
Uref	tensão de referência
Up, Ub	tensão de pulso e de base, respectivamente
Uinf	valor da tensão inicial do ensaio
Ua	tensão de arco
Uarm	tensão de armadura
Ucont	tensão de controle
Ureal	tensão real de arco
va	velocidade do arame-eletrodo
vap, vab	velocidade do arame-eletrodo nas fases de pulso e base, respectivamente
VM	volume modal de gota

v_s	velocidade de soldagem
α, β	constantes da equação da velocidade do arame-ele trodo
ϵ	erro

RESUMO**PROCEDIMENTO COMPUTADORIZADO DE DETERMINAÇÃO, SELEÇÃO
E CONTROLE DE VARIÁVEIS NO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG**

O estudo do processo MIG/MAG para a determinação, a seleção e a qualificação de procedimentos de soldagem é realizado de maneira ainda muito empírica em virtude da existência restrita de sistemas computadorizados dedicados e de metodologias adequadas de ensaio. Estes recursos são fundamentais para a aplicação nesse processo, devido ao número muito grande de variáveis e parâmetros envolvidos. Por essa razão, foi realizado o presente trabalho, que inclui o desenvolvimento de um sistema de aquisição e análise de dados, comando e controle de variáveis de soldagem com base nos modernos recursos da eletrônica e da informática. Devido a sua flexibilidade de programação, o sistema pode executar todas as funções citadas, isoladamente ou simultaneamente, em quatro modulações utilizadas para o controle do processo MIG/MAG. Para que isto fosse possível, uma fonte de energia transistorizada foi adaptada, recebendo alguns circuitos adicionais.

Outras adaptações foram feitas para que um mesmo alimentador de arame possa atender a qualquer fonte de energia que vier a ser acoplada ao sistema, podendo comandar a velocidade do arame-eletrodo pelo princípio do controle interno ou do controle externo.

O gerenciamento do sistema é feito através de um micro-computador PC interligado com uma interface modular de aquisição

e controle, que pode também se constituir no segundo microcomputador do sistema, pois possui seu próprio microprocessador e memória RAM para o carregamento de programas em linguagem de máquina, através do PC. A troca de informações entre os dois microcomputadores é feita através de uma tabela criada em memória RAM, onde cada um deles pode escrever e acessar dados.

Especial atenção foi dada aos medidores de grandezas elétricas, onde foram utilizados sensores de efeito Hall, conseguindo-se uma excelente performance de medição, tanto estática, quanto dinâmica. A conversão de todos os sinais das grandezas é feita em 12 bit, oferecendo com isto erros bastante pequenos, e, para a obtenção de eventos rápidos, a conversão é feita em 8 bit, em canal único (corrente ou tensão instantânea) ou multiplexada para 2 canais (corrente e tensão instantâneas).

Este sistema de soldagem se constitui assim em um laboratório de pesquisa, que é ampliado a medida que algoritmos, na forma de programas, forem sendo incorporados ao banco de métodos.

Dentro do escopo do presente trabalho, quatro metodologias foram desenvolvidas e ensaiadas. A primeira delas se refere ao estudo do processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito. Através da aquisição de valores instantâneos de corrente e tensão, que torna possível a construção dos oscilogramas dessas grandezas, elaboram-se histogramas com base na análise algoritmizada. Estes histogramas representam o comportamento dos oscilogramas através de três parâmetros: valor de pico da corrente, tempo entre transferências e tempo de curto-circuito. Foi constatado que o desvio padrão destas grandezas representa um bom indicativo da estabilidade do processo e, por conseguinte pode ser

usado na qualificação de consumíveis, de fontes de energia e para a qualificação de procedimentos adequados de soldagem.

A segunda metodologia desenvolvida tem por finalidade a determinação de funções de relacionamento entre as principais variáveis de soldagem em modulação tensão e em modulação corrente. A versatilidade desta metodologia permite, com um esforço muito pequeno do operador, fazer levantamentos extremamente rápidos em todo o campo de soldagem possível para um determinado eletrodo e gás de proteção.

A terceira metodologia visa a determinação de variáveis adequadas para o controle da soldagem em corrente pulsada. Esta metodologia é dividida em duas partes; a primeira comanda soldagens com corrente constante na faixa da transferência metálica na forma de projétil (spray), faz a aquisição de dados de tensão instantânea e determina, a partir deles, a primeira aproximação das variáveis de pulso. A segunda parte desta metodologia, testa estas últimas com a utilização de um algoritmo computacional combinado com o comando da velocidade do arame-eletrodo pelo circuito de controle externo, localizado no cabeçote de soldagem. Esta metodologia revelou-se adequada aos objetivos propostos.

A quarta metodologia se refere ao controle do processo MIG/MAG em tempo real, especificamente em corrente pulsada. Quatro algoritmos, utilizando princípios diferentes, foram desenvolvidos para minimizar o número de variáveis a serem selecionadas pelo operador. Todos os princípios testados, revelaram uma boa atuação no controle das variáveis. Entretanto, são ainda necessários testes adicionais para que se possa decidir, de forma genérica ou para casos particulares, qual o princípio mais adequado.

ABSTRACT**COMPUTERIZED PROCEDURE FOR THE DETERMINATION, SELECTION AND CONTROL OF VARIABLES IN THE MIG/MAG WELDING PROCESS**

The study of the MIG/MAG process for the determination, selection and qualification of welding procedures is still carried out very empirically, due to the restricted existence of computadorized systems dedicated to, and methodologies adequate to testing. Such resources are vital to application in this process, on account of the large number of variables and parameters involved. For that reason, the present study has been performed, including the development of a data acquisition and analysis system, welding variables command and control based on modern electronic and computer resources. Due to its programming flexibility, the system is capable of performing all of the above mentioned functions, separate or simultaneously, on four modes controlling the MIG/MAG process. To make it possible, a transistor energy source was adapted, receiving a few additional circuits.

Other adaptations have been introduced, so that one same wire feeder can attend to any energy source to be eventually coupled to the system, being in a position to command the wire-electrode speed through the internal or external control principle.

System management is obtained through a PC microcomputer interconnected to an acquisition and control modular interface, which can also become the system second computer, since it

has its own microprocessor and RAM memory for the loading, through the PC, of machine language programs. Data exchange between the two microcomputers is performed through a table built on RAM memory, where each one of the micros is in a position to write and access data.

Special attention was given to electrical quantity meters, for which Hall effect sensors were employed, an excellent, both static and dynamic, measuring performance being achieved. Conversion of all quantity signals is made on 12 bit, thus offering quite small errors and, to obtain fast events, conversion is made on 8 bit, on single channel (instant current or tension) or multiplexed for two channels (instant current and tension).

Thus, this welding system has turned into a research laboratory amplified when algorithms, under the form of software, are incorporated to the method bank.

Within the scope of this work, four methodologies have been developed and tested. The first one refers to the study of the MIG/MAG process with a short-circuit transfer. Through the acquisition of instant tension and current values, which allow for the construction of the oscillograms for such quantities, histograms are drawn up based on algorithmic analysis. Such histograms represent the behaviour of oscillograms through three parameters: current peak value, time between transfers, and short-circuit time. Standard deviation for such quantities was found to represent a good indicator of process stability, being thus in a position to be used for the qualification of consumables, of energy sources, and for the qualification of adequate welding procedures.

The second developed methodology has the purpose of determining relationship functions between the main welding variables for tension modulation and current modulation. The versatility of this method allows, through a slight effort of the operator, to perform extremely fast surveys across all possible welding field for a given electrode and shielding gas.

The third methodology seeks to determine those variables adequate to welding control on pulsed current. This methodology is made up of two parts: the first commands constant current weldings on the metallic transfer band under the form of spray and performs the acquisition of instant tension data through which it establishes the first approximation for the pulso variables. The second part test the later, employing a computational algorithm combined to the command of electrode speed by the external control circuit located on the wire driver. Such methodology proved adequate to the proposed goals.

The fourth methodology refers to the control of the MIG/MAG process on real time, specifically on pulsed current. To minimize the number of variables to be selected by the operator, four algorithms were developed, utilizing different principles. All of the tested principles have shown a good performance on variable control. Nevertheless, further tests are still necessary so as to decide, for general or specific cases, which principle would be the most adequate.

ZUSAMMENFASSUNG

EIN RECHNERGESTEUERTES VERFAHREN FÜR DIE BESTIMMUNG, AUSWAHL UND KONTROLLE DER VARIABLEN BEIM MIG/MAG SCHWEISSPROZESS.

Arbeiten für die Bestimmung, Auswahl und Qualifizierung des Schweissvorgehens beim MIG/MAG - Prozesses werden heute in allgemeinen noch nach empirischen Methoden durchgeführt. Dies ist bedingt durch die eingeschränkte Verfügbarkeit adaptierter Rechnerysteme und geeigneter Versuchsmethodologien. Derartige Hilfsmittel sind eine Grundbedingung für die Anwendung des genannten Schweissprozesses, da die Anzahl der Variablen und der Parameter sehr gross ist. In der vorliegende Arbeit wird die Entwicklung eines Systems zur Datenerfassung, - Speicherung und - Analyse beschrieben, das gleichzeits die Steuerung und Kontrolle der Schweissvariablen, auf der Grundlage moderner Hilfsmittel der Elektronik und Informatik erlaubt. Durch geeignete Programmierung kann das System die genannten Funktionen einzeln oder in ihrer Gesamtheit für Energiequellen in den vier Modulationsarten, die heute zur Kontrolle des MIG/MAG-Prozesses angewandt werden, ausführen. Um die verschiedenen Modulationen zu ermöglichen, wurde eine transistorgesteuerte Energiequelle entsprechend umgebaut.

Weitere Anpassungen wurden vorgenommen, um die gleiche Drahtvorschubeinheit für eine möglichst grosse Zahl von Energiequellen einsetzen zu können, wobei die Geschwindigkeit der Drahtelektrode sowohl durch interne als auch durch externe

Kontrolle gesteuert werden kann. Das gesamte System wird durch einem Mikrorechner von Typ PC gesteuert, der mit einem modularen Interface zur Datenerfassung und Kontrolle verbunden ist. Das Interface kann auch als einem zweiter Mikrorechner des Systems funktionieren, da es einen eigenen Mikroprozessor und RAM-Speicher zur Aufnahme von Programmen in Maschinensprache hat. Der Datenaustausch zwischen den beiden Mikrorechnern basiert sich auf einer Tabelle, die im RAM-Speicher enthalten ist, auf die, beide Rechnern zugreifen koennen.

Besondere Aufmerksamkeit wurde den elektrischen Messeinrichtungen gewidmet. Dabei konnten durch die Verwendung von Hallensoren ausgezeichnete Ergebnisse, sowohl bei statischen als auch dynamischen Messungen erreicht werden. Ein Analog-Digital-Umsetzer mit einer Aufloesung von 12 bit gewaehrleistet geringe Fehler. Zur Messung schneller Vorgaenge wurde eine Aufloesung von 8 bit gewaehlt. Es sind Messungen mit einem Kanal (zeitlichestrom-oder Spannungsverlauefe) oder gemultiplext in zwei Kanalen (zeitlichestrom-und Spannungsverlauefe) moeglich.

Das gesamte entwickelte System ist mit einem Forschungslabor vergleichbar, das durch Softwareentwicklungen leicht fuer Verschiedene Schweißmethoden angepasst oder erweitert werden kann.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden vier Methodologien entwickelt und geprueft. Die erste bezieht sich auf das Studium des MIG/MAG-Prozesses mit Tropfuebergang durch Kurzschluss. Durch Aufnahme des zeitlichestrom-und Spannungsverlaufes, werden auf der Basis verschiedene Algorithmen Histogramme erstellt. Diese Histogramme stellen das Verhalten der Ergebnisse abhaengig von drei Parametern dar. Diese sind der

Spitzenwert des Stromes, die Zeitspanne zwischen den Tropfuebergangen, und die Zeitspanne des Kurzschlusses. Es wurde festgestellt, dass die Standardabweichung dieser Groessen ein gutes Stabilitaetskriterium fuer den Prozess darstellt, und sowohl zur Beurteilung von Energiequellen als auch von Schweißvorgängen benutzt werden kann.

Die zweite entwickelte Methodologie dient zur Bestimmung von Beziehungen zwischen den wichtigsten Schweißvariablen in Spannungs- und Strommodulation. Die Flexibilitaet der angewendeten Methodologie erlaubt es, mit geringen Arbeitsaufwand sehr schnelle Erhebungen im gesamten Feld der moeglichen Schweißparameter fuer verschiedene Elektroden und Schutzgase zu machen.

Die dritte Methodologie zielt auf die Bestimmung der geeignetsten Variablen zur Kontrolle des Schweißprozesses mit Pulsstrom hin. Es wird in zwei Schritten vorgegangen. Zuerst werden beim Schweißprozess mit konstantem Strom und projektilen Tropfuebergang (Spruehlichtbogen) die zeitlichen Spannungsverlaufe ermittelt und daraus in erster Annaeherung die Pulsvariablen bestimmt. Im zweiten Schritt werden die gewonnenen Ergebnisse unter Anwendung eines Rechneralgorithmus, der die Regelung der Drahtvorschubgeschwindigkeit durch den aesseren Regelkreis in der Drahtvorschubeinheit beeinflusst, geprueft.

Die vierte Methodologie bezieht sich auf die Kontrolle des MIG/MAG-Prozesses in Echtzeit mit Pulsstrom. Es wurden vier Algorithmen, unter der Annahme verschiedener Voraussetzungen zur Kontrolle entwickelt, mit dem Ziel, die Anzahl der vom Bediener auszuwaehlenden Variablen zu vermindern. Alle ueberprueftete Algorithmen erwiesen eine gute Anwendbarkeit bei der Kontrolle

der Prozess-Variablen. Es sind jedoch noch zusaetzliche Versuche noetig, um generell oder im Einzelfall, entscheiden zu koennen, welcher Algorithmen der geeignetste ist.

PRINCIPAIS FINANCIADORES DESTE TRABALHO

- CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO -
CNPq.
- COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE ENSINO SUPERIOR -
CAPES.
- SERVIÇO ALEMÃO DE INTERCÂMBIO ACADÊMICO - DAAD.
- DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UFSC - EMC.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC.
- CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO "LEOPOLDO A. MIGUEZ DE
MELLO" DA PETROBRAS - CENPES -, ATRAVÉS DO SERVIÇO DE DESENVOL-
VIMENTO DE RECURSOS HUMANOS - SEDES.
- O AUTOR.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação com crescente participação na manufatura desde os anos 30. Ela se diversifica em um grande número de técnicas, utilizando uma variedade de princípios, o que, em consequência, exige dos profissionais do ramo um conhecimento interdisciplinar que principalmente envolve a metalurgia, a física, a eletrônica e a mecânica.

A maioria dos trabalhos de pesquisa desenvolvidos têm sido relativos a metalurgia com seus envolvimento nas propriedades mecânicas da junta soldada. A pesquisa que trata o presente trabalho, enfoca assuntos relacionados com a física e automação, cujos efeitos atuam relevantemente nas propriedades metalúrgicas e mecânicas da união soldada. O trabalho se desenvolve restrito a um dos processos de soldagem a arco, convencionalmente designado como MIG/MAG.

1.1 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O processo de soldagem a arco com eletrodo consumível e contínuo, que utiliza gases especiais para a formação da atmosfera ionizante e para a proteção do metal fundido, é designado genericamente de MIG/MAG. A sigla MIG - Metal Inert Gas - designa a versão do processo em que o gás utilizado é inerte, ou seja,

quando o mesmo for argônio e/ou hélio. Quando o gás utilizado possuir componentes ativos, como oxigênio e nitrogênio, ou quando ele se decompõe em gases ativos, como é o caso do CO₂, gerando monóxido de carbono e oxigênio, o processo toma o nome de MAG (Metal Active Gas).

Ambas as versões utilizam o mesmo equipamento (fig. 1.1), que é fundamentalmente composto de uma fonte de energia de corrente contínua com capacidade máxima aproximada de 400 A, um alimentador de arame-eletrodo, uma pistola (tocha) de soldagem e um sistema de suprimento de gás.

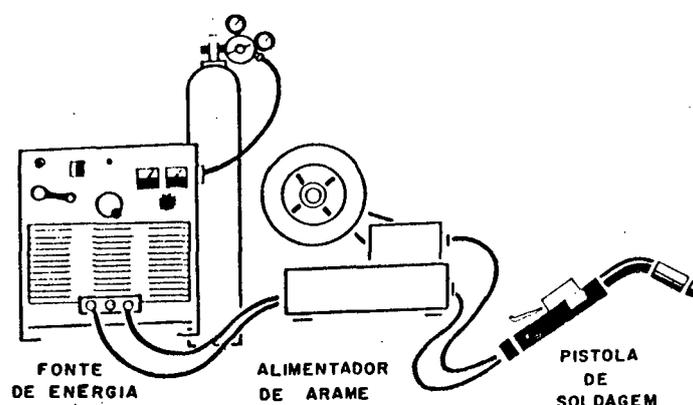


Fig. 1.1 - Equipamento para soldagem MIG/MAG [1].

As fontes de energia, tradicionalmente usadas, são do tipo tensão constante, porém, em versões mais modernas do processo, já são utilizadas as de corrente constante.

O alimentador do arame, que é o responsável pelo controle da velocidade do arame-eletrodo em direção à peça, deve ter um projeto eletro-mecânico compatível com a qualidade requerida da solda, o que, por sua vez, é dependente também da natureza do metal do arame-eletrodo. Arames mais macios, como os de alumínio,

têm grande dificuldade de fluir através dos roletes impulsioneiros, bicos de alimentação, e bico de contato, sem serem amassados e enrolados.

Devido aos mesmos fatores, a pistola de soldagem (fig. 1.2) deve ter um projeto adequado, principalmente no que tange ao bico de contato, pois o mesmo, deve permitir uma livre movimentação do arame e ao mesmo tempo, transferir a corrente de soldagem. Além disso, ele deve ter forma e dimensões compatíveis com o bocal de gás para propiciar um fluxo adequado deste último.

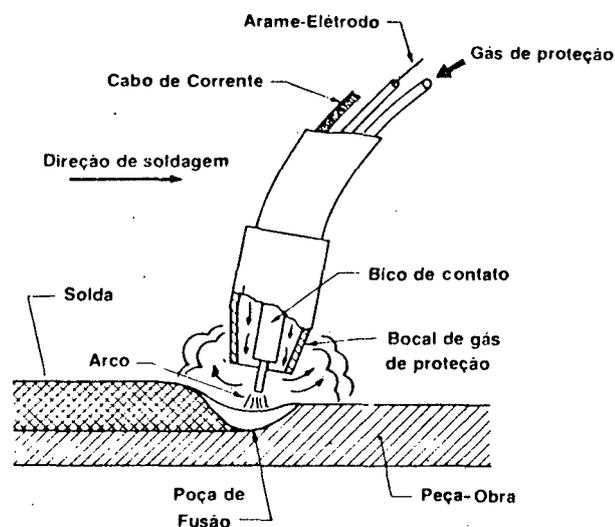


Fig. 1.2 - Representação esquemática do extremo de uma pistola de soldagem MIG/MAG [1].

A transferência metálica do eletrodo para a peça tem no processo MIG/MAG, como em outros processos a arco com eletrodos consumíveis, formas diversas.

A obtenção de um ou outro tipo é dependente dos parâmetros e variáveis utilizados, que resultam em forças atuantes nas gotas formadas no extremo do eletrodo. Estas forças têm as

mais diferentes origens, assumindo maior ou menor importância em dependência do nível de energia utilizado. Pode-se dividi-las em cinco categorias: força gravitacional, tensão superficial da gota e da poça líquida, força de origem eletromagnética (efeito "pinch"), força aerodinâmica provocada pelo fluxo do plasma e dos vapores metálicos e as forças oriundas das microexplosões provocadas por gases e vapores oriundos de reações químicas ou pela vaporização que ocorre devido ao superaquecimento do metal. Além dessas forças de origem intrínseca aos processos, se pode ter ainda forças devido a campos magnéticos externos e devido a atuações mecânicas sobre o eletrodo.

Todas estas forças já foram razoavelmente estudadas por vários pesquisadores, que obtiveram resultados, que são, de maneira organizada, tratados no livro de Schellhase [2].

Do balanço destas forças e da natureza do processo de soldagem, pode-se ter, segundo classificações propostas pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW) [3, 4, 5], três categorias de transferência: com curto-circuito, sem curto-circuito e transferência guiada por escória.

Os dois primeiros tipos de transferência são ainda subdivididos em categorias particulares, que ocorrem como função do nível de energia utilizado e do tipo de proteção. A figura 1.3 ilustra esta classificação.

A transferência globular ocorre em baixas densidades de corrente e é predominantemente influenciada pela aceleração da gravidade e pela tensão superficial, além de uma pequena influência da força de arraste do plasma. As gotas possuem normalmente diâmetros bem superiores ao do eletrodo e a frequência de transferência é relativamente pequena.

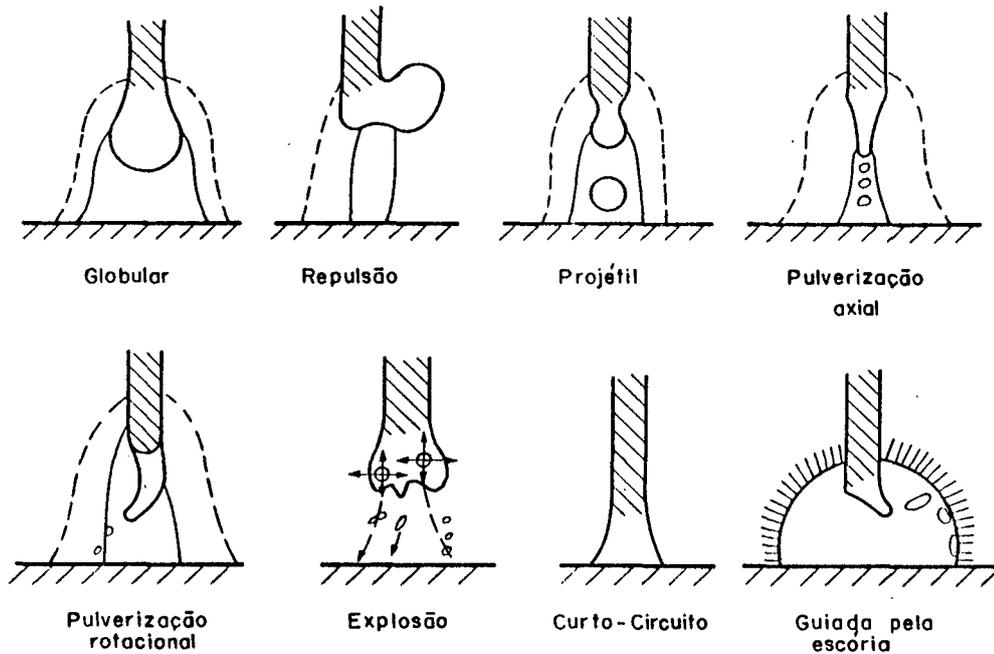


Fig. 1.3 - Ilustração dos diversos modos de transferência metálica [2].

Na transferência por repulsão ocorre uma alta contração do arco, o que acontece com gases de alta condutibilidade térmica, como por exemplo, em gases moleculares de alta energia de dissociação. O arco se estrangula no contato com o eletrodo provocando assim uma intensa vaporização com a formação de um núcleo brilhante claro de vapor metálico, cuja densidade é muito maior que o restante do plasma. Este núcleo exerce uma pressão concentrada sobre a poça de fusão e gota, que resulta num aumento da penetração. A gota é pressionada fortemente, sendo desviada lateralmente. Dependendo do comprimento do arco, pode haver curto-circuito entre gota e poça de fusão.

A transferência por projétil é identificada pela ocorrência de gotas com diâmetro próximo ao do eletrodo. Esta forma de transferência exige que o eletrodo seja suficientemente envolvido pelo plasma e, por isso, torna-se necessário a utilização de

gases com pequena condutibilidade térmica.

A transferência por pulverização axial (conhecida tradicionalmente pela designação "spray") se caracteriza pela formação de uma sequência contínua de finíssimas gotas que se desprendem axialmente do eletrodo. Se caracteriza também pela ponta cônica do eletrodo e pela forma trapezoidal do plasma, que tem um núcleo perfeitamente identificado constituído de vapores metálicos.

A transferência por pulverização rotacional ocorre quando se tem densidades de corrente bem superiores as que ocorrem na transferência por pulverização axial, e também é necessário que se tenha comprimentos grandes de eletrodo. Nestas condições, o extremo do eletrodo sofre um superaquecimento, perdendo resistência mecânica. A ação do campo eletromagnético gera um efeito torsional fazendo com que as gotas sejam transferidas na direção radial ao eixo do arco.

A transferência por explosão resulta da formação de pequenas bolhas de gás no interior da gota, que ao explodirem, geram um número bastante grande de pequenas gotas de tamanho variável. Este tipo de transferência é característico de determinados tipos de eletrodos revestidos.

Na transferência por curto-circuito, a mais comumente utilizada no processo MIG/MAG, cada gota se transfere por ocasião do estabelecimento de um contato físico desta com a poça líquida. As principais forças atuantes neste tipo de transferência são a gravidade, a tensão superficial e, no caso da utilização de fontes de tensão constante, uma forte contribuição do efeito "pinch".

A tensão superficial, que antes do curto-circuito agia somente em sentido contrário à transferência, passa, durante o estabelecimento do contato físico, a atuar favoravelmente a ela. As condições para se ter este tipo de transferência são uma relativa baixa corrente, associada a um pequeno comprimento do arco (baixa tensão). Entretanto, para o CO₂ e misturas ricas do mesmo, até para correntes elevadas se terá transferência por curto-circuito, associada às características da transferência repulsiva.

A transferência guiada pela escória é característica dos processos a arco submerso, soldagem manual com eletrodo de revestimento espesso e eletrodos tubulares. Em razão do contato físico da ponta fundida do eletrodo com uma escória fluída, das reações metalúrgicas e da dinâmica fluídica entre metal fundido e escória, obtém-se diferentes formas de transferência metálica. No processo a arco submerso forma-se uma caverna entre o eletrodo e a poça de fusão, onde o arco se estabelece. Na maioria dos casos, se observa uma espécie de repulsão de gotas, que são conduzidas até as paredes da caverna e daí à poça de fusão.

1.2 - EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

O processo MIG surgiu no ano de 1948 [6], quando o processo TIG, que usava também argônio, já podia ser considerado um processo industrial. O MIG logo teve uma boa aceitação na soldagem de chapas grossas de alumínio, onde o TIG oferecia uma baixa produção. Na época, o processo também foi testado na soldagem de

aços, mas o alto custo do argônio não permitiu logo o seu uso industrial.

Em 1953 surgiu o processo MAG com a utilização de CO₂. Entretanto, como os arames utilizados na época, possuíam diâmetros muito grandes, só se obtinha uma razoável estabilidade do processo em correntes muito altas, resultando em grande dificuldade de aplicação. Este fato conduziu à produção de arames mais finos e à fabricação de fontes de energia com melhores características, possibilitando a soldagem com transferência por curto-circuito com razoável estabilidade.

No princípio dos anos 60, quando o custo do argônio já se tornava mais acessível, o seu uso com pequenas adições de oxigênio, viabilizou a soldagem dos aços com transferência por "spray"

Concomitantemente a estes desenvolvimentos, se trabalhava na elaboração do arame tubular na tentativa de se melhorar a proteção da solda e do metal em transferência quando da soldagem em canteiros expostos, pois a geração localizada dos gases na ponta do eletrodo, juntamente com um pouco de escória, melhora a proteção.

Por volta de 1965, surgiu a aplicação da corrente pulsada como uma maneira de se conseguir a dita transferência por "spray" em correntes médias mais baixas do que a necessária em corrente convencional.

Hoje, os principais desenvolvimentos do processo MIG/MAG estão quase que exclusivamente ligados a novas técnicas de controle, para melhorar a sua performance, e para sua aplicação em sistemas automatizados de soldagem. Devido a isto é que fontes de energia com controles transistorizados e tiristorizados

são cada vez mais aplicados [7, 8, 9, 10].

Em sistemas totalmente automáticos com uso de robô, o processo MIG/MAG é o que vem mais crescendo em utilização devido suas características de produção e alta flexibilidade, principalmente no que tange à posições de soldagem. Estima-se que na Europa e Estados Unidos o processo MIG/MAG já consome mais de 54% de todo o arame de adição para soldagem, incluindo o arame tubular, que na Europa ocupa a cifra de utilização de 3% e nos Estados Unidos de 18% [6]. No Brasil, estas cifras são desconhecidas. Sabe-se entretanto que o uso do processo MIG/MAG é bem mais restrito, estimando-se um consumo de arame de cerca de 20% do total [11].

1.3 - JUSTIFICATIVAS PARA O TRABALHO

Incomparavelmente ao processo manual com eletrodos revestidos, o processo MIG/MAG pode funcionar, aparentemente bem, numa ampla faixa de regulagem de variáveis. É isto que torna o processo, muitas vezes, mais vulnerável à falhas do que o eletrodo revestido, pois este se caracteriza muito mais pelo atrelamento das grandezas elétricas às características do eletrodo, sem haver muitas possibilidades de regulagens diferentes. Em se considerando, entretanto, só o processo MIG/MAG convencional, existe um sem número de variáveis e parâmetros que influenciam o processo, mas cujas influências não são perfeitamente determinadas. Assim, por exemplo, para um mesmo conjunto tensão-corrente e

velocidade de soldagem, que determina uma energia de soldagem, sendo normalmente o que é especificado pelos metalurgistas, existe a possibilidade de se obter soldas com as mais variadas características, bastando atuar sobre os seguintes parâmetros: diâmetro do eletrodo, gás de proteção, distância contato-obra (que influi diretamente no comprimento do eletrodo e no comprimento do arco), inclinação da pistola, posição de soldagem, polaridade e comportamento dinâmico (indutância). A influência destes sobre as propriedades da solda pode ser de maior ou menor importância, dependendo da faixa de energia utilizada. O comportamento dinâmico, por exemplo, tem influência marcante em soldagem com transferência por curto-circuito [12] (baixo nível energético) como se pode constatar pelos oscilogramas das figs. 1.4 e 1.5, que representam soldagens em que a única diferença de regulagem foi a indutância da fonte. Para analisar o processo com este tipo de transferência de maneira científica diversos trabalhos [13, 14, 15] têm dado um tratamento algoritmizado a estes oscilogramas na tentativa de obter índices de estabilidade. Todavia, isto ainda não tem sido alcançado satisfatoriamente, necessitando-se de muitas pesquisas para o correlacionamento destes índices com as propriedades resultantes da solda.

Na faixa da transferência metálica por projétil pulverização axial, onde já se precisa de alta energia, a indutância praticamente não tem influência, pois, a natureza da transferência metálica não impõe variações bruscas na tensão e, por conseguinte, tão pouco na corrente. Entretanto, o estudo deste tipo de transferência é importante para se analisar efeitos dos gases [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], de constituintes dos

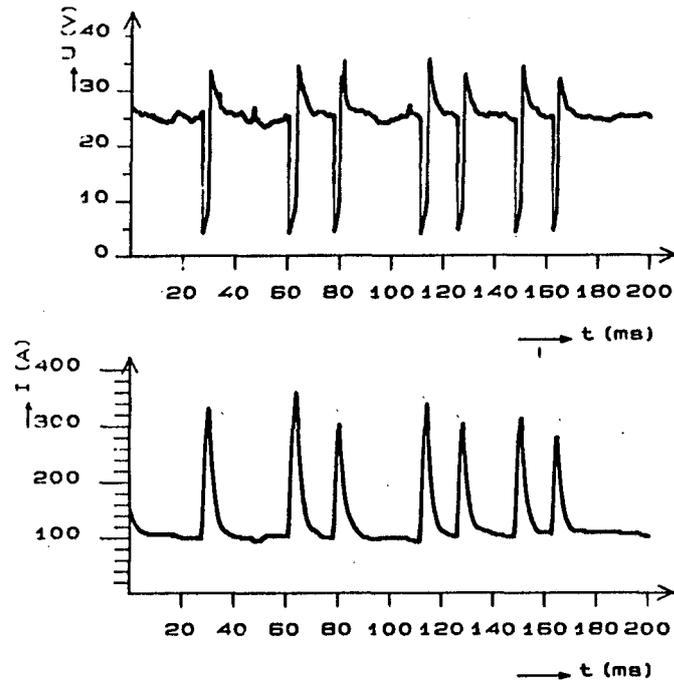


Fig. 1.4 - Oscilograma de soldagem com tensão de 23 V, taxa de crescimento da corrente de 92 A/ms, velocidade do arame-eletrodo de 4 m/min, gás corgon 18 e arame ER70S-6 de 1mm.

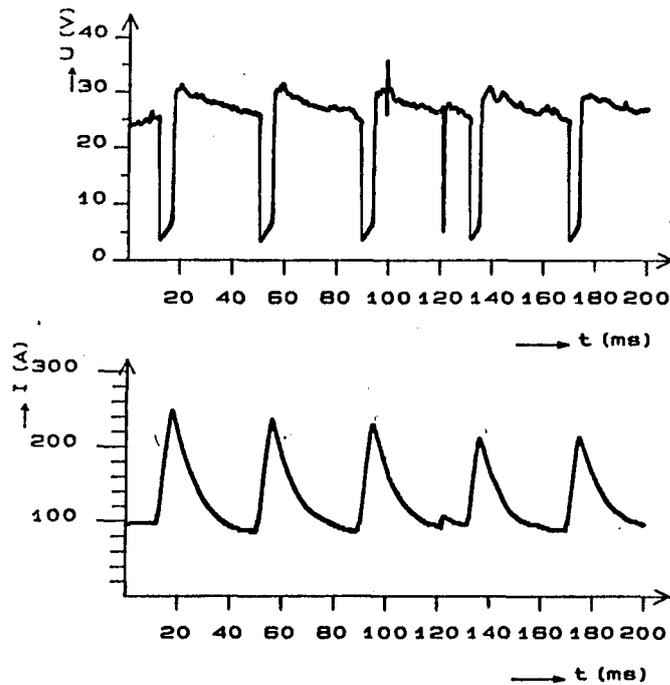


Fig. 1.5 - Oscilograma de soldagem com iguais condições ao da fig. 1.4, exceto na taxa de crescimento da corrente que é de 26 A/ms.

arames-eletrodos [26] e para se obter subsídios para a determinação das variáveis de pulso em corrente pulsada [27, 28, 29, 30, 31].

O gás, segundo sua natureza e composição, tem uma influência preponderante nas características do arco, no tipo de transferência do metal, na estabilidade do arco e, em consequência, na salpicagem, na molhabilidade do metal de adição, na temperatura da poça líquida e numa série de características mecânico-metalúrgicas.

A influência do diâmetro do eletrodo e da distância contato-peça se faz predominantemente sentir sobre as características de fusão do eletrodo e em consequência, na geometria da solda [1, 32].

Além da influência dos parâmetros citados, se tem a principal atuação, que é a das variáveis corrente, tensão e velocidade de soldagem, cada uma delas desempenhando ações igualmente importantes.

Em se tratando do processo MIG pulsado, novas variáveis aparecem, dificultando bem mais a análise e seleção das mesmas. É que neste caso, as variáveis tensão e corrente se desdobram em seus valores de pulso e de base com seus respectivos tempos de atuação. Além disso, existem vários princípios para o controle da corrente pulsada: por imposição da corrente, por controle da tensão ou pelas duas combinadas.

Dada essa gama imensa de variáveis e parâmetros e a quase inexistência de sistemas dedicados de medição, de comando e de controle, bem como, a escassez, ou, para determinados casos, a inexistência de algoritmos para tratamento de dados, a determinação de procedimentos de soldagem tem um caráter elevado de im-

provisto e/ou empírico. Estes fatos contribuem desfavoravelmente para uma aplicação mais generalizada do processo MIG/MAG.

Os problemas ainda se acentuam em razão de que existem, na literatura, informações divergentes. Como exemplo, citam-se os trabalhos de Essers [33] e Zhiming [34], que propõem diferentemente as situações de leitura do comprimento real do arco em soldagem com corrente pulsada. O primeiro afirma que o valor de tensão representativo do comprimento do arco seria aquele medido na fase de pulso. Sua tese é apoiada na seguinte justificativa: em observações feitas com filmagens em alta velocidade foi constatado que a conexão do arco com a peça é realizada através de várias manchas catódicas que se localizam preferencialmente na zona de transição entre a poça líquida e o metal ainda sólido. Tal fato é justificado em razão de que o metal ainda sólido, estando revestido pela camada de óxido, tem uma menor função de trabalho termoiônico do que o metal puro. Na fase de base, entretanto, o número dessas manchas é pequeno e mudam rapidamente de posição. Nestas condições, a leitura da tensão, que seria indicativa do comprimento do arco, varia em até 3 V. Já na fase de pulso, o número de manchas catódicas é bastante maior e, embora mudem de posição, a tensão produzida é bastante representativa da média, não se obtendo variações como na fase de base.

Já Zhiming propõe como valor indicativo do comprimento do arco, a tensão lida na fase de base. Suas justificativas se baseiam em outros fundamentos. Ele diz que, como na fase de base se tem uma corrente muito baixa, as possíveis variações de resistência elétrica no comprimento do eletrodo, nos cabos condutores e no bico de contato pouco influenciam a leitura da tensão de base e por isso, esta é a que melhor representa o comprimento do

arco.

Outras divergências na literatura são notórias, como as proposições do instante em que cada gota deve se desprender do eletrodo e, do diâmetro de gota mais adequado em soldagem com corrente pulsada.

Estes fatos atestam a necessidade de realização de pesquisas e experimentos próprios para se assegurar um conhecimento básico bastante fundamentado e sólido a fim de que sobre ele se consolide de maneira adequada o desenvolvimento da pesquisa aplicada. Para tanto, é necessário que se disponha de uma adequada bancada de testes com as facilidades que hoje são oferecidas pela eletrônica e pela informática.

1.4 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a criação de um sistema de aquisição e análise de dados, comando e controle de variáveis de soldagem com base nos modernos recursos da eletrônica e da informática. O sistema deve proporcionar um alto grau de automatismo para a realização de pesquisas científicas em tempos muito mais curtos do que com instrumentação convencional [35, 36].

Para ter uma abrangência bastante ampla em termos de controle do processo MIG/MAG, o sistema deve:

- a) Soldar pelo método clássico, que utiliza fontes do tipo tensão constante, onde se obtém um auto-contro-

le do comprimento do arco [1].

- b) Soldar com corrente imposta, onde será necessário a utilização de controles analógicos [37, 38, 39] e/ou controles microprocessados para controlar a velocidade do arame-eletrodo em consonância com um comprimento de arco pretendido [40, 41].
- c) Soldar com corrente pulsada nas quatro modulações apresentadas na fig. 1.6 [42,43, 44]. Na primeira, a fonte é regulada para funcionar em duas características estáticas de tensão constante, saltando de uma a outra em intervalos de tempo reguláveis. Nesta situação, para caracterizar a atuação direta da fonte sobre a tensão, a representação desta no oscilograma é feita com traços retos e a representação da corrente com traços irregulares para caracterizar que ela é uma variável dependente. Na segunda modulação se tem é a imposição da corrente em dois níveis, sendo a tensão agora, a variável dependente. Nas duas últimas modulações se tem situações compostas das duas primeiras, ora a fonte controla a tensão, ora controla a corrente. Em todas as modulações, o sistema deve permitir o ajuste contínuo de todas as quatro variáveis envolvidas: corrente ou tensão de pulso, tempo de pulso, corrente ou tensão de base e tempo de base.

Em aquisição de dados, o sistema deverá ter características bastante abrangentes. Ele deverá ter a capacidade de medir durante a soldagem, os valores instantâneos, médios e eficazes da corrente e da tensão. Para tanto, um sub-sistema de medição deve

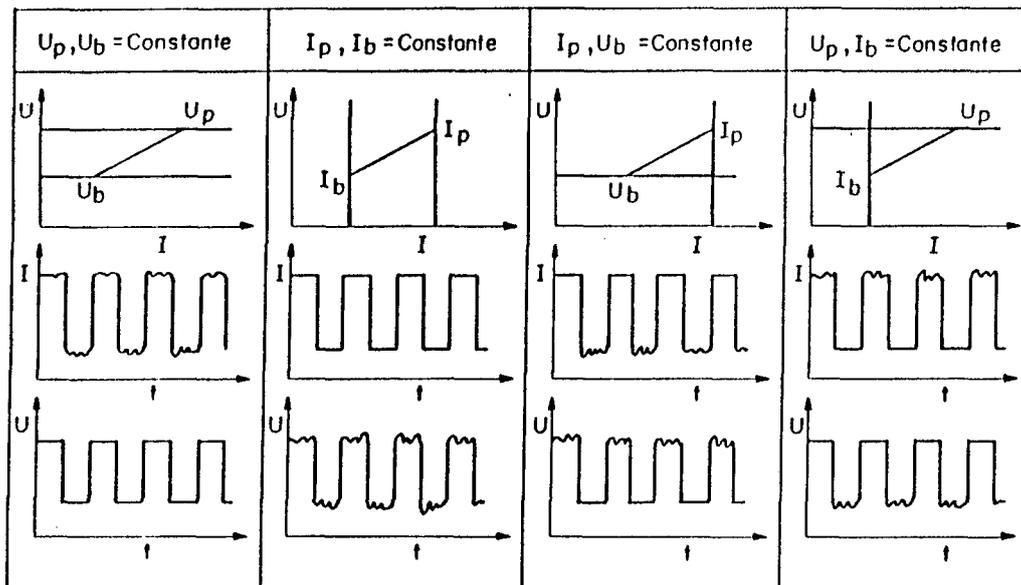


Fig. 1.6 - Diferentes modos de modulação pretendidos do sistema [42].

rá ser convenientemente projetado para executar este objetivo com erros minimizados. Além disso, a conversão dos sinais analógicos de corrente e tensão instantâneas deverá ser feita a velocidades que permitam a reprodução adequada dos oscilogramas dessas grandezas.

Como finalização desse trabalho, visando comprovar a eficácia de atuação do sistema em toda sua potencialidade, foi estabelecido a implantação e teste de metodologias de estudo e controle do processo. Nas metodologias de estudo se inserem a análise de transferência metálica com e sem curto-circuito para se determinar procedimentos adequados de soldagem. Nas metodologias de controle, ficou decidido que se trabalharia em corrente pulsada, visando automatizar a seleção de variáveis.

2. ANÁLISE DO PROCESSO MIG/MAG

O presente capítulo tem como objetivo fazer um breve resumo do estado da arte no processo MIG/MAG, abordando os assuntos mais relevantes a esse trabalho, ressaltando conceitos que serão utilizados em capítulos posteriores.

2.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS

O processo MIG/MAG utiliza no sistema tradicional fontes de energia CC que trabalham com controle de tensão. Isto equivale a dizer que o que se pode regular na fonte de energia é a tensão, sendo a corrente uma variável dependente, prioritariamente, da velocidade de avanço do eletrodo. Em assim sendo, todos os conhecimentos que se tem a respeito dos valores de corrente para obtenção de uma determinada característica de solda ficam restritos de serem usados, a menos que se disponha de gráficos, ábacos ou equações com os relacionamentos entre velocidade de avanço do arame, corrente e tensão. Para tanto, vários trabalhos têm sido desenvolvidos para atender a esta necessidade, como os que propõem [45, 46] fórmulas do tipo

$$v_a = \alpha \cdot I + \beta \cdot I^2 \quad (2.1)$$

onde v é a velocidade do eletrodo, e l o comprimento do eletrodo. α e β são constantes que dependem fundamentalmente do material e diâmetro do arame-eletrodo.

Outro relacionamento que tem sido feito é o da tensão com a corrente para um dado comprimento do arco (característica estática de arco) [1, 42, 47, 48], que é fundamentalmente importante para determinados sistemas de controle [49, 50, 51].

Todos esses relacionamentos são quase sempre particulares, valendo somente nas condições de realização dos ensaios. Uma dificuldade adicional à generalizações de conclusões é o número bastante grande de variáveis influentes do processo e, uma mostra disso são os exemplos apresentados nas figs. 1.3 e 1.4. Não obstante, o processo funciona em amplas faixas de regulação sem chamar a atenção de operadores menos qualificados para os problemas citados, em virtude da chamada auto-regulação [47], que existe quando se solda com controle de tensão, como é o caso do sistema clássico utilizado.

Este sistema utiliza um princípio de regulação, tradicionalmente denominado de controle interno. Nele, a velocidade média de fusão do eletrodo se equilibra com a velocidade de mergulho do mesmo, porque as correntes média e eficaz acompanham esta última. Quando a velocidade do arame-eletrodo aumenta, o número de curtos-circuitos, mostrados pelas figs. 1.3 e 1.4, aumenta e, com isso, também aqueles valores de corrente. Se a transferência metálica não se efetuar por curto-circuito, o equilíbrio também acontece em virtude da alteração do comprimento do arco com a modificação da velocidade do arame-eletrodo. A medida em que esta velocidade cresce, o comprimento do arco diminui, diminuindo a impedância total do circuito e, com isso, aumentando a corrente

para assim fundir mais material.

Na faixa da transferência metálica por curto-circuito se consegue um controle da mesma de maneira bastante limitada, principalmente pelas limitações de projeto da fonte de energia. Isto conduz a suscetibilidade de falhas de fusão e uma intensa salpicagem, o que leva a restrição do processo em fabricação de alta qualidade, como em vasos de pressão.

Na transferência por projétil e por pulverização [2], uma corrente mínima relativamente alta é necessária (corrente de transição), o que produz um arco muito penetrante, que não pode ser usado para chapas finas e também para posições de soldagem onde fica difícil a sustentação da poça líquida.

Para resolver estes problemas, foi desenvolvido em 1960 o processo MIG pulsado, mas para se obter um adequado controle do processo foi necessário se implementar a velocidade de resposta, a precisão e a controlabilidade das fontes de energia. Por esta razão foram desenvolvidas as fontes eletrônicas.

2.2 - FONTES DE ENERGIA PARA O PROCESSO MIG/MAG

De acordo com a forma da característica estática de arco deste processo, que apresenta tensões crescentes para correntes crescentes, pode-se, além da utilização de fontes de tensão constante, como descrito no item anterior, utilizar fontes do tipo corrente constante [47, 52]. No entanto, precisa-se agora de um circuito externo para regular a velocidade de arame em compa-

tibilidade com a corrente e o comprimento do arco, a menos que se tenha previamente a função que relaciona a corrente com a velocidade de avanço do arame.

Outra característica que deve ser considerada na seleção de fontes é o seu comportamento ante a solicitações dinâmicas, isto é, o comportamento que retrata a velocidade de resposta da fonte de energia quando ocorre um evento no arco que não pode ser considerado como independente do tempo. Este comportamento é normalmente modificado quando se altera o valor da indutância da fonte de energia ou, em fontes eletrônicas, quando se altera o tempo de resposta do circuito de controle dos tiristores e/ou transistores. Esta é uma característica, como já foi mencionado anteriormente, altamente importante para a estabilidade de arco, pois, os fenômenos que ocorrem neste, não são suficientemente lentos para que somente a característica estática seja considerada. Assim, para se selecionar uma fonte, faz-se necessário observar o que ocorre com a tensão e a corrente quando a mesma é submetida a, por exemplo, um curto-circuito.

2.2.1 - Fontes Tiristorizadas

As fontes de energia tiristorizadas vieram ao mercado no fim dos anos 60 trazendo grande impulso à soldagem MIG/MAG. Com elas se tornou possível o controle da energia entregue ao arco de maneira totalmente eletrônica, o que possibilitou a introdução da chamada corrente pulsada (fig. 2.1).

Aqui o fornecimento de energia se processa em dois níveis; uma corrente de base relativamente baixa e uma corrente pulsante superposta. A corrente de base é de intensidade menor que a corrente de transição curto-circuito/projétil, enquanto que a amplitude dos pulsos deve ser ajustada de modo a sobrepujar a corrente de transição para que a cada impulso uma gota seja transferida do eletrodo à peça.

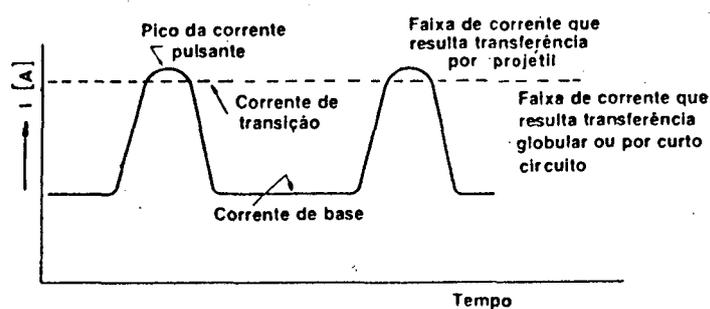


Fig. 2.1 - Representação da corrente pulsada produzida por uma fonte tiristorizada.

Para que esta exigência seja cumprida, os pulsos devem satisfazer a certas características relativas a sua forma. Estas fontes o fazem proporcionando frequência de pulsação em dependência com a frequência da rede de energia [53]. Por exemplo, para uma frequência de rede de 60 Hz, se obtém uma frequência de pulsação de 30, 40, 60 e 120 Hz. A desvantagem destas fontes de energia reside então, primeiramente na possibilidade de se ter somente frequências fixas, o que impossibilita sua utilização no controle sinérgico em corrente pulsada e, além disso, na relativa inércia de resposta da estrutura e na duração dos pulsos que é fixa (6 a 8 ms).

2.2.2 - Fontes Transistorizadas

Estas fontes de energia, que inicialmente foram projetadas em malha aberta e, posteriormente, as de malha fechada, representaram um passo a frente para a soldagem MIG/MAG. Com isto, se atingiu não somente a possibilidade da soldagem com a técnica da pulsação com quase nenhuma salpicagem em aços não ligados e de baixa liga, mas também se melhorou todo transcurso da operação de soldagem, desde uma maior facilidade de acendimento do arco, até o preenchimento de cratera, passando pela possibilidade de rápida realimentação dos controles. Até o presente momento, ainda não são conhecidas todas as possibilidades destas fontes e, por isso, são ainda motivo de exaustivos estudos.

Para a seleção da fonte de energia transistorizada mais adequada deve-se considerar três tipos básicos [54, 55] hoje existentes que se diferenciam basicamente no tipo da unidade de potência: fontes analógicas, as chaveadas no secundário e as chaveadas no primário. Relativamente à unidade de potência pode-se resumir suas propriedades:

- a) Analógicas - o mais curto tempo de reação (30 a 50 μ s), bom fator de potência, eletrônica menos complicada, com rendimento fortemente dependente da faixa de trabalho (65 a 75%), peso idêntico às fontes convencionais.
- b) Chaveadas no secundário - longo tempo de reação (300 a 500 μ s), comando eletrônico um pouco mais complicado que as analógicas, rendimento entre 75 e 85%, peso idêntico às fontes convencionais.

- c) Chaveadas no primário - longo tempo de reação (300 a 500 μ s), comando eletrônico bem mais complicado que as analógicas, rendimento entre 75 a 85%, peso 30% menor.

Uma fonte de energia transistorizada analógica apresenta uma construção parecida com as fontes retificadoras convencionais (fig. 2.2). O transformador no entanto, não possui nenhuma regulagem para o controle da energia de soldagem. Depois da ponte de diodos segue uma cascata de transistores, que funcionam na região linear de trabalho, como nos amplificadores de baixa potência. Com isso, é possível uma regulagem contínua e rápida das variáveis de soldagem. A diferença entre a energia de entrada e a de saída tem de ser dissipada pelos transistores na forma de calor. Por isso, os transistores são montados sobre uma placa que é refrigerada através de serpentinas. Com este tipo de fonte de energia é possível se obter um arco voltaico pulsado em qualquer frequência e qualquer tipo de onda.

As fontes transistorizadas chaveadas no secundário (fig. 2.3) possuem transformador e retificador do mesmo modo que as fontes analógicas. No entanto, a tensão (corrente) aqui produzida é regulada através do princípio do chaveamento dos transistores (1 até 20 kHz). Uma mudança dos tempos em que os transistores ficam chaveados e não chaveados produz uma mudança na tensão média depois dos transistores. Esta relação de tempo permanece constante para soldagens com corrente contínua constante, mas muda quando se deseja utilizar a técnica da pulsação. O reator (indutância), associado a seguir, transforma os pulsos em uma corrente contínua levemente ondulada. A perda nos transistores neste caso é pequena.

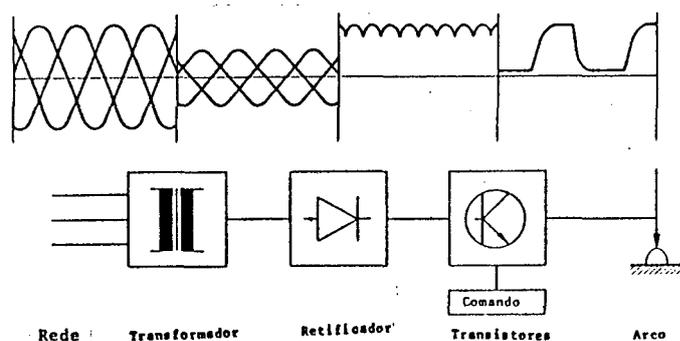


Fig. 2.2 - Diagrama de blocos de uma fonte de energia transistorizada analógica [55].

As fontes transistorizadas chaveadas no primário transformam a tensão alternada de 380 V numa tensão contínua de quase 600 V. O estágio seguinte é composto de uma cascata de transistores (inversor) que transforma a tensão contínua em pulsos positivos e negativos de largura regulável (fig. 2.4). A frequência de chaveamento é frequentemente mais alta que 20 kHz.

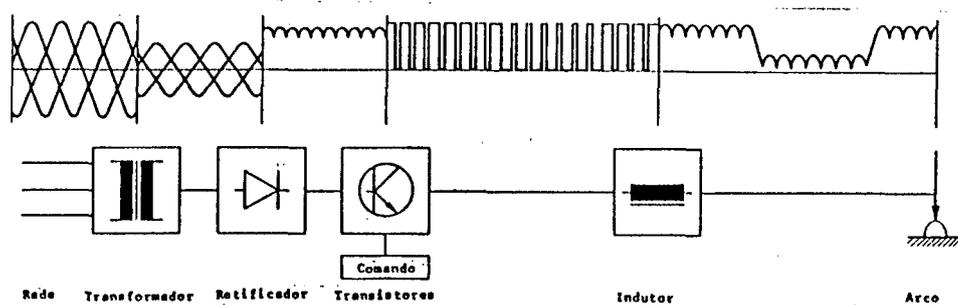


Fig. 2.3 - Diagrama de blocos de uma fonte transistorizada chaveada no secundário [55].

Através de um pequeno transformador é produzida uma corrente alternada com pequena tensão. Os estágios seguintes, constituídos por um retificador e um indutor, produzem, de acordo com a unidade de controle dos transistores, uma corrente contínua constante ou uma corrente contínua pulsada.

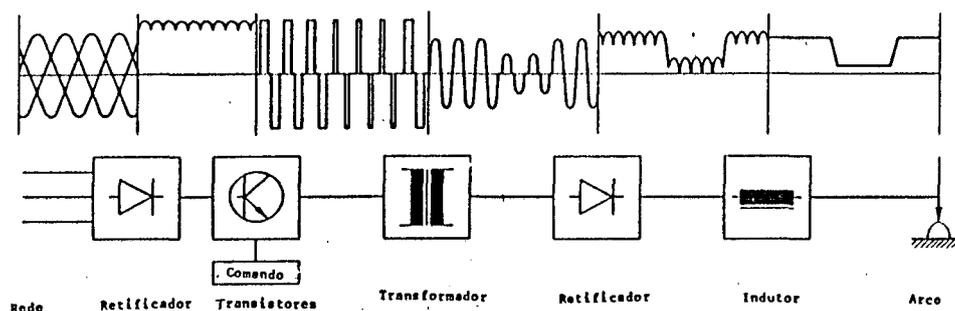


Fig. 2.4 - Diagrama de blocos de uma fonte transistorizada chaveada no primário [55].

Circuitos eletrônicos de potência, igualmente se do tipo analógico ou do tipo chaveado, não são nenhuma descoberta da tecnologia da soldagem. Também não qualificam as fontes de soldagem como de velha ou de nova geração. Todos os tipos de circuitos citados são relativamente antigos e em outras tecnologias já são utilizados há mais de 12 anos, como em acionamento e em campos magnéticos de alta intensidade. Cada um dos tipos denominados tem suas vantagens e desvantagens que devem ser pesadas na prática. De essencial significação é o tempo de reação do circuito de potência, que para os tipos analógicos é o mais curto. Os circuitos chaveados possuem fundamentalmente um tempo morto, que com relação aos analógicos, somente permite uma regulação com certa defasagem no tempo (10 a 50 vezes maior que para os analógicos). Isto tem especial influência sobre a transferência metálica em curto-circuitos e conseqüentemente sobre a salpicagem.

2.3 - VARIÁVEIS DE SOLDAGEM EM CORRENTE PULSADA

Os relacionamentos entre os parâmetros e variáveis de soldagem referenciados no item 2.1 têm agora, com a utilização de corrente pulsada, somente validade qualitativa. As características de fusão do eletrodo, por exemplo, são as que sofrem modificações mais diretas, em virtude da maior diferença que existe entre o valor médio e o eficaz da corrente. Isto, por sua vez, desencadeia uma série de consequências sobre outros relacionamentos entre parâmetros e variáveis.

Todavia, de suma importância é agora o fato de quais variáveis são independentes e quais as dependentes.

Por razões de limitação do controle tiristorizado, não se dispõe de fontes com esta tecnologia, que controlem diretamente a corrente nas frequências necessárias. As fontes que podem fazer isso e, ainda, com regulagem contínua, são as transistorizadas.

Por ser assim, as variáveis de soldagem possíveis de serem controladas nas fontes de energia tiristorizadas pulsadas, se referem todas à tensão. Conforme a figura 2.1, se tem a tensão de base, a tensão de pulso e as vezes a frequência de pulsação, em múltiplos ou sub-múltiplos da frequência da rede. As respectivas correntes de base e de pulso são variáveis dependentes da velocidade do eletrodo, regulada no alimentador do arame. Sendo assim, é necessário se estabelecer relações entre a tensão de pulso e a velocidade de arame para se obter uma corrente de pulso que seja maior do que a corrente de transição a fim de se ter o destacamento de pelo menos uma gota fundida. No entanto, este rela-

cionamento é praticamente impossível, uma vez que, pela forma de onda do pulso, quando a amplitude varia, varia também o tempo de pulso. Por isso, não são encontrados trabalhos de pesquisa envolvendo este tipo de equipamento. A seleção das variáveis é então feita de maneira puramente empírica, sem se poder estabelecer qualquer equação paramétrica.

Já com as fontes transistorizadas se pode ter formas de onda bem retangulares (fig. 2.5), onde cada variável pode ser regulada independentemente da outra. Neste caso, todavia, ainda existem equipamentos com diferentes formas de controle. Pode-se controlar as tensões de pulso e de base, sendo as respectivas correntes, variáveis dependentes, ou se impor as correntes de pulso e de base, sendo as respectivas tensões, variáveis dependentes, ou ainda, pode-se ter sistemas mistos destas possibilidades.

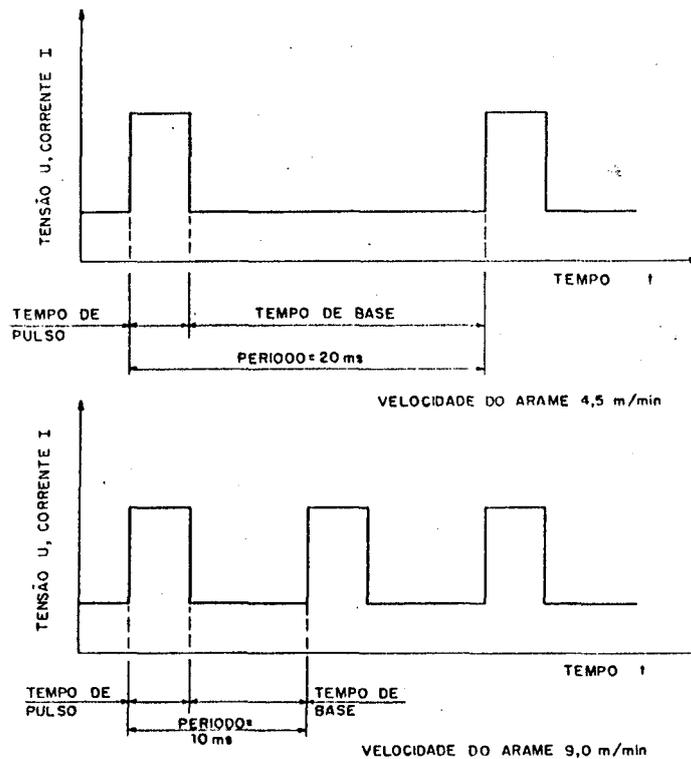


Fig. 2.5 - Corrente pulsada obtida de fontes transistorizadas com exemplo da dependência entre a frequência de pulsação e a velocidade do arame.

O controle de tensão é o mais antigo, porém, por necessitar de relacionamentos indiretos da tensão e velocidade de arame com a corrente de pulso resultante, torna a análise e equacionamento matemático deveras difícil. Além disso, a corrente de base pode resultar frequentemente muito baixa, ocasionando instabilidade de arco, pois, não somente a corrente de pulso é função da velocidade do arame, mas também a corrente de base. Assim sendo, não existe equacionamentos sistêmicos para a seleção das variáveis de pulso com este tipo de controle.

O controle por imposição de corrente pressupõe, ou o conhecimento prévio do relacionamento entre a velocidade do arame e a corrente média para que se possa ajustar as duas grandezas adequadamente, assegurando o equilíbrio entre a velocidade de alimentação e a velocidade de fusão, ou a existência de um controle externo para empurrar o arame em consonância com a tensão média do arco, que é por sua vez o elemento indicador daquele equilíbrio.

São cinco as variáveis que devem ser reguladas no equipamento: a corrente de pulso e seu respectivo tempo de atuação, a corrente de base e seu respectivo tempo e a velocidade de avanço do eletrodo. Para simplificar a questão, se tem procurado associar uma corrente de pulso mínima, acima da corrente de transição, com um respectivo tempo de atuação, tal que se obtenha a transferência de uma gota. Deste modo, ambas as variáveis estariam selecionadas. Restariam então, a corrente de base, o seu tempo de atuação e a velocidade do arame-eletrodo. A corrente de base, por sua vez, deve ser ajustada a um nível mínimo tal que não haja instabilidade de arco, o que normalmente seria na faixa de 20 a 50 A. Restaria agora a seleção da velocidade do arame e

do tempo de base. A seleção do tempo de base fixará imediatamente a frequência de pulsação e também a corrente média. É aí, então, que se necessita do equacionamento entre a velocidade do arame e esta corrente média, $v_a = f(I)$. A figura 2.5 exemplifica a dependência entre o tempo de base (frequência de pulsação) e a velocidade de avanço do arame.

Na tentativa de se abolir a necessidade do conhecimento prévio da relação $v_a = f(I)$, e, se assegurar uma corrente mínima para garantir a ionização durante a fase de base, foram desenvolvidos os equipamentos com controle misto, já citados. Na fase de base, a corrente é imposta e na fase de pulso é a vez da tensão. A velocidade do arame pode agora ser regulada com certa liberdade, uma vez que é ela que vai definir a corrente de pulso e, com isto, a corrente média. É claro que uma velocidade de arame muito alta pode resultar num comprimento de arco muito curto e com isto pode aparecer curto-circuito e, conseqüentemente, salpicagem. Para corrigir isto, deve-se, ou reduzir a velocidade do arame, ou aumentar a tensão de pulso. Como se observa, é difícil o equacionamento das variáveis e, da mesma forma que nos sistemas controlados por tensão, não existe, até o momento, uma pesquisa sistematizada sobre esta maneira de controlar o processo.

2.4 - CONTUNDÊNCIA DE CONCEITOS E LACUNA TECNOLÓGICA

Embora já existam grandes disponibilidades em termos de equipamentos de soldagem, faltam muitos conhecimentos sobre o

processo e o estabelecimento de equações entre as variáveis. Para que se tenha uma idéia da precariedade de informações nesta área, basta observar a frequência com que aparecem trabalhos onde são citadas as energias em que várias soldagens foram realizadas, sem que haja uma preocupação na especificação da corrente e da tensão independentemente. No entanto, como é mostrado em vários trabalhos [45, 46, 56], inúmeras são as possibilidades de se obter soldas diferentes com a mesma energia utilizada.

Um outro fator gerador de polêmica refere-se a que valor é mais significativo para a soldagem, se o valor da corrente eficaz ou o valor médio. Alguns dos trabalhos [42, 57] apresentam o valor eficaz como o representativo, enquanto que outros [27, 28, 29], apontam o valor médio. O argumento para tal reside no fato de que o arco elétrico não obedecendo a lei de Ohm, não seria considerado uma carga resistiva e, portanto, falar-se em corrente eficaz seria de pouco significado. No entanto, é necessário que se atente para as particularidades de cada processo. Em se tratando de processos com eletrodos não consumíveis, os autores citados teriam completa razão, uma vez que o calor gerado no comprimento do eletrodo não modificaria a solda resultante. Não obstante, em processos que utilizam eletrodos consumíveis e resistivos, a corrente que circula no eletrodo, gera um apreciável calor por "efeito Joule", onde o valor eficaz da corrente é que seria relevante.

2.5 - AUTOMAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG

Por suas características de flexibilidade, produção e possibilidades de soldagem em qualquer posição, o MIG/MAG é o processo que mais vem ganhando terreno em termos de automatização.

Para atender a esta tendência, o estudo da tecnologia da soldagem vem ampliando seu campo de ação para além da mecânica e metalurgia. Existe hoje em dia uma grande tendência ao estudo dos aspectos relacionados à física dos processos. Isto se tornou também possível, graças a disponibilidade de modernos equipamentos de soldagem e moderna instrumentação para aquisição e tratamento de dados. Assim, aspectos estudados já nos primórdios do processo MIG/MAG, tais como, a transferência de material de adição, hoje são assuntos de atualidade e vitalmente importantes para a automatização, pois a mesma não é simplesmente uma questão de fazer com que a pistola de soldagem siga uma determinada trajetória independentemente de um soldador, mas sim também, é uma questão de como fazer uma escolha adequada dos parâmetros e variáveis de soldagem a fim de que o primeiro intento seja possível.

A sequência de operações necessárias em soldagem manual com eletrodos consumíveis obedece aos seguintes passos:

- Posicionamento da peça-obra para soldagem;
- Colocação do eletrodo para posição de partida;
- Acendimento do arco em curto-circuito;
- Alimentação do eletrodo e simultâneo controle do comprimento do arco, bem como do movimento pendular

ou retilíneo do mesmo ao longo da junta;

- Apagamento do arco.

Em soldagem com eletrodo revestido, estas funções são todas executadas pelo soldador, que fica restrito a um procedimento básico, previamente qualificado. Ele na realidade faz o papel de sensor e atuador, alterando levemente os parâmetros e variáveis, buscando adaptá-los a cada nova situação, como é o caso da alteração da junta devido aos fenômenos térmicos.

Em soldagem mecanizada, todas estas funções devem ser realizadas por comando mecânico, elétrico ou eletrônico e unidades de controle. Todavia, há vários graus de mecanização, a tal ponto que é impossível se estabelecer limites bastante claros entre uma soldagem automática e não automática. Assim, um procedimento de soldagem sem a utilização de qualquer dispositivo de condução da pistola, pode envolver maior automatismo do que se fosse efetuada através de um robô. É que hoje, com as modernas fontes de energia para soldagem que utilizam transistores ou tiristores, a necessidade de controles realimentados, bem como, a necessidade de se simplificar a seleção das variáveis, que no caso são muitas, conduz a um grau de sofisticação tal que a assertiva anterior pode ser considerada verdadeira.

Nos países industrializados, a problemática da automação da soldagem relativa aos aspectos somente inerentes à fonte de energia e à unidade de alimentação do arame (para processos de eletrodos consumíveis) é um assunto ainda bastante polemizado, com soluções apenas razoáveis em casos particulares. Entretanto, nestes países há conhecimento mais do que suficiente e equipamentos de soldagem apropriados para que se passe a utilizar com intensidade os robôs de soldagem.

No Brasil, não há nenhum equipamento fabricado que possibilite, na verdade, um acoplamento, pelo menos razoável, com um robô de soldagem. Entretanto, já se começa a tentar produzir este último sem que, pelo menos exista uma pequena massa crítica de conhecimento relativa a processos e equipamentos de soldagem.

Os problemas inerentes aos processos de soldagem e extremamente relevantes para a automatização são inúmeros, podendo-se citar:

- A irregularidade da corrente em soldagem com transferência por curto-circuito, quando se utiliza fontes do tipo tensão constante, causando irregularidade de penetração e, por vezes, a precipitação do banho de fusão nos passes de raiz;
- O surgimento de sopro magnético provocando efeitos danosos que não podem ser corrigidos por atuação do operador;
- A produção de salpicos que pode provocar o surgimento de defeitos e perturbar a atuação dos sensores de observação da junta, se estes forem usados.

Portanto, em grande parte dos casos, o uso simples de um robô de trajetória programável não é a solução definitiva. Os robôs de última geração já dispõem da possibilidade de correção da trajetória durante o transcorrer da operação mediante a utilização de sensores. Estes, podem ser de princípios de funcionamento muito diferentes: de contato, indutivos, ópticos, etc. Modernamente, utilizam-se também as próprias variáveis de soldagem.

Na figura 2.6 apresenta-se o esquema de um equipamento que utiliza um sensor óptico, adaptado a uma mesa de três coordenadas [58, 59]. Ali o sinal do sensor orienta a trajetória da

pistola e ao mesmo tempo realimenta a regulagem das variáveis de soldagem conforme a variação que ocorrer na junta a ser soldada.

As próprias variáveis de soldagem, como sensores, têm sido utilizadas bem recentemente no que se pode chamar de sistema de procura da junta [60]. Este sistema se baseia na observação da variação da corrente e da tensão quando se solda com movimento de tecimento em juntas em "V" ou "U" ou ainda em juntas em ângulo como mostram as figuras 2.7 e 2.8. A alteração destas variáveis ocorre em função da mudança da distância contato-peça causada pela movimentação alternativa da pistola em torno do eixo central da junta. Um algoritmo adequado, pode, em função da alteração das variáveis, mudar o curso programado. Depois da execução do primeiro passe pelo sistema de procura da junta, os passes subsequentes são feitos com a direção já corrigida.

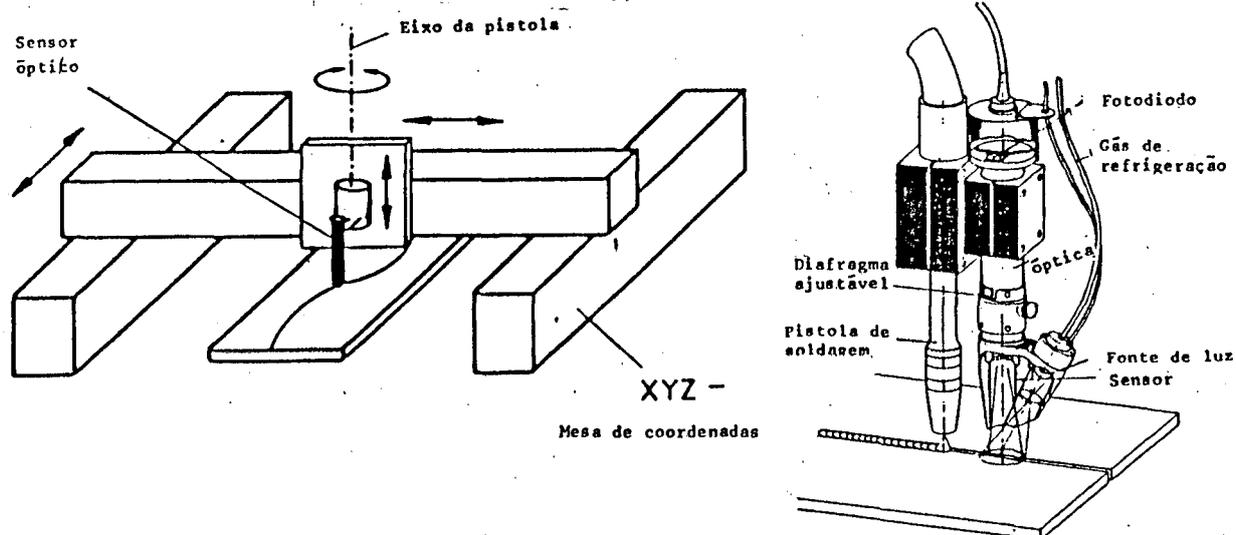


Fig. 2.6 - Representação esquemática de uma mesa de três coordenadas com sensor óptico conectado a uma pistola de soldagem MIG [58].

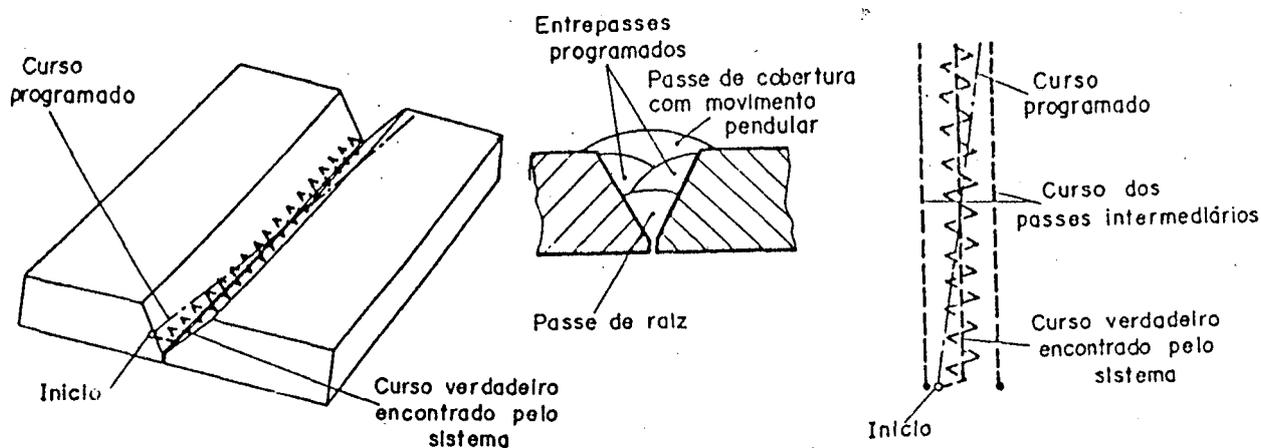


Fig. 2.7 - Representação do sistema de procura de junta através do robô em juntas de topo [60].

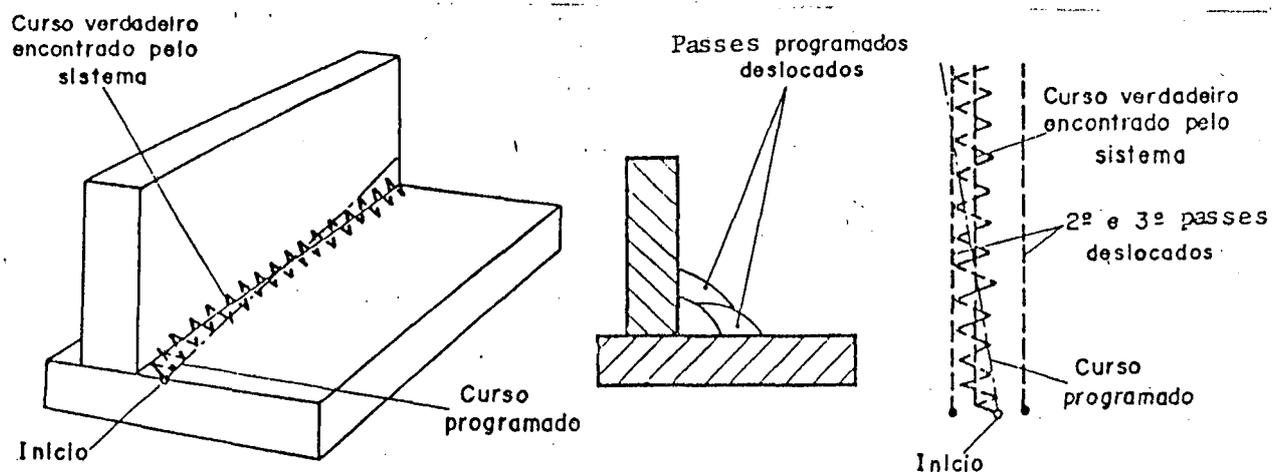


Fig. 2.8 - Representação do sistema de procura de junta através do robô em juntas de ângulo [60].

3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

O grande avanço na tecnologia de aquisição, comando e controle nesta década tem como causa o vertiginoso desenvolvimento dos microprocessadores e microcomputadores. A grande vantagem que eles trazem é a flexibilidade de modificação de suas funções através de reprogramação. Esta característica foi decisiva para a concepção do presente sistema, que se baseia na utilização dos mesmos, associados a controles analógicos.

3.1 - ANTECEDENTES

Os primeiros sistemas microcomputadorizados utilizados em soldagem foram desenvolvidos no "The Welding Institute" da Inglaterra no início dos anos 80. Um deles, utilizado para aquisição, análise e tratamento de dados em soldagem MIG/MAG e eletrodo revestido [13] utilizava um microcomputador (na época minicomputador) PDP11/03 DECLAB que utilizava um microprocessador de 16 bit composto de quatro "chips". Um segundo sistema destinado a controlar as variáveis de soldagem do recém introduzido processo MIG/MAG sinérgico, utilizava um microcomputador contendo um microprocessador 8080 de 8 bit [40].

Um outro sistema, foi desenvolvido mais recentemente na Divisão de Automatização de Processos de Soldagem (Prozesssteuerung in der Schweisstechnik) da Universidade Técnica de Aa-

chen, na Alemanha Ocidental [57]. Este sistema tinha por objetivo controlar um processo MIG/MAG convencional, fazendo aquisição das variáveis corrente e tensão médias e eficazes e da velocidade do arame-eletrodo. O funcionamento do sistema era baseado em dois microcomputadores, um mestre e um escravo, acoplados, possuindo ambos uma CPU de 8 bit 6502. Enquanto que o escravo somente poderia ser programado em linguagem de máquina, o mestre possuía um interpretador BASIC e podia também, mediante um programa em ASSEMBLER, ser utilizado para o desenvolvimento de programas em linguagem de máquina.

Em 1984 foi iniciado na Universidade Técnica de Magdeburg (Alemanha Oriental) a construção de um sistema computadorizado de soldagem para que se constituísse num laboratório de ensino e pesquisa [61]. O sistema é constituído de um robô com 5 a 8 graus de liberdade selecionáveis, uma fonte de energia para o processo MIG/MAG, um sub-sistema de medição e aquisição de dados e de um microcomputador. O sistema permite a análise de dados do processo, sendo os conhecimentos adquiridos utilizados em controles adaptativos.

Em 1986 Berg e Weman publicaram um trabalho [62] no qual descrevem um sistema constituído por uma fonte de energia transistorizada analógica comandada por um microcomputador PC. O sistema tinha por objetivo comandar o processo MIG/MAG nas versões de transferência por curto circuito e de corrente pulsada, sem ter, no entanto, um sub-sistema integrado de medição e aquisição de dados.

O desenvolvimento de instrumentos, de componentes e de métodos de medição [63, 64, 65, 66, 67] tem possibilitado a aquisição de dados com crescente minimização de erros, uma melhor

identificação entre valores médios e eficazes e a determinação de eventos rápidos.

3.2 - CRITÉRIOS E CONCEPÇÃO

As funções exercidas pelos sistemas citados no item anterior podem ser definidas, de acordo com a norma DIN 19226, como monitoração, comando e controle. O princípio da monitoração (fig. 3.1.a) fundamenta-se na aquisição das grandezas de saída, através de sensores, e sua documentação, sem influenciar nas grandezas de entrada. O fornecimento das grandezas de entrada, através de um atuador controlado por uma lógica, denomina-se de comando (fig. 3.1.b). Se as grandezas de saída são comparadas com grandezas padrão, produzindo-se sinais que são algebricamente somados às grandezas de entrada, tem-se então um controle (fig. 3.1.c).

O sistema planejado neste trabalho deve cumprir todas as funções mencionadas, isoladamente ou simultaneamente. No diagrama da fig. 3.2 são representadas as partes integrantes mais importantes, necessárias para o cumprimento dos objetivos propostos. Numa primeira fase, que é relativa a este trabalho, o robô é substituído por um dispositivo condutor da pistola de soldagem com controle automático de apenas um eixo (x). Duas fontes de energia de concepções distintas podem ser comandadas pelo micro-computador. Uma das fontes é tiristorizada, oferecendo um reduzido potencial de variações de métodos de controle do processo. Já a fonte transistorizada oferece todas as possibilidades apresentadas na fig. 1.6.

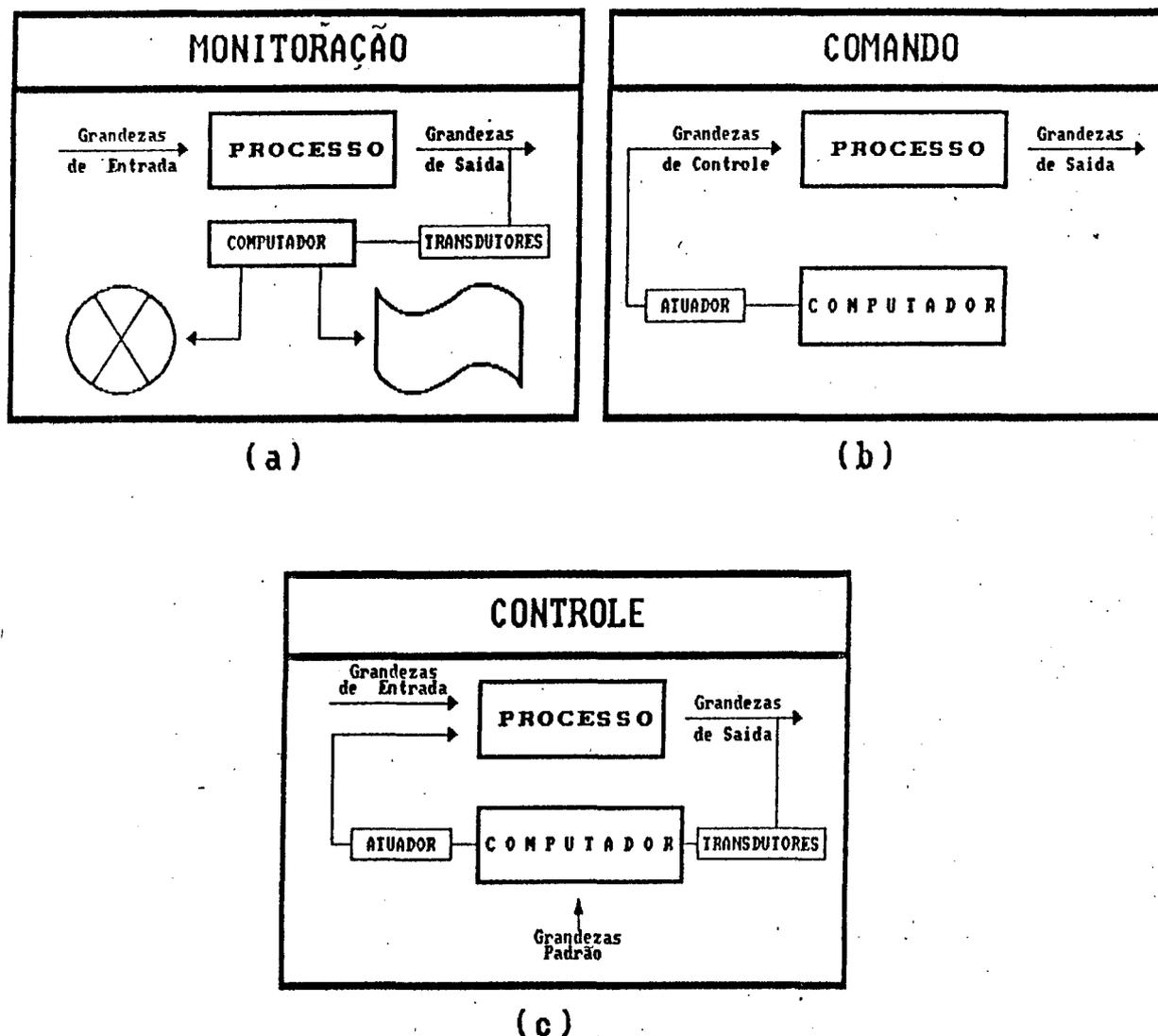


Fig. 3.1 - Funções dos diferentes sistemas utilizados em processos de fabricação (DIN 19226) [57].

Um alimentador de arame, adaptado aos objetivos, possui controles para atender às várias metodologias de ensaio. Além disso, contém os medidores de grandezas elétricas e o medidor da velocidade do arame-eletrodo.

Para tornar possível o diálogo entre as partes, anteriormente citadas, e o microcomputador, é necessário uma interface modular de aquisição e controle (IMAC). Ela deve ser responsá-

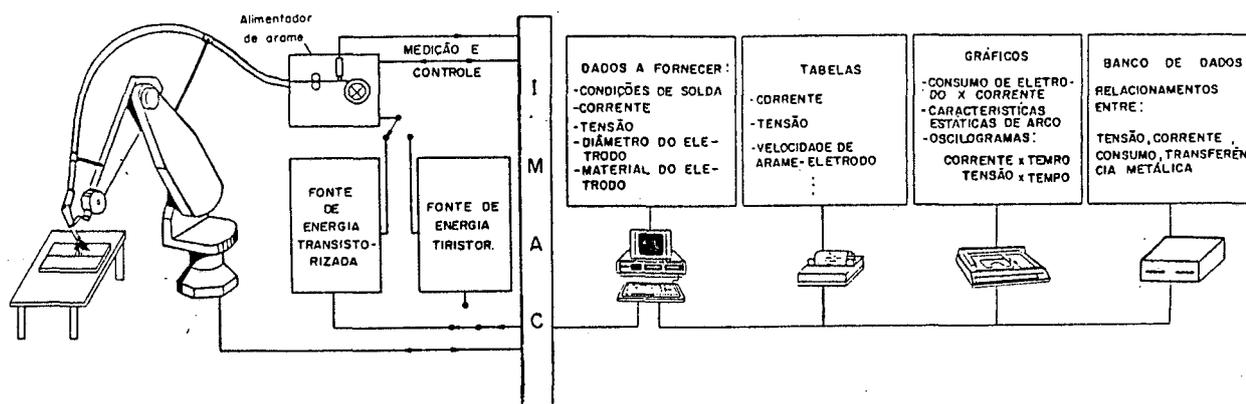


Fig. 3.2 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados, comando e controle de variáveis de soldagem concebido para esta pesquisa.

vel pela conversão de sinais analógicos em digitais provindos dos transdutores de grandezas elétricas, do transdutor de velocidade de avanço do arame e do transdutor de posição do dispositivo de condução da pistola. Deve converter também os sinais digitais em analógicos utilizados no comando das fontes de energia, no comando da movimentação da pistola e no comando do alimentador do arame.

Para comandar o sistema de acordo com as modulações pretendidas, são necessários uma série de sinais analógicos, que são apresentados na fig. 3.3. Para a fonte tiristorizada, que trabalha com característica estática de tensão constante, dois sinais são suficientes: um para a tensão e outro para a tensão de pulso (no caso de se trabalhar com corrente pulsada). Para a fonte transistorizada, dependendo do tipo de modulação, podem ser necessários até quatro sinais simultâneos. Todavia, se for gerado um sinal de referência com a forma de onda desejada, somente ele é suficiente para comandar a fonte em corrente pulsada. Isto pode

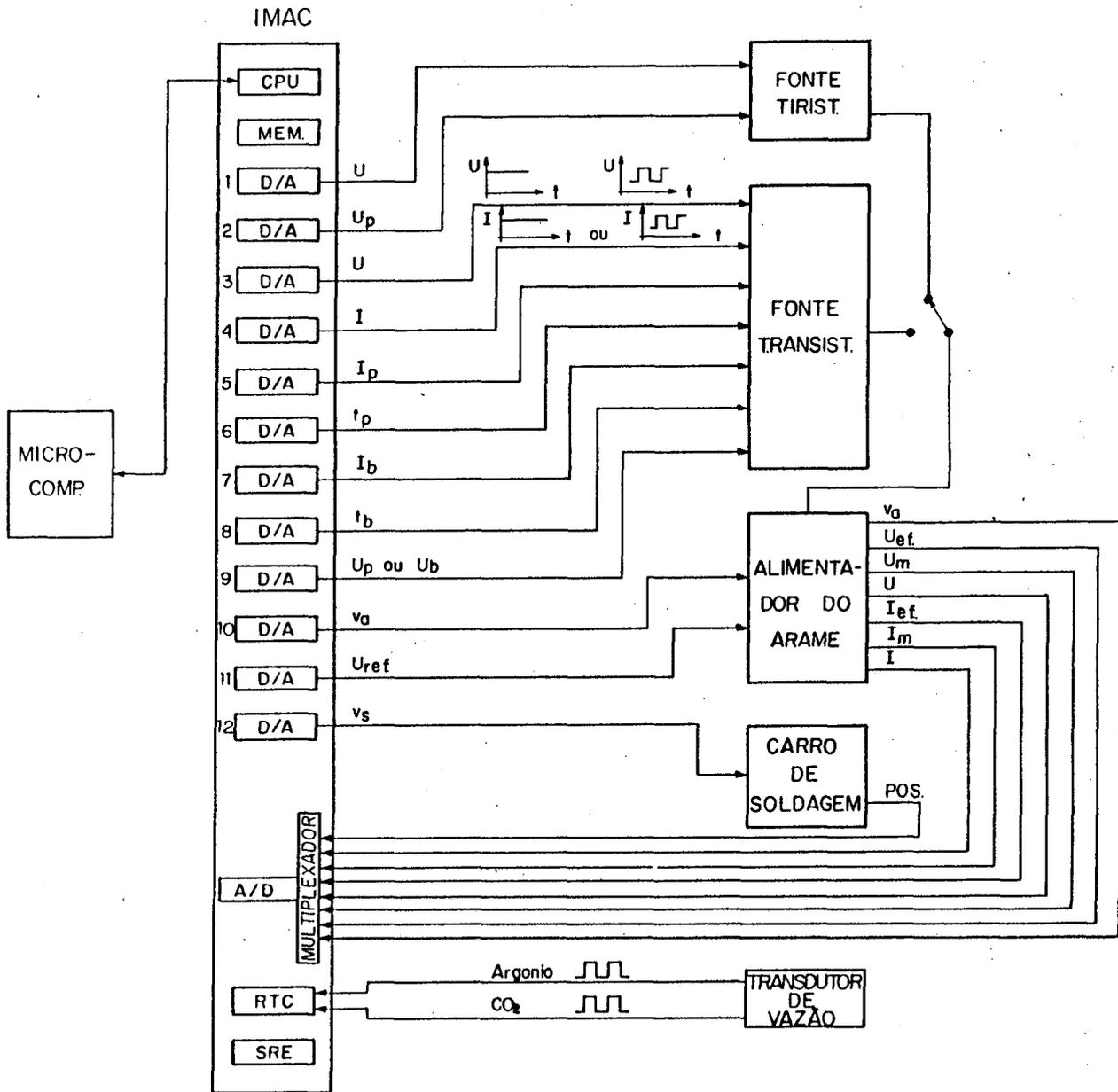


Fig. 3.3 - Esquemática das saídas e entradas analógicas da IMAC

ser feito, comandando a fonte em tensão ou em corrente, conforme mostra a fig. 3.3. Dessa maneira, é necessário que a IMAC dispense um certo tempo para monitorar permanentemente este sinal. Para evitar isso, devem ser enviados quatro sinais simultâneos à fonte de energia para que, a partir deles, num circuito dedicado, possa ser gerado o sinal desejado para o controle dos transistores. Na fig. 3.3, aparece ainda o sinal designado como "Up ou Ub" que é utilizado nas modulações mistas, em substituição ao sinal "Ip".

Conforme a modulação utilizada, o alimentador do arame necessitará do sinal da velocidade do eletrodo ou do sinal que indica um determinado comprimento do arco (U_{ref}).

Um último sinal analógico é necessário para comandar a velocidade do carro de soldagem.

Para executar todos estes tipos de comando, são necessários doze sinais, conforme mostra a fig. 3.3. Todavia, como as fontes são utilizadas individualmente e cada tipo de modulação à sua vez, pode-se utilizar um mesmo conversor digital/analógico para comandar coisas distintas. Assim, o tempo de base (t_b) da fonte transistorizada pode ser associado a tensão (U) da fonte tiristorizada; a corrente de base (I_b) da fonte transistorizada com a tensão de pulso (U_p) da tiristorizada. Os sinais de corrente de pulso (I_p), tensão de pulso (U_p), tensão (U) e corrente (I), todos da fonte transistorizada, podem também utilizar somente um conversor digital/analógico, bastando para tanto, a utilização de desvios, através de relês. Desse modo, é possível se reduzir o número de conversores D/A, que comandam as fontes, para quatro.

Da mesma maneira, pode-se utilizar somente uma saída analógica para comandar o alimentador do arame.

Contando com o comando do carro de soldagem, são seis as saídas analógicas necessárias.

Para a medição, será necessário apenas um conversor analógico/digital com entrada multiplexada para a leitura de corrente e tensão instantâneas, médias e eficazes, da velocidade do arame-eletrodo e da posição do carro de soldagem. A medição da tensão e corrente médias e eficazes será feita de duas maneiras: via computacional, através dos valores instantâneos adquiridos, e analogicamente, utilizando circuitos dedicados [63].

A medição da vazão dos gases será realizada com auxílio de um módulo "relógio temporizador-contador (RTC)".

O microcomputador utilizado pode ser um PCxt ou um PCat, dependendo somente das características de velocidade de processamento que se deseja. O micro comunica-se com a IMAC via uma interface serial RS 232-C.

Os demais periféricos compreendem uma impressora matricial e uma plotadora para a listagem de programas e emissão de protocolos, e logicamente dois conjuntos de acionadores de disquetes para o carregamento e armazenamento de programas e dados.

4. MÓDULOS DO SISTEMA

Este capítulo tem por objetivo caracterizar a adequação/concepção, realizada em cada unidade do sistema, de forma a alcançar os objetivos propostos.

4.1 - FONTES DE ENERGIA

Como visto no capítulo anterior, duas fontes de energia foram adaptadas para serem incorporadas ao sistema, atendendo aos modos de modulação planejados. Uma das fontes, no entanto, com tecnologia tiristorizada (fig. 4.1a) atende somente a modulação em tensão. Ela é da marca Oerlikon, tipo CPW 320, com capacidade nominal de 320 A e pulsação com frequência fixa igual a da rede de alimentação.

Sua estrutura de potência é basicamente constituída de duas fontes de energia, uma para produzir a energia de base e outra para produzir pulsos quando se desejar trabalhar com corrente pulsada. O comando de ambas as variáveis pode ser feito pelo microcomputador, bastando introduzir sinais de referência para estes controles, na faixa de 0 - 10 V, que são calculados através de uma função de transferência disponível em um dos programas básicos do sistema. Como as características estáticas da fonte são levemente descendentes, esta função de transferência foi calculada para uma carga de 100 A médios. Nestas condições pode-se ga-

rantir uma incerteza da variável de comando de no máximo ± 1 V.

Um projeto de adaptação mais complexo foi o requerido para a fonte transistorizada, que é do tipo analógico (fig. 4.1. b), isto é, que tem o funcionamento dos transistores na região linear, onde se tem características bastante dissipativas. Em compensação, esta fonte possui a característica de produzir uma tensão ou fornecer uma corrente com uma forma de onda que é uma reprodução quase perfeita do sinal injetado no circuito de controle dos transistores.

Esta fonte de marca ELMA, tipo C400P e capacidade de 400 A, em sua concepção original, era somente controlada em tensão e, quando em modo pulsado, tinha o seu controle em modo misto. Isto significava uma limitação do sistema em relação ao que se pretendia dele. Por isso, inferiu-se diretamente no controle da fonte, fazendo-a funcionar também com corrente imposta.

Não obstante, como a fonte também não possuía referência de corrente, só era possível o seu controle mediante um gerador de sinal externo ou, no caso de se usar o microcomputador, a IMAC, teria que gerar este sinal. Isto, para determinados aplicativos, consumiria um tempo muitas vezes indispensável para a realização de certas funções.

Tal limitante foi resolvida pelo desenvolvimento de um circuito gerador do sinal de referência de corrente. Este gerador foi projetado para produzir um sinal pulsado a partir de quatro sinais, que representam a corrente de pulso (I_p), tempo de pulso (t_p), corrente de base (I_b) e tempo de base (t_b).

A fig. 4.2 apresenta o diagrama lógico de controle, que viabiliza todos os tipos de modulação apresentados na fig. 1.6, com os comandos podendo ser feitos diretamente no painel da

máquina ou remotamente.

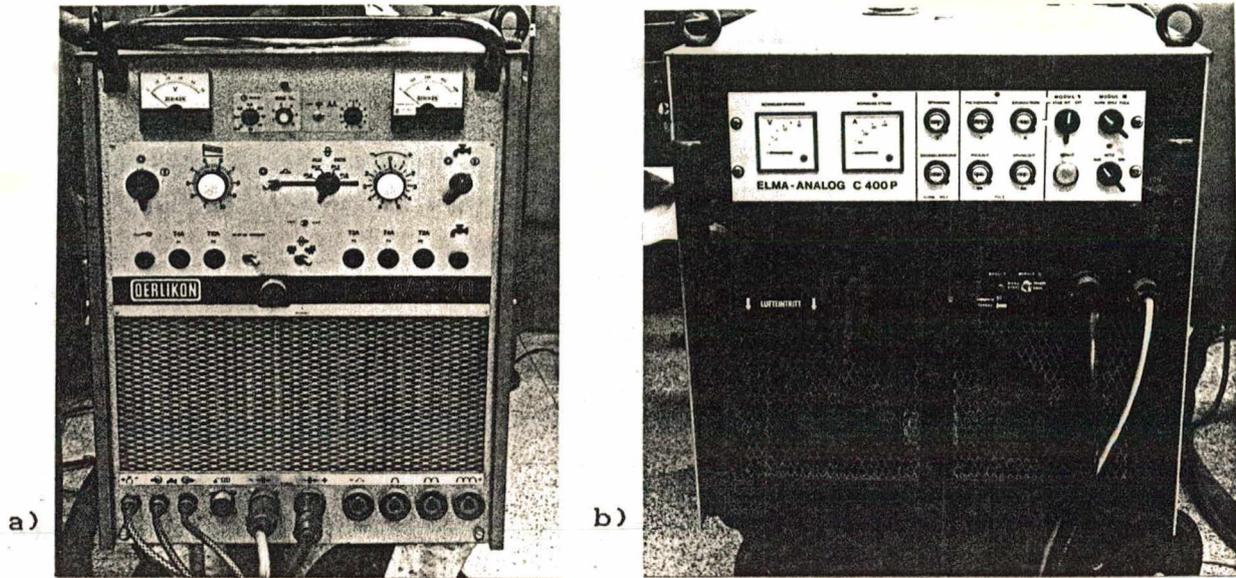


Fig. 4.1 - Painéis frontais das fontes de energia: a - tiristorizada; b - transistorizada.

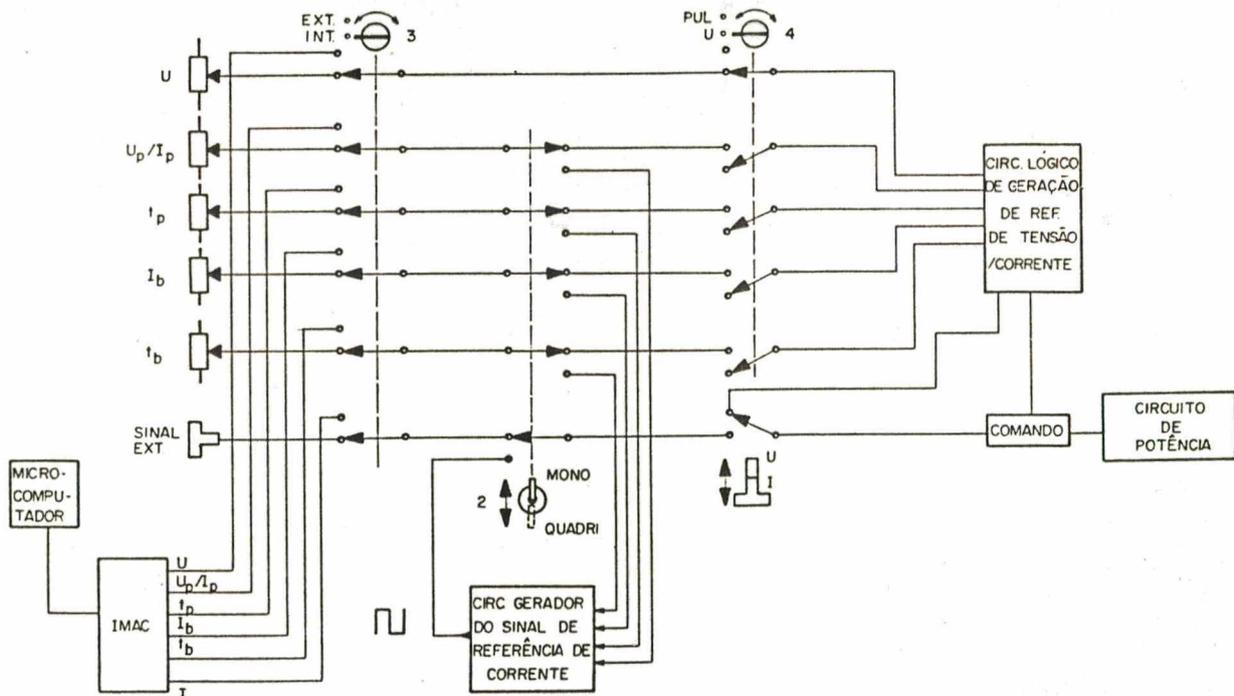


Fig. 4.2 - Diagrama lógico de controle da fonte transistorizada.

4.1.1 - Circuito Gerador do Sinal de Referência da Corrente

O propósito da construção deste circuito foi o de suprir a fonte de energia com um sinal próprio para alimentar o comando da fonte de energia e controlá-la em corrente.

O circuito tem a propriedade de produzir um sinal quase retangular para que se possa controlar a fonte em modo pulsado. A velocidade de passagem do sinal de base ao sinal de pulso, bem como, em sentido inverso, é tida na literatura [54, 68, 69] como fundamentalmente importante para o controle do processo MIG/MAG. Esta literatura afirma que transições quanto mais rápidas, tanto mais eficiente o controle sobre a transferência de gotas metálicas em corrente pulsada. Dentro desta visão, foi projetada e montada a primeira versão do circuito.

Os ensaios com soldagem produziram oscilogramas de corrente e tensão com certas deformações que, de um lado, poderiam influenciar negativamente o controle da transferência metálica e, de outro lado, poderiam mascarar as análises dos oscilogramas na determinação dos instantes de transferência. Devido a isto, se partiu para um estudo mais profundo para se caracterizar a dinâmica da fonte e do arco diante de diferentes dinâmicas do sinal de controle.

Puschner [54] fala em tempos de reação para fontes transistorizadas analógicas em torno de $50 \mu s$, o que então induziu a que a dinâmica do sinal produzido pelo circuito gerador do sinal de referência da corrente fosse projetada inicialmente para atender a esta característica. A figura 4.3 mostra este sinal para níveis de corrente de 240 A de pulso e 44 A de base. Como pode

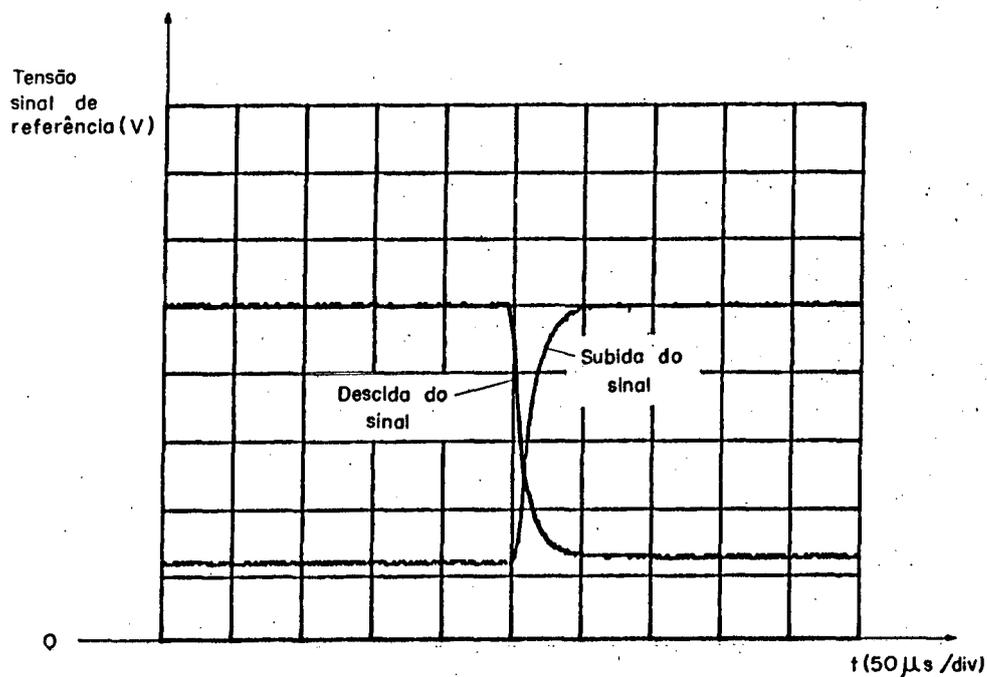


Fig. 4.3 - Sinal do "circuito gerador do sinal de referência de corrente", para nível de corrente de base de 44 A e de pulso 240 A.

ser observado, o tempo de subida do sinal, bem como o de descida é de aproximadamente 50 μ s. Com este sinal foram feitos ensaios submetendo a fonte de energia a três cargas diferentes para caracterizar perfeitamente sua resposta. A fig. 4.4 mostra o comportamento diante de um curto-circuito, onde se observou, através de expansões de escala, que o tempo de subida da corrente é de 80 μ s. O tempo de descida da corrente foi, neste caso, bem maior, da ordem de 1 ms, o que pode ser explicado pela maior dificuldade de dissipação da energia, que foi armazenada durante a fase de pulso, devido a baixa impedância do circuito. Por isso, chega-se a observar uma tensão negativa sobre a carga (fig. 4.4) em razão da polarização do diodo de roda-livre existente no circuito da fonte de energia, que permite a circulação da corrente quando os transistores oferecem uma resistência muito grande à passagem da mesma.

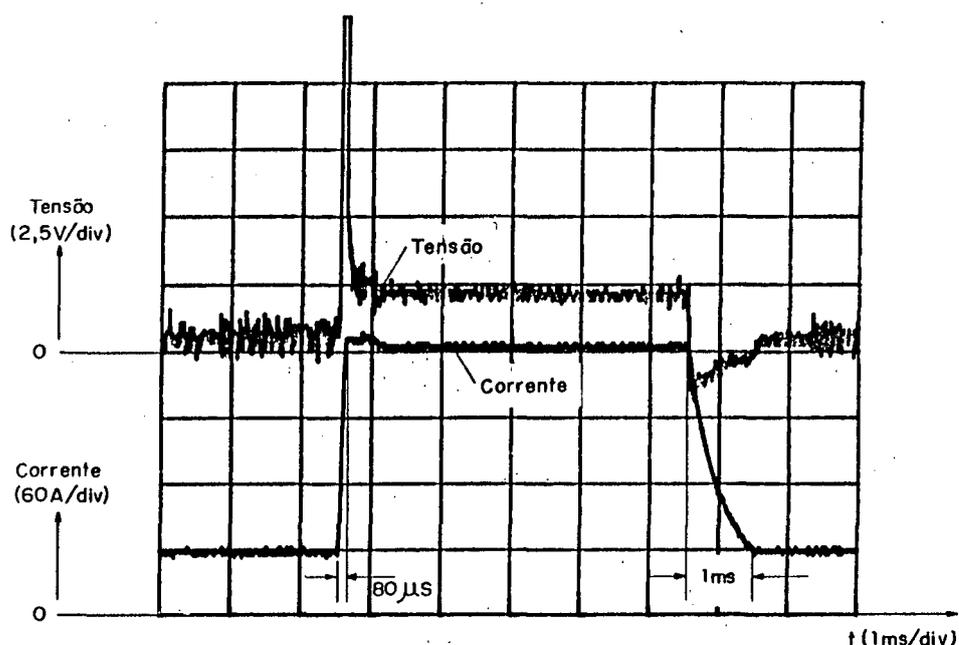


Fig. 4.4 - Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.3 com ensaio em curto-circuito.

Em um segundo ensaio com uma carga resistiva, que produz uma tensão de pulso equivalente ao caso de uma soldagem, propriamente dita (fig. 4.5), verificou-se um tempo de atingimento à corrente nominal de pulso de aproximadamente $210 \mu\text{s}$. O tempo de descida é da mesma ordem de grandeza que o tempo de subida. Na determinação do tempo de subida deve-se desconsiderar o tempo de sobrepujamento da corrente nominal ("overshoot"), característica que influencia os oscilogramas de soldagem, como ver-se-á adiante.

O terceiro ensaio realizado foi em soldagem (fig. 4.6), utilizando-se um gás de proteção que fornecesse uma boa estabilidade de arco (95% de argônio e 5% de CO_2). Como pode ser observado na fig. 4.6, obtém-se, como no ensaio com carga resistiva, um "overshoot" tanto na tensão, quanto na corrente, ao atingir-se o valor de pulso. A consequência do aparecimento destes picos é de

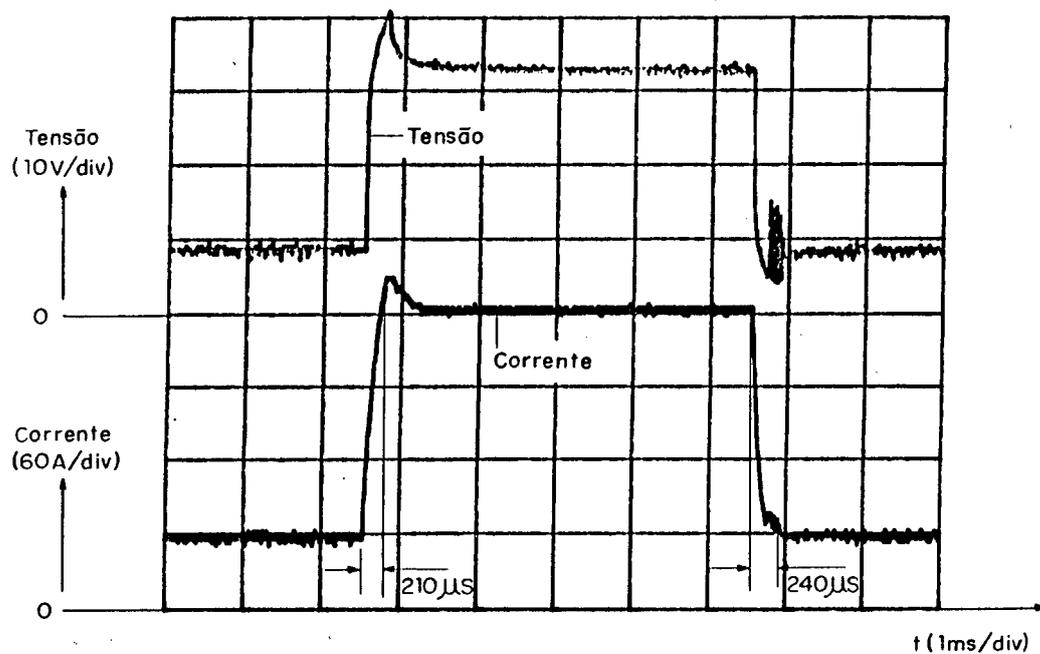


Fig. 4.5 - Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.3 em ensaio com carga resistiva.

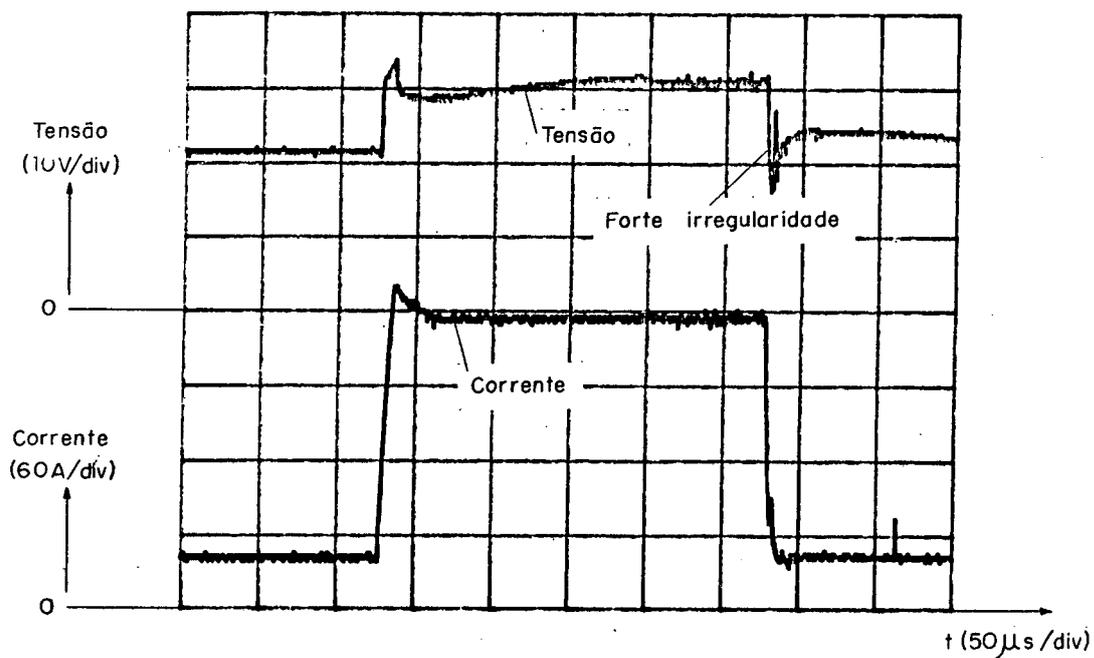


Fig. 4.6 - Oscilograma de soldagem em corrente pulsada utilizando-se o sinal de corrente conforme a fig. 4.3.

certa forma maléfica para a metodologia desenvolvida nesta pesquisa, em que a observação dos oscilogramas é fator indispensável para se determinar o momento em que houve destacamento de gota, pois fica difícil diferenciá-los daqueles que aparecem durante o destacamento. Além disso, em certas situações, o pico de corrente pode influenciar relevantemente o destacamento de gota, tal que a consideração só das variáveis de pulso pode não ser suficiente. Em virtude também do íngreme descenso da tensão do valor de pulso ao de base, obtém-se uma acentuada irregularidade da tensão no início da fase de base, o que pode ser fator causador de instabilidade de arco. Uma visão geral do problema pode ser vista na fig. 4.7, onde é mostrado o oscilograma da corrente (fig. 4.7-a) e o da tensão (fig. 4.7-b). Como se observa, ocorrem picos relativamente grandes no início da fase de pulso, que podem prejudicar a estabilidade de arco, podem prejudicar a análise da transferência metálica que é feita com base na observação de picos de tensão (fig. 4.7-b), além de alterarem os próprios valores médios e eficazes da corrente e tensão.

Para solucionar este inconveniente, sucessivas modificações foram procedidas no circuito gerador do sinal de referência da corrente. A situação final adotada, forneceu para os mesmos valores de pulso e de base anteriores, o sinal apresentado na fig. 4.8, onde se tem um tempo de subida e de descida em torno de 250 μ s. Com isto, se obteve tempos de subida e de descida da corrente, nos três ensaios (curto-circuito, carga resistiva e arco) (figs. 4.9, 4.10, 4.11), maiores do que com a dinâmica anterior. Todavia, estes tempos se equivalem ao do próprio sinal de controle. Com isto, se obteve um oscilograma de corrente e tensão bem mais livre de perturbações, como pode ser observado na fig. 4.12.

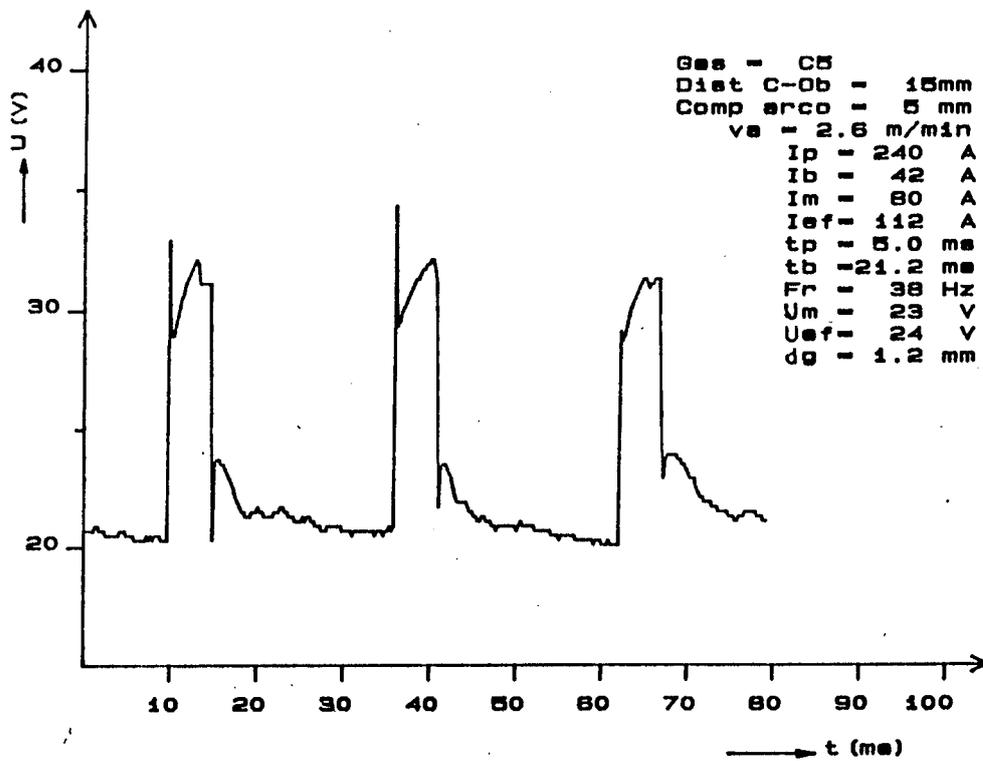
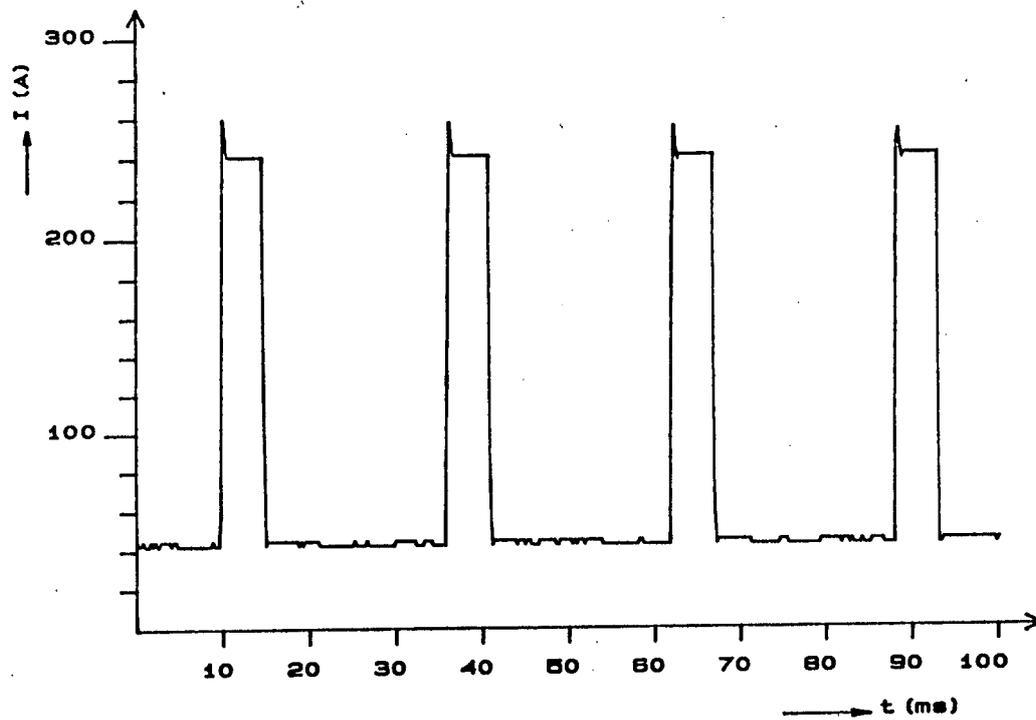


Fig. 4.7 - Oscilogramas de soldagem com corrente pulsada utilizando-se o sinal de controle conforme a fig. 4.3.

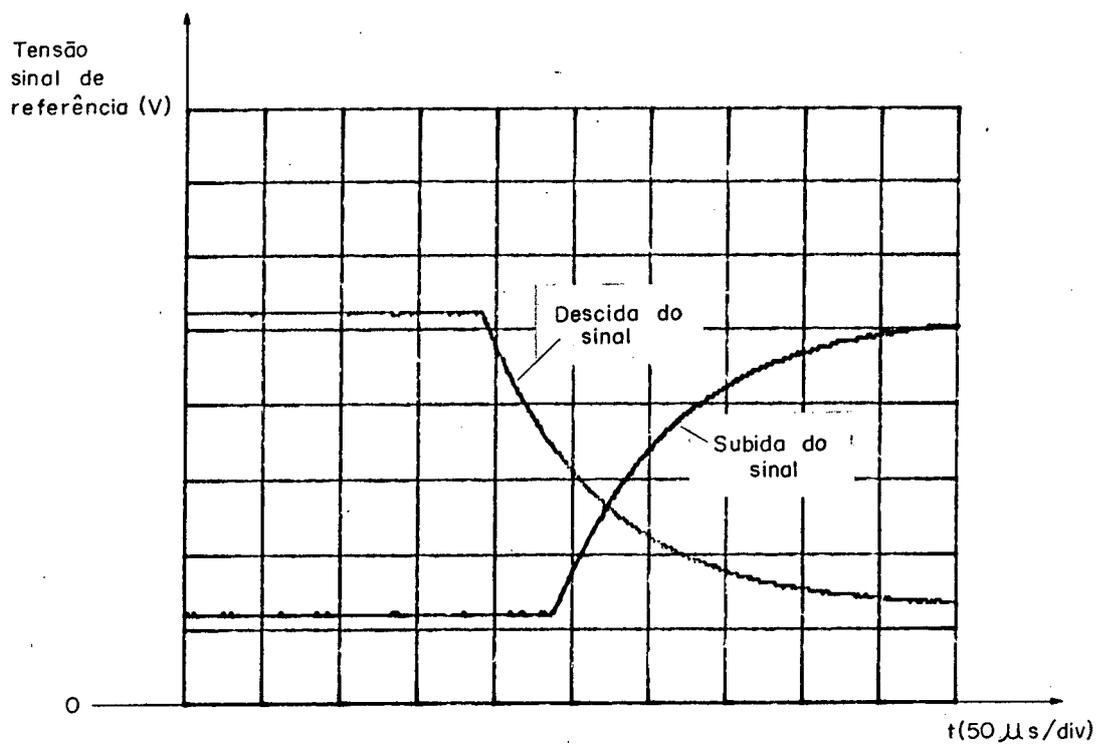


Fig. 4.8 - Sinal do circuito gerador do sinal de referência da corrente modificado.

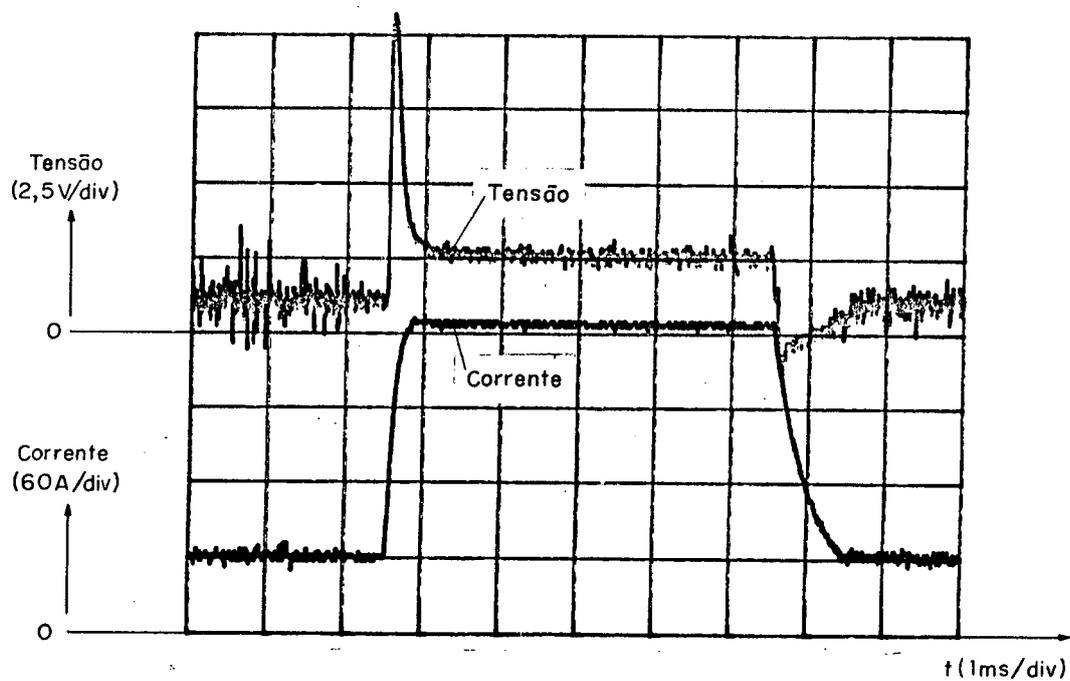


Fig. 4.9 - corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.8 em ensaio com curto circuito.

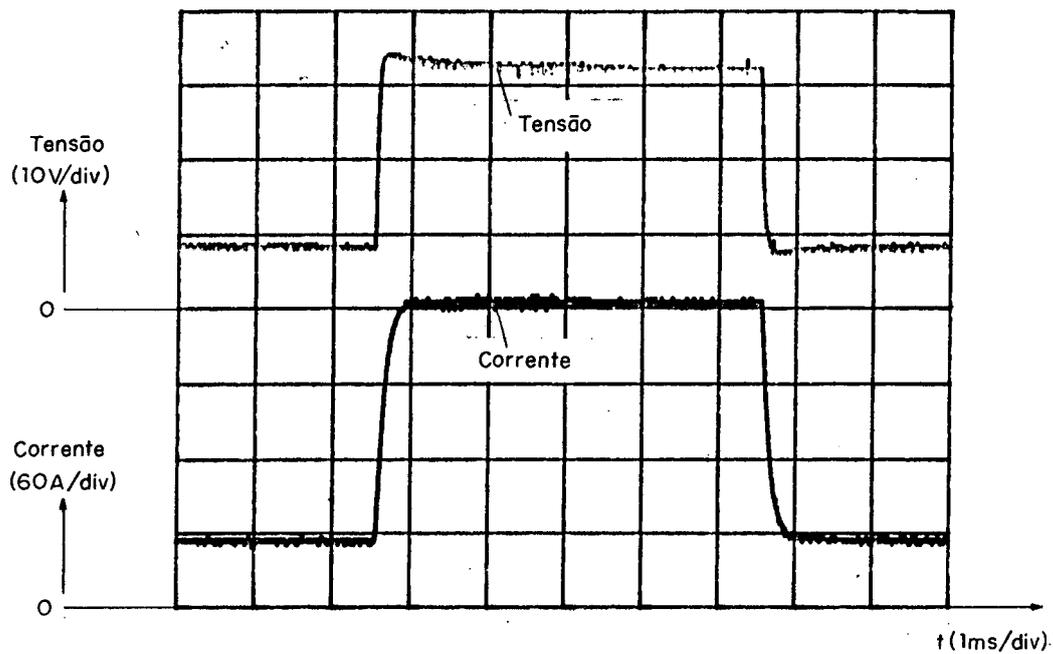


Fig. 4.10 - Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.8 em ensaio com carga resistiva.

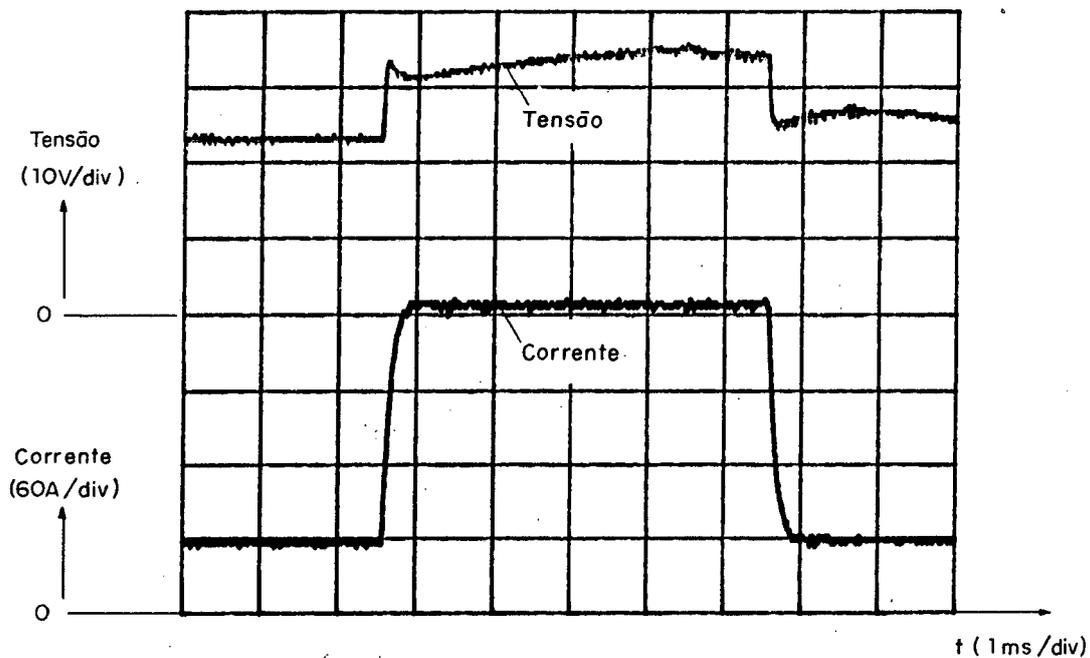


Fig. 4.11 - Corrente pulsada obtida a partir do sinal conforme a fig. 4.8 em ensaios com soldagem.

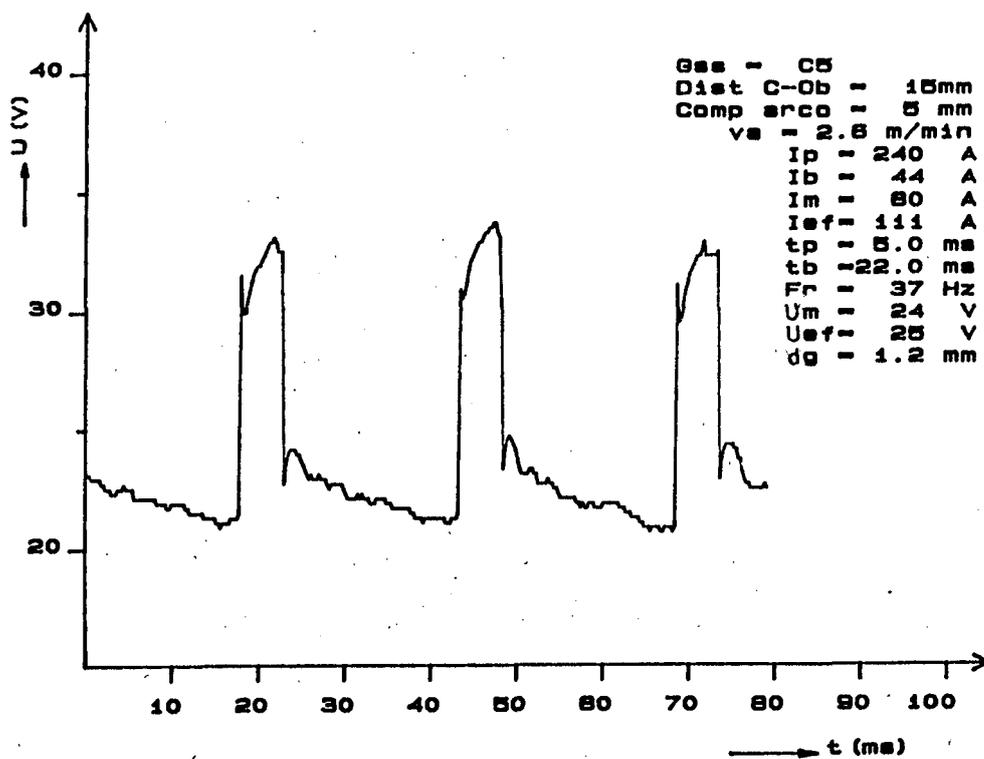
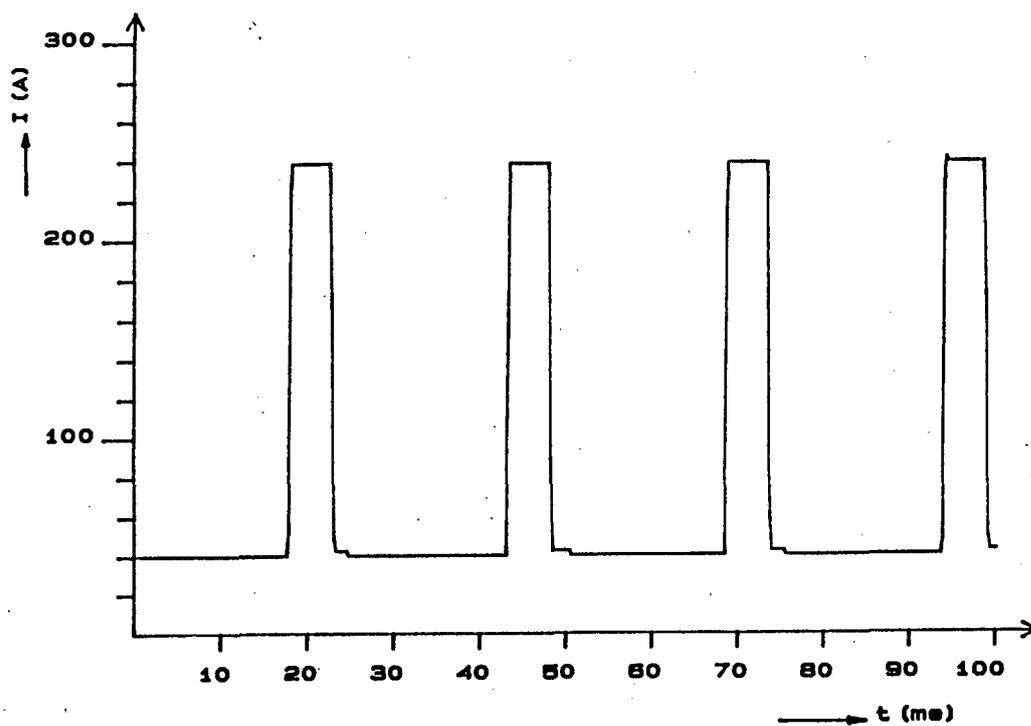


Fig. 4.12 - Oscilogramas de soldagem com corrente pulsada utilizando-se o sinal de controle conforme a fig. 4.8.

4.2 - ALIMENTADOR DO ARAME

O alimentador do arame (fig. 4.13) é um equipamento com características eletro-mecânicas bastante avançadas para se conseguir um perfeito controle da velocidade do arame-eletrodo. Uma dessas boas características, se refere ao acendimento do arco, que é controlado através de circuitos especialmente desenvolvidos para todos os casos de modulação (tensão ou corrente). Em modo tensão constante, o cabeçote permite ainda a regulagem do tempo de defasagem entre o instante de parada do arame e o desligamento da energia.

De acordo com a concepção de funcionamento do sistema, o cabeçote opera em dois modos que devem estar compatibilizados com o tipo de modulação da fonte de energia. Na modulação tensão constante (VC), a velocidade do arame é imposta, a qual determina a corrente de soldagem. Nesta situação, o alimentador recebe a informação "velocidade do arame-eletrodo requerida", por duas vias possíveis: diretamente do potenciômetro localizado no painel, ou do microcomputador, via IMAC. Na modulação corrente constante (VV), a velocidade do arame-eletrodo pode ser regulada automaticamente fazendo-se a monitoração da tensão do arco e comparando-se com uma tensão de referência previamente fornecida. Isto é realizado através de um circuito denominado "controle externo", descrito em item subsequente. A referida tensão de referência pode ser ajustada no painel, no mesmo potenciômetro que no caso anterior atuava sobre a velocidade do arame-eletrodo, o que é possível graças a uma lógica adequada. Quando requerido, a tensão de referência pode provir do microcomputador, utilizando-se também



Fig. 4.13 - Alimentador do arame.

uma lógica adequada para tal. Pode-se também substituir o "controle externo" por um controle efetuado por "software" ou ainda utilizar o potenciômetro, anteriormente referido, para ajustar manualmente a velocidade do arame-eletrodo. Este último caso é especialmente utilizado para simular o controle sinérgico, referenciado em itens subsequentes, onde todas as variáveis de uma corrente pulsada estão em sincronismo (dependência) com a velocidade do arame-eletrodo.

Para a implementação de todas estas possibilidades faz-se uso de dois relês da IMAC e dois no alimentador. A fig. 4.14 apresenta um diagrama esquemático onde se representa toda a lógica de controle. Através de um terceiro relê da IMAC, é possível partir ou desativar o processo e com os dois relês, já citados, pode-se selecionar o elemento de atuação (microcomputador ou potenciômetro do painel) e ainda determinar o modo de operação (corrente constante (VV), tensão constante (VC), etc).

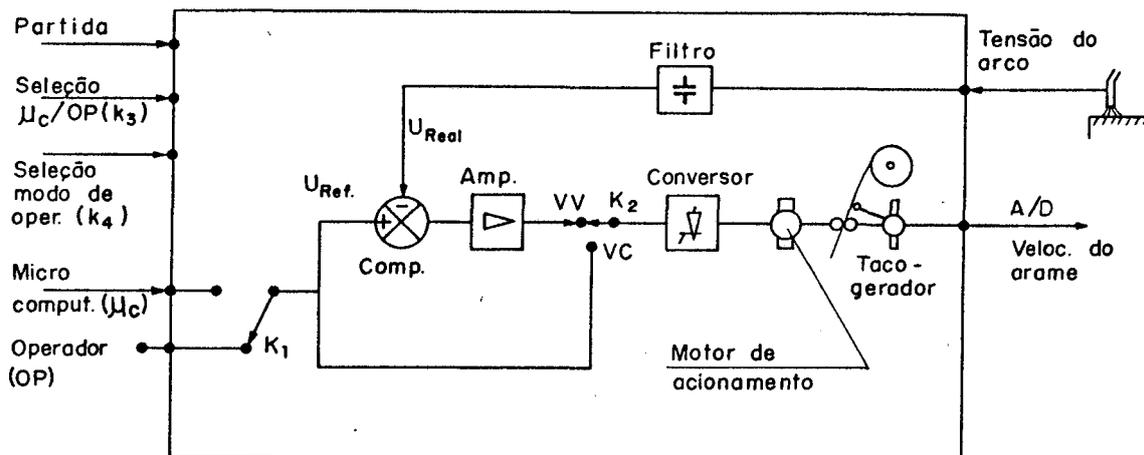


Fig. 4.14 - Diagrama do alimentador do arame; relês K1 e K2 são comandados pelos relês K3 e K4 da IMAC respectivamente.

Dentro do alimentador localiza-se ainda o transdutor da velocidade do arame e transdutores da corrente e da tensão, os quais são assuntos que serão abordados em outros itens.

4.2.1 - Controle Externo

O chamado "controle externo" é um circuito, que, baseado numa estipulada tensão de referência, controla a velocidade do arame-eletrodo em função da diferença existente entre esta tensão e a tensão do arco (fig. 4.15).

Para a execução adequada deste projeto [37] são necessários conhecimentos de todos os sub-sistemas que interagem no

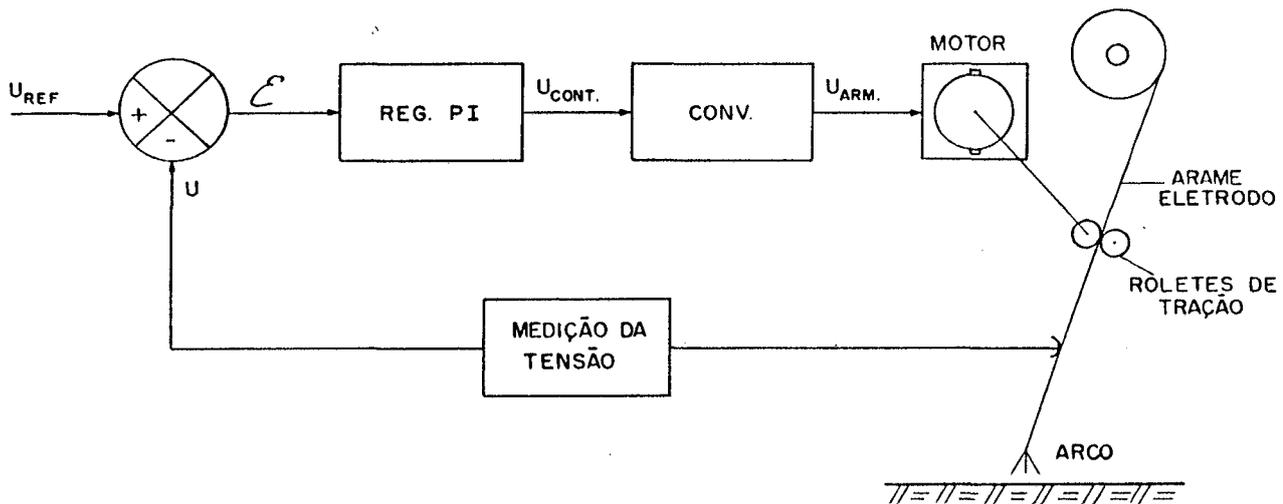


Fig. 4.15 - Diagrama de blocos da concepção inicial do controle externo.

processo, os quais são escassamente encontrados na literatura, principalmente funções de relacionamento dinâmico do arco. Como base do projeto foram utilizados relacionamentos estáticos entre velocidade do eletrodo e valores médios da tensão e corrente do arco [37].

Os primeiros ensaios realizados com o circuito revelaram uma forte dificuldade na abertura do arco, principalmente em correntes menores que 160 A. Esta dificuldade está intimamente ligada às características da fonte de energia transistorizada do sistema. Uma delas é que a corrente de curto-circuito é exatamente a mesma da corrente com arco aberto. Nestas condições, nenhuma facilidade se tem para a abertura do arco, como seria o caso se fosse utilizada uma fonte de corrente constante convencional, onde a corrente de curto-circuito é algo superior a corrente de arco aberto. Um agravante a isto é o fato do sistema de controle desta fonte ser baseado na alteração da tensão para que a

corrente seja mantida. Assim, em certas situações de regulação, a fonte com sua característica de alta velocidade de resposta, atua rapidamente na tensão, enquanto que acelerações ou desacelerações do motor do alimentador não chegam a se refletir de imediato na extremidade do arame, devido a influência de todo o conjunto mecânico. Um último fato que prejudicava a abertura do arco é que antes de se ter a ignição, sendo a tensão real a própria tensão em vazio da fonte de energia, tinha-se um sinal de erro bastante grande, fruto da diferença entre esta tensão e a tensão de referência previamente regulada no controle. Então, dependendo da distância inicial da extremidade do eletrodo até a peça, a velocidade do eletrodo poderia atingir valores muito acima das de regime para aquela corrente regulada. O curto-circuito nessas condições era tão intenso que mesmo com a atuação rápida do controle, não mais havia condições de ignição do arco.

Para contornar este inconveniente, foi introduzido um circuito adicional para limitar a velocidade de aproximação do eletrodo. Este circuito inibe a atuação do regulador enquanto a tensão estiver acima de um determinado nível indicador de circuito aberto. Tão logo este nível seja atingido, o circuito limitador deixa de atuar, cedendo vez ao regulador proporcional-integral (PI) utilizado (fig. 4.16). Em princípio, a velocidade de aproximação deveria ser dependente da regulação de corrente feita na fonte de energia, o que se queria evitar para não vincular o controle à fonte. Assim, embora a tensão de soldagem não tenha uma influência marcante sobre a velocidade de fusão do eletrodo, a mesma é regulada mantendo-se certa compatibilidade com a corrente, fato que foi aproveitado para administrar a velocidade de aproximação.

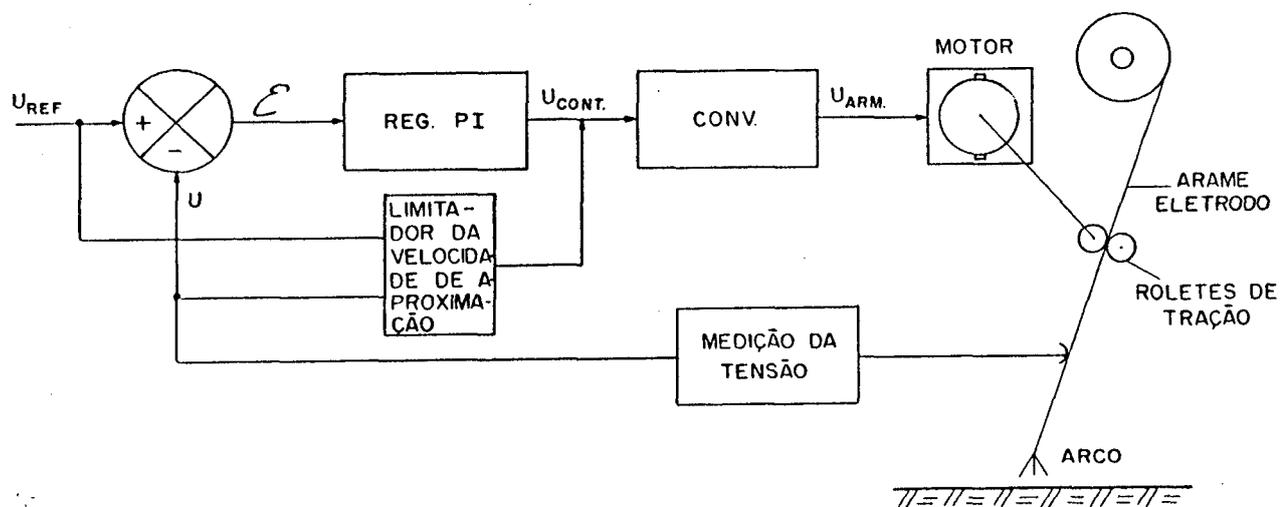


Fig. 4.16 - Diagrama de blocos do controle externo modificado.

A utilização desta velocidade de aproximação trouxe como consequência a necessidade de reduzir as constantes de tempo, tanto do regulador, quanto do filtro, pois com correntes mais elevadas o circuito precisava ser mais rápido para acompanhar a rápida velocidade de fusão do eletrodo. No entanto, isto veio novamente favorecer a ignição do arco com correntes mais elevadas em detrimento do bom funcionamento com correntes mais baixas, onde ocorriam sucessivos mergulhos do eletrodo após a liberação do circuito de aproximação.

Nestas condições, para contornar o problema das frequentes instabilidades de arco, principalmente na fase inicial do processo, desenvolveu-se um circuito aditivo ao controle que tem por finalidade limitar a velocidade máxima do arame em função da corrente e do diâmetro do arame utilizado. Com isto, melhorou-se acentuadamente a performance do controle. Contudo, para aplicação

com uma fonte com as características citadas, deve-se ressaltar que o espectro de tensões possíveis para o arco é bem menor do que a utilizada para o processo MIG/MAG convencional. A fig. 4.17

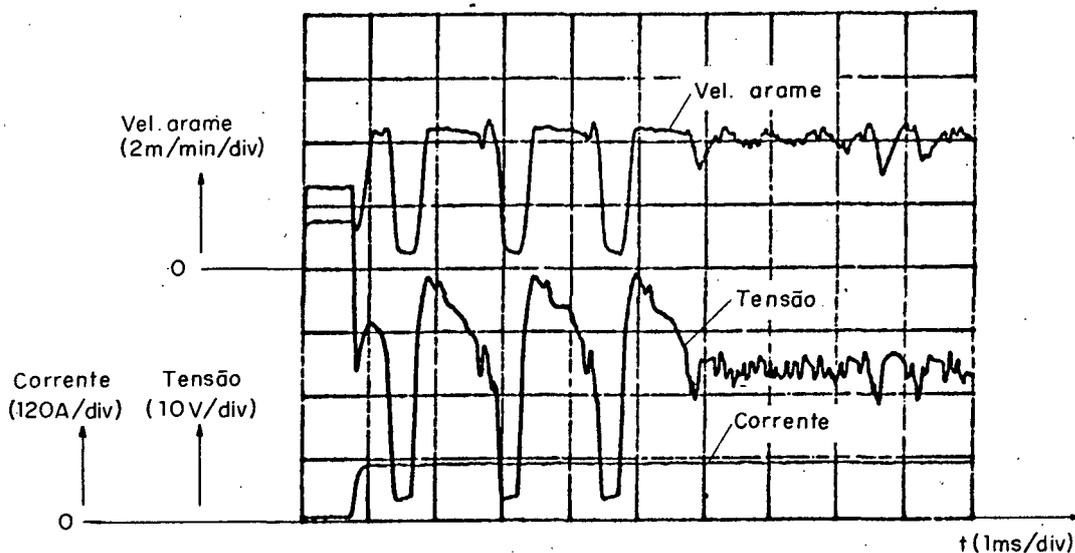


Fig. 4.17 - Oscilogramas de soldagem com fonte de imposição de corrente e controle externo.

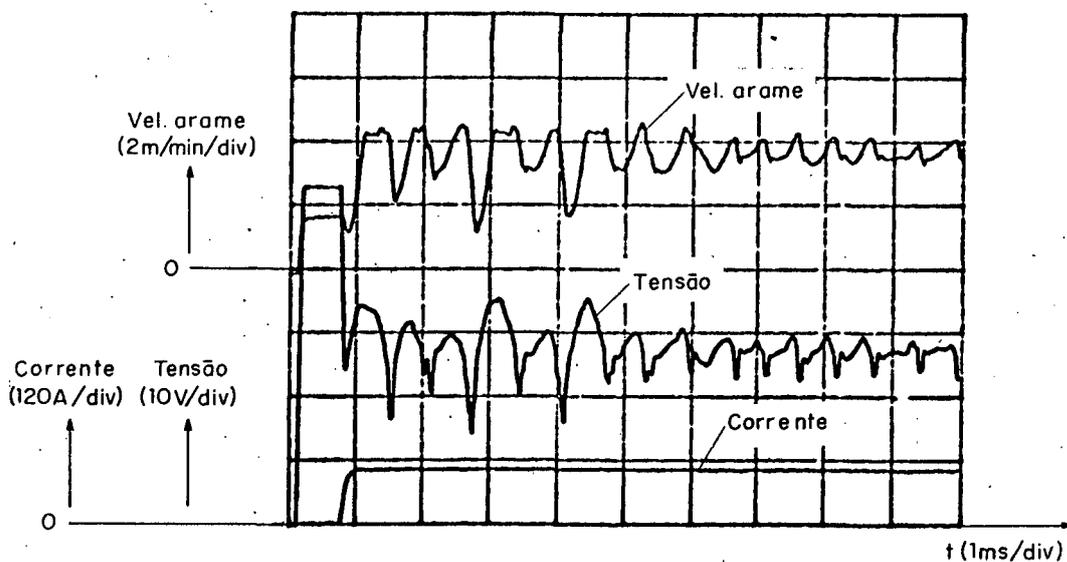


Fig. 4.18 - Idem fig. 4.17 com tensão média de 28V.

ilustra uma soldagem onde ocorreram vários curto-circuitos sucessivos até que a estabilidade fosse atingida. A fig. 4.18 retrata uma outra soldagem em que o acendimento do arco foi mais eficiente, onde a tensão de referência regulada foi a única alteração em relação ao caso anterior.

4.3 - DISPOSITIVO DE CONDUÇÃO DA PISTOLA DE SOLDAGEM

Utilizando um motor de corrente contínua com campo em derivação, correias sincronizadoras e caixa de engrenagens, foi construído um dispositivo para deslocamento da pistola de soldagem num curso de 800 mm (fig. 4.19).

O controle da velocidade de soldagem é realizado por um conversor que atua sobre o motor (fig. 4.20). Este conversor pode ser alimentado diretamente ou através da interveniência da IMAC, bem como, pode comandar a velocidade por ajuste direto em um potenciômetro em seu painel ou por intermédio do microcomputador, via IMAC. Para tanto, o canal da IMAC que comanda a velocidade de soldagem, precisa fornecer sinais negativos e positivos, na faixa de -10 a +10 V, para se cobrir a gama de velocidades entre 5 e 50 cm/min nos dois sentidos.

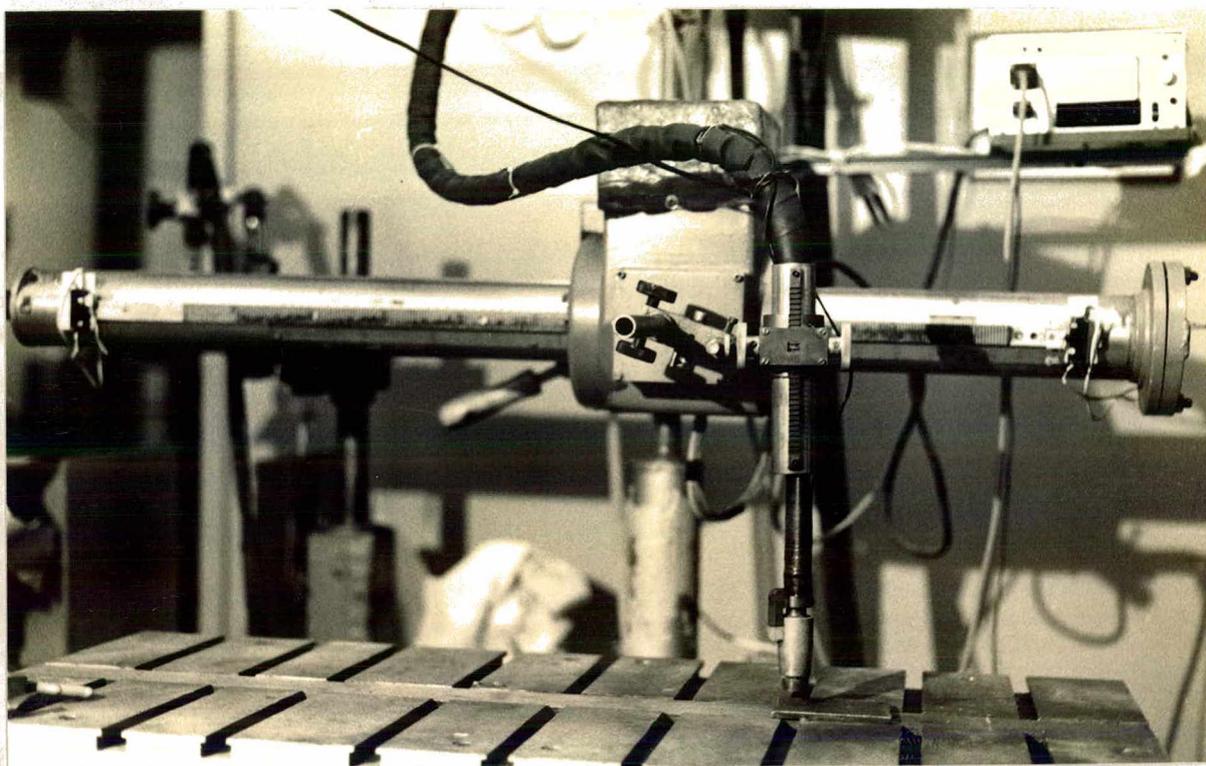


Fig. 4.19 - Dispositivo de condução da pistola de soldagem.

4.4 - INTERFACE MODULAR DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

Como já foi dito, as funções básicas da IMAC consistem na aquisição de sinais, temporização de eventos, ajuste de saídas analógicas e controle. Cada uma dessas funções são executadas por módulos que estão interligados através de um barramento e acondicionados dentro de um gabinete metálico (fig. 4.21).

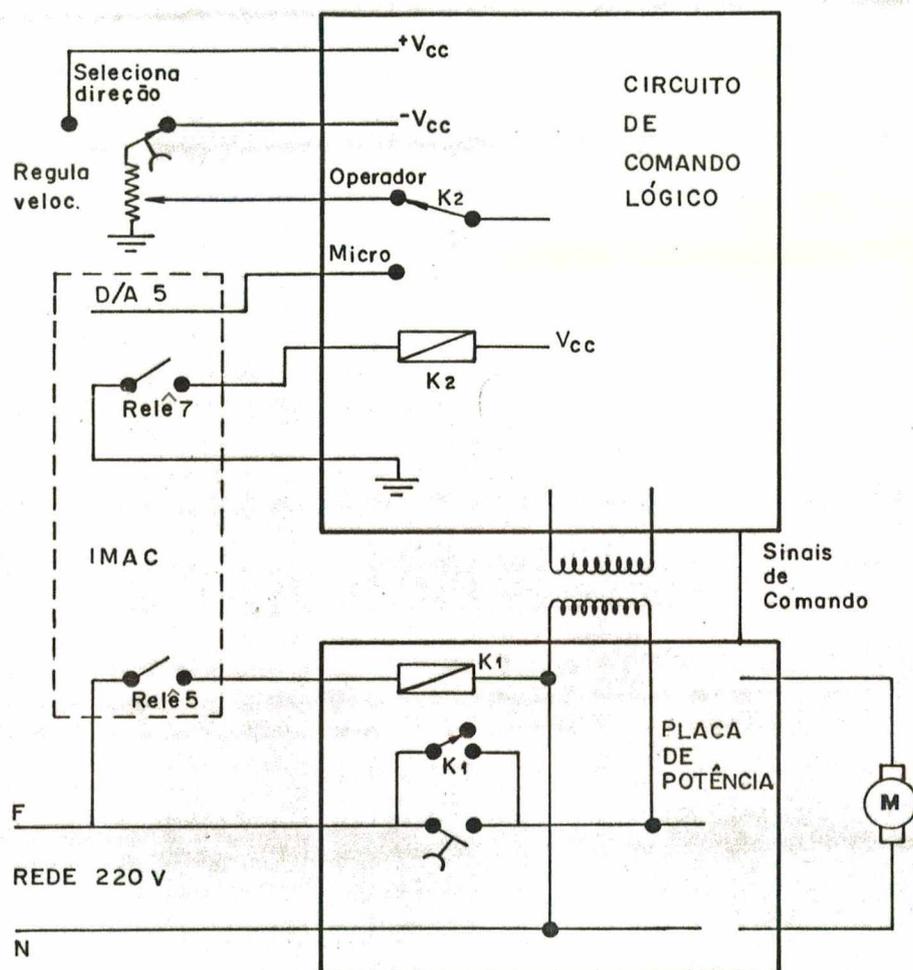


Fig. 4.20 - Esquema do conversor do dispositivo de condução da pistola de soldagem.

4.4.1 - Configuração dos Módulos

A fig. 4.22 apresenta os módulos da IMAC, com exceção do módulo fonte de alimentação, e suas vinculações com o sistema.

O módulo unidade central de processamento" - CPU - é

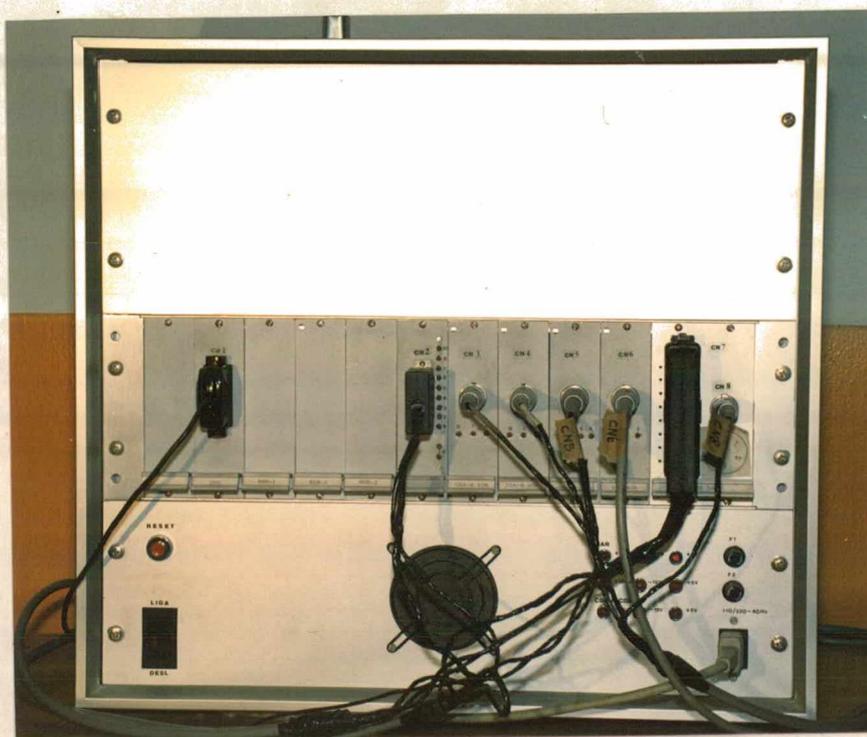


Fig. 4.21 - Interface modular de aquisição e controle - IMAC.

baseado no microprocessador Z80-A e é o responsável pelo controle dos demais módulos e comunicação com o microcomputador. Possui 4 kbyte de memória EPROM (2732), contendo o interpretador de comandos e as rotinas de monitoração. Tem também uma memória RAM de 8 kbyte. O "clock" é de 4 MHz e a taxa de comunicação serial é de 9600 bps.

O módulo conversor digital-analógico (D/A) é constituído de três sub-módulos com dois canais cada um, num total de seis canais, todos com resolução de 12 bit e tendo seus próprios conversores da Analog Device AD 7542. Cada canal pode ter uma ou mais funções que dependem de qual fonte está acoplada ao sistema, ou do tipo de modulação escolhida para a soldagem (fig. 4.22). Um dos canais é inclusive ligado ao sistema, utilizando-se dois relês do módulo de relês em consonância com o tipo de modulação

pretendido. Isto conduz a uma minimização da quantidade de canais necessários.

O módulo conversor analógico-digital (A/D), cuja função é converter os sinais analógicos em informações digitais, compatíveis com o microcomputador, é constituído basicamente por um conversor analógico-digital (A/D) de 12 bit, uma lógica de seleção de endereços e um multiplexador de 16 canais. O conversor utilizado é o circuito integrado da Analog Device, AD 574A com conversão por aproximações sucessivas. Possui "clock" e tensão de referência internos e tempo de conversão menor que 35 μ s. Embora possa operar também em modo bipolar com tensões entre -5 a + 5V, opera no sistema somente em modo unipolar na faixa de 0 a + 10V. Através de um dos sinais de controle (o sinal denominado AO) pode-se seleccionar entre uma conversão de 8 bit (AO = 1), que são mais rápidas, ou de 12 bit (AO = 0), que são mais lentas. Conforme as abreviaturas da fig. 4.22, as grandezas medidas são, na sequência de cima para baixo: corrente instantânea, corrente eficaz, corrente média, tensão instantânea, tensão eficaz, tensão média, velocidade do arame-eletrodo e posição do carro de soldagem.

O módulo relógio-temporizador-contador (RTC) é utilizado para medir a vazão dos gases argônio e CO₂ e para gerar a interrupção de monitoração. Na medição da vazão dos gases, é utilizado um sensor que gera pulsos com frequência proporcional a vazão.

O módulo relés é constituído de 8 relés com contatos reversíveis que servem para chavear sinais e acionar e desacionar os vários periféricos do sistema.

4.4.2 - Caracterização de "Software" Utilizado

Na configuração do projeto SISDATASOLDA, o microcomputador PC está conectado a IMAC por meio de uma interface serial RS232-C, enviando comandos e recebendo dados do sistema.

O "software" implementado na IMAC, funcionando segundo o diagrama de blocos da fig. 4.23, consiste em um programa armazenado em EPROM, que contém as rotinas de comunicação serial, as rotinas de acesso aos módulos e um programa interpretador de instruções. O programa interpretador utiliza as rotinas de comunicação para receber comandos e enviar dados ao microcomputador.

As rotinas de monitoração, que podem ser implementadas pelo usuário, possibilitando monitorar o sistema de forma dinâmi-

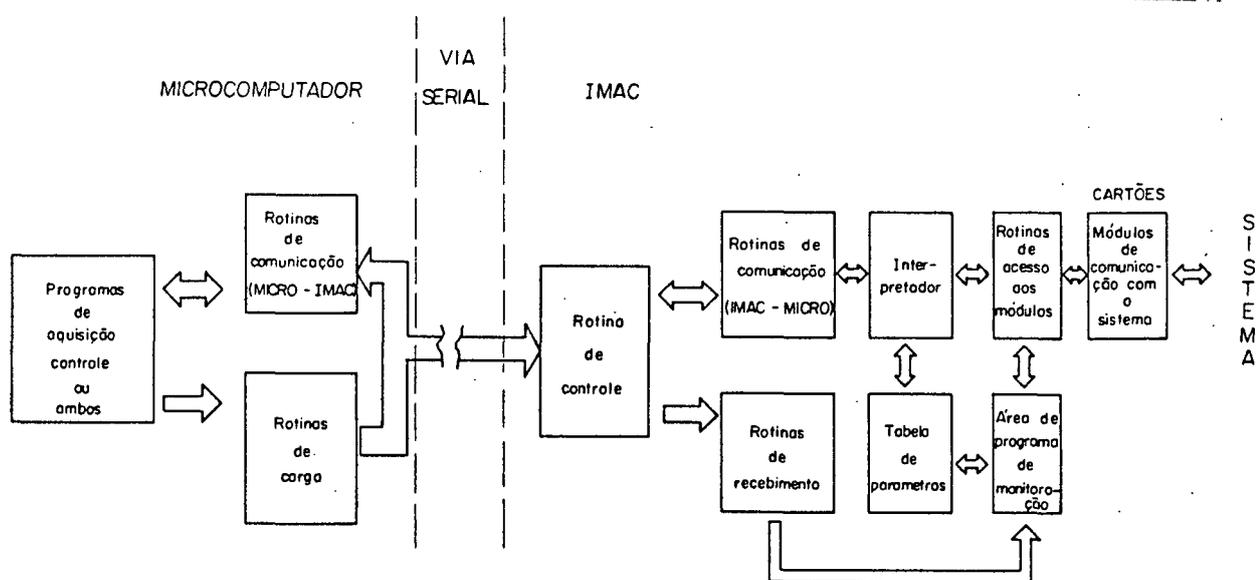


Fig. 4.23 - Diagrama de blocos de funcionamento do "Software" implementado na IMAC.

ca, são acessadas por meio de um sistema de interrupção, tornando sua execução totalmente transparente ao interpretador de comandos, que é o programa principal que realiza a comunicação e a aquisição de dados e controle de variáveis do sistema.

5. MEDIDORES DE GRANDEZAS ELETRO-MECÂNICAS

Tendo como objetivo central do desenvolvimento deste sistema microcomputadorizado de soldagem o conhecimento do processo MIG/MAG em suas características mais minuciosas, é de extrema relevância se dispensar cuidados especiais ao projeto dos medidores das grandezas envolvidas no processo. Salienta-se que se deseja a determinação de transitórios de corrente e tensão, como ficou já evidenciado no capítulo anterior, caso contrário, até o ajuste de certos sinais de comando não poderiam ser feitos adequadamente, prejudicando com isso a controlabilidade do processo.

Os principais problemas que ocorrem na medição das grandezas elétricas de soldagem se referem a interferências causadas por fortes campos eletro-magnéticos, que surgem da grande intensidade de corrente utilizada. Tais problemas não seriam tomados em conta em medições ordinárias, onde somente os valores médios ou eficazes são considerados.

Em sistemas complexos, como o desenvolvido neste trabalho, em que se tem acoplado várias partes, cumprindo funções associadas, surgem ainda problemas de compatibilidade de sinais e de isolamento.

Além das grandezas elétricas, faz-se a aquisição de duas grandezas de natureza mecânica dentro do escopo deste trabalho. A primeira e mais importante é a velocidade do arame, onde os problemas são de transformar o movimento linear do arame em um movimento de rotação, e, deste, a um sinal elétrico adequado à medição automática.

A segunda grandeza se refere a posição da pistola de soldagem que permite grande praticidade para a automatização dos experimentos.

5.1 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE E TENSÃO

Ao circuito de medição de corrente e tensão cabe fornecer os valores instantâneos, médios e eficazes destas grandezas. Estes sinais devem ao mesmo tempo ser compatíveis com a entrada do conversor analógico-digital da IMAC.

A primeira solução adotada para geração do sinal proporcional utilizava, como sensor de corrente, um "shunt", e a medição da tensão era feita diretamente dos pontos requeridos, isto é, bico de contato (fig. 1.2) e peça. Nestas condições, como mostra a figura 5.1, a referência da placa de medição, que por

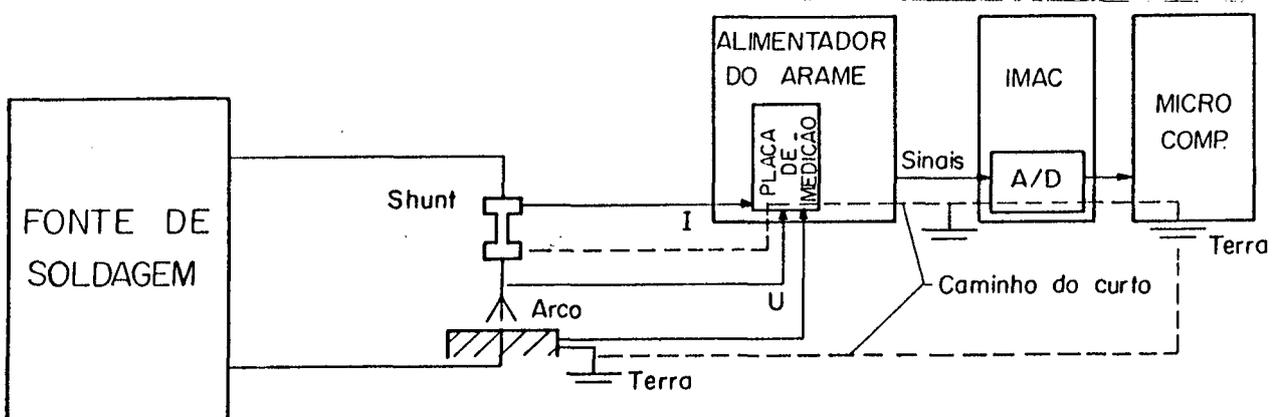


Fig. 5.1 - Diagrama esquemático do sistema de medição com transdutor não isolado mostrando o caminho de um possível curto-circuito.

sua vez, é a própria referência do conversor analógico-digital, é também o próprio terra da IMAC e do microcomputador. Isto conduz à possibilidade de um curto circuito, cujo caminho é mostrado pela linha tracejada. Este inconveniente pode ser evitado, se a instalação do "shunt" for no cabo negativo da fonte de energia, o que não foi possível porque se desejava instalar o sistema de medição no alimentador do arame, e aí só se tem acesso ao cabo positivo.

A solução final adotada foi a utilização de sensores galvanicamente isolados, usando o princípio do efeito Hall. A figura 5.2 mostra esquematicamente a situação do sistema de medição no contexto do sistema. Nestas condições, nenhum risco se tem de fechamento de curto-circuito, bem como, minimiza-se efeitos de interferências.

Sobre uma mesma placa de circuitos são montadas as unidades de tratamento do sinal da corrente e da tensão, cujas funções são as mesmas e, por isso, podem ser representadas pelo mesmo diagrama de blocos (fig. 5.3). A faixa de operação da tensão de 0 a 50 V e da corrente de 0 a 600 A são convertidas nas faixas 0 a 10 V, compatíveis com o conversor A/D da IMAC. Esta unidade de tratamento faz ainda a adaptação da polaridade do sinal para tornar viável a troca de polaridade da soldagem. Isto é realizado através da chave lógica e do inversor. Os sinais de corrente e de tensão instantâneos têm a seguir três destinos. Um deles são os canais do conversor A/D, destinados aos valores instantâneos, e os outros se constituem em unidades de tratamento para a obtenção dos valores médios e dos valores eficazes. Para obtenção dos valores médios são utilizados filtros ativos passa baixa de dois polos com frequência de corte de uma década abaixo

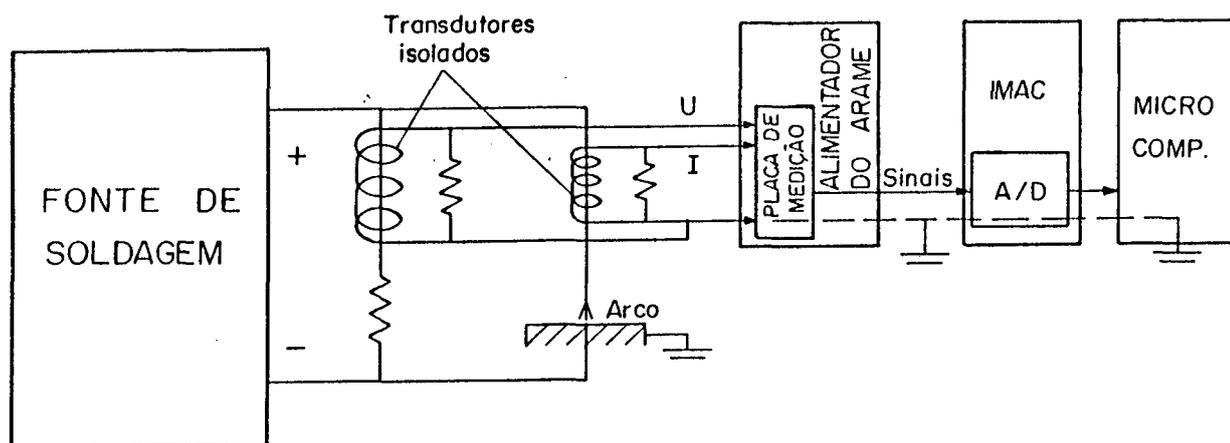


Fig. 5.2 - Diagrama esquemático do sistema de medição utilizando transdutores isolados.

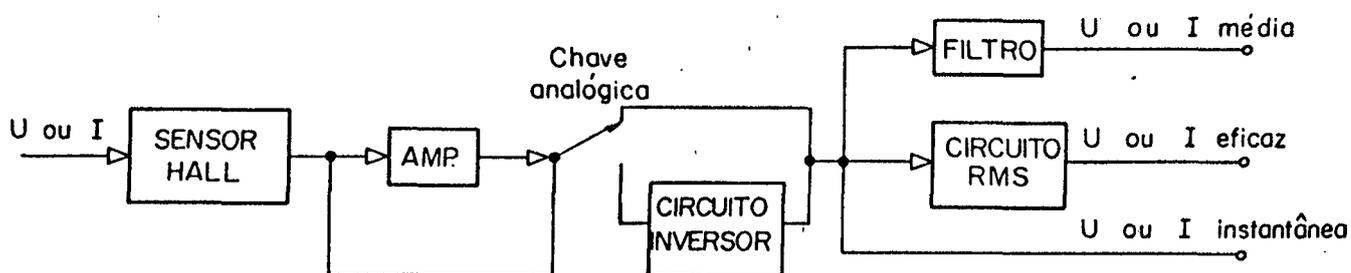


Fig. 5.3 - Configuração geral do sistema de medição.

de 50 Hz, que é uma frequência considerada mínima das variáveis elétricas. A razão da utilização dos filtros ativos em vez de passivos, deve-se ao fato de se obter com os ativos uma característica que fica independente da impedância de entrada da IMAC, bem como de qualquer outro circuito que possa necessitar dos valores médios.

Para obtenção dos valores eficazes é utilizado um circuito integrado (AD536A) [70] conhecido como "True rms - to - DC converter", isto é, conversor de valor eficaz (RMS) verdadeiro. O circuito é completado externamente por um capacitor CAV (fig. 5.4), que atua na constante de tempo para a determinação do valor

médio do quadrado da tensão de entrada, e pelos componentes R, C1 e C2, que formam um filtro de dois polos. Este tem por finalidade reduzir a ondulação da tensão de saída "US", já que se o capacitor CAV tiver um valor muito alto para se obter este efeito, ter-se-á um tempo de estabilização muito elevado.

O erro inerente do conversor é menor do que $\pm 0,2\%$ e, considerando os componentes externos, o erro adicional para uma faixa de frequência de 50 a 400 Hz não deve ultrapassar $\pm 0,1\%$.

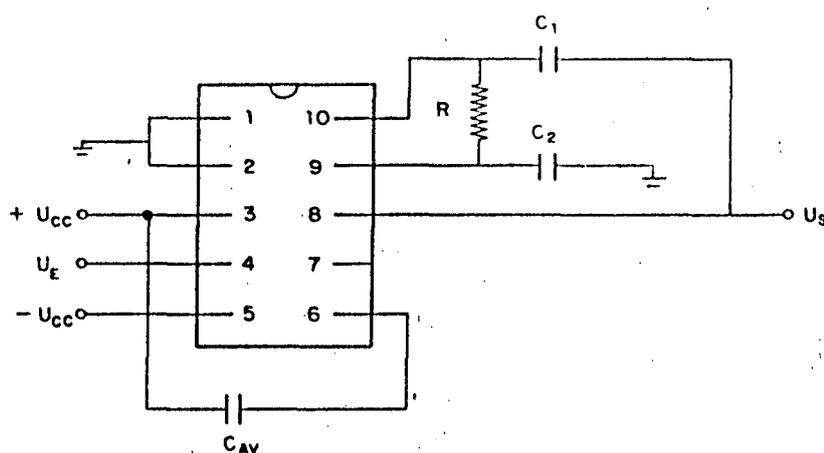


Fig. 5.4 - Configuração do circuito de determinação dos valores eficazes, utilizando o circuito integrado AD536A [70].

5.2 - DESEMPENHO METROLÓGICO DA MEDIÇÃO DE CORRENTE

A faixa de operação da medição da corrente foi projetada para 0 a 600 A. Nesta faixa de corrente, não se teve disponibilidade de um padrão para calibração com erro menor do que o sensor Hall utilizado, que, segundo as especificações do fabricante, apresenta um erro máximo de 1% da corrente nominal de 300 A rms. Por isso, já se tem de admitir que o sistema de medição de

corrente não terá condições de ter erros abaixo desse valor.

Para determinar os erros aleatórios e sistemáticos das outras unidades do sistema de medição, incluindo o conversor analógico-digital, foi montado um voltímetro digital de 6,5 dígitos em paralelo com o resistor de onde é tirado o sinal de tensão proporcional a corrente, que circula no secundário do sensor Hall. É este mesmo sinal de tensão, que representa o valor da corrente, que é tratado na placa de medição.

Um procedimento computadorizado foi adotado para se fazer a calibração com a determinação da função de transferência em toda a faixa de operação. Neste mesmo procedimento já se executa a determinação da função de transferência de comando. Para tanto, utilizando-se um programa, transmite-se valores na faixa de 0 a 4095, correspondentes aos valores binários de 12 bit no conversor digital-analógico, que controla a corrente. Em cada um desses valores procede-se a leitura no voltímetro, indicativa da corrente (um fator constante, correspondente ao valor do resistor e da relação de transformação, converte o sinal de tensão no valor da corrente). Este valor é fornecido, via teclado, ao microcomputador, que ao recebê-lo começa a fazer sucessivas leituras dos canais da corrente instantânea, média e eficaz. De cada uma dessas grandezas são calculados os erros aleatórios e sistemáticos que resultaram em incertezas de medição de $\pm 0,32$, $\pm 0,17$ e $\pm 0,23$ A. Estes valores representam, para a mesma corrente nominal do transdutor de 300 A, erros relativos de $\pm 0,11$, $\pm 0,06$ e $\pm 0,08\%$ para a corrente instantânea, média e eficaz, respectivamente. Em vista destes serem muito pequenos, pode-se admitir que o erro total do sistema de medição da corrente, seja o próprio erro do sensor Hall, que é de $\pm 1\%$.

O sinal para comandar a fonte de energia em corrente foi calibrado conjuntamente, obtendo-se também nas mesmas condições um erro máximo de $\pm 1\%$.

Na calibração do circuito de aquisição com conversão em 8 bit, o erro é maior como consequência da resolução ter valor menor. Neste caso, para o canal da corrente instantânea, que é o único a trabalhar com esta resolução, se tem um erro de $\pm 1,8\%$.

Foram feitos ensaios também para se determinar o desempenho metrológico dinâmico, os quais consistiram na comparação entre o sinal proveniente de um "shunt" e do sensor Hall. Com a ajuda de um osciloscópio de memória digital, pode-se, mediante um ajuste de ganho, sobrepor ambos os sinais em várias situações de soldagem. Foi constatado que a resposta dinâmica era a mesma. Nestas condições, se é levado a aceitar os dados de catálogo do sensor Hall que indicam um tempo de resposta inferior a $1 \mu s$ e uma taxa de acompanhamento do sinal (di/dt) superior a $50 A/\mu s$.

Para a calibração de comando das correntes de pulso e de base, foi utilizado um osciloscópio para ler o sinal de tensão, correspondente a corrente, nos terminais do mesmo resistor, citado anteriormente. Os erros destas funções de transferência são também de $\pm 1\%$.

5.3 - DESEMPENHO METROLÓGICO DA MEDIÇÃO DA TENSÃO.

Os pontos para o sensoreamento da tensão de soldagem, foram escolhidos de modo a que o valor adquirido represente o

mais aproximadamente possível a tensão do arco. Todavia, o ponto mais próximo do ânodo, ainda viável de se fazer contato elétrico é o bico de contato. Nestas condições, a tensão lida sempre incorporará a parte referente ao comprimento do eletrodo.

O sensor Hall utilizado, foi um destinado a medir corrente, transformado em sensor de tensão. A rigor, o que ele faz na realidade é medir a corrente, que circula em uma derivação do circuito de soldagem, representado na fig. 5.2. Esta corrente, sendo muito pequena, na faixa de 1 a 30 mA, praticamente não influi na corrente total de soldagem. Este sinal de corrente, por último, é novamente transformado em sinal de tensão.

Para o levantamento das funções de transferência da tensão, a fonte de energia é posicionada na modulação tensão. A sequência de procedimento é idêntica ao caso da corrente, a menos da consideração do padrão, que agora é o voltímetro digital HP de 6,5 dígitos, que faz a leitura direta da tensão. As incertezas de medição da tensão instantânea, média e eficaz são de $\pm 0,12$, $\pm 0,026$ e $\pm 0,025$ V, respectivamente, o que dá erros relativos em tensões nominais de 25 V de $\pm 0,5$, $\pm 0,1$ e $\pm 0,1\%$. Já na medição da tensão em aquisição rápida, se tem erros maiores em virtude da menor resolução obtida (0,2 V), tendo-se, na mesma tensão nominal de 25 V, um erro relativo de $\pm 0,8\%$.

A calibração do sinal de comando da tensão é feita com base na fixação de uma carga (corrente), porque esta tem alguma influência sobre a primeira, já que a característica estática com modulação em tensão não é perfeitamente constante. Para o caso das duas fontes utilizadas, o valor escolhido para a carga foi de 100 A.

Para se verificar o desempenho metrológico do ponto de vista de resposta dinâmica, foi adotada a mesma metodologia usada no caso da corrente. Em situações bastante adversas do que se tem normalmente em soldagem, se registrou simultaneamente o sinal de tensão fornecido pelo transdutor Hall e o captado diretamente, conforme fig. 5.1. Como se observa na fig. 5.5, o valor dU/dt do transdutor não tem diferença do valor real. Todavia, se observa uma atenuação do sinal quando se trata de picos de tensão muito estreitos, na faixa dos 15 μs no ponto, onde o sinal do transdutor deixa de acompanhar o valor verdadeiro, indicado pelas setas na citada figura. Assim, pode-se prever, que picos de tensão com largura nesta ordem de grandeza serão atenuados pelo sistema de medição. Também haverá uma pequena atenuação, indicada igualmente na figura, no instante do estabelecimento de um curto-circuito. O primeiro fenômeno pode ser atribuído a uma relativa grande

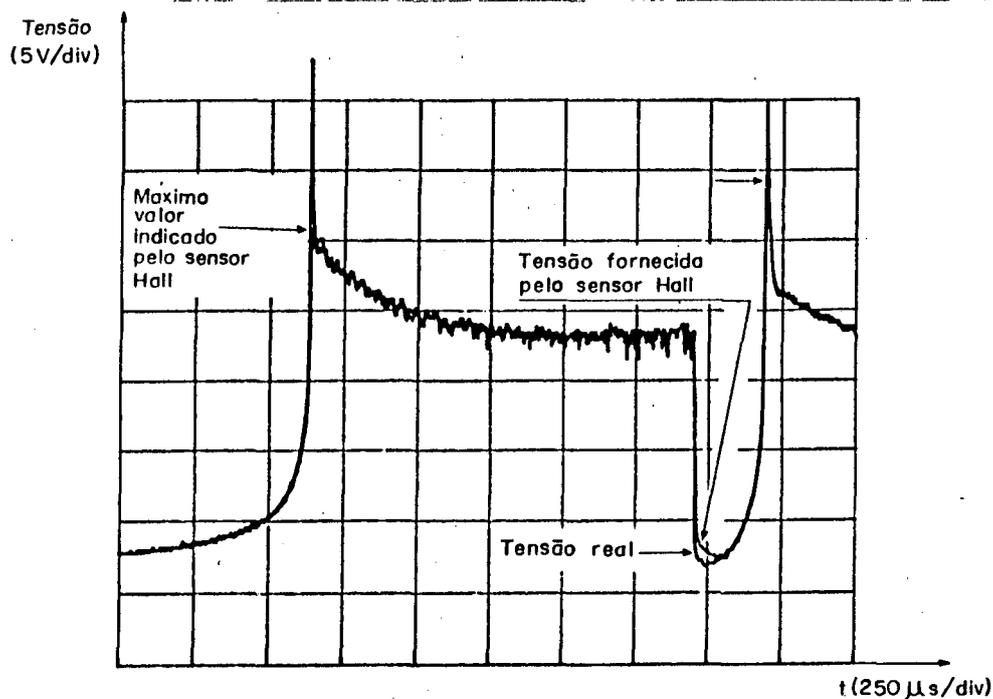


Fig. 5.5 - Comparação entre o sinal da tensão do arco medido diretamente e medido pelo sensor Hall.

constante de tempo que se obteve devido a indutância provocada pelo enrolamento do primário do transdutor Hall. O segundo, pode ser atribuído ao fato de que, tendo-se uma tensão muito baixa de soldagem no curto-circuito, se obtém uma corrente no primário do transdutor também muito pequena e isto faz com que a componente de "offset" no secundário, que tem sentido contrário à corrente principal, tenha uma influência que não é notada em outras situações.

5.4 - MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DO ARAME-ELETRODO

Uma das medições de maior importância do sistema é a da velocidade do arame-eletrodo, pois todo o processo MIG/MAG gira em torno de relacionamentos com esta variável.

Pela necessidade de atuação em tempo real, não foi dispensada uma maior atenção para se desenvolver um sensor do tipo digital, em vista dos analógicos estarem sempre com o valor atualizado. Assim, foi utilizado um tacogerador com uma sensibilidade de 7 V por 1000 rpm, com erro máximo de 0,1%, válida entre 100 e 6000 rpm.

Para que o tacogerador produza um sinal proporcional à velocidade do arame-eletrodo, este, por efeito de atrito aciona uma pequena roda acoplada ao eixo daquele. O diâmetro dessa roda não pode ser muito pequeno a fim de se evitar escorregamento entre esta e o arame. Com um diâmetro estipulado de 32 mm obtém-se, numa velocidade de arame-eletrodo de 1,5 m/min, considerada míni-

ma, uma rotação de 14,93 rpm. Isto representa uma faixa de trabalho fora das especificações do tacogerador, o que traria uma falta de confiabilidade do transdutor. Assim, embora com prejuízos causados por uma maior carga a ser vencida pelo transdutor, foi necessário a ampliação de rotação, através de polias, por um fator de 6, que ainda fica fora da faixa especificada pelo tacogerador.

Para o levantamento das funções de transferência de aquisição e comando, também foi desenvolvido um procedimento computadorizado, visando automatizar a operação. Esta calibração utiliza como instrumento padrão um frequencímetro, que gera um sinal pulsado proporcional à velocidade, sendo enviado a um dos canais do módulo RTC da IMAC. O sensor é composto de uma roda de raio 15,9 mm acoplada a um disco com 50 fendas e um foto-detector, que tem por finalidade detectar os impulsos produzidos pelas fendas do disco. Assim, através de equacionamento matemático chega-se a uma fórmula de correlação entre a velocidade do arame e a frequência dos pulsos.

A resolução obtida na função de comando foi de 0,005 m/min e a incerteza de medição de $\pm 0,093$ m/min. Para aquisição, a resolução foi de 0,004 m/min e a incerteza de medição de $\pm 0,130$ m/min.

Estes resultados não comprometem o controle do processo, porém podem ser melhorados, utilizando-se transdutores mais compatíveis com a rotação, que se pode obter a partir da velocidade tangencial do arame. Isto será realizado em etapa posterior a este trabalho.

6. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DO ARCO COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

Embora novas versões do processo MIG/MAG já tenham sido desenvolvidas para atender soldagens na mesma faixa do sistema clássico com transferência por curto-circuito, é esta ainda a opção mais utilizada devido a inúmeros fatores. Alguns deles são: a tradição, o relativo baixo custo do equipamento e o alto grau necessário de conhecimento dos operadores para selecionar adequadamente as variáveis, no caso das versões mais modernas.

Devido a isto, é interessante ainda alguma dedicação a este procedimento convencional, uma vez que, apesar de antigo, foi estudado até hoje com critérios pouco científicos, utilizando-se instrumental de aquisição de dados que não tinham condições de oferecer informações mais detalhadas de suas variáveis. Neste capítulo será introduzido uma metodologia, na qual o sistema desenvolvido desempenha suas funções de comando de variáveis e de análise de desempenho do procedimento de soldagem utilizado.

6.1 - INTERPRETAÇÃO DE ESTABILIDADE DE ARCO

O termo estabilidade é utilizado em soldagem para designar genericamente condições de bom ou de mal funcionamento do arco voltaico, sem no entanto haver qualquer critério comparati-

vo. Além disso, o mesmo termo é utilizado tanto para abordar situações de equilíbrio médio entre a velocidade do arame-eletrodo e a velocidade de fusão do mesmo, quanto para designar comportamentos dinâmicos.

6.1.1 - Critério dos Soldadores

Na versão convencional do processo MIG/MAG utiliza-se fontes do tipo tensão constante, tendo-se a corrente como uma variável dependente da velocidade do arame-eletrodo. O nome tensão constante refere-se ao valor médio da mesma, pois, a cada curto-circuito, seu valor desce a aproximadamente zero, enquanto que a corrente cresce rapidamente a valores que podem atingir quatro vezes o valor médio (fig. 6.1). Estes curto-circuitos correspondem ao instante em que as gotas fundidas do eletrodo tocam a peça, ocasionando a sua transferência, com a produção de um ruído característico.

Este ruído é utilizado por soldadores experientes para regular as variáveis de soldagem. Um ruído com pequeno período e mais constante indica a transferência em pequenas gotas e de forma uniforme, produzindo um cordão de solda de melhor qualidade. Todavia, a capacidade do ouvido não pode chegar a estabelecer diferenças nítidas entre várias situações possíveis, e tão pouco é possível quantificar para comparação com um outro soldador.

6.1.2 - Critério Proposto

Pela aquisição e tratamento dos oscilogramas de corrente e tensão, conforme a fig. 6.1, utilizando-se um algoritmo adequado, propõe-se alguns parâmetros numéricos como indicativos de maior ou menor estabilidade de arco [13]. O fundamento da análise é baseado na regularidade dos oscilogramas, que é retratada através da emissão de histogramas de três diferentes parâmetros tirados dos oscilogramas (fig. 6.2): picos de corrente, períodos de transferência e tempos de curto-circuito.

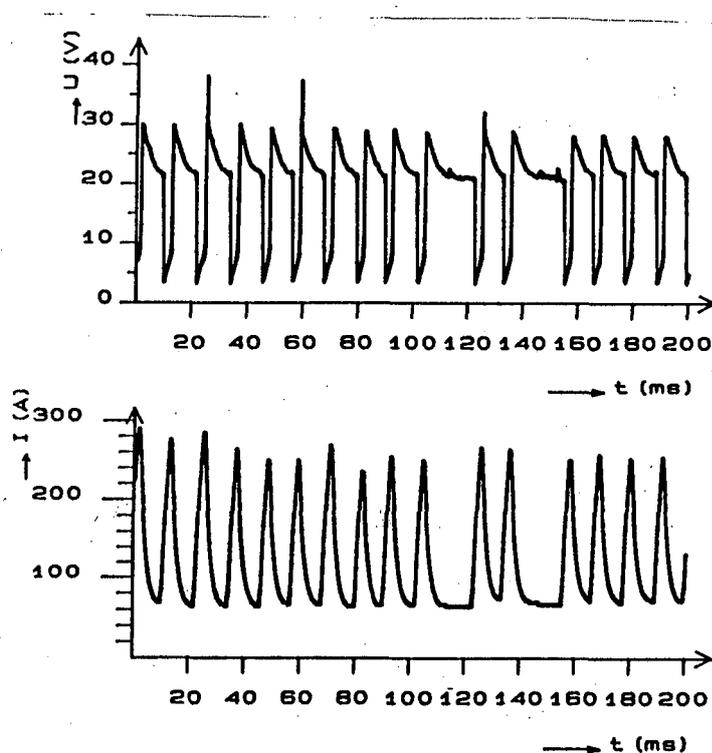


Fig. 6.1 - Oscilograma de soldagem com tensão de 18 V, taxa de crescimento da corrente de 71 A/ms, velocidade do arame de 4 m/min, gás corgon 18 e arame ER70S-6 de 1 mm.

Para a realização dos histogramas dos picos de corrente, é solicitado do operador o fornecimento de uma corrente limiar acima da qual o algoritmo deva considerar pico. Este valor, no caso presente, deverá ser escolhido entre a corrente média e a corrente eficaz. Os picos são então agrupados em conjuntos de 5 em 5 A. O valor médio do conjunto de maior ocorrência é considerado o pico de referência. Com base nele é calculado o desvio padrão dos picos de corrente, que é um parâmetro indicativo de estabilidade do arco.

Os histogramas dos períodos de transferência são obtidos a partir dos oscilogramas da tensão, onde é atribuído o valor de 15 V como limiar entre o arco aberto e curto-circuito. Estes intervalos de tempo são agrupados em conjuntos de 2 em 2 ms. O

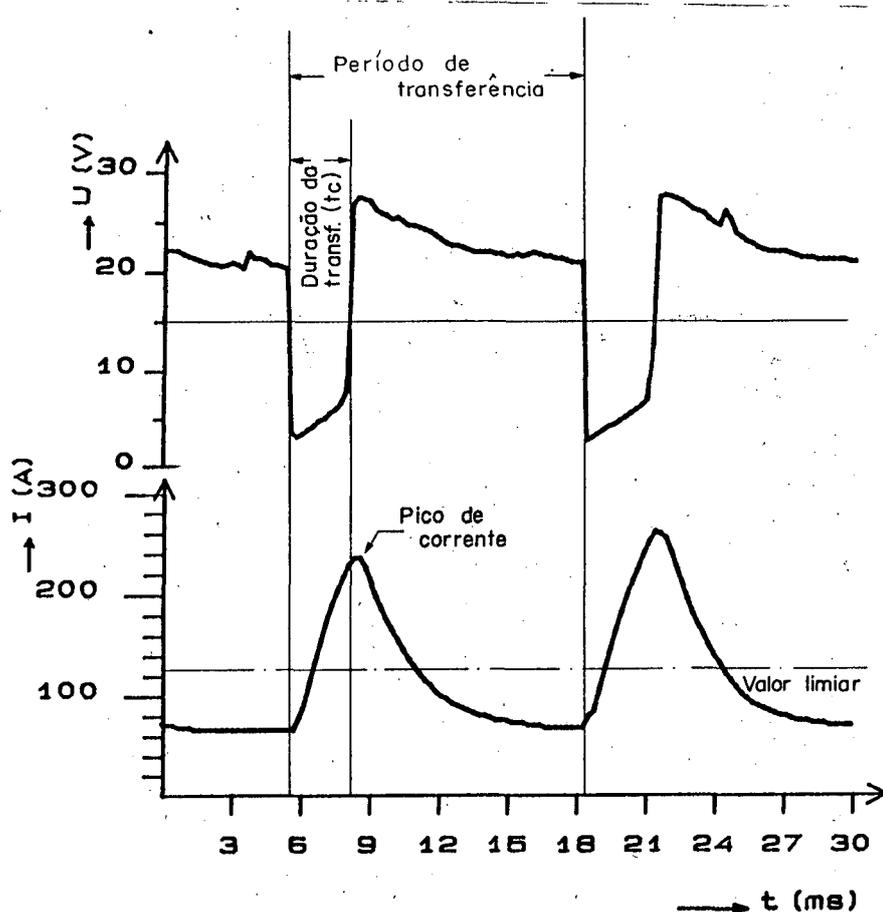


Fig. 6.2 - Definição dos parâmetros dos oscilogramas.

valor médio do conjunto de maior ocorrência é considerado o período de referência de transferência. Com base nele, é calculado o desvio padrão dos períodos de transferência que é o segundo parâmetro indicativo de estabilidade de arco.

Os histogramas dos tempos de curto-circuito, t_c , têm também como tensão limiar 15 V. Os intervalos são agora agrupados em conjuntos de 0,25 em 0,25 ms. O tempo de referência é também determinado como nos casos anteriores, sendo igualmente, o desvio padrão utilizado como parâmetro indicativo de estabilidade do arco.

6.2 - PROCEDIMENTO COMPUTADORIZADO PARA DETERMINAÇÃO DE ESTABILIDADE DE ARCO

Este procedimento é viabilizado através do programa SOLTE (fig. 6.3), que comanda o processo MIG/MAG com modulação em tensão. Ele foi concebido para realizar o experimento de maneira automática. Suas funções são executadas pelos seguintes subprogramas, cujos nomes aparecem na estampa principal do programa:

a) "Fornecimento de parâmetros": embora não seja relevante ao controle do processo, ele é importante em termos de documentação, pois registra dados como o gás de proteção, tipo e diâmetro do arame-eletrodo, distância contato-peça, etc.

b) "Fornecimento de variáveis": é o responsável pelo controle do processo, pois através dele, são fornecidas a tensão de soldagem e a velocidade do arame-eletrodo.

c) "Posicionamento e direção": é o que faz o posicionamento automático da pistola de soldagem sobre o corpo de prova e o que determina a direção de soldagem desejada, direita ou esquerda.

d) "Início da soldagem": é neste subprograma que é solicitado do operador, qual o tipo de aquisição que deve ser realizado. Existem 3 opções possíveis:

- leitura simultânea de corrente e tensão, onde se tem 25000 valores de cada variável num tempo de aquisição total de aproximadamente 6 s (frequência de aquisição de 4,2 kHz);

- leitura somente de corrente, onde se tem 50000 valores desta grandeza num tempo total de aproximadamente 4 s (frequência de aquisição de 13 kHz);

- leitura somente de tensão, onde se tem 50000 valores desta grandeza num tempo total de aproximadamente 4 s (frequência de aquisição de 13 kHz).

e) "Tratamento dos dados": somente após ter sido realizada a aquisição dos dados é que o programa aceita esta opção. Este subprograma é o responsável pelo traçado de oscilogramas no vídeo em qualquer escala de tempo desejada. Do mesmo modo, pode traçar os histogramas no tempo correspondente dos oscilogramas mostrados ou em qualquer tempo desejado. Além disso, ele também executa o translado dos gráficos do vídeo do microcomputador para a impressora e plotadora.

Para se comprovar a performance do sistema de soldagem junto com este procedimento, foram realizados ensaios de simulação com uma forma de onda conhecida, estabelecida por um gerador de funções. Uma onda triangular foi escolhida por ser ela a que apresenta maior dificuldade de detecção do valor de seu pico

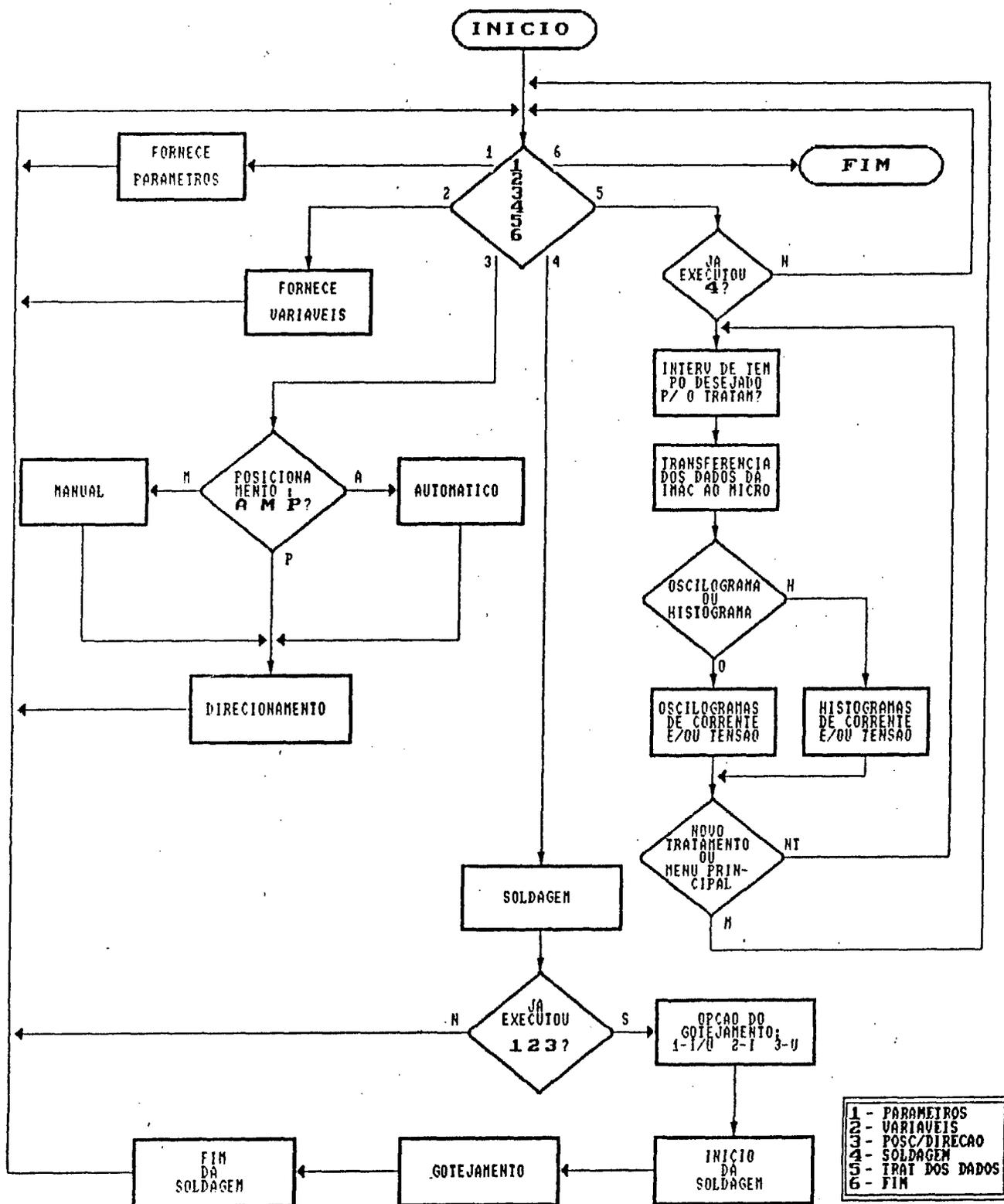


Fig. 6.3 - Diagrama de blocos simplificado do programa SOLTE.

quando a frequência é relativamente alta em comparação com a frequência de aquisição. Assim, apesar do sinal do gerador de funções apresentar picos de mesmo valor, na ordem de 286 A e 200 Hz, a aquisição do mesmo pela opção 1, onde o conversor analógico-digital é chaveado para ler alternadamente a corrente e a tensão, revela uma inconstância dos picos, conforme é mostrado na fig. 6.4. Tal inconstância é numericamente ressaltada pelo alto desvio padrão dos picos, como é mostrado no histograma da fig. 6.5. Já o mesmo sinal lido, utilizando-se da opção 2 de aquisição, onde se tem o conversor analógico-digital dedicado somente ao canal da corrente, apresenta um desvio menor, como é possível ver através

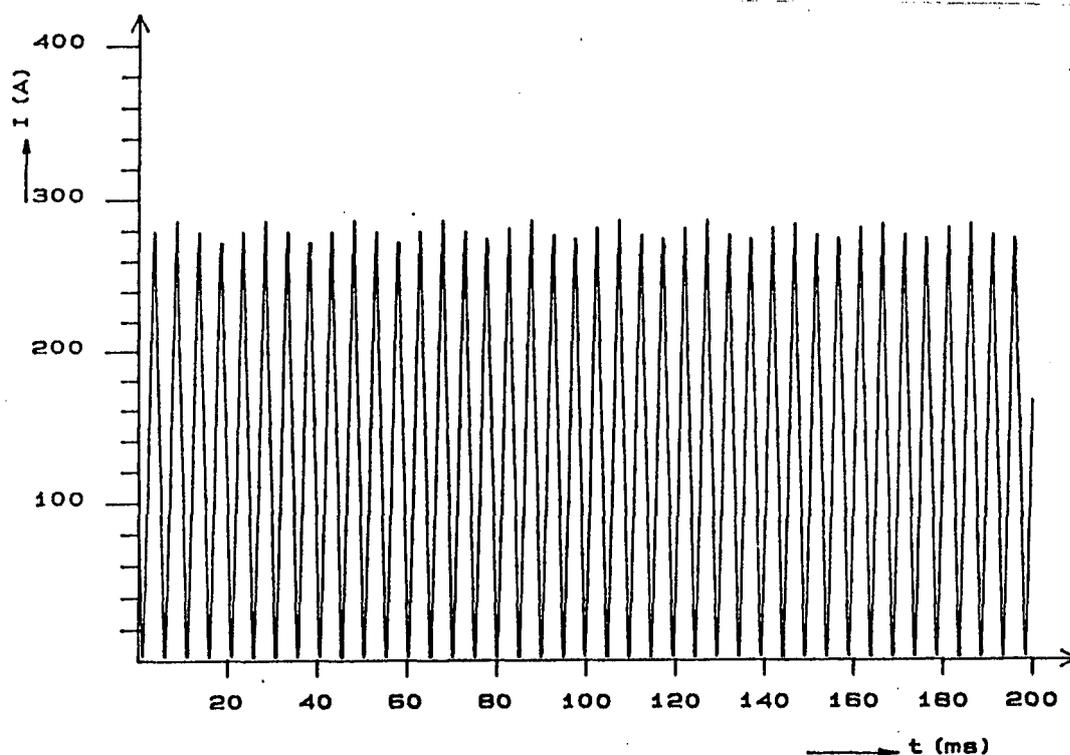


Fig. 6.4 - Oscilograma de uma onda triangular de 200 Hz lida pelo sistema de aquisição a uma frequência de 4206 Hz (opção 1).

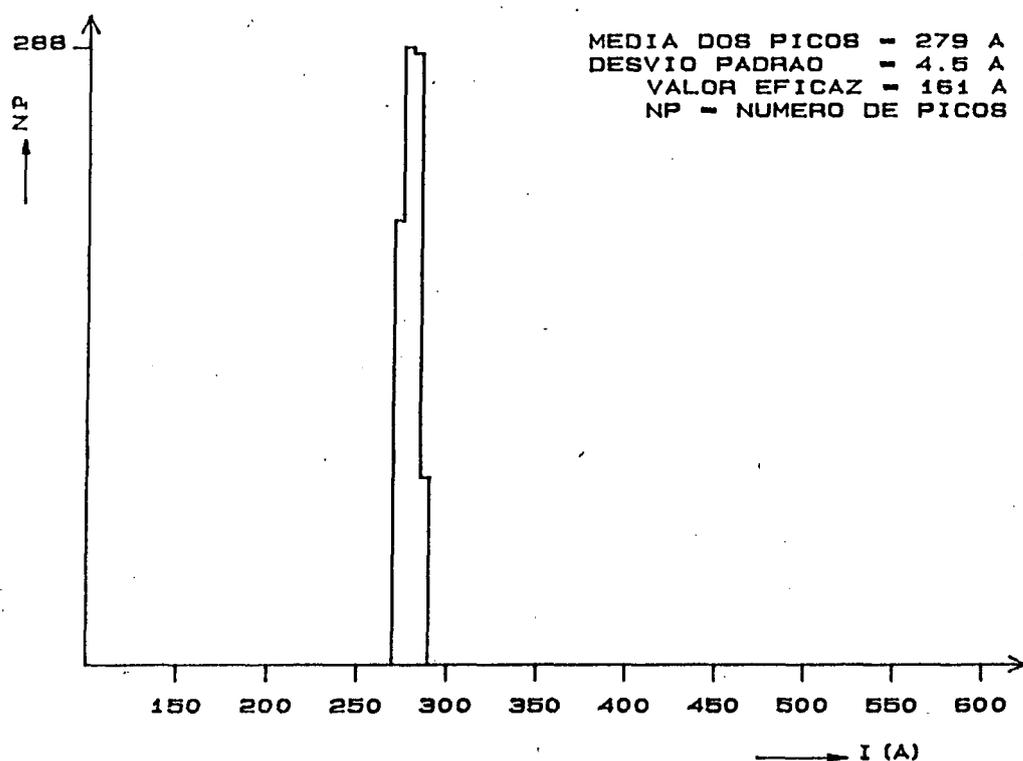


Fig. 6.5 - Histograma dos picos de corrente conforme o oscilograma da fig. 6.4.

das figuras 6.6 e 6.7. A medida que a frequência do sinal diminui, a diferença entre os desvios padrão obtidos pela opção 1 e opção 2 vão se aproximando (em 100 Hz: 1,8 A para a opção 1 e 1,2 A para a opção 2) até que em 25 Hz não há sensível diferença entre elas. Como em soldagem com transferência por curto-circuito, a frequência destes não ultrapassa os 100 Hz, conclui-se que a aquisição alternada da corrente e tensão (opção 1) não compromete o tratamento estatístico dos dados, pois o desvio padrão de corrente é bem menor que a resolução de aquisição em 8 bit, que é de 2,35 A.

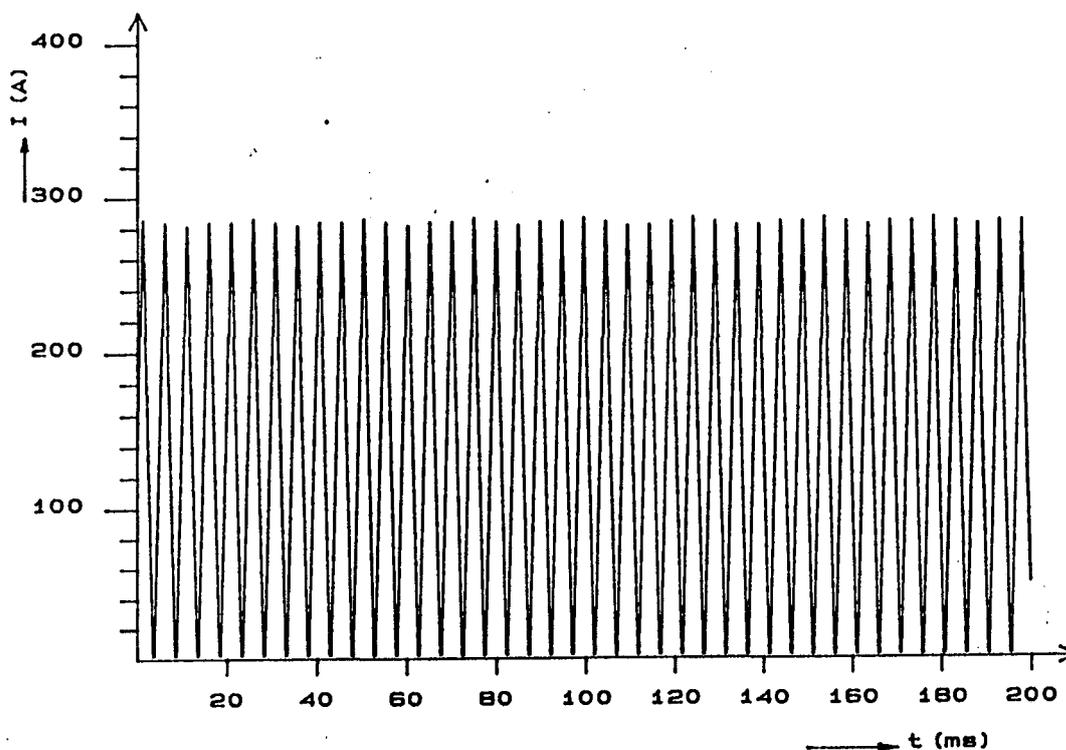


Fig. 6.6 - Oscilograma de uma onda triangular de 200 Hz lida pelo sistema de aquisição a uma frequência de 13 kHz (opção 2).

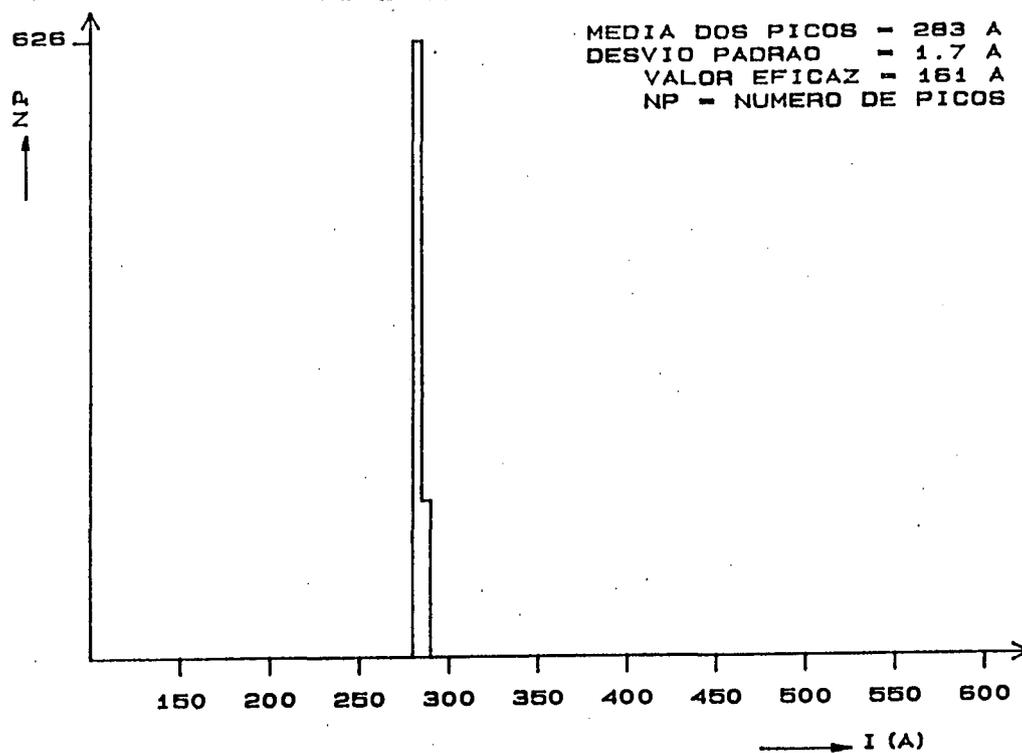


Fig. 6.7 - Histograma dos picos de corrente conforme o oscilograma da fig. 6.6.

6.3 - ESTABILIDADE DE ARCO EM FUNÇÃO DA TENSÃO E DA DINÂMICA DA FONTE

Várias são as variáveis e parâmetros que influenciam a estabilidade do arco. Entretanto, as variáveis críticas para estabelecer uma condição adequada de soldagem em uma dada velocidade do arame-eletrodo e velocidade de soldagem são a tensão e o comportamento dinâmico da fonte (indutância). Ambas as variáveis têm influência marcante sobre o número de curto-circuitos e, conseqüentemente, na quantidade de material transferida em cada um deles. A indutância, entretanto, tem uma particularidade de atuação; ela é responsável pela velocidade de crescimento da corrente no instante em que ocorre o curto-circuito e, por isso, agindo acentuadamente na força de Lorentz (efeito Pinch), que atua sobre a gota metálica em transferência. A influência marcante da velocidade de crescimento da corrente sobre essa força é devido ao fato de que a relação de dependência entre esta força e a corrente é quadrática. Assim, se a força de Lorentz aumentar vertiginosamente ter-se-á uma transferência explosiva com a produção intensa de salpicos. Se de outra parte, a força tiver um crescimento muito lento, longos períodos de curto-circuitos ocorrerão, ocasionando interrupções do processo e falhas na solda.

A indutância tem ainda influência sobre a velocidade de decrescimento da corrente a partir do instante da transferência da gota. Esta velocidade também não deve ser muito rápida nem muito lenta para se ter uma boa estabilidade do arco, e isto, deve ser compatibilizado com a natureza do gás utilizado.

Nas fontes convencionais de soldagem não há a possibilidade de se ter um controle individual para a velocidade de crescimento e decrescimento da corrente, todavia, nas fontes eletrônicas, isto já é possível.

O presente capítulo não tem a pretensão de analisar pormenorizadamente cada efeito das variáveis sobre a estabilidade do arco, mas sim de mostrar a capacidade da metodologia. Para tanto, apresenta-se alguns resultados para casos específicos de soldagem com arame-eletrodo ER70S-6 de 1 mm com velocidade de 4m/min, utilizando-se como gás de proteção a mistura corgon 18.

A fig. 6.1 mostra os oscilogramas de uma soldagem com tensão de 18 V e indutância que resultou numa taxa de crescimento da corrente de 71 A/ms. A fig. 6.8 representa para essa soldagem, os histogramas dos picos de corrente, dos tempos entre transferências e dos tempos de curto-circuito, respectivamente. Para comparação, apresenta-se duas outras situações com tensão de 23 V e taxas de crescimento da corrente de 92 A/ms (fig. 1.4, 6.9) e 26 A/ms (fig. 1.5, 6.10).

Como se pode depreender já diretamente dos oscilogramas, existe uma diferença marcante entre cada uma das situações apresentadas, embora os valores eficazes da corrente tenham permanecido idênticos. O oscilograma da fig. 6.1 mostra a mais alta frequência de curto circuitos dos três oscilogramas, produzindo gotas pequenas com boa repetibilidade de transferência, o que pode ser demonstrado nos histogramas pela maior concentração de dados. Esta boa uniformidade de transferência acontece como consequência de uma baixa tensão de controle (18 V) que nem sempre atende a outros requisitos da solda. Com uma tensão muito baixa, as gotas se transferem relativamente mais frias, dando caracte-

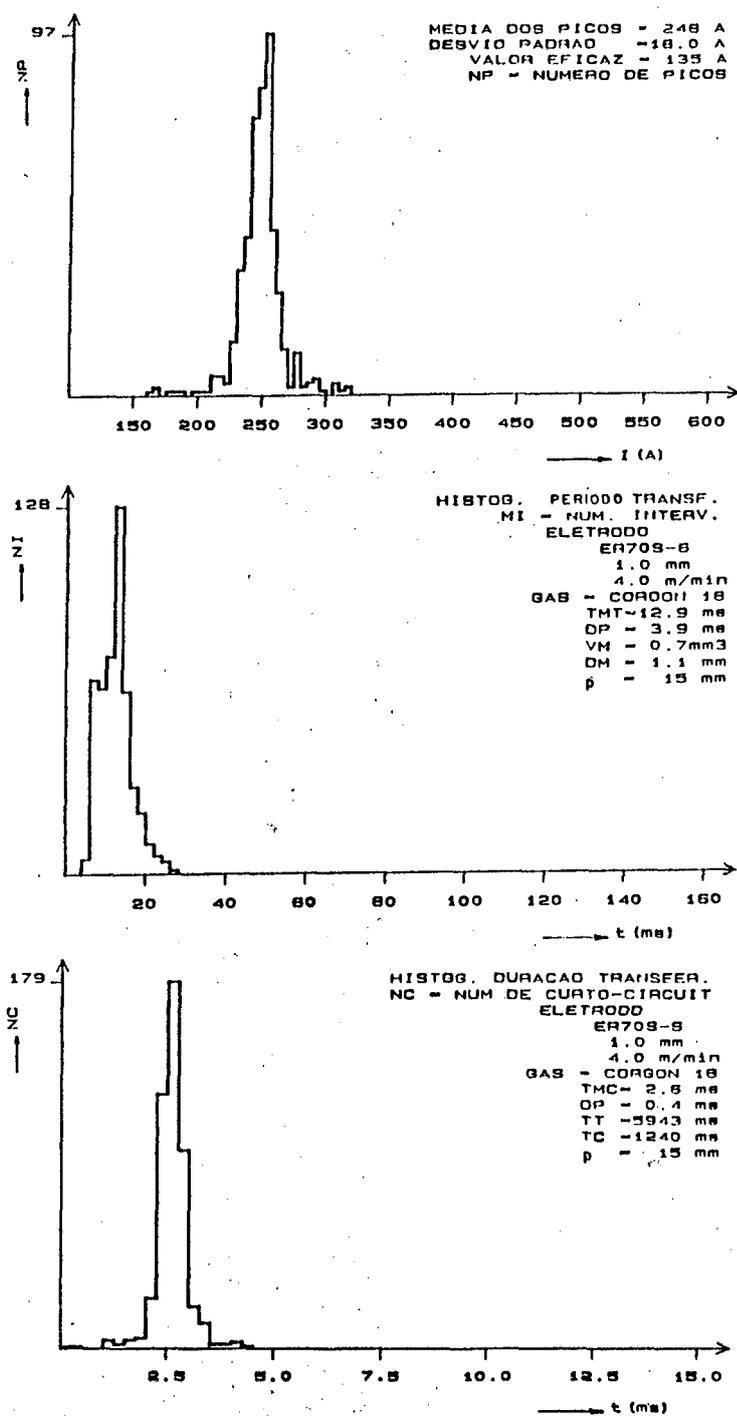


Fig. 6.8 - Histogramas referentes ao ensaio retratado pelo oscilograma da fig. 6.1; (a) picos de corrente; (b) períodos de transferência; (c) duração da transferência.

rísticas de pouca molhabilidade, favorecendo a formação de soldas com características convexas.

Quando se deseja sair dessas características, precisa-se adotar uma tensão de controle mais elevada, diminuindo-se com isto a frequência de transferência. Este fato é constatado pelo oscilograma da fig. 1.4 (soldagem com 23 V) e pelo histograma da corrente resultante do mesmo (fig. 6.9). Constata-se no entanto uma perda na repetibilidade da transferência, demonstrada na maior aleatoriedade do histograma. É interessante também se observar que os valores dos picos de corrente são bem superiores ao caso anterior.

Para melhorar a estabilidade do processo sem mudar a tensão, nesta mesma velocidade do arame-eletrodo, pode-se atuar na dinâmica da fonte (indutância). Isto é exemplificado pelo oscilograma da fig. 1.5 e seu respectivo histograma (fig. 6.10). Esta situação foi obtida elevando-se a indutância, que produzia no caso da fig. 1.4, uma taxa de crescimento da corrente de 92 A/ms, e agora 26 A/ms. Como se observa nestas últimas figuras, além de se obter uma sensível redução do desvio padrão dos picos de corrente, se reduziu também sensivelmente a média dos mesmos, fator também de correlação com a estabilidade do processo.

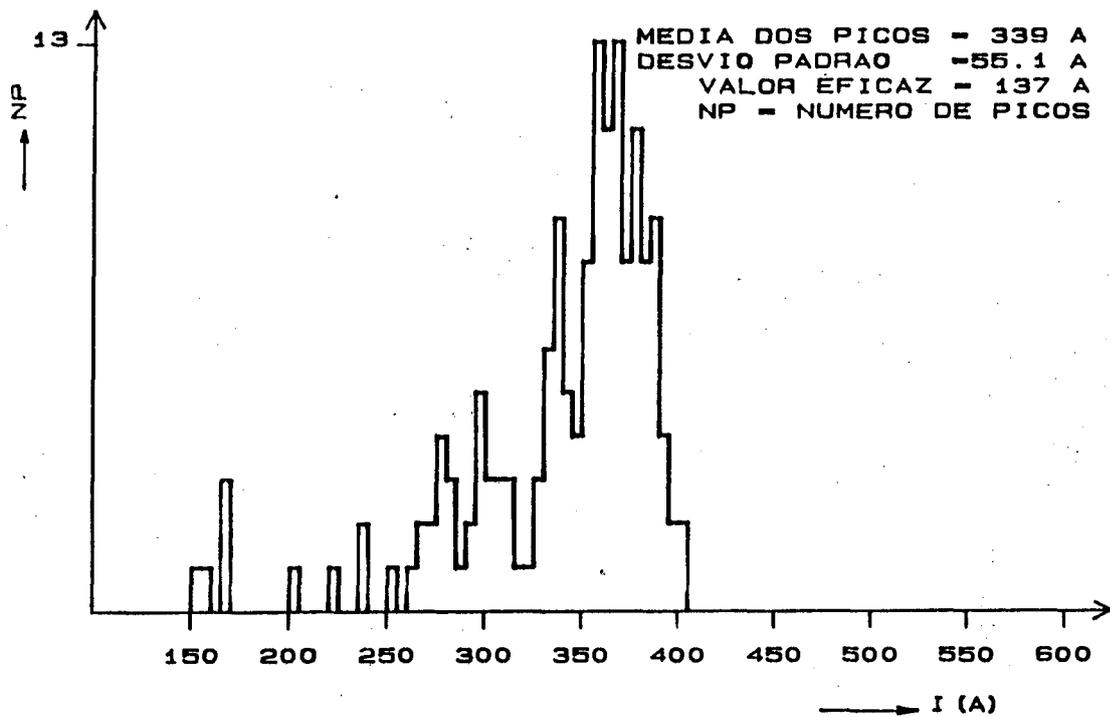


Fig. 6.9 - Histograma dos picos de corrente referente ao ensaio retratado pelo oscilograma da fig. 1.4.

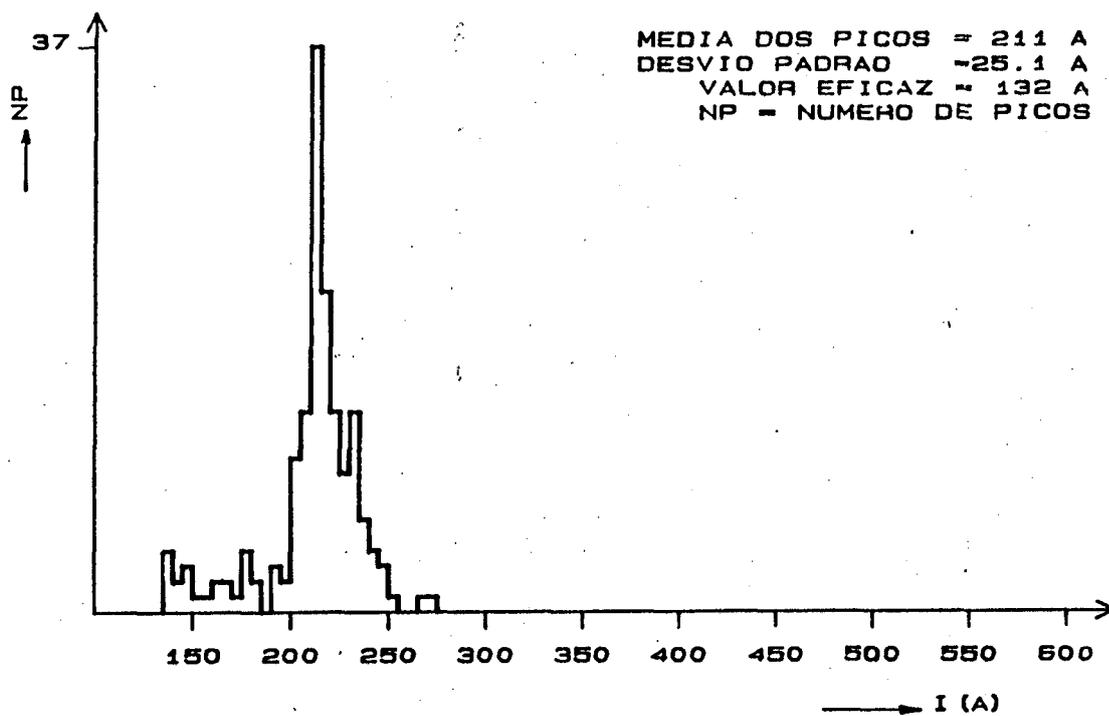


Fig. 6.10 - Histograma dos picos de corrente referente ao ensaio retratado pelo oscilograma da fig. 1.5.

6.4 - CONSIDERAÇÕES GERAIS DA ANÁLISE

Embora, não possam ser feitas formulações gerais para se definir as melhores situações de soldagem, em vista da grande diversidade de características possíveis e desejáveis, a metodologia apresentada é sem dúvida uma ferramenta valiosa, pois, para algumas condições pré-fixadas, consegue mostrar gráfica e numericamente características relevantes à estabilidade do processo.

Além disso, são obtidas destes ensaios outras informações que podem ser úteis ao estudo da automatização do processo, principalmente quando da utilização de sensores de seguimento de junta. As mais relevantes são impressas nos histogramas e têm para os dois períodos de transferência a seguinte simbologia: TMT, para período modal de transferência, que significa o tempo de referência entre transferências, DP, para desvio padrão e VM e DM, para volume e diâmetro modal, respectivamente. Nos histogramas da duração da transferência tem-se: TMC, para tempo modal de curto, TT, significa o tempo total da aquisição e TC, o tempo de arco apagado (tempo de curto-circuito). Este último tempo é importante para correlacionamentos com penetração, pois, durante o mesmo, a energia utilizada atua somente na fusão do eletrodo. Nos casos apresentados neste trabalho, se tem percentagens de tempo de atuação do arco, na sequência das figuras, de 79%, 92% e 89%.

Quanto aos aspectos específicos de estabilidade de arco, apresenta-se alguns dados que mostram como a influência de uma variável pode agir num sentido em uma determinada situação e ao contrário em outra. A fig. 6.11 mostra a tendência de variação do desvio padrão e da média dos picos de corrente com a taxa de

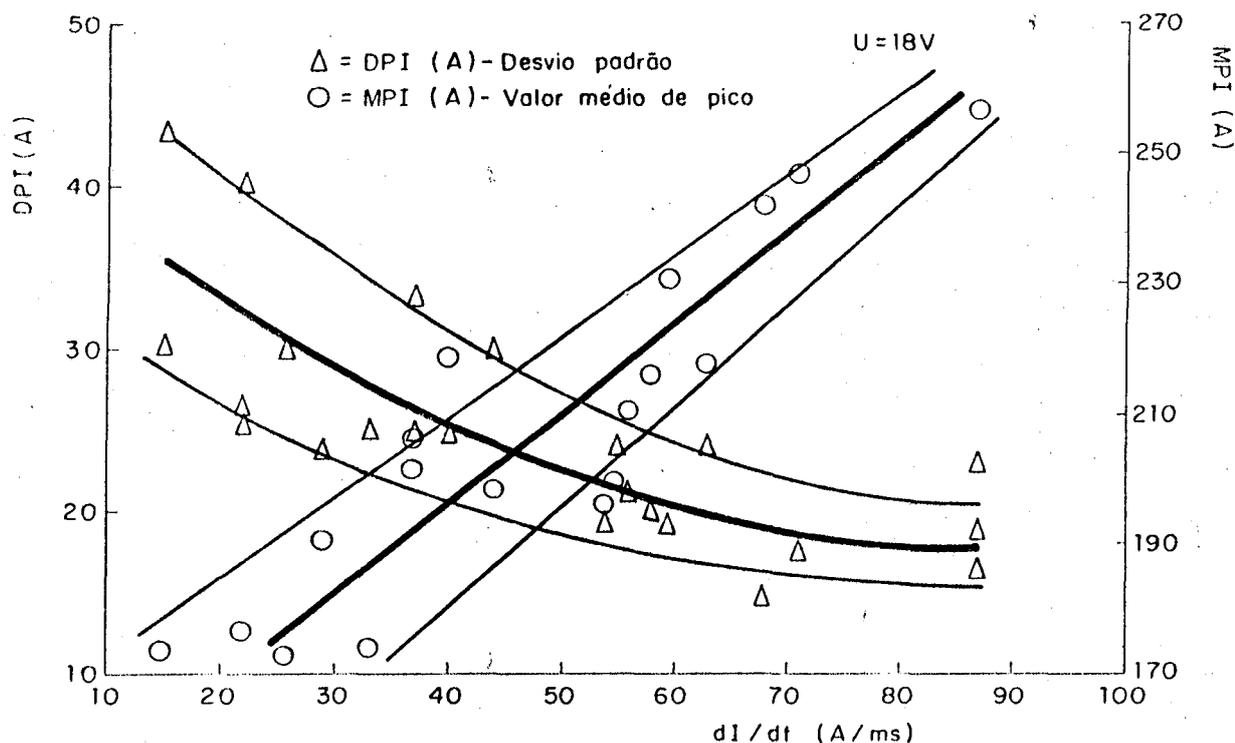


Fig. 6.11 - Variação do desvio padrão dos picos de corrente e do valor médio dos mesmos com di/dt em soldagem com tensão de 18 V.

crescimento da corrente, regulada pela indutância da fonte, em soldagem com 18 V.

Para ambos os parâmetros verifica-se a ocorrência de uma razoável dispersão de valores. Como causas principais disso pode-se citar, por exemplo, a tendência que tem a transferência metálica de assumir um determinado comportamento durante um dado intervalo de tempo, para a seguir mudar, as vezes drasticamente. Como o intervalo de tempo total de aquisição de cada ensaio é de somente 6 s, é sempre possível que de ensaio para ensaio se tenha amostragens que contenham diferenças relevantes. Para minimizar isto, seria necessário a ampliação da capacidade de memória do

sistema, onde seria possível a aquisição com tempos maiores de amostragem, o que não será feito para este trabalho.

De qualquer maneira, os dados aqui apresentados revelam uma tendência razoavelmente nítida do comportamento do arco com a variação da indutância. Para o caso da fig. 6.11, à medida que se tem maiores taxas de variação de corrente, se obtém arco mais estável, uma vez que os desvios padrão são menores. Para melhorar a visualização disso, propõe-se ainda um novo parâmetro com base na relatividade do desvio padrão em relação à média dos picos, que tem para o caso apresentado (fig. 6.11) tendência contrária a dos desvios padrão. Este novo parâmetro, designado como desvio padrão relativo dos picos de corrente (DPIR) é apresentado na fig. 6.12.

A fig. 6.13, que retrata soldagens com 23 V, mostra que

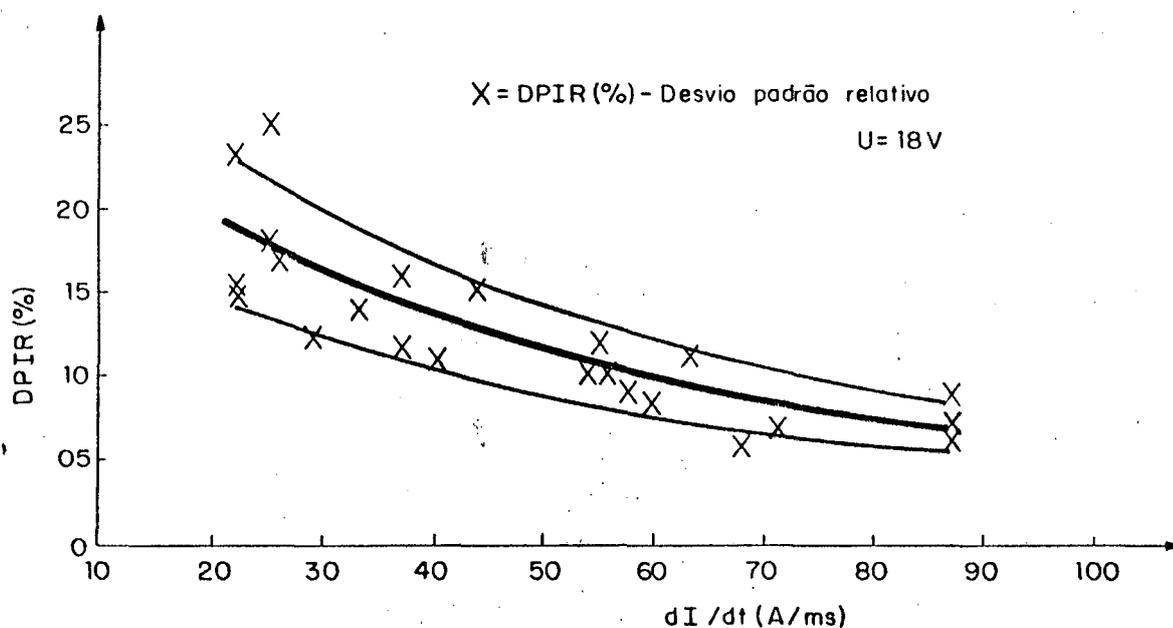


Fig. 6.12 - Variação do desvio padrão relativo dos picos de corrente com dI/dt em soldagem com tensão de 18 V.

agora a tendência de se obter menores desvios padrão está em pequenas taxas de crescimento da corrente (indutância elevada), ao mesmo tempo que se tem pequenos valores da corrente de curto-circuito. Em vista disso, o desvio padrão relativo (fig. 6.14) não apresenta uma variação tão apreciável como no caso anterior.

Destas duas séries de experiências se constata que para tensões mais elevadas, a indutância deve ser regulada em valores altos (baixos di/dt), e para tensões mais baixas, a indutância deve ser baixa (elevado di/dt). Este fato leva a se formular a hipótese de que para tensões intermediárias, a regulagem da indutância deve ser um fator irrelevante. Todavia, não se apresenta aqui nada absolutamente conclusivo, apenas proposições e

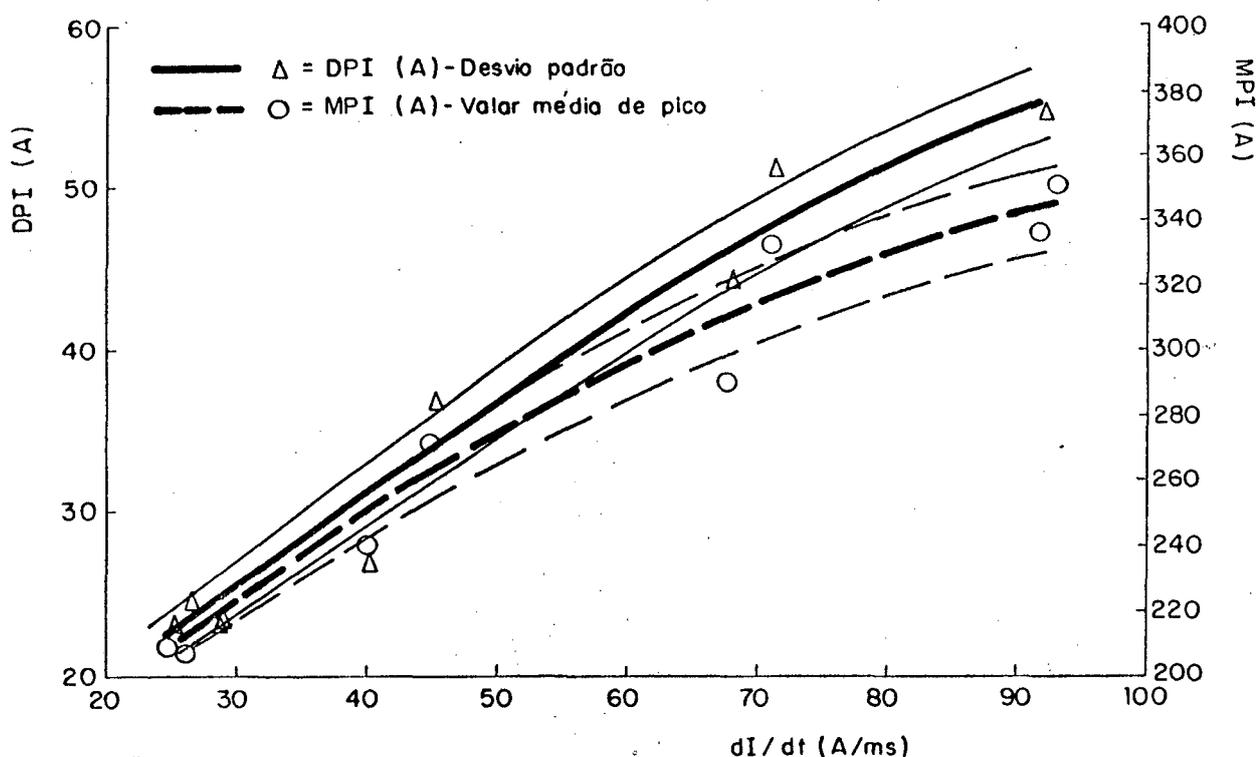


Fig. 6.13 - Variação do desvio padrão dos picos de corrente e do valor médio dos mesmos com di/dt em soldagem com tensão de 23 V.

hipóteses para serem estudadas, utilizando-se o sistema de soldagem descrito anteriormente. Estes estudos devem ser acompanhados por uma análise criteriosa das soldas obtidas.

A fig. 6.15 mostra para uma indutância fixa, a variação do desvio padrão dos picos de corrente com a tensão. Se verifica para estas condições, que existe um ponto de ótimo, situando-se na casa dos 18 V.

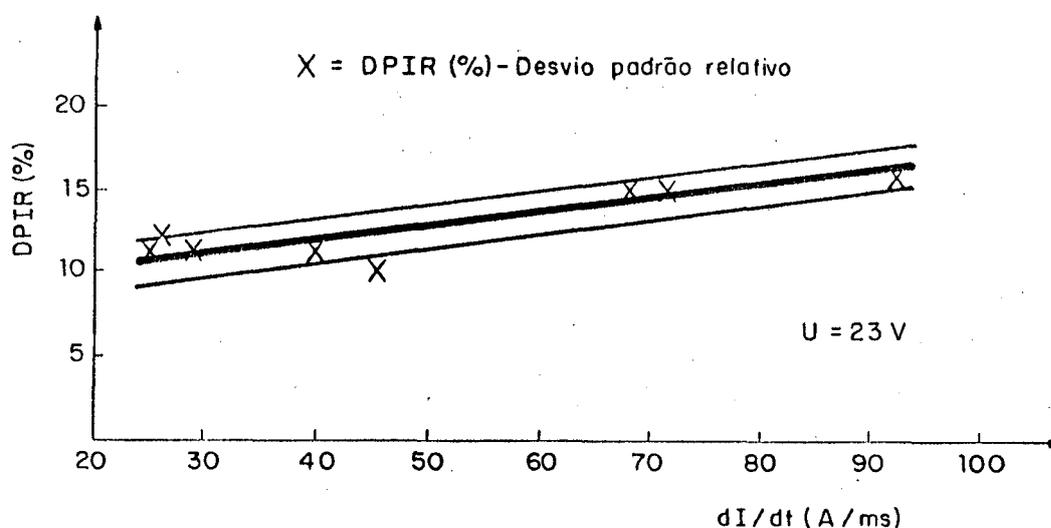


Fig. 6.14 - Variação do desvio padrão relativo dos picos de corrente em soldagem com tensão de 23 V.

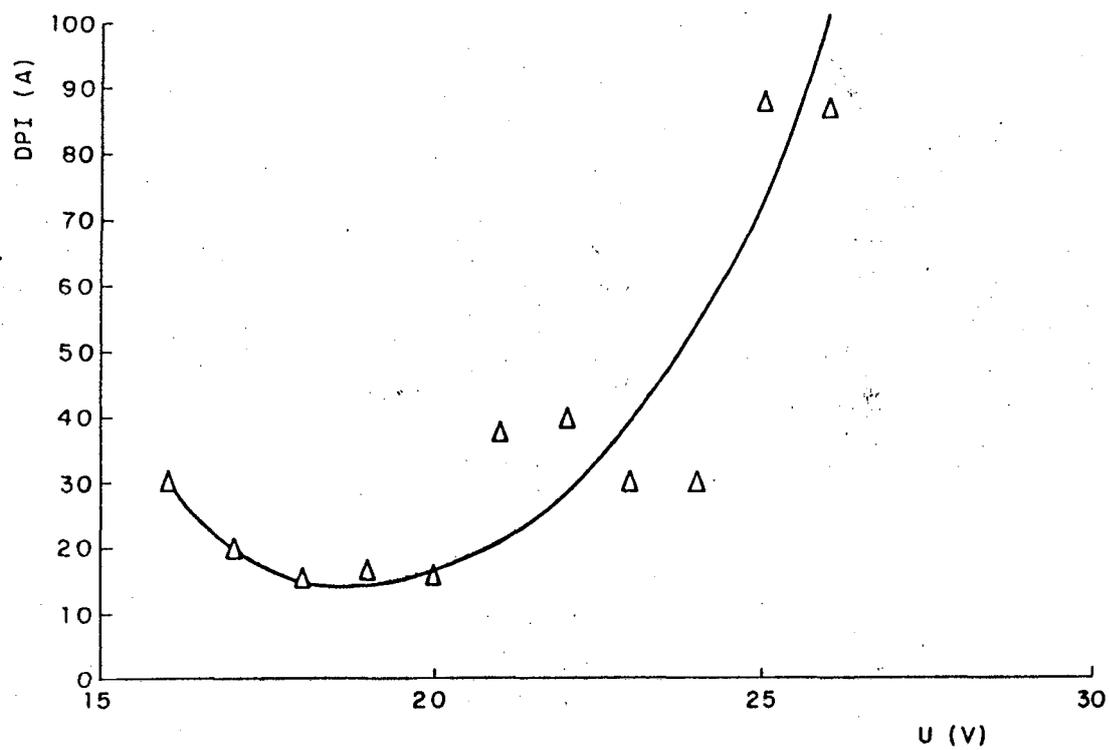


Fig. 6.15 - Variação do desvio padrão dos picos de corrente com a tensão.

7. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE FUSÃO DOS ELETRODOS

Um processo de soldagem com eletrodo consumível é tanto mais estável quanto melhor for o equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame-eletrodo e a velocidade de fusão do mesmo. Para que o processo seja possível, é necessário pelo menos, que este equilíbrio seja mantido em sua média. Em soldagem MIG/MAG convencional com transferência por curto-circuito os oscilogramas mostram que para uma determinada velocidade fixa de alimentação do eletrodo, se tem uma flutuação acentuada das variáveis corrente e tensão, fruto de uma variação do comprimento do arco, que em última análise, é resultado de um desequilíbrio entre a alimentação e a fusão. De qualquer maneira, o equilíbrio médio é mantido e o que se deve sempre tentar obter quando se seleciona as variáveis de soldagem é que os desequilíbrios instantâneos sempre ocorram com idênticas características.

Todavia, mesmo que no processo MIG/MAG convencional, ocorra uma auto-regulação em termos médios, o conhecimento de uma função matemática de relacionamento entre as variáveis elétricas e a velocidade do arame é por demais importante na qualificação de procedimentos e na enormidade de fatores decorrentes disso, como a determinação de custos.

Essa função matemática torna-se, entretanto, imprescindível quando se trabalha com imposição de corrente sem que se tenha um circuito eletrônico (controle externo) para controlar automaticamente a velocidade do arame-eletrodo em função do comprimento do arco.

O presente capítulo não tem a intenção de mostrar amplamente as características de fusão dos eletrodos, mas sim de apresentar uma metodologia adequada para se atingir este intento com rapidez e precisão.

7.1 - DESENVOLVIMENTO MATEMATICO

Segundo "Lesnewich" [45], a fusão do eletrodo é principalmente afetada por duas fontes de calor: o calor gerado no contato elétrico entre o arco e eletrodo e o calor gerado por efeito Joule ao longo do comprimento do eletrodo. A primeira parcela é diretamente proporcional ao valor da corrente instantânea, enquanto que a segunda tem uma relação quadrática com a mesma:

$$v_a = \alpha \cdot I + \beta \cdot l \cdot I^2 \quad (7.1)$$

onde v_a é a velocidade do arame-eletrodo, que nas situações estáveis deve ser igual a velocidade de fusão do mesmo, l , o seu comprimento, e α e β são constantes que dependem do material, diâmetro do eletrodo e gás de proteção. O gás, entretanto, tem influência pequena, alterando somente a constante α . O material e diâmetro do eletrodo exercem sua influência na constante β , pois são grandezas fundamentais da resistividade.

Se a corrente for constante no tempo, como ocorre aproximadamente em soldagem MIG/MAG com transferência por projétil, os resultados práticos numa ampla faixa de corrente divergem muito pouco dos obtidos pela equação. Todavia, a medida em que o va-

lor médio for divergindo do instantâneo, obtém-se cada vez mais discrepâncias. Para se ter melhores resultados, dever-se-ia considerar

$$v_a = \frac{\int_{\text{ciclo}} v_a(t) dt}{T} \quad (7.2)$$

Numa corrente pulsada com forma retangular (p - designa pulso e b - base) tem-se dessa maneira:

$$v_a = \frac{v_{a_p} \cdot t_p + v_{a_b} \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (7.3)$$

As respectivas velocidades de eletrodo em cada fase são:

$$v_{a_p} = \alpha \cdot I_p + \beta \cdot l \cdot I_p^2 \quad (7.4)$$

$$v_{a_b} = \alpha \cdot I_b + \beta \cdot l \cdot I_b^2$$

O valor médio da velocidade do arame-eletrodo é então:

$$v_a = \frac{\alpha \cdot I_p \cdot t_p + \beta \cdot l \cdot I_p^2 \cdot t_p + \alpha \cdot I_b \cdot t_b + \beta \cdot l \cdot I_b^2 \cdot t_b}{T} \quad (7.5)$$

$$v_a = \frac{\alpha \cdot (I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b)}{T} + \frac{\beta \cdot l \cdot (I_p^2 \cdot t_p + I_b^2 \cdot t_b)}{T} \quad (7.6)$$

$$v_a = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot l \cdot I_{ef}^2 \quad (7.7)$$

Desta maneira, o valor médio deve ser considerado na primeira parcela, enquanto que o valor eficaz deve ser considerado na segunda.

Esta dupla dependência da velocidade do arame-eletrodo não é prática, tanto para o processo MIG/MAG convencional, como para o pulsado. No primeiro caso, entretanto, na maioria das vezes, pode-se admitir, que a corrente média seja igual a eficaz, fato que em corrente pulsada está longe de acontecer. Como, neste caso, toda a programação das variáveis tem como objetivo manter uma transferência controlada, o que em algumas vezes pressupõe uma manutenção do diâmetro das gotas para qualquer corrente de soldagem, tem-se que variar a frequência dos pulsos em acordo com a corrente média. Para que isto seja possível, é necessário que se tenha a velocidade do arame, que por sua vez é dependente de I_{ef} , que é função da frequência.

Para se poder sair deste impasse, faz-se uma simplificação, procurando-se eliminar a dependência da frequência no cálculo de v_a . Supõe-se que o aquecimento ôhmico durante a fase de base (eq. 7.6) seja desprezível comparado com aquele da fase de pulso, isto é,

$$I_P^2 \cdot t_P \gg I_b^2 \cdot t_b$$

Assim, a equação 7.6, torna-se:

$$v_a = \alpha \cdot I_m + \beta \cdot I \cdot \frac{I_P^2 \cdot t_P}{T} \quad (7.8)$$

O período necessário para se obter um diâmetro de gota, d_g , é dado por:

$$T = \frac{40 \cdot d_g^3}{d^2 \cdot v_a} \quad (7.9)$$

sendo, d_g e d , os diâmetros da gota e do eletrodo respectivamente em mm, v_a , a velocidade do arame-eletrodo em m/min e T , o período em ms. Substituindo T em (7.8), obtém-se:

$$v_a = \frac{\alpha \cdot I_m}{1 - \frac{\beta \cdot l \cdot D \cdot d^2}{40 \cdot d_g^3}} \quad (7.10)$$

sendo $D = I_p^2 \cdot t_p$, a função critério de destacamento de gota.

7.2 - PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS DE CARACTERÍSTICAS DE FUSÃO EM SOLDAGEM COM CONTROLE POR TENSÃO

Para este procedimento foi desenvolvido um programa, denominado ARCOAN com a finalidade de levantar automaticamente os dados relevantes que são relacionados direta ou indiretamente com a velocidade de fusão do eletrodo em soldagens com controle por tensão. Numa única experiência, o sistema de soldagem varre de maneira criteriosa todo o campo de tensão e corrente onde a soldagem pode ser executada para um determinado eletrodo e gás de proteção. As variáveis tensão, velocidade do arame-eletrodo e velocidade de soldagem são controladas, sendo adquiridas, a tensão

e corrente média, a tensão e corrente eficaz e, para controlar o deslocamento da pistola de soldagem, é lido também a posição da mesma a cada incremento das variáveis.

Para melhor ilustrar apresenta-se na fig. 7.1 um diagrama de blocos simplificado do programa. No início, o programa pede a data, solicita informações sobre a fonte de energia que será utilizada na experiência e em consequência apresenta um menu correspondente, onde deverão ser definidos alguns parâmetros básicos como indutância e polaridade e onde também contém instruções sobre algumas conexões que deverão ser feitas manualmente. O menu principal direciona o programa para os principais subprogramas do mesmo, onde são definidos os parâmetros e variáveis, dá-se início ou finda-se a experiência.

No menu de parâmetros são definidos elementos importantes para a documentação, porém não interferem no controle do processo. Já o menu de variáveis trata das grandezas que vão comandar a experiência, definindo também alguns limites do ensaio, sendo entretanto no subprograma campo de ensaio que são definidas as fronteiras inferior e superior num plano $U \times I$.

Ao ser dado o início da soldagem, as variáveis de controle correspondem ao limite inferior de tensão e ao limite inferior da velocidade do eletrodo. Após transcorrido o tempo de aquisição desejado, durante o qual são feitas leituras de corrente e tensão médias e eficazes, uma nova tensão de controle é automaticamente definida, de acordo com o incremento da referida variável, fornecido anteriormente. Assim se sucede até que a fronteira superior seja atingida, onde então ocorre o incremento da velocidade do arame-eletrodo, baixando concomitantemente a tensão para a fronteira inferior. Este procedimento continua até

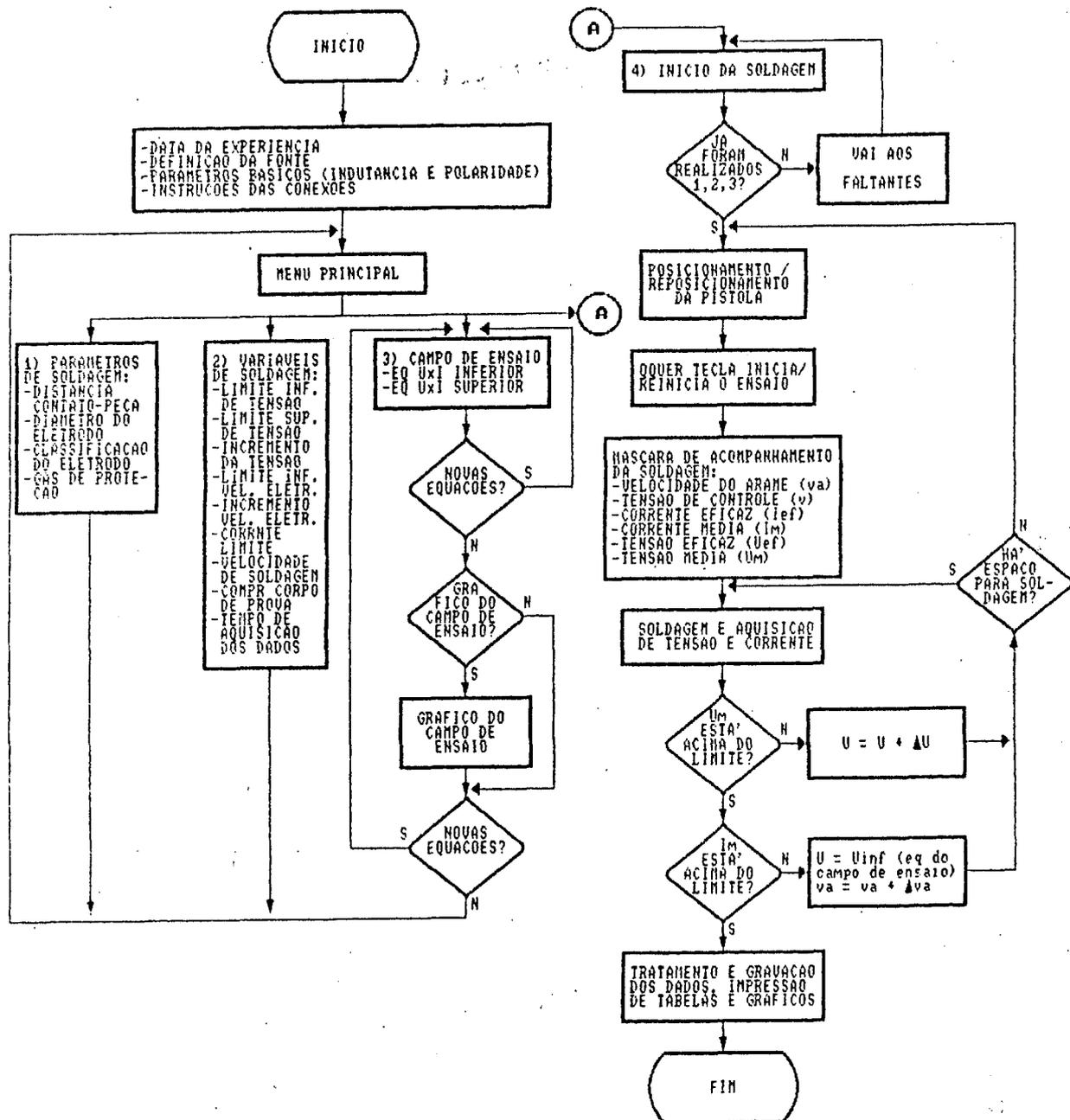


Fig. 7.1 - Diagrama de blocos simplificado do programa ARCOAN.

que o limite superior da corrente seja atingido, onde então o processo é interrompido.

Os dados da experiência podem ser gravados em disquetes sob forma de arquivos com nomes formatados adequadamente para que sejam facilmente identificados à posteriori.

Os protocolos que podem ser emitidos com esses dados podem ter formas de tabelas ou gráficos, de acordo com a necessidade e interesse do usuário. As tabelas apresentam, no cabeçalho, a codificação do experimento e as condições em que o mesmo foi realizado e, a seguir, os dados de corrente média, corrente eficaz, tensão média e tensão eficaz relacionados com a velocidade do arame-eletrodo e a tensão de controle. A figura 7.2 é um exemplo, que mostra dados de um experimento com arame de aço ER70S-6 e gás de proteção composto de 95% de argônio e 5% de CO₂.

Os protocolos na forma gráfica, podem se apresentar como diagramas cartesianos de tensão versus corrente (fig. 7.3), sobre os quais são traçadas linhas, à semelhança das curvas de nível utilizadas em topografia. Cada linha é formada por pontos, cujas coordenadas de tensão e corrente representam situações de soldagem que têm a capacidade de fundir a mesma quantidade de arame-eletrodo.

Se for do desejo se obter relacionamentos diretos entre a velocidade de arame-eletrodo e a corrente, o procedimento faz isto automaticamente, emitindo gráficos, segundo as equações apresentadas anteriormente, após ter determinado os coeficientes das mesmas.

Estes protocolos são obtidos a partir dos anteriores, onde a velocidade de arame, representativa de cada corrente, é determinada a partir da estipulação da tensão desejada, que pode

V10AC12052

23/06/89

DISTANCIA CONTATO OBRA : 12.00 mm
 DIAMETRO DO ELETRODO : 1.00 mm
 MATERIAL DO ELETRODO : ER70S-6
 MATERIAL DE BASE : ST 1015
 GAS : C5
 POLARIDADE : Inversa CC⁺
 FONTE DE ENERGIA : FONTE ELMA
 VELOCIDADE DE SOLDAGEM : 20.00 cm/min
 EQUACAO DA CARAC. ESTATICA SUP. : $U = 19.00 + 0.030 * I$
 EQUACAO DA CARAC. ESTATICA INF. : $U = 13.00 + 0.030 * I$

U	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
VA	CORRENTE MEDIA										
2	68	64	66	66	68	68					
3	95	94	98	97	99	97	103	107			
4	121	115	122	125	128	127	127	131	132	130	
5			145	144	149	148	152	149	152	147	152
6				161	164	165	165	168	169	173	174
7							177	181			

U	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
VA	CORRENTE EFICAZ										
2	72	64	65	73	65	70					
3	95	98	99	103	107	101	99	98			
4	128	119	124	129	130	130	126	128	135	131	
5			150	148	152	154	153	152	146	153	153
6				162	166	169	170	170	172	176	177
7							180	186			

Fig. 7.2 - Tabela de dados obtidos com o programa ARCOAN.

U	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
VA	TENSÃO						MÉDIA					
2	17	18	19	19	20	21						
3	17	18	19	19	20	21	22	22				
4	17	18	18	19	20	21	21	22	23	24		
5			18	19	19	20	21	22	23	23	24	
6				18	19	20	21	21	22	23	23	
7						20	19					

U	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
VA	TENSÃO						EFICAZ					
2	17	18	19	19	20	21						
3	17	18	19	19	20	21	22	23				
4	17	18	18	19	20	21	21	22	23	24		
5			18	19	19	20	21	22	23	23	24	
6				18	19	20	21	21	22	23	24	
7						20	20					

Fig. 7.2 - Tabela de dados obtidos com o programa ARCOAN - cont.

ser constante para todos os valores de corrente ou, variável com esta. Para o caso da situação de soldagem apresentada na fig. 7.3, obteve-se para uma tensão variando segundo a equação:

$$U_{r_1} = 0,03 \cdot I + 19,$$

os coeficientes $\alpha = 0,023$ e $\beta = 6,25 \cdot 10^{-6}$ (fig. 7.4). Os mesmos coeficientes passaram a valer $0,025$ e $4,84 \cdot 10^{-6}$ para o caso em que o diagrama cartesiano da fig. 7.2 teve como coordenadas os valores eficazes da tensão e da corrente.

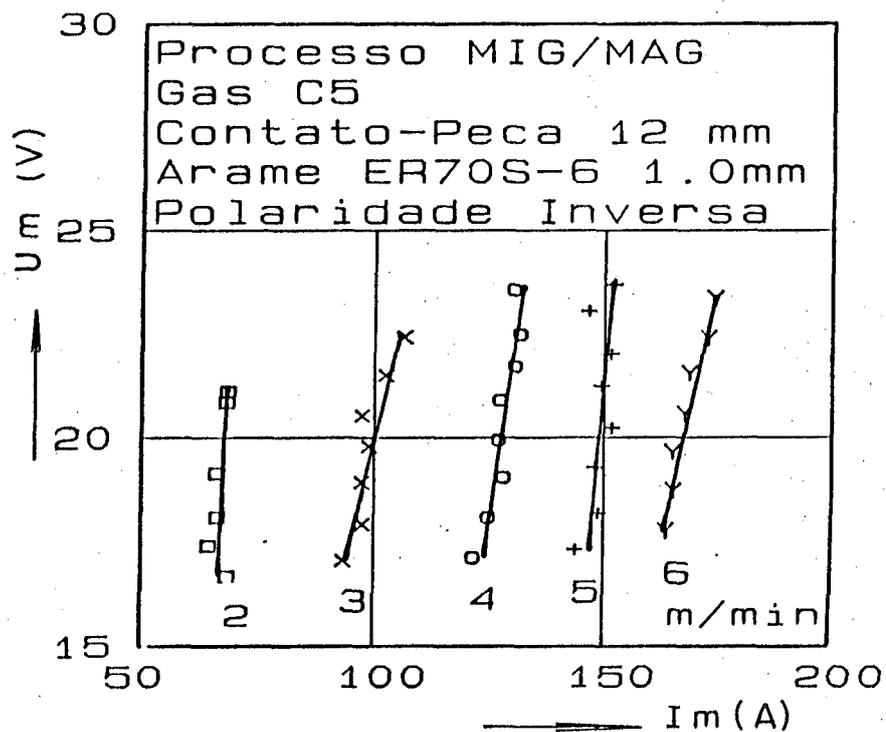


Fig. 7.3 - Curvas de igual velocidade de arame eletrodo obtidas de ensaio através do programa ARCOAN.

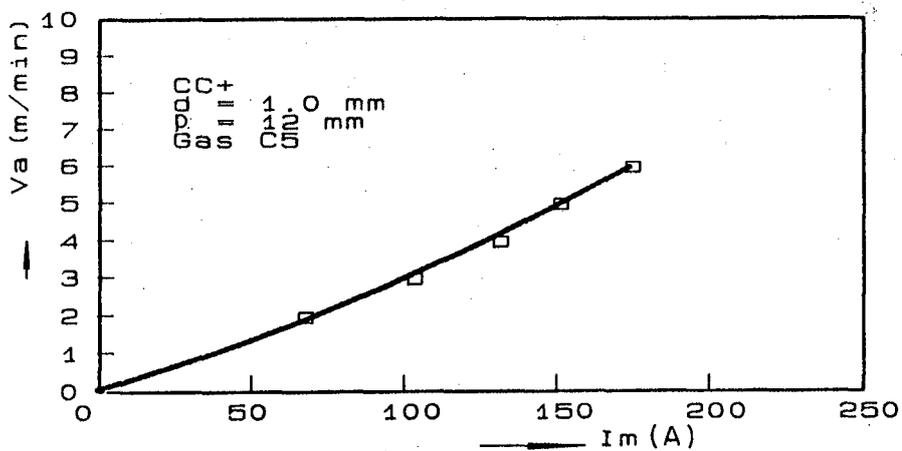


Fig. 7.4 - Correlação da velocidade do arame-eletrodo com a corrente obtida pelo programa ARCOAN. Tensão: $U = 0,03 \cdot I + 19$.

7.3 - PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS DE CARACTERÍSTICAS DE FUSÃO EM SOLDAGEM COM CONTROLE POR CORRENTE.

Como a fonte de energia transistorizada acoplada ao SISDATASOLDA permite a imposição instantânea da corrente, é possível se determinar mais precisamente a função de correlação entre esta e a velocidade do arame-eletrodo. Os coeficientes das equações obtidas nesses levantamentos, podem então ser utilizados em casos onde a corrente média e a eficaz são bastante diferentes, do valor instantâneo.

Para a realização deste objetivo, um outro programa, denominado FUSÃO 1, cujo diagrama de blocos é mostrado na fig. 7.5, deve comandar a corrente que a fonte de energia deve fornecer, e uma tensão de referência, que deve ser transmitida ao alimentador do arame para que este, utilizando o "controle externo" [37], possa controlar a velocidade do arame-eletrodo. A tensão de referência é obtida através de uma função linear, que a relaciona com a corrente, cujos coeficientes (angular = mve e linear = cv) são fornecidos pelo operador por ocasião do aparecimento do menu de variáveis. Neste mesmo menu, é fornecida também a corrente inicial de soldagem, que poderá ser incrementada ou decrementada durante o ensaio. Em cada um dos valores da corrente, o operador poderá realizar aquisições de velocidade do arame-eletrodo e também de tensão média. Após a finalização do ensaio, o gráfico da função velocidade do arame-eletrodo x corrente, considerando todos os pontos nos quais o operador determinou aquisição de dados, pode ser apresentado no vídeo utilizando-se ajuste por regressão linear, ou de segunda ordem. Se for desejado, o gráfico também po-

derá ser transcrito na impressora ou plotadora.

Foram realizados ensaios, utilizando-se este programa para se determinar os coeficientes α e β em condições idênticas às utilizadas com o ARCOAN.

Em vista de que, com o gás utilizado (95% argônio e 5% CO₂) se pode obter transferência metálica, tanto com curto-circuito, como em forma de projétil (spray), as experiências foram conduzidas, de modo a cobrir estas duas faixas. Para tanto, devido a necessidade de se obter os dados sempre relativos a um mesmo comprimento de eletrodo (1), teve-se que dividir o ensaio em duas etapas. A primeira, sem curto-circuito, regulou-se o bico de contato da pistola de soldagem até a peça em 15 mm e se adotou uma função da tensão de referência em relação à corrente, tal que se obtivesse um comprimento de arco de 5 mm e, em consequência, um comprimento de eletrodo de 10 mm. Para a obtenção dos dados na faixa do curto-circuito, foi necessário uma outra função da tensão de referência e uma outra distância contato-peça. Esta última foi regulada em 12 mm tendo-se em vista que o diâmetro de gota transferida, juntamente com o arco, não ultrapassam 2 mm e, por isso, obtendo-se também um comprimento de eletrodo de 10 mm. Os dois conjuntos de dados foram lançados sobre um mesmo gráfico (fig. 7.6), onde se observa uma harmoniosa continuidade, obtendo-se daí os coeficientes, $\alpha = 2,65 \cdot 10^{-2}$ e $\beta = 5 \cdot 10^{-6}$.

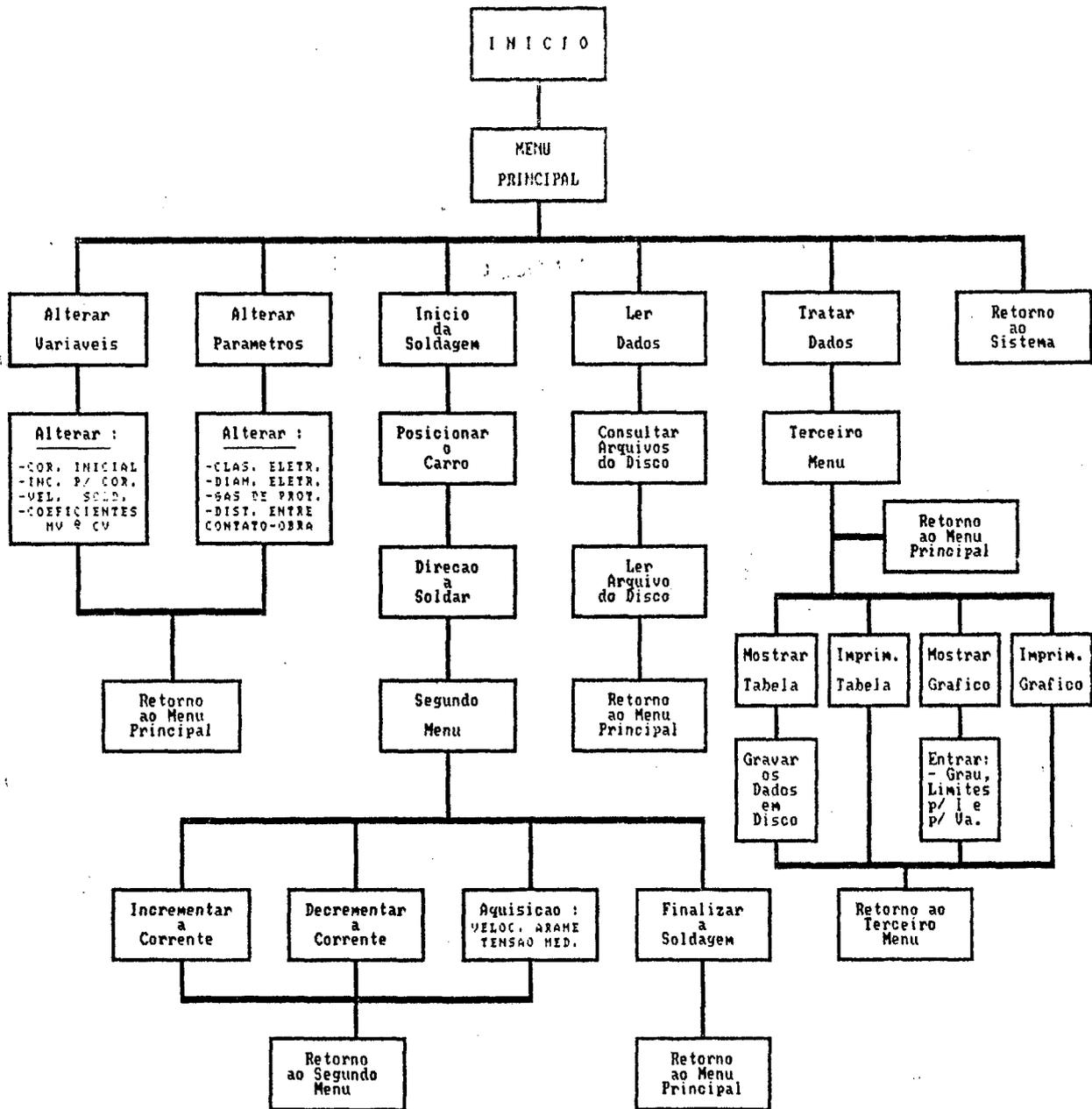


Fig. 7.5 - Diagrama de blocos simplificado do programa FUSKO 1.

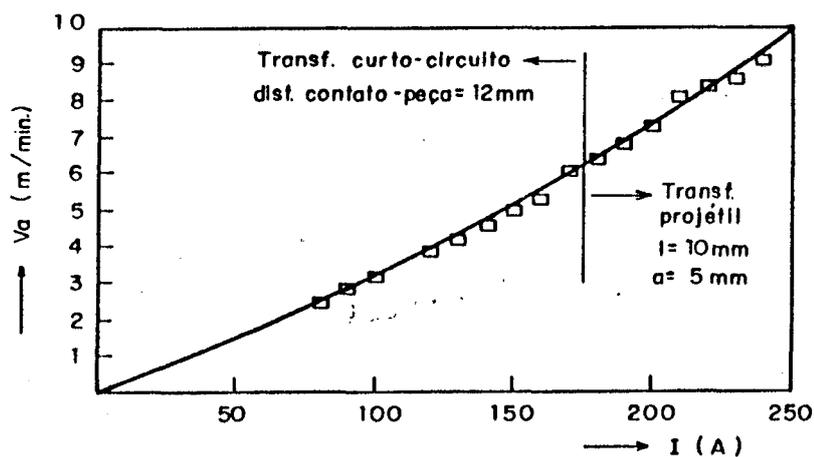


Fig. 7.6 - Função da velocidade do arame-eletrodo com a corrente, determinada com o programa FUSKO 1.

7.4 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os coeficientes α e β , obtidos pelas diferentes maneiras apresentadas, foram aplicados em soldagem com corrente pulsada nas condições de corrente média de 100 A, corrente de pulso de 240 A e tempo de pulso de 4,1 ms. A frequência foi diversa para se obter diâmetros de gota de 1,0, 1,1 e 1,2 mm, o que resultou em correntes eficazes diferentes. Como se observa na figura 7.7, os resultados obtidos pela equação 7.8 são muito próximos dos obtidos pela equação 7.7 e também, representam uma aproximação muito boa do valor real. Todavia, os resultados mais próximos do valor real são os obtidos com o programa FUSKO 1.

dg (mm)	Fr (Hz)	Ib (A)	tb (ms)	va _{real} (m/min)	va eq. 7.7 FUSAO1 (m/min)	va eq. 7.8 FUSAO1 (m/min)	va α . 7.7 ARCOAN * (m/min)	va eq. 7.8 ARCOAN * (m/min)	va α . 7.7 ARCOAN ** (m/min)	va α . 7.8 ARCOAN ** (m/min)
1.0	69	20	7.2	3,86	3,72	3,69	3,65	3,62	3,53	3,51
1.1	69	40	9,6	3,53	3,57	3,51	3,42	3,34	3,36	3,29
1.2	54	60	14,3	3,34	3,43	3,29	3,29	3,12	3,26	3,12

Figura 7.7 - Quadro das velocidades de eletrodo medidas e calculadas para três condições de corrente pulsada. (* Dados a partir dos coeficientes α e β calculados dos valores médios de U e I (fig. 7.3); ** idem, mas a partir de valores eficazes).

8. METODOLOGIA DE ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA PARA A DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM COM CORRENTE PULSADA

Em níveis energéticos baixos só se consegue soldar com o processo MIG/MAG convencional através de transferência por curto-circuito. Isto se realiza, com certa instabilidade de arco, com perda de controle de penetração e com uma certa produção de salpicos.

A soldagem em corrente pulsada tem então o objetivo de produzir uma transferência metálica sem curto-circuito e de maneira uniforme, de tal sorte que se pode controlar mais perfeitamente a penetração, se produzir soldas em baixa energia com ausência de salpicagens e, com isto, se garantir uma qualidade superior dos produtos soldados [71].

O problema de uso deste tipo de tecnologia está na dificuldade de seleção das variáveis de soldagem. O objetivo deste capítulo é, então, apresentar uma metodologia para determiná-las.

8.1 = ALGORÍTMOS PARA ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA POR PROJÉTIL EM CORRENTE CONSTANTE

A filosofia para uma previsão das variáveis da corrente

pulsada é baseada na transferência metálica que ocorre em soldagem com transferência por projétil, utilizando-se uma corrente contínua constante [30]. Neste tipo de transferência, as gotas podem ser detectadas por filmagem ou através da emissão de oscilogramas da tensão. Neste último caso, a detecção é possível, graças ao repentino aumento de 0,5 a 2 V que a tensão sofre quando a gota se desprende do eletrodo. Tal detecção também só é possível se a fonte de energia utilizada não produzir um "ripple" inerente a sua própria forma de controlar a corrente ou a tensão, pois tal comportamento mascara os picos de tensão oriundos da transferência. Como a fonte de energia utilizada nesta pesquisa é transistorizada analógica, as variações que ocorrem na tensão são consequência de fatores exclusivamente do arco. Assim, pela detecção dos tempos entre transferências, pode-se determinar estatisticamente aquele de maior ocorrência (tempo modal) e, uma vez que se saiba a velocidade do arame, pode-se determinar também o diâmetro de gota correspondente (diâmetro modal). Para este diâmetro de gota obtido, formula-se então a hipótese de que a corrente pulsada, necessária para se garantir transferência por projétil, deverá ter uma amplitude igual a da corrente constante utilizada, com um tempo de atuação igual ao tempo de transferência de maior ocorrência. O período da onda é determinado pela corrente média desejada, pois é ela que define basicamente a velocidade do arame-eletrodo, que por sua vez, determina a frequência (Capítulo 2). Uma vez definida a corrente de pulso, o seu correspondente tempo, e o tempo de base, que é fruto da subtração do período com o tempo de pulso, resta determinar a corrente de base, que decorre imediatamente da equação da corrente média.

Para se determinar com eficácia estas variáveis, foram desenvolvidos dois programas - TRANSP1 e TRANSP2 - para controlar a soldagem, fazer aquisição de dados e o respectivo tratamento. Ambos os programas possuem "menús" elucidativos, através dos quais pode-se fornecer as variáveis e parâmetros básicos do ensaio e posicionar a pistola de soldagem. Eles têm a opção de se poder soldar com ou sem o controle externo, fato que direciona a dois tipos diferentes de "menús" de variáveis. Se for com uso de controle externo, aparece no "menú" a corrente de soldagem, a tensão de referência e a velocidade de soldagem. De modo contrário, aparece a tensão de controle, a velocidade do arame-eletrodo e a velocidade de soldagem (fig. 8.1).

Depois de ser dado o início da soldagem pode-se fazer a aquisição de 50000 dados de valores instantâneos de tensão. Até este ponto os dois programas são iguais, distinguindo-se no tratamento dos dados no que diz respeito a busca dos instantes de ocorrência de transferência. O TRANSP1, após apresentar o oscilograma de tensão no vídeo do microcomputador (fig. 8.2), solicita ao usuário o fornecimento de uma tensão limiar para que o microcomputador possa, por si só, determinar os picos de tensão representantes de transferência metálica. Os intervalos entre transferências são agrupados para se determinar histogramas (fig. 8.3, 8.4, e 8.5), de onde pode ser tirado o intervalo de maior ocorrência, designado como tempo modal de transferência (TMT). Como também a velocidade do arame-eletrodo é fornecida (ou adquirida, no caso do controle externo), pode-se determinar o diâmetro modal de transferência através da fórmula:

$$DM = \sqrt[3]{\frac{d^2 \cdot v_a \cdot TMT}{40}} \quad (8.1)$$

onde DM é o diâmetro modal de transferência (mm), d, o diâmetro do eletrodo (mm), v_a , a velocidade do eletrodo (m/min) e TMT, o tempo modal (ms).

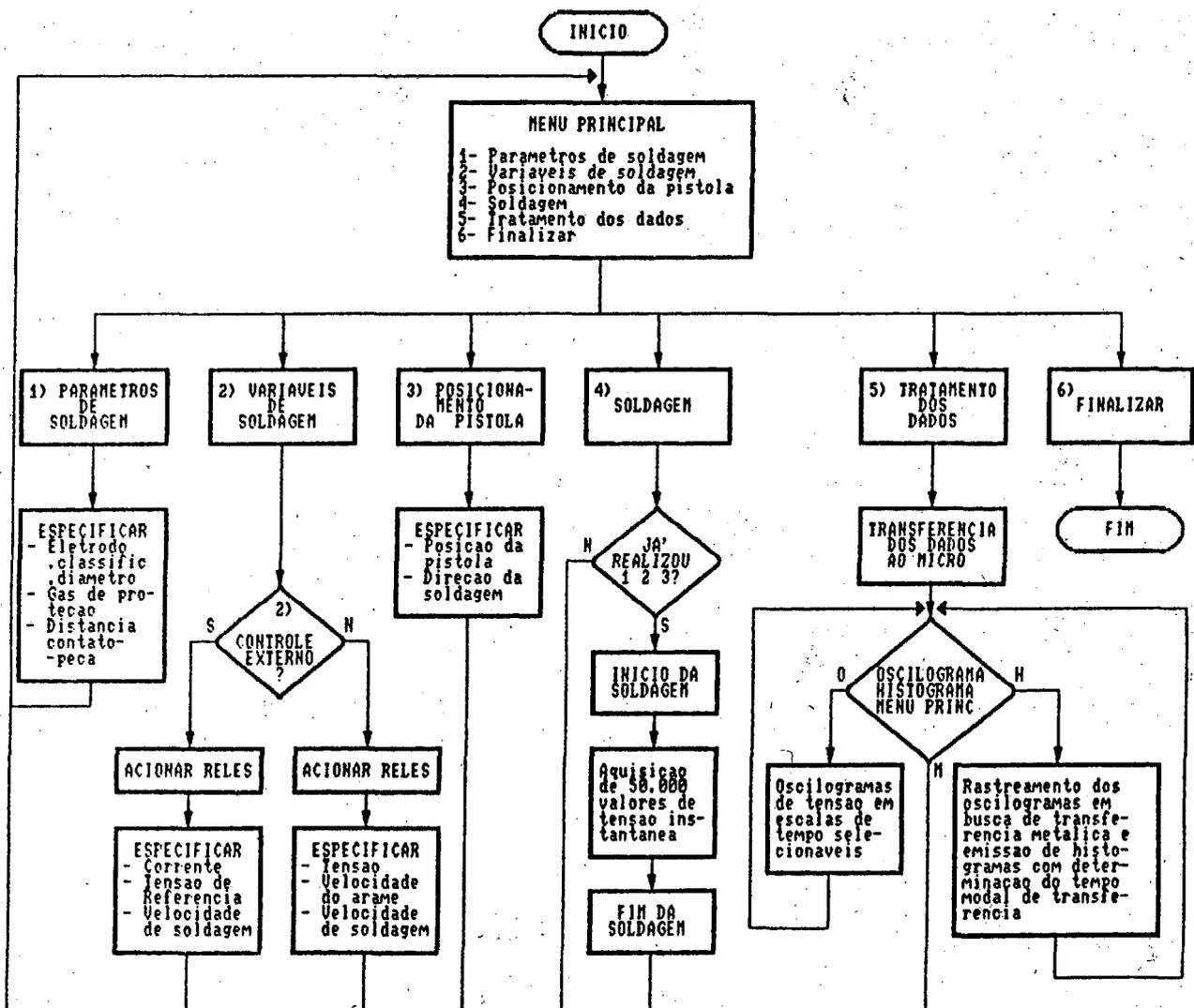


Fig. 8.1 - Diagrama simplificado dos programas TRANSP.

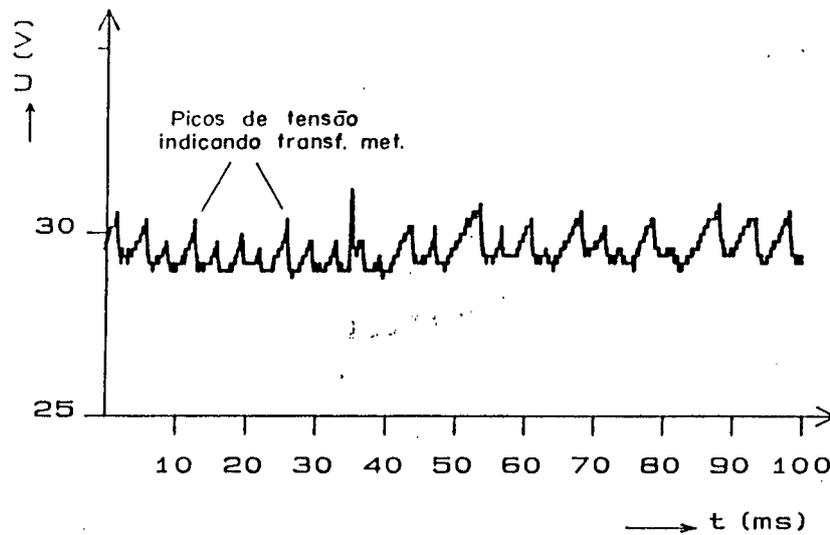


Fig. 8.2 - Oscilograma da tensão em soldagem com arame ER70S-6 de 1 mm de diâmetro e 220 A.

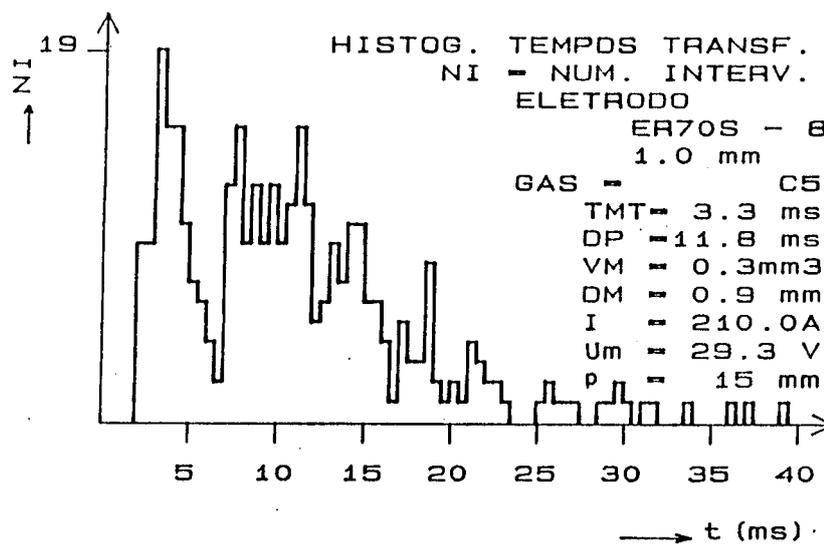


Fig. 8.3 - Histograma dos tempos de transferência em soldagem com 210 A.

O TRANSP2, deixa a cargo do usuário a determinação de cada instante de transferência, o que é feito através do deslocamento de uma linha vertical ao longo de todo o oscilograma. Quando a

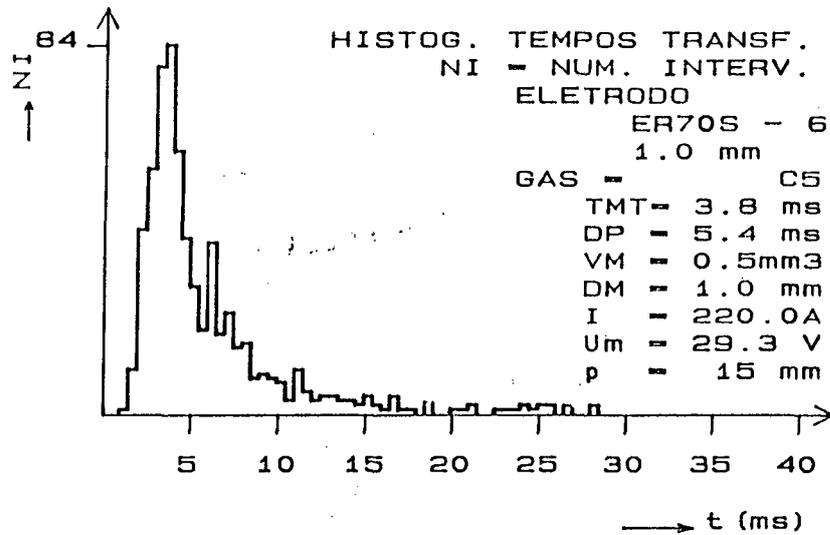


Fig. 8.4 - Histograma dos tempos de transferência em soldagem com 220 A

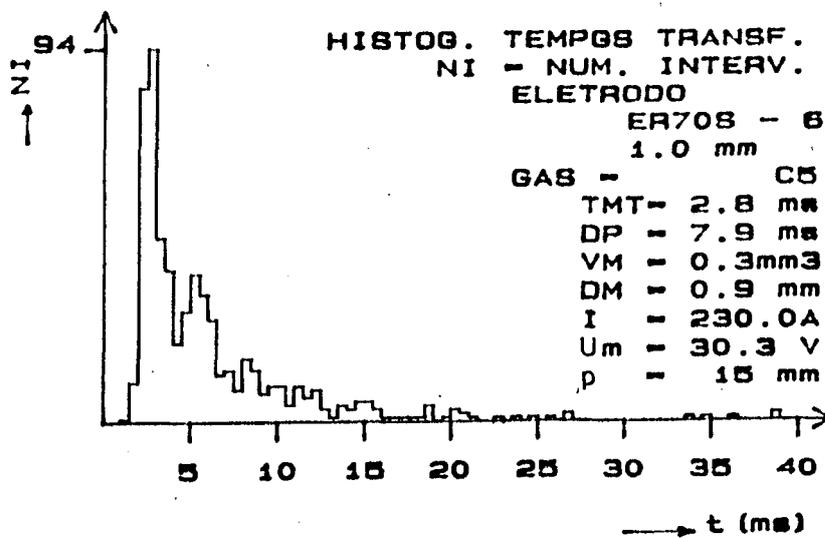


Fig. 8.5 - Histograma dos tempos de transferência em soldagem com 230 A.

linha se situar sobre uma transferência, o usuário, mediante o acionamento da tecla "enter", informa ao microcomputador que aquele é o instante de uma transferência. Desta maneira, a linha vertical, que pode ser deslocada ao longo de todo o oscilograma, permite a memorização de todas as transferências. Este procedimento, embora não seja tão automatizado quanto o anterior, permite maior certeza do resultado, principalmente em casos em que o oscilograma for bastante desuniforme.

Foram realizados ensaios para o arame-eletrodo ER70S-6 de 1 mm de diâmetro nas correntes de 200, 210, 220, 230 e 240 A, utilizando-se a mistura gasosa de 95% de argônio e 5% de CO₂. Em 200 A, o processo se revelou muito instável, obtendo-se um oscilograma bastante irregular, não próprio para o tratamento estatístico proposto. Em 240 A, os diâmetros de gota já são tão pequenos, que o oscilograma passa a não ser mais um instrumento adequado para a observação de transferência. Com as correntes intermediárias obteve-se tempos modais de transferência de 2,8, 3,3 e 3,8 ms e diâmetros modais de gota de 0,9 e 1,0 mm, como pode ser constatado nos dados dos histogramas. Os desvios padrão dos tempos modais de transferência apresentam valores bastante grandes, o que também significa dizer que os diâmetros de gota também oscilam bastante.

8.2 - ALGORITMO PARA ESTUDO DE TRANSFERENCIA POR PROJÉTIL EM CORRENTE PULSADA

Este algoritmo, configurado no programa PULSO (fig.

8.6) permite testar as variáveis, anteriormente determinadas pelos programas TRANSP1 e TRANSP2, para a validação definitiva do parâmetro de destacamento de gota "D" [46, 71], que é uma função de correlação entre a corrente de pulso e tempo de pulso ($I_p^2 \cdot t_p = D$) para que se tenha a garantia de transferência de uma gota por pulso.

As informações imprescindíveis ao controle da soldagem, fornecidas ao programa por ocasião da chamada do "menú" 2 são as variáveis corrente média, corrente de pulso, tempo de pulso, corrente de base e tensão de referência. Esta última serve para controlar a velocidade do arame-eletrodo pelo controle externo. O algoritmo permite que se possa ajustar o comprimento do arco durante a soldagem pela alteração desta variável. Também, durante o desenrolar do ensaio, é possível se determinar o diâmetro hipotético de gota, supondo-se o desprendimento de uma gota por pulso, através do pressionamento de uma tecla, que faz iniciar um processo de leitura da velocidade do eletrodo. Este diâmetro é indicado no vídeo do microcomputador. Se for do desejo alterá-lo durante o ensaio, isto poderá ser feito pressionando-se teclas específicas. A cada pressão nestas teclas, a corrente de base é alterada e, para que a corrente média seja mantida, o tempo de base também se modifica automaticamente. Em consequência, o período é modificado, e com isso o diâmetro hipotético de gota. Após todos estes ajustes durante a soldagem, pode-se realizar uma aquisição de dados e a posterior apresentação dos oscilogramas. Da observação destes, pode-se detectar a localização temporal de ocorrência da transferência devido aos picos de tensão característicos, como mostram as figs. 8.7, 8.8 e 8.9. O oscilograma da fig. 8.7 representa uma soldagem com as variáveis levemente modificadas em re-

lação as apresentadas pelo histograma da fig. 8.4. Como pode ser observado no oscilograma da tensão, as transferências metálicas, detectadas através dos pequenos picos de tensão, ocorreram impe-

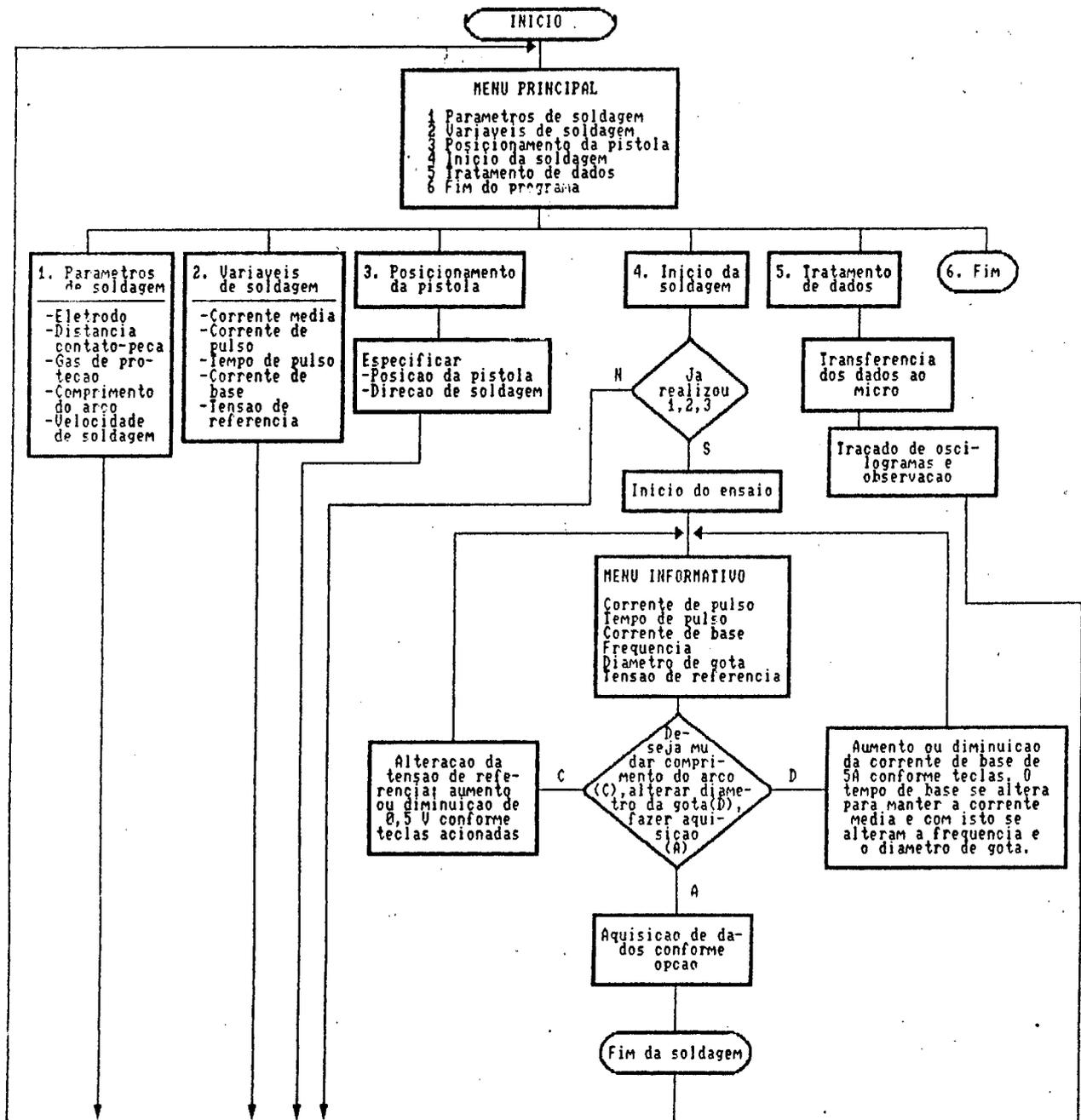


Fig. 8.6 - Diagrama de blocos do programa PULSO.

riodicamente, as vezes na fase de pulso e outras vezes na fase de base. Isto caracteriza uma instabilidade do arco, que se faz sentir também no oscilograma como um todo.

Experiências adicionais mostraram, pela observação dos oscilogramas e do comportamento visual do arco, que com diâmetros de gota menores do que o do arame-eletrodo, como é o caso do apresentado na fig. 8.7, não se consegue controlar perfeitamente

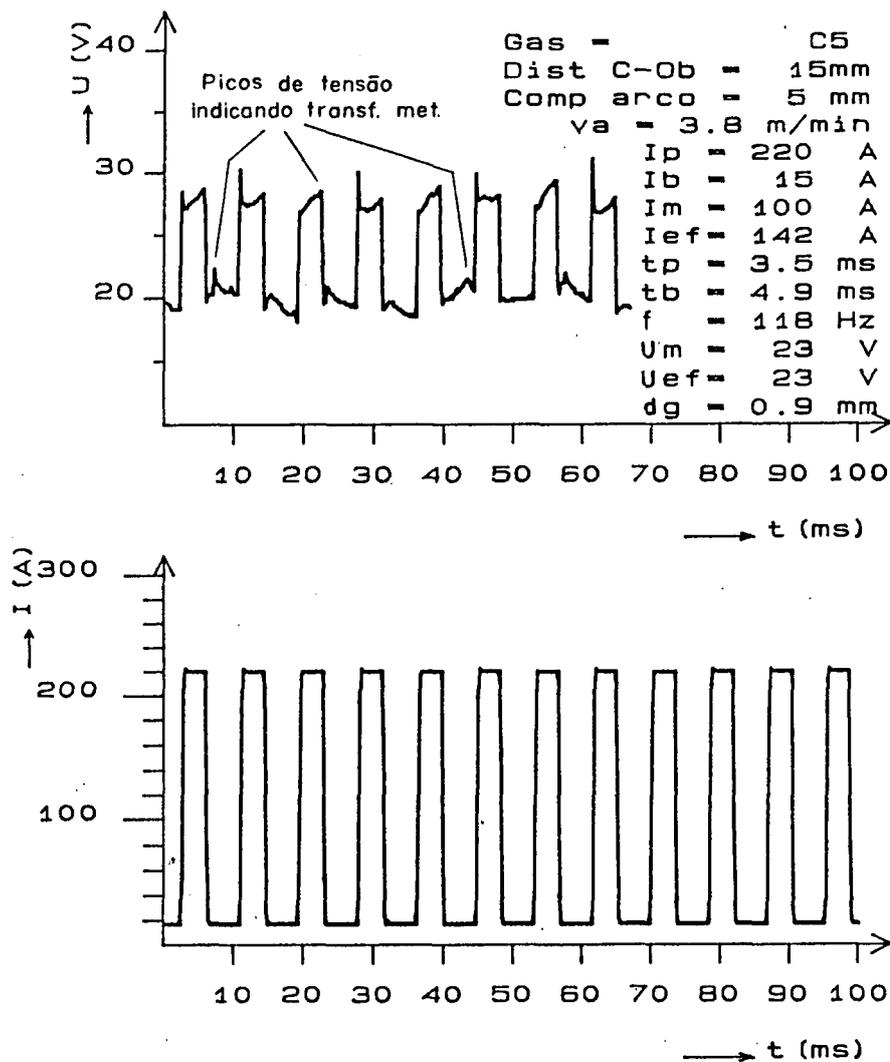


Fig. 8.7 - Oscilograma de soldagem em corrente pulsada utilizando dados obtidos a partir dos histogramas.

a transferência metálica, mesmo modificando as variáveis. Assim, novas experiências foram procedidas admitindo-se diâmetros de go-

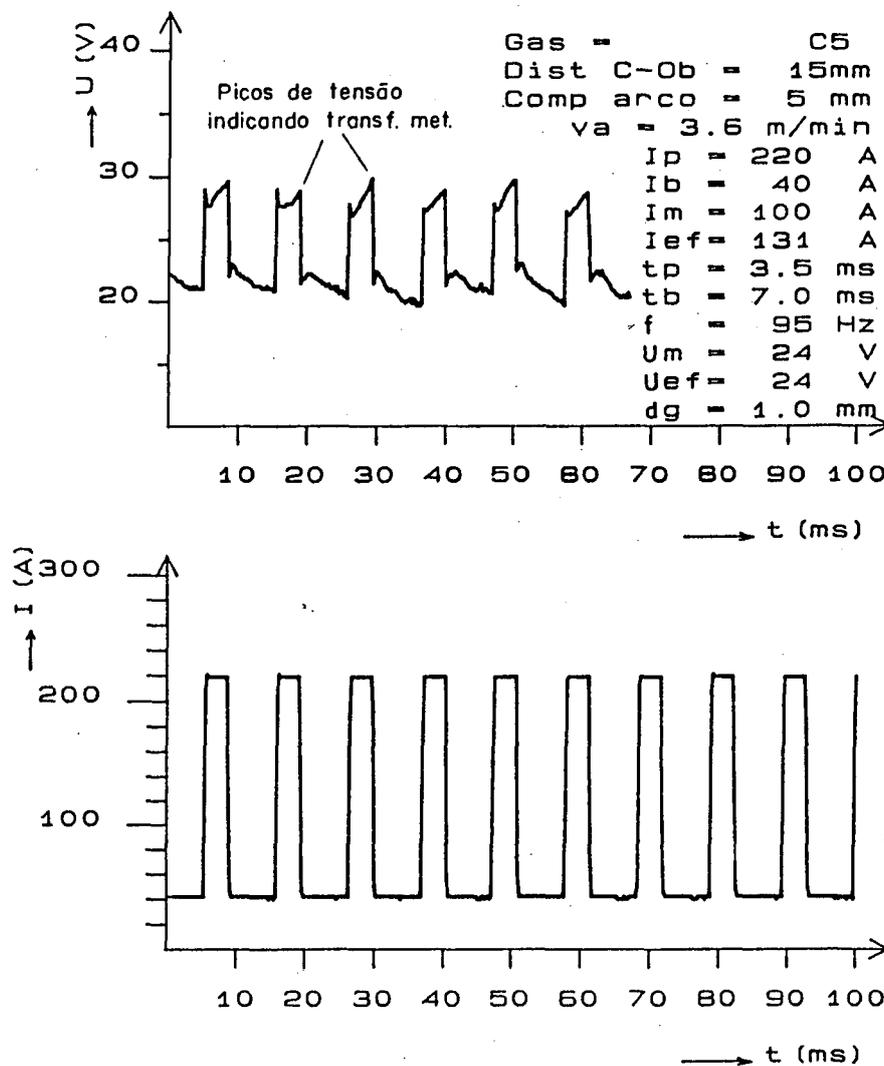


Fig. 8.8 - Oscilograma de soldagem em corrente pulsada com os mesmos dados de pulso da fig. 8.7, exceto no diâmetro de gota (d_g) e nas variáveis decorrentes disto.

ta maiores. A fig. 8.8, por exemplo, retrata o oscilograma de uma soldagem em que foi mantido o diâmetro de gota, obtido a partir do histograma da fig. 8.4. Observa-se que o oscilograma da tensão já mostra uma boa regularidade, com os picos de tensão ocorrendo

todos no final da fase de pulso. Assim, pode-se admitir que o parâmetro de destacamento para este diâmetro de gota é de 169.

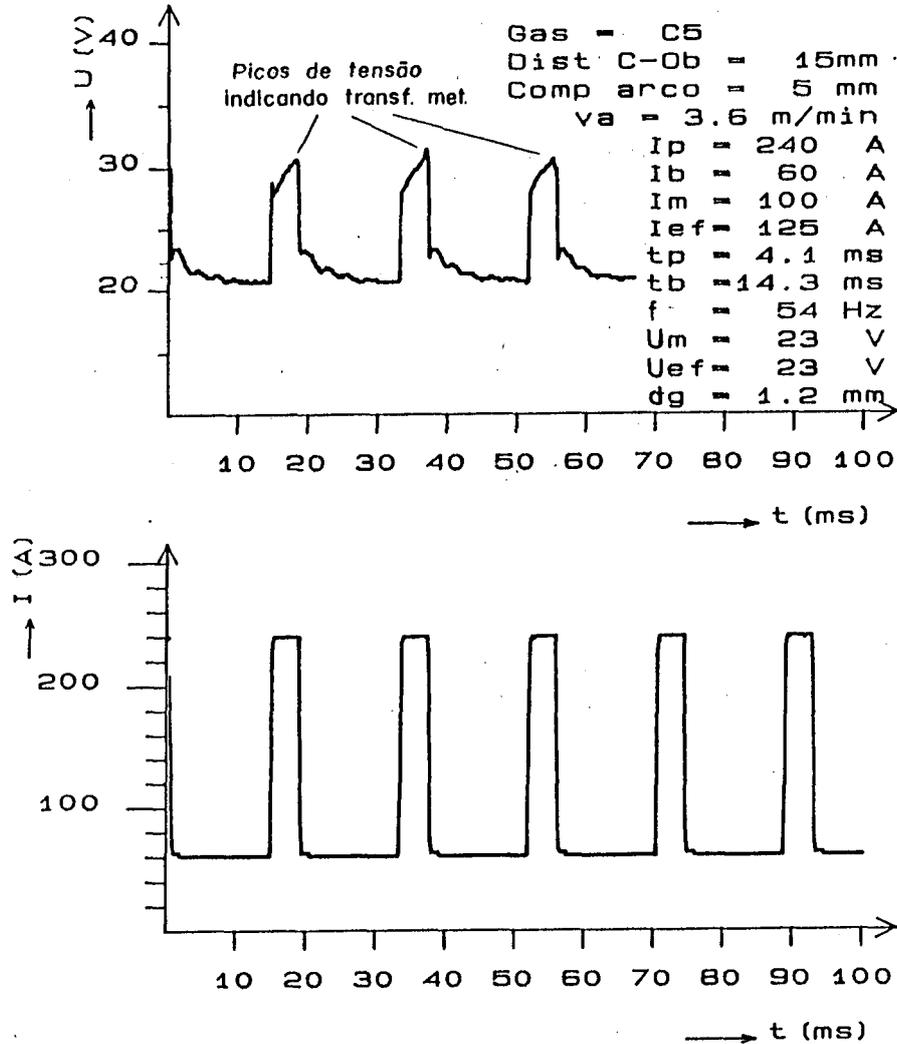


Fig. 8.9 - Oscilograma de soldagem em corrente pulsada com variáveis de pulso adequadas para diâmetro de gota de 1,2 mm.

Entretanto, melhores resultados foram obtidos com diâmetros de gota maiores do que 15% do diâmetro do eletrodo, como pode ser constatado pelo oscilograma da fig. 8.9, onde retrata uma experiência para diâmetro de gota de 1,2 mm. Neste caso, o oscilograma da tensão mostra uma repetibilidade quase perfeita,

indicando excelente estabilidade de arco. Para esta condição, o parâmetro de destacamento vale 236.

8.3 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A metodologia adotada se revelou perfeitamente eficaz para a seleção das variáveis de soldagem em corrente pulsada.

O programa TRANSP1 para a detecção de transferência metálica oferece bons resultados dentro de uma faixa específica de corrente, devendo-se, entretanto, sempre compará-los com os obtidos pelo TRANSP2, pelo menos em intervalos de tempo pequenos. Destaca-se que a utilização do TRANSP2 requer um tempo muito grande de utilização do microcomputador. Para varrer os 3854 ms, correspondentes aos 50000 dados adquiridos, são necessários mais de 60 min de trabalho, enquanto que o programa TRANSP1 realiza a tarefa em pouco mais de 2 min.

O programa PULSO, se revelou um dos mais versáteis utilitários do sistema, pois ao mesmo tempo em que comanda variáveis, faz uso do controle externo para regular a velocidade do arame-eletrodo, e faz aquisição e tratamento de dados.

9. ALGORÍTMOS PARA O CONTROLE SINÉRGICO DO PROCESSO MIG/MAG PULSADO

Embora se possa obter grandes vantagens da utilização da corrente pulsada, como já comentado anteriormente, introduz-se uma dificuldade no que tange a correta seleção das variáveis de soldagem. Em modulação corrente, que é a que oferece as melhores condições para o estabelecimento de relações de interdependência, é necessário a fixação de cinco variáveis para produzir uma corrente média previamente definida. A corrente de pulso (I_p) e o tempo correspondente (t_p) são as variáveis mais responsáveis pelo controle da transferência de uma e somente uma gota por pulso. O tempo de base (t_b) definindo em conjunto com o tempo de pulso, o período, é responsável pelo diâmetro das gotas. A corrente de base é a variável determinativa da corrente média. Por último, resta a velocidade do arame-eletrodo, que deve ser definida em consonância com a corrente média e eficaz para se conseguir equilíbrio com a velocidade de fusão.

Isto tudo torna o processo incômodo para uma aplicação industrial adequada. Assim, para melhor viabilizar a aplicação desta versão do processo MIG/MAG, se tem procurado desenvolver controles que fazem automaticamente a seleção destas variáveis a partir de informações, que o operador fornece ao equipamento. A estes sistemas se tem dado frequentemente o nome de controle sinérgico. O nome sinérgico significa ação simultânea de várias grandezas para o cumprimento de uma determinada função. Esta ação simultânea deve permitir que todas as grandezas, num esforço comum, atuem no sentido de permitir a variação da corrente média de

soldagem, mantendo o controle sobre a transferência metálica, como anteriormente descrito. Os princípios utilizados para tal fim podem ser bastante diversos, todavia, todos se baseiam na equação de destacamento:

$$D = I_p^2 \cdot t_p \quad (9.1)$$

referenciada no capítulo anterior.

O objetivo deste capítulo é mostrar como alguns destes princípios, já apresentados pela literatura, foram adaptados ao sistema de soldagem desenvolvido, ao mesmo tempo em que também apresenta novas proposições para esta forma de controle. Com todas estas versões de controle sinérgico, a seguir apresentadas, se tem a possibilidade de estudar e se determinar a que melhor se adapta a materiais de propriedades físicas diferentes.

9.1 - CONTROLE SINÉRGICO SINCO

Este controle (fig. 9.1) utiliza como variável de entrada a corrente média. A velocidade do arame-eletrodo é, neste caso, uma variável dependente, que é calculada pelo microcomputador utilizando a equação 7.8. O diâmetro de gota, que vai determinar o parâmetro destacamento "D", pode também ser uma variável de entrada (eq. 7.10).

O algoritmo fixa uma corrente de pulso (I_p) de partida acima da corrente de transição e, a partir dela, considerando a constante "D", calcula o tempo de pulso (t_p). O período total (T) é definido pelo diâmetro de gota desejado, a partir da velo-

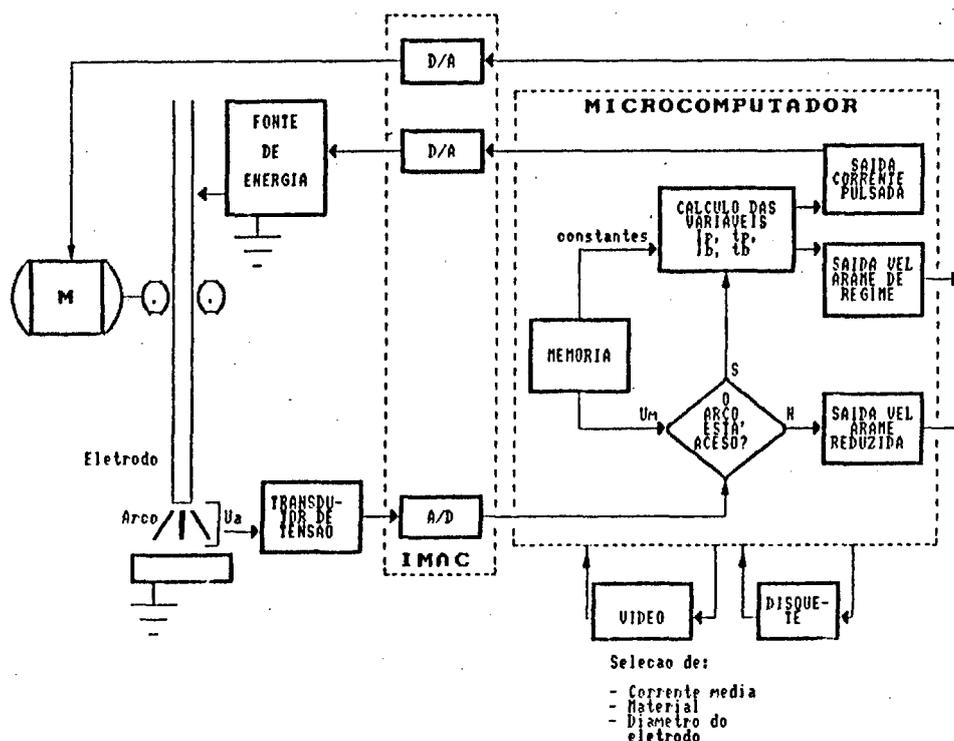


Fig. 9.1 - Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINCO.

cidade do arame-eletrodo, já calculada, utilizando-se a equação (7.9).

O tempo de base sai então da diferença entre T e t_p . Falta somente a determinação da corrente de base que é obtida da equação da corrente média:

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad (9.2)$$

O que pode acontecer é que esta corrente de base pode resultar num valor muito baixo (ou mesmo negativo), que se implementado causaria instabilidade de arco. Quando isto acontece, o algoritmo recalcula tudo a partir de um incremento dado na corrente de pulso, o que caracteriza um método iterativo.

O arco é continuamente monitorado, através da observação da tensão. Se esta indicar um nível que caracterize a não existência de arco, a velocidade do arame-eletrodo é proporcionalmente modificada para o restabelecimento do mesmo.

Os resultados experimentais revelaram uma boa estabilidade de arco com correntes médias de até 40 A. Entretanto, os ensaios se procederam somente com condução automática da pistola.

9.2 - CONTROLE SINÉRGICO SINVA

Este controle é diferente do anterior no sentido em que a velocidade do arame é agora a variável de partida (fig. 9.2). O caminho para a determinação das variáveis é inverso do anterior somente no interrelacionamento entre a corrente média e a velocidade do arame. A partir daí existe uma grande equivalência, a menos da correção de instabilidades, que agora são contidas por uma atuação sobre as variáveis de corrente. Na abertura do arco, ou quando for detectado uma tensão média muito baixa, o microcomputador envia um sinal à fonte de energia para que esta forneça um nível de corrente mais alto.

Os ensaios experimentais revelaram um comportamento idêntico ao controle anterior.

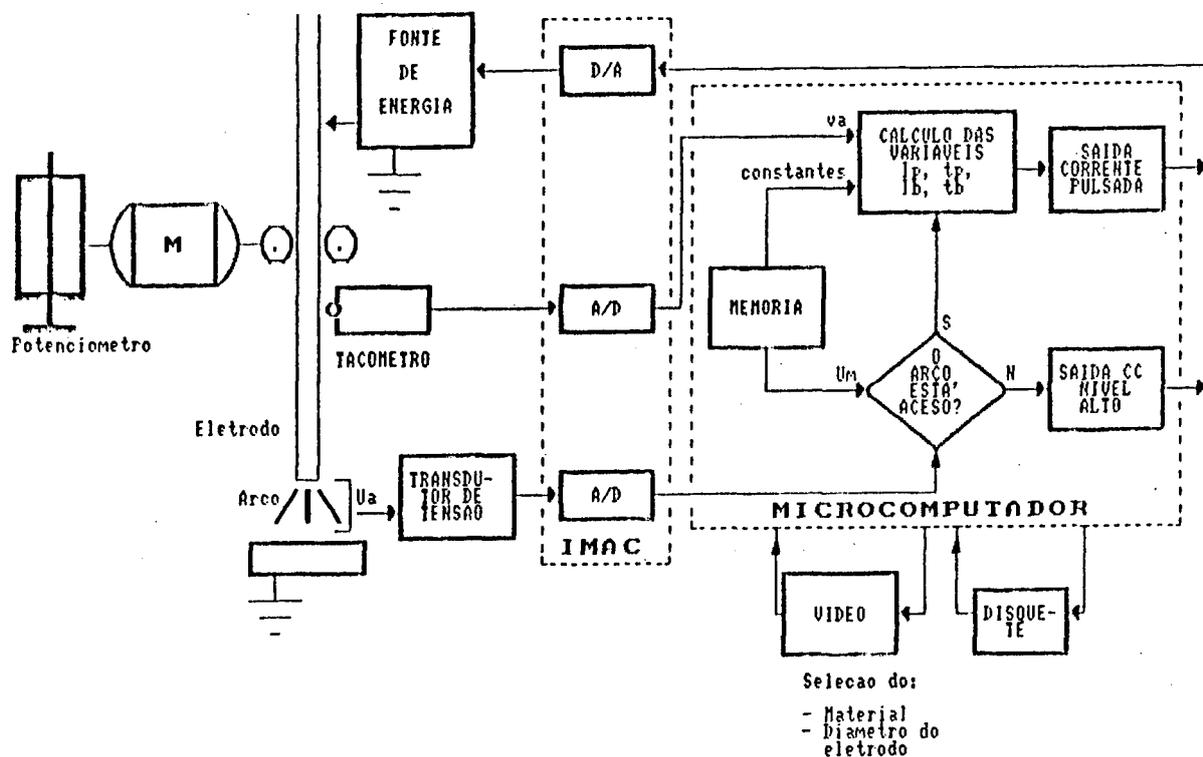


Fig. 9.2 - Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINVA.

9.3 - CONTROLE SINÉRGICO SINTE

Ambos os controles anteriores se baseiam no relacionamento matemático entre a corrente e velocidade do arame-eletrodo, o que pressupõe, para que o processo seja mantido estável, a manutenção da distância contato-peça aproximadamente igual às con-

dições pré fixadas naquele relacionamento.

O presente controle não se baseia neste fundamento e sim na monitoração constante do comprimento do arco, através da leitura da tensão média, para uma atuação em tempo real sobre a corrente média (fig. 9.3). A variável utilizada para modificar a corrente média é o tempo de base (t_b), uma vez que a corrente de pulso e seu respectivo tempo, não devem ser alterados, e a corrente de base não pode descer a valores que comprometam a estabilidade do arco.

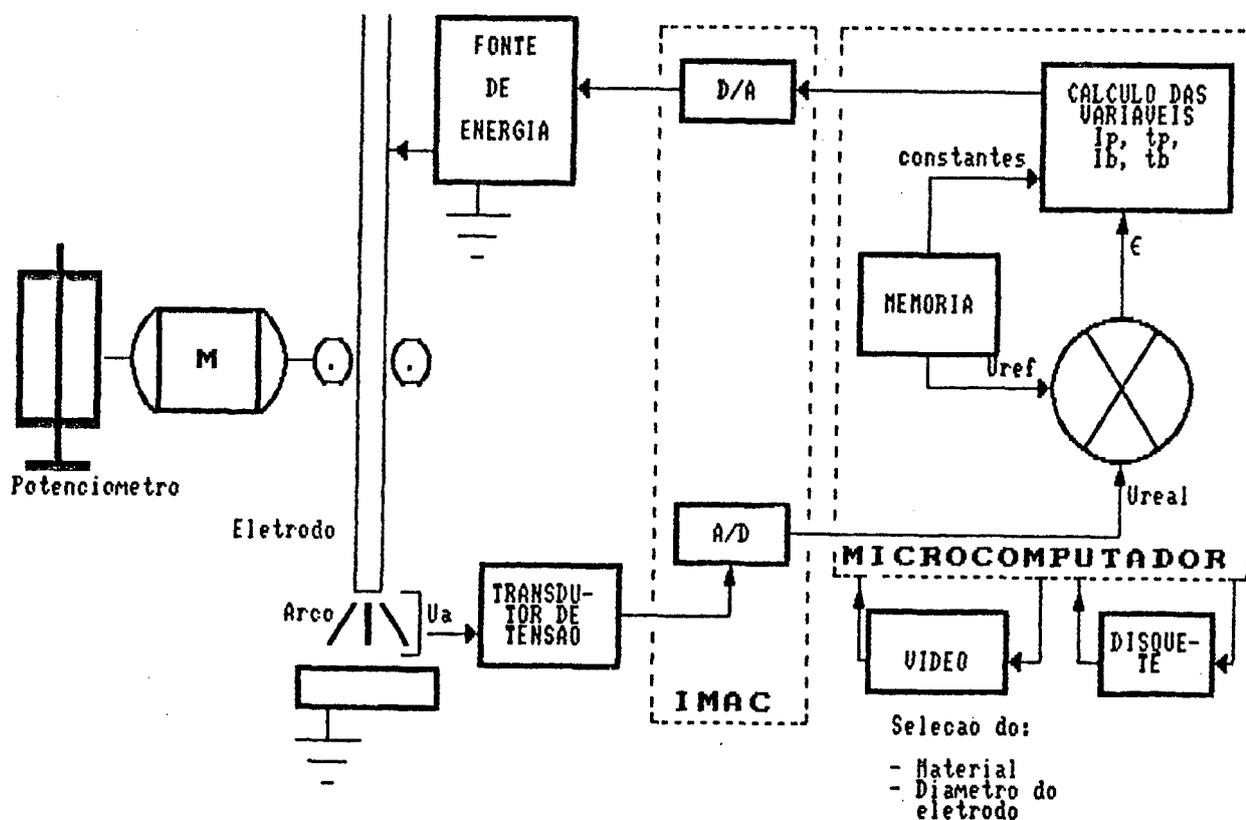


Fig. 9.3 - Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINTE.

A alteração do tempo de base, significa uma alteração da frequência, o que significa dizer que o controle é feito por modulação de frequência. Isto tem implicações diretas sobre o volume de gota transferido em cada pulso, o que altera também a constante "D". Todavia, isto não é tomado em conta no controle, o que implica num sistema não tão bom como os anteriores em termos de precisão de transferência, mas tem as suas vantagens em termos da não limitação da distância contato-peça. Assim, as soldagens em que a pistola é conduzida pelo operador são mais fáceis de serem executadas.

9.4 = CONTROLE SINÉRGICO SINCOEX

Este controle (fig. 9.4) detém uma grande parcela de novidade. Ele associa o microprocessamento de dados com controle analógico. Como no caso anterior, não existe na memória do microcomputador nenhum relacionamento entre a corrente e a velocidade do arame-eletrodo. Esta é automaticamente regulada pelo controle analógico, denominado "controle externo" montado no alimentador do arame. As variáveis de pulso são calculadas de acordo com a corrente média pretendida e injetadas no controle da fonte de energia. Uma tensão de referência, também determinada pelo microcomputador em consonância com a corrente média, é enviada ao controle externo para que este controle a velocidade do arame-eletrodo. Analogamente ao caso anterior, não se tem uma precisão muito grande quanto a transferência metálica, mas também

não se tem restrições quanto a distância contato-peça, como ficou constatado nos ensaios experimentais.

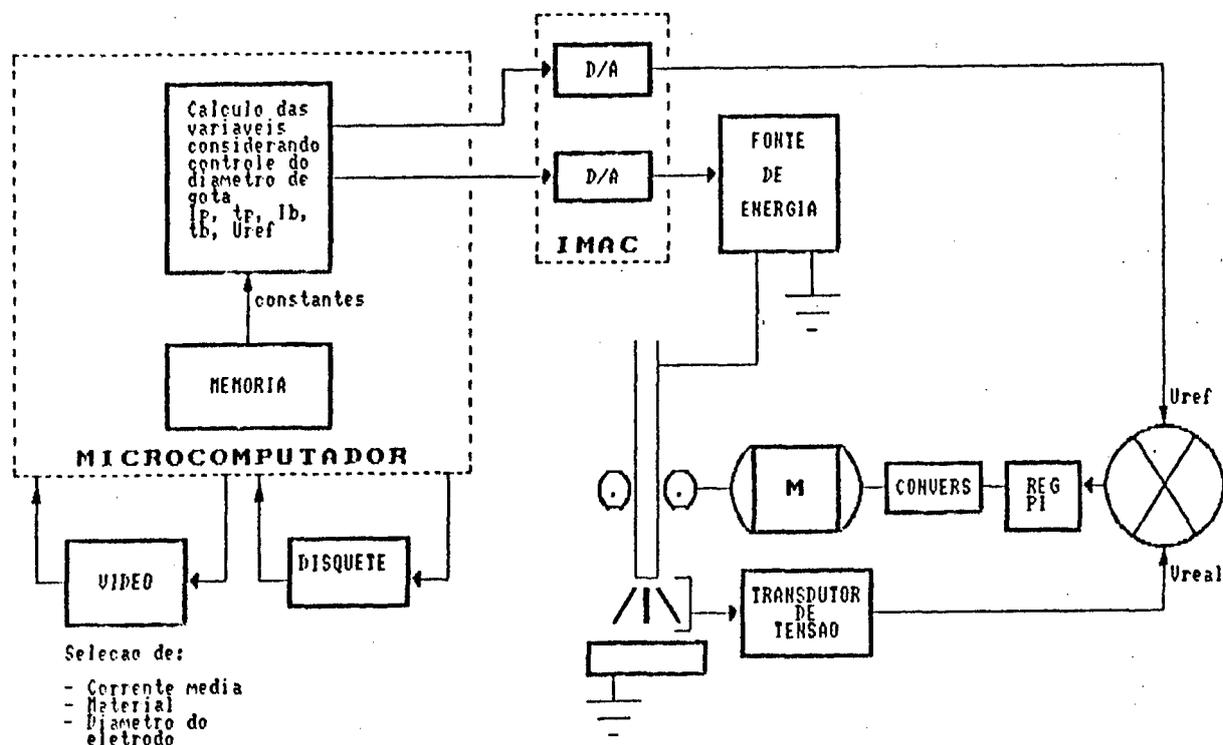


Fig. 9.4 - Diagrama de blocos simplificado do controle sinérgico SINCOEX.

9.5 - CONTROLE SINÉRGICO NA SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS

Embora, muito ainda haja por fazer para otimizar os controles sinérgicos propostos, o que não é o escopo da presente pesquisa, apresenta-se já aqui alguns ensaios que comprovam a

grande eficiência do processo na soldagem de chapas finas. O controle sinérgico utilizado foi o SINCO e as chapas utilizadas foram de aço SAE 1015 de 1 e 2 mm de espessura com preparação em "I" sem qualquer fresta e na posição plana. Os testes foram conduzidos com diâmetros de gota de 1,1 e 1,2 mm com eletrodo ER70S6 de 1 mm de diâmetro. Ótimos resultados foram obtidos com diâmetro de gota de 1,2 mm, tanto para a espessura de chapa de 1 mm, como para a de 2 mm, como pode ser observado na macrografia de um dos corpos de prova (fig.9.5) e nas fotos da parte superior e inferior, nas fig. 9.6. Como se observa, a penetração pelo lado reverso é homogênea, dando inclusive a impressão de que também foi soldado por este lado.

Estes resultados apresentam uma repetibilidade muito superior aos que são obtidos com o processo convencional.

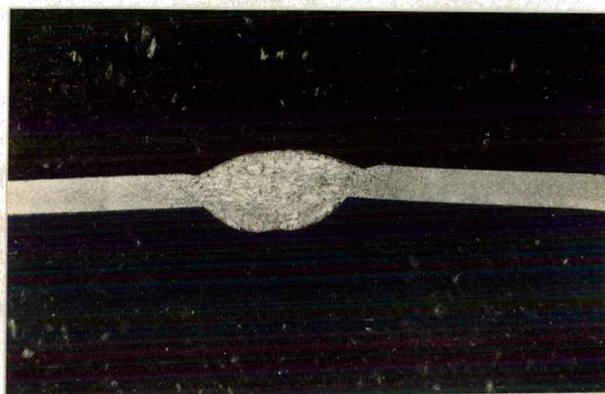
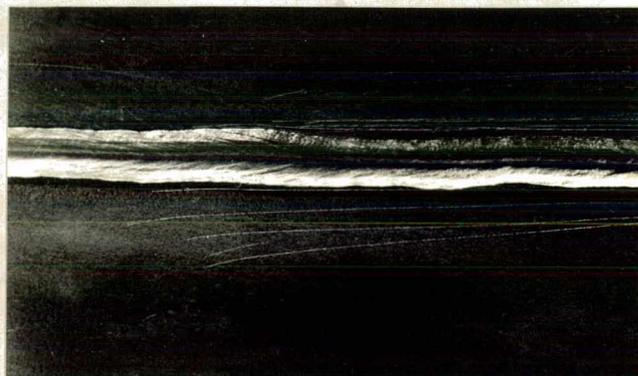


Fig. 9.5 - Secção transversal do cordão de solda executado em chapa de 1mm de espessura com o controle sinérgico SINCO, utilizando-se corrente de 45 A.



a) parte superior



b) parte inferior

Fig.9.6 - Vista longitudinal do cordão de solda executado em chapa de 1 mm de espessura com o controle sinérgico SINCO, utilizando-se corrente de 45 A.

10. CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido cumpriu a performance pretendida no projeto da tese, oferecendo uma alta flexibilidade em combinação com uma fácil comunicação entre homem e máquina. Ele configura um completo laboratório de soldagem, que viabiliza a aquisição de conhecimentos efetivos do processo MIG/MAG, saindo-se do empirismo, e com isso, abrindo portas para maiores avanços técnico-científicos.

De especial inovação, que este sistema traz em relação a outros de conhecimento da literatura, é a abrangência de atuação. Ele faz a aquisição e análise de dados, comanda variáveis e controla o processo em tempo real. Todas estas funções podem ser executadas em modulação de tensão, em modulação de corrente (ambas com ou sem pulsação) e em modulação mista. Em corrente pulsada, o sinal para controle de uma das fontes de energia pode ter qualquer forma desejada, possibilitando excelentes estudos sobre esta versão do processo.

Para o controle do processo em tempo real, o sistema também oferece uma excelente versatilidade. Ele pode atuar, utilizando-se programação em linguagem de alto nível, que confere grande facilidade de modificações nos princípios de controle, e pode atuar também utilizando-se programação em linguagem de baixo nível, através das chamadas rotinas de monitoração, que conferem maior rapidez de atuação. As quatro versões apresentadas de controle do processo em corrente pulsada utilizaram princípios já empregados em equipamentos industriais e também novas implementações oferecidas pelo sistema. Isto proporciona a vantagem de se poder fazer um estudo comparativo da performance de cada um dos

princípios utilizados em situações distintas de corrente média (ou eficaz), para metais diferentes e para as diversas posições de soldagem. Isto representa um passo importante no projeto de sistemas sinérgicos que poderão ser integrados à fontes de energia transistorizadas.

Os medidores das grandezas elétricas formam mais uma das boas características do sistema. Utilizando sensores galvanicamente isolados, se tem disponível os sinais de corrente e tensão instantâneas, médias e eficazes com erros minimizados a níveis necessários ao estudo. A velocidade de aquisição dos valores instantâneos em tempos de até $77 \mu s$ é mais do que suficiente para acompanhar os fenômenos dinâmicos do arco e por conseguinte, habilita o equipamento para ensaios de consumíveis e, principalmente para testar fontes de energia.

As implementações procedidas no alimentador de arame, no tocante a lógica de interpretação de sinais, tornou viável a versatilização de controle da velocidade do arame-eletrodo. Dependendo da necessidade, esta velocidade é controlada a partir de um sinal, que indica diretamente o valor da mesma, ou é controlada a partir de um sinal indicativo do comprimento do arco, que é monitorado continuamente para comparação com o comprimento pretendido. Esta última modalidade de controle não é utilizada até o momento em equipamentos do processo MIG/MAG, entretanto, mostrou uma excelente performance, principalmente associada à corrente pulsada.

Os quatro aplicativos desenvolvidos atestam a alta eficiência do sistema para pesquisa. Eles representam as linhas mestras de conhecimentos necessários para a otimização das variáveis de soldagem, e, por isso, imprescindíveis ao estudo da automação.

BIBLIOGRAFIA

- [1] QUITES, A. M. e DUTRA, J. C. Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico. Livro Didático, edição dos autores, 78.
- [2] SCHELLHASE, M. Der Schweisslichtbogen - ein technologisches Werkzeug. Livro, Deutscher Verlag fuer Schweisstechnik (DVS) GmbH, Duesseldorf, outono/85.
- [3] LANCASTER, J. Metal Transfer in Fusion Welding. Arc Physics and Weld Pool Behaviour, London 48, pp. 135-146, 89.
- [4] DILTNEY, U. Einfluss von Schutzgasen auf den Werkstoffuebergang in Metall - Schutzgasschweiss-Verfahren. DVS - Bericht, Bd. 42, pp. 145-194, 76.
- [5] BRANDI, S. D. Análise da Transferência Metálica na Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido. Tese de Mestrado da Escola Politécnica da USP, 88.
- [6] SALLBONE, C. Past, Present and Future Developments in Welding Processes, 1 st International Symposium Johannesburg, South Africa, 11/85.
- [7] OGASAWARA, T. MARUYAMA, T., SAITO, T., SATO, M. and HIDA, Y. A Power Source for Gas Shielded Arc Welding with New Current Waveforms. Welding Journal, 03/87.
- [8] BROSILOW, R. The New GMAW Power Supplies. Welding Design and Fabrication, 06/87.
- [9] PAN, J. L., ZHANG, R. H., OU, Z. M., WU, Z. Q. and CHEN, Q. Adaptive Control GMA Welding - A New Technique for Quality Control. Welding Journal, 03/89.
- [10] DORN, L., RIPPL, P. Stromquelleneinfluss beim Lichtbogen schweissen - dynamisches Verhalten beim Lichtbogenhand

schweissen mit Gleichstrom. Schweissen und Schneiden, 06/87.

- [11] ALCANTARA, N. G. O Presente e o Futuro da Indústria de Soldagem - Trabalho apresentado no 1º Simpósio de Tecnologia da Soldagem da Região Sul, promovido pelo SENAI - Porto Alegre - 09/86.
- [12] KOHN, G. and SIEWERT, T. A. The Effect of Power Supply Response Characteristics on Droplet Transfer of GMA Welds. Advances in Welding Science and Technology. Proceedings International Conference, Gattlinburg, TN, USA, 05/86.
- [13] LUCAS, W. and BUTLER, M. An Evaluation of Minicomputer Techniques for Data Acquisition and Analysis in Arc Welding Process Research. The Welding Institute, 02/81.
- [14] GUPTA, S. R., GUPTA, P. C. and REHFELD, D. Process Stability and Spatter Generation During Dip Transfer in MAG Welding. Welding Review, 11/88.
- [15] MITA, T., SAKABE A. and YOKOO, T. Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ Gas Shielded Arc Welding. Welding International, No. 2/88.
- [16] MASUMOTO, I., KUTSUNA, M., and ABRAHAM, M. Metal Transfer and Spatter Loss in Double Gas Shielded Metal Arc Welding - Study on Double Gas Shielded Metal Arc Welding (Report 1). Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 19, No. 2, 10/ 88.
- [17] GLOWICKI, G. und SOENNICHSEN, H. MAGCI - Verfahren-ein neues Schutzgasschweissen - DVS 74.
- [18] BOEHME, D. und HEUSER, H. Metal-Schutzgasschweissen mit zwei getrennt zugeführten Schutzgasen - Stromungsverhal-

ten und Einfluss des Argonanteiles auf die Einbrandverhältnisse. Schweissen und Schneiden, 02/88.

- [19] TYVONCHOK, P. A. and PATSKEVICH, I. R. Special Features of Metal Transfer in the Arc in Deposition in a Mixture of Natural Gas and Oxygen. Welding International No. 2/88.
- [20] NEEDHAM, J. C. and CARTER, A. W. Arc and Transfer Characteristics of the Steel/CO₂ Welding Process. British Welding Journal, 10/67.
- [21] LANCASTER, J. F. The Physics of Fusion Welding. Part 2: Mass Transfer and Heat Flow. IEE Proceedings, Vol. 134, 11/87
- [22] LIU, S. and SIEWERT. Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate. Welding Journal, 02/89.
- [23] WASZINK, J. H. and PIENA, M. J. Experimental Investigation of Drop Detachment and Drop Velocity in GMAW. Welding Journal, 06/84.
- [24] KILLING, R. Beitrag zum Metal - Schutzgasschweissen von Aluminum mit zwei getrennten, konzentrisch angeordneten Schutzgasstroemen. Sonderdruck aus Schweissen und Schneiden, 09/84.
- [25] KILLING, R. SOENNICHSEN, H. und GLOWICKI, G. Beitrag zur Classifizierung des Werkstoffueberganges beim Mettalschutzgasschweissen. Schweissen und Schneiden 36, pp. 575/78, 12/84.
- [26] MURTHY, M.S.P. and LOPER, C. R. Jr. Arc and Metal Transfer Characteristics During the GMA Welding of Rare Earth Treated C-Mn-Nb HSLA Steels Using Solid and Flux Cored Wires. ASM International, 05/86.

- [27] AMIN, M. Prediction of Pulse Parameter for MIG Welding, Welding Institute Research Bulletin, Vol. 24, 02/83.
- [28] AMIN, M. Synergic Pulse Arc Welding, Metal Construction, 06/81.
- [29] AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer, Metal Construction, 05/83.
- [30] AMIN, M. Prediction of Square Wave Pulse Current Parameters for Control of Metal Transfer in MIG Welding. Welding Institute Research Report 83, 1978/p.
- [31] DREWS, P. e DUTRA, J. C. Utilização do Microcomputador para a Automatização e Escolha de Parâmetros na Soldagem MIG/MAG com Fontes de Energia Tiristorizadas e Transistorizadas. Anais do VIII COBEM - pp. 729, 732 - 12/85.
- [32] QUINTINO, L. Fusion Characteristics in Pulsed - GMAW of mild Steel. PhD Thesis of Cranfield Institute of Technology, 04/86.
- [33] ESSERS., W. G. and VAN COMPEL, M. R. M. Arc Control with Pulsed GMA Welding. Welding Journal, 06/84.
- [34] ZHIMING OU und AL-ERHAYEM, O. Feedbacksteuerung zum Metall Schutzgasschweissen mit Impulslichtbogen. Schweissen und Schneiden, 03/89.
- [35] DUTRA, J. C. Sistema de Soldagem MIG/MAG Computadorizado. Anais do 14º Encontro Nacional da Tecnologia da Soldagem, 2º vol. - Associação Brasileira de Soldagem, 11/88.
- [36] DUTRA, J. C., SCHNEIDER, C. A. e OLLÉ, L. F. Banco de Ensaio para Estudo e Automação do Processo MIG/MAG. Anais do 13º Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, pp. 471-488, 87.

- [37] DUTRA, J. C., e OLLÉ, L. F. O Controle Externo para Soldagem MIG/MAG com Corrente Constante. Anais do 14º Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Vol. 1, Associação Brasileira de Soldagem - 11/88.
- [38] WEINSHENK, H. und ULRICH, L. Regelungstechnische Betrachtungen beim Lichtbogenschweissen. Schweisstechnik 15, Heft 2, 65.
- [39] THOMPSON, F. M. Adaptive Control of the Welding Process. Australian Welding Journal, spring/86.
- [40] AMIN, M. Microcomputer Control of Synergic Pulsed MIG Welding - Welding Institute Research Report 166, 81.
- [41] KANNATEY-ASIBU, E. Jr. Analysis of the GMAW Process for Microprocessor Control of Arc Length Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, vol. 109, 05/87.
- [42] FRIELINGHAUS, W. S. MIG-Impulslichtbogenschweissen von Baustaehlen in Zwangspositionen mit mechanischer Brennerpendelung und Magnetischer Lichtbogenauslenkung, Technisch wissenschaftlicher Bericht der Abteilung fuer Prozesssteuerung in der Schweisstechnik der RWTH-Aachen, 09/80.
- [43] PAN, J. L. und ZHANG, H. Eine neue Methode der Steuerung des Schweisslichtbogens. Schweissen und Schneiden, 10/81.
- [44] REYNOLDS, J. A New Process for Thin Gauge Aluminum. Welding Journal, 07/80.
- [45] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal Arc Welding. Part II - Control of Metal Transfer in Inert-Gas Shielded Arc Welding, British Welding Journal, 07/60.

- [46] ALLUM, C. J. MIG Welding - Time for a Reassessment, Metal Construction, 06/83.
- [47] DUTRA, J. C. Aspectos da Soldagem a Arco Voltaico Convencionalmente não Considerados. 1º Simpósio de Tecnologia da Soldagem da Região Sul, SENAI, RS, 09/86.
- [48] KILLING, R. Die Regelung der Lichtbogenlänge. Sonderdruck aus der Praktiker - DVS, 09/78.
- [49] AMIN, M. and NASEER-AHMED. Synergic Control in MIG Welding. 1 - Parametric Relationships for Steady DC Open Arc and Short Circuiting Arc Operation. Metal Construction, 01/87.
- [50] AMIN, M. and NASEER-AHMED. Synergic Control in MIG Welding 2 - Power - Current Controllers for Steady DC Open Arc Operation. Metal Construction, 06/87.
- [51] AMIN, M. and NASEER-AHMED. Synergic Control in MIG Welding. 3 - Linear Voltage - Current Controller for Steady DC Open Arc and Short Circuiting arc Operation. Metal Construction, 09/87.
- [52] DILTNEY, U. and STENKE, V. Power Source for MIG-Welding with Special Respect to Synergic Pulse MIG-Welding with Modern, Fully Transistorized Power Sources. Proceedings, International Welding Conference, New Delhi, 01/87.
- [53] JOCHUM, V., KUNZ, W. und SOENNICHSEN, H. Impulstechnik beim Metal-Aktivgasschweißen von Baustählen mit verschiedenen Gas-gemischen. Sonderdruck aus DVS - Berichte - Band 90 - 83.
- [54] PUSCHNER, P. Entwicklungstendenzen bei elektronischen Schweißstromquellen. Schweißen und Schneiden, 02/86.
- [55] KNOCH, R. und WELZ, W. Metal-Aktivgas-Impulslichtbogensch-

weissen mit transistorisierten Stromquellen. Schweißen und Schneiden, pp. 67-71, 02/86.

- [56] FU, Xie-Sheng, USHIO, M and MATSUDA, F. Melting Characteristics of Some Steel and Aluminium Alloy Wires in GMA Welding, Transactions of JWRI, Welding Research Institute of Osaka University, 10/83.
- [57] KUHNE, A. H. Ein Beitrag zur Steuerung und Regelung des automatisierten Schutzgasschweißprozesses und zur Anpassung der Schweißparameter an die jeweilige Fugengeometrie - Dissertation an der TH Aachen, 12/85.
- [58] DREWS, P.; FRASSEK, B. und WILMS, K. Fugengeometrieerfassung mit optischen Sensoren. DVS - Bericht 94, Deutscher Verlag fuer Schweißtechnik, 85.
- [59] DREWS, P., FRASSEK, B., FUCHS, K., KUHNE, A. und WILMS, K. Automatisches Schweißsystem ASTRA. VDI-Z, Bd. 128, 02/86
- [60] CLOOS, Intelligente Cloos Schweißroboter - Catálogo.
- [61] GERIKE, H. Neue Laboratorien fuer Forschung und Lehre zur Schweißprozessautomatisierung an der TH Magdeburg. Schweißtechnik 35, 85.
- [62] BERG, M. J. and WEMAN, K. The Use of an IBM-PC for Real Time Processing of the Pulsed Arc Process. Proceedings, 1st International Conference on Computer Technology in Welding, London, 06/86.
- [63] FRASSEK, B. Mikroprozessorgesteuerte Komponenten fuer die Prozesssteuerung und Automatisierung beim Lichtbogenschweißen. Dissertation an der TH Aachen - 05/87.
- [64] CRC/Evans Electronic Monitoring of the Welding Process Increases Quality. Welding Journal, 03/89.
- [65] STREET, J. A. Practical Measurement of Voltage and Cur-

rent in Arc Welding. Metal Construction, 11/87.

- [66] KNOCH, R. Messgroessen und Messgeraete beim Metallschutzgas schweissen. schweissen und Schneiden, 07/86.
- [67] REHFELDT, D. Untersuchungen zum Metall-Schutzgas schweissen mittels Ultrahochgeschwindigkeitkinematografie und schneller Erfassung elektrischer Schweissparameter. Kurzberichte Schweissen und Schneiden, 03/89.
- [68] PUSCHNER, P. Prozessrueckfuehrung zum Verringern der Spritzerbildung beim MAG-Schweissen, Sonderdruck aus DVS - Berichte Band 65.
- [69] PUSCHNER, P. Robotergeeignete Stromquellen mit ihren Anforderungen und praxisgerechten Schnittstellen, Sonderdruck aus DVS - Berichte Band 94.
- [70] ANALOG DEVICES Especificação de Produto "Integrated Circuit True rms-to-dc Converter - AD 536A", Analog Devices, Norwood, Massachusetts, USA.
- [71] OLIVEIRA SANTOS, J. F. Controlled Transfer MIG Welding of Stainless Steel. PhD Thesis of Cranfield Institute of Technology, 11/1986.