

**MONITORAMENTO, DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDA
BASEADA NO SENSORIAMENTO DA PRESSÃO ACÚSTICA DO ARCO ELÉTRICO NO
PROCESSO GMAW-S**

EBER HUANCA CAYO

MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MONITORAMENTO, DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS
NA SOLDA BASEADA NO SENSORIAMENTO DA PRESSÃO
ACÚSTICA DO ARCO ELÉTRICO NO PROCESSO GMAW-S**

EBER HUANCA CAYO

ORIENTADOR: SADEK CRISOSTOMO ABSI ALFARO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM – 025A/08

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO - 2008

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MONITORAMENTO, DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS
NA SOLDA BASEADA NO SENSORIAMENTO DA PRESSÃO
ACÚSTICA DO ARCO ELÉTRICO NO PROCESSO GMAW-S**

EBER HUANCA CAYO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM SISTEMAS MECTRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Sadek Crisostomo Absi Alfaro, (PhD, UnB)
(Orientador)**

**Prof. Kalil Skeff Neto, (DSc, UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Jair Carlos Dutra, (DSc, UFSC)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 5 DE SETEMBRO DE 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

CAYO, EBER HUANCA.

Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos na Solda Baseada no Sensoriamento da Pressão Acústica do Arco Elétrico no Processo GMAW-S

[Distrito Federal] 2008.

xv, 108p, 210 x 297mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|------------------|---------------------------|
| 1. Detecção | 2. Localização |
| 3. Defeitos | 4. GMAW |
| 5. Arco Elétrico | 6. Sensoriamento Acústico |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAYO, EBER H. (2008). Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos na Solda Baseada no Sensoriamento da Pressão Acústica do Arco Elétrico no Processo GMAW-S Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-02A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, XXXp.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Eber Huanca Cayo

TÍTULO: Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos na Solda Baseada no Sensoriamento da Pressão Acústica do Arco Elétrico no Processo GMAW-S

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Eber Huanca Cayo
CLN 407 Bloco C, sala S25.
70855-530 Brasília – DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Dona Getrudes Cayo, e Dom Roger Huanca e a minha irmã Nadia Rocio por terem-me ensinado agir com dedicação, empenho e força na vida e depositado em mim toda a sua confiança, carinho, amor e absoluto apoio para conseguir os meus êxitos pessoais e profissionais.

AGRADECIMENTOS

Em princípio agradeço a Deus pela força mental e espiritual que me dá todos os dias e porque sempre esteve e está comigo tanto nos momentos mais difíceis como nos mais felizes da minha vida.

A minha família, que mesmo longe sempre estiveram presente com os seus conselhos, ajuda e apoio incondicional que são muito importantes e valiosos.

A meu orientador, Professor PhD. Sadek Crisostomo Absi Alfaro como pessoa e profissional por os seus conselhos, recomendações, conhecimentos e experiências transmitidas, orientação e apoio.

Ao corpo docente do programa de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos da Universidade de Brasília.

Aos meus amigos e colegas do Grupo de Automatização e Controle - GRACO, Marrocos, Daniel Bebiano, Luciano Franco, Fernad, Jones, Luição, Bernhar, Rosimarci, Bruno, André, Evandro, Leonardo Junior, José, Carlos, Damuz, Magno, Frederico, Dife, Yesid, Diego, Rodrigo, Álvaro, Ronald, Ana Maria, Claudia, Hugo, etc.

Aos meus amigos com os que comparti momentos amenos e memoráveis, Edgar, Juan Carlos, Max, Martin.

A todos os meus amigos por cada momento de apoio, conselho e alegria, onde cada um deles é tão importante quanto o outro.

RESUMO

MONITORAMENTO, DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDA BASEADA NO SENSORIAMENTO DA PRESSÃO ACÚSTICA DO ARCO ELÉTRICO NO PROCESSO GMAW-S (MAG CURTO-CIRCUITO)

Autor: Eber Huanca Cayo
Programa de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos
Brasília, setembro de 2008.

Este trabalho apresenta um sistema de monitoramento, detecção e localização de defeitos na solda a partir do sensoriamento da acústica do arco elétrico do processo *GMAW-S*. O desenvolvimento implicou na abordagem de diferentes tecnologias, tais como: processo *GMAW*; avaliação de qualidade da solda; isolamento e direcionamento acústico; aquisição de sinais de tensão do arco, corrente de soldagem e pressão acústica do arco elétrico do processo; pré-processamento; filtragem convencional e estocástica de sinais; análise da estabilidade do processo; estabelecimento de parâmetros elétricos e acústicos de estabilidade do processo e algoritmos de detecção e localização de defeitos. Também foram desenvolvidos equipamentos, como sistemas de deslocamento de corpos de prova, direcionador e concentrador de sinais acústicos, dispositivo para a aquisição de sinais do processo, programa para a análise dos sinais do processo (tensão, corrente e som). A metodologia deste trabalho consistiu em obter um conjunto ótimo de parâmetros de soldagem visando gerar a maior estabilidade do processo. Foram feitas soldas repetitivas ajustando a fonte de energia com o conjunto de parâmetros obtidos. Na execução das soldas se adquiriu sinais elétricos e acústicos do arco elétrico. Avaliou-se a qualidade da solda baseada na continuidade da estabilidade dos parâmetros estatísticos dos sinais elétricos e acústicos. Seguido isso, foram feitas soldas simulando três tipos de defeitos: variação do *stand off*, presença de graxa na trajetória da solda e ausência de gás de proteção. Nessas soldas determinaram-se e quantificaram-se as variações dos parâmetros estatísticos acústicos de estabilidade e que finalmente foram montadas no algoritmo de detecção e localização de defeitos. Para a validação da metodologia, foram feitas soldas sem defeitos e soldas simulando os três defeitos apresentados. Nessas soldas adquiriu-se apenas o sinal de pressão acústica do arco elétrico. Demonstra-se que a partir da pressão acústica gerada pelo arco elétrico do processo de soldagem é possível monitorar, detectar e localizar defeitos sobre a solda.

ABSTRACT

MONITORING, DETECTION AND LOCALIZATION SYSTEM FOR WELDING DEFECTS BASED ON THE ACOUSTIC PRESSURE OF THE GMAW-S (SHORT CIRCUIT MAG) PROCESS ELECTRIC ARC

Author: Eber Huanca Cayo
Master degree in Mechatronic Systems
Brasilia, 2008, september.

This work presents a monitoring, detection and localization system of welding defects by acoustic sensing of the electric arc of GMAW-S process. The development implicated on the approach of different technologies such as: GMAW process; weld quality evaluation; isolation and acoustic orientation; electrical arc data acquisition, such as voltage, current and acoustic pressure; pre-processing; signal filtering, stability analysis of the GMAW process; establishment of electric and acoustic parameters to welding process stability and algorithms for detection and localization of defects. Equipments were also developed, such as a plate displacement system, a concentrator of acoustic signs, data acquisition hardware, software for the process signals analysis (voltage, current and sound). The methodology of this work consisted on obtaining an optimal amount of weld parameters to guarantee process stability. Some experiments were done in order to adjust the weld source with the optimal parameters. During the experiments, the acoustic and electrical signals of the electrical arc were acquired. The weld quality was evaluated based on the electric and acoustic statistical parameters stability. Then, some defects were simulated: the *stand off* variation, grease insertion and shielding gas flow extinction. In those experiments the variations of the acoustic statistical parameters stability were determined and quantified and finally were analyzed by the weld defects detection and localization algorithm. To validate the methodology, were made welds with and without defects for later comparison. In these experiments the only signal acquired was the acoustic pressure of the electric arc. It is demonstrated that by the acoustic pressure generated by the electric arc it is possible to monitor, detect and localize weld defects.

RESUMEN

MONITOREO, DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DEFECTOS EN SOLDADURAS BASADA EN EL SENSORIAMIENTO DE LA PRESIÓN ACÚSTICA DEL ARCO ELÉCTRICO EN EL PROCESO GMAW-S (MAG CORTO-CIRCUITO)

Autor: Eber Huanca Cayo
Programa de Post-grado en Sistemas Mecatrónicos
Brasilia, 05 de setiembre de 2008.

Este trabajo presenta un sistema de monitoreo, detección y localización de defectos en soldaduras a partir de sensoriamiento de la acústica del arco eléctrico del proceso *GMAW-S*. El desenvolvimiento implicó abordar diferentes tecnologías, tales como: proceso *GMAW*; evaluación de calidad de soldadura; aislamiento y direccionamiento acústico; adquisición de señales de tensión de arco, corriente de soldadura y presión acústica del arco eléctrico del proceso; pre-procesamiento; filtrado convencional y estocástico de señales; análisis de estabilidad del proceso; establecimiento de parámetros eléctricos y acústicos de estabilidad del proceso y algoritmos de detección y localización de defectos. También fueron desarrollados equipos, como sistemas de desplazamiento de cuerpos de prueba, orientador y concentrador acústico, dispositivos para la adquisición de señales del proceso, software para el análisis de señales del proceso (tensión de arco, corriente de soldadura y presión acústica del arco). La metodología de este trabajo consistió en obtener un conjunto óptimo de parámetros de soldadura visando generar la mayor estabilidad del proceso. Se hicieron soldaduras repetitivas ajustando la fuente de energía con el conjunto de parámetros obtenidos. En la ejecución de las soldaduras se adquirió señales eléctricas y acústicas del arco eléctrico. Se evaluó la calidad de la soldadura basada en la continuidad de la estabilidad de los parámetros estadísticos de las señales eléctricas y acústicas. Luego de ello, se realizaron soldaduras simulando tres tipos de defectos: variación del *stand off*, presencia de grasa en la trayectoria de la soldadura y ausencia de gas de protección. En esas soldaduras se determinaron y cuantificaron las variaciones de los parámetros estadísticos acústicos de estabilidad y que finalmente fueron montadas en el algoritmo de detección y localización de defectos. Para la validación de la metodología, se hicieron soldaduras sin defectos y soldaduras simulando los tres defectos presentados. En estas soldaduras se adquirió solo la señal de presión acústica del arco eléctrico. Se demuestra que a partir de la presión acústica generada por el arco eléctrico de proceso de soldadura es posible monitorear, detectar y localizar defectos sobre la soldadura.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM	3
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW	3
2.2.1	Definição do Processo GMAW	3
2.2.2	Estabilidade no Processo GMAW	4
2.2.3	Elementos do arco elétrico no processo de soldagem GMAW	5
2.2.4	Parâmetros do Processo de Soldagem GMAW	6
2.2.5	Modos de Transferência	9
2.2.6	Modo de Transferência por Curto Circuito	10
2.3	FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA AEROTRANSPORTADA	12
2.3.1	Pressão do Som	12
2.3.2	Nível de Pressão do Som	12
2.3.3	Espectro de Frequências	14
2.3.4	Filtragem de Sinais	16
2.3.5	Psico-acústica	17
2.3.6	Direcionamento de Som	19
2.4	CONTROLE DE QUALIDADE EM PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW	20
3	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	29
3.1	SISTEMA COMPUTACIONAL E HARDWARE	29
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	32
3.2.1	Analisador de Som	32
3.2.2	Fonte de Soldagem	32
3.2.3	Sistema mecânico de deslocamento do corpo de prova e fixação da tocha	33
3.2.4	Materiais e Corpos de Prova	35
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
4.1	CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO	36
4.1.1	Software para a Aquisição e Análise	36
4.1.2	Identificação dos Modos de Transferência na Fonte de Energia	37
4.1.3	Envelope Ótimo de Parâmetros Soldagem	38
4.1.4	Sinais Monitorados no Processo	41
4.1.5	Condicionamento Acústico	45
4.1.6	Localização do Microfone	46
4.1.7	Pré - Processamento de sinais do Processo de Soldagem	47
4.1.8	Relação entre a Acústica e os Sinais Elétricos do Processo de Soldagem	50
4.2	AQUISIÇÃO DE SINAIS	53
4.2.1	Monitoramento dos Sinais Adquiridos na Experimentação	53

4.2.2	Execução de Soldas Estáveis.....	55
4.2.3	Execução de Soldas com Presença de Instabilidades	55
4.3	ANÁLISE DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS	57
4.3.1	Região de Estudo e Análise dos Sinais do Processo de Soldagem.....	57
4.3.2	Parâmetros Estatísticos de Estabilidade	58
4.3.3	Janela de Análise dos Sinais do Processo de Soldagem.....	63
4.3.4	Parâmetros Estatísticos em Condições de Estabilidade.....	65
4.3.5	Instabilidades Originadas pelos defeitos Simulados	69
4.3.6	Detecção e Localização de Defeitos.....	77
4.4	VALIDAÇÃO DO MÉTODO	87
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	92
6	CONCLUSÕES	96
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
	APÊNDICE A – Fluxograma dos Dados no Algoritmo Desenvolvido... 106	
	APÊNDICE B – Fluxograma dos Dados na Detecção de Defeitos	107
	APÊNDICE C – Fluxograma dos Dados na Localização de Defeitos	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Classificação dos parâmetros do processo de soldagem GMAW	7
Tabela 2.2:	Modos de Transferência no Processo GMAW (modificado Norrish, 1992)10	
Tabela 4.1:	Instrumentos Virtuais usados na Experimentação.....	37
Tabela 4.2:	Faixa dos Parâmetros de Soldagem Usados.	39
Tabela 4.3:	Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem Identificado.	41
Tabela 4.4:	Sinais Adquiridos no Procedimento Experimental.....	41
Tabela 4.5:	Parâmetros Finais de Pré-processamento	49
Tabela 4.6:	Testes de Simulação de Defeitos	56
Tabela 4.7:	Testes de Simulação de Solda com Maior estabilidade.....	68
Tabela 4.8:	Valores estabelecidos para a detecção de Defeitos	77
Tabela 4.9:	Testes de validação.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Nomenclatura dos elementos para o arco elétrico no processo GMAW.....	6
Figura 2.2:	Parâmetros diretos e indiretos do Processo GMAW (modificado Bingul e Cook, 1999).....	7
Figura 2.3:	Extensão livre do eletrodo (modificado SBRT, 2008).....	8
Figura 2.4:	Inclinação e sentido do avanço da tocha (modificado SBRT, 2008).....	9
Figura 2.5:	Oscilograma de tensão e corrente num ciclo de curto circuito (modificado Nadzam, 2006).....	11
Figura 2.6:	Variação do <i>SPL</i> , em função do Δt (continuação).....	14
Figura 2.7:	Sinais no domínio do Tempo e da Frequência.....	15
Figura 2.8:	Resposta em Frequência dos Filtros de Ponderação.....	17
Figura 2.9:	Curvas Isofonicas baseada no ISO 226.....	18
Figura 2.10:	Direcionadores de Som.....	19
Figura 2.11:	Níveis de controle de Qualidade <i>On-Line</i>	21
Figura 3.1:	Distribuição do Sistema Computacional e Hardware empregado.....	29
Figura 3.2:	Distribuição e Localização do Sistema Computacional, Hardware e Equipamentos Utilizados.....	31
Figura 3.3:	Suporte da tocha.....	33
Figura 3.4:	Sistema mecânico de suporte da tocha e deslocamento do corpo de prova.....	34
Figura 4.1:	Etapas da Metodologia de Experimentação.....	36
Figura 4.2:	Caracterização dos Modos de Transferência.....	38
Figura 4.3:	Cordões de Solda Feitas para a Identificação do Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem.....	40
Figura 4.4:	Identificação do Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem.....	40
Figura 4.5:	Cordão de Solda Obtido para o Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem.....	41
Figura 4.6:	Sinais no Domínio do Tempo e Frequência Amostradas a 50000 kHz.....	43
Figura 4.7:	Sinais no Domínio do Tempo e Frequência Amostradas a 20000 kHz.....	44
Figura 4.8:	Sinais no Domínio do Tempo e Frequência Amostradas a 10000 kHz.....	44
Figura 4.9:	Direcionador Acústico Cônico.....	46
Figura 4.10:	Orientação e posição do Cone e o Microfone.....	47
Figura 4.11:	Primeira Topologia ensaiada de pré-processamento dos sinais.....	48
Figura 4.12:	Sinais Adquiridas do Processo no Domínio do Tempo e Frequência.....	48
Figura 4.13:	Terceira Topologia ensaiada de pré-processamento dos sinais.....	49
Figura 4.14:	Sinais do Processo Originais e Pré-processadas.....	50
Figura 4.15:	<i>SPL</i> Calculado pelo Som e pela Tensão e Corrente do Arco do Processo.....	52
Figura 4.16:	Comparação entre os Modelos Matemáticos da Acústica do Arco Elétrico do Processo.....	53
Figura 4.17:	Sinais monitoradas no Processo de Soldagem.....	54
Figura 4.18:	Fluxograma de Aquisição e armazenamento de Sinais sem Defeitos.....	55
Figura 4.19:	Área de Simulação de Defeitos.....	56
Figura 4.20:	Fluxograma de Aquisição e Armazenamento de Sinais com Defeitos.....	57
Figura 4.21:	Região de Análise nos Sinais do Processo de Soldagem.....	58
Figura 4.22:	Fluxograma de Sinais do Processo em Condições de Estabilidade.....	58
Figura 4.23:	Fluxograma e Sinais na Detecção de Curtos-Circuitos.....	59
Figura 4.24:	Ciclograma de Tensão de arco e Corrente de Soldagem.....	60
Figura 4.25:	Fluxograma e Sinais na Detecção de Envolvente da Pressão Acústica.....	62
Figura 4.26:	Distribuição Normal do <i>SPL</i> em Condições de Estabilidade.....	63

Figura 4.27:	Janelas de Análise.....	65
Figura 4.28:	PEA e PEE para uma Solda sem Presença de Defeitos.....	66
Figura 4.29:	Ciclogramas em Condições de Estabilidade.....	67
Figura 4.30:	Curtos-circuitos e Ignições de Arco com a Maior Estabilidade.....	67
Figura 4.31:	Regiões de Análise nas Simulações de Defeitos.....	69
Figura 4.32:	Sinais do Processo em Condições de Instabilidade.....	71
Figura 4.33:	PEA e PEE Simulação de Defeito pela Variação do <i>Stand Off</i>	73
Figura 4.34:	PEA e PEE na Simulação de Defeito pela Presença de Graxa.....	74
Figura 4.35:	PEA e PEE na Simulação de Defeito pela Ausência do Gás	75
Figura 4.36:	Distribuições Normais dos sinais resultantes.....	78
Figura 4.37:	Curva Gaussiana da Distribuição Normal Padrão	79
Figura 4.38:	Sinais Normalizados em Condições de Maior Estabilidade.....	80
Figura 4.39:	Sinais Normalizados Para Defeitos Gerados pela Variação de <i>Stand Off</i> ...	82
Figura 4.40:	Sinais Normalizados Para Defeitos Gerados pela Presença de Graxa.....	83
Figura 4.41:	Sinais Normalizados Para Defeitos Gerados pela Ausência de Gás de Proteção.....	85
Figura 4.42:	Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas sobre Corpos de Prova Livres de Defeitos.....	88
Figura 4.43:	Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas Simulando defeitos por Variação de <i>Stand Off</i>	89
Figura 4.44:	Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas Simulando Defeitos pela Presença de Graxa.....	90
Figura 4.45:	Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas Simulando Defeitos pela Ausência de Gás.....	91

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES.

Soldagem:

GMAW	- Gas Metal Arc Welding (Soldagem ao arco elétrico com gás de proteção)
GMAW-S	- Gas Metal Arc Welding – Short Circuit (GMAW no modo curto-circuito)
GTAW	- Gas Tungsten Arc Welding (Solda a eletrodo de tungstênio)
FCAW	- Flux-cored arc welding (Soldagem com Arame Tubular)
SMAW	- Shielded Metal Arc Welding (Soldagem a Eletrodo Revestido)
MIAB	- Magnetically Impelled Arc Butt
AWS	- American Welding Society (Aociedade Americana de Soldagem)
MIG	- Metal Inert Gas (Solda a eletrodo consumível com gás inerte)
MAG	- Metal Active Gas (Solda a eletrodo consumível com gás ativo)
TIG	- Tungsten Inert Gas
CTWD	- Contact Tube to Work Distance (Distância entre o bico de contato e a peça)
DBCP	- Distância Bico de Contato-Peça
IIW	- International Institute of Welding (Instituto Internacional de Soldagem)
IGBT	- Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Comporta Isolada)

Acústica:

SPL	- Sound Level Pressure (Nível de Pressão de Som)
DFT	- Discrete Fourier Transform (Transformada Discreta de Fourier)
FIR	- Finite Impulse Response (Filtro de resposta Finita ao Impulso)
FFT	- Fast Fourier Fransform (Transformada Rápida de Fourier)
L_{eq}	- Nível de pressão de som (dB)
S	- Amplitude do sinal de som no tempo (V)
K	- Fator Geométrico (experimentalmente = $10E-5$)
ξ	- Variável de tempo de integração
t	- Tempo inicial (s)
Δt	- Intervalo de tempo de integração (s)
V	- Tensão do arco (V)
I	- Corrente do arco (A)
K	- Fator Geométrico (experimentalmente = $10E-5$)
P_o	- Pressão acústica de referencia ($20 \mu Pa$)

$P(t)$	- Pressão acústica (μPa)
C_l	- Capacitância do arco (μF)
R	- Resistência do Arco (Ω)
L	- Indutância do Arco (H)
f_{am}	- Frequência de amostragem (Hz)
f_{\max_s}	- Frequência componente máxima do sinal (Hz)
K_t	- Ganho de Kalman
P	- Matriz de covariância
w	- Ruído causado por uma variável aleatória
Q	- Covariância de w
θ	- Estado
$\hat{\theta}$	- Estimação de θ

Parâmetros Estadísticos

PEE	- Parâmetro Estatístico de Estabilidade Elétrica
PEA	- Parâmetro Estatístico de Estabilidade Acústico
\bar{x}_i	- Média Aritmética da i -ésima Janela de Análise
S_i	- Desvio Padrão da i -ésima Janela de Análise
n	- Número de Dados Componentes da Janela de Análise
x_j	- j -ésimo Dado Componente da Janela de Análise

Detecção e Localização de Defeitos:

nnd_i	- nível normalizado de defeitos para o sinal avaliado i
x_i	- i -ésimo PEA avaliado
\bar{x}	- Média Aritmética da estabelecida para a análise
S	- Desvio Padrão estabelecido para a análise
Inp_i	- Intensidade normalizada do PEA i (%)
Dd_i	- Defeito detectado no sinal de avaliado de PEA i
LDn	- Limite de defeitos normalizado
Dfd_j	- j -ésimo dado de defeitos detectados
Ind_j	- j -ésimo dado de Intensidade normalizada de defeitos

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos de manufatura mais utilizados na indústria da construção metálica. Quando a soldagem atingiu escalas industriais, as exigências e requerimentos de qualidade da solda no mercado também foram se multiplicando. Para se garantir a qualidade do processo, são tomados certos cuidados. Há os mais simples, como inspeções visuais, aqueles pouco mais criteriosos, como ensaios não-destrutivos (radiologia, ultrassom, partículas magnéticas, líquido penetrante) e também os rigorosos, realizados pelos ensaios destrutivos (tração, dureza, metalografia). As inspeções e ensaios são feitos após o processo de soldagem, e, dependendo da aplicação do produto, são feitos em todas as peças ao longo de toda a superfície soldada. Isso aumenta o custo final de produção, pois são necessários pessoas capacitadas, equipamento, insumos e horas de trabalho. Durante a soldagem o arco elétrico gera fenômenos físicos como a emissão da temperatura, emissão de campos eletromagnéticos, emissão de luminosidade, emissão de pressão acústica, entre outras. Alguns desses fenômenos são percebidos pelos operadores experientes para monitorar e controlar a execução de soldas.

Este trabalho faz parte de um projeto maior baseado no monitoramento de algumas variáveis físicas geradas pelo arco elétrico do processo de soldagem para a análise e exploração das suas potencialidades e limitações para usar-las como variáveis de realimentação no controle do processo mediante técnicas de fusão de sensores. O objetivo do presente trabalho é mostrar a possibilidade do monitoramento do processo de soldagem GMAW no modo de transferência de curto-circuito a partir da pressão acústica aerotransportada gerada pelo arco elétrico, assim como a exploração da possibilidade de detectar e localizar defeitos na solda. Para isso se seguiram determinados passos como o estudo de localização e condicionamento do sensor de pressão acústica, visando obter alta fidedignidade na aquisição do som gerado pelo arco elétrico, estudo da relação entre os parâmetros elétricos e o comportamento acústico do arco elétrico, montagens experimentais de simulação de soldas com e sem defeitos, desenvolvimento de sistema de aquisição de sinais, uso de ferramentas computacionais, entre outros.

O monitoramento acústico do processo é um método não intrusivo. A sua aplicação como ferramenta para a medição da estabilidade do processo poderia servir como um método para a detecção de defeitos na solda. O entendimento de regras empíricas que o operador

especializado utiliza para o controle e avaliação da qualidade a partir do som do arco elétrico seria o primeiro passo para no futuro desenvolver um sistema de avaliação de qualidade da solda *on-line* baseado no monitoramento da acústica do arco elétrico do processo de soldagem. A maioria dos controladores das fontes de energia emprega basicamente como parâmetros de entrada a velocidade de alimentação do arame, corrente e tensão do arco elétrico. De acordo com a estratégia de controle embarcado no controlador, esse muda a tensão ou a corrente ou ainda a velocidade do arame com o objetivo de manter a estabilidade do arco elétrico. A caracterização quantificada do comportamento acústico do arco elétrico do processo poderia ser usada como uma nova variável no controlador do processo. Isso oferece a possibilidade de desenvolver estratégias de controle semelhantes a das utilizadas pelo pessoal técnico especializado em soldagem, dando assim certo grau de realismo à automatização dos processos de soldagem visando incrementar a qualidade da solda.

O capítulo 1 descreve a introdução e uma abordagem geral das tecnologias relacionadas à pesquisa do presente trabalho, onde se destaca o que deu origem ao seu desenvolvimento, os alcances e os limites. Também se faz menção às potencialidades e possíveis aplicações em trabalhos futuros que poderiam ter os resultados do desenvolvimento deste trabalho, o objetivo geral e os objetivos específicos que se esperam alcançar, a justificativa e a organização. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa. Fizeram-se a abordagem nas áreas de processos de soldagem GMAW, acústica aerotransportada e controle da qualidade da solda. O capítulo 3 faz abordagem à plataforma de desenvolvimento que consiste no *hardware*, instrumentação para a aquisição de sinais de tensão de arco, corrente de soldagem e pressão acústica do arco, assim como as características da célula de soldagem utilizada. O capítulo 4 trata do procedimento experimental. Nesse capítulo se explicam as características dos materiais usados, software de análises, escolha da taxa de amostragem, soldas repetitivas para a identificação do envelope ótimo de parâmetros de soldagem, relação entre a pressão de som e a tensão e corrente do arco. Além disso, se faz abordagem da aquisição de sinais e detecção de defeitos. No capítulo 5 se faz a discussão dos resultados obtidos no procedimento experimental. No capítulo 6 as conclusões finais do trabalho são apresentadas. No capítulo 7 fizeram-se as sugestões de novos trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

Por mais de 3000 anos o método de união de peças metálicas esteve baseado no martelamento, aquecimento e resfriamento dos metais para obter a união por difusão molecular, como a brasagem e a soldagem por forjamento. O descobrimento do arco elétrico por Sir Humphry Davy nos anos 1801 e 1806, deu o início à soldagem por fusão metálica. Em 1885 Bernados - Slavyanov patenteou o processo de soldagem baseado num arco elétrico produzido entre um eletrodo de carvão e a peça metálica a ser soldada. No início do século XX, A. P. Strohmenger e Oscar Kjellberg criaram os eletrodos recobertos. Strohmenger usou argila e óxido de cálcio para recobrir o eletrodo, entando Kjellberg usou silicatos e carbonatos para recobrir o eletrodo e estabilizar o arco. Kjellberg patenteu este método de recobrimento no 1907. A soldagem passou a ser o processo de fabricação mais importante durante a primeira guerra mundial pela necessidade de união metálica nos navios. Em 1941 se criou o processo *GTAW*, em 1948 *GMAW* e em 1957 *FCAW*, mas o uso delas não era popular devido a os elevados custos de gás de proteção (Argônio). Na década de 60 se criou a soldagem por difusão de elétrons e a soldagem a laser. Mas depois com as misturas de gases protetores do arco elétrico e a automatização, os processos *GTAW*, *GMAW* foram os mais utilizados industrialmente.

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

2.2.1 Definição do Processo GMAW

O processo de soldagem GMAW, é um processo que produz a coalescência de metais aquecendo-os com um arco entre um eletrodo de metal alimentado continuamente e a peça de trabalho. O processo utiliza uma composição gasosa que tem por função proteger a poça metálica, estabilizar o arco voltaico, ou ainda atuar ativamente no processo de soldagem (conforme for o processo). Neste processo, a união das peças metálicas é produzida pelo seu aquecimento por meio do arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico não consumível (metal de adição), e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra a contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. O processo GMAW é chamado também de MIG (*Metal Inert Gas*) se a proteção gasosa empregada é inerte ou rica em gases inertes. É chamada de MAG (*Metal*

Active Gas) quando o gás usado é ativo ou contém mistura rica em gases ativos (Villani *et al*, 2005). A fusão do eletrodo não consumível na poça de fusão também é conhecida como transferência metálica. Ela é o fenômeno físico-metalúrgico mais importante no processo GMAW que está ligado diretamente à estabilidade do arco e a qualidade do processo.

2.2.2 Estabilidade no Processo GMAW

Desde o ponto de vista qualitativo, um processo é considerado estável quando uma entrada limitada em amplitude gera uma saída também limitada em amplitude. Durante algum tempo a estabilidade do processo de soldagem GMAW, era determinada pelo soldador experiente de acordo ao ruído que se gerava, ou pela quantidade de respingos de acordo com sua experiência e habilidade (Slania, 1996; Vaidya, 2002; Lucas, 1983; Mita, 1988 *apud* Gonçalves *et al*, 2008). A estabilidade no processo de soldagem é conceituada distintamente por diversos autores. Gonçalves *et al* (2008) definem que a estabilidade do processo, se dá quando o resultado do mesmo é uma solda com regularidade na transferência metálica, independente do tipo, e homogeneidade da mesma ao longo do cordão, produzindo um mínimo de respingos, os quais não comprometeram o conforto do soldador e nem acarretem em tempos secundários excessivos de retrabalho, produzindo uma poça e metal de solda também geometricamente homogêneos em toda a extensão do cordão. Nesse trabalho se define quantitativamente as condições que deve apresentar a transferência metálica assim como as características que deve apresentar o cordão durante e depois da transferência independentemente do tipo de processo; no presente trabalho se adotara o conceito anterior para definir a estabilidade do processo de soldagem. Em outros trabalhos relativos à estabilidade do processo apenas se especificam diferentes condições para obter a estabilidade no processo de soldagem GMAW. Bingul e Cook, (1999) estabeleceram como condições para conseguir a estabilidade no balanço da velocidade de alimentação de arame e a taxa de fusão do arame. Cook *et al*, (1992), Adolfsson *et al*, (1999) e Wu *et al*, (2001), determinaram que a máxima estabilidade do processo para garantir a melhor qualidade da solda se consegue quando na transferência metálica ocorre o máximo número de curtos-circuitos por segundo, quando se tem um desvio padrão mínimo dos tempos dos curtos-circuitos, quando a transferência de massa é mínima durante o curto-circuito e quando o nível dos respingos é mínimo.

Hermans e Den Ouden, (1999) revelaram que são três as causas da instabilidade: os curto-circuitos instantâneos produzido quando o eletrodo encosta na poça de fusão por períodos curtos e o metal não se transfere; a falha na re-ignição do arco e as variações de velocidade de alimentação do arame. O autor conclui que a máxima estabilidade do arco acontece quando a oscilação da poça de soldagem e a frequência dos curto-circuitos são iguais. Em outra conclusão menciona que a máxima estabilidade do processo ocorre quando o desvio-padrão da frequência de curto-circuito é mínima e também diz que a instabilidade está acompanhada pela formação de respingos. O nível dos respingos é um indicador da estabilidade do arco elétrico (Xiaoqing *et al*, 2005). Nesse trabalho se descreve o comportamento da forma dos sinais de tensão e corrente para o caso de processos *GMAW* estáveis e instáveis no modo de transferência de curto-circuito. Mediante métodos experimentais, são feitas mudanças na forma da corrente de forma que se consegue controlar a estabilidade do processo e fazer o uso do nível de respingos como indicador. Mediante a caracterização dos gráficos de tensão versus corrente (ciclograma) determinam-se e identificam-se processos estáveis e instáveis. Suban e Tušek, (2003) fizeram um estudo comparativo de metodologias para a determinação do melhor método para a avaliação da estabilidade do processo *GMAW*. Depois de fazer testes para três tipos de gás de proteção nos modos de transferência de curto-circuito e spray, concluiu que o método do ciclograma é o mais didático e menos complexo frente aos métodos analisados como a distribuição probabilística de períodos de curto-circuitos e arcos elétricos, distribuição probabilística de tensão e corrente e análise de Fourier.

2.2.3 Elementos do arco elétrico no processo de soldagem GMAW

Na figura 2.1 se apresenta a nomenclatura dos elementos do arco elétrico para o processo *GMAW*.

- a) Bocal: é um dispositivo componente da tocha de soldagem e cumpre a função de orientar o fluxo de gás no processo de soldagem.
- b) Bico de contato: é um dispositivo da tocha que tem a função de orientar e fornecer tensão ao arame.
- c) Arame: é o eletrodo consumível de aço revestido de cobre, que se derrete com o arco elétrico e transfere até a poça de fusão.
- d) Peça de trabalho: composta pelos corpos metálicos a serem unidos pela solda.

- e) Distância entre o bocal e a peça de trabalho: na maioria das vezes é confundida com a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho, que coincide quando o corte frontal do bocal também é o mesmo do corte frontal do bico de contato.
- f) Comprimento do arame: também conhecido como *stick out*, é o comprimento do arame livre depois de ter passado pelo bico de contato.
- g) Comprimento do arco: medido entre a ponta do eletrodo e a peça de fusão.
- h) Distância entre o bico de contato e a peça de trabalho: também conhecida como DBCP que em diante será nomeada como *Stand Off*.

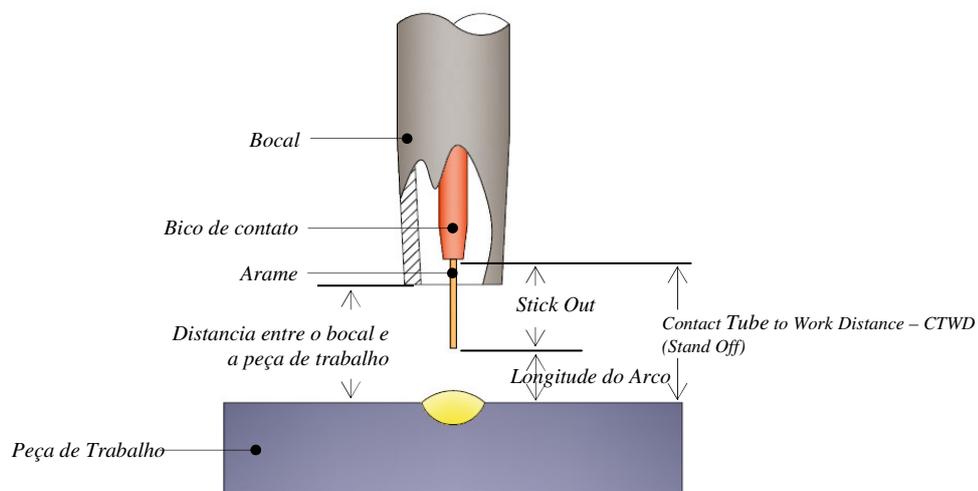


Figura 2.1: Nomenclatura dos elementos para o arco elétrico no processo GMAW.

2.2.4 Parâmetros do Processo de Soldagem GMAW

Existem distintas classificações dos parâmetros de soldagem para o processo GMAW, Bingul e Cook (1999), separaram as variáveis do processo de soldagem em duas categorias: parâmetros diretos de soldagem e parâmetros indiretos de soldagem, como se mostra na figura 2.2. Os parâmetros diretos do processo são: o comprimento do eletrodo, comprimento do arco, corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, velocidade de deslocamento da tocha, composição química da proteção gasosa e outros. Os parâmetros indiretos são: largura da solda, penetração, dutibilidade, fusão incompleta, porosidade.

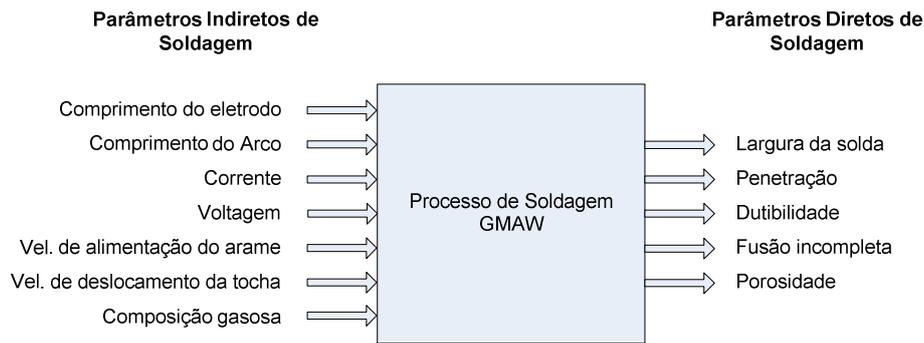


Figura 2.2: Parâmetros diretos e indiretos do Processo GMAW (modificado Bingul e Cook, 1999)

A Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society - AWS*) determinou dois tipos de parâmetros: de entrada e de realimentação. O presente trabalho utiliza esta classificação para a definição e identificação dos parâmetros porque leva em consideração a acústica do arco como parâmetro de realimentação, esse que não é considerado em outras classificações. Os parâmetros de entrada foram separados em duas categorias, fixos e variáveis. Esta classificação é mostrada na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classificação dos parâmetros do processo de soldagem GMAW

Parâmetros de Entrada	Parâmetros de Realimentação
<p>Parâmetros fixos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Geometria da junta - Composição dos materiais da junta - Composição do eletrodo arame - Composição do gás de proteção <p>Parâmetros variáveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Forma de onda de voltagem em circuito aberto - Distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (<i>Stand Off</i>) - Orientação da tocha a peça de trabalho - Velocidade de deslocamento da tocha - Velocidade de alimentação de eletrodo arame (<i>WFS</i>) - Fluxo de gás de proteção 	<ul style="list-style-type: none"> - Tensão do arco - Corrente do arco - Penetração da solda - Altura do cordão de solda - Comprimento da solda - Modo de transferência metálica - Taxa de transferência metálica - Acústica do arco - Emissões de radiação do arco - Desvio geométrico da juntura - Gradiente de temperatura do metal base

Segundo os estudos realizados por SBRT, (2008), os parâmetros mais importantes que afetam a penetração e a geometria no processo GMAW são a corrente de soldagem, a tensão de arco, a velocidade de deslocamento da tocha ou velocidade de soldagem, a extensão livre do eletrodo (*stick out*), a inclinação da tocha e o diâmetro do eletrodo. Em seguida são descritas as implicações desses parâmetros na solda.

- **Corrente de soldagem:**

Se forem mantidas constantes todas as demais variáveis de soldagem, um aumento na corrente de soldagem (aumento na velocidade de alimentação do arame) irá causar aumento na profundidade e largura de penetração, aumento na taxa de deposição e aumento do cordão de solda.

- **Tensão de soldagem:**

Nas mesmas condições citadas acima, um aumento na tensão proporcionará alargamento e achatamento do cordão de solda, aumento da largura de fusão e aumento do aporte térmico, que resultará em um aumento do tamanho da zona termicamente afetada. Uma tensão de soldagem muito alta poderá causar porosidades, respingos e mordeduras. Já uma tensão muito baixa tenderia a estreitar o cordão de solda e aumentar a altura do reforço do cordão.

- **Velocidade de soldagem:**

Uma velocidade de soldagem baixa resultará em um cordão muito largo com muito depósito de material. Já velocidades muito altas produzem cordões estreitos e com pouca penetração. Quando a velocidade é excessivamente alta, a tendência é de que cause mordeduras no cordão de solda.

- **Extensão livre do eletrodo:**

Define-se como extensão livre do eletrodo ou *stick-out* a distância entre o último ponto de contato elétrico do arame (normalmente o tubo de contato) e a ponta do eletrodo ainda não fundida (ver figura 2.3). Quando esta distância aumenta, aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, que terá assim mais tempo para se aquecer por efeito Joule.

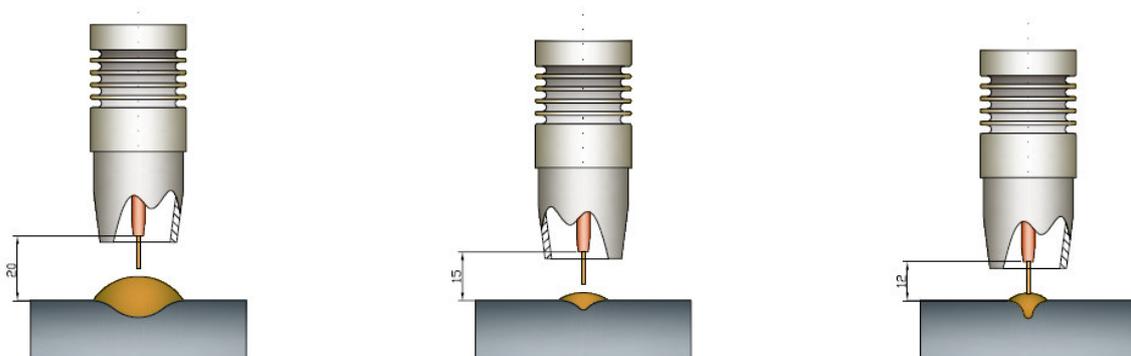


Figura 2.3: Extensão livre do eletrodo (modificado SBRT, 2008).

Com esta elevação da temperatura do eletrodo, será necessária uma menor corrente para fundir o eletrodo para a mesma taxa de alimentação, ou vindo de outra forma, para a mesma corrente de soldagem utilizada, se obterá uma maior taxa de deposição, porém com menor penetração. As extensões normalmente utilizadas situam-se na faixa entre 6 e 13 mm para a transferência por curto-circuito e entre 13 e 35 mm para os demais modos de transferência (SBRT, 2008).

• **Inclinação da pistola de soldagem:**

A inclinação da pistola de soldagem durante a execução dos cordões tem, em relação à forma e penetração do cordão, um efeito mais marcante do que algumas variações em parâmetros como velocidade e tensão de soldagem. Na soldagem à direita, aponta-se o cordão para o metal de base frio, causando com isto cordões mais largos, achatados e de menor penetração. Já quando se solda no sentido oposto (à esquerda), apontando-se para a poça de fusão, os cordões são mais estreitos, o reforço é mais convexo, o arco é mais estável e a penetração é máxima. A seguir é apresentada uma ilustração esquemática dessa variável. Nota-se, na figura 2.4, que da direita para a esquerda a penetração aumenta.

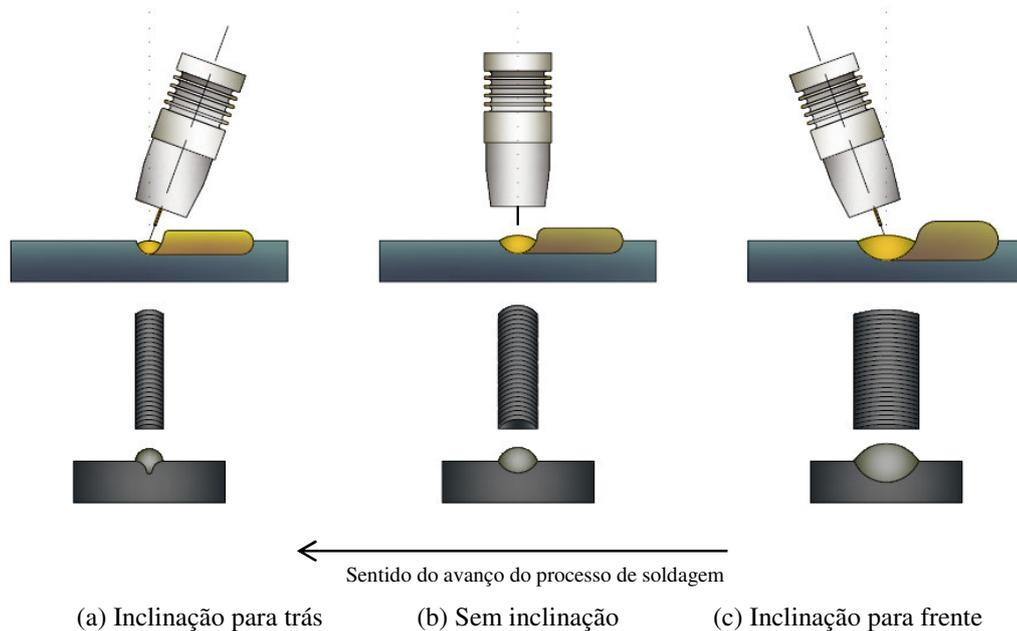


Figura 2.4: Inclinação e sentido do avanço da tocha (modificado SBRT, 2008).

2.2.5 Modos de Transferência

No processo de soldagem GMAW a transferência metálica tem grande importância no desempenho do processo, além de estar intimamente ligada à penetração do material. A transferência metálica pode ocorrer de várias formas e vai variar principalmente em função

da corrente utilizada na soldagem. A forma como se transfere o metal através do arco elétrico esta relacionada com o ajuste dos parâmetros de soldagem (Bingul e Cook, 2006).

Tabela 2.2: Modos de Transferência no Processo GMAW (modificado Norrish, 1992)

Modo de Transferência	Sub - modo de Transferência	Processo de Soldagem
Queda Livre (Free Flight Transfer):		
<i>Globular (Globular)</i>	<i>Globular (Drop)</i>	<i>GMAW - baixa corrente</i>
	<i>Repelida</i>	<i>GMAW - com proteção de CO₂</i>
<i>Aerossol (Spray)</i>	<i>Projetado (Projected)</i>	<i>GMAW - corrente intermediária</i>
	<i>Em Fluxo (streaming)</i>	<i>GMAW - corrente média</i>
	<i>Rotacional (Rotating)</i>	<i>GMAW - corrente elevada</i>
Por Contato (Bridging Transfer):		
<i>Curto-Circuito (Short – Circuiting)</i>		<i>GMAW - baixa corrente</i>

No processo GMAW classicamente se tem três modos de transferência: (a) por Curto-Circuito, (b) Globular, (c) por Spray ou Aerossol (Modenesi, 2001), (Wang *et al*, 2003). Cada modo de transferência depende, entre outros fatores, da combinação da corrente e voltagem do arco, a extensão do eletrodo e diâmetro do eletrodo (Fan e Kovacevic, 1998). Na Tabela 2.2 se mostra a classificação dos modos de transferência feita pelo Instituto Internacional de Soldagem (*International Institute of Welding - IIW*) apenas para o processo GMAW.

2.2.6 Modo de Transferência por Curto Circuito

Nesse modo a transferência metálica acontece na fase do contato direto (contato físico) entre o eletrodo e a poça de fusão. O metal é transferido do eletrodo para a peça somente durante o período quando o eletrodo está em contato com a poça de fusão. Nenhum metal é transferido através do arco. Este modo ocorre quando são escolhidos baixos valores de tensão e corrente e é o modo normalmente usado para a soldagem para todas as posições (Villani *et al*, 2005). Ela produz baixa taxa de transferência de calor em comparação a outros modos, por isso é ideal para a solda de chapas de pequena espessura. Suporta o uso de arames de 0,6 mm. a 1,0 mm. de diâmetro e uma composição gasosa de 100% de CO₂ ou uma mistura de 75 a 80% de argônio, e 25 a 20% de CO₂ (Nadzam, 2006). O ciclo dos curto-circuitos se produz com uma frequência que oscila de 20 a 200 vezes por segundo. Durante o curto-circuito, a corrente aumenta rapidamente e a ruptura do contato entre a poça de fusão e o eletrodo tende a ser explosiva, com a vaporização de parte do material e a formação de inúmeros respingos. Por outro lado, se a corrente não aumentar de forma suficientemente rápida, o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte

liquida e formar um emaranhado não fundido sobre o metal de base. A ruptura da ponte líquida está influenciada pela indutância da fonte de soldagem que também influi na frequência de curto-circuitos. (Modenesi, 2001). Na Figura 2.5 detalha-se o oscilograma de um ciclo no modo de curto-circuito, dividido em seis fases.

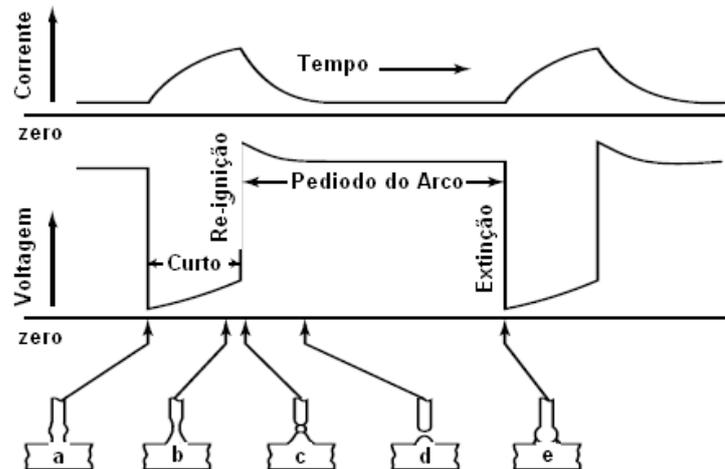


Figura 2.5: Oscilograma de tensão e corrente num ciclo de curto circuito (modificado Nadzam, 2006).

- O eletrodo (arame) faz contato com a poça de fusão. A voltagem se aproxima do zero e o nível de corrente de soldagem aumenta.
- Nesta fase se mostra o efeito das forças de natureza eletromagnética aplicadas uniformemente sobre o eletrodo. Esta força estrangula a ponta do arame eletrodo para formar a gota que se deposita na poça de fusão. O nível da voltagem vai aumentando até formar a gota. O nível de corrente também vai aumentando até chegar no nível de pico.
- Nessa fase se desprende a ponta do arame e se transfere para a poça de fusão. A corrente alcança o nível de pico e se produz a re-ignição da voltagem do arco.
- Essa região fora do curto-circuito é chamada período do arco, o nível da corrente vai descendo, se aproximando do zero assim como a voltagem vai se estabilizando.
- Nesta fase o arame eletrodo novamente faz contato com a poça de fusão produzindo a extinção da voltagem e o aumento da corrente.

2.3 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA AEROTRANSPORTADA

2.3.1 Pressão do Som

A pressão do som, ou pressão acústica, é o produto propagação do som. A energia provocada pelas ondas sonoras gera um movimento ondulatório das partículas do ar, provocando a variação alternada na pressão estática do ar. A razão dessas variações de pressão atmosférica é que se produzem áreas onde se concentram essas partículas (*zonas de concentração*) e outras áreas ficam menos saturadas (*zonas de refração*). A zona com maior concentração de moléculas tem maior densidade e as zonas de menor concentração têm menor densidade. Então, a pressão acústica é definida como a diferença de pressão instantânea e a pressão atmosférica estática. A pressão acústica se mede sob múltiplos de pascais. Essas variações de pressão têm origem em variações mecânicas que podem ser longitudinais ou transversais. Quando estas variações mecânicas são longitudinais e vão desde 20 Hz a 20 kHz, o ouvido humano pode percebê-las como som.

2.3.2 Nível de Pressão do Som

O decibelímetro *Brüel & Kjaer Type 2250* usado neste projeto se vale da equação 1 para o cálculo do nível de pressão acústica (BKSV, 2008), que em diante será nomeada como *SPL* (*Sound Pressure Level*).

$$SPL = 20 \cdot \text{Log} \left[\sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} P^2(\xi) d\xi} / p_o \right] \quad (1)$$

Para a medição do sinal de pressão de som é usado o microfone, que é um transdutor que muda a energia mecânica das ondas acústicas num sinal elétrico. A relação entre a variação de pressão acústica e elétrica é conhecida como sensibilidade do microfone. Na equação 2 se apresenta a equação 1 em função da sensibilidade do microfone:

$$SPL = 20 \cdot \text{Log} \left[\sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{S(\xi)}{50E-3} \right)^2 d\xi} / p_o \right] \quad (2)$$

Onde:

SPL : Nível de pressão de som

S : Amplitude do sinal de som no tempo

P : Pressão acústica

K : Fator Geométrico (experimentalmente = $10E-5$)

P_o : Pressão acústica de referência (20 uPa)

ζ : Variável de tempo de integração

t : Tempo inicial

Δt : Intervalo de tempo de integração

O intervalo de tempo de integração Δt , é uma variável importante no momento de fazer o cálculo do SPL . Na figura 2.6 se apresenta o sinal acústico do processo $GMAW-S$ e os níveis de pressão acústica SPL calculados com distintos valores de Δt . O sinal apresentado na figura 2.7 (a), foi adquirido com uma frequência de amostragem de 20000 amostras por segundo, o que significa que para cada fração de $1/20000$ de segundo se captura um ponto do sinal acústico. Para o cálculo do nível de pressão acústica é necessário escolher um valor adequado para a variável Δt . Ela está relacionada com o número de níveis de $SPLs$ calculados por segundo. Na figura 2.6 (b) se apresenta o SPL calculado pelo decibelímetro *Brüel & Kjør Type 2250*. Ele apresenta 10 níveis de $SPLs$ para cada segundo. Nas figuras 2.6 (c), (d), (e) e (f) se apresentam os $SPLs$ calculados para 20, 50, 100 e 200 níveis por segundo respectivamente.

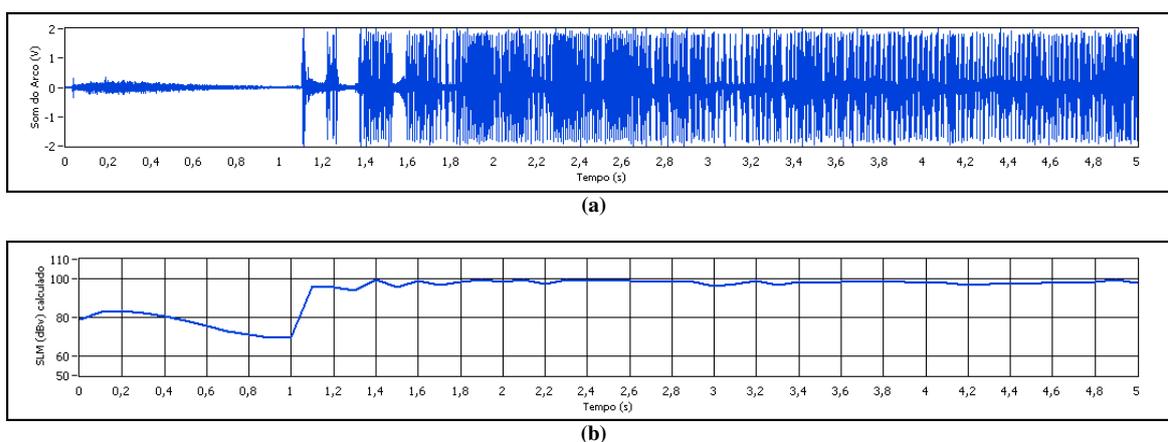


Figura 2.6: Variação do SPL , em função do Δt

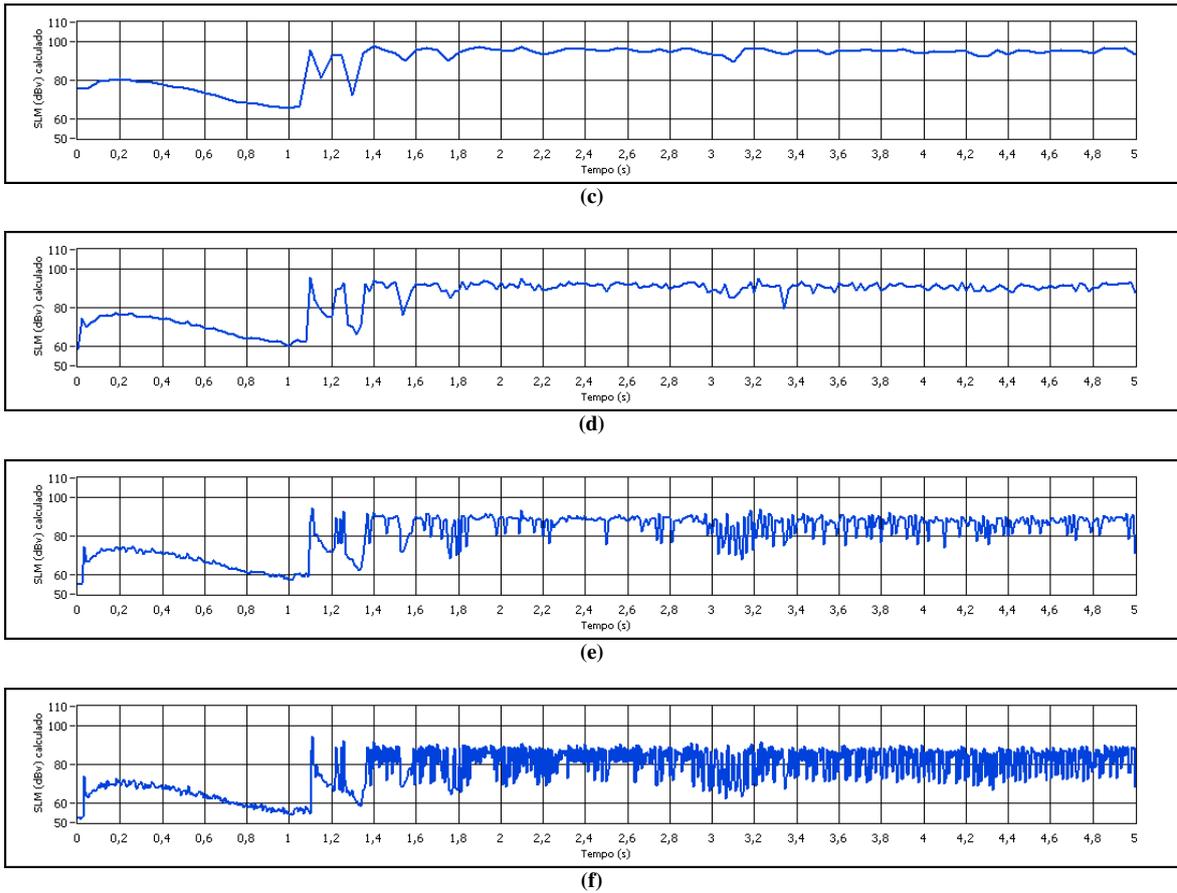


Figura 2.6: Variação do SPL, em função do Δt (continuação)

2.3.3 Espectro de Frequências

Uma ferramenta utilizada para a análise espectral do comportamento do som é a transformada contínua de Fourier. Ela permite que se analise o sinal acústico no domínio da frequência por intermédio de uma transformação linear que leva o sinal do domínio temporal para o de frequência. A transformada contínua de Fourier de um $s(t)$ é definida por:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

Onde $S(f)$ representa o espectro do sinal no domínio da frequência, por meio do qual se pode analisar as características de periodicidades dominantes que o sinal possui. $S(f)$ tem uma resolução infinita de frequências, pois a integração é feita sobre uma faixa infinita de tempo. Na prática realiza-se uma integração discreta sobre N pontos de dados e k bandas de

freqüências finitas. Essa técnica é conhecida como a transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform - DFT*) e é expressa por:

$$S(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (4)$$

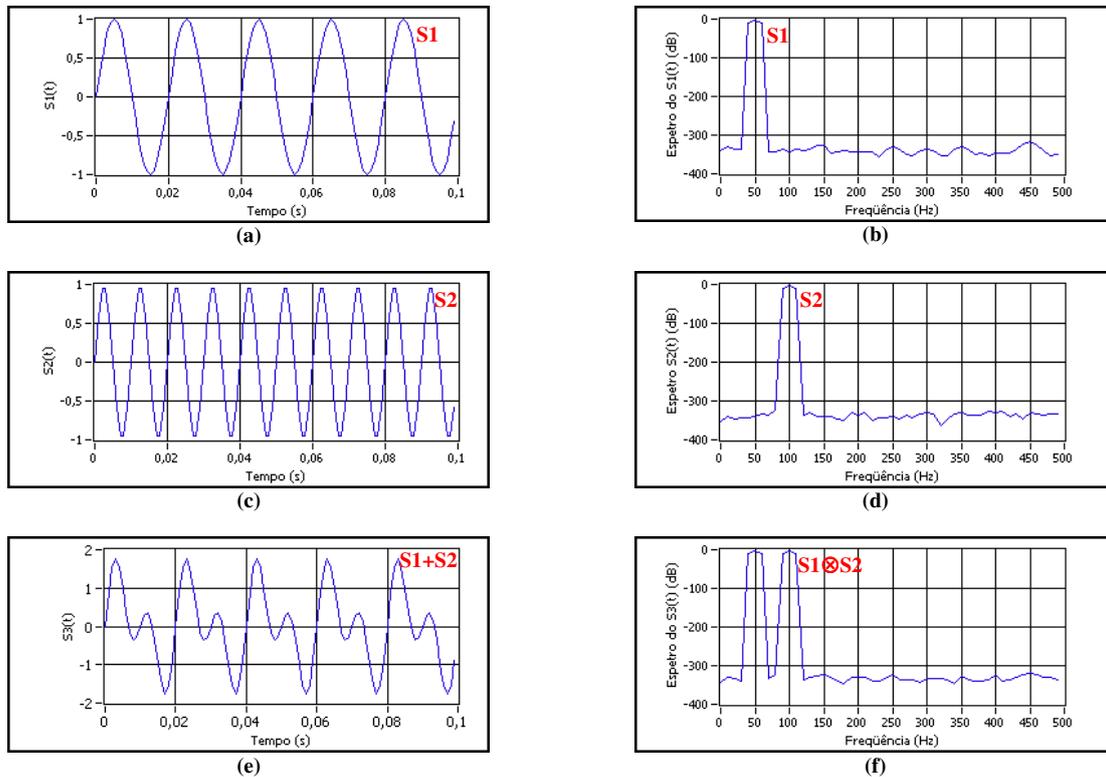


Figura 2.7: Sinais no domínio do Tempo e da Freqüência.

Na figura 2.7 (a) e (c) se apresentam os sinais S1(t) e S2(t) no domínio do tempo com 50 Hz e 100 Hz representados nos espectros das figuras 2.7 (b) e (d) respectivamente; estes espectros foram calculados a partir das equações 3 e 4. Na figura 2.7 (e) se apresenta a soma aritmética dos dois sinais S1 e S2. Na figura 2.7 (f) se apresenta a convolução dos espectros de freqüências dos sinais S1 e S2. Nessa figura se pode notar claramente que o espectro apresenta picos nas freqüências de 50 Hz e 100 Hz, que representam os sinais originais que compõem o sinal S3(t). A análise do espectro do sinal é uma ferramenta que permite expressar um sinal no domínio da freqüência, mas apresenta limitações quando o sinal no domínio do tempo apresenta transientes.

2.3.4 Filtragem de Sinais

Um filtro é um dispositivo e/ ou elemento computacional que discrimina uma determinada frequência ou faixa de frequências de um sinal que passa através dele, podendo modificar, tanto a sua amplitude, como a sua fase. A continuação de descrevem brevemente os tipos de filtros usados no presente trabalho.

a Filtros Convencionais

Os filtros convencionais usados são:

- Filtro de *Butterworth*, a sua resposta em frequência se caracteriza por ter uma faixa de passo suave e um corte agudo.
- Filtro de *Chevyshev*, a sua resposta em frequência se caracteriza por ter um corte agudo, mas com uma faixa de passo com ondulações.

b Filtros de Média Móvel (Moving Average Filters)

O filtro de média-móvel é um filtro digital de resposta finita ao impulso (*Finite impulse response - FIR*). É um filtro de uma classe de operadores suavizadores que são usados em aplicações de processamento de sinais acústicas.

c Filtros de Kalman

O filtro de Kalman é um tipo de filtro estatístico. Mediante os filtros estatísticos é possível suavizar o sinal pela retirada de ruídos causados por variáveis aleatórias. O método de filtragem é diferente, pois nesse caso é feita uma estimação do sinal lido. O filtro de Kalman esta dividido em duas etapas: predição e correção.

Na predição, entre os instantes $t-1$ e t calculam-se os fatores:

$$\text{Estimação } a \text{ priori:} \quad \hat{\theta}_t^- = F_{t,t-1} \hat{\theta}_{t-1}$$

$$\text{Matriz de covariância } a \text{ priori:} \quad P_t^- = F_{t,t-1} P_{t-1} F_{t,t-1}^T + Q_{t-1}$$

E na correção são calculados os demais fatores:

$$\text{Estimação } a \text{ posteriori:} \quad \hat{\theta}_t = \hat{\theta}_t^- + K_t (y_t - H_t \hat{\theta}_t^-)$$

$$\text{Ganho de Kalman:} \quad K_t = P_t^- H_t^T (H_t P_t^- H_t^T + R_t)^{-1}$$

$$\text{Matriz de covariância } a \text{ posteriori:} \quad P_t = (I - K_t H_t) P_t^-$$

d Filtros de Ponderação Acústica (Weighting Filters)

O ouvido humano tem um comportamento muito complexo, apresenta sensibilidade diferente para cada frequência como se observa nas curvas isofônicas (Figura 2.9). Para compensar o comportamento não linear da natureza do ouvido humano são utilizados os filtros de ponderação. Estes filtros são usados para dar ênfase às intensidades dos sons para as frequências nas quais o ouvido humano é mais sensível e atenuar aquelas em que é pouco sensível. Os principais filtros de ponderação são os filtros A, B e C - Weighting. O filtro A-Weighting é um filtro passa-alta projetado para simular a percepção da intensidade de tons de baixo nível. Este filtro produz ênfases (atenuação) progressivo para sinais acústicos a partir de 500 Hz de frequência. O filtro B-Weighting simula a percepção da intensidade dos tons médios; não é frequente o uso deste filtro. O filtro C-Weighting tira sons que estão fora da faixa de 20Hz até 20kHz, além disso simula a percepção da intensidade de tons de alto nível. A Figura 2.8, mostra a resposta em frequência dos filtros de ponderação acústica.

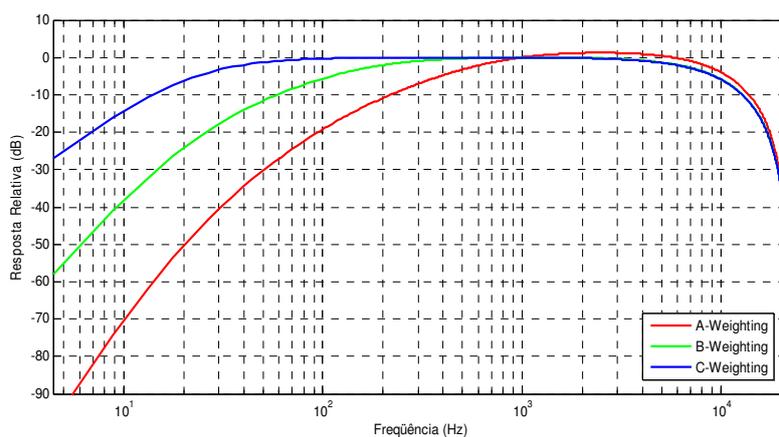


Figura 2.8: Resposta em Frequência dos Filtros de Ponderação.

2.3.5 Psico-acústica

É o estudo da percepção subjetiva das características do som (intensidade de pressão, tom e timbre). Essas características estão ligadas à frequência e amplitude do sinal acústico. Os parâmetros psicoacústicos mais relevantes são: altura, timbre e sonoridade. Devido à sensibilidade do ouvido humano, esses termos no contexto da psicoacústica não são totalmente independentes. Os três se influem mutuamente. Modificando um parâmetro, mudam os outros e a percepção do som varia. A altura está ligada à percepção do tom (na realidade, com a frequência fundamental do sinal sonoro). O timbre é a capacidade que nos

permite diferenciar os sons. O timbre está caracterizado pela forma da onda, e/ou seus componentes harmônicos. A sonoridade é a medida subjetiva da intensidade como é percebido pelo ouvido humano (sensação sonora de intensidade). A sonoridade se acentua para sons fracos e diminui para sons fortes. Isso se deve ao fato de que a audição humana não é linear, ela apresenta um comportamento logarítmico. Há dois termos usados freqüentemente em psico-acustica: o nível de audição, que é a intensidade mínima de som capaz de sensibilizar o ouvido humano (0 dB ou 20 μ Pa), e o nível de dor (110-130 dB ou 100 Pa) é a intensidade sonora a partir da qual o som produz no ouvido a sensação de dor. A unidade da sonoridade é o *fonio*, e esta definida como a sonoridade dum sinal senoidal de 1kHz com um nível de pressão de som (intensidade) de 0 dB. Isso quer dizer que 0 dB é o mesmo que 0 *fonios* e 120 dB é igual a 120 *fonios*, isso para sinais senoidais de 1kHz. Como se fez menção anteriormente, a resposta em freqüência do ouvido humano apresenta um comportamento de natureza logarítmica. Munson e Fletcher em 1933 determinaram as curvas isofônicas que descrevem a sensação sonora de intensidade para o ouvido humano (Figura 2.9).

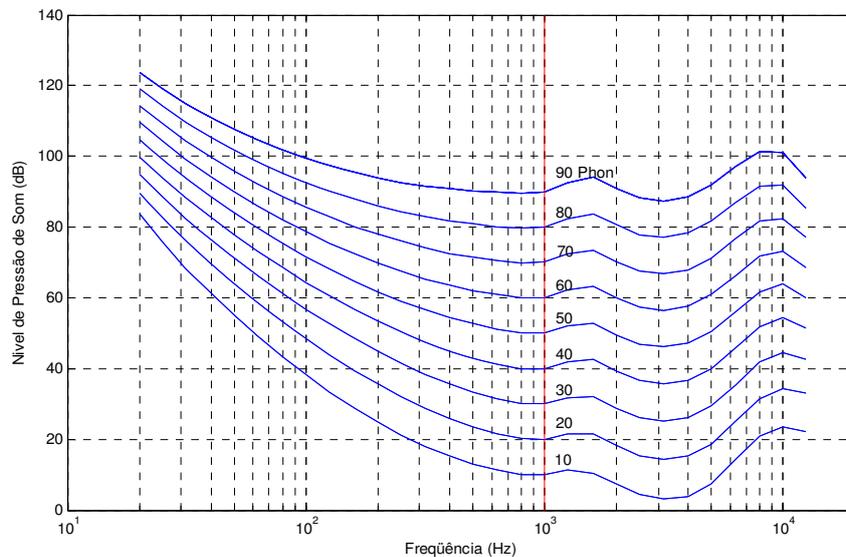


Figura 2.9: Curvas Isofônicas baseada no ISO 226

As curvas isofônicas são curvas de igual sonoridade. Estas curvas relacionam a freqüência e a intensidade dos sinais acústicos. Todos os pontos sobre cada curva isofônica têm a mesma sonoridade. Assim, se 10 *fonios* correspondem a uma sonoridade com uma intensidade de 10 dB com uma freqüência de 1 kHz, também uma sonoridade de 10 *fonios* poderia corresponder a uma sonoridade com uma intensidade de 60 dB com uma freqüência de 40 Hz. Nestas curvas se pode observar que à medida que aumenta a intensidade sonora,

as curvas são mais planas. Isso quer dizer que a dependência da frequência é menor quando vai aumentando o nível de pressão de som, assim, quando a intensidade sonora diminuir, os primeiros sons em se atenuar serão os agudos (sinais de altas frequências).

2.3.6 Direcionamento de Som

Para capturar o som de um lugar específico de interesse, se usam os direcionadores de som. No mercado existem diferentes tipos de direcionadores de som. Eles usam técnicas baseadas em distintos princípios físicos de ondulação. De todos eles, o mais usado é o direcionador parabólico (ver Figura 2.10 (a)). A sua capacidade para captar som em longa distância faz estes direcionadores especialmente adequados para escutar perturbações ao ar livre, gravação de voz, sons, etc. (assumindo que não há excessivo vento ou outros ruídos de fundo). Consiste em um microfone orientado a uma parábola que se orienta frente à fonte de som que se pretende gravar. Deste modo, o microfone fica em direção oposta à fonte e fixado a parábola a uma determinada distância. A parábola, que é côncava, além de cancelar os sons não desejados, concentra as ondas sonoras procedentes da fonte na cabeça do microfone.

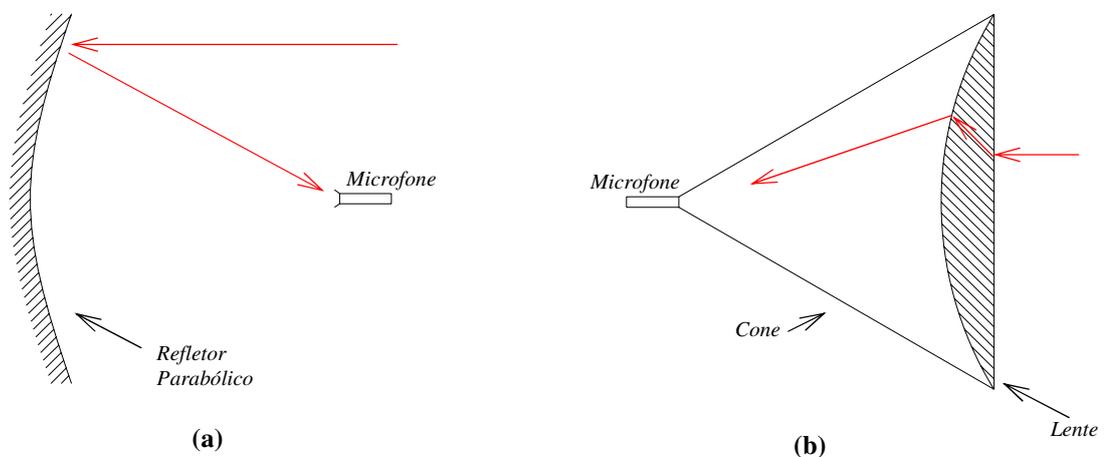


Figura 2.10: Direcionadores de Som.

Malcolm (1953) desenhou um microfone altamente direcional usando uma combinação de uma lente acústica e um cone (ver Figura 2.10 (b)). Essa combinação supera as desvantagens do refletor parabólico para direcionar o som. Neste trabalho se utilizou esse tipo de direcionador, porque se pretende medir a pressão acústica gerada pelo o arco elétrico e a poça de fusão do processo de soldagem. Esse tipo de direcionador cônico mede sinais de uma região específica e pequena (dependendo do diâmetro da lente acústica). Enquanto que o refletor parabólico captura todo o som do ambiente e concentra no foco

onde está localizado o microfone. O ambiente de soldagem apresenta diversas fontes de ruído, especificamente ruído ambiental e o ruído da fonte de soldagem. Um refletor parabólico concentraria todo este ruído junto com o som do processo de soldagem. O direcionador cônico permite capturar unicamente o som da região frontal da lente acústica, ele não concentra o som e, portanto, o som capturado por este direcionador apresenta menor quantidade de ruído do que o direcionador parabólico.

2.4 CONTROLE DE QUALIDADE EM PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW

Na indústria a avaliação da qualidade da solda é feita por ensaios destrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos consistem em tomar amostras de peças soldadas e fazer ensaios de corte, cisalhamento, compressão, tração, além de outros para avaliar a continuidade metálica, resistência mecânica e outros fatores determinantes para o correto desempenho em serviço. Estes ensaios implicam na inutilização do corpo ensaiado. Os ensaios não destrutivos são técnicas utilizadas na inspeção da solda a partir de métodos indiretos para a avaliação sem inutilizar a peça depois do ensaio. Os métodos mais comuns são os baseados em ensaios por ultrassom, radiologia, partículas magnéticas e líquidos penetrantes. Mas nesse tipo de ensaio, a inspeção visual e o conhecimento empírico são fatores determinantes na avaliação final da qualidade da solda. Os ensaios, sejam destrutivos ou não, que têm como finalidade determinar se a qualidade da solda é aceitável ou não são feitos depois do processo de soldagem. Para que estes ensaios apresentem resultados eficazes e confiáveis devem ter pessoal treinado, qualificado e certificado, equipamentos calibrados, procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos (ABENDE, 2008).

Existem distintos conceitos de qualidade, mas em resumo, qualidade se pode definir como a união dos requerimentos dos clientes num produto (Oakland, 2003). O processo de soldagem GMAW convencional é o mais estudado e desenvolvido no Brasil, mas a qualidade e quantificação, assim como o controle e automatização em soldagem são as áreas menos pesquisadas (Scotti, 2008). Recentes desenvolvimentos em união de materiais, especificamente os processos de soldagem, estão aumentando o seu alcance e estendendo-se nas indústrias aeroespacial, nuclear e submarina, nas quais a complexidade da geometria e o risco do ambiente necessitam de sistemas de um grande nível de automatização. As aplicações tradicionais de soldagem como as soldas e a manufatura automobilística, têm

aumentado a sua demanda em qualidade, precisão e volume para permanecer em um nível competitivo (Tam, 2005). Esses requerimentos freqüentemente excedem as capacidades de habilidade e robustez do operador humano. Dessa forma, torna-se necessário dar ênfase nos parâmetros de realimentação e sensoriamento do processo para alcançar satisfatoriamente um controle de malha fechada do processo. Um parâmetro de realimentação no processo *GMAW* é a emissão acústica do arco (ver a tabela 2.1 na secção 2.2.3). No trabalho feito por Grad *et al* (2004), se menciona que existem três níveis de controle de qualidade *on-line* estabelecidos pela indústria (ver figura 2.11). O primeiro nível consiste na detecção automática de defeitos sobre a solda, o segundo nível se dá quando é possível identificar o tipo e a causa do defeito e o terceiro nível consiste na capacidade de corrigir os parâmetros de soldagem durante o processo para assegurar uma qualidade apropriada para a solda. Existem diversas pesquisas relativas à qualidade da solda no processo *GMAW*, mas a maior parte destes trabalhos estão localizados no primeiro nível de controle qualidade, e tem como ponto de partida o monitoramento dos parâmetros convencionais de tensão de arco e corrente de soldagem.

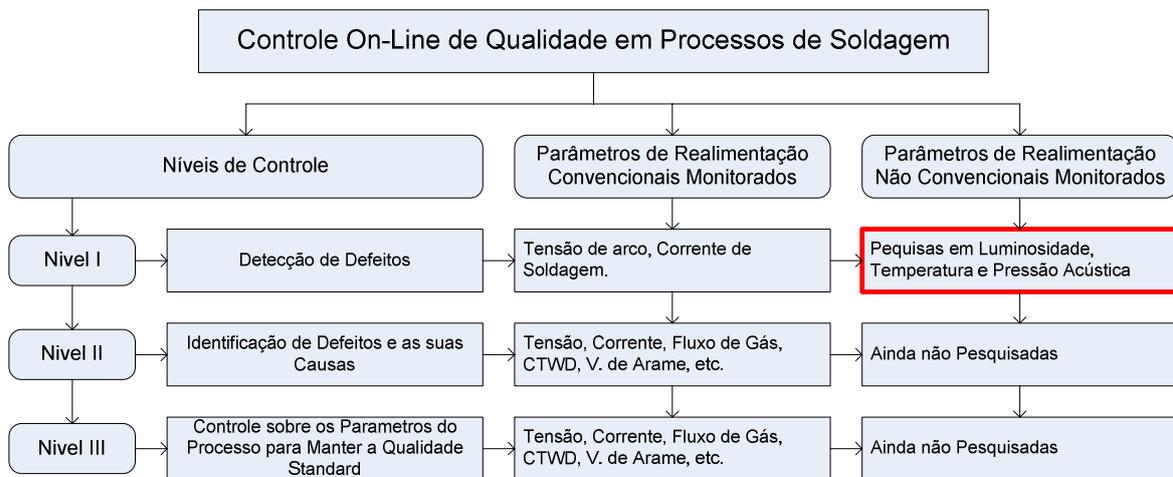


Figura 2.11: Níveis de controle de Qualidade *On-Line*.

O monitoramento em tempo real da qualidade do processo de soldagem é muito importante para evitar o tempo e custos das inspeções pós-soldagem, assim como as operações de reparação (Wu *et al*, 2007). São poucos os trabalhos feitos no controle de qualidade baseado no monitoramento de parâmetros não convencionais como por exemplo a luminosidade, temperatura ou a pressão acústica.

Na avaliação da qualidade da solda são levados em consideração fatores geométricos e estruturais como a uniformidade na rugosidade da solda e a adequada penetração na junta das peças a serem unidas (Miller, 2007). Segundo Moore *et al* (1998) é possível controlar a qualidade da solda no processo GMAW a partir do controle da transferência da massa e o calor do eletrodo até a poça de fusão. No processo GMAW há muitos parâmetros para controlar e otimizar a qualidade da solda, mas a escolha adequada demanda tempo (Terasaki e Simpson, 2006). Nesse trabalho se apresentou um modelo matemático do processo GMAW; também se determinaram que a qualidade do início do arco elétrico e a continuidade da estabilidade do arco no processo de soldagem, têm implicação direta na qualidade final da solda. A estabilidade do processo de soldagem é uma propriedade do arco elétrico; um arco ideal para um processo estável, apresenta algumas características destacáveis, tais como uma transferência uniforme do material (metal), o tempo do arco e o tempo de curto circuito apresentam uniformidade, apresenta o comprimento do arco constante e não gera respingos (Suban e Tušek, 2003).

Chu *et al* (2004) fez a avaliação da qualidade para o processo *GMAW* no modo curto-circuito baseado na análise de tempo-frequência para a voltagem do arco. Em tal avaliação identifica as frequências para quando o processo apresenta continuidade na estabilidade do arco. Para validar o método, foram simulados defeitos sobre a chapa e foi observado que quando a solda passa sobre os defeitos, são produzidas variações na frequência. Essas variações indicam a instabilidade no arco e isso indica a presença de um defeito na solda. Nesse trabalho foi utilizada a transformada rápida de Fourier – *FFT* (*Fast Fourier Transform*) como ferramenta para estimar o espectro de frequências. A *FFT* nem sempre é uma boa ferramenta para representar sinais, particularmente se o sinal apresenta variações abruptas (transientes) (Walker, 1997). O sinal da voltagem do arco no modo curto-circuito possui natureza aleatória estacionária e apresenta múltiplos transientes em períodos aleatórios (Absi *et al*, 2006). É por isso que no momento de representar a voltagem do arco no domínio da frequência aparecem como dominantes a frequência da rede elétrica e os seus harmônicos, que não têm relação direta com o processo. Embora apresentem mudanças na frequência diante da presença de defeitos, esses resultados não são constantes e, portanto, são pouco confiáveis para serem quantificados e utilizados para a avaliação da qualidade da solda. Cook *et al* (1997) destaca a potencialidade da estatística para a aplicação no monitoramento e análise da estabilidade do processo de soldagem *GMAW*;

uma análise estatística dos sinais envolvidos no processo de soldagem resulta adequado por serem estes sinais de natureza estocástica.

Di *et al* (2000) conseguiu fazer o monitoramento *on-line* de defeitos em soldagem para o processo *GMAW*, baseando-se em técnicas de classificação por redes neurais a partir da caracterização dos histogramas da voltagem e da corrente do processo. Nesse trabalho identificaram-se instabilidades do processo para detectar os defeitos na solda. Concluiu-se que mediante este método podem-se monitorar automaticamente os defeitos na solda e ter uma efetividade de até 100%. Também concluiu-se que as características da qualidade da solda podem ser extraídas da estatística do processo. Em 2001 foi proposto um método de avaliação de qualidade *on-line* para o processo *GMAW* no modo de curto-circuito a partir do monitoramento da tensão de arco e a corrente de soldagem (Wu *et al*, 2001). A abordagem feita nesse trabalho foi o monitoramento estatístico da tensão e a corrente do processo. Foram utilizadas técnicas de lógica nebulosa para fazer a classificação entre processos de qualidade aceitável e não aceitável. Os resultados obtidos foram satisfatórios e confiáveis.

Uma técnica batizada como *Signature Image* baseada na padronização estatística da continuidade da estabilidade da tensão e da corrente para o processo *GMAW* - S, cuja qualidade é catalogada como aceitável, é utilizada para a avaliação da qualidade da solda por comparação (Hughes e Simpson, 2002). Nesse trabalho, além de detectar os defeitos, pretende-se identificar a natureza deles. Como o comportamento do processo de soldagem é estocástico e estacionário (Absi *et al*, 2006), a representação estatística padronizada do processo com boa qualidade é uma técnica fortemente confiável para avaliar a qualidade dos processos de soldagem por comparação. Em um trabalho posterior (Simpson e Hughes, 2006), foi medida a qualidade da solda por comparação do comportamento padrão da corrente (a corrente padrão é a corrente média obtida a partir de múltiplas soldas) com a corrente adquirida. Uma série de testes de detecção de defeitos valida satisfatoriamente esse método.

Em 1999, Quinn *et al*, em um trabalho relativo ao sensoriamento do arco para a detecção de defeitos no processo *GMAW*, mediante metodologias estatísticas, determinaram níveis de média e desvio-padrão para a tensão de arco, corrente de soldagem, resistência do arco, tendência da tensão, tendência da corrente, frequência de curto-circuito e introduziram um

termo chamado número de condição de arco. Os ensaios foram feitos para um total de 400 corpos de prova. Em função dos parâmetros nomeados anteriormente identificaram-se constantes para soldas de boa qualidade. Desenvolveram-se algoritmos de identificação e qualificação de defeitos em soldas baseados nas constantes estatísticas encontradas nos ensaios iniciais. Um segundo grupo de ensaios consistiu em simulações de cinco tipos de defeitos: ausência de gás, partes de óleo, tocha fora da junta, fundição de peças finas e excesso de comprimento na junta da solda. O algoritmo baseado no parâmetro denominado número de condição de arco desempenha um melhor comportamento discriminante para identificar esses defeitos na solda. O autor concluiu que esse sistema não apresenta bons resultados para identificar defeitos quando a tocha está fora da junta e para o excesso de comprimento da junta, e que os demais algoritmos foram testados com sucesso. Encontrou-se na estatística uma excelente ferramenta para a avaliação da qualidade.

Todos os trabalhos citados anteriormente apresentam diferentes abordagens para avaliar a qualidade do processo *GMAW*, mas para isso, utilizam técnicas intrusivas para o sensoriamento das variáveis do processo, fato que representa instrumental adicional inserido no processo. No sensoriamento de processos, as técnicas não intrusivas apresentam vantagens significativas sobre as intrusivas.

Em 1982, foi proposta uma nova técnica para determinar o tempo de evolução da voltagem numa coluna de arco elétrico (Drouet *et al*, 1979). Esse trabalho foi baseado na medição do som produzido pelo arco elétrico. Mostrou-se que as mudanças do som do arco têm uma relação direta com as mudanças da potência do arco elétrico. A medição não intrusiva baseada no som evita os erros de medição usualmente causados por tensões e correntes induzidas por campos eletromagnéticos aos sistemas de medição intrusivos. Os autores propuseram este método de medição para situações em que o método tradicional de medir voltagem apresenta sérias complicações. Eles testaram esse método com sucesso para operações de controle de arco de soldagem e controle da voltagem em fornos de arco elétrico. As limitações que apresenta esta técnica são o ruído ambiental e a baixa capacidade de resposta em frequência do sensor acústico utilizado.

Já em 1995, Lin e Fischer, desenvolveram um monitor *on-line* da qualidade do arco da solda e sistemas de controle para o processo *GMAW* baseado numa combinação de técnicas de estatística, redes neurais artificiais e funções discriminantes lineares. O treinamento

desse sistema inteligente de monitoramento e controle foi feito com vetores característicos do som do arco elétrico. Para obter esse vetor, utilizou-se uma função de extração de características denominada modelo de redução de dimensão de sinal (*Signal Dimension Reduction - SDR*). O modelo *SDR* se utiliza dos seguintes fatores: a medição do desvio-padrão, a média dos mínimos e padrões da repetibilidade. Esse modelo foi aplicado ao som do arco para eliminar características insignificantes e obter o vetor característico. Os autores concluíram que esta metodologia pode ser empregada efetivamente para estimar a geometria da solda, identificar soldas de boa qualidade e monitorar o processo. Também concluíram que a efetividade da metodologia depende da não ambigüidade dos dados dos sinais padrão para prevenir classificações inválidas.

Com base na pesquisa de Drouet *et al* (1982), Mansoor e Huissoon (1999) fizeram um trabalho relacionado à identificação acústica do processo *GMAW*. Os dados do som do arco foram processados no domínio do tempo e a frequência para obter descritores. Os resultados obtidos indicaram que o som do arco exibe distintas características para cada modo de transferência. Concluiu-se que o som pode ser utilizado como sinal de retroalimentação para o processo de soldagem *GMAW*. A análise do som do arco feita no domínio da frequência não permite distinguir com clareza entre um e outro modo de transferência, mas no domínio de tempo, a diferença é contundente.

Grad *et al* (2004), fez um estudo da possibilidade do uso dos sinais acústicos do arco elétrico para o monitoramento *on-line* do processo *GMAW-S*. Segundo este trabalho o som do arco elétrico do processo *GMAW* contém informação sobre a atividade da coluna do arco, a poça de fusão junto à transferência da gota. O som é produzido por diferentes processos como: a transferência da gota metálica, fluxo da poça de fusão, mudanças na microestrutura, liberação de tensão interna, dilatações e deformação plástica. Os três últimos são processos que acontecem depois da soldagem. A emissão acústica produzida pela transferência da gota até a poça de fusão é mais forte em comparação aos outros processos citados anteriormente. Nesse trabalho também fez-se a análise no domínio do tempo e da frequência. Determinou-se que o som do processo é produzido pelo curto-circuito e a re-ignição do arco. Concluiu-se que a análise de frequência não é confiável porque a frequência de curto-circuitos no processo de soldagem é de natureza aleatória. A análise no tempo por medições de diferentes parâmetros estatísticos é uma boa ferramenta

para avaliar a estabilidade do processo e a sua variação pode ser utilizada para detectar defeitos na solda.

Um trabalho posterior (Tam e Huissoon, 2005) desenvolveram experimentos psico-acústicos no processo *GMAW*, demonstrando que o operador humano têm uma dependência absoluta do som para o controle do processo. Esse trabalho propõe um modelo do operador humano como controlador do processo de soldagem, no qual ele se baseia nos sinais acústicos e visuais para o controle do processo e a variável de controle é a distância entre a poça de fusão e bico de contato (*Stand Off*). O operador humano detecta instabilidades na soldagem a partir de variações acústicas e visuais do processo. O controle da mudança do *Stand off* faz variar a voltagem do arco e isso permite estabilizar o processo, mas é o som quem ajuda ao operador a estabilizar o processo. Também demonstrou-se que o som percebido pelo operador com um atraso maior do que 400ms origina a interpretação errada da informação acústica. Dessa forma, o processo se torna instável, já que esse fica pouco controlável pelo operador humano.

O estudo feito por Tam (2005) que trabalhou em metodologias para a caracterização da acústica do processo *GMAW* com o objetivo de achar a relação entre os parâmetros de soldagem e as características espectrais do som. Três metodologias foram utilizadas. A primeira é o método de Taguchi. Esse revela a tendência entre parâmetros de soldagem e o som do processo. A segunda é a de experimentações psico-acústicas. Elas demonstram a dependência do som para controlar o processo por parte do operador humano. Por último, a implantação de redes neurais artificiais para o mapeamento das características espectrais do som com respeito aos parâmetros de soldagem. Concluiu-se que efetivamente há uma dualidade visual e acústica que o operador humano emprega para o controle do processo (Kralj, 1968). Encontrou-se uma mudança marcada no comportamento espectral da acústica para uma determinada variação de voltagem do arco, mas não é suficiente para caracterizar o processo a partir do comportamento espectral acústico, devido a sua instabilidade causada pela natureza estocástica do sinal do som. Grad *et al* (2004), também chegou à mesma conclusão e portanto no presente trabalho não se usará este método para a detecção acústica de instabilidades do arco de soldagem.

No trabalho de Sanches *et al* (2006), foi realizado a caracterização do modo de transferência por curto-circuito em processos *GMAW* a partir das emissões acústicas

geradas pelo arco. Nessa pesquisa se confirma potencialidade do emprego do som para monitorar o processo *GMAW*, fato que também foi concluído por Grad *et al* (2004). Além disso, foi identificado implosões e explosões no som durante o curto-circuito e na re-ignição, respectivamente, num ciclo de transferência metálica, o que levou a concluir que é possível medir os tempos dos ciclos da transferência a partir das emissões acústicas. Para validar esta afirmação compararam-se os tempos medidos pelo método acústico e os medidos a partir da voltagem do arco. Os resultados foram satisfatórios. A presença de um tempo de atraso na medição acústica não influi na medição dos tempos dos ciclos de curto-circuito.

Em 2006, Warinsiriruk e Poopat fizeram uma investigação das variações da corrente de soldagem e o *stand off* e a sua repercussão na atividade acústica. Para a sua validação, fez-se variações de corrente e *stand off*. O sinal acústico do processo no domínio do tempo foi utilizado para contar o número de gotas desprendidas do eletrodo até a poça de fusão, conseguindo-se diferenciar entre um modo de transferência e outro.

Em um posterior trabalho Poopat e Warinsiriruk (2006), se basearam no sinal acústico para classificar os modos de transferência no processo *GMAW*. Foi utilizado o comportamento do valor médio quadrático acústico e o espectro de frequências para identificar cada modo de transferência.

Cayo e Absi (2007a) utilizaram os sinais de tensão de arco e corrente de soldagem para calcular o comportamento do nível de pressão de som. As medições acústicas posteriores mostraram a estreita semelhança entre os níveis de pressão calculados e medidos. Além disso, mostrou-se que existe uma grande diferença entre um e outro modo de transferência em relação à atividade acústica do processo. Concluiu-se que o nível de pressão de som gerado pelo processo *GMAW-S* é mais sensível às variações do processo em comparação com os modos de transferência globular e spray. Também se concluiu que a avaliação da qualidade na solda pode ser feita a partir da avaliação da continuidade da estabilidade do nível de pressão de som. Num posterior trabalho conseguiram identificar os modos de transferência a partir do monitoramento do nível de pressão acústica (Cayo e Absi, 2008a).

O estudo feito por Čudina *et al* (2008), demonstra, mediante o modelo matemático proposto em função da corrente, voltagem e constantes resistivas, indutivas e capacitivas, que o som

do arco no processo *GMAW-S* apresenta impulsos acústicos no curto-circuito e na ignição do arco, sendo esta de maior intensidade, e que o som entre os impulsos é um ruído turbulento causado pelas oscilações do arco elétrico, arame e poça de fusão. Esse modelo foi validado por comparação entre o sinal do som calculado e medido. Também se concluiu que o som é apropriado para o monitoramento *on-line*, controle da estabilidade e qualidade do processo *GMAW-S*. Cayo e Absi (2008b) fizeram um estudo da utilização do nível de pressão de som do arco elétrico para a avaliação da estabilidade do processo *GMAW-S*. Rigorosos ensaios comparativos de soldas sobre corpos de prova com e sem defeitos nos que se monitoraram os sinais de tensão e pressão acústica do arco demonstraram a potencialidade da acústica do arco para a avaliação da estabilidade do processo de soldagem; também se destaca a possibilidade da caracterização das instabilidades do nível de pressão acústica para a identificação de instabilidades no processo.

3 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

3.1 SISTEMA COMPUTACIONAL E HARDWARE

Na Figura 3-1 se apresenta a distribuição do sistema computacional e hardware utilizado neste trabalho.

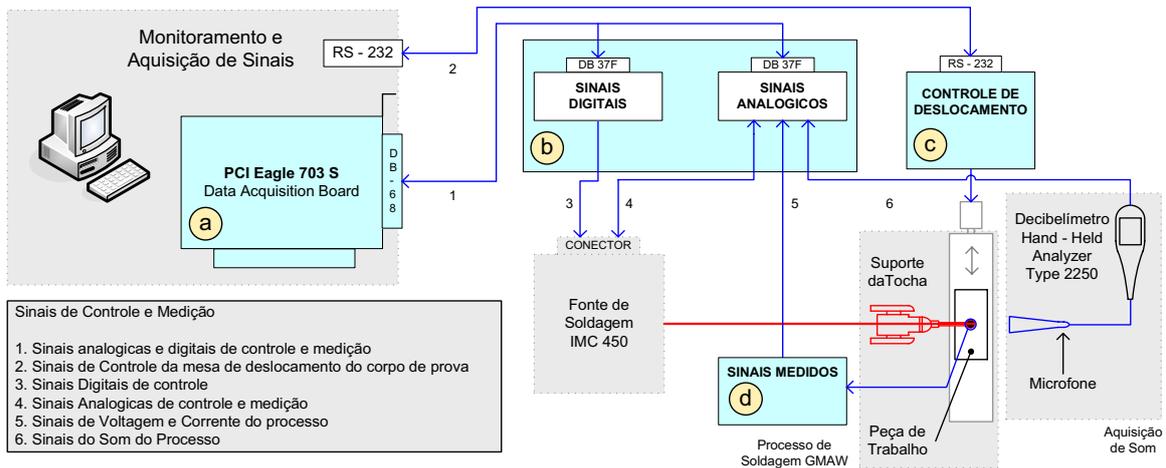


Figura 3.1: Distribuição do Sistema Computacional e Hardware empregado.

À continuação detalha-se brevemente cada um dos dispositivos do sistema computacional e hardware utilizados, assim como as funcionalidades que estes desempenham.

a. Placa de aquisição de dados *PCI Eagle 703S* (Eagle, 2008). Software de instrumentação virtual *LabVIEW* (NI, 2008). Ambos (hardware e software respectivamente) estão instalados no computador industrial *ICP-622* (ADVANTECH, 2008) e são encarregados da aquisição e armazenamento dos sinais de tensão de arco, corrente de soldagem e pressão acústica do processo. As características mais representativas da placa de aquisição de dados são:

- 16 canais analógicos de entrada
- 2 canais analógicos de saída
- 8 entradas / saídas digitais TTL
- 400 kHz de frequência de amostragem
- Barramento PCI-Bus, revisão 2.2

A configuração do hardware e software do computador industrial empregado é a seguinte:

- Intel Pentium (R) 4 Processador de 3.20 GHz
 - 2,00 GB de RAM
 - 140 GB Hard Drive (5400RPM)
 - Microsoft Windows XP Home
- b. Sistema híbrido de conexão de sinais digitais e analógicos (ver figura 3.2). Mediante este dispositivo consegue-se interconectar a placa de aquisição de dados com os sinais de controle da fonte de energia, sinais elétricos e acústicos medidos no processo *GMAW*.
- c. Sistema local e remoto para o controle do sistema eletromecânico de deslocamento da peça de trabalho (ver figura 3.2). Mediante este dispositivo se consegue configurar a velocidade de soldagem, o tempo e o sentido de soldagem. A comunicação entre o computador industrial e este dispositivo foi feita pela porta de comunicações RS-232.
- d. Sistema de medição de tensão de arco e corrente de soldagem do processo; este hardware tem a função de acondicionar e isolar as variáveis elétricas do processo. Este sinal é isolado opticamente do sistema híbrido para reduzir o ruído elétrico de origem eletromagnético e proteger das sobretensões e transientes. A corrente é medida por uma pinça amperimétrica *Fluke i1010 CA/CC* (ver figura 3.2); este instrumento é isolado eletricamente, já que a medição da corrente é feita pelo método do efeito hall (indução eletromagnética da corrente). À continuação se apresenta as características mais importantes:
- Tipo de medição: sensor de efeito de hall
 - Faixa de corrente nominal: 600^a, AC; 1000A DC
 - Precisão: 2% + 0.5 A
 - Nível de saída: 1 mV/A
 - Nível de segurança: CAT III 600V

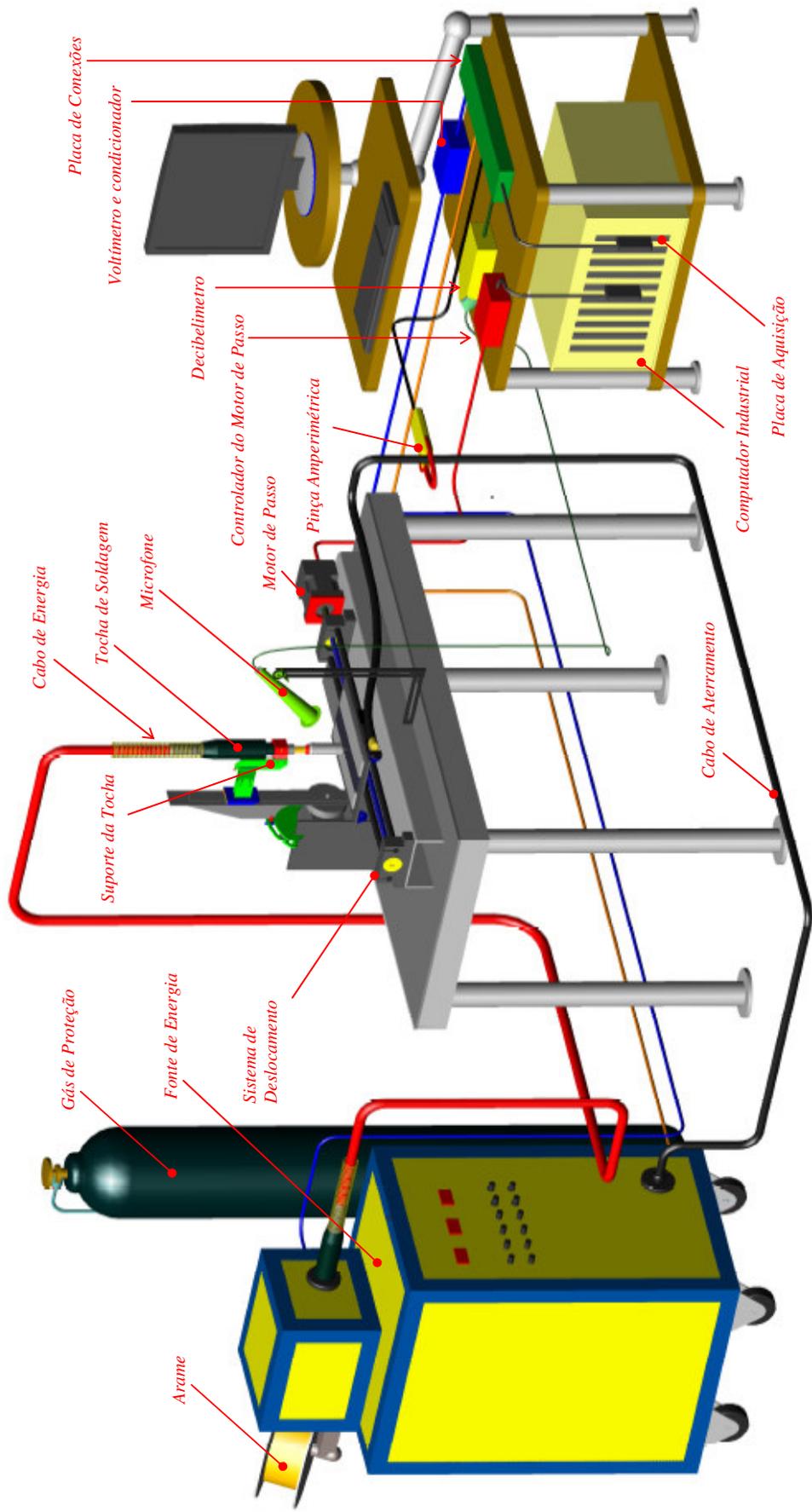


Figura 3.2: Distribuição e Localização do Sistema Computacional, Hardware e Equipamentos Utilizados.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1 Analisador de Som

Para a medição da pressão acústica e o nível de pressão acústica, foi usado o decibelímetro analisador de som Hand - Held Analyzer type 2250 (ver figura 3.2). Este decibelímetro tem três programas que permitem a configuração interna. Um programa básico de sonômetro, para fazer medições convencionais de todos os parâmetros globais e estatísticos. Um programa de análise de frequência que permite medições em tempo real em bandas de 1/1 e 1/3 de oitavas. Um programa de registro que amplia a funcionalidade do type 2250 para permitir o registro automático das medições em intervalos programáveis durante longos períodos de tempo. Eles servem para a medição de ruído ambiental, monitoramento de ruído, validação de cálculos preditivos, medição de níveis de potência sonora (método de pressão) e aplicações industriais como investigação e desenvolvimento, redução de ruído, e controle de qualidade em produção (BKSV, 2008). As principais características são:

- Decibelímetro classe 1, segundo CEI 60651 e CEI 6080 e CEI 61672
- Analisador estatístico
- Analisador de frequências em tempo real
- Registrador automático de níveis e frequências
- Gravação de áudio no equipamento
- Memória de alta capacidade e conexão USB com PC
- Faixa dinâmica de 120 dB
- Microfone 4189 pré-polarizado free-field ½ ” (ver figura 3.4)
- Sensibilidade de $-26 \text{ dB} \pm 1.5 \text{ dB}$ re 1 V/Pa, 50 mV/Pa
- Pré-amplificador de microfone ZC 0032
- Sinal de saída com filtro de ponderação acústica A, C, ou Z
- Filtros de banda de uma oitava e 1/3 de oitava

3.2.2 Fonte de Soldagem

A fonte de energia utilizada *IMC Inversal 450* (IMC, 2008) realiza os processo de soldagem de SMAW, GTAW e GMAW. Para o desenvolvimento do presente trabalho se selecionou o processo GMAW de tensão constante, sendo assim as variáveis reguladas, a tensão de soldagem e a velocidade de alimentação do arame. A intensidade de corrente de soldagem será, então, uma consequência da junção destas duas. A fonte de energia

usada (ver figura 3.2) apresenta alta tecnologia e versatilidade em equipamentos de soldagem utilizando transistores de potência IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), os quais conferem elevada dinâmica e alta eficiência. Entradas e saídas analógicas e digitais para comando por microcomputador ou robô e para aquisição de dados; além disso para o processo GMAW, possui o sistema tracionador de arame, STA-20, que possibilita a alimentação de arame bobinado de diversos tipos, com velocidade regulada pelo usuário. As principais características elétricas da fonte são:

- Corrente Nominal: 280 A 100% FC
- Corrente Máxima de 450 A
- Tensão em Vazio: 68 V
- Tensão de alimentação: 220, 380, 440 V 3 ~,
- Cos φ : 0,95
- Velocidade de alimentação de arame: 1,0 a 20,00 m/min.

3.2.3 Sistema mecânico de deslocamento do corpo de prova e fixação da tocha

Neste trabalho foram feitas solda repetitivas de boa qualidade e soldas repetitivas com simulação de defeitos. Em todos eles foram adquiridos sinais de tensão do arco, corrente de soldagem e pressão do som.

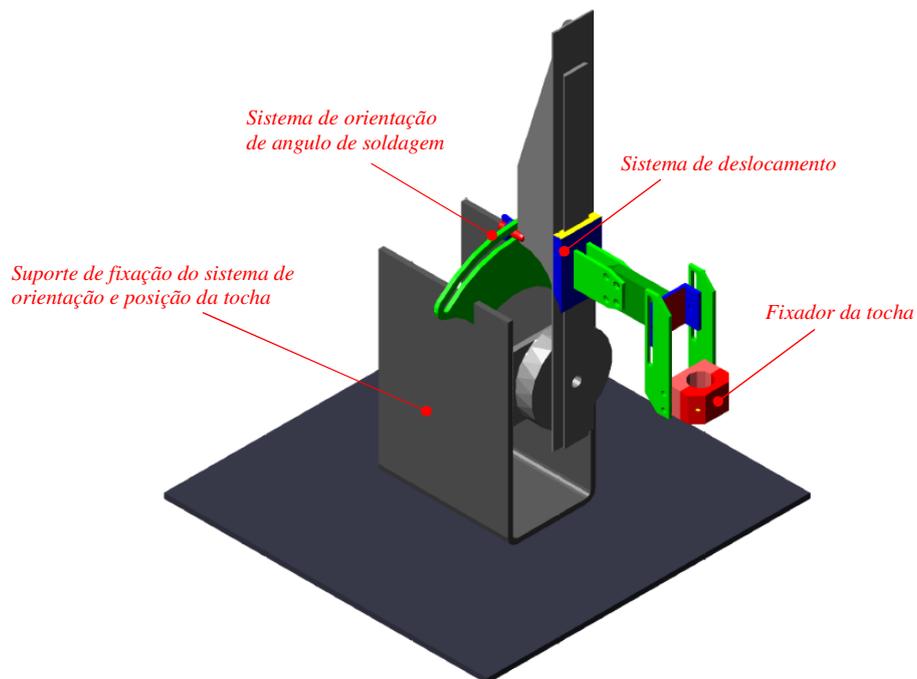


Figura 3.3: Suporte da tocha.

Para que estes sinais adquiridos sejam confiáveis no momento do monitoramento e a análise, é necessário garantir com determinadas condições de repetibilidade como a localização dos corpos de prova, dispositivos de medição acústica (posição do microfone), parâmetros de soldagem (tensão de arco em circuito aberto, velocidade de arame, velocidade de soldagem, *stand off*, composição gasosa) e propriedades metalúrgicas dos corpos de prova e o arame sejam as mesmas para cada solda executada. Com o objetivo de garantir a repetibilidade da execução das soldas, se montou e um suporte para a tocha de soldagem e um sistema mecânico de deslocamento de corpos de prova. Na figura 3.3, é mostrado o suporte da tocha. Nele, é possível ajustar o *stand off* e o ângulo de soldagem (parâmetro que permanece constante em zero grau). Na figura 3.4, se mostra o sistema mecânico de deslocamento de corpos de prova. Nesse sistema o motor de passo transforma o seu movimento rotacional em linear e é transmitido para a mesa mediante um mecanismo de parafuso sem fim.

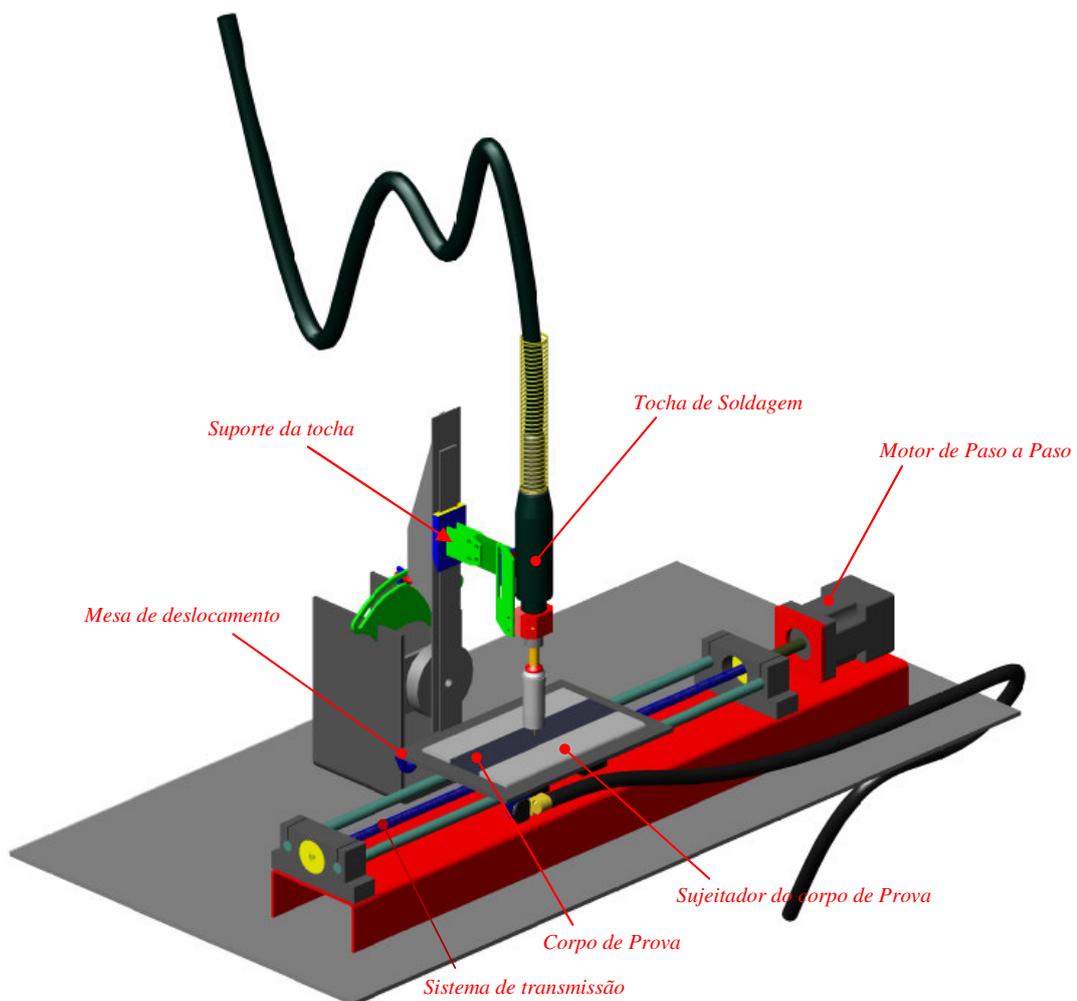


Figura 3.4: Sistema mecânico de suporte da tocha e deslocamento do corpo de prova.

3.2.4 Materiais e Corpos de Prova

Os materiais usados neste trabalho são:

- Eletrodo do tipo *AWS A5.18 ER70S-6* com diâmetro de 1 mm.
- Proteção gasosa: gás inerte de mistura de argônio e anidrido carbônico *M21** (*ATAL 5A / Ar 82% + CO2 18%*).
- Corpos de prova de aço *AISI 1020*; dimensões: 250 mm. x 40 mm. x 6,35 mm.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De acordo com a metodologia proposta, o procedimento experimental deste trabalho está estruturado em quatro etapas que se executam seqüencialmente como se detalha na seguinte figura.

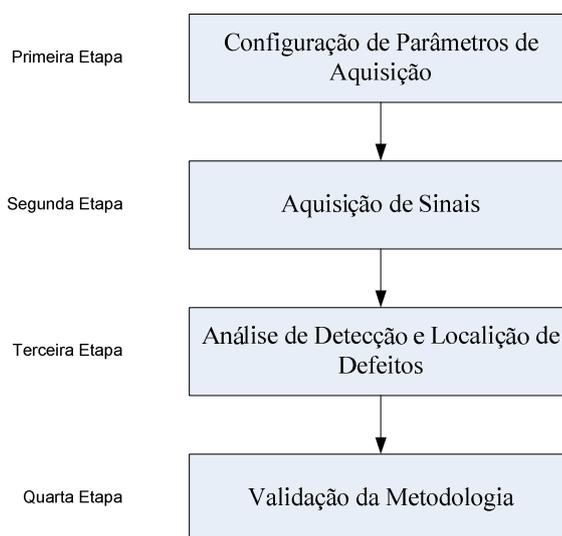


Figura 4.1: Etapas da Metodologia de Experimentação.

4.1 CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO

Esta etapa tem por objetivo determinar os parâmetros de aquisição de sinais; identificar os modos de transferência para a fonte de soldagem; identificar o envelope ótimo de parâmetros de soldagem para o modo de curto-circuito; identificar a posição mais adequada para localizar e fixar o microfone; fazer pré-processamento de sinais de tensão, corrente e pressão de som e confirmar a semelhança entre os sinais acústicos medidos e calculados.

4.1.1 Software para a Aquisição e Análise

O software usado neste trabalho foi desenvolvido no *LabVIEW 8.2* da *National Instruments*; os programas projetados nesse software são chamados de instrumentos virtuais ou VI's . Na tabela 4.1 detalham-se os instrumentos virtuais desenvolvidos e a funcionalidade de cada um de eles.

Tabela 4.1: Instrumentos Virtuais usados na Experimentação.

Nome do VI	Funcionalidade
VI_1.vi	<i>Instrumento Virtual de análise de estabilidade do processo de soldagem a partir dos sinais de tensão e corrente mediante ciclogramas.</i>
VI_2.vi	<i>Instrumento Virtual de análise de pré-processamento de sinais de tensão, corrente e pressão acústica, comparativo e desempenho de filtros convencionais e estatísticos.</i>
VI_3.vi	<i>Instrumento Virtual de pré-processamento e análise de sinais no domínio da frequência (A análise será feita para os sinais de tensão, corrente e pressão de som).</i>
VI_4.vi	<i>Instrumento Virtual de modelos matemáticos no domínio do tempo e comparação com o sinal acústico medido, (empregam-se os filtros de Kalman e o de ponderação acústica).</i>
VI_5.vi	<i>Instrumento Virtual de aquisição de tensão, corrente e pressão de som.</i>
VI_6.vi	<i>Instrumento Virtual automatizado para a obtenção do Nível de pressão de Som por cada ensaio (gerar 1 arquivo por solda).</i>
VI_7.vi	<i>Instrumento Virtual automatizado que obterá os indicadores estatísticos consistentes em histogramas a partir do nível de pressão de som de cada solda (arquivos gerados pelo VI_6). Esse software gerará um arquivo contendo um resumo estatístico por conjunto de soldas.</i>
VI_8.vi	<i>Instrumento Virtual de detector de envolvente do sinal de pressão acústico, contador de ignições e contador de pulsos a partir ta tensão de arco.</i>
VI_9.vi	<i>Instrumento Virtual de monitoramento e análise de estabilidade a partir dos sinais de tensão de arco, corrente de soldagem e pressão acústica do processo de soldagem.</i>
VI_10.vi	<i>Instrumento Virtual de monitoramento e análise de estabilidade a partir dos parâmetros de estatísticos de estabilidade acústica do processo de soldagem.</i>
VI_11.vi	<i>Instrumento Virtual de análise de estabilidade em função de janelas para os parâmetros de estatísticos de estabilidade acústica do processo de soldagem.</i>
VI_12.vi	<i>Instrumento Virtual de monitoramento, detecção e localização de defeitos a partir da tensão de arco, corrente de soldagem e pressão acústica, baseado no comportamento estatístico da acústica do arco.</i>
VI_13.vi	<i>Instrumento Virtual de monitoramento, detecção e localização de defeitos a partir da pressão acústica, baseado no comportamento estatístico da acústica do arco.</i>

4.1.2 Identificação dos Modos de Transferência na Fonte de Energia

Para a determinação do envelope ótimo de parâmetros de soldagem foi preciso primeiro fazer testes iniciais para identificar as regiões dos modos de transferência para a fonte de energia utilizada (*Inversal 450*). Para isso se fizeram múltiplas soldas variando os parâmetros de soldagem: tensão de arco, velocidade de solda, velocidade de alimentação do arme, *stand off* e vazão de gás. A identificação de cada modo de transferência foi feita pela inspeção visual e acústica do arco elétrico determinada por um operador experiente

em soldagem. Em cada teste foram adquiridos os sinais de tensão e corrente por meio do software VI_5 (ver tabela 4.1). Na figura 4.2 se apresenta o resultado dos testes de identificação, com os valores médios para a tensão e corrente; No gráfico são mostradas as faixas de tensão e corrente para cada modo de transferência, assim como também a corrente de transição entre os modos de transferência globular e spray. Também pode-se notar que a faixa do nível de tensão para produzir soldas no modo de transferência de curto-circuito vão aproximadamente desde 15 a 24 V. Tensões inferiores geram fusões, arcos e ignições incompletas e tensões superiores geram os modos de transferência globular e/ou instabilidades.

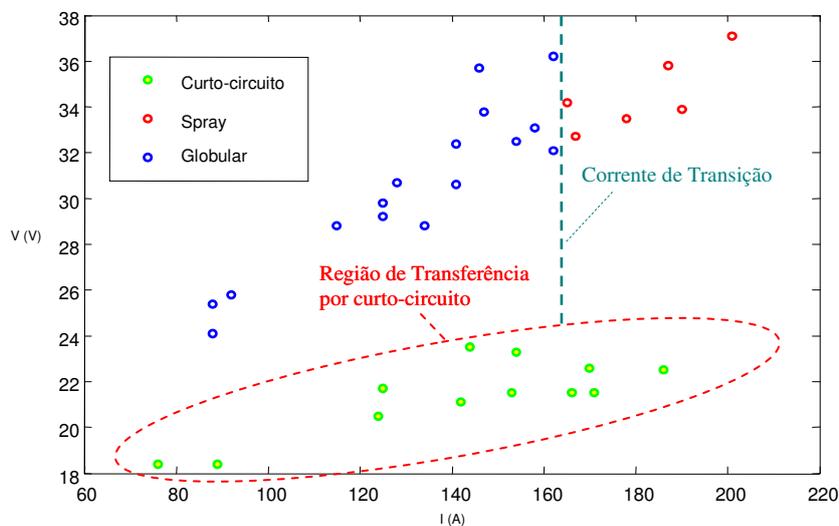


Figura 4.2: Caracterização dos Modos de Transferência.

4.1.3 Envelope Ótimo de Parâmetros Soldagem

A melhor qualidade da solda se obtém quando se atinge uma adequada combinação dos parâmetros de realimentação de soldagem (Adolfsson, 1999). Na avaliação da qualidade foram levados conta fatores geométricos e estruturais, tais como a uniformidade na rugosidade da solda e a adequada penetração da solda na peça de trabalho (Miller, 2007). As possíveis causas para a degradação da qualidade da solda são: a inadequada técnica de soldagem, instabilidade do arco elétrico, inadequada preparação dos metais a serem unidos (posição inadequada e/ou sujeira nos metais) e inadequada composição e/ou fluxo de gás.

Di *et al* (2000) fez o monitoramento *on-line* de defeitos em soldas para o processo GMAW, utilizando técnicas de classificação baseadas em redes neurais a partir da caracterização dos histogramas de tensão e corrente do processo. Nesse trabalho, foram identificadas instabilidades do processo para detectar os defeitos. Também de concluiu que

mediante esse método é possível monitorar automaticamente os defeitos na solda e ter uma considerável efetividade. Finalmente demonstrou-se que as características de qualidade da soldagem podem ser extraídas da estatística do processo.

Cayo e Absi (2007b) utilizaram os parâmetros de realimentação de tensão de arco e corrente de soldagem para calcular o comportamento do nível de pressão de som. As medições acústicas posteriores mostram a estreita semelhança entre os níveis de pressão calculados e medidos. Além disso, mostrou-se que existe uma diferença marcante entre os modos de transferência ao se analisar a atividade acústica do processo. Nesse trabalho concluiu-se que o nível de pressão de som gerado pelo processo GMAW-S (MAG em curto-circuito) é mais sensível às variações do processo em comparação aos modos de transferência globular e spray. Outra conclusão foi a possibilidade da avaliação da qualidade em soldagem a partir da monitoração do nível de pressão de som.

Neste trabalho identificou-se um envelope ótimo de parâmetros de soldagem visando obter a maior estabilidade do processo para garantir a melhor qualidade da solda. Os critérios de escolha do envelope ótimo de parâmetros são: maior número de curtos-circuitos por segundo durante a transferência, mínimo desvio padrão dos tempos dos curtos-circuitos e mínimo nível de respingos, (Adolfsson *et al*, 1999), (Cook *et al*, 1992), (Wu *et al*, 2001). Para isso, foram utilizados os parâmetros de soldagem constados na tabela 4.2 ajustados para a região de transferência por curto-circuito (ver figura 4.2):

Tabela 4.2: Faixa dos Parâmetros de Soldagem Usados.

Envelope ótimo de parâmetros de soldagem	Tensão	Velocidade do arame (WFS)	Velocidade de avanço da tocha	<i>Stand off</i>	Fluxo de Gás
1	15 – 23,50 V	6 m/min	10 mm/s	10 mm	17 l/min

Para obter o envelope ótimo de parâmetros de soldagem foi ajustada a velocidade de alimentação de arame em 6m/min e o *stand off* em 10 mm. Posteriormente, foram realizadas soldas experimentais as quais consistiram no aumento da tensão de operação de 15 a 23,5 V em intervalos de 0,5 V (região de transferência por curto-circuito). Em total foram 18 soldas feitas com uma duração de 8 s (ver figura 4.3). De acordo com um dos critérios de avaliação de estabilidade da solda feita por Adolfsson *et al* (1999), a transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW apresenta maior estabilidade quando é gerada a maior quantidade de curtos-circuitos por segundo. A contagem do número de curtos-circuitos por segundo é feita a partir de amostras de um segundo da

tensão do arco. Mas conferindo os resultados obtidos pelo software VI_13 - contagem de curtos-circuitos-, a solda que tem maior quantidade de curtos-circuitos por segundo não é a que apresenta a melhor qualidade, essa dada pela baixa geração de respingos, continuidade na rugosidade e outras características. Isso pode ser observado na solda S1 da figura 4.3.

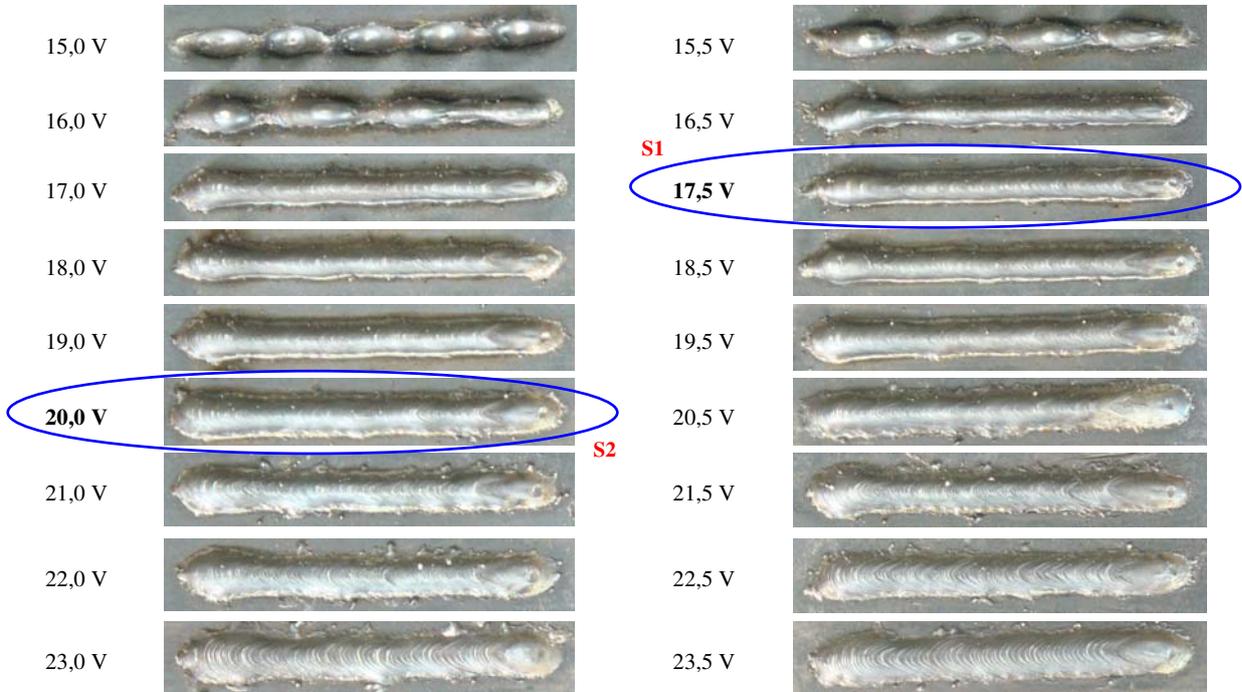


Figura 4.3: Cordões de Solda Feitas para a Identificação do Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem.

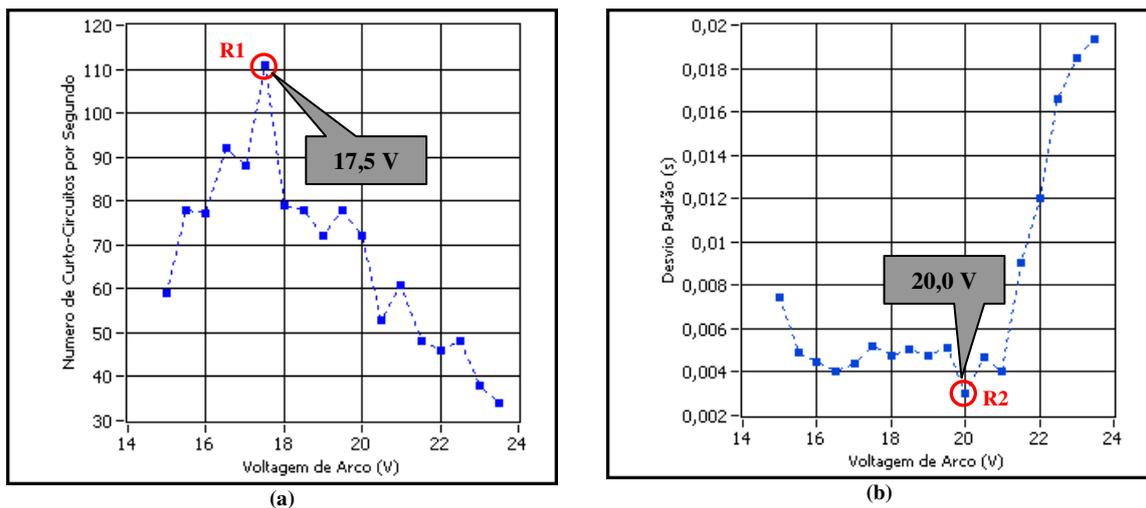


Figura 4.4: Identificação do Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem.

A solda que apresenta melhor aspecto visual com respeito à uniformidade na rugosidade é a feita com 20,0 V, identificada pelo nome S2 na figura 4.3. Essa solda, não apresenta o

maior número de curtos-circuitos como se pode observar na solda S1 da figura 4.3 e com o ponto R1 da figura 4.4(a). Uma segunda análise estatística da distribuição dos tempos entre os curtos-circuitos de cada solda revela que o envelope ótimo de parâmetros que gera melhor aspecto visual tem o menor desvio padrão como se mostra no ponto R2 da figura 4.4(b). O gráfico da figura 4.4(a) indica o número de curto-circuitos para as soldas de escolha do envelope ótimo de parâmetros de soldagem. Na figura 4.4(b) se apresenta o gráfico do desvio padrão dos períodos de curto-circuito para as soldas de escolha do envelope ótimo de parâmetros de soldagem. Nesses gráficos nota-se que o melhor envelope de parâmetros ótimos de soldagem não necessariamente apresenta o maior número de curto-circuitos; é importante a uniformidade da frequência dos curto-circuitos. Dessa forma, a solda com melhor qualidade é aquela que apresenta o menor desvio padrão na periodicidade dos curto-circuitos durante a transferência metálica. Como resultado da identificação do envelope ótimo de parâmetros de soldagem (ver figura 4.4 (a) e (b)), se obteve os valores apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem Identificado.

Tensão	Velocidade de arame (WFS)	Velocidade de avanço da tocha	Stand off	Fluxo de Gás
20,0 V	6 m/min	10 mm/s	12 mm	17 l/min

A figura 4.5 apresenta o aspecto do cordão de solda obtido com os parâmetros de soldagem ajustados para o envelope ótimo de parâmetros de soldagem apresentado na tabela anterior.

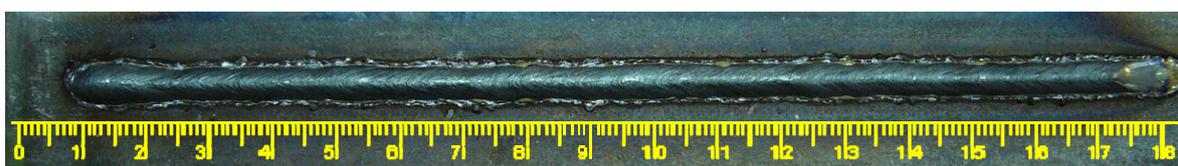


Figura 4.5: Cordão de Solda Obtido para o Envelope Ótimo de Parâmetros de Soldagem.

4.1.4 Sinais Monitorados no Processo

Na tabela 4.4 se apresentam os sinais envolvidos do processo analisados neste trabalho.

Tabela 4.4: Sinais Adquiridos no Procedimento Experimental.

Sinal do Processo	Analógico/Digital	Faixa de Variação	Faixa Condicionada
Pressão de Som	analógico	+/- 1 V	+/- 1 V
Tensão de Arco	analógico	0 - 50 V	0 - 5 V
Corrente de Soldagem	analógico	1 - 1000 A	0 - 1 V

Os sinais de entrada envolvidos são de natureza analógica (pressão de som, tensão de arco, corrente de soldagem). Mas há necessidade de serem digitalizados para ser processados

pelo computador. Para isso faz-se necessária a conversão de sinal analógico para digital. Essa tarefa é realizada pela placa de aquisição empregada neste trabalho (*PCI Eagle 703S*). A placa apresenta frequência máxima de aquisição de 400000 amostras por segundo e com uma resolução de 16 bit. A determinação da frequência de amostragem será feita em seguida. A escolha desse valor deve ser feita de tal forma que mantenha o equilíbrio entre a qualidade do sinal e a não redundância de dados adquiridos. Para isso adotou-se o teorema de amostragem de Nyquist – Shannon, (Nyquist, 1924; Shannon, 1947). De acordo com esse teorema, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado. Com isso é possível a reprodução integral do sinal sem erro de *aliasing*, Nyquist, (1924); Shannon, (1947); Wyner e Shamai, (1998). A metade da frequência de amostragem é chamada frequência de “Nyquist” e corresponde ao limite máximo de frequência do sinal que pode ser reproduzido (ver equação 5)

$$f_{am} \geq 2f_{\max_s} \quad (5)$$

Onde: f_{am} : Frequência de amostragem
 f_{\max_s} : Frequência componente máxima do sinal

Em trabalhos anteriores relacionados à aquisição de sinais de tensão e corrente no processo *GMAW*, foram utilizadas diversas frequências de amostragem: 8.192 kHz. Adolfsson (1998); 10 kHz. por Hermans e Den Ouden (1999); 6 kHz por Suban e Tušek (2003); 100 kHz no trabalho de Wu *et al* (2001); 8 kHz por Simpson e Hughes (2006). A faixa dinâmica do microfone usado (*B&K 4189*) vai de 20 a 20 kHz (frequências audíveis). As frequências em que normalmente se encontram os sinais de tensão de arco e da corrente de soldagem não superam os 10 kHz - ver figuras 4.6 (b2) e (c2). Em uma pesquisa de identificação acústica do processo *GMAW* (Mansoor e Huissoon, 1999), foi feita aquisição de som com uma frequência de amostragem de 40 kHz.

Pesquisas posteriores fizeram aquisição de pressão de som do arco elétrico com frequências de amostragem de 48 kHz por Grad *et al* (2004); 16kHz, por Tam e Huissoon (2005); Čudina *et al* (2008) com uma frequência de amostragem de 48 kHz. Quanto maior a frequência de amostragem, mais fácil será reproduzir o sinal, mas haverá redundância de dados sem nenhuma melhoria na qualidade da aquisição – Bland e Tarczynski (1997); McLean *et al* (2005).

Para determinar a frequência de amostragem seguindo o teorema de *Nichols – Nyquist* e em função da máxima frequência audível (20 kHz), foram realizadas três soldas para o envelope ótimo de parâmetros de soldagem onde se adquiriram sinais de tensão de arco e corrente de soldagem com taxas de 50 kHz, 20 kHz e 10 kHz. Inicialmente se determinou que frequência de amostragem será de 50 kHz. Como se mencionou anteriormente, o sinal de pressão de som apresenta maior dinâmica no domínio da frequência do que os sinais de tensão e da corrente. Com 50000 mostras por segundo é possível adquirir sinais de até 25000 kHz. Na análise do espectro do sinal acústico, a dinâmica da frequência não tem componentes significativas a partir dos 10 kHz. -ver figura 4.6 (a2).

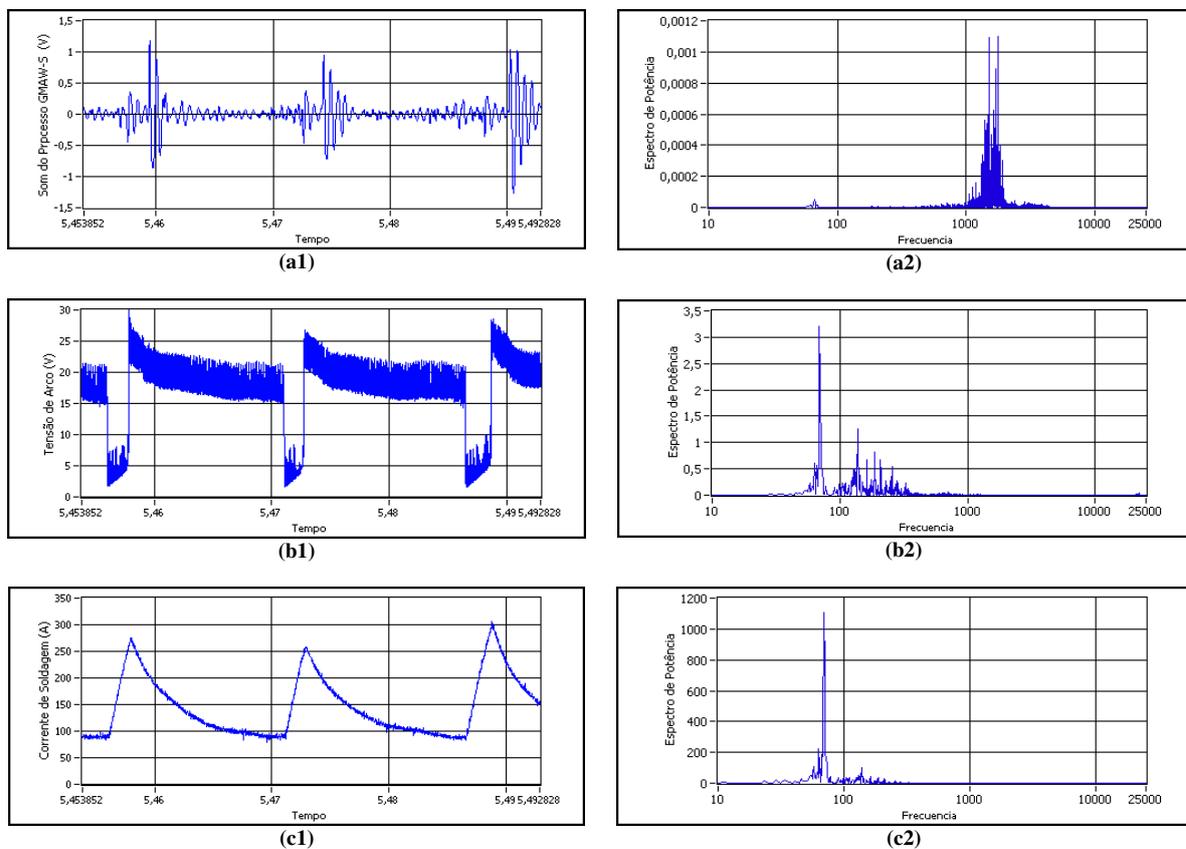


Figura 4.6: Sinais no Domínio do Tempo e Frequência Amostradas a 50000 kHz.

Os espectros de frequência dos sinais de tensão e corrente, se observa que apresentam dinâmica em frequências inferiores a 1 kHz. - ver figuras 4.6 (b2) e (c2). No domínio do tempo, nota-se que os sinais apresentam boa qualidade de resolução. Na figura 4.7, são apresentados os sinais adquiridos com uma taxa de amostragem de 20 kHz. Na figura 4.7 (a2), (b2) e (c2) o comportamento no domínio da frequência mantém a mesma dinâmica do que do primeiro caso, e no domínio do tempo não apresenta variação significativa quanto à resolução dos sinais adquiridos - ver figuras 4.7 (a1), (b1) e (c1).

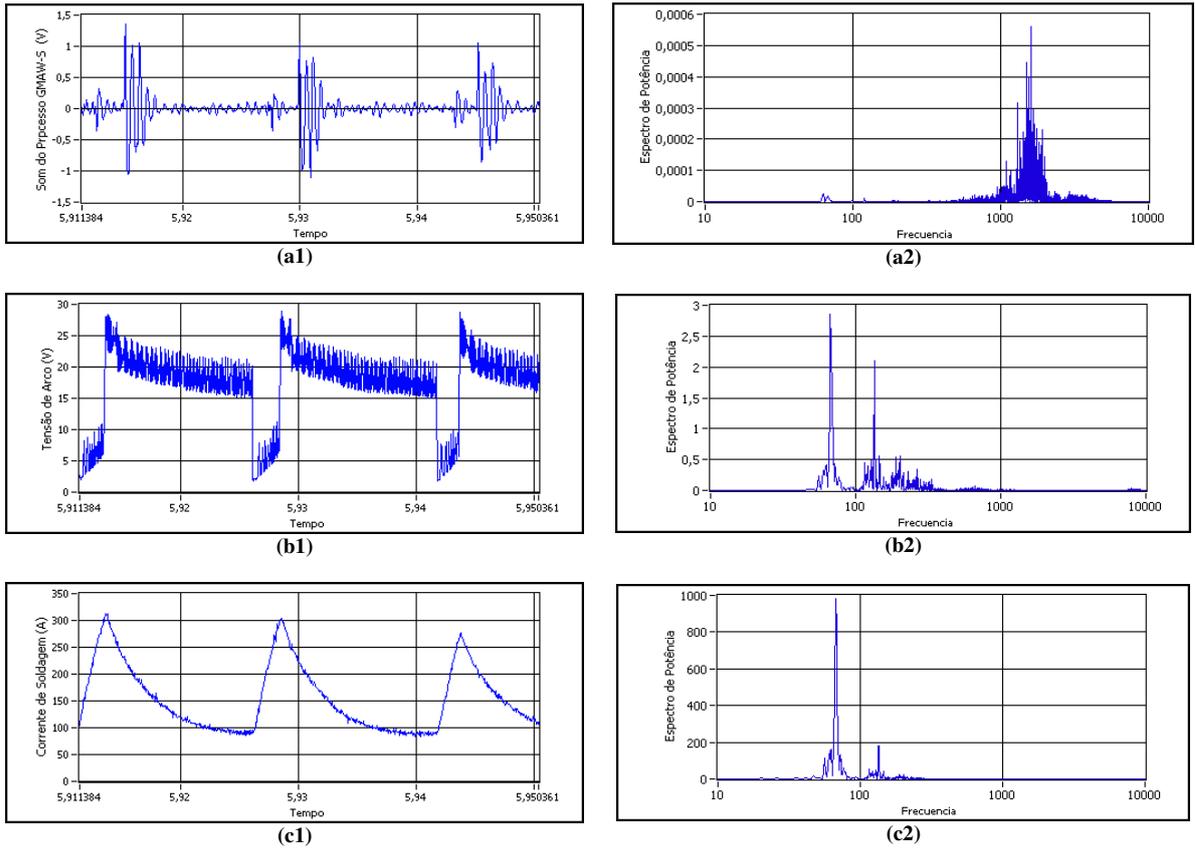


Figura 4.7: Sinais no Domínio do Tempo e Freqüência Amostradas a 20000 kHz.

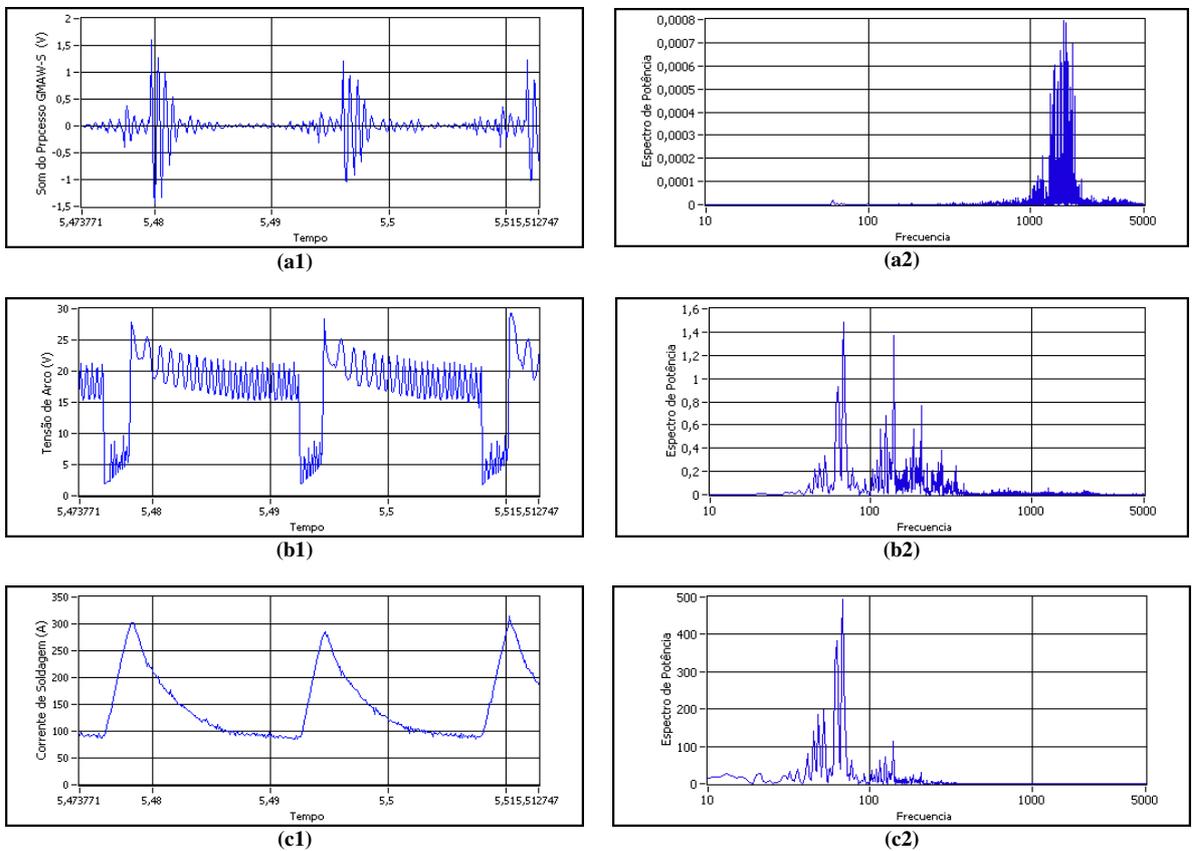


Figura 4.8: Sinais no Domínio do Tempo e Freqüência Amostradas a 10000 kHz.

Na terceira solda foi realizada a amostragem a uma taxa de 10 kHz. Esses sinais são apresentados na figura 4.8. nota-se a diminuição da redução no domínio do tempo, mas esses sinais ainda apresentam qualidade aceitável para a análise. Depois de comparadas as três frequências de amostragem e visando a não redundância de dados, fixou-se a frequência de amostragem em 20 kHz para os sinais de pressão de som, tensão de arco e corrente de soldagem.

4.1.5 Condicionamento Acústico

Percebe-se que no ambiente do processo GMAW há diversas fontes de ruído que não tem relação com o arco elétrico do processo de soldagem (principalmente ruído ambiental e da fonte de energia). De acordo com as pesquisas da origem do som do processo *GMAW* (Grad *et al*, 2004), a emissão acústica produzida pela transferência da gota até a poça de fusão é mais forte em comparação com as outras fontes, tais como: fluxo da poça de fusão, mudanças na microestrutura, liberação de tensão interna, dilatações e deformação plástica.

No presente trabalho é imprescindível adquirir o som do processo com a maior fidelidade e qualidade. Portanto, é importante fazer um isolamento e direcionamento acústico do microfone adequado para o ambiente do processo de soldagem. O direcionador mais popular é do tipo parabólico (figura 2.11-a), já que a sua estrutura é mais simples em comparação com outros modelos. De acordo com o trabalho de Malcolm, (1953) o direcionador parabólico apresenta três desvantagens. A primeira é referente à localização do microfone no foco da parábola. Com isso bloqueiam-se as frentes de onda que impactam na sua parte traseira. Outra desvantagem é a finita sensibilidade no contorno do microfone devido à difração do som. Por ultimo, há um estrito requerimento de uma boa focalização e qualidade da superfície. Nesse trabalho se desenhou uma lente acústica que apresenta um melhor desempenho, direcionando som em comparação com um direcionador parabólico. Uma adaptação desse modelo de direcionador foi utilizada no presente trabalho. Uma vez que se interessa obter o som apenas do arco elétrico e a poça de fusão, um direcionador parabólico não seria uma boa opção, pois com esse tipo de direcionador além de abaixar o som do arco elétrico e a poça, também abaixaria o som do ambiente. A figura 4.9 apresenta o direcionador acústico cônico. Esse direcionador foi implementado visando captar o som unicamente da região para onde ele for apontado. Pela figura nota-se o encaixe entre o microfone e o cone metálico mediante a utilização de um acoplador. A pressão de som monitorada é de natureza aerotransportada, e para evitar

fluxos turbulentos e isolar o microfone do ruído ambiental, o interior do cone foi revestido de uma esponja de alta porosidade. A tampa do cone apresenta uma abertura circular para a recepção das frentes acústicas. Soldas comparativas mostraram que o uso do direcionador cônico, melhora consideravelmente a fidelidade do sinal acústico devido ao isolamento do som do arco elétrico do ruído ambiental e da fonte de soldagem.

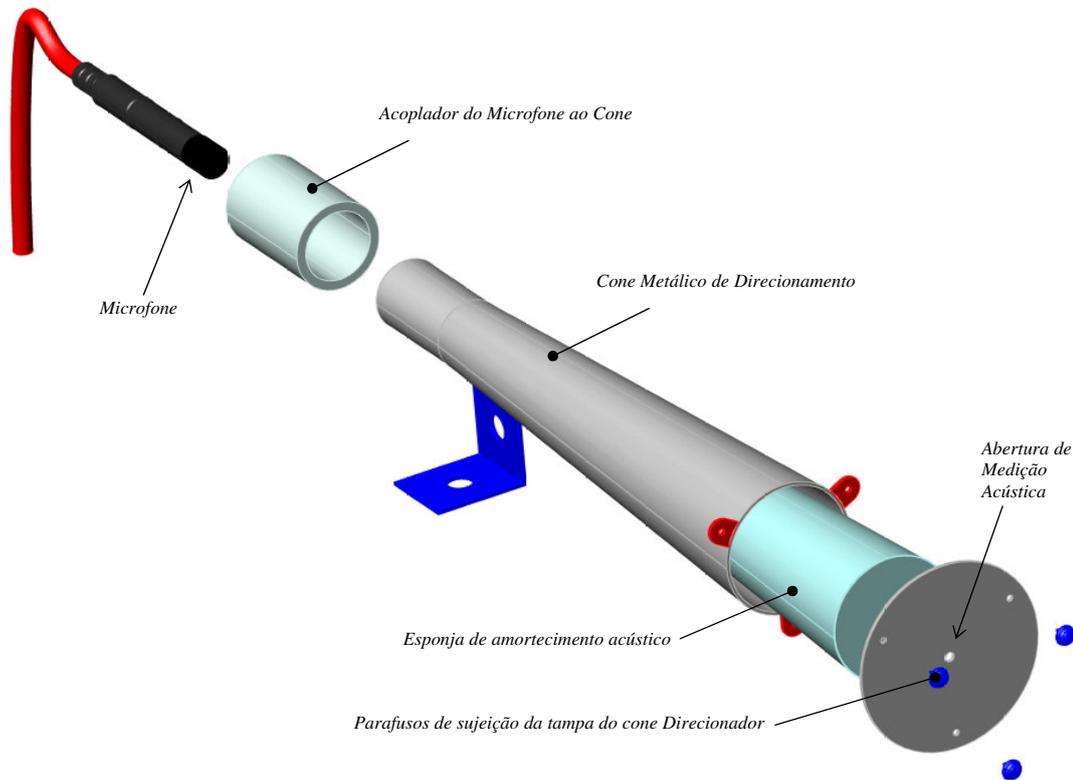


Figura 4.9: Direcionador Acústico Cônico.

4.1.6 Localização do Microfone

Segundo Tam e Huissoon (2005), além de concluir que o operador humano depende absolutamente do som produzido pela soldagem para controlar a estabilidade do processo, afirma que se o sinal acústico apresenta atrasos superiores a 400 ms., o som apresentará distorção e não poderia ser utilizado como indicador de estabilidade da soldagem por parte do operador. Considerando que a velocidade do som no ar é de 340 m/s com uma temperatura ambiente de 20 °C, o atraso de 400 ms se produzirá só se a localização do microfone superar aproximadamente os 136 m. Fato que tecnicamente não acontece no presente trabalho. Em resumo, o som medido nas proximidades do arco elétrico é capaz de fornecer informação confiável para a avaliação por parte do operador humano.

Em trabalhos experimentais anteriores, o microfone foi instalado em diversos comprimentos distantes do processo: 1 m. (Sanchez *et al*, 2006); 85 mm. (Drouet e Nadeau, 1979); 200 mm. (Warinsiriruk e Poopat, 2006); 35 mm. (Čudina *et al*, 2008).

Na figura 4.10 (a) se apresenta a localização do direcionador cônico que porta o microfone para o monitoramento acústico. Na figura 4.10 (b) se detalha a localização dentro do ambiente da execução de soldas do processo GMAW. Essa localização foi escolhida considerando-se que o microfone não pode ficar perto do processo de soldagem para não alterar o seu comportamento pelo calor radiado, fumaça e intensos campos eletromagnéticos gerados pelo processo, como também para proteger dos respingos. Essa posição mostrada na figura 4.10 foi adotada em todo o trabalho.

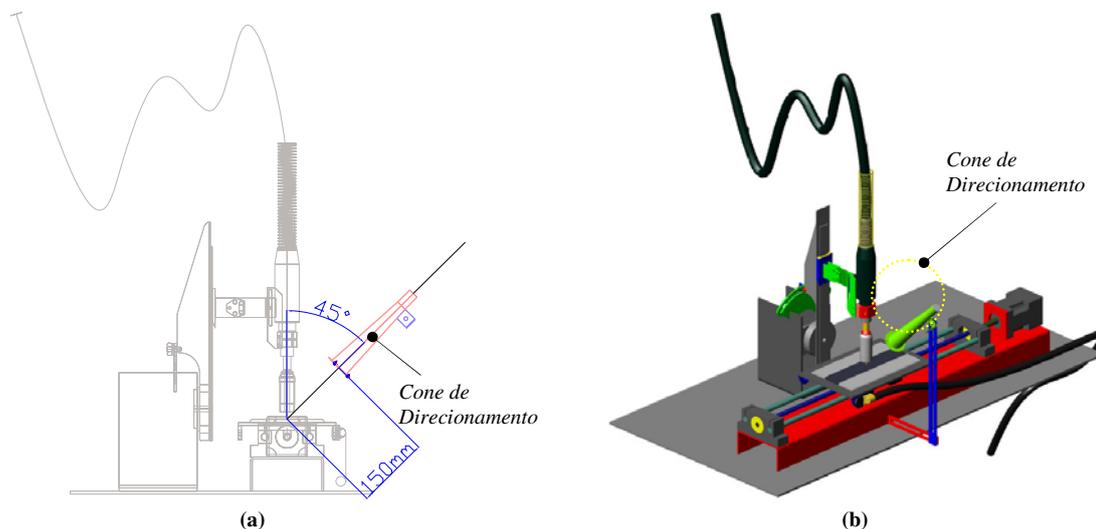


Figura 4.10: Orientação e posição do Cone e o Microfone.

4.1.7 Pré - Processamento de sinais do Processo de Soldagem

Depois de ter identificado o envelope ótimo de parâmetros de soldagem e a posição do microfone, foi feito o pré-processamento dos sinais de pressão de som, tensão de arco e corrente de soldagem com o objetivo de melhorar a sua qualidade. O pré-processamento consiste na filtragem do ruído assim como a suavização dos sinais monitorados. Para o caso do sinal de som foram avaliados os filtros de ponderação acústica (*Weight Filter*) para determinar o nível de contribuição na melhoria da qualidade e realismo do sinal acústico. Na figura 4.11, é apresentada a primeira topologia analisada para os sinais adquiridos com a fonte de energia regulada com o envelope ótimo de parâmetros de soldagem. Nesta

topologia foram utilizados filtros convencionais (*Butterworth* e *Chebyshev*). Posteriormente o sinal de som foi pré-processado pelo filtro de ponderação acústica.

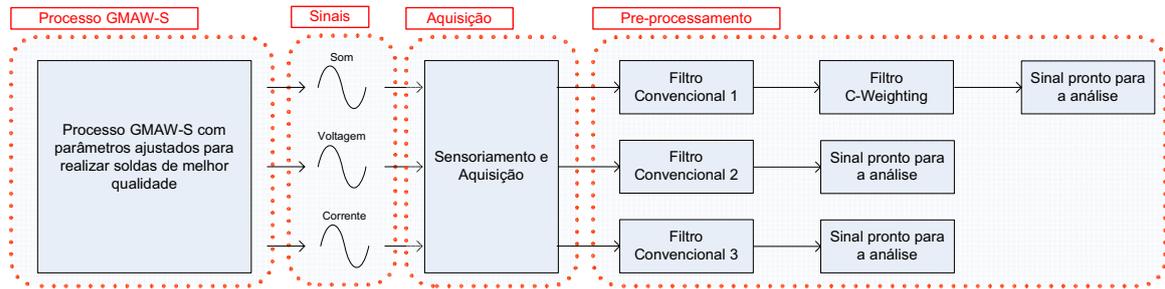


Figura 4.11: Primeira Topologia ensaiada de pré-processamento dos sinais.

No resultado da análise dos sinais com a primeira topologia (fig 4.11) foram identificadas as frequências componentes do ruído dos sinais. Na figura 4.12 (a1) é apresentado o sinal de tensão do arco a ser pré-processado. Na figura 4.12 (a2) são apresentados os espectros de frequências dos sinais com e sem filtragem (vermelho é sem filtrar e azul é filtrado). Na figura 4.12 (b1) se apresenta o sinal de corrente de soldagem a ser pré-processado. Já a figura 4.12 (b2) apresenta os espectros de frequências dos sinais com e sem filtragem (vermelho é sem filtrar e azul é filtrado). Nas figuras 4.12 (a2) e (b2) se pode notar a presença de ruído em altas frequências. Na análise da primeira topologia, também se concluiu que o filtro convencional *Butterworth* entrega melhor resposta em amplitude para os três sinais. No caso do sinal de pressão do som, o filtro de ponderação acústica não apresentou melhora significativa no domínio do tempo do sinal. Pelo contrário, o filtro deformou o sinal do som. Portanto, o filtro de ponderação não foi escolhido.

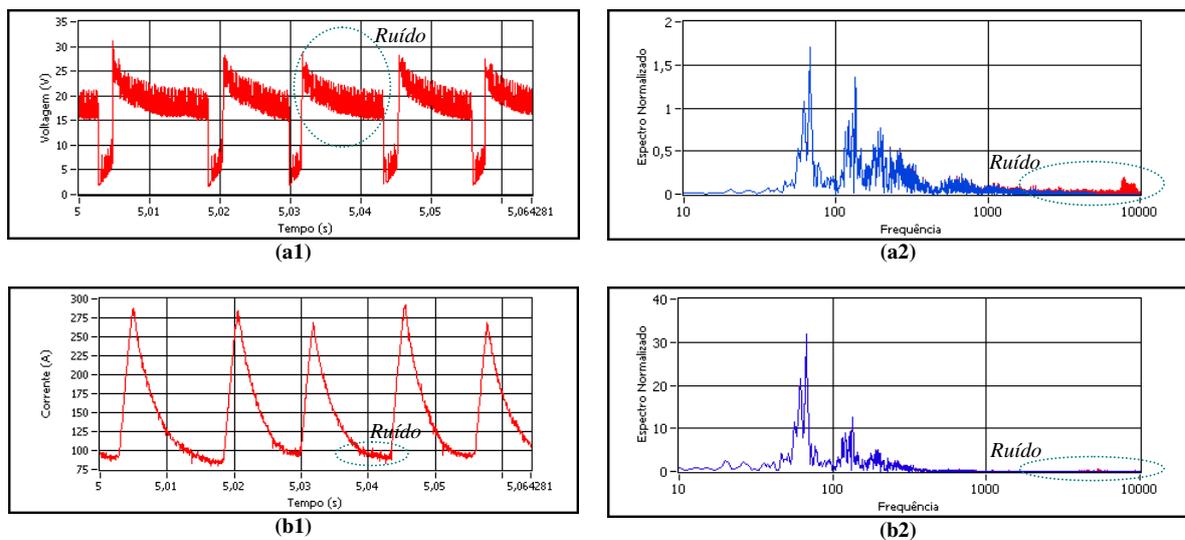


Figura 4.12: Sinais Adquiridas do Processo no Domínio do Tempo e Frequência.

Os sinais de tensão de arco e corrente de soldagem, depois de terem sido filtrados, ainda apresentaram pequenas oscilações geradas pelo processo de filtragem do ruído. Para eliminar essas oscilações, foi adotado em seguida um processo de suavização do sinal. Foi utilizada uma combinação do filtro *kalman* e filtro de média móvel (*Median Filter*). O filtro *Kalman* junto com o filtro de media móvel apresenta uma grande melhoria dos sinais de tensão e corrente e não gerou defasagem. Esses filtros de suavização não apresentam boa resposta para o sinal de pressão acústica devido à natureza oscilatória do som. Pelo contrário, pioram o sinal quando o nível de variância do filtro *Kalman* decresce e a faixa do filtro de média cresce. Na figura 4.13 é apresentada a topologia final de pré-processamento que foi empregado durante o trabalho.

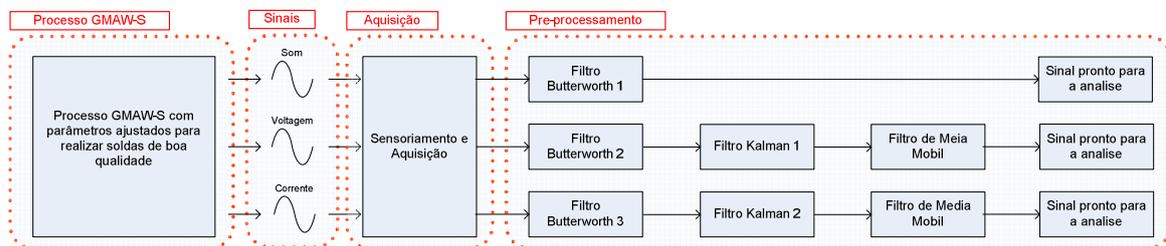


Figura 4.13: Terceira Topologia ensaiada de pré-processamento dos sinais.

Nas figuras 4.14 (a1), (b1) e (c1) são apresentados os sinais de pressão de som, tensão de arco e corrente de soldagem prévios a serem pré-processados. Pode-se notar a presença de ruído elétrico e o riple da fonte nos sinais de tensão de arco e corrente de soldagem. Esses mesmos sinais pré-processados de pressão acústica, tensão de arco e corrente de soldagem apresentam uma resposta sem ruído e suavizadas, como se mostra nas figuras 4.14 (a2), (b2) e (c2), respectivamente. O sinal de som captado através do direcionador cônico apresenta uma baixa presença de ruído e o único filtro que se utilizou para esse sinal é do tipo *Butterworth*. Na tabela 4.5 se apresentam os níveis e constantes dos filtros usados no pré-processamento dos sinais.

Tabela 4.5: Parâmetros Finais de Pré-processamento

Sinal	Filtro <i>Butterworth</i>		Filtro de <i>Kalman</i>	Filtro de Media Móvel
	Frequência de Corte Baixa	Frequência de Corte Alta	Nível de Confiança	Faixa
Pressão de Som	10 Hz.	8 kHz.	não aplica	não aplica
Tensão de Arco	0.0001 Hz.	5 kHz.	0,01	10
Corrente de Soldagem	0.0001 Hz.	5 kHz.	0,01	10

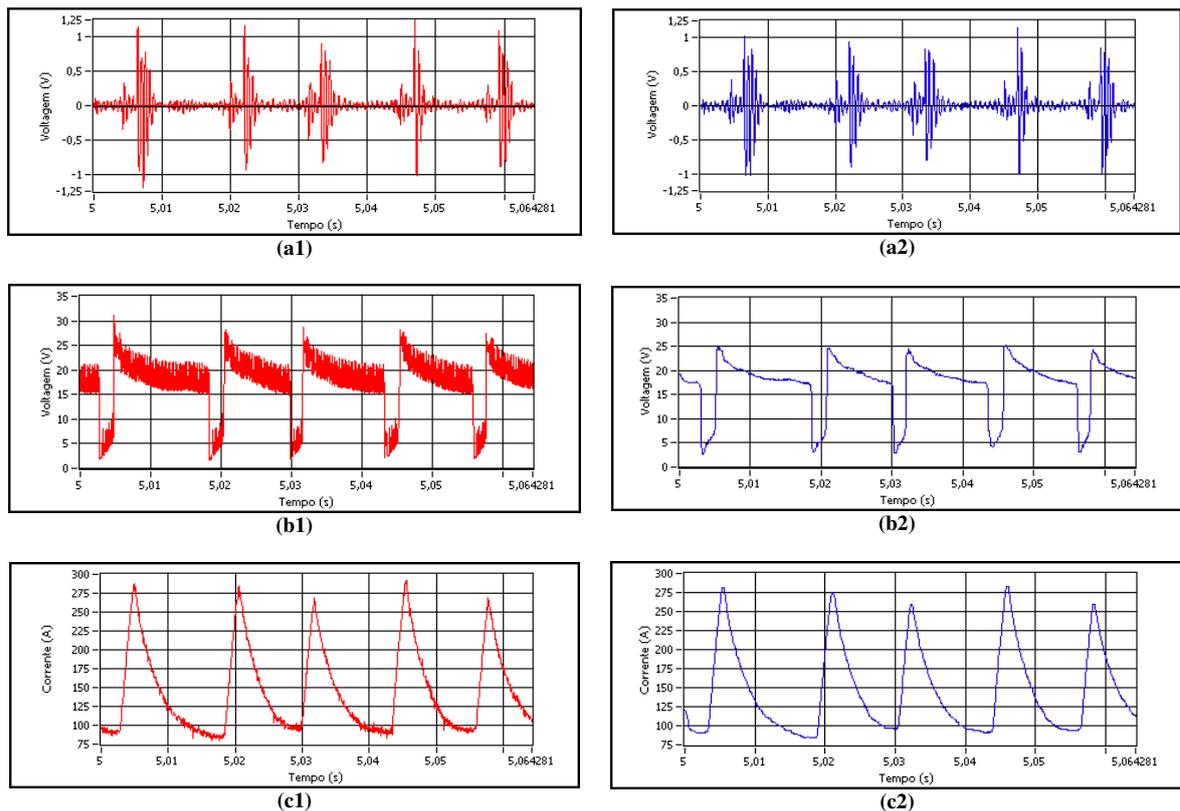


Figura 4.14: Sinais do Processo Originais e Pré-processadas.

4.1.8 Relação entre a Acústica e os Sinais Elétricos do Processo de Soldagem

O som produzido pelo arco elétrico do processo de soldagem é uma consequência da modulação em amplitude da corrente de soldagem pela tensão do arco (Drouet e Nadeau, 1982). Investigações e experimentos demonstraram que o operário em soldagem tem uma absoluta dependência visual e acústica no controle do processo GMAW, (Kralj 1968). É por isso que o pessoal especializado em soldagem emprega uma combinação acústica de timbres e tons, para distinguir os modos de transferência, a estabilidade do arco, além de detectar e identificar defeitos na solda.

A primeira derivada do sinal modulado em amplitude da tensão de arco pela corrente de soldagem diz respeito à potência do arco elétrico. Portanto, o som produzido pelo processo GMAW é um indicador da potência de soldagem. A variação da pressão do som produzida pelo arco elétrico é proporcional às variações de potência do arco (Drouet e Nadeau, 1979). No som produzido pela coluna do arco elétrico, não há emissões acústicas nas regiões próximas dos eletrodos (Drouet e Nadeau, 1982). Logo o som é um indicador direto da dinâmica do arco elétrico.

$$S_a(t) = \frac{d(k.V(t).I(t))}{dt} \quad (6)$$

$$k = \alpha \frac{(\gamma-1)}{c^2} \quad (7)$$

Onde:

$S_a(t)$: Amplitude do sinal de som no tempo

$V(t)$: Tensão do arco (V)

$I(t)$: Corrente do arco (A)

k : Fator Geométrico (experimentalmente = 10E-5)

γ : Coeficiente adiabático de expansão do ar

c : Velocidade do som no ar (m/s)

Baseado nas equações 2 e 6, obteve-se a seguinte expressão para o nível de pressão de som em função dos parâmetros elétricos:

$$SPL = 20.Log \left[20 \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_i^{t+\Delta t} \left(\frac{d(k.V(t).I(t))}{dt} \right)^2 dt} / p_o \right] \quad (8)$$

Onde:

SPL : Nível de pressão de som (dB)

V : Tensão do arco (V)

I : Corrente do arco (A)

K : Fator Geométrico (experimentalmente = 10E-5)

P_o : Pressão acústica de referencia (20 μ Pa)

t : Tempo inicial (s)

Δt : Intervalo de tempo de integração (s)

A equação 9 apresenta o modelo da pressão de som do processo de soldagem GMAW a partir dos sinais acústicos feito por Čudina et al (2008). Substituindo essa equação nas equações 1 e 2 obtém-se o SPL em função do modelo da pressão acústica (equação 10).

$$p(t) = C_1 [VI - 2RI\dot{I} - L(\dot{I}^2 + \ddot{I})] \quad (9)$$

$$SPL = 20 \cdot \text{Log} \left[20 \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} (C_1 [V\dot{i} - 2RI\dot{i} - L(\dot{i}^2 + \ddot{i})])^2 dt} / p_o \right] \quad (10)$$

Onde:

$p(t)$: Pressão acústica

V : Tensão do arco (V)

I : Corrente de Soldagem (A)

C_1 : Capacitância do arco (μF)

L_{eq} : Nível de pressão de som (dB)

R : Resistência do Arco (Ω)

L : Indutância do Arco (H)

t : Tempo inicial (s)

Δt : Intervalo de tempo de integração (s)

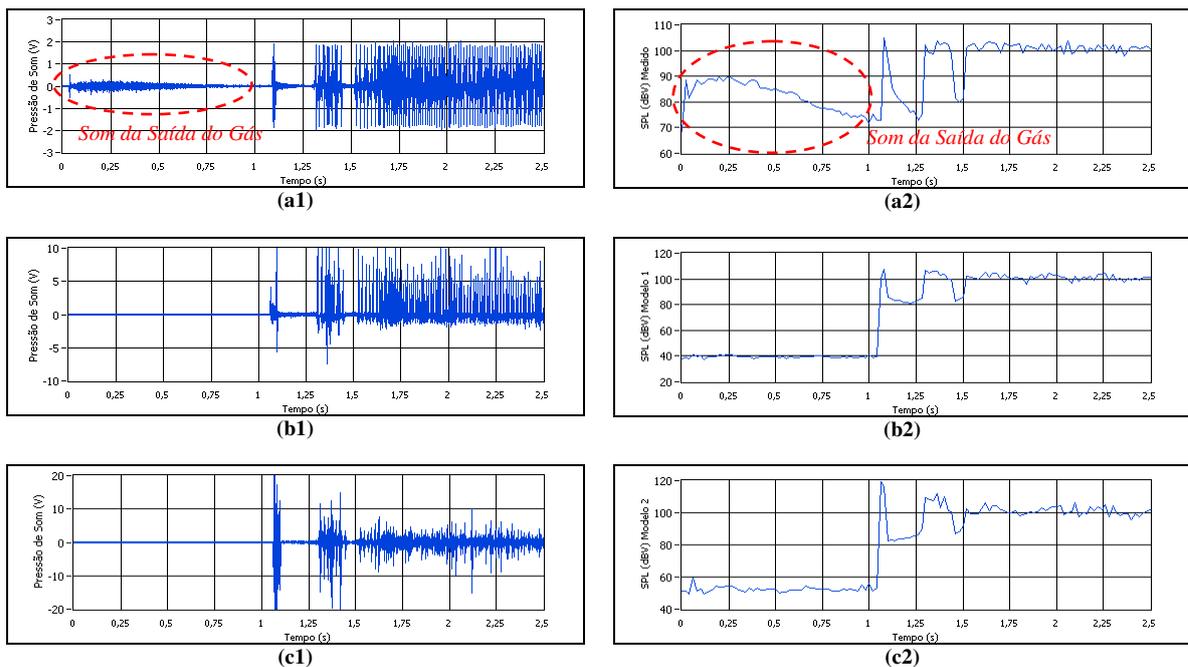


Figura 4.15: SPL Calculado pelo Som e pela Tensão e Corrente do Arco do Processo.

Na figura 4.15 (a1) é apresentado o sinal acústico medido do processo *GMAW-S* com algumas instabilidades simuladas. A figura 4.15 (a2) representa o *SPL* medido a partir do sinal acústico calculado pela equação 2 para um $\Delta t=1/50$ s. Na figura 4.15 (b1) se apresenta o *SPL* calculado a partir dos sinais elétricos de tensão do arco e corrente de soldagem (equação 8). Na figura 4.15 (b2) se apresenta o *SPL* calculado a partir das

equações 9 e 10. Nas figuras 4.16 a e b é apresentada a distribuição comparativa das duas equações que calculam o *SPL* a partir dos sinais elétricos de soldagem (equações 8 e 10). Nessas figuras, as regiões R3 e R6 representam o momento inicial da saída do gás que não pode ser calculado pelos sinais elétricos, mas é medido pelo som. Nas regiões R1 e R4 se representam a média dos valores do *SPL* quando o processo é estável. Os valores de *SPL* para os sinais medidos e calculados convergem na mesma região com valores aproximados. Esse comportamento confirma a relação entre os sinais elétricos e acústicos do processo de soldagem GMAW-S. As regiões R2 e R5 representam as regiões de instabilidade do processo. Esse fato também confirma que as instabilidades nos sinais elétricos também se refletem no comportamento acústico do processo.

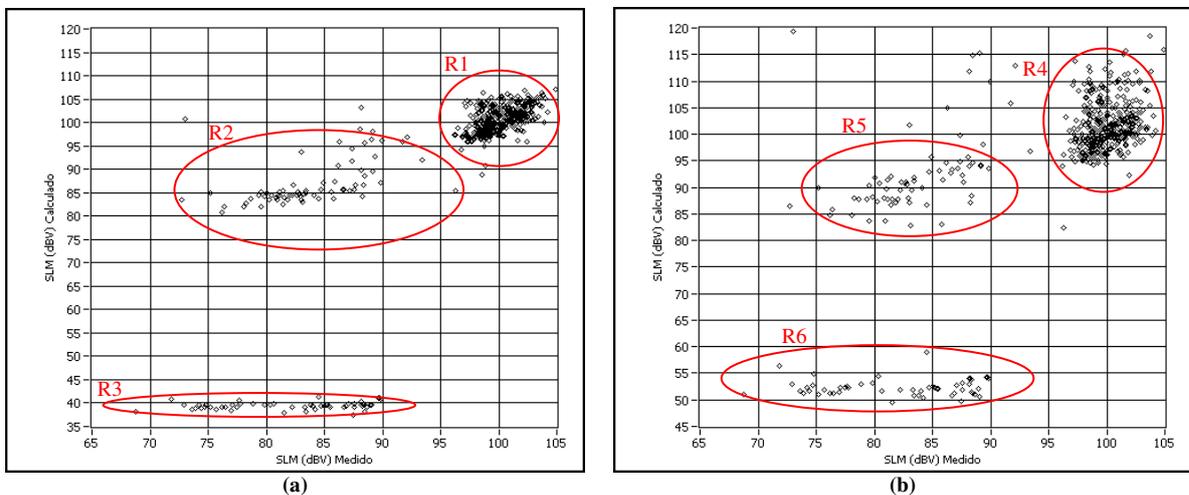


Figura 4.16: Comparação entre os Modelos Matemáticos da Acústica do Arco Elétrico do Processo.

4.2 AQUISIÇÃO DE SINAIS.

4.2.1 Monitoramento dos Sinais Adquiridos na Experimentação

Na figura 4.17, são apresentados os sinais adquiridos na experimentação do presente trabalho: a pressão de som, a tensão de arco e a corrente de soldagem. Na figura 4.17 (a) e 4.17 (b) nota-se que há uma relação entre o sinal de tensão e o sinal de pressão acústica. Na figura 4.17 (b) a região “b” do sinal de tensão de arco representa a extinção do arco e o seu comportamento acústico se representa na região “a” da figura 4.17 (a). As regiões “c” e “d” das figuras 4.17 (a) e 4.17 (b) representam a região do comportamento do sinal acústico e tensão do arco respectivamente quando se produziu a ignição do arco. A extinção do arco produziu na acústica, um conjunto de pulsos, onde os pulsos de menor amplitude representam a extinção do arco e os de maior amplitude representam a ignição

do arco. Esses mesmos resultados foram obtidos por Sanchez *et al* (2006). Além disso também pode-se notar que os pulsos de menor amplitude estão relacionados com o aumento da corrente, e as maiores amplitudes estão relacionadas com a diminuição da corrente, -ver figura 4.17 (c). Esse fato confirma que as origens do som do processo está na modulação em amplitude da corrente pela tensão do arco.

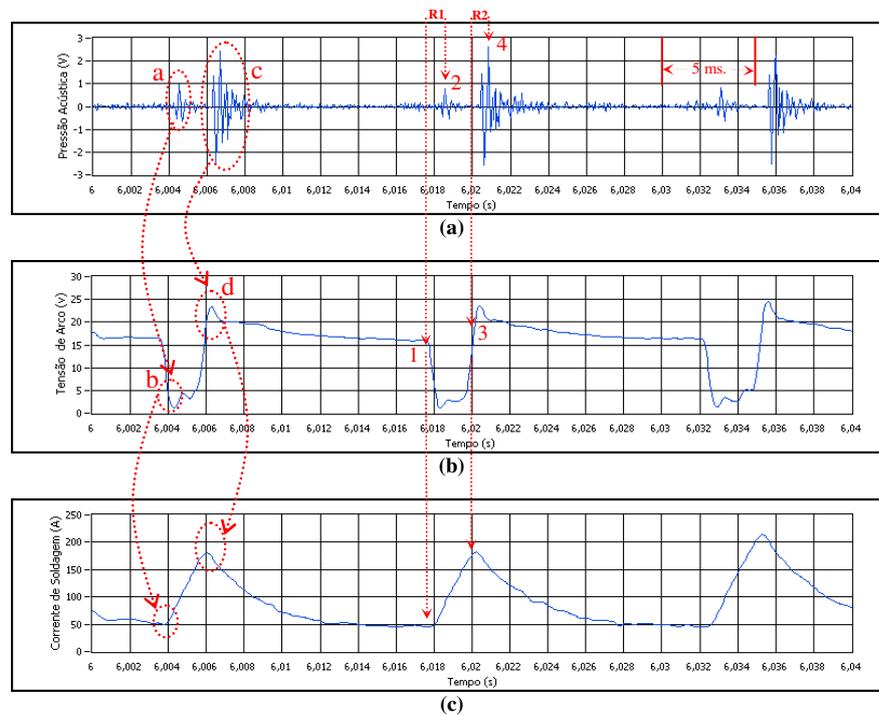


Figura 4.17: Sinais monitoradas no Processo de Soldagem.

Nas figuras 4.17 (a) e (b) também estão assinados os pontos 2, 4 e 1, 3 sobre os sinais de pressão acústica do processo e a tensão de arco, respectivamente. O ponto 1 representa o momento em que se produz a extinção do arco e o ponto 2 representa o pulso de maior amplitude da região acústica que representa o início do curto-circuito. O ponto 3 representa o início da ignição do arco e o ponto 4 representa o pulso de maior amplitude da região acústica que representa o estabelecimento do arco. Nas duas regiões pode-se notar que há um atraso R1 entre o tempo de extinção do arco e o tempo que se produziu a maior amplitude acústica, a qual representa a extinção do arco. Observe-se o mesmo atraso R2 quando se produziu a ignição do arco. Esse retardo, cujo valor é menor que 5 ms, é originado pela natureza aerotransportada do som do arco. O valor será menor quanto mais próximo o microfone estiver do processo. Segundo Tam e Huissoon (2005), o sinal acústico representa corretamente o processo de soldagem quando o retardo não supera os 400 ms. Na figura 4.17 (a) nota-se que o atraso do som com respeito aos sinais elétricos de tensão de arco e corrente de soldagem não superam 5 ms. de atraso. Portanto, o

comprimento da localização do microfone na experimentação deste trabalho não gerou uma defasagem a qual tenha implicações significativas na representação acústica dos sinais de realimentação do processo (tensão e corrente do processo).

4.2.2 Execução de Soldas Estáveis

Neste trabalho se utilizou um sistema mecanizado de fixação da tocha de soldagem. Os cordões de solda foram executados um em cada chapa (*bead on plate*) em posição plana. Foram realizadas vinte soldas; cada solda teve um comprimento de 180 mm. (ver figura 4.19); estas soldas foram feitas ajustando a fonte de energia com os de parâmetros mostrados na tabela 4.3 (envelope ótimo de parâmetros de soldagem identificado). Durante cada soldas, foram adquiridos simultaneamente sinais de corrente, tensão de arco e pressão de som a uma frequência de amostragem de 20 kHz. Na figura 4.18 se apresenta o fluxograma representativo para a aquisição e armazenamento dos sinais monitorados. Os dados foram armazenados em formato *.lvm. pelo instrumento virtual VI_5 (ver tabela 4.1). Esse formato pode ser lido como um “.txt”.

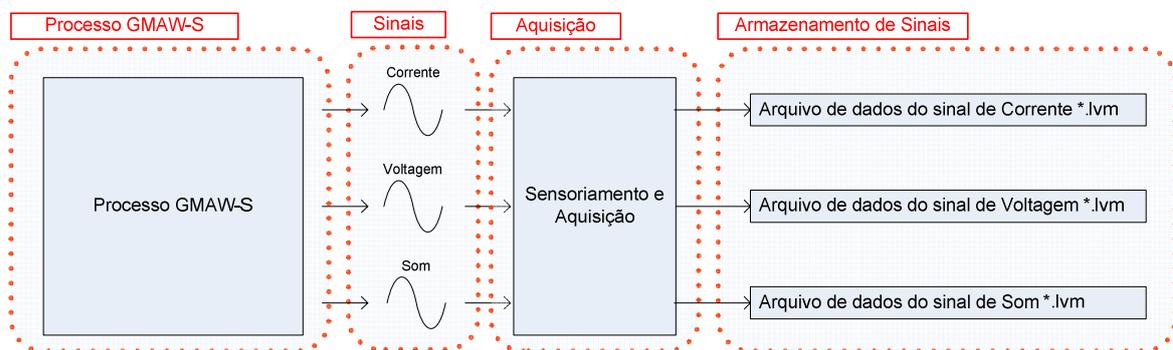


Figura 4.18: Fluxograma de Aquisição e armazenamento de Sinais sem Defeitos.

4.2.3 Execução de Soldas com Presença de Instabilidades

Com o objetivo de detectar acusticamente instabilidades no processo GMAW-S na presença de falhas, foram realizadas soldas simulando defeitos sobre o corpo de prova. Os defeitos estiveram localizados numa região intermédia da chapa de aço para avaliar o comportamento acústico durante o início, meio e final da falha. Na figura 4.19 se apresenta à localização da área de simulação de defeitos sobre o corpo de prova.

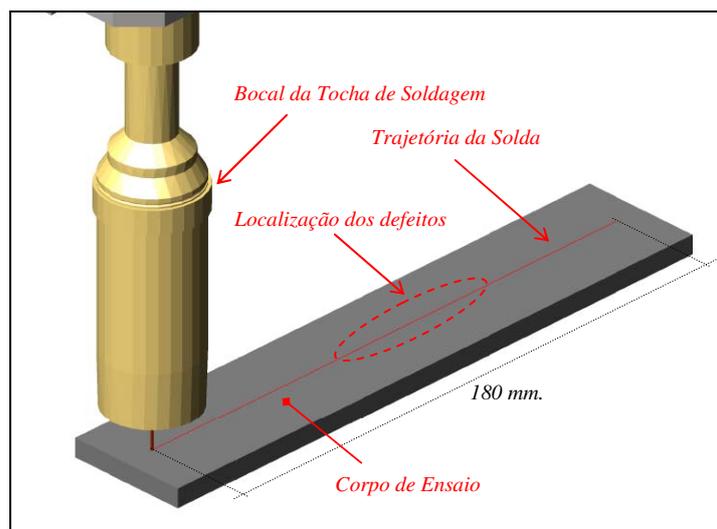


Figura 4.19: Área de Simulação de Defeitos.

Neste trabalho foram simulados três tipos de defeitos. A variação do *stand off*, a presença de graxa na trajetória da solda e a ausência de gás de proteção. A variação do *stand off* foi feita mediante a colocação de uma chapa de aço de 2 mm. de espessura sobre o corpo de prova. Com isso, há variação no comprimento do arco que gera também uma variação na corrente que finalmente gerou instabilidades no processo. A simulação do defeito por presença de sujeira foi feita por meio da inserção de graxa em uma certa região do corpo de prova. A falha por ausência de gás foi feita fechando-se a válvula reguladora da vazão do gás em uma certa região. Esses ensaios de simulação de falhas foram feitos ajustando a fonte de soldagem com os parâmetros de soldagem mostrados na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Testes de Simulação de Defeitos

Falha simulada	Soldas	Tempo	Tensão	WFS	Velocidade de soldagem	Stand off	Fluxo de Gás
Varição de Stand Off	05	18 s	20,0 V	6 m/min	10 mm/s	10 – 08 mm	17 l/min
Ausência de Gás	05	18 s	20,0 V	6 m/min	10 mm/s	10 mm	17 - 0 l/min
Presença de Graxa	05	18 s	20,0 V	6 m/min	10 mm/s	10 mm	17 l/min

A figura 4.20 apresenta o fluxograma utilizado para a aquisição e armazenamento dos dados dos sinais monitorados.

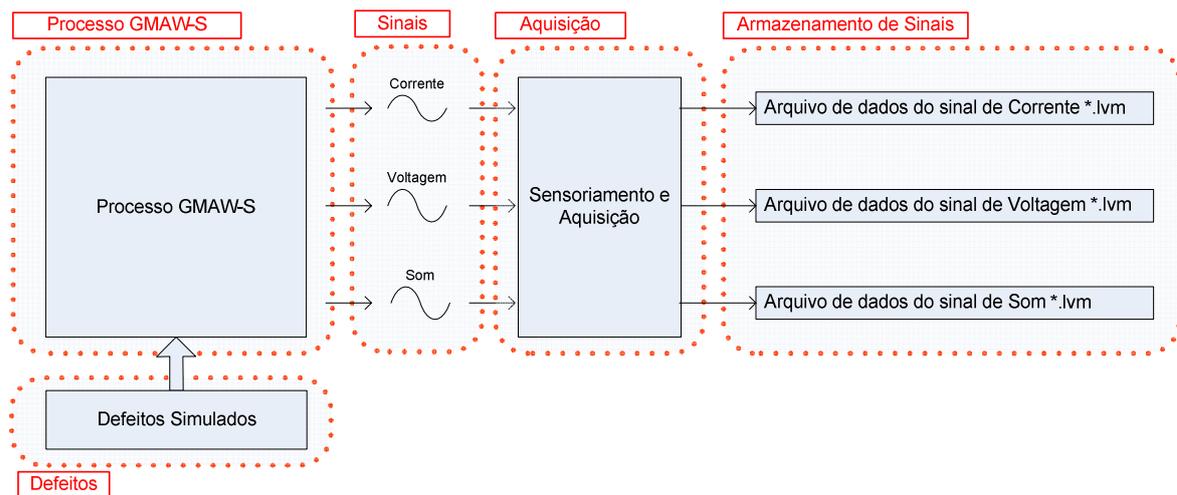


Figura 4.20: Fluxograma de Aquisição e Armazenamento de Sinais com Defeitos.

4.3 ANÁLISE DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS

4.3.1 Região de Estudo e Análise dos Sinais do Processo de Soldagem

Na figura 4.21 (a), (b) e (c), apresenta-se o comportamento dos sinais de tensão de arco, corrente de soldagem e pressão acústica, respectivamente. No início do processo de soldagem, o arco apresenta instabilidades. Esse fato foi revelado nas instabilidades produzidas no início e no final de cada sinal. Além disso, no sinal de pressão acústica percebe-se que no início, o fluxo de gás produz maior pressão acústica, mas aquele se reduz quando se estabiliza. Também pode-se notar a presença de instabilidade nos sinais localizada no início da formação do arco com uma duração aproximada de 2,0 segundos. A instabilidade no final da solda tem uma duração próxima a 500 ms. Para a avaliação da solda na detecção de defeitos abaixou-se a região que apresenta estabilidade no arco, visando continuidade, estabilidade e estacionariedade dos sinais adquiridos. Para garantir que a região dos sinais do processo estudados apresenta a maior estabilidade (com os parâmetros de soldagem ajustados com os valores da tabela 4.3), a região de análise e estudo foi a partir do quarto segundo depois de ter iniciado a ignição do arco elétrico e após apresentar estabilidade na transferência metálica. A região de análise incluiu até um segundo antes de finalizar o processo de soldagem para evitar analisar sinais instáveis devido à finalização da transferência.

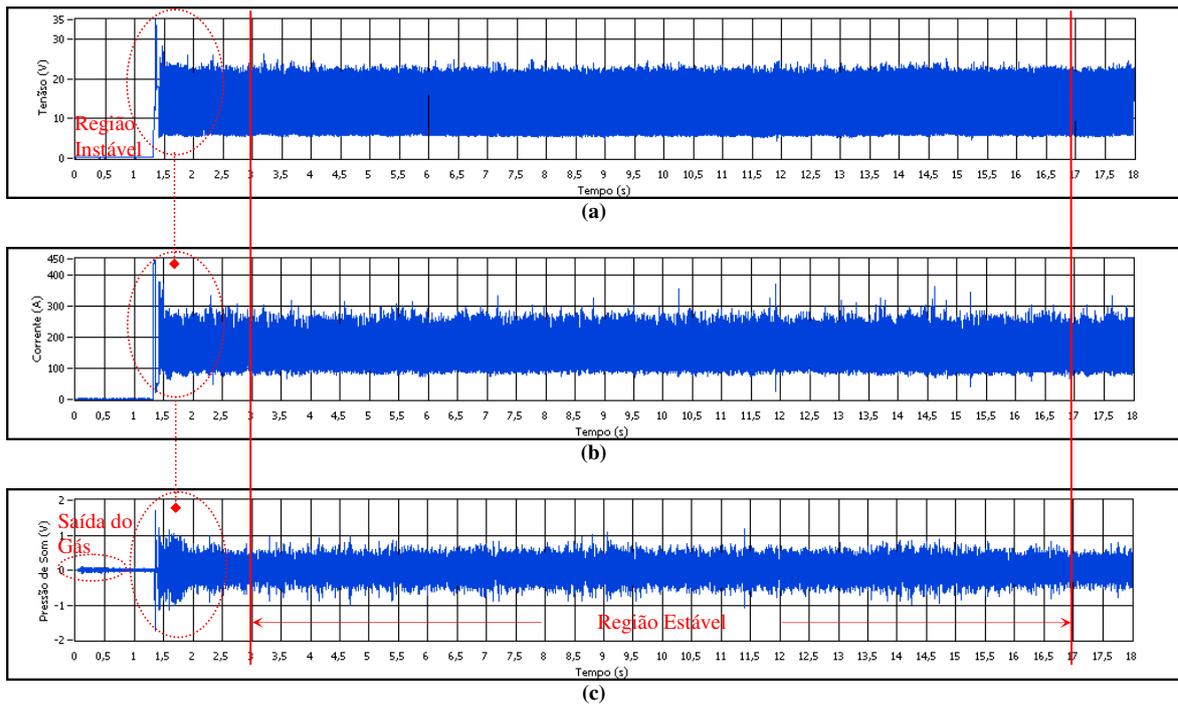


Figura 4.21: Região de Análise nos Sinais do Processo de Soldagem.

4.3.2 Parâmetros Estatísticos de Estabilidade

Os parâmetros estatísticos de estabilidade foram divididos em dois grupos: parâmetros estatísticos de estabilidade elétrica e os parâmetros estatísticos de estabilidade acústica (que em diante será nomeada como PEE e PEA respectivamente). Esses parâmetros foram determinados a partir dos sinais de tensão de arco e corrente de soldagem para o caso do PEE e a partir da pressão acústica para o caso do PEA. Na figura 4.22 se mostra o fluxograma de análise para o estabelecimento dos PEA e PEE.

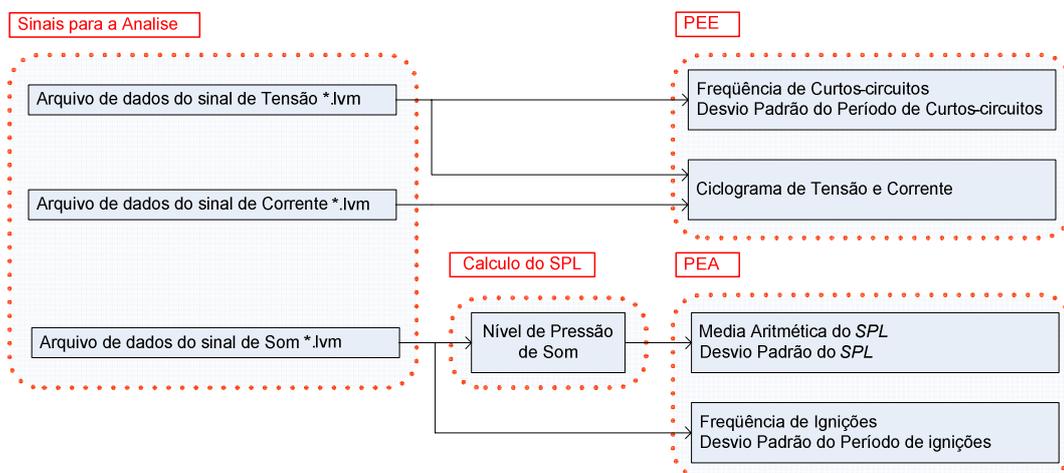


Figura 4.22: Fluxograma de Sinais do Processo em Condições de Estabilidade.

a Parâmetros Estatísticos de Estabilidade Elétrica - PEE

Os PEE são: a frequência de curtos-circuitos determinadas eletricamente a partir do sinal de tensão do arco, o desvio padrão dos períodos dos curtos-circuitos determinados eletricamente e o ciclograma de tensão de arco e corrente de soldagem do processo.

a.1 Frequência e Desvio Padrão de Curto-circuitos do Arco a partir da Tensão

A partir da tensão do arco foi calculada a frequência de curtos-circuitos e desvio padrão dos períodos de curtos-circuitos. Na figura 4.23 (a) se mostra o sinal de tensão do arco de todo o processo e se indica a janela escolhida - ver figura 4.23 (b). A figura 4.23 (d) corresponde aos impulsos resultantes onde cada impulso representa o curto-circuito do arco. Na figura 4.23 (c) são apresentados os procedimentos usados para a detecção de curtos-circuitos e medição do período de curto-circuito a partir da tensão do arco. Este detector consiste num derivador de primeira ordem e um filtro de kalman que entrega unicamente impulsos representando cada curto-circuito. Usou-se um nível referencial de 0,2 V, para detectar curtos-circuitos. Também foi medido o tempo entre cada curto-circuito para o cálculo do desvio padrão dos períodos de curto-circuito.

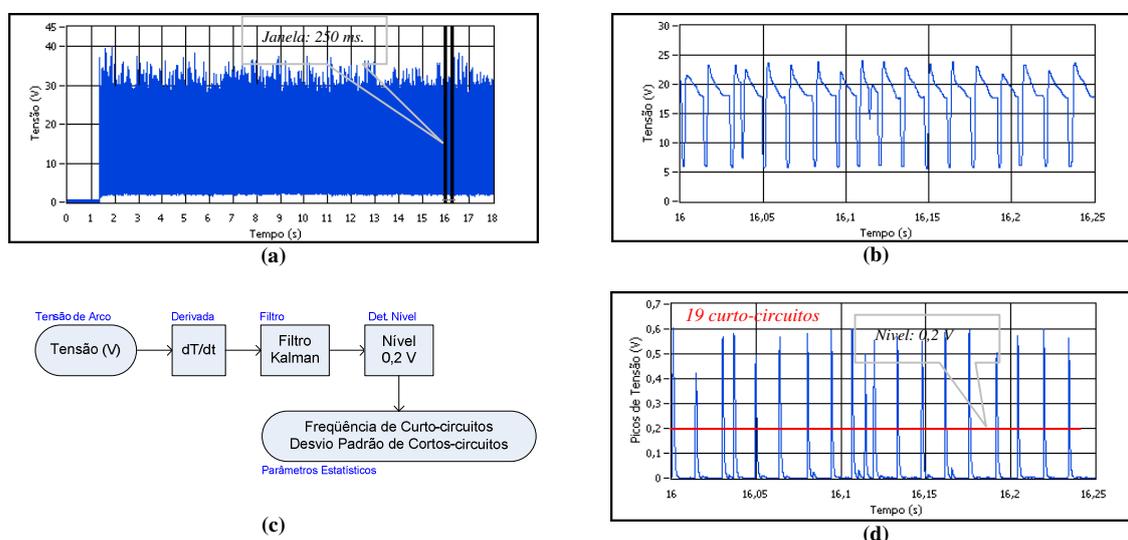


Figura 4.23: Fluxograma e Sinais na Detecção de Curtos-Circuitos.

a.2 Ciclograma de Tensão de Arco e Corrente de Soldagem

Finalmente se fez uma análise gráfica do ciclograma de tensão e corrente para identificar o comportamento dessas duas variáveis sobre condições de estabilidade da soldagem. O ciclograma é um gráfico do tipo XY que representa dois sinais, no caso tensão e corrente.

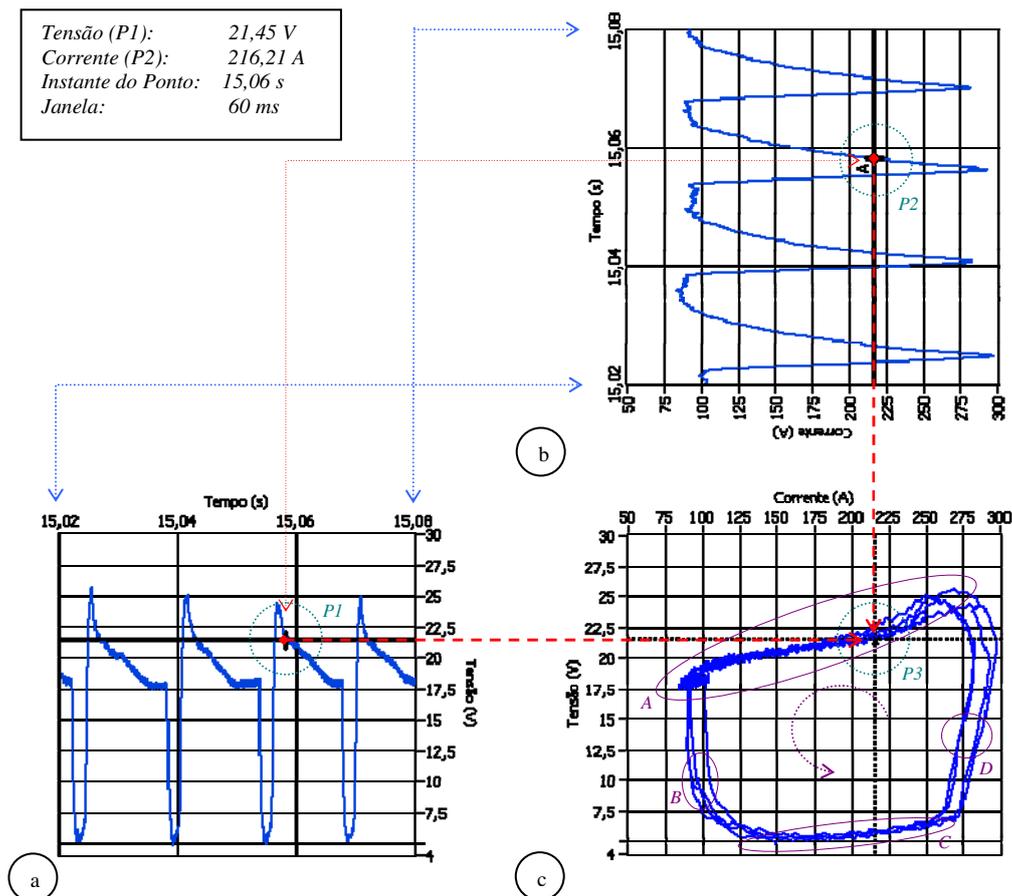


Figura 4.24: Ciclograma de Tensão de arco e Corrente de Soldagem.

Na Figura 4.24 (c) pode-se observar o ciclograma dos sinais de tensão de arco -fig. 4.24 (a) - e corrente de soldagem -fig. 4.24 (b)- com uma janela de análise de 60 ms para o processo de soldagem estável. Os pontos P1, (21,45 V) e P2, (216,21 A) dos sinais de tensão e corrente, respectivamente, são representados mediante o ponto P3 no ciclograma. Cabe ressaltar que esses pontos foram gerados simultaneamente no processo no instante de 15,06 s. Na Figura 4.24 (c) se observam as regiões de transferência do ciclograma. A região de transferência “A” representa o arco estabelecido. A região “C” representa o curto-circuito. As regiões “B” e “D” representam as transições de tensão de arco para a tensão de curto-circuito e a transição da tensão de curto-circuito para a tensão de arco, respectivamente (extinção e ignição do arco). A transição entre uma e outra região de transferência no ciclograma, sempre se produz em sentido anti-horário. Em condições de estabilidade, o ciclograma deve apresentar uma transição harmônica entre as quatro regiões como se mostra no ciclograma da Figura 4.24 (c). A instabilidade do processo é refletida na tensão e corrente e, portanto, também no ciclograma, se manifestando com uma transição turbulenta entra uma e outra região de transferência.

b Parâmetros Estatísticos de Estabilidade Acústica - PEA

Os parâmetros estatísticos de estabilidade acústica que em diante será nomeada como PEA, são: o SPL médio, o desvio padrão do SPL médio, a frequência de ignições determinadas acusticamente e o desvio padrão dos períodos das ignições determinadas acusticamente. (veja-se o Apêndice A)

b.1 Média e Desvio Padrão do SPL

A equação 11 representa a média aritmética. Esse parâmetro resulta da soma dos valores de uma variável dividido pelo número de elementos. A equação 12 representa o desvio padrão. Esse parâmetro é uma medida da dispersão estatística da variável avaliada, indicando quão longe em geral os seus valores se encontram do valor esperado. Para a análise da média aritmética e o desvio padrão do SPL foram utilizadas as seguintes equações:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n) \quad (11)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}_i)^2} \quad (12)$$

Onde:

\bar{x}_i : Média Aritmética da i -ésima Janela de Análise

S_i : Desvio Padrão da i -ésima Janela de Análise

n : Número de Dados Componentes da Janela de Análise

x_j : j -ésimo Dado Componente da Janela de Análise

b.2 Frequência e desvio padrão de ignições do arco a partir da pressão acústica

Com o objetivo de analisar a periodicidade dos curtos-circuitos do processo de soldagem a partir da pressão de som, se calculou o número de impulsos acústicos por segundo. Após isso, se identificou a posição no tempo da janela de cada pulso que representa cada ignição do arco para determinar o tempo médio que há entre cada impulso. Esse tempo médio representa o período médio das ignições do arco elétrico medido a partir da pressão de som. Com o objetivo de determinar a variação do período de ignições, se calculou o desvio padrão dos períodos de ignição para cada janela de análise. Esses dois parâmetros foram

calculados com as equações 11 e 12, respectivamente. Como o nível de pressão de som é uma consequência da modulação em amplitude da tensão do arco pela corrente de soldagem (Drouet e Nadeau, 1982), portanto se a pressão acústica é um sinal modulado em amplitude é possível aplicar o princípio da de-modulação de sinais. A de-modulação de um sinal modulado em amplitude não é mais que a detecção da envolvente do sinal. Existem diversos métodos de detecção de envolvente. Os mais utilizados são o método da combinação do quadrado do sinal e o filtro passa baixo e o método da transformada de Hilbert. Neste trabalho se usou o primeiro método porque desempenha uma boa resposta sem ter um elevado custo computacional em comparação com o segundo método.

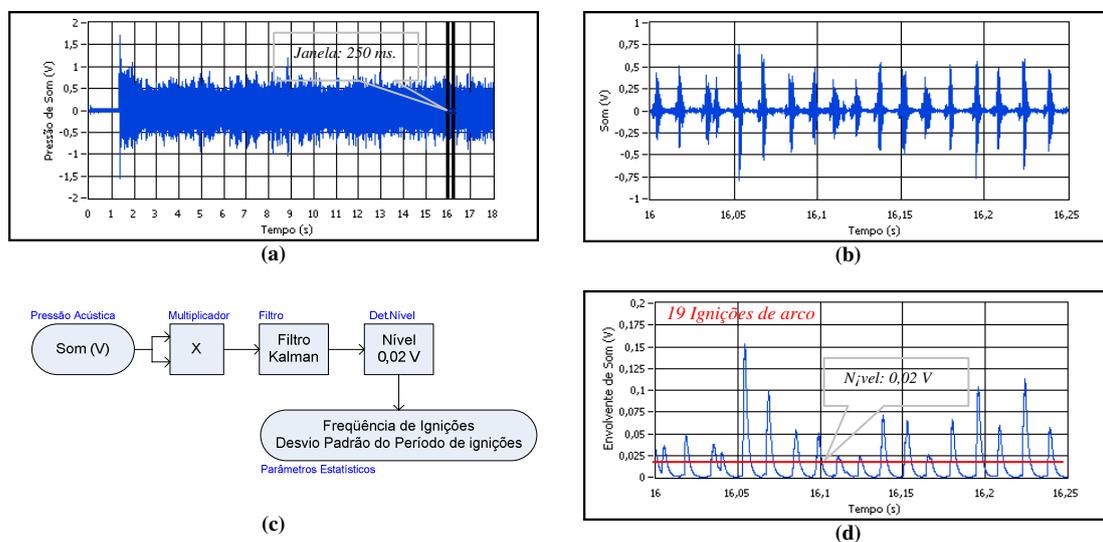


Figura 4.25: Fluxograma e Sinais na Detecção de Envolvente da Pressão Acústica.

Na figura 4.25 c são apresentados os procedimentos empregados para a detecção de envolvente. Na figura 4.25 a se mostra o sinal de pressão acústica de todo o processo e se indica a janela escolhida para fazer a análise e detecção de envolvente -Figura 4.25 (b). A figura 4.25 (d) corresponde ao sinal envolvente resultante, onde cada pico representa a ignição do arco. Para a detecção dos impulsos se usou um nível referencial de 0,02 V. Valores superiores a esse nível são considerados como uma ignição do arco. O número de ignições detectadas a partir da envolvente da pressão de som -figura 4.35 (c)- coincide com o número de curto-circuitos detectados a partir da tensão do arco para a mesma janela de análise (figura 4.35 (c)). Isso era esperado já que no processo GMAW-S se produz ciclicamente a ignição do arco e o curto-circuito, um após o outro.

4.3.3 Janela de Análise dos Sinais do Processo de Soldagem

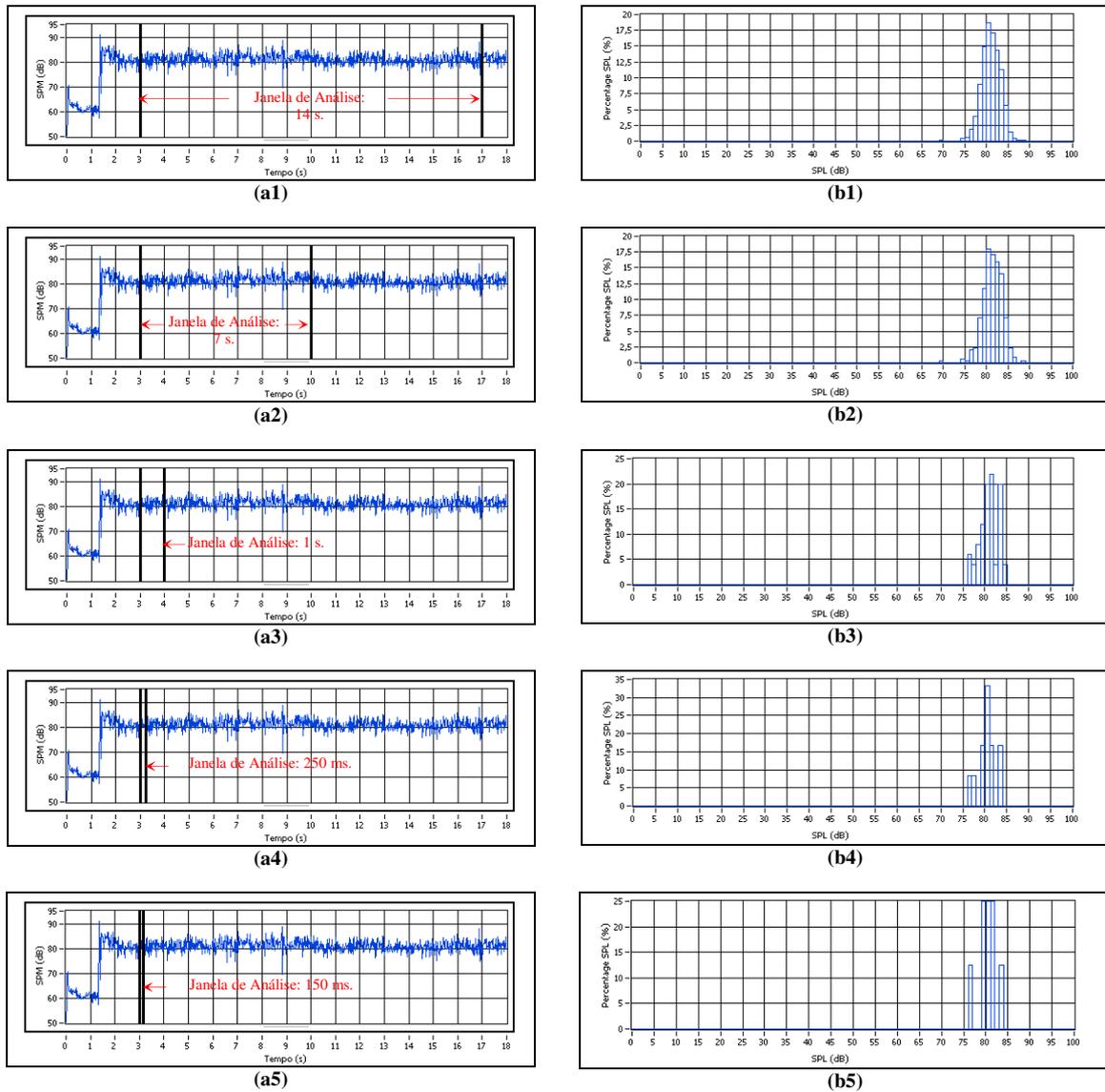


Figura 4.26: Distribuição Normal do SPL em Condições de Estabilidade.

Absi *et al* (2006), no estudo estatístico dos sinais de soldagem usou janelas de análise de 250 ms com uma frequência de amostragem de 4032 Hz (1024 dados para cada janela de 250 ms). O tempo de duração dessa janela foi considerado como o tempo mínimo onde os sinais do processo de soldagem reúnem as características estocásticas representativas do processo considerado estacionário. No estudo de avaliação acústica da estabilidade feito por Cayo e Absi (2008b), destaca-se a capacidade do SPL para avaliar a estabilidade do processo de soldagem baseada na sua continuidade e a mínima variância. A figura 4.26 (a1), (a2), (a3), (a4) e (a5) mostra o SPL do processo calculado a partir do som em função da equação (1) e (2) e as janelas de análise de 14 s. (toda a região de estabilidade), 7 s, 1 s,

250 ms e 150ms respectivamente. A figura 4.26 (b1), (b2), (b3), (b4) e (b5) demonstra a distribuição do SPL respectiva para cada janela de análise mencionada anteriormente. Pode-se notar que a distribuição da primeira janela de análise que corresponde à região de estabilidade (figuras 4.26 a1 e b1), tem o comportamento de uma distribuição estatística normal mono modal, com uma média que oscila nas proximidades de 82 dB. Para uma janela de 7 segundos (50% do tempo da janela anterior) o nível médio do SPL se mantém quase invariável nas proximidades de 82 dB (ver figuras 4.26 a2 e b2). As janelas de 1 segundo e 250 ms ainda matém a média do SPL nas proximidades de 82 dB (ver figuras 4.26 a3, b3, a4, b4 e a5, b5, respectivamente). Esse comportamento confirma a estacionariedade do sinal de pressão acústica do processo de soldagem. Para o estudo da estabilidade do SPL do processo foram usadas janelas de comprimento de um segundo.

Na figura 4.27 se apresenta dois grupos de janelas para a análise dos sinais de SPL, desvio padrão do SPL, frequência de ignições e desvio padrão dos períodos de ignições. A figura 4.27 (a) apresenta resultados para uma janela de análise de 1 segundo. Isso significa que se teve só um valor médio a cada segundo. Já na figura 4.27 (b) se apresentam resultados para uma janela de análise de 150 ms. Os resultados mostrados são de maior resolução, embora a janela de análise seja reduzida. Isso pode ser percebido, na frequência de ignições para ambas janelas (ver figura 4.27 a3 e b3) onde para a janela de um segundo se tem uma média de aproximadamente 72 curtos-circuitos para cada segundo. Para a janela de 150 ms, se tem aproximadamente 11 ignições por cada 150 ms. significando que para um segundo teria aproximadamente 73 ignições. Esse número que se aproxima da média obtida na janela de 1 segundo. Esses dois valores de frequência guardam estreita relação e correspondência, pois ainda numa janela de 150 ms se consegue manter as informações estatísticas do processo de soldagem, como se pode apreciar na distribuição histográfica do SPL para uma janela de 150 ms descrita na secção 4.3.1 (ver figura 4.22 a5 e b5). Logo as análises estatísticas correspondentes a SPL, desvio padrão do SPL, frequência de ignições de arco, desvio padrão do período de ignições, frequência de curtos-circuitos e desvio padrão de períodos de curtos-circuitos, para o estabelecimento dos parâmetros de estabilidade, detecção de instabilidades e localização de defeitos, foram feitas com uma janela de 150 ms.

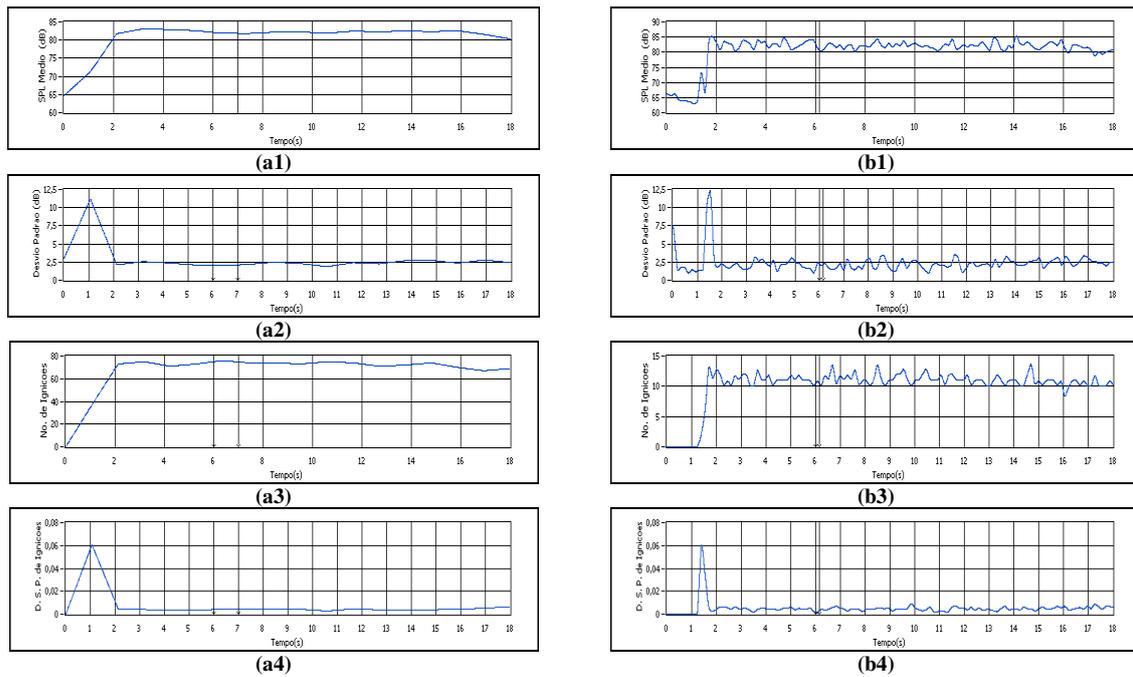


Figura 4.27: Janelas de Análise.

4.3.4 Parâmetros Estatísticos em Condições de Estabilidade

Na figura 4.28 (a) se apresenta o aspecto visual de uma solda com a maior estabilidade. A Figura 4.28 (b), (c), (d) e (e) apresenta os PEA SPL médio, desvio padrão do SPL, frequência de ignições, e desvio padrão do período das ignições respectivamente,. A Figura 4.28 (f) e (g) apresenta os PEE frequência de curtos-circuitos e desvio padrão para o período dos curtos-circuitos respectivamente. A figura 4.29 apresenta o PEE do ciclograma de tensão e corrente. Os sinais dos PEA e PEE mostrados na figura 4.28 se caracterizam por apresentar uma continuidade e variância característica tanto nos valores médios como no desvio padrão. A caracterização desses valores será o ponto de partida para detectar defeitos quando algum desses sinais estiver fora do valor característico que se estabelecer mais na frente. Na figura 4.29, demonstra-se os ciclogramas para uma janela de análise de um segundo para a solda que apresentou o menor desvio padrão do SPL (ver figura 4.30), que é a solda mais estável do grupo de soldas. Nesse conjunto de ciclogramas, pode-se notar que as tensões de arco e curto-circuito se mantêm estáveis durante cada segundo medido aproximadamente para as faixas de 19 a 21 V e 5,5 a 6,5 V, respectivamente. A corrente também se mantém estável dentro de uma faixa de 160 a 200 A aproximadamente. A corrente de transição entre a região de curto-circuito e o arco elétrico apresenta maior variância que a corrente de transição entre a região do arco elétrico e o curto-circuito. Isso é típico num processo de soldagem estável (Xiaoqing, 2005).

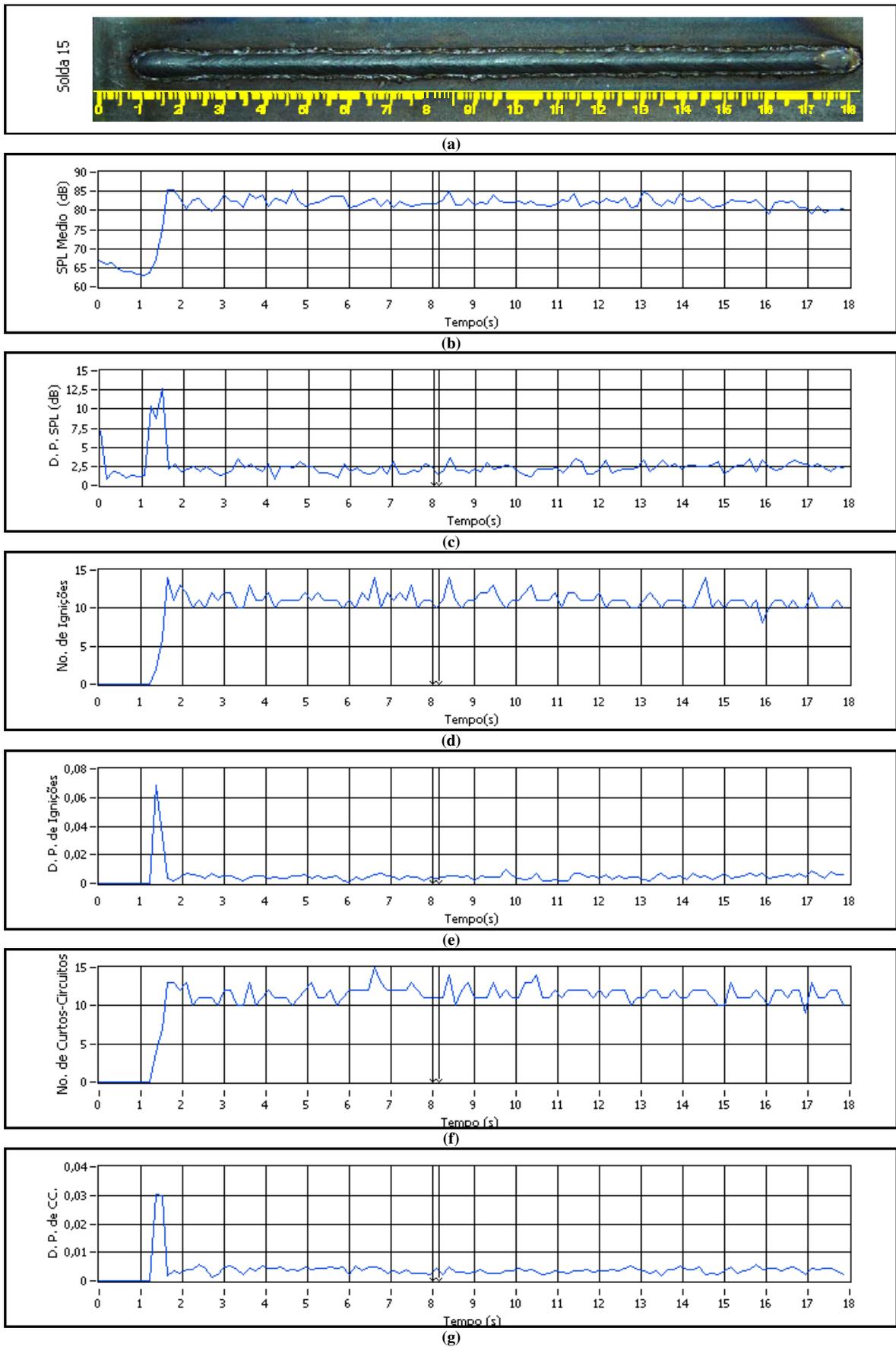


Figura 4.28: PEA e PEE para uma Solda sem Presença de Defeitos.

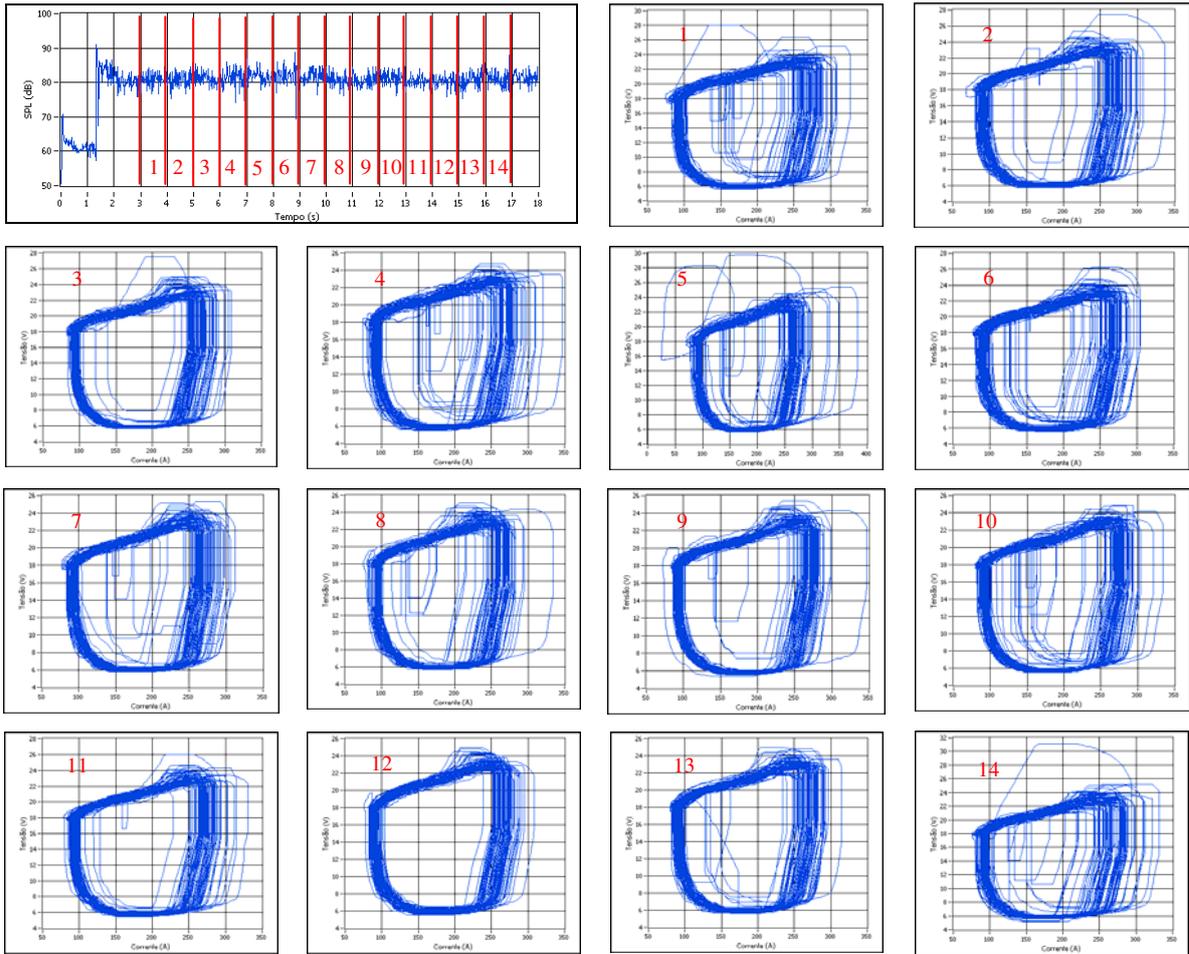


Figura 4.29: Ciclogramas em Condições de Estabilidade.

A figura 4.30 apresenta os resultados dos cálculos e medições estatísticas da frequência de ignições de arco medida a partir da pressão acústica e a frequência de curtos-circuitos medida a partir da tensão do arco do processo de soldagem para condições de maior estabilidade (ver tabela 4.3).

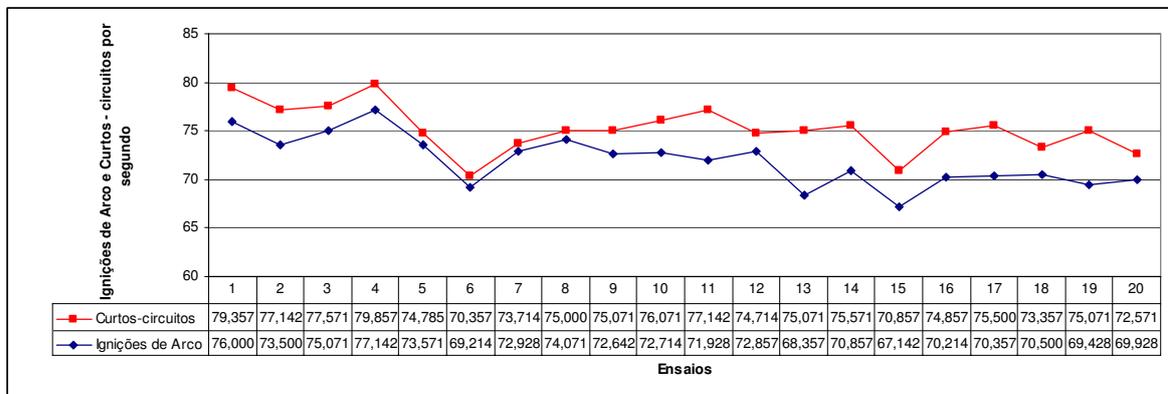


Figura 4.30: Curtos-circuitos e Ignições de Arco com a Maior Estabilidade.

Os resultados mostrados anteriormente foram obtidos apenas para janelas de 1 segundo de duração. No total foram 14 segundos analisados, que estão dentro da região de estabilidade (ver fig. 4.21). O resultado final para cada solda executada foi obtido a partir da média aritmética dos resultados obtidos em cada janela. A frequência de curtos-circuitos e a frequência de ignições de arco foram obtidas a partir dos sinais de tensão de arco e pressão acústica seguindo os modelos mostrados nas figuras 4.23 (c) e 4.25 (c), respectivamente. No gráfico da figura 4.30 pode-se notar que há uma relação biunívoca entre a frequência de curtos-circuitos e ignições de arco, confirmando a estreita relação entre a acústica e os sinais de tensão de arco e corrente de soldagem modulados em amplitude.

Tabela 4.7: Testes de Simulação de Solda com Maior estabilidade

Soldas Executada	SPL médio	Desvio padrão do SPL médio	Desvio padrão médio	Desvio padrão do DP médio	No. de ignições para janela de 15 ms	Desvio padrão do período de ignições	Desvio padrão médio do número de ignições	Desvio padrão do DP do número de ignições
1	81,92	0,9376	2,34	0,5297	11,60	1,1224	0,005629	0,001555
2	82,11	0,9079	2,34	0,5859	11,20	1,0199	0,005190	0,001402
3	82,31	0,9421	2,31	0,6197	11,48	1,1677	0,005526	0,001397
4	82,74	0,8927	2,43	0,6117	11,76	0,9942	0,004769	0,001131
5	82,61	0,9016	2,34	0,5148	11,20	0,9444	0,004940	0,001151
6	82,67	0,8616	2,30	0,6440	10,57	0,9739	0,005550	0,001076
7	82,20	0,8945	2,14	0,4833	11,15	0,9366	0,004350	0,001223
8	82,43	0,7606	2,05	0,4781	11,32	0,9059	0,003924	0,001076
9	81,58	0,7390	2,08	0,3591	11,08	1,0226	0,005017	0,002022
10	82,30	1,0149	2,23	0,5503	11,09	0,7655	0,004441	0,001234
11	81,35	0,8791	2,15	0,4853	10,98	1,2235	0,005882	0,001690
12	81,91	0,9843	2,30	0,4789	11,15	1,1791	0,005390	0,001484
13	81,21	0,9578	2,39	0,5002	10,39	1,0298	0,006291	0,001810
14	81,10	0,8951	2,14	0,5927	10,77	1,0348	0,005098	0,001832
15	80,99	0,8442	2,02	0,5587	10,21	0,8402	0,005061	0,001512
16	81,50	1,1143	2,26	0,4847	10,68	1,1096	0,005682	0,001555
17	81,43	0,9626	2,18	0,4759	10,65	1,0466	0,005874	0,001648
18	81,85	0,9387	2,30	0,5352	10,84	1,0084	0,005502	0,001797
19	80,93	0,8621	2,16	0,5552	10,56	1,2232	0,006021	0,001714
20	82,02	1,1002	2,31	0,5697	10,67	0,8793	0,005363	0,001214
<i>Média</i>	<i>81,86</i>	<i>0,9195</i>	<i>2,24</i>	<i>0,5306</i>	<i>10,97</i>	<i>1,0214</i>	<i>0,005275</i>	<i>0,001476</i>
<i>Máximo</i>	<i>82,74</i>	<i>1,1143</i>	<i>2,43</i>	<i>0,6440</i>	<i>11,76</i>	<i>1,2235</i>	<i>0,006291</i>	<i>0,002022</i>
<i>Mínimo</i>	<i>80,93</i>	<i>0,7390</i>	<i>2,02</i>	<i>0,3591</i>	<i>10,21</i>	<i>0,7655</i>	<i>0,003924</i>	<i>0,001076</i>
<i>Faixa</i>	<i>1,81</i>	<i>0,3753</i>	<i>0,41</i>	<i>0,2849</i>	<i>1,55</i>	<i>0,4580</i>	<i>0,002367</i>	<i>0,000946</i>

Na tabela 4.7 se apresenta o resumo os valores médios e o desvio padrão dos PEA para um conjunto de vinte solda executadas com o envelope ótimo de parâmetros de soldagem e sem presença de defeitos. Na mesma tabela se apresenta os valores médio, máximo, mínimo e a faixa de variação do PEA. Sendo que esses resultados apresentados foram

obtidos para uma janela de 150 ms. Em função dos valores médio, máximo, mínimo e faixa de cada PEA foram estabelecidas as constantes de PEA e serviram de referencia de comparação com os PEA obtidos nas soldas feitas para a validação e testes para detecção e localização de defeitos.

4.3.5 Instabilidades Originadas pelos defeitos Simulados

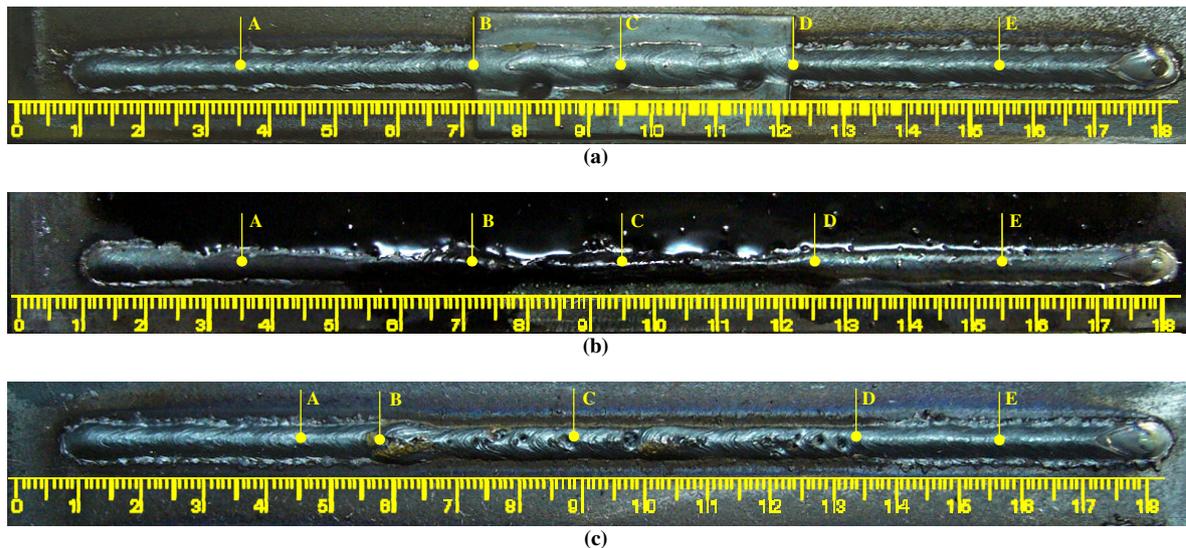


Figura 4.31: Regiões de Análise nas Simulações de Defeitos.

Na figura 4.31 se apresentam os aspectos finais das soldas simulando defeitos para gerar instabilidades no PEA e PEE. A figura 4.31(a) apresenta uma instabilidade gerada pela variação do *stand off*. A figura 4.31(b) apresenta uma instabilidade gerada pela presença de graxa na trajetória da solda. A figura 4.31(c) apresenta uma instabilidade gerada pela ausência de gás de proteção numa determinada região de soldagem. Nesses três tipos de defeitos se podem ser identificadas cinco regiões de instabilidade mostrados nos ciclogramas para cada tipo de defeito na figura 4.32.

a Região de Instabilidade A

Essa região, a qual é anterior a presença dos defeitos, se caracteriza pela estabilidade das suas características físicas e metalúrgicas, assim como os PEA's e PEE's do processo de soldagem se mantêm constantes e contínuos.

b Região de Instabilidade B

Essa região está caracterizada pela variação e/ou mudança da continuidade das características físicas e metalúrgicas da solda que se vêem refletidas nas mudanças dos

PEA's e PEE's. Algumas mudanças dos PEA's e PEE's são mais pronunciadas que do que outras dependendo do tipo de defeito. No defeito gerado pela variação do *stand off*, nota-se que a tensão de arco apresentou variações pouco perceptíveis e/ou notórias, mas a corrente de soldagem apresentou variações anormais. Esse fato aconteceu porque com a presença da chapa na trajetória da solda, o *stand off*. Essa transição de mudança de *stand off* se pronuncia mais na corrente do que na tensão do arco. No defeito gerado pela presença de graxa na trajetória de soldagem, nota-se que também se apresenta uma variação pouco notória na tensão do arco, mas uma maior variação na corrente de soldagem. O início do defeito gerado pela ausência de gás de proteção se manifesta com a variação complexa da tensão de arco e corrente de soldagem.

c Região de Instabilidade C

Localizada durante o defeito na solda, está caracterizada pela variação e inconstância das características físicas e metalúrgicas da solda devido à presença do defeito. Esse fato pode ser percebido no comportamento dos PEA's e PEE's. Cada um deles apresentou variações características dependendo do tipo de defeito. No defeito gerado pela variação do *stand off* nota-se que após ter se produzido a variação no comprimento do arco, a tensão do arco e a corrente de soldagem apresentaram a tendência a se estabilizar para um valor de corrente superior ao apresentado nas regiões A e E. Mas a chapa colocada na trajetória de soldagem, apresentava furos que não permitem a estabilização do processo. Fato que aconteceria se depois de mudar o *stand off* esse permanece constante para um novo valor.

No defeito gerado pela presença de graxa na trajetória de soldagem, nota-se um súbito aumento e uma variação e interrupção da tensão do arco e corrente de soldagem produzindo-se até inclusive na abertura do arco elétrico em determinados instantes durante a presença do defeito. Essas variações foram produzidas porque a graxa não permitiu a formação da poça de fusão, assim como o estabelecimento do arco elétrico. As altas temperaturas do arco elevam a temperatura da graxa até o ponto de evaporação liberando gases que com a mistura com o gás de proteção deteriora a qualidade da solda.

No defeito gerado pela ausência de gás de proteção, nota-se que a tensão apresentou um valor médio maior, mas com uma variação mínima. A corrente apresentou uma variação maior.

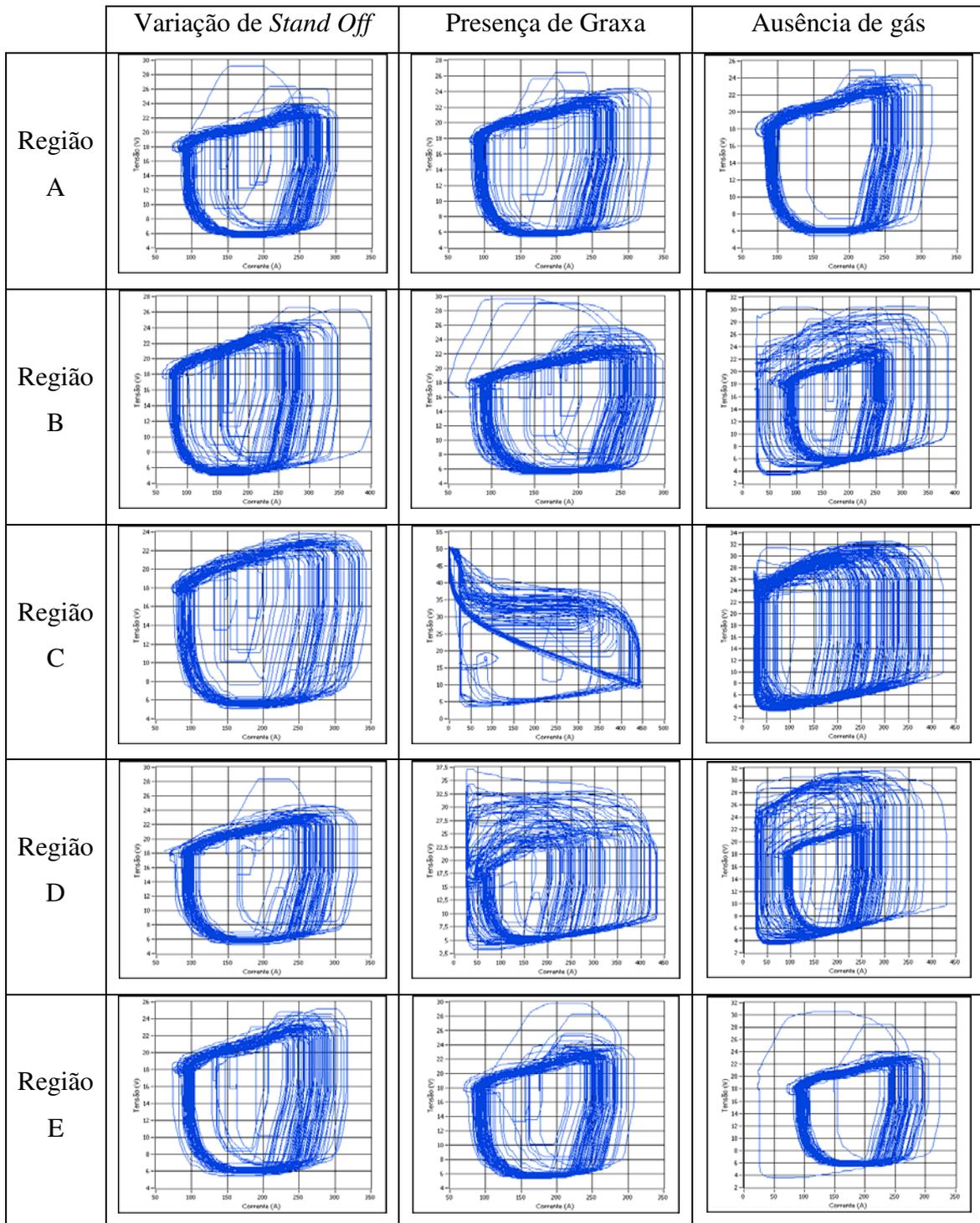


Figura 4.32: Sinais do Processo em Condições de Instabilidade.

d Região de Instabilidade D

É a zona da solda onde o defeito terminou e se iniciou novamente a estabilização do processo. Caracterizado pela tendência à estabilização dos PEA's e PEE's. No defeito produzido pela variação do *stand off* nota-se que no final do defeito se apresentou com variações atípicas na corrente e variações mínimas na tensão do arco.

No ciclograma do defeito gerado pela presença de graxa, nota-se que, tanto a tensão de arco como a corrente de soldagem apresentaram uma variação da tensão e corrente, mas sem a abertura do arco elétrico. No defeito produzido pela ausência de gás nota-se que a tensão apresentou uma oscilação entre o novo valor de tensão estabelecido durante o defeito (aproximadamente 26,0 V) e o valor de tensão em condições de estabilidade (aproximadamente 20,0 V). Também nota-se que a variação da corrente de soldagem apresentou uma redução com tendência a se estabilizar.

e Região de Instabilidade E

Localizada após da finalização da presença do defeito e ter se estabilizado novamente os PEA's e PEE's. Nota-se que o comportamento dos ciclogramas foram novamente típicos para um processo de soldagem estável. As figuras 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam o aspecto da solda com a presença do defeito e o comportamento dos sinais dos PEA' e PEE's para os defeitos por variação do *stand off*, presença de graxa na trajetória da solda e a ausência de gás de proteção numa determinada região da solda, respectivamente. A figura 4.33 (a) apresenta o aspecto final da solda para simulação de defeitos por variação do *stand off*. Na figura 4.33 (b) se apresenta o PEA de SPL médio. Nesse gráfico pode-se notar que se produziu uma redução do SPL médio durante o defeito. Isso se deveu ao fato que durante o defeito o *stand off* diminuiu e a tensão de arco se reduziu e modulado com a corrente de soldagem gerou pressão de som com menor amplitude. Na figura 4.33 (c) se apresenta o PEA do desvio padrão do SPL médio. Nesse gráfico se nota que se produziram variações abruptas somente durante o início, final e o passo pelos furos da chapa. Quando o *stand off* variou para um novo valor, esse PEA se manteve invariável. A figura 4.33 (d) mostra o PEA da frequência de ignições para cada 150 ms. Nota-se que a frequência variou levemente durante o defeito (esse PEA é calculado a partir da pressão acústica do som gerado pelo arco elétrico). Na figura 4.33 (e) se apresenta o PEA do desvio padrão dos períodos de ignições nos quais se pode notar que se produzem mudanças abruptas pronunciadas durante as variações de *stand off*. A figura 4.33 (f) apresenta o PEE da frequência de curto-circuitos por cada 150 ms. Nesse gráfico percebe-se um comportamento equivalente ao PEA da frequência de ignições -fig 4.33 (d)- se produziram variações leves durante o defeito. A figura 4.33 (g) apresenta o PEE do desvio padrão da frequência de curto-circuitos; nesse gráfico pode-se notar que se produziu uma variação pouco pronunciada.

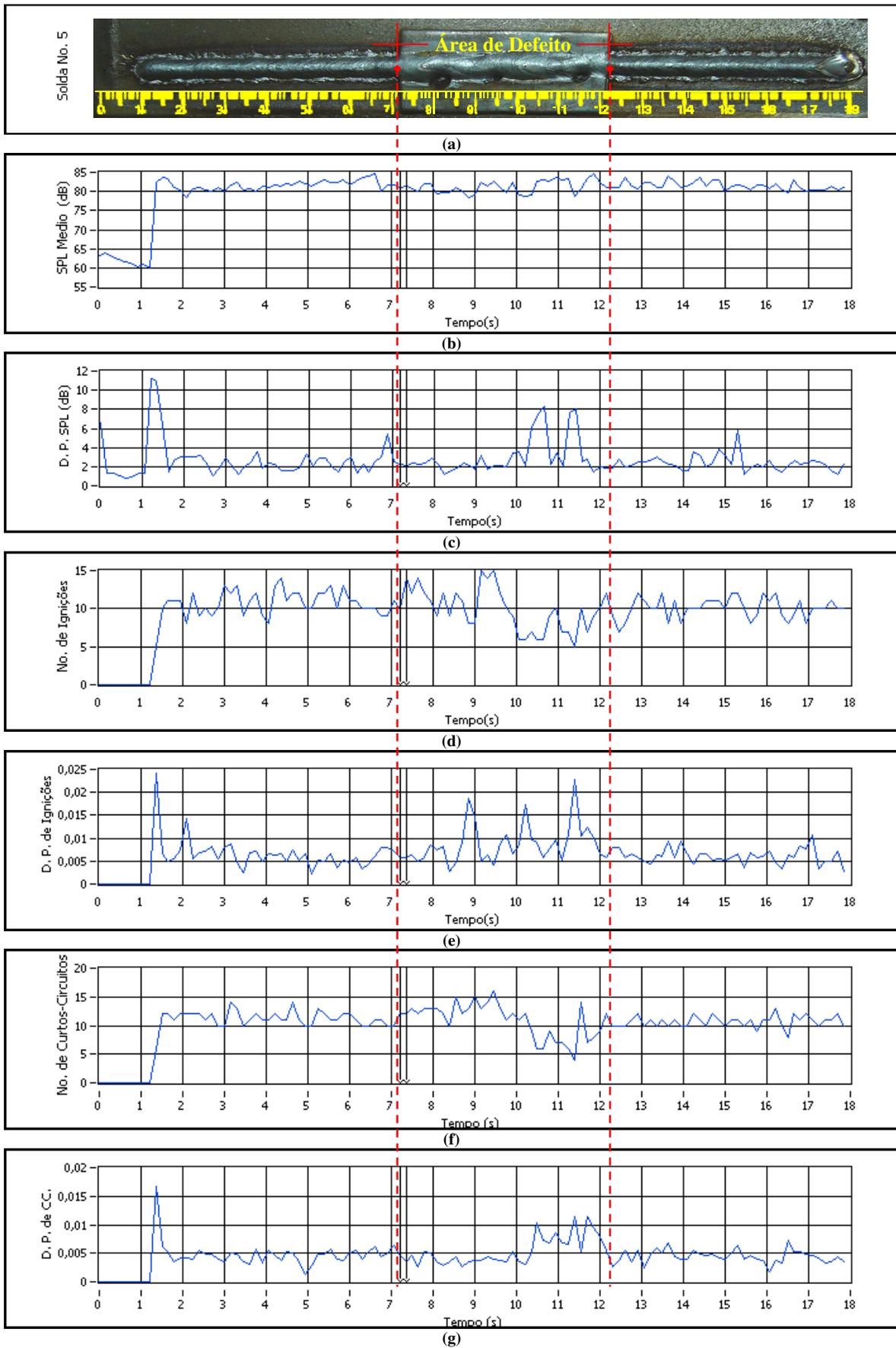


Figura 4.33: PEA e PEE Simulação de Defeito pela Variação do *Stand Off*

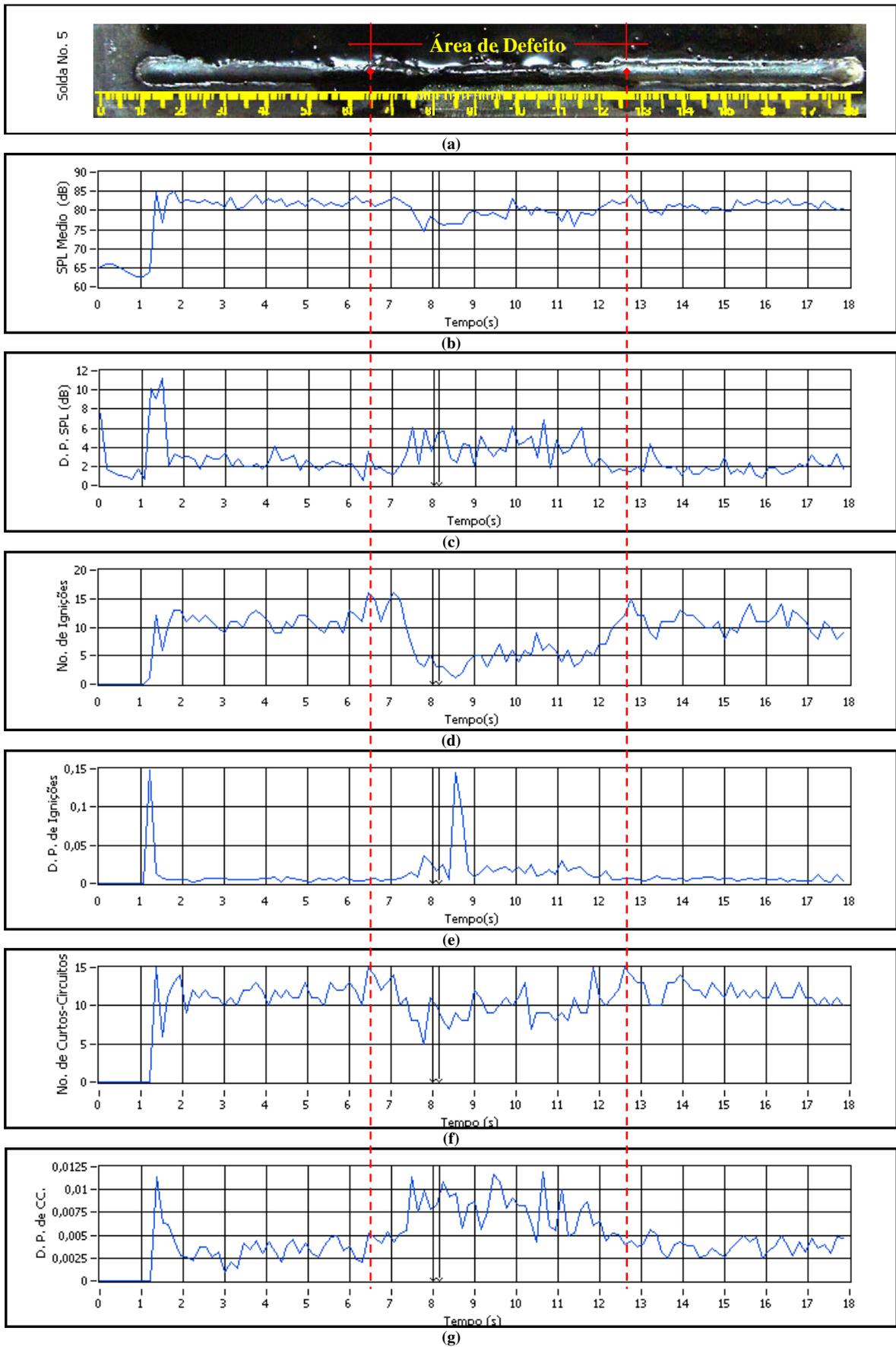


Figura 4.34: PEA e PEE na Simulação de Defeito pela Presença de Graxa.

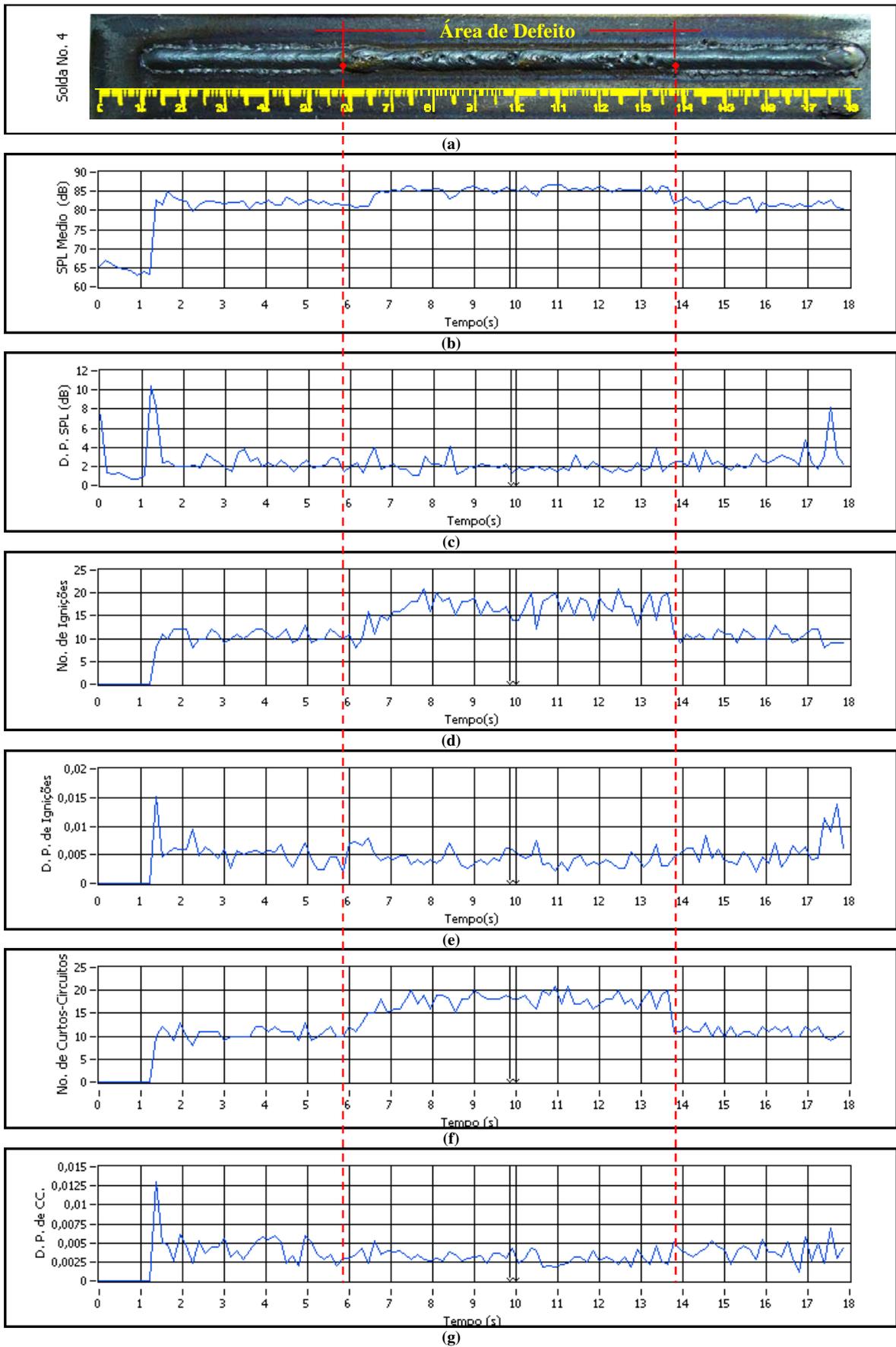


Figura 4.35: PEA e PEE na Simulação de Defeito pela Ausência do Gás

A figura 4.34 (a) apresenta o aspecto final da solda para a simulação de defeitos por presença de graxa na trajetória da solda. Na figura 4.34 (b) se apresenta o PEA de SPL médio. Nesse gráfico nota-se que se produz uma redução do SPL médio durante o defeito. Isso se deve ao de que durante o defeito o arco elétrico sofreu aberturas, e isso aumentou a tensão do arco ao mesmo tempo em que a corrente sofre quedas. Portanto a pressão acústica diminuiu em amplitude. Como consequência disso o SPL diminuiu. Na figura 4.34 (c) se apresenta o PEA do desvio padrão do SPL médio. Nesse gráfico se nota que se produziram variações durante todo o defeito. A figura 4.34 (d) mostra o PEA da frequência de ignições onde se nota que a frequência diminuiu durante o defeito pelas mesmas razões que diminuiu o PEA do SPL médio. Na figura 4.34 (e) se apresenta o PEA do desvio padrão dos períodos de ignições. Nesse gráfico se pode que se produziram poucas mudanças abruptas pronunciadas durante o defeito. A figura 4.34 (f) apresenta o PEE da frequência de curtos-circuitos. Note-se que parecido ao PEA da frequência de ignições -fig 4.34 (d)-, se produziram variações leves durante o defeito mas, esses são menos pronunciados. A figura 4.34 (g) apresenta o PEE do desvio padrão da frequência de curto-circuitos. Nesse gráfico pode-se notar que se produziu uma variação bastante pronunciada.

A figura 4.35 (a) apresenta o aspecto final da solda para simulação de defeitos por ausência de gás de proteção. Na figura 4.35 (b) se apresenta o PEA de SPL médio. Nesse gráfico pode-se notar que se produziu um aumento do SPL médio durante o defeito. Na figura 4.35 (c) se apresenta o PEA do desvio padrão do SPL médio. Nesse gráfico se nota que se produziram variações ínfimas durante o defeito. A figura 4.35 (d) mostra o PEA da frequência de ignições onde se nota que a frequência se aumentou notoriamente e ainda se manteve relativamente constante para outro valor de frequência durante o defeito. Na figura 4.35 (e) se apresenta o PEA do desvio padrão dos períodos de ignições. Nessa figura pode-se notar que se produziram mudanças ínfimas durante o defeito, pois se produziu um aumento na frequência de ignições, mas esse aumento se manteve constante. A figura 4.35 (f) apresenta o PEE da frequência de curtos-circuitos para cada 150 ms. Nesse gráfico nota-se que parecido ao PEA da frequência de ignições -fig 4.35 (d)- se produziu um aumento dos curtos-circuitos durante o defeito. A figura 4.35 (g) apresenta o PEE do desvio padrão da frequência de curto-circuitos. Nesse gráfico pode-se notar que se produziu uma variação pouco pronunciada.

Depois de ter identificado o comportamento dos PEA's e PEE's, se estabeleceram os valores limites constantes utilizados no algoritmo de detecção de defeitos que se apresentará na próxima secção (ver tabela 4.8). Esses valores foram obtidos para janelas de análise de 150 ms e em função do valores médios, máximos e faixa de variação mostrados na tabela 4.8, assim como das magnitudes das variações dos PEA's e PEE's para as soldas feitas com a presença de defeitos.

Tabela 4.8: Valores estabelecidos para a detecção de Defeitos

SPL médio	Desvio padrão do SPL médio	Desvio padrão médio	Desvio padrão do DP médio	No. de ignições para janela de 150 ms	Desvio padrão do período de ignições	Desvio padrão médio do número de ignições	Desvio padrão do DP do número de ignições
82,765	0,9995	2,445	0,5506	11,745	1,2235	0,005275	0,001476

4.3.6 Detecção e Localização de Defeitos.

Como a pressão acústica gerada pelo arco elétrico num processo de soldagem é o resultado da modulação da tensão de arco pela corrente de soldagem (Drouet e Nadeau, 1982) e esses sinais elétricos do processo são de natureza estocástica (Absi *et al*, 2006), então o som produzido pelo arco elétrico também é de natureza estocástica. Para que um sinal possa ser considerado de natureza estocástica, esse deve ser estacionário e ergódico. O fato de ser estacionário significa que o sinal obedece a uma distribuição estatística de dados (nesse caso uma distribuição normal).

Na figura 4.36 se mostram os histogramas dentro da região de estabilidade (ver fig. 4.21) dos sinais que foram usados para a detecção de soldagem. A figura 4.36 (a) representa a distribuição normal para o SPL médio. A figura 4.36 (b) representa a distribuição normal do desvio padrão do desvio padrão médio do SPL médio. A figura 4.36 (c) representa a distribuição normal para o número de ignições para uma janela de 150 ms. A figura 4.36 (d) representa a distribuição normal para o desvio padrão do desvio padrão médio do número de ignições para uma janela de 150 ms.

Essas distribuições mostradas são para uma solda feita com o envelope ótimo de parâmetros de soldagem. Como pode-se notar esses dados obedeceram a uma distribuição normal, o que confirma a estacionariedade dos sinais medidos e calculados a partir da pressão acústica do arco elétrico. Também pode-se notar que esses sinais apresentaram uma média similar aos apresentados na tabela 4.8.

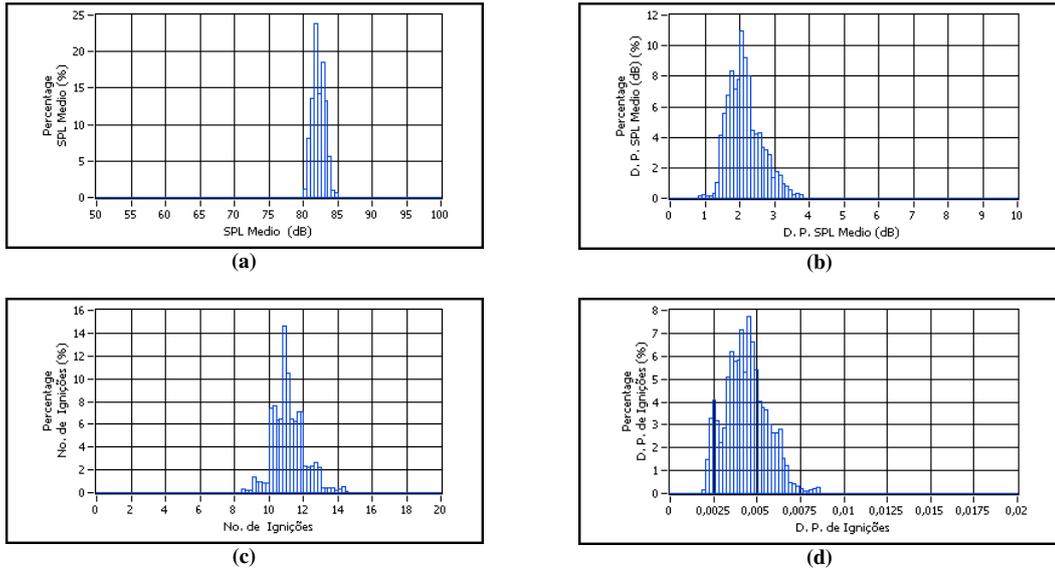


Figura 4.36: Distribuições Normais dos sinais resultantes.

Para a detecção de e localização defeitos foi desenvolvido um algoritmo estatístico baseado na normalização dos sinais dos PEA's. Na equação (13) se apresenta a relação de normalização de dados que foi definido como a distância natural de um valor aleatório x em relação à média estabelecida \bar{x} dividida pelo desvio padrão estabelecido S . O sinal calculado normalizado apresenta uma média nula e um desvio padrão unitário. A equação 14 determina a intensidade do nível normalizado do parâmetro de defeitos expressado em porcentagem. A equação 15 representa os defeitos detectados por cada PEA. Nessa equação o defeito detectado Dd_i recebe o valor de "1" (defeito detectado) quando o nível normalizado de defeitos nnd_i é maior ou igual ao limite de defeitos normalizado LDn . Caso contrário, recebe o valor de "0" (sem defeitos). A equação 16 estabelece os defeitos finais detectados Dfd_j . Essa relação resulta da combinação dos defeitos detectados Dd_j em cada PEA usando a função lógica "or" para cada conjunto de dados j de cada PEA k . A equação 17 representa a intensidade do nível normalizado do defeito. Essa relação resulta da combinação das intensidades normalizadas de cada parâmetro k usando a função "max" aplicado para cada conjunto de dados j de cada PEA k .

$$nnd_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S} \quad (13)$$

$$Inp_i = nnd_i * 10 \quad (14)$$

$$Dd_i = \begin{cases} 1, & \text{se } nnd_i \geq LDn \\ 0, & \text{se } nnd_i < LDn \end{cases} \quad (15)$$

$$Dfd_j = or[Dd_j^{k=spl}, Dd_j^{k=DPspl}, Dd_j^{k=NoIG}, Dd_j^{k=DPNoIG}] \quad (16)$$

$$Ind_j = \max[Inp_j^{k=spl}, Inp_j^{k=DPspl}, Inp_j^{k=NoIG}, Inp_j^{k=DPNoIG}] \quad (17)$$

Onde: nnd_i : nível normalizado de defeitos para o sinal avaliado i

x_i : i -ésimo PEA avaliado

\bar{x} : Média Aritmética da estabelecida para a análise

S : Desvio Padrão estabelecido para a análise

Inp_i : Intensidade normalizada do PEA i (%)

Dd_i : Defeito detectado no sinal de avaliado de PEA i

LDn : Limite de defeitos normalizado

Dfd_j : j -ésimo dado de defeitos detectados

Ind_j : j -ésimo dado de Intensidade normalizada de defeitos (%)

O limite de defeito normalizado LDn divide a curva gaussiana que representa a distribuição normal em duas regiões em termos de porcentagem de área embaixo da curva (ver Fig. 4.37). Como numa distribuição normal a média está localizada no $z = 0$, isso significa que o nosso valor de médio normalizado esperado fica nas proximidades de $z = 0$ até um determinado limite.

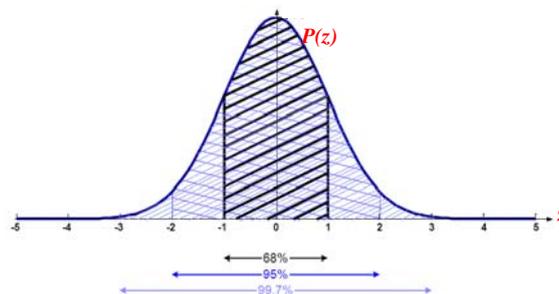


Figura 4.37: Curva Gaussiana da Distribuição Normal Padrão

Na figura 4.38 (a.1) se apresenta o aspecto de uma solda em condições de estabilidade. A figura 4.38 (b.1) representa a escala da intensidade do nível normalizado de defeitos expressado em porcentagem que será usada junto com as curvas de nível normalizado de

defeitos. As figuras 4.38 (a.2), (a.3), (a.4) e (a.5) apresentam os níveis normalizados de defeitos para os sinais de PEA's.

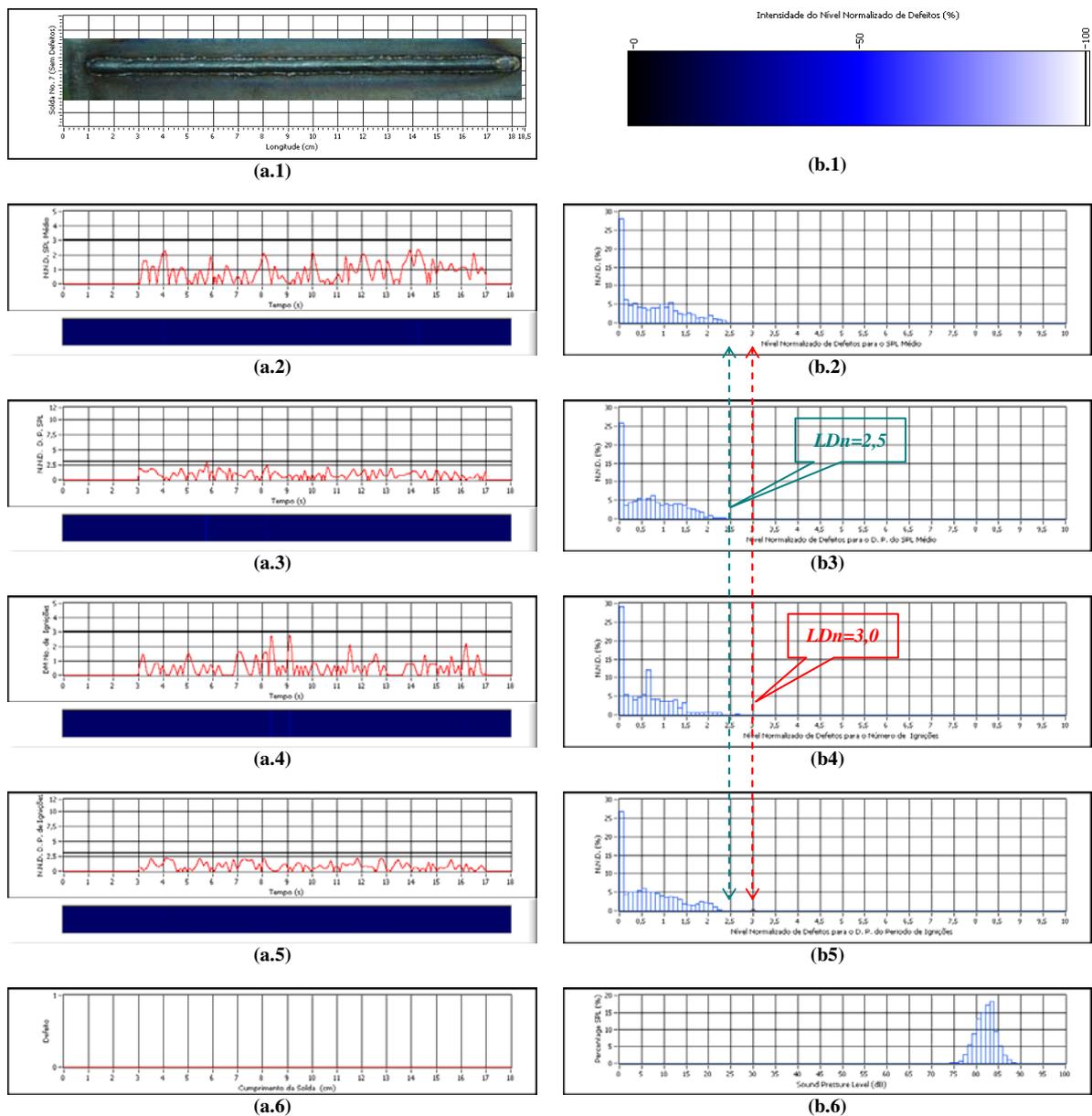


Figura 4.38: Sinais Normalizados em Condições de Maior Estabilidade.

As figuras 4.38 (b.2), (b.3), (b.4) e (b.5) apresentam as distribuições normalizadas para os sinais de SPL médio, desvio padrão do SPL médio, número de ignições e desvio padrão do período de ignições respectivamente. Nessas distribuições normalizadas nota-se que o nível normalizado de defeitos nnd_i para cada sinal, abrange perto de $LDn = 2,5$. De acordo com a tabela de distribuição normal padrão Z, esse limite de defeitos normalizado representa o 99,3790 % da área abaixo a curva gaussiana. Isso quer dizer que as variações dos sinais medidos dentro dessa região são características de uma maior estabilidade. Uma

vez que os sinais envolvidos no processo GMAW, são estocásticos e não lineares, o estabelecimento dos limites de qualidade são trabalhosos e nem sempre resultam confiáveis (Wu *et al*, 2007). Neste trabalho foi usado um limite igual a três vezes o desvio padrão e se obtiveram resultados satisfatórios. Seguindo a experiência do trabalho de Wu *et al* (2007) e com o objetivo de diminuir as detecções erradas de defeitos foi estabelecido o limite de defeitos normalizado em três ($LDn = 3,0$) para todos os PEA. Isso significa que os sinais medidos podem variar dentro de 99,8650 % da região abaixo da curva gaussiana (veja-se o Apêndice B).

A figura 4.38 (a.6) representa aproximadamente à distância a partir do início onde se localiza o defeito. Esse valor é determinado pelo produto entre da velocidade de soldagem e o instante determinado em que se detecta o defeito. Essa relação que determina a localização é apenas válida quando a velocidade de soldagem é constante. Para ter uma maior precisão é necessário conhecer a trajetória que se seguiu para fazer a solda. Mas para este trabalho se estabeleceu dentro do envelope de parâmetros ótimos de soldagem que a velocidade de soldagem seja constante e de trajetória retilínea. Com o produto entre o instante de detecção do defeito pela velocidade de soldagem se consegue aproximar a localização do defeito na solda (veja-se o Apêndice C).

A figura 4.39 apresenta o comportamento dos sinais de PEA, e distribuições normalizadas respectivas para o defeito gerado pela variação do *stand off*. Na figura 4.39 (a.1) se mostra a solda defeituosa final detalhando a posição do defeito. Na figura 4.39 (b.1) se apresenta o histograma do SPL total para a região de estabilidade. Nesse gráfico pode-se notar na região S1 a presença de componentes anormais de SPL -anormais em comparação com o histograma do SPL estável apresentado na figura 4.38 (b.6)- que representaram a presença de um defeito. A figura 4.39 (a.2) apresenta o nível normalizado de defeitos para o sinal de PEA de SPL e nota-se que em determinados instantes durante a presença do defeito superou-se o limite de defeitos normalizado (LDn). Mas essas variações foram pouco pronunciadas como se pode notar no nível de intensidade. Esses níveis que superaram o LDn estão localizados na região S2 da distribuição normalizada respectiva -figura 4.39 (b.2)-. A figura 4.39 (a.3) apresenta o nível normalizado de defeitos do sinal de PEA do desvio padrão do SPL médio. Nesse gráfico nota-se que se produziram abruptas mudanças no início e no final do defeito assim como ao passar pelos furos da chapa que simula o defeito por variação de *stand off*. Essas mudanças são as suficientemente grandes para superar o LDn , mas como aconteceram somente quando variou-se o *stand off* e não quando

o *stand off* tem um novo valor, a sua presença na distribuição normal que espera que esteja na região S3, é ínfima (ver fig. 4.39 (b.3)). Na figura 4.39 (a.4) se apresenta o nível normalizado de defeitos para o PEA de frequência de ignições. Esse parâmetro varia levemente. Isso também pode ser notado no nível de intensidade mostrado onde as variações são pouco pronunciadas e somente durante o defeito. Mesmo sendo pouco pronunciada a variação desse parâmetro a sua presença no histograma de distribuição normal é possível identificá-lo na região S4.

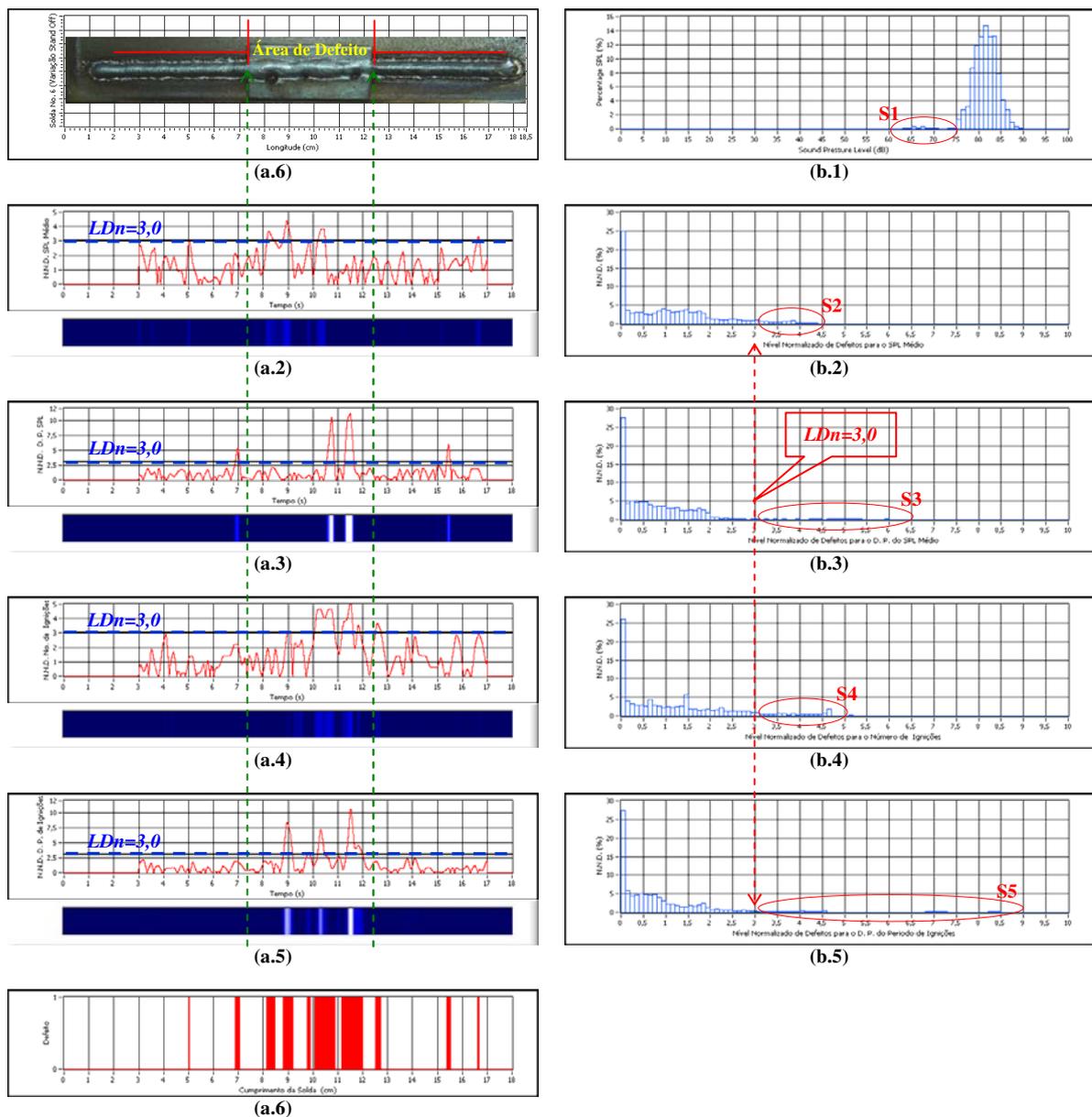


Figura 4.39: Sinais Normalizados Para Defeitos Gerados pela Variação de *Stand Off*.

A figura 4.39 (a.5) mostra o nível normalizado de defeitos para o PEA de desvio padrão do período de ignições. Nesse gráfico se podem notar claramente as variações que se

produzem ao passo da solda quando o *stand off* varia abruptamente. Esse fato pode ser observado no nível de intensidade, e cada variação abrupta representa a presença dos furos na chapa. Essas variações abruptas são pouco pronunciadas no histograma da distribuição normalizada como pode-se notar na região S5 da figura 4.39 (b.5). Na figura 4.39 (a.6) note-se a localização do defeito resultado da conjunção dos quatro níveis de intensidade.

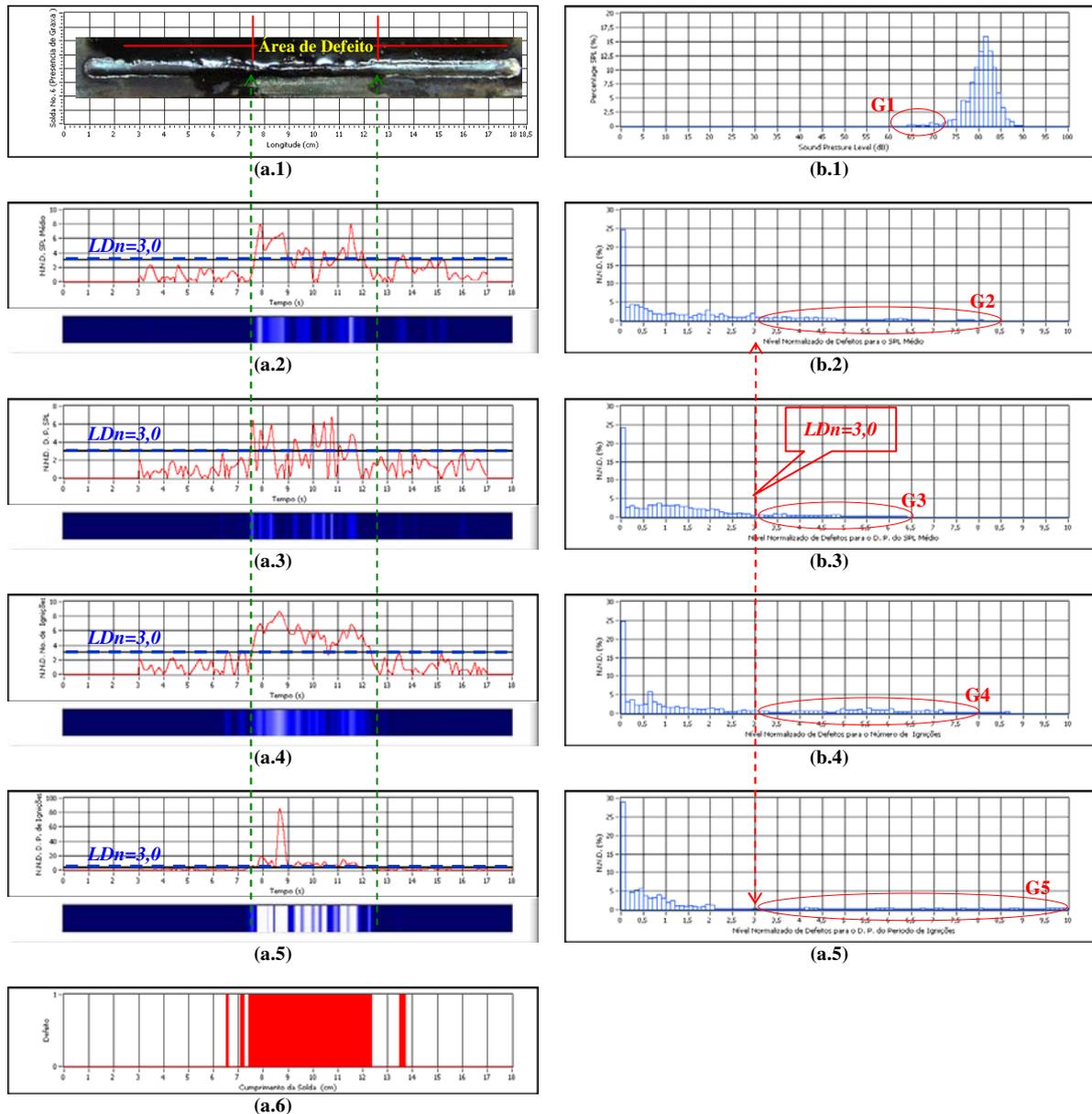


Figura 4.40: Sinais Normalizados Para Defeitos Gerados pela Presença de Graxa.

Na figura 4.40 se apresenta o comportamento dos sinais de PEA e distribuições normalizadas respectivas para o defeito gerado pela presença de graxa na trajetória da solda. Na figura 4.40 (a.1) se mostra a solda defeituosa final detalhando a posição do defeito. Na figura 4.40 (b.1) se apresenta o histograma do SPL total para a região de

estabilidade. Nesse gráfico pode-se notar na região G1 a presença de componentes anormais de SPL -anormais em comparação com o histograma do SPL estável apresentado na figura 4.38 (b.6)- que representam a presença do defeito. A figura 4.40 (a.2) se apresenta o nível normalizado de defeitos para o sinal de PEA de SPL e nota-se que a maior parte do defeito supera o limite de defeitos normalizado (LDn). Além disso, essas variações são medianamente pronunciadas como se pode notar no nível de intensidade.

Esses níveis que superaram o LDn estão localizados na região G2 da distribuição normalizada respectiva (figura 4.40 (b.2)). A figura 4.40 (a.3) se apresenta o nível normalizado de defeitos do sinal de PEA do desvio padrão do SPL médio. Nesse gráfico nota-se que se produzem abruptas mudanças durante a maior parte do defeito e que se podem apreciar notoriamente no nível de intensidade. Essas mudanças são as suficientemente pronunciadas e para superar o LDn . Como o PEA do SPL durante o defeito não têm tendência a ficarem estáveis em algum valor, esse fato se vê refletido em constantes e abruptas variações do PEA do desvio padrão do SPL médio. Fato que é observado no nível de intensidade adjunto. A presença desse nível normalizado na distribuição normal esperado que esteja na região G3 é ínfima, mas mesmo assim é possível de distinguir - ver fig. 4.40 (b.3).

Na figura 4.40 (a.4) se apresenta o nível normalizado de defeitos para o PEA de frequência de ignições. Esse parâmetro aumenta consideravelmente superando amplamente o LDn . Isso também pode ser notado no nível de intensidade mostrado. Esse aumento no nível normalizado de defeitos para esse PEA tem a sua origem na redução na frequência de ignições e curtos-circuitos devido a que a presença de graxa faz reduzir a corrente de soldagem, e até em instantes origina a abertura do arco elétrico o que faz que o tempo para acontecerem às ignições e curtos-circuitos se reduza e como resultado se obtenha uma dramática diminuição na frequência de ignições -ver figura 4.34 (d) e (f)-. O aumento e variação pronunciada desse parâmetro se vê refletido na região G4 da distribuição normal. A figura 4.40 (a.5) mostra o nível normalizado de defeitos para o PEA de desvio padrão do período de ignições. Nesse gráfico se podem notar claramente as variações que se produzem quando a solda passa pela região defeituosa. Esse fato se aprecia pronunciadamente no nível de intensidade durante todo o defeito, já que o aumento do nível normalizado de defeito não mantém constância nenhuma. O nível normalizado varia caoticamente durante este tipo de defeito. Essas variações abruptas são pouco pronunciadas no histograma da distribuição normalizada, mas se estendem praticamente durante toda a

distribuição, como pode-se notar na região G5 da figura 4.40 (b.5). Na figura 4.40 (a.6) nota-se a localização do defeito resultado da junção dos quatro níveis de intensidade. A figura 4.41 apresenta o comportamento dos sinais de PEA, e distribuições normalizadas respectivas para o defeito gerado pela ausência de gás de proteção.

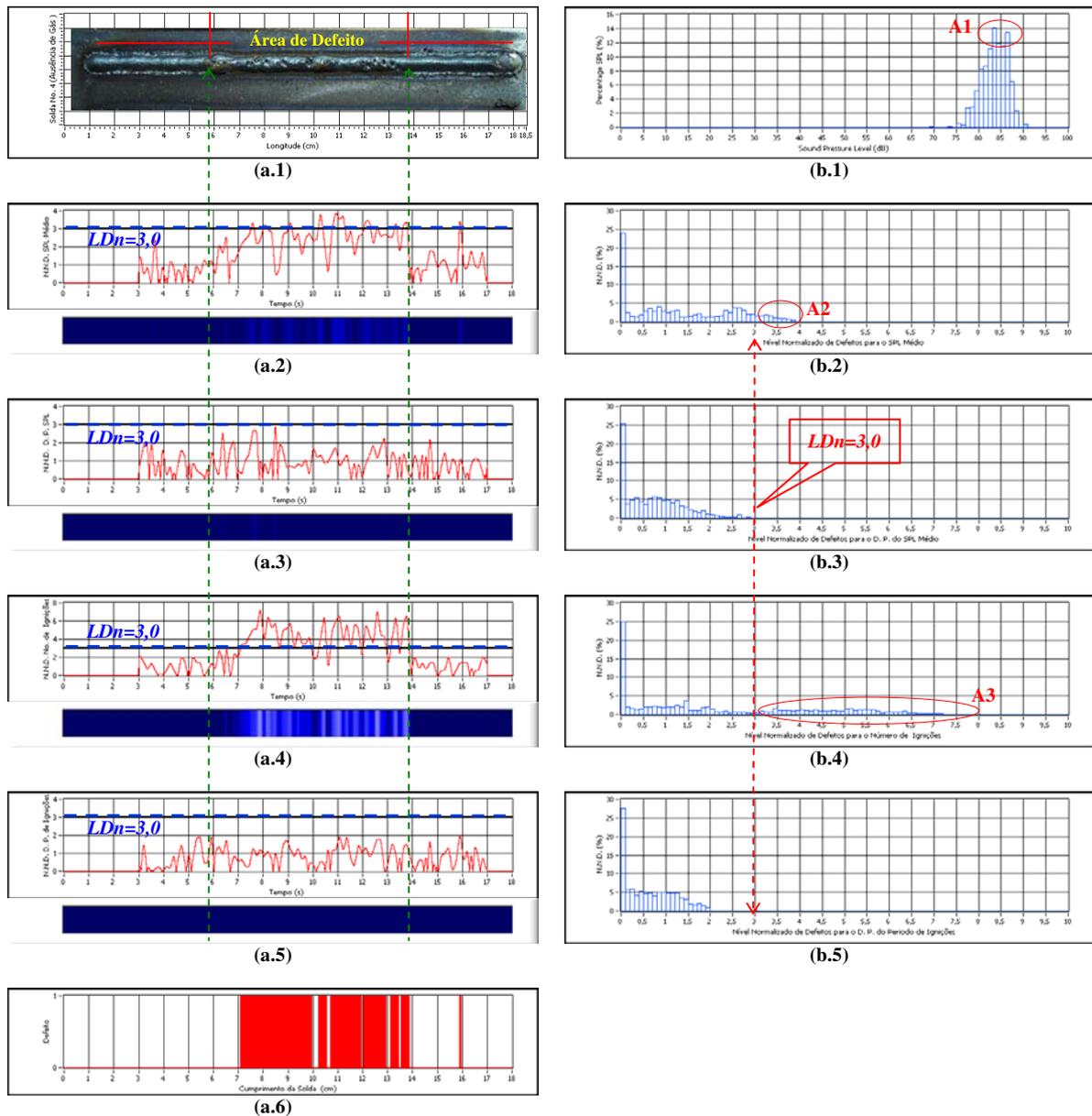


Figura 4.41: Sinais Normalizados Para Defeitos Gerados pela Ausência de Gás de Proteção.

Na figura 4.41 (a.1) se mostra a solda defeituosa final detalhando a localização do defeito. Na figura 4.41 (b.1) se apresenta o histograma do SPL total para a região de estabilidade. Nesse gráfico podemos notar na região A1 a presença de componentes anormais de SPL (anormais em comparação com o histograma do SPL estável apresentado na figura 4.41

(b.6)) tornando a distribuição mono-modal em uma distribuição bi-modal. Esse fato representa a presença de um defeito.

A distribuição bi-modal do SPL se pode explicar observando o comportamento que apresenta o ciclograma da respectiva solda (ver figura 4.32) onde durante o defeito se apresenta um aumento na tensão com uma relativa estabilidade, e que quando o defeito era superado, a tensão de arco voltava para o valor característico. A figura 4.41 (a.2) mostra o nível normalizado de defeitos para o sinal de PEA de SPL e nota-se que em determinados instantes, durante a presença do defeito, supera levemente o limite de defeitos normalizado (LDn). Mas essas variações são pouco pronunciadas como se pode notar no nível de intensidade. Esses níveis que superaram o LDn estão localizados na região G2 da distribuição normalizada respectiva -figura 4.41 (b.2)-. A figura 4.41 (a.3) se apresenta o nível normalizado de defeitos do sinal de PEA do desvio padrão do SPL médio. Nesse gráfico nota-se que se produzem mudanças pouco pronunciadas durante a presença do defeito. Essas ínfimas mudanças se podem apreciar levemente no nível de intensidade e não são as suficientemente pronunciadas, para superar o LDn . Portanto não é possível observá-lo na distribuição normal de esse PEA -ver fig. 4.41 (b.3)-. Na figura 4.41 (a.4) se apresenta o nível normalizado de defeitos para o PEA de frequência de ignições. Esse parâmetro varia claramente. Esse fato também pode ser notado no nível de intensidade mostrado onde as variações são bastante pronunciadas durante o defeito. A presença desse defeito na distribuição normal está localizada na região A3. O nível normalizado desse PEA varia notoriamente devido ao aumento do número de ignições durante a ausência de gás de proteção -ver figura 4.35 (f)-. A figura 4.41 (a.5) mostra o nível normalizado de defeitos para o PEA de desvio padrão do período de ignições. Nesse gráfico se pode notar que as variações que se produzem ao passo da solda durante o defeito não superam o LDn . Esse fato de variação ínfima se aprecia no nível de intensidade. Na da distribuição normalizada desse PEA não é possível apreciar a presença de componentes que superem o LDn -ver figura 4.41 (b.5)-. Na figura 4.41 (a.6) nota-se a localização do defeito resultado da conjunção dos quatro níveis de intensidade.

4.4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Com o objetivo de corroborar e testar os algoritmos de detecção e localização de defeitos na solda a partir do sensoriamento acústico do processo GMAW-S, realizaram-se vinte soldas divididos na seguinte maneira: cinco soldas de solda sem defeitos, cinco soldas de solda com variação de *stand off*, cinco soldas de solda com presença de graxa na trajetória da solda e cinco soldas de solda com ausência de gás. Essas soldas foram feitas com a fonte de energia ajustada para o envelope ótimo de parâmetros de soldagem (ver tabela 4.3).

Na tabela 4.9 se apresentam os resultados da avaliação das soldas analisadas na validação. Nessa tabela nota-se que todas as soldas com a presença de defeitos foram detectadas assim como também as soldas sem presença de defeitos foram realmente avaliadas como tal. A figura 4.42 apresenta o aspecto da solda ensaiada sem a presença de defeitos junto com a intensidade do nível de defeito respectivo.

A figura 4.43 apresenta o aspecto da solda ensaiada simulando defeitos por variação do *stand off*, junto a ela se apresenta a localização do defeito na solda assim como também a intensidade do nível de defeito respectivo. A figura 4.44 apresenta o aspecto da solda ensaiada simulando defeitos por presença de graxa na trajetória da solda, junto a ela se apresenta a localização do defeito na solda assim como também a intensidade do nível de defeito respectivo. A figura 4.45 apresenta o aspecto da solda ensaiada simulando defeitos por ausência de gás de proteção, junto a ela se apresenta a localização do defeito na solda assim como a intensidade do nível de defeito respectivo.

Tabela 4.9: Testes de validação.

<i>Solda</i>	<i>Tipo de Defeito</i>	<i>Defeito Detectado?</i>	<i>Solda</i>	<i>Tipo de Defeito</i>	<i>Defeito Detectado?</i>
1	Sem defeitos	×	21	Defeitos por Presença de Graxa na Trajetória	✓
2		×	22		✓
3		×	23		✓
4		×	24		✓
5		×	25		✓
6	Defeitos por Variação de <i>Stand Off</i>	✓	26	Defeitos por Ausência de Gás de Proteção	✓
7		✓	27		✓
8		✓	28		✓
9		✓	29		✓
10		✓	30		✓



(a) Teste 1



(b) Teste 2



(c) Teste 3

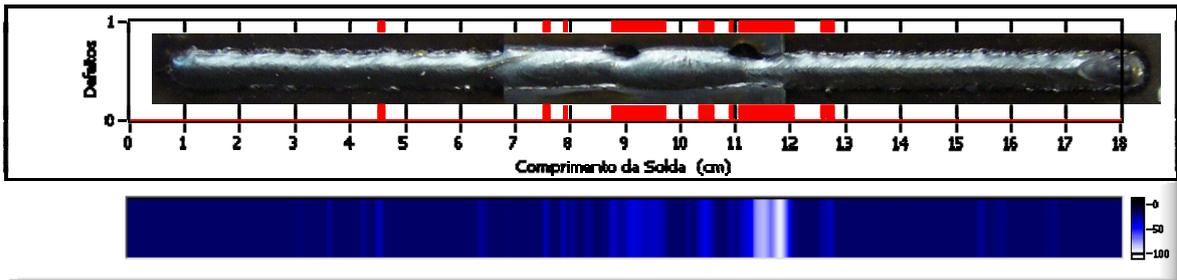


(d) Teste 4

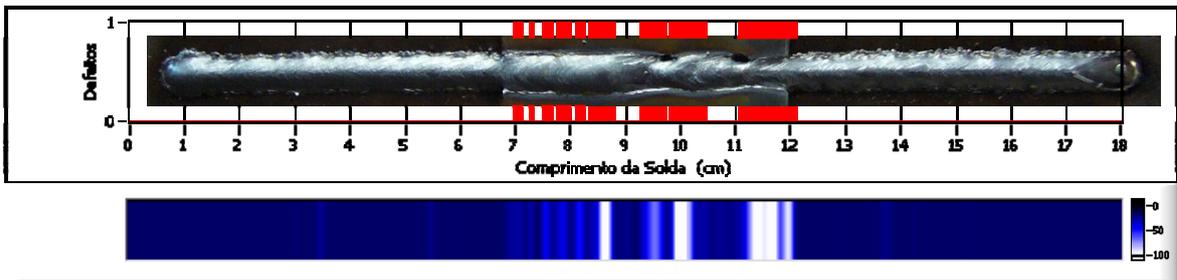


(e) Teste 5

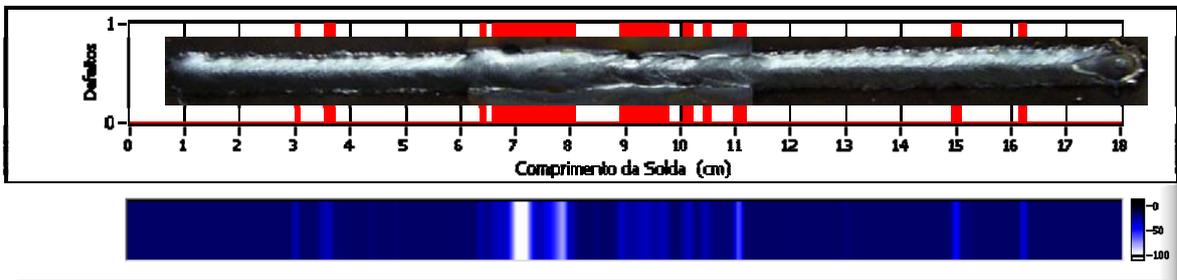
Figura 4.42: Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas sobre Corpos de Prova Livres de Defeitos.



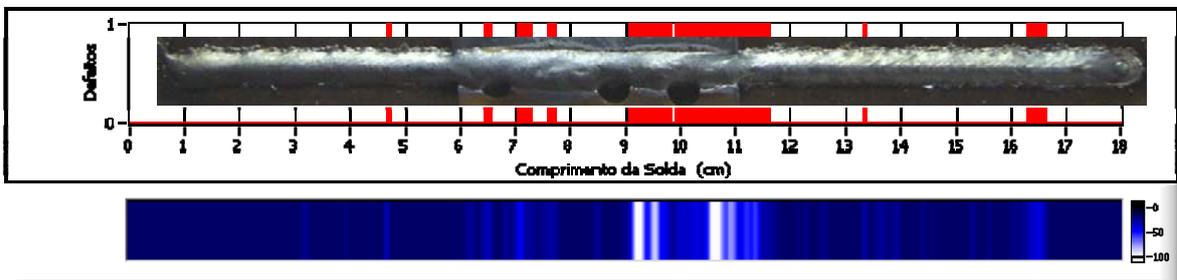
(a) Teste 1



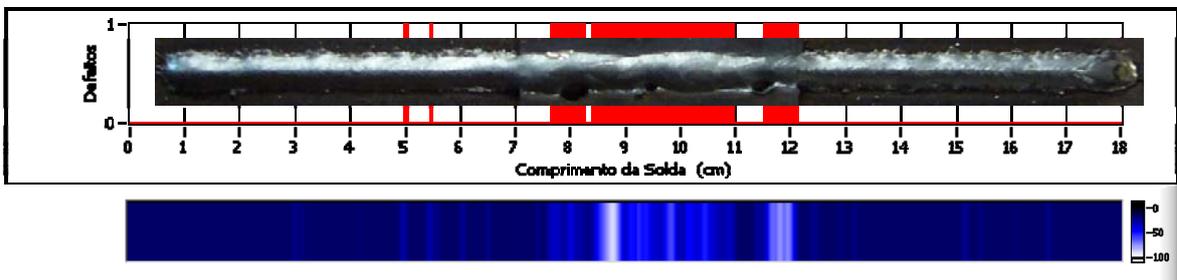
(b) Teste 2



(c) Teste 3

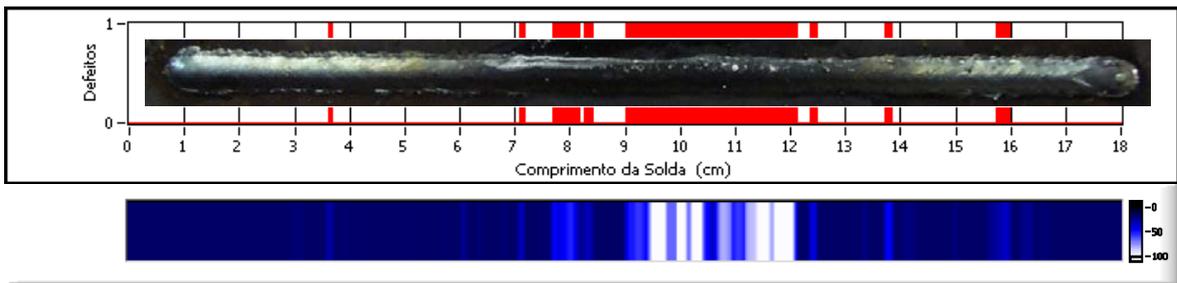


(d) Teste 4

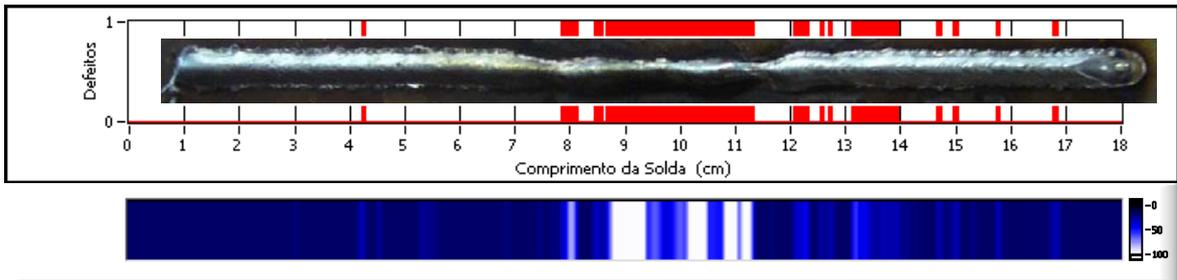


(e) Teste 5

Figura 4.43: Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas Simulando defeitos por Variação de *Stand Off*.



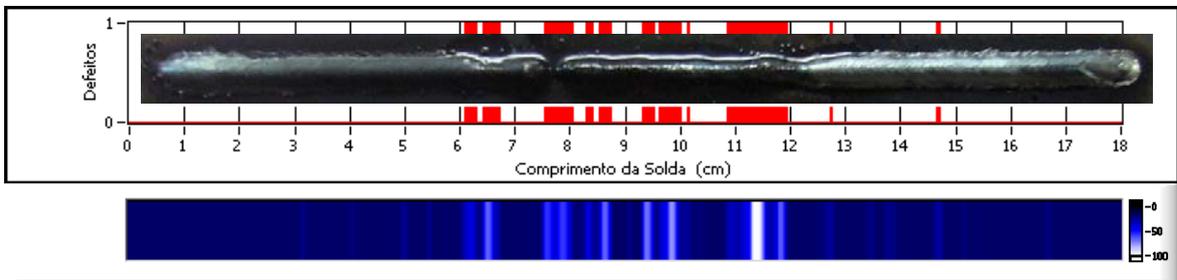
(a) Teste 1



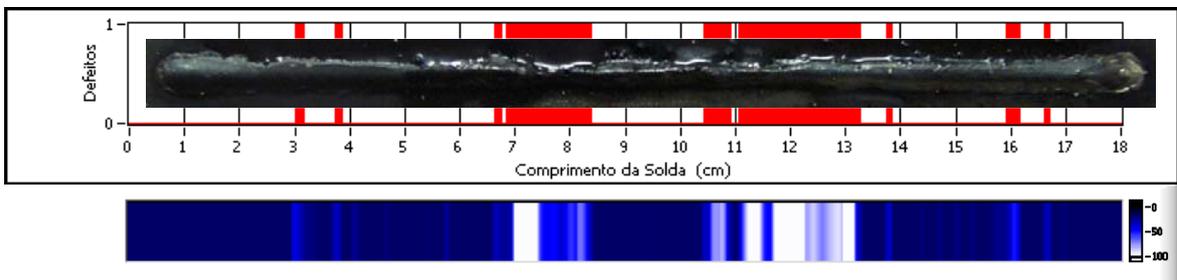
(b) Teste 2



(c) Teste 3



(d) Teste 4



(e) Teste 5

Figura 4.44: Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas Simulando Defeitos pela Presença de Graxa.

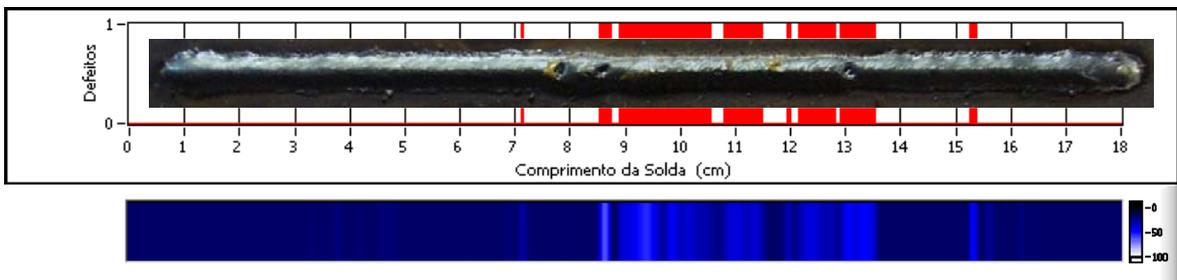
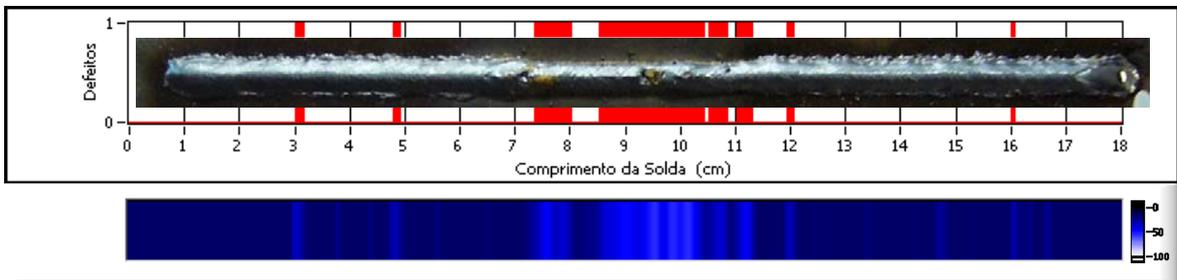
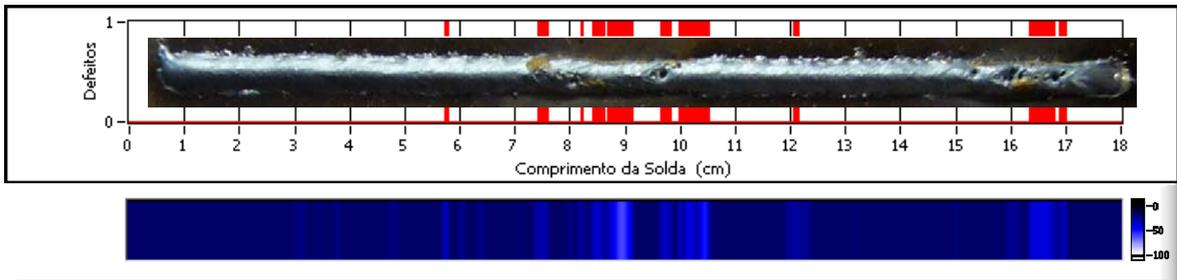
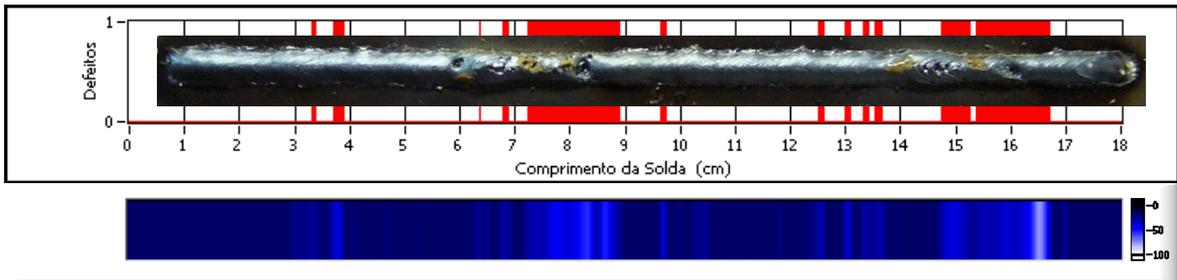
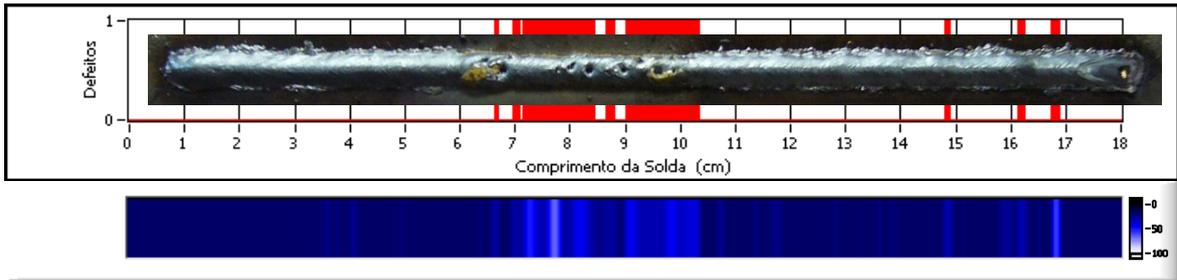


Figura 4.45: Monitoramento, Detecção e Localização de Defeitos para Soldas Simulando Defeitos pela Ausência de Gás.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o instrumental operativo e identificado o envelope ótimo de parâmetros de soldagem foi feito um conjunto de vinte soldas sobre corpos livres de defeitos. Monitorando sinais de tensão de arco, corrente de soldagem e pressão acústica do arco. Nesses sinais se identificaram regiões de instabilidade do processo localizadas no início e no final da solda. Dessa forma se estabeleceu uma região de estabilidade, onde foram feitas as próximas análises. A partir desses sinais se escolheram os parâmetros estatísticos de estabilidade acústica – PEA (aqueles obtidos a partir do sinal de pressão acústica) e os parâmetros estatísticos de estabilidade elétrica – PEE (aqueles obtidos a partir dos sinais de tensão de arco e corrente de soldagem). Esses sinais elétricos do processo são de natureza estocástica (Absi *et al*, 2006) e como o som é o resultado da modulação desses sinais, afirmamos que esta também é de natureza estocástica. No trabalho referido a estabilidade acústica do processo GMAW-S (Cayo e Absi, 2008b), se demonstrou que o nível de pressão acústica – SPL é uma ferramenta que possibilita monitorar a estabilidade do processo a partir da sua continuidade. Como se mencionou anteriormente a pressão de som é de natureza estocástica, Foram levantados histogramas da sua distribuição para comprovar esse fato e determinar a janela de análise de dados (secção 4.3.3). Após algumas análises se determinou que uma janela de dados de 150 ms será usada no presente trabalho para a análise de dados. Nesta janela se consegue representar adequadamente os sinais de PEA e PEE. Os PEA estão constituídos pelo SPL médio, o desvio padrão do SPL médio, o número de ignições por janela e o desvio padrão do período de ignições. Os PEE estão constituídos por o número de curto-circuitos por janela e o desvio-padrão dos períodos de curto-circuitos. O SPL médio e o desvio padrão são calculados pelas equações (11) e (12) respectivamente. O número de ignições, que é calculado a partir do sinal de pressão acústica, foi medida seguindo o principio da modulação e de-modulação, (todo sinal modulado pode ser de-modulada). Para isso se utilizou um detector de envolvente quadrático otimizado por um filtro *Kalman* em lugar de um filtro passa baixas resultando um sinal bem definido. A comparação com o nível estabelecido permite detectar ignições do arco a partir da pressão acústica que tem uma estreita semelhança com o número de curto-circuitos detectados a partir da tensão de arco para o mesmo instante e janela de análise. (ver figura 4.30). O desvio padrão do número de ignições foi calculado a partir da equação (12). O número de curto-circuitos por janela foi calculado a partir da tensão de arco; para isso se usou um derivador de primeira ordem para detectar as variações e um inversor para realçar a variações produzidas pelo curto-circuito. Uma comparação com um

nível estabelecido permite a detecção dos curto-circuitos por janela. O desvio padrão dos períodos de curto-circuitos foi calculado seguindo a equação (12).

Nas vinte soldas realizadas se calcularam os valores médios, máximos, mínimos e a faixa de variação dos PEA e PEE. Os resultados são mostrados na tabela 4.7. Também se mostrou o comportamento do ciclograma de tensão e corrente para uma solda com a melhor estabilidade sem presença de defeitos. Após isso foram feitas quinze soldas simulando defeitos. Estas soldas estão distribuídas em três grupos onde se simularam três diferentes tipos de defeitos: Variação de *stand off*, presença de graxa na trajetória da solda e ausência de gás de proteção. Mostraram-se nos ciclogramas de cada tipo de defeitos como os sinais de tensão de arco e corrente se soldagem sofreram transtornos e instabilidades que se traduzem como defeitos na solda. Também pode-se notar que os PEA e os PEE sofreram grandes variações durante a presença do defeito. Com esses resultados evidentes de variação diante a presença de defeitos, foram estabelecidos os limites aceitáveis de variação dos PEA e são mostrados na tabela 4.8.

As equações (13) a (17) representam o algoritmo de detecção e localização de defeitos. Esse algoritmo está baseado na normalização dos PEAs e a sua comparação estatística com os níveis aceitáveis estabelecidos na tabela 4.8. A normalização de cada PEA é chamada de nível normalizado de defeito. A sua distribuição normalizada apresenta uma média nula e um desvio padrão unitário -ver figura 4.38 (b)-(e)-. Na análise dos níveis normalizados para os PEA nas soldas feitas sem presença de defeitos se notou que nenhuma distribuição normalizada dos PEA supera o LDn de 2.5. Numa análise posterior, comparando a distribuição normalizada dos PEAs das soldas com e sem a presença de defeitos, se estabeleceu que o limite de defeitos normalizado LDn tivesse o valor de 3 vezes o desvio padrão unitário. Análises posteriores nos PEA das soldas com defeitos mostraram que o algoritmo desenvolvido conseguiu detectar e localizar defeitos. Cada tipo de defeito apresentou comportamentos peculiares em cada tipo de PEA avaliado, assim como, na sua distribuição normalizada.

No defeito gerado pela variação do *stand off* se colocou uma chapa de aço de 2 mm de espessura. Nesse defeito, quando a solda passa pela chapa de aço se produz uma redução no *stand off* e isso também traz uma redução do comprimento do arco; a amplitude da pressão acústica e diretamente proporcional ao comprimento do arco (Drouet *et al*, 1982). Esse princípio se vê refletido na diminuição do SPL quando a solda passa pela chapa simulando o defeito da variação do *stand off*. O desvio padrão do SPL médio apresenta

pronunciados picos somente no início e no final da passagem pela chapa que simula o defeito por variação de *stand off*, mas *durante* o passo da solda pela chapa o SPL se mantém invariável. Esse fato era esperado, já que durante o defeito o *stand off* permanece constante, mas com um novo valor de comprimento e o SPL se estabiliza num novo valor, nesse caso num valor menor ao normal, pois o *stand off* diminuiu. Para esse mesmo defeito o número de ignições sofre variações leves no início e no final da solda. Durante o defeito também sofre alterações, mas essas são pouco perceptíveis. As leves variações são originadas pela mudança abrupta do *stand off*, onde transitoriamente se interrompe a seqüência de ignições e curto-circuitos na transferência metálica. Mas a medida que a soldagem vai avançando pela chapa, é possível que o arco recupere a estabilidade para o novo valor de *stand off*. Isso se observou para algumas soldas onde as instabilidades diminuíram até se estabilizar o arco, fato que se vê refletido na leve variação do desvio padrão do número de ignições que sofre variações pouco pronunciadas. A variação do SPL médio e o seu desvio padrão sugerem ser, indicadores mais ressaltantes e sensíveis para detectar esse tipo de defeito.

No defeito gerado pela presença de graxa na trajetória da solda, se observou que o SPL sofre uma diminuição mais pronunciada em comparação como o defeito descrito anteriormente. Essa diminuição do SPL está presente durante todo o defeito, mas varia constantemente. A transição entre a região estável e a região não estável é progressiva e não se apresentam variações abruptas, isso é observado pois à medida que a solda vai se aproximando da região de instabilidade, a temperatura da poça de fusão transmitida por condução no corpo de prova, evapora as bordas da região com graxa. Mas como a velocidade de evaporação é menor em comparação com a velocidade de soldagem, a solda passa progressivamente pela graxa até encontrá-la ainda em estado líquido. As variações do SPL durante a instabilidade simulada é causada pela variação da quantidade de graxa na trajetória da solda. Quando essas quantidades variam abruptamente durante o passo da solda, esse se manifesta com uma variação abrupta no desvio padrão do SPL. Essas são as únicas variações que o desvio padrão do SPL consegue monitorar. O número de ignições apresenta variações que vão sendo progressivas à medida que a solda vai avançando desde a região estável até a região instável. Quando a solda passa pelo defeito, o número de ignições decresce consideravelmente e se produz uma constante instabilidade até que não haja a presença de graxa na trajetória da solda. O desvio padrão do número de ignições,

apresentou variações altamente pronunciadas. Essas variações se produzem constantemente durante todo o comprimento do defeito.

No defeito gerado pela ausência de gás de proteção, se notou que, igualmente ao defeito anterior, a variação do SPL médio é progressiva, mas durante o passo da solda pelo defeito, esse apresenta uma determinada estabilidade similar ao SPL médio apresentado pelo defeito gerado pela variação do *stand off* mas com a diferença que em este caso o SPL médio aumenta levemente. O desvio padrão do SPL médio praticamente permanece invariável ante esse defeito. O número de curto-circuitos variou progressivamente e que a diferença do defeito gerado pela presença de graxa na trajetória em este caso aumentou-se e ainda apresentou pouca variação. Fato que no seu desvio padrão se manifestou pela ausência de variações leves ou abruptas.

Finalmente foram feitas soldas finais de validação e teste do algoritmo de detecção e localização de defeitos em corpos de prova com e sem presença dos defeitos nomeados anteriormente.

Nas soldas em corpos sem a presença de defeitos notou-se que na totalidade não foram feitas detecções falsas. Na simulação de defeitos na solda por variação de *stand off* se conseguiu detectar e localizar defeitos devido às variações do SPL médio e o seu desvio padrão. Mesmo que em algumas soldas se teve uma variação pouco pronunciada no número de ignições assim como no desvio padrão. Nas soldas com defeitos gerados pela presença de graxa na trajetória da solda, o algoritmo desenvolvido, conseguiu detectar e localizar todos os defeitos simulados. Esses defeitos foram detectados principalmente pelas variações do número de ignições assim como o seu desvio padrão. As variações do SPL médio e o seu desvio padrão não apresentaram variações pronunciadas como para poder detectar esse tipo de defeitos. Nas soldas com defeitos gerados pela ausência de gás de proteção o algoritmo de detecção e localização também conseguiu resultados satisfatórios, para todos as soldas. Para esse tipo de defeito conseguiu-se detectar pelas variações do SPL médio e principalmente pelo aumento do número de ignições, já que os seus desvios padrões respectivos definitivamente apresentam variações nulas ante a presença desse tipo de defeito.

6 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi monitorar, detectar e localizar defeitos a partir do sensoriamento da acústica do arco elétrico do processo GMAW no modo de transferência por curto-circuito. Os resultados dos experimentos permitiram concluir:

- É possível desenvolver um sistema computacional não intrusivo baseado na acústica gerada pelo arco elétrico do processo para monitorar, detectar e localizar defeitos no processo de soldagem GMAW-S.
- O ruído ambiental tem influência direta na qualidade do sinal acústico medido do arco, mas o isolamento, o direcionamento do microfone e o pré-processamento do sinal conseguem melhorar a qualidade do sinal de pressão acústica para a análise de estabilidade.
- O uso da acústica do arco de soldagem é uma ferramenta factível para a avaliação da estabilidade do processo GMAW-S; desde que a seqüência de curto-circuitos e ignições de arco da transferência metálica se vem refletidas como um impulso acústico de pequena e grande amplitude, respectivamente.
- O sinal acústico do arco elétrico é uma consequência da primeira derivada da modulação em amplitude dos sinais de tensão e corrente do arco do processo de soldagem. Esse sinal acústico é de natureza estocástica, pois os sinais que dão a sua origem são dessa natureza.
- A abordagem estatística da análise do sinal acústico do arco elétrico permitiu avaliar a estabilidade do processo a partir da continuidade do SPL e do número de ignições por janela. Uma análise de variação respectiva desses parâmetros permitiu estabelecer os limites aceitáveis de estabilidade e cujo sobrepasso e/ou desbordagem dos mesmos indicam uma instabilidade na transferência metálica, e que, portanto, evidencia a presença de um defeito na solda.
- A avaliação da estabilidade em processos de soldagem e, portanto, a detecção e localização de defeitos, mediante o algoritmo desenvolvido a partir de sinais acústicos do arco de soldagem, apresenta maior facilidade para detectar instabilidades produzidas por falhas originadas pela ausência de gás e presença de

graxa na trajetória de soldagem em comparação aos defeitos originados pela variação do *stand off*. Pois os sinais de PEA dos dois primeiros defeitos apresentam variações mais pronunciadas em comparação com o último tipo de defeito nomeado.

- O estudo, compreensão e caracterização de cada PEA em cada tipo de defeito abre a possibilidade de se poder identificar o tipo de defeito que origina a instabilidade no processo. A identificação em tempo real do tipo de defeito a partir da pressão acústica gerada pelo arco elétrico poderia ser em uma formidável ferramenta de controle para o processo de soldagem GMAW.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As perspectivas de trabalhos futuros relacionados objetivam atingir um nível funcional do sistema de monitoramento, detecção e localização de defeitos, para atender as expectativas de um sistema semelhante para a sua operação em tempo real.

Um dos projetos futuros seria o estudo de detecção de defeitos a partir da pressão acústica baseado em sistemas estatísticos de controle e técnicas de inteligência artificial. Os resultados desse estudo permitiriam capturar o conhecimento e critério de avaliação de qualidade na solda de soldadores experientes e a partir de isso criar algoritmos de avaliação da qualidade na solda de tal forma que se tenha maior realismo nos resultados.

O fato de que a qualidade aceitável na solda esteja baseada na continuidade de determinadas características acústicas do processo de soldagem, abre a possibilidade de fazer análises desse sinal a partir de transformadas de *wavelet*, visando detectar discontinuidades que mediante métodos estatísticos às vezes não são possíveis distinguir. Um trabalho que abranja a análise e caracterização dos parâmetros estatísticos de estabilidade acústica baseado em técnicas de inteligência artificial permitiria identificar com determinado grau de certeza o tipo de defeito. Outro posterior trabalho de factibilidade da aplicação da pressão acústica do arco elétrico como variável de realimentação do processo permitiria desenvolver algoritmos de controle sobre as variáveis de controle do processo de soldagem semelhantes aos usados pelos soldadores experientes.

O estudo do monitoramento acústico do processo GMAW em outros modos de transferência permitiria entender melhor o comportamento acústico do arco assim como desenvolver e aperfeiçoar os algoritmos de avaliação de estabilidade, detecção e localização de defeitos.

O uso de parâmetros não convencionais como a pressão acústica do arco elétrico, luminosidade temperatura e outros que se produzem durante a transferência metálica junto com técnicas de fusão de sensores e inteligência artificial, permitiria desenvolver tarefas de controle sobre o processo com um elevado grau de realismo, sendo isso mais que um desafio uma tendência das próximas tecnologias que envolvam o monitoramento, controle do processo de soldagem e avaliação da qualidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABENDE, (2008), web site: <http://www.abende.org.br>, Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos e Inspeção.
- Absi, S. C., Carvalho, G.C. e da Cunha, F.R., (2006), *A statistical approach for monitoring stochastic welding processes*, Journal of Materials Processing Technology 175 4–14.
- Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjö, G. e Claesson, I, (1998), *Quality Monitoring in Robotised Spray GMA Welding*, Inst. J. for the Joining of Materials 10 (1/2).
- Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjö, G. e Claesson, I, (1999), *On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding*, Welding Research Supplement, p. no2 59s–73s.
- ADVANTECH, (2008), web site: <http://www.advantech.com>, Trusted ePlatform, Service and Application-ready Platforms For Intelligent Lifestyle.
- Barborak, D., Conrardy, C., Madigan, B. e Paskell, T, (1999), *"Through-Arc" Process Monitoring Techniques For Control Of Automated Gas Metal Arc Welding*, International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan May 1999
- Bingul, Z. e Cook, G. E., (2006), *A Real – Time Prediction Model of Electrode Extension for GMAW*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol 11, no 1.
- Bingul, Z. e Cook, G. E., (1999), *Dynamic Modeling of GMAW Process*, Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, USA.
- Bland, D.M., Tarczynski, A., (1997), *Optimum Nonuniform Sampling Sequence for Alias Frequency suppression*, Circuits and Systems, 1997. ISCAS apos;97., Proceedings of 1997 IEEE International Symposium on, Volume 4, Issue , 9-12 Jun 1997 Page(s):2693 - 2696 vol.4.
- BKSV, (2008), <http://www.bksv.com>, Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S.

- Cayo, E. H. ; Absi Alfaro, S.C. (2007a), *Medición de la Calidad en Soldadura Basado en Sensoreamiento Acústico*, 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2007, Cusco - Perú. CIBIM8. Lima - Perú : Pontificia Universidad Católica del Perú, 2007. v. 1. p. 1068-1079.
- Cayo, E. H., Absi Alfaro, S. C., (2007b), *Welding Quality Measurement Based On Acoustic Sensing*, COBEM2007, 2007, Brasília. 19th International Congress of Mechanical Engineering. São Paulo : ABCM, 2007. v. 1. p. 2200-2200-11.
- Cayo, E. H., Absi Alfaro, S. C., (2008a), *Weld Transference Modes Identification Through Sound Pressure Level in GMAW Process*, Sixteenth International Scientific Conference on Achievements of Mechanical and Materials Engineering - AMME'2008, June 2008, Gliwice, Poland, p. 1.15, p.73. ISBN 83-89728-47-8, EAN 9788389728470.
- Cayo, E. H., Absi Alfaro, S. C., (2008b), *Evaluación Acústica de la Estabilidad del Proceso de Soldadura MIG/MAG para el Modo de Transferencia Corto-circuito*, 3° Congreso Nacional de Ingenierías Mecánica, Eléctrica, Electrónica y Mecatrónica, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco-Ciudad de Mexico, Mexico, v. 3, s. 4, pp. 399-405.
- Chu, Y. X., Hu, S. J., Hou, W. K., Wang, P. C. e Marin S. P., (2004), *Signature Analysis for Quality Monitoring in Short-Circuit GMAW*, Welding Research Journal, December 2004.
- Cook, G. E., Andersen K. e Barrett R. J., (1992), *Keynote Address Feddback and Adaptative Control in Welding*, International Trends in Welding Science and Technology, ASM International, pp 891-903.
- Cook, G. E., Maxwell, J. E., Barnett, R. J. e Strauss A. M., (1997), *Statistical Process Control Application to Weld Process*, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 33, No. 2.
- Čudina, M., Prezelj, J., Polojnar, I., (2008), *Use of Audible Sound For On-Line Monitoring of Gas Metal Arc Welding Process*, Croatian Metallurgical Society, Metalurgija 47 (2008) 2, 81-85, 2008, Zagreb, Croatia.

- Di, L., Yonglun, S. e Feng, Y., (2000), *On Line Monitoring of Weld Defects for Short-circuit Gas Metal Arc Welding Based on the Self-organize Feature Map Neural Networks*, Neural Networks, 2000. IJCNN 2000, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on.
- Drouet M. G. e Nadeau, F., (1979), *Pressure Waves due to Arcing Faults in a Substation*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No.5.
- Drouet M. G. e Nadeau, F., (1982), *Acoustic measurement of the arc voltage applicable to arc welding and arc furnaces*, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 15.
- EAGLE, (2008), web site: <http://www.eagledaq.com>, Eagle Technology – Data Acquisition Hardware & Software.
- Fan, H. G. e Kovacevic, R. (1998), *Dynamic analysis of globular metal transfer in gas metal arc welding a comparison of numerical and experimental results*, J. Phys. D: Appl. Phys. 31.
- Gonçalves, R. H., Dutra, J. C. e Gohr, R., (2008), *Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC)-Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente*, Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 13, No. 1, p.070-081,Jan/Mar.
- Grad, L., Grum, J., Polajnar, I., e Slabe, J. M., (2004), *Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding*, International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 44, Issue 5, April 2004, Pages 555-561
- Hermans, M. J. M. e Den Ouden, G., (1999) *Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding*, Welding Research Supplement, April 1999, The Netherlands.
- Hughes, P., e Simpson, S.W., (2002), *Industrial Application Of Welding Signatures For Real Time Quality Assurance And Process Improvement*, 12th International TWI Computer Technology in Welding Conference, paper 67, August 2002, Sydney, Australia.
- IMC, (2008), web site: <http://www.imc-soldagem.com.br/>, IMC – Engenharia de Soldagem.

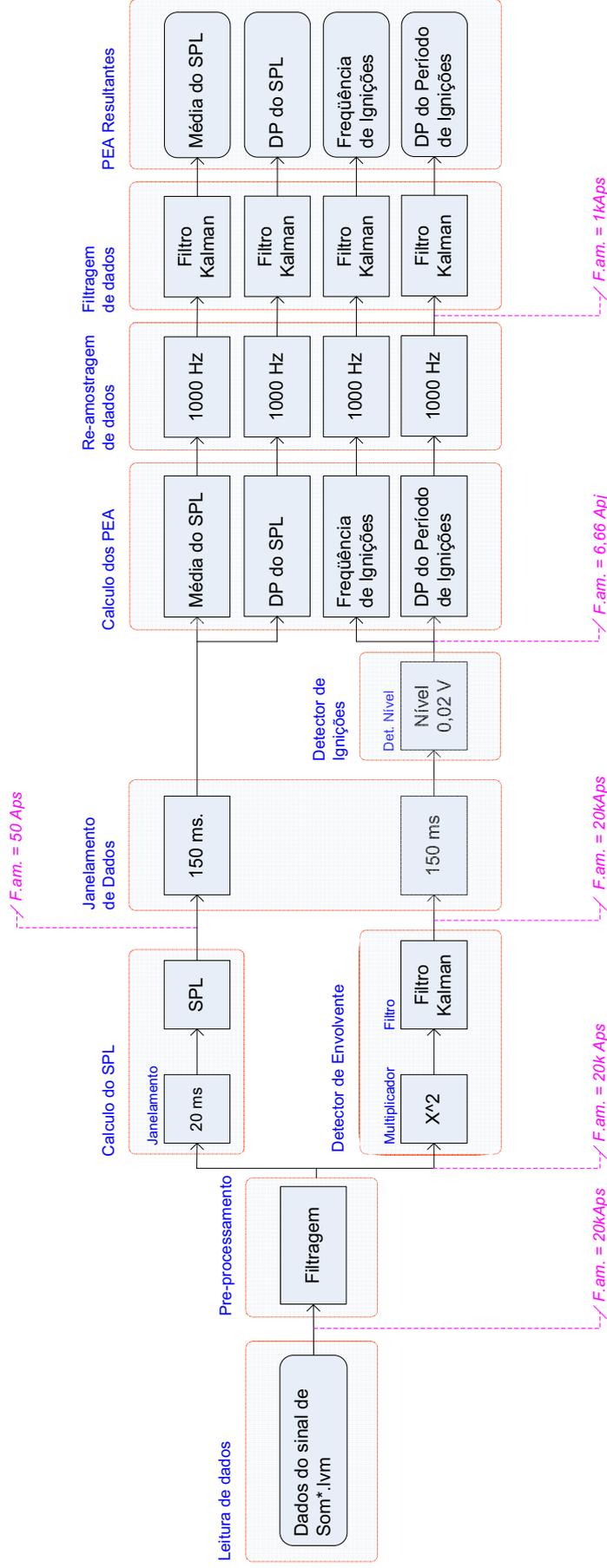
- Kralj, V., (1968), *Biocybernetic investigations of hand movements of human operator in hand welding*, IIW/IIS Doc. 212-140-68, 1968.
- Lin, R. H. e Fischer, G.W., (1995), *An on-line arc welding quality monitor and process control system*, Dept. of Ind. Eng. & Manage., Nan-Tai Coll., Tainan Hsieu, Taiwan, Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, International IEEE/IAS Conference on, May,1995.
- Malcolm A. C., (1953), *An Acoustic Lens as a Directional Microphone*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 25, issue 4, p. 829
- Mansoor, A. e Huissoon, J. P., (1997), *An investigation of the arc sound produced during GMA welding*”, MASC Thesis, University of Waterloo.
- Mansoor, A.M., Huissoon, J.P.(1999), *Acoustic Identification of the GMAW Process*, 9th Intl. Conf. on Computer Technology in Welding, , pp312-323 Detroit, USA.
- McLean, R. F.; Alsop, S. H., e Fleming, J. S., (2005), *Nyquist—Overcoming the Limitations*, Journal of Sound and Vibration Volume 280, Issues 1-2, 7, Pages 1-20
- Miller, (2007), *Guidelines for Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, 1.ed., US, editorial Miller Electric Mfg. Co.
- Modenesi, P., (2001), *Introdução a Física do Arco*, 1.ed. Belo Horizonte - Brasil, Editora UFMG 53 p.
- Moore, K. L., Yender, R., Tyler, J., e Naidu, D. S., (1998), *Modeling, Calibration, and Control-Theoretic Analysis of the GMAW Process*, Proceedings of the American Control Conference Philadelphia, Pennsylvania, June 1998.
- Nadzam J., (2006), *Gas Metal Arc Welding Guidelines*, editorial Lincoln Electric Company.
- Norrish J., (1992), *Advanced Welding Processes*, 1.ed. US, editorial IOP Publishing Inc.
- NI, (2008), web site: <http://www.ni.com/labview>, NI LabVIEW - The Software That Powers Virtual Instrumentation - Products and services - National Instruments.
- Nyquist, H., (1924), *Certain Topics in Telegraph Transmission Theory*, Classic Paper, American Telephone & Telegraph Co., New York, NY; Re-impresso pela Transactions of the A. I. E. E., pp. 617–644, Feb. 1928, Proceedings Of The IEEE, Vol. 90, No. 2, February 2002.

- Oakland, J. S., (2003), *Statistical Process Control*, 1. ed. Butterworth-Heinemann, An imprint of Elsevier Science, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 200 Wheeler Road, Burlington MA 01803
- Polajnar, I., Prezelj, J., Mišina, N., Čudina, M., (2007), *Noise at the Welder's Workplace*, Sigurnost 49 (2) 113 - 124 (2007), Ljubljana, Slovenija
- Poopat, B. e Warinsiruk, E., (2006), *Acoustic signal analysis for classification of transfer mode in GMAW by noncontact sensing technique*, Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol. 28, Issue 4, pages/rec.No: 829-840, University of Technology Thonburi, Thungkru, Bangmod, 2006, Bangkok, Thailand.
- Quinn, T. P., Smith, C., McCowan, C. N., Blachowiak, E. E Madigan, R. B. (1999), *Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding*, Welding Research Supplement.
- Sanches A., , Carvajal, H., Blanco, J., Sanz, F. e Jimenes, E., (2006), *Caracterización del modo de transferencia por cortocircuito en procesos de soldadura GMAW a partir de la señal de emisión acústica generada por el arco*, IV Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica – COMEC, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- Scotti, A., (2008), *A Portrait of the Welding Research in Brazil*, Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 13, No. 2, p. 160-164, Abr/Jun.
- Shannon, C. E. (1947), *Communication in the Presence of Noise*, Classic Paper, IRE New York Section, New York, N. Y., 1947. Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, N. J. Presented, 1948, IRE National Convention, New York, N. Y., March 24, 1948; foi re- impresso pela IRE, vol. 37, no.1, pp. 10–21, Jan, 1949, Proceedings Of The IEEE, Vol. 86, No. 2, Feb 1998.
- Simpson, S. W., e Hughes, P., (2006), *Prospects for Fault identification and control in welding using signature images*, N. S. W. 2006, School of electrical and Information Engineering, University of Sydney, Australia.
- SBRT, (2008), web site: <http://www.sbirt.ibict.br/pages/index.jsp>, Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas - SRBT

- Suban, M. e Tušek, J., (2003), *Methods for the Determination of arc Stability*, Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) 430–437, Institut za varilstvo (Welding Institute), 2003, Ljubljana, Slovenia.
- Tam, J. e Huissoon J., (2005), *Developing Psycho-Acoustic Experiments in Gas Metal Arc Welding*, Proceedings of the IEEE, International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada, July 2005
- Tam, J. (2005), *Methods of Characterizing Gas-Metal Arc Welding Acoustics for Process Automation*, tese apresentada na Universidade de Waterloo para obter o grau de mestre em Engenharia Mecânica, Canada.
- Terasaki H. e Simpson S. W., (2006), *Circuit simulation for Gas Metal Arc Welding system*, The 47h IEEE International Midwest Symposium on Circuits and System, vol. III, pp. 387-390.
- Villani, P., Modenesi, P. e Bracarense, A., (2005), *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*, 1.ed. Belo Horizonte - Brasil, Editora UFMG 362 p.
- Warinsiriruk, E. e Poopat, B., (2006), *Investigation of Metal Transfer of ER70S-6 Filler metal in MAG-M Welding by Acoustic Signal Detection*, The Fourth Thailand Materials Science and Technology Conference, Bangkok, Thailand, April 2006.
- Wang, F., Hou, W. K., Hu, S. J., Kannatey-Asibu, E., Schultz, W. W. e Wang, P. C., (2003), *Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding*, J. Phys. D: Appl. Phys. 36.
- Walker, J. S., (1997), *Fourier Analysis and Wavelet Analysis*, Proceeding of the Notices of the AMS, Volume 44, number 6.
- Wu, C. S., Polte, T. e Rehfeldt, D., (2001), *A Fuzzy Logic System for Process Monitoring and Quality Evaluation in GMAW*, Supplement to the Welding Journal, February 2001
- Wu, C. S., Gao, J. Q. e Hu, J. K., (2007), *Real-Time Sensing and Monitoring in Robotic Gas Metal Arc Welding*, Measurement Science and Technology, Institute for Materials joining, Shandong University, Jinan, 250061, People's Republic of China, 18 pp. 303-310.
- Wyner, A. D., Shamai, S., (1998), *Introduction to "Communication in the Presence of Noise" by C. E. Shannon*, Proceedings Of The IEEE , Vol. 86, No. 2.

Xiaoqing, L., Biao, C., Min, Z. e Zenghao, H., (2005), *Effects of current waveform parameters during droplet transfer on spatter in high speed waveform controlled Short-circuiting GMAW*, China Welding Vol. 14 No. 2, November 2005, Guangzhou, China.

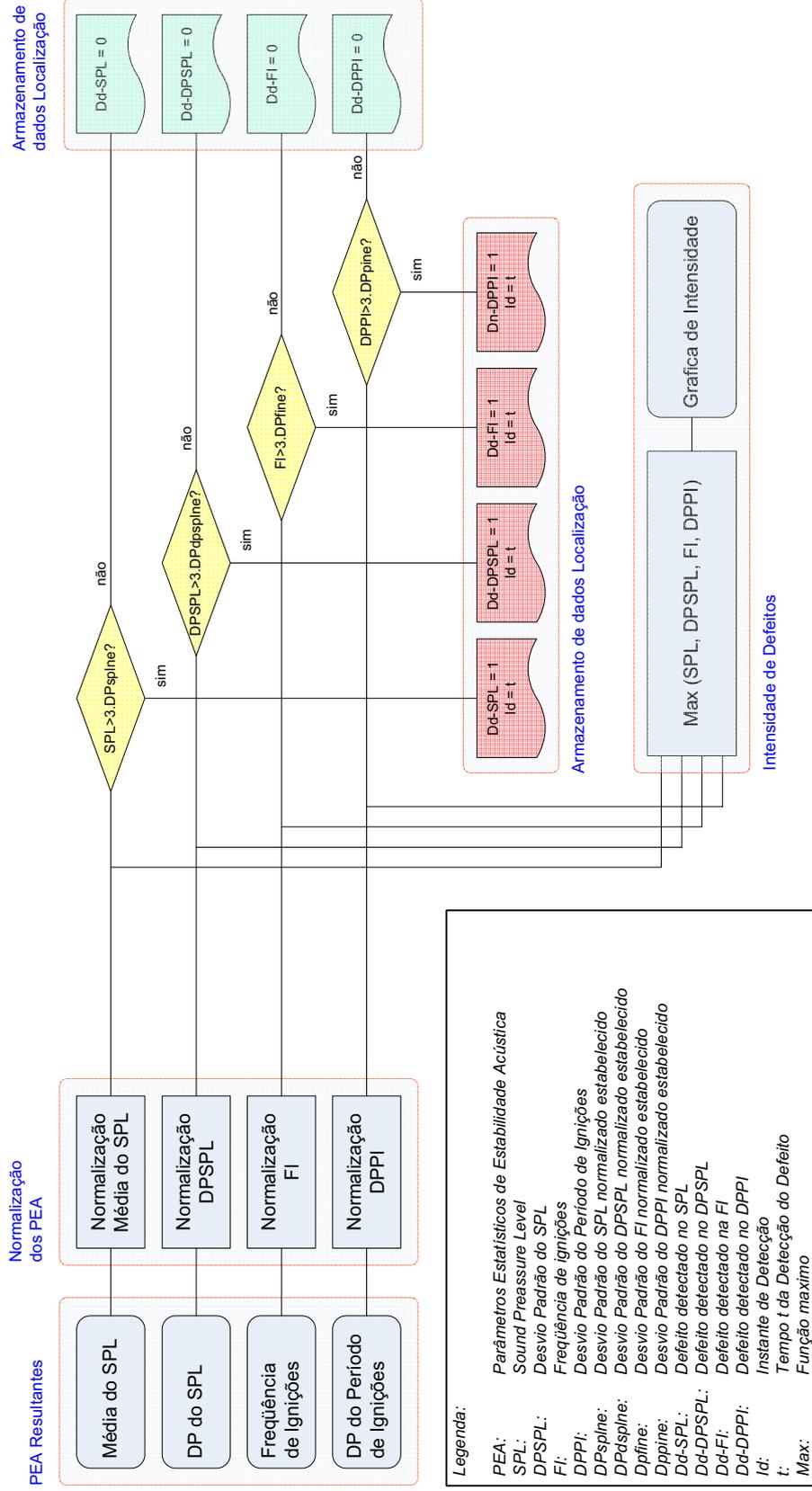
APÊNDICE A – Fluxograma dos Dados no Algoritmo Desenvolvido



Legenda:

- Fam: Freqüência de Amostragem
- Aps: Amostras por Segundo
- Apj: Amostras por Janela
- PEA: Parâmetros Estatísticos de Estabilidade Acustica
- SPL: Sound Pressure Level
- DP: Desvio Padrão

APÊNDICE B – Fluxograma dos Dados na Detecção de Defeitos



APÊNDICE C – Fluxograma dos Dados na Localização de Defeitos

