

MARCUS VINÍCIUS RIBEIRO MACHADO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO SONORO PARA A
SOLDAGEM MAG CURTO-CIRCUITO
(SiMoSS)**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2015

MARCUS VINÍCIUS RIBEIRO MACHADO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO SONORO PARA A
SOLDAGEM MAG CURTO-CIRCUITO
(SiMoSS)**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Coorientador: Prof. Dr. Roberto M. Finzi Neto

UBERLÂNDIA - MG

2015

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

M149s Machado, Marcus Vinícius Ribeiro, 1986-
2015 Sistema de monitoramento sonoro para a soldagem MAG curto-
circuito (SiMoSS) / Marcus Vinícius Ribeiro Machado. - 2015.
288 f. : il.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.

Coorientador: Finzi Neto, Roberto Mendes.

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

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2017.10>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. I. Vilarinho,
Louriel Oliveira. II. Finzi Neto, Roberto Mendes. III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



ALUNO: Marcus Vinícius Ribeiro Machado

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11023EMC007

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL DOUTORADO

TÍTULO DA TESE:

“Sistema de Monitoramento Sonoro para a Soldagem MIG/MAG Curto-Circuito (SiMoSS)”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

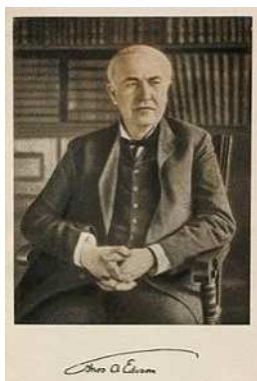
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto

A Tese foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro A-B do Bloco 5R, Campus Santa Mônica, em 24 de agosto de 2015, às 09:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (orientador)	UFU
Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto (co-orientador)	UFU
Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi	UFU
Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte	UFU
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha	EPUSP
Prof. Dr. Admilson Vieira da Costa	CEFET/MG

Uberlândia, 24 de agosto de 2015

Dedico,
Aos meus pais,
familiares, e
amigos,
pelo apoio, força e
encorajamento nesta jornada de estudos.
Que não pare por aqui.



"De fato,
não fracasei ao tentar
cerca de 10.000 vezes
desenvolver um acumulador.
Simplesmente,
encontrei 10.000 maneiras que não funcionam."

Thomas A. Edison

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia,

À Faculdade de Engenharia Mecânica,

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

À Faculdade de Ciências Integradas do Pontal, da Universidade Federal de Uberlândia pela liberação em Afastamento Total para conclusão desta Tese de Doutorado.

Ao Professor Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, ideias na solução de problemas, indicações de estudos, discussões sobre assuntos diversos acrescentando a este trabalho grande experiência e qualidade, e pelas horas de conversas e conselhos que, sem dúvida, foram essenciais para a insistência e conclusão do trabalho.

Ao Professor Roberto Mendes Finzi Neto, pela orientação, pela paciência durante as fervorosas discussões sobre os problemas encontrados e na busca de soluções, além da disposição de ensinar e sempre esclarecer dúvidas.

Aos meus companheiros de laboratório, grandes amigos, pela disponibilidade, pelas sugestões e interesse durante todo o desenvolvimento deste trabalho e pelo incentivo para continuar a longa jornada.

Ao grupo LAPROSOLDA e todos seus Professores, pela disponibilidade de todos os recursos necessários para a conclusão deste trabalho.

MACHADO, M. V. R. **SISTEMA DE MONITORAMENTO SONORO PARA A SOLDAGEM MAG CURTO-CIRCUITO (SiMoSS)**. 2015. 228f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O monitoramento dos processos de soldagem é atividade fundamental industrialmente, sendo comprovado pela quantidade de estudos e desenvolvimento de dispositivos nos últimos anos, com ênfase na demanda pela ISO 3834. O monitoramento elétrico (corrente e tensão) da soldagem é bem empregado no estudo e desenvolvimento de processos e procedimentos de soldagem, além de utilizado nas indústrias para o acompanhamento de linhas de produção, verificação da operação realizada e documentação do produto. Nesse contexto, o monitoramento sonoro tem sido tratado como uma possibilidade para o monitoramento e acompanhamento do processo de soldagem, com limitações de aplicação justificadas por sua baixa robustez contra interferência de ruídos externos. Uma das finalidades de se utilizar monitoramento em soldagem é verificar critérios que indiquem condições operacionais que se traduzam em regularidade do processo. O estudo da regularidade da transferência metálica em processos de soldagem por curto-circuito já vem sendo realizado pelo monitoramento dos sinais elétricos, fazendo-se uso, dentre outros, do Índice de Regularidade (IV_{cc}). Neste sentido, este trabalho utiliza o sinal sonoro (som) proveniente do processo MAG curto-circuito convencional para a determinação do Índice de Regularidade Sonoro (IV_{ccS}), com o consequente desenvolvimento de um sistema portátil para o monitoramento e avaliação da regularidade do processo. A partir da análise da regularidade, o sistema propõe sugestão de melhoria. Para tanto, foi implementado um algoritmo de processamento do sinal sonoro capaz de determinar de forma satisfatória o IV_{ccS} e, a partir de um banco de dados de soldagem, realizar sugestão de melhoria do processo de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados, tudo embarcado em um sistema portátil de grande versatilidade e fácil utilização.

Palavras-Chave: Monitoramento, Sonoro, Soldagem, Curto-Circuito, Regularidade.

MACHADO, M. V. R.. **SOUND-BASED MONITORING SYSTEM FOR SHORT-CIRCUIT MAG WELDING (SiMoSS)** 2015. 228f. Doctorate Thesis, Federal University of Uberlandia, MG, Brazil.

ABSTRACT

The monitoring of welding processes is crucial industrial activity and, during the last years, studies and development have been carried out with emphasis on ISO 3834 demands. The monitoring of electrical signals (current and voltage) in welding is well established in the study and development of welding processes and procedures, and it is used in industries for tracking production lines, operation verification and product documentation. Within this context, the sound monitoring has been treated as a possibility for monitoring and tracking welding processes, with limitations justified by its lack of robustness against external noise interference. One of the objectives of using monitoring in welding is to assess criteria that indicate operational conditions with regularity. The study of metal transfer regularity in short-circuit welding process has been carried out by electrical signals monitoring and by using the Regularity Index (IV_{CC}), among others. Therefore, this work employs the sound signal from the conventional short-circuit MAG for determining the Regularity Sound Index (IV_{CCS}), with the consequent development of an embedded, portable, low cost system for monitoring and evaluation of the process regularity. From the analyses of process regularity, the developed system proposes improvement suggestion. This is carried out by an implement algorithm that processes the sound signal and determines the IV_{CCS} and, by using a database, proposes new adjustment in welding parameters. All of these steps are carried out by an embedded, portable, versatile and easy-to-use system

Keywords: Monitoring, Sound, Welding, Short Circuit, Regularity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistema de Monitoramento Sonoro para Soldagem – SiMoSS (Fonte: Próprio autor)	29
Figura 2.1 – Montagem para execução de soldagem MIG/MAG (Nascimento, 2015)	32
Figura 2.2 – Mapa de transferência didática – adaptado de (Vilarinho, 2007).....	33
Figura 2.3 – Ciclo de transferência metálica por curto-circuito (Souza, 2010).....	33
Figura 2.4 – Sequência de passos da técnica top-down (WOLF, 2001).....	46
Figura 2.5 – Exemplo de sinal estacionário e não estacionário e suas respectivas DFT (Mello, 2015)	47
Figura 2.6 – Exemplo de Janelamento para cálculo da FFT (Mello, 2015).....	48
Figura 2.7 – Fundamento da Transformada <i>Wavelet</i> (Mello, 2015).....	48
Figura 2.8 – Transformada <i>Wavelet</i> sinal sonoro (Soldagem MAG Curto-Circuito), Janelamento Haar e sete níveis (Fonte: Próprio autor)	49
Figura 2.9 – Exemplo do histograma de um sinal sonoro (Fonte: Próprio autor).....	49
Figura 2.10 – Forma Esquemático de um ECG (Fonte: Próprio autor).....	50
Figura 2.11 – Contração prematura ventricular. Extraído do registro 100, intervalo da grade: 0,2 s, 0,5 mV (Physionet, 2006).....	50
Figura 2.12 - Complexos QRS detectados no exame com filtros em amplitude e no tempo (Madeiro, Cortez <i>et al.</i> , 2004).....	51
Figura 2.13 – Ilustração de filtros por amplitude e no tempo (distância entre os picos)	52
Figura 2.14 – Ilustração de métodos de eliminação de picos por proeminência (Fonte: Próprio autor)	52
Figura 2.15 – Mapeamento de relevo submarino por sonar (NOAA, 2012).....	53
Figura 2.16 – Ultrassom 3D colorido de um feto humano (Gestação 3D, 2015)	54
Figura 2.17 – Divisões básicas do ouvido humano (Spada, 2012b).....	54
Figura 2.18. Limiar da Audição para Diferentes Frequências (Spada, 2012b)	55
Figura 2.19 – O microfone, ao captar o som, traduz as variações de pressão acústica (dB) na sua entrada em variações de tensão elétrica (mV) (Fonseca, Santos <i>et al.</i> , 2002)	56

Figura 2.20. a) Esquema de funcionamento de microfone de eletreto (condensador pré-polarizado), b) exemplos comerciais (Riffel, 2001; Pcb Piezotronics Inc, 2012)	61
Figura 2.21 - Exemplo de Microfone tipo <i>Shotgun</i>	61
Figura 2.22 - Diagrama polar de um microfone Shotgun. (Spada, 2012a)	61
Figura 2.23 – Esquerda: Arco de Solda (Filho, 2015). Direita: Alto Falante	65
Figura 2.24 – Formas de onda do som para diferentes formas de onda da corrente de solda ($f = 500\text{Hz}$, $I_m = 100\text{A}$). A) Retangular; B) Dente de Serra; C) Triangular e D) Seno (Arata, Inoue <i>et al.</i> , 1980)	66
Figura 2.25 – Densidade Espectral (PSD) de uma soldagem à plasma com polaridade variável (VPPAW) (Saad, Wang <i>et al.</i> , 2006)	67
Figura 2.26. Correlação entre os sinais de corrente e sonoro. I – Ruído por impulso, II – Ruído turbulento (Cudina, Prezelj <i>et al.</i> , 2008)	68
Figura 4.1 – Esquerda: Mesa em construção. Direita: Mesa em funcionamento	74
Figura 4.2 – <i>Hardware</i> para controle da bancada experimental	74
Figura 4.3 – Interface de controle da bancada experimental desenvolvida	75
Figura 4.4 – Fonte 1: utilizada na referência da parte da solda. Fonte 2: utilizada para alimentação de todo circuito e referência para o sistema de aquisição	76
Figura 4.5 – Placa de circuito impresso utilizada para realização do condicionamento dos sinais	77
Figura 4.6 – Circuito de entrada para a tensão: divisor de tensão e isolamento	77
Figura 4.7 – Circuito de filtro analógico para a tensão: Butterworth de segunda ordem em 1591 Hz	78
Figura 4.8 – Circuito de condicionamento da corrente	79
Figura 4.9 - Circuito de condicionamento para a velocidade de alimentação	79
Figura 4.10 – Microfone Brüel & Kjaer Type 4957	81
Figura 4.11 – Microfone de Eletreto - PANASONIC WM SERIES ELECTRET CIRCUIT WM-53C01. (Fonte: Próprio autor)	81
Figura 4.12 – Circuito elétrico de condicionamento do sinal do microfone de eletreto	82
Figura 4.13 – Esquerda: Esquema da Placa de Condicionamento do Microfone de Eletreto. Direita: Placa Montada	82
Figura 4.14 - Comparativo dos microfones com forma de onda em 20 Hz (Fonte: Próprio autor)	84

Figura 4.15 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 200 Hz (Fonte: Próprio autor)	85
Figura 4.16 – Observação de altas frequências inseridas pela captação – Onda Quadrada de 600 HZ (Fonte: Próprio autor)	86
Figura 4.17 – Esquerda: Projeto de Construção. Direita: Impresso e Montado (Fonte: Próprio autor)	86
Figura 4.18 – Comparação entre sinais elétrico (acima) e sonoro (meio – tensão, baixo – corrente) (Fonte: Próprio autor)	87
Figura 4.19 - Ilustração dos tempos de atraso entre sinais elétrico e sonoro para distância de 200 mm (Fonte: Próprio autor).....	88
Figura 4.20 – Relação entre sinais de azul: tensão, roxo: potência e preto: pressão sonora(Fonte: Próprio autor)	89
Figura 4.21 - Comparativo entre sinal sonoro adquiridos à 200, 400 e 800 mm do arco elétrico com destaque para o impulso sonoro de extinção do arco (Fonte: Próprio autor)	91
Figura 4.22 – Impulsos sonoros provenientes da extinção e ignição do arco (impulsos sonoros I e II, respectivamente) (Fonte: Próprio autor)	91
Figura 4.23 - Ilustração dos tempos de curto-circuito e abertura do arco para sinais elétrico e sonoro (Fonte: Próprio autor)	93
Figura 4.24 – a) Esquema de funcionamento da perfilografia (Bálsamo, Vilarinho <i>et al.</i> , 2000); b) imagem obtida pela técnica (Fonte: Próprio autor)	96
Figura 4.25 – Sistema de sincronia entre curto-circuito e imagem por perfilografia (Fonte: Próprio autor)	97
Figura 4.26 – Funcionamento do dispositivo de disparo sincronizado da câmera de alta velocidade (Fonte: Próprio autor)	97
Figura 4.27 – Sinal de disparo da câmera sincronizado com o sinal de tensão do arco (Fonte: Próprio autor)	98
Figura 4.28 – Sinal de tensão mostrando que o sistema realiza a captura de imagem apenas se a tensão do arco for superior ao limiar estabelecido (10V) (Fonte: Próprio autor)	98
Figura 4.29 – Critério 1 de comprimento de arco durante o curto-circuito (Fonte: Próprio autor)	99

Figura 4.30 – Critério 2 de comprimento de arco durante o curto-circuito (Fonte: Próprio autor)	99
Figura 4.31 – Montagem Experimental. 1 – Fonte de Soldagem Miller, 2 – Laser (Perfilografia), 3 – Microfone, 4 – Mesa XZ, 5 – Lentes da Câmera, 6 – Computador (Fonte: Próprio autor)	100
Figura 4.32 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_01a – 110A (Fonte: Próprio autor)	103
Figura 4.33 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_03b – 160A (Fonte: Próprio autor)	104
Figura 4.34 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_04d – 160A (Fonte: Próprio autor)	104
Figura 4.35 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_13d – 110A (Fonte: Próprio autor)	105
Figura 4.36 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_14b – 110A (Fonte: Próprio autor)	106
Figura 4.37 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_15 ^a – 160A (Fonte: Próprio autor)	107
Figura 4.38 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_16 ^a – 160A (Fonte: Próprio autor)	107
Figura 4.39 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_18 ^a – 110A (Fonte: Próprio autor)	108
Figura 4.40 – Detalhe do ruído gerado pela abertura do pré-gás (fluxo do gás de proteção) (Fonte: Próprio autor)	109
Figura 4.41 – Relações de percentual entre os tempos de arco aberto e curto-circuito (Fonte: Próprio autor)	112
Figura 4.42 – Amostra de Sinal do teste_01a para (a) um e (b) cinco períodos de curto, com sua FFT. (Fonte: Próprio autor)	114
Figura 4.43 – Amostra de Sinal do teste_01a para 5 s de soldagem, com sua FFT (Fonte: Próprio autor)	115
Figura 4.44 – Amostra de Sinal do teste_17a para (a) um e (b) cinco períodos de curto, com suas FFT (Fonte: Próprio autor)	116
Figura 4.45 – Amostra de Sinal do teste_17a para 5 s de soldagem, com sua FFT. (Fonte: Próprio autor)	117

Figura 4.46 – (a) Espectro de frequência do teste_16a com detalhe em baixas frequências; (b) Detalhe dos sinais do teste_16 ^a (Fonte: Próprio autor).....	118
Figura 4.47 – Exemplo de oscilação do sinal sonoro – teste_16a. (Fonte: Próprio autor)	119
Figura 4.48 – Resultado demonstrativo do sinal filtrado em 4 – 8 kHz e amostrado em 25 kS/s (Fonte: Próprio autor)	120
Figura 4.49 – Detalhes do sinal sonoro e RMS (2*TOSC) do teste_01a e teste09_c. (Fonte: Próprio autor)	122
Figura 4.50 – Detalhes do sinal sonoro e RMS (2*TOSC) do teste_16a. (Fonte: Próprio autor)	122
Figura 4.51 – Resposta da aplicação da técnica do valor RMS (2*TOSC) móvel para um sinal considerado bom. (Fonte: Próprio autor)	123
Figura 4.52 – Resposta da aplicação da técnica do valor RMS (2*TOSC) móvel para um sinal considerado ruidoso (baixa frequência de curto e ruído de fundo). (Fonte: Próprio autor)	123
Figura 4.53 – Picos da curva RMS do sinal sonoro (Fonte: Próprio autor).....	125
Figura 4.54 – Estratificação dos picos na curva RMS (Fonte: Próprio autor)	126
Figura 4.55 – Picos da curva RMS (em vermelho) para 5s e seu histograma (Fonte: Próprio autor)	126
Figura 4.56 – Exemplo da limpeza dos picos de abertura de arcos de acordo com o tempo mínimo de curto-circuito ($tccmin \geq 2ms$) (Fonte: Próprio autor).....	127
Figura 4.57 – Picos da curva RMS (em vermelho) para 5 s após limpeza por $tccmin$ e seu histograma (Fonte: Próprio autor)	127
Figura 4.58 – Determinação do limiar de amplitude para picos de abertura de arco para o teste 1 (Fonte: Próprio autor)	128
Figura 4.59 – Picos pré-selecionados de aberturas de arco (Fonte: Próprio autor)	129
Figura 4.60 – Detalhe mostrando a pré-seleção dos picos de abertura de arco (Fonte: Próprio autor)	129
Figura 4.61 – Pré-seleção dos picos de abertura de arco para um sinal com perturbações de fundo (Fonte: Próprio autor)	130
Figura 4.62 – Detalhe da pré-seleção dos picos de abertura de arco para um sinal com perturbações de fundo (Fonte: Próprio autor)	130

Figura 4.63 – Determinação da faixa de tempo para busca do pico de apagamento do arco anterior a abertura de um novo arco (Fonte: Próprio autor).....	131
Figura 4.64 – Parte Frontal MEB, sendo:.....	138
Figura 4.65 – Parte Posterior MEB, sendo:.....	139
Figura 4.66 – Placa com micro-controlador com encaixe compatível com MEB	139
Figura 4.67 – Esquerda: Placa Raspberry Pi Model B (Raspi). Direita: Interface Gráfica de toque compatível com a Raspi	140
Figura 4.68 – Módulo OEM SMPS. (Fonte: Próprio autor).....	141
Figura 4.69 – Imagem da Bateria TX 9xr Safe N2200.3S.25C / 2200mAh / 3S1P / 3 Cell / 11.1V - 139g - 100x33x19mm.....	142
Figura 4.70 – Esquerda: Módulo OEM (Interno). Direita: Carregador externo.....	143
Figura 4.71 – Circuito de Isolamento entre a FAE e FAB proposto para uso na alimentação do sistema portátil.....	143
Figura 4.72 – Apple iPhone 4	146
Figura 4.73 – Interface com o Usuário do SiMoSS IVccS (Fonte: Próprio autor) ...	149
Figura 4.74 – Resultado de avaliação do teste_01a pelo SiMoSS IVccS (Fonte: Próprio autor)	149
Figura 4.75 – Esquerda: curvas de ajuste da tensão. Direita: superfície de ajuste de resposta tensão velocidade de alimentação para Ar+8%CO ₂ e ER70S-6 de 1.2mm (Fonte: Próprio autor)	152
Figura 4.76 – Esquerda: curvas de ajuste da tensão. Direita: superfície de ajuste de resposta tensão velocidade de alimentação para Ar+15%CO ₂ e ER70S-6 de 1.2mm (Fonte: Próprio autor)	152
Figura 4.77 – Esquerda: curvas de ajuste da tensão. Direita: superfície de ajuste de resposta tensão velocidade de alimentação para Ar+25%CO ₂ e ER70S-6 de 1.2mm (Fonte: Próprio autor)	153
Figura 4.78 – Estimativa de IVcc em 1.276 para Ar+25%CO ₂ ; ER70S-6 de 1.2mm; 3,2 m/min e 17,0 V (Fonte: Próprio autor).....	154
Figura 4.79 – Exemplo de aplicação dos critérios de sugestões do ajuste de parâmetros (baseados unicamente na tensão regulada) (Fonte: Próprio autor)	156
Figura 4.80 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software embarcado, de acordo com classificação do Caso, conforme descrito. (Fonte: Próprio autor).....	159

Figura 4.81 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software para mais informações sobre as medidas. (Fonte: Próprio autor)	159
Figura 4.82 – Cordões de soldas dos testes de validação (como escala adotar largura da chapa de 25,4 mm – 1”) (Fonte: Próprio autor).....	162
Figura 4.83 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 20 e 60 Hz. (Fonte: Próprio autor)	179
Figura 4.84 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 100 e 200 Hz. (Fonte: Próprio autor)	180
Figura 4.85 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 600 E 1000 Hz. (Fonte: Próprio autor)	180
Figura 4.86 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 2000 e 6000 Hz. (Fonte: Próprio autor)	181
Figura 4.87 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 10000 Hz. (Fonte: Próprio autor)	181
Figura 4.88 – Detalhes da Tensão de Curto das Soldagens com 000%Ar+100%CO ₂ , ER70S-6 1,0 mm. (Fonte: Próprio autor)	183
Figura 4.89– Detalhes da Tensão de Curto das Soldagens com 075%Ar+025%CO ₂ , ER70S-6 1,0 mm. (Fonte: Próprio autor)	184
Figura 4.90– Detalhes da Tensão de Curto das Soldagens com 098%Ar+002%O ₂ , Inox ER308L 1,0 mm. (Fonte: Próprio autor)	185
Figura 4.91 – Detalhe dos sinais do teste_01a (Fonte: Próprio autor).....	188
Figura 4.92 – Observação de trecho dos sinais do teste_01a (Fonte: Próprio autor)	188
Figura 4.93 – Detalhe dos sinais do teste_02d (Fonte: Próprio autor).....	189
Figura 4.944.95 – Observação de trecho dos sinais do teste_02d (Fonte: Próprio autor)	189
Figura 4.96 – Detalhe dos sinais do teste_03b (Fonte: Próprio autor).....	190
Figura 4.97 – Observação de trecho dos sinais do teste_03b (Fonte: Próprio autor)	190
Figura 4.98 – Detalhe dos sinais do teste_04d (Fonte: Próprio autor).....	191
Figura 4.99 – Observação de trecho dos sinais do teste_04d (Fonte: Próprio autor)	191
Figura 4.100 – Detalhe dos sinais do teste_05a (Fonte: Próprio autor).....	192

Figura 4.101 – Observação de trecho dos sinais do teste_05a (Fonte: Próprio autor)	192
Figura 4.102 – Detalhe dos sinais do teste_06c (Fonte: Próprio autor)	193
Figura 4.103 – Observação de trecho dos sinais do teste_06c (Fonte: Próprio autor)	193
Figura 4.104 – Detalhe dos sinais do teste_07d (Fonte: Próprio autor)	194
Figura 4.105 – Observação de trecho dos sinais do teste_07d (Fonte: Próprio autor)	194
Figura 4.106 – Detalhe dos sinais do teste_08d (Fonte: Próprio autor)	195
Figura 4.107 – Observação de trecho dos sinais do teste_08d (Fonte: Próprio autor)	195
Figura 4.108 – Detalhe dos sinais do teste_09c (Fonte: Próprio autor)	196
Figura 4.109 – Observação de trecho dos sinais do teste_09c (Fonte: Próprio autor)	196
Figura 4.110 – Detalhe dos sinais do teste_10a (Fonte: Próprio autor)	197
Figura 4.111 – Observação de trecho dos sinais do teste_10a (Fonte: Próprio autor)	197
Figura 4.112 – Detalhe dos sinais do teste_11c (Fonte: Próprio autor)	198
Figura 4.113 – Observação de trecho dos sinais do teste_11c (Fonte: Próprio autor)	198
Figura 4.114 – Detalhe dos sinais do teste_12b (Fonte: Próprio autor)	199
Figura 4.115 – Observação de trecho dos sinais do teste_12b (Fonte: Próprio autor)	199
Figura 4.116 – Detalhe dos sinais do teste_13d (Fonte: Próprio autor)	200
Figura 4.117 – Observação de trecho dos sinais do teste_13d (Fonte: Próprio autor)	200
Figura 4.118 – Detalhe dos sinais do teste_14b (Fonte: Próprio autor)	201
Figura 4.119 – Observação de trecho dos sinais do teste_14b (Fonte: Próprio autor)	201
Figura 4.120 – Detalhe dos sinais do teste_15a (Fonte: Próprio autor)	202
Figura 4.121 – Observação de trecho dos sinais do teste_15a (Fonte: Próprio autor)	202
Figura 4.122 – Detalhe dos sinais do teste_16a (Fonte: Próprio autor)	203

Figura 4.123 – Observação de trecho dos sinais do teste_16a (Fonte: Próprio autor)	203
Figura 4.124 – Detalhe dos sinais do teste_17e (Fonte: Próprio autor)	204
Figura 4.125 – Observação de trecho dos sinais do teste_17e (Fonte: Próprio autor)	204
Figura 4.126 – Detalhe dos sinais do teste_18a (Fonte: Próprio autor)	205
Figura 4.127 – Observação de trecho dos sinais do teste_18a (Fonte: Próprio autor)	205
Figura 4.128 – Detalhe dos sinais do teste_19c (Fonte: Próprio autor)	206
Figura 4.129 – Observação de trecho dos sinais do teste_19c (Fonte: Próprio autor)	206
Figura 4.130 – Detalhe dos sinais do teste_20b (Fonte: Próprio autor)	207
Figura 4.131 – Observação de trecho dos sinais do teste_20b (Fonte: Próprio autor)	207
Figura 4.132 – Espectro de Frequência do teste_01a para 5 segundos de soldagem.	210
Figura 4.133 – Espectro de Frequência do teste_02d para 5 segundos de soldagem.	210
Figura 4.134 – Espectro de Frequência do teste_03b para 5 segundos de soldagem.	211
Figura 4.135 – Espectro de Frequência do teste_04d para 5 segundos de soldagem.	211
Figura 4.136 – Espectro de Frequência do teste_05a para 5 segundos de soldagem.	212
Figura 4.137 – Espectro de Frequência do teste_06c para 5 segundos de soldagem.	212
Figura 4.138 – Espectro de Frequência do teste_07d para 5 segundos de soldagem.	213
Figura 4.139 – Espectro de Frequência do teste_08d para 5 segundos de soldagem.	213
Figura 4.140 – Espectro de Frequência do teste_09c para 5 segundos de soldagem.	214

Figura 4.141 – Espectro de Frequência do teste_10a para 5 segundos de soldagem.	214
Figura 4.142– Espectro de Frequência do teste_11c para 5 segundos de soldagem.	215
Figura 4.143– Espectro de Frequência do teste_12b para 5 segundos de soldagem.	215
Figura 4.144– Espectro de Frequência do teste_13d para 5 segundos de soldagem.	216
Figura 4.145– Espectro de Frequência do teste_14b para 5 segundos de soldagem.	216
Figura 4.146– Espectro de Frequência do teste_15a para 5 segundos de soldagem.	217
Figura 4.147– Espectro de Frequência do teste_16a para 5 segundos de soldagem.	217
Figura 4.148– Espectro de Frequência do teste_17e para 5 segundos de soldagem.	218
Figura 4.149– Espectro de Frequência do teste_18a para 5 segundos de soldagem.	218
Figura 4.150– Espectro de Frequência do teste_19c para 5 segundos de soldagem.	219
Figura 4.151– Espectro de Frequência do teste_20a para 5 segundos de soldagem.	219
Figura 4.152 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($0.5 \cdot TOSC \rightarrow 0,0925 \text{ ms} \rightarrow 3$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	220
Figura 4.153 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($1.0 \cdot TOSC \rightarrow 0,185 \text{ ms} \rightarrow 5$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	220
Figura 4.154 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($1.5 \cdot TOSC \rightarrow 0,2775 \text{ ms} \rightarrow 7$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	221
Figura 4.155 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($2.0 \cdot TOSC \rightarrow 0,370 \text{ ms} \rightarrow 9$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	221

Figura 4.156 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($2.5 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 0,4625 \text{ ms} \rightarrow 11$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	222
Figura 4.157 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($3.0 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 0,555 \text{ ms} \rightarrow 13$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	222
Figura 4.158 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($5.5 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 1,0175 \text{ ms} \rightarrow 25$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	223
Figura 4.159 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($8.0 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 1,48 \text{ ms} \rightarrow 37$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	223
Figura 4.160 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($11.0 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 2,035 \text{ ms} \rightarrow 51$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	224
Figura 4.161 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($13 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 2,405 \text{ ms} \rightarrow 61$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).	224
Figura 4.162 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 01 e 02.	225
Figura 4.163 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 03 e 04.	225
Figura 4.164 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 05 e 06.	225
Figura 4.165 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 07 e 08.	226
Figura 4.166 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 09 e 10.	226
Figura 4.167 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 11 e 12.	226
Figura 4.168 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 13 e 14.	227
Figura 4.169 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 15 e 16.	227

Figura 4.170 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 17 e 18.
..... 227

Figura 4.171 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 19 e 20.
..... 228

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Resultados comparativos da determinação do IV_{cc} através de monitoramento elétrico e sonoro.....	93
Tabela 4-2 – Planejamento experimental fatorial completo realizado.....	95
Tabela 4-3 – Proposição inicial para as condições operacionais.....	95
Tabela 4-4 –Condições operacionais utilizadas.....	99
Tabela 4-5 – Tabela de ensaios realizados para verificação de influência de parâmetros sobre o comportamento do som e do IV_{cc}	101
Tabela 4-6 – Resultados da avaliação dos sinais elétricos.....	102
Tabela 4-7 – Avaliação dos tempos percentuais médios de curto.....	111
Tabela 4.8 – Frequências de oscilação do sinal sonoro.	119
Tabela 4-9 – Resultados do processamento dos sinais pelo algoritmo.....	132
Tabela 4-10 – Dados técnicos da FAE especificada.....	141
Tabela 4-11 – Recursos disponíveis no dispositivo Apple iPhone 4.....	146
Tabela 4-12 – Resultado de processamento comparativo para o teste_01a.....	149
Tabela 4-13 - Parâmetros utilizados em banco de dados.....	151
Tabela 4-14 – Variações do valor de IV_{cc} para um mesmo processo, calculados com base nos resultados da Tabela 4-23	156
Tabela 4-15 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software computacional, de acordo com a configuração dos parâmetros de soldagem	157
Tabela 4-16 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software computacional, de acordo com classificação do Caso, conforme descrito.	158
Tabela 4-17 – Repetições de ensaios a serem realizados – Fatorial Fracionário ..	160
Tabela 4-18 – Novos ensaios de soldagem a serem realizados.....	160
Tabela 4-19– Resultados dos sinais elétricos para as novas soldas de validação.	161
Tabela 4-20– Resultados dos de regularidade para as novas soldas de validação	162
Tabela 4-21 – Dados que compõem o banco de dados do sistema atual.	176
Tabela 4-22 – Tabela de avaliação da $U_{cc_{ref}}$ no IV_{cc} e Frequência de Curto-circuito	185
Tabela 4-23 – Tabela completa de resultados do testes para avaliação de parâmetros	208

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DBCP	Distância bico de contato peça
Dptaa	Desvio Padrão do Tempo de Arco Aberto
Dptcc	Desvio Padrão do Tempo de Curto-circuito
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GMAW	Gas Metal Arc Welding
I	Corrente
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHM	Interface homem-máquina
Im	Corrente Média
IVcc	Índice Vilarinho de Regularidade
IVccEsperado	Índice de Regularidade Esperado para o Processo
IVccMinimo	Índice de Regularidade Mínimo para o Processo
IVccS	Índice Vilarinho de Regularidade Sonoro
LCD	Display de cristal líquido
LED	Diodo Emissor de Luz
MIG	Metal Inert Gas Welding
MAG	Metal Active Gas Welding
MCU	Dispositivo microcontrolador
n	Número de pontos adquiridos discretamente
RMS	Valor eficaz
Taa	Tempo de Arco Aberto
Tcc	Tempo de Curto-circuito
Tanalise	Tempo de Análise de IVcc
Tmaa	Tempo Médio de Arco Aberto
Tmcc	Tempo Médio de Curto-circuito
U	Tensão
Ucc _{ref}	Tensão de referência para curto-circuito
Um	Tensão Média
VALim	Velocidade de alimentação

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	26
1 Introdução	26
1.1 Objetivos do Trabalho.....	28
1.2 Organização da Tese	29
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2 Revisão Bibliográfica	31
2.1 Soldagem MIG/MAG	31
2.1.1 Soldagem MAG com Transferência por Curto-circuito.....	33
2.1.1.1 Fatores que Influenciam na Transferência por Curto-Circuito	35
2.1.1.2 Estabilidade e Regularidade no Curto-circuito	37
2.1.1.3 Critério Laprosolda para Regularidade da Transferência Metálica em modo Curto-circuito.....	39
2.1.1.3.1 Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota - F_{corte}	39
2.1.1.3.2 Índice de Regularidade – IV_{cc}	40
2.2 Instrumentação, Monitoramento, Sistemas Embarcados e Processamento Digital de Sinais.....	41
2.3 Monitoramento Sonoro	52
2.3.1 O Som	52
2.3.2 Ouvido Humano – O Microfone Humano Natural.....	54
2.3.3 Captação do Som.....	56
2.3.3.1 Microfones Eletrônicos	57
2.3.3.1.1 O que é um Microfone	57
2.3.3.1.2 Diferentes tipos de Microfones	58
2.3.4 Som <i>versus</i> Áudio	62
2.4 Monitoramento em Soldagem	62
2.4.1 Abordagens em Monitoramento de Processos de Soldagem	63
2.4.2 Monitoramento Sonoro em Soldagem.....	64
SEQUÊNCIA METODOLÓGICA	70
3 Visão Geral da Metodologia de Trabalho	70
3.1 Etapa A – Bancada Experimental	70
3.2 Etapa B – Viabilidade Técnica.....	71
3.3 Etapa C – Processamento de Sinais	71
3.4 Etapa D – O Sistema de Monitoramento Sonoro (SiMoSS).....	71

3.5 Etapa E – Processo Decisório.....	71
3.6 Etapa F – Validação do Sistema	72
DESENVOLVIMENTO, RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4 Desenvolvimento Experimental e Resultados.....	73
4.1 Etapa A – Bancada Experimental	73
4.1.1 Mesa de Movimentação XZ Automatizada.....	73
4.1.2 Sistema de Instrumentação e Monitoramento.....	75
4.1.2.1 Sinais Elétricos.....	75
4.1.2.1.1 Tensão	77
4.1.2.1.2 Corrente	78
4.1.2.1.3 Velocidade de Alimentação.....	79
4.1.2.2 Sinal Sonoro	80
4.1.2.2.1 Microfone de Referência	80
4.1.2.2.2 Microfone de Eletreto Proposto.....	81
4.1.2.2.3 Avaliação dos Microfones	83
4.2 Etapa B – Viabilidade Técnica.....	86
4.2.1 Relação entre o Sinais Elétricos e o Sinal Sonoro.....	87
4.2.2 Influência da Distância entre o Microfone e o Arco de Soldagem.....	90
4.2.3 Determinação do IVcc pelo Som - IVccS	92
4.2.4 Influência dos Parâmetros e Consumíveis de Soldagem sobre o Som e na Determinação do IVccS.....	93
4.3 Etapa C – Processamento do Sinal Sonoro.....	109
4.3.1 Princípios Relevantes dos Processos de Soldagem por Curto-circuito para o Processamento do Sinal	110
4.3.2 Estudo das Características dos Sinais Sonoros	112
4.3.2.1 Domínio da Frequência	113
4.3.2.2 Domínio do Tempo.....	121
4.3.3 Algoritmos de Determinação do IVcc pelo Som (IVccS)	123
4.3.3.1 Algoritmo Final Implementado – Exemplo passo-a-passo	124
4.3.3.1.1 Etapa 1 – Identificação dos Picos	124
4.3.3.1.2 Etapa 2 – Estratificação e Detecção dos Picos de Abertura de Arcos.....	125
4.3.3.1.3 Etapa 3 – Detecção dos Picos de Apagamento dos Arcos.....	130
4.3.3.1.4 Etapa 4 – Cálculo do IVccS.....	131
4.4 Etapa D – O Sistema de Monitoramento Sonoro (SiMoSS).....	134
4.4.1 Etapas de Funcionamento do Sistema de Monitoramento Idealizado	135
4.4.1.1 Etapa 1 – Checagem e Calibração	135

4.4.1.2 Etapa 2 – Aquisição do Sinal Sonoro.....	135
4.4.1.3 Etapa 3 – Processamento do Sinal	135
4.4.1.4 Etapa 4 – Proposição de Melhoria	136
4.4.2 Sistema Físico de Monitoramento	136
4.4.2.1 Desenvolvimento de Tecnologia e Hardware Independente.....	137
4.4.2.2 Utilização de Placas de Desenvolvimento de Terceiros	137
4.4.2.2.1 Placas de Desenvolvimento	138
4.4.2.2.2 Sistema de Alimentação.....	140
4.4.3 Utilização de Hardware e Software Comercial – <i>Smartphones</i>	144
4.4.3.1 Sistema Físico e Interface com Usuário.....	145
4.4.3.2 Implementação e Conclusões	147
4.5 Etapa E – Processo Decisório.....	150
4.5.1 Banco de Dados de Soldagem.....	150
4.5.2 Estimativa do IVcc.....	151
4.5.3 Sugestões de Ajuste de Parâmetros para o Usuário	154
4.1 Etapa F – Validação do SiMoSS	159
CONCLUSÕES	164
TRABALHOS FUTUROS.....	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	169
ANEXOS	176
Anexo I – Banco de Dados de Soldagem (item 4.5.1)	176
APÊNDICES.....	179
Apêndice I – Comparativo entre Microfones (Item 4.1.2.2.3)	179
Apêndice II – Estudo da Tensão de Referência para Curto-circuito para Determinação do IVcc pelo Sinal da Tensão (Item 4.2.3)	182
Apêndice III – Resultados das Soldagens para Avaliação dos Parâmetros (item 4.2.4) ...	188
Apêndice IV – Espectros de Frequência dos Sinais Sonoros (item 4.3.2.1).....	210
Apêndice V – Estudo do número de pontos para cálculo do RMS móvel (item 4.3.2.2)	220
Apêndice VI – Estudo da Determinação do Limiar de Amplitude dos Picos de Abertura de Arcos (4.3.3.1.2).....	225

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1 Introdução

Nos processos de fabricação mecânica, em especial os de união permanente de metais, a soldagem a arco tem sido um dos mais importantes e utilizados na indústria. Com sua grande utilização e, sendo a soldagem um processo especial de fabricação – a garantia da qualidade da junta soldada e inspeções contra imperfeições não podem ser realizadas apenas após sua finalização (Iso3834, 2005) – o desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos e métodos de monitoramento e avaliação contínua dos processos são cada vez mais necessários.

Existem diversos equipamentos, de diferentes fabricantes, que realizam monitoramento dos parâmetros e variáveis dos processos de soldagem, cada um com seu enfoque de processo específico, com suas vantagens e limitações. Equipamentos programáveis também estão disponíveis no mercado de diferentes fabricantes, que são adaptáveis ao monitoramento da soldagem com a utilização de condicionadores de sinais e transdutores específicos, sendo estes bastante utilizados em ambientes de pesquisa e desenvolvimento de processos, enquanto os primeiros são utilizados tanto para pesquisa quanto na indústria.

A tendência atual da tecnologia, principalmente voltada à manufatura industrial, segue na criação de equipamentos de uso específico, prático e simplificado. Tais equipamentos são dedicados, com a eliminação de circuitos adaptativos e maior facilidade de instalação/operação, já que o equipamento de monitoramento deve auxiliar o usuário/operador a melhorar o processo, e não ser mais um “obstáculo”, apresentando problemas e dificuldades de uso. Além disso, se o mesmo for aplicado em ambientes fabris, o equipamento deve-se adaptar ao meio e não o contrário.

Dispositivos móveis que realizam a configuração, monitoramento, controle e avaliação de processos de soldagem sem fios é uma tendência atual, tendo como grande impulso a crescente quantidade de tecnologias de comunicação sem fio e o grande desenvolvimento de sistemas embarcados vez mais ricos em recursos, tanto

com o uso de *hardware* mais poderosos como de *softwares* capazes de realizar tarefas complexas.

Assim, partindo-se de trabalhos já realizados para a construção de dispositivos de monitoramento sem fios com base em dispositivos de medição de sinais (corrente, tensão e velocidade de alimentação) diretamente na fonte de soldagem (Machado, 2011), aliado à trabalhos de estudos sobre o som produzido pelos processos de [(Arata, Inoue *et al.*, 1979a), (Arata, Inoue *et al.*, 1979b), (Arata, Inoue *et al.*, 1980) e (Arata, Inoue *et al.*, 1981)], bem como equipamentos desenvolvidos no Laprosolda/UFU, que executam a função de alto falante a partir do arco elétrico (variação do arco elétrico de acordo com uma entrada de som) (Nascimento, Vilarinho *et al.*, 2015), é que surgiu a ideia da construção de um dispositivo de monitoramento e avaliação da regularidade de processos de soldagem por instrumentação sonora. Assim, tornando o dispositivo totalmente desacoplado do sistema produtivo (processo de soldagem) quanto a sensores/transdutores, acredita-se ser possível contribuir para o estado da arte em dispositivos de medição, controle e avaliação de processos de soldagem.

A instrumentação por som de processos de soldagem surgiu da observação de que a experiência e habilidade do soldador, em processos manuais, é fundamental para se obter soldas de boa qualidade (Pires, Loureiro *et al.*, 2006). Para tal, o mesmo se utiliza da experiência para selecionar os parâmetros de soldagem com base em procedimentos já anteriormente realizados, sendo ele capaz de:

- selecionar o tipo de gás de proteção, tipo e diâmetro de metal de adição, tensão e corrente mais adequados ao caso;
- ajustar continuamente as variáveis do processo observando a poça de solda ou pelo som gerado pelo arco/transferência metálica da solda;
- manter a tocha na posição correta com precisão e estabilidade, o que é fundamental para uma solda boa e regular.

Com a mesma tendência de desenvolvimento de equipamentos e métodos voltados para uma aplicação comercial, onde há a procura por agilidade e praticidade de uso de equipamentos de monitoramento para avaliação de processos de soldagem enquanto os mesmos são realizados, seja por um engenheiro ou responsável técnico que pretende modificar o processo produtivo do cliente

apresentando novos produtos e mostrando na prática as vantagens da modificação realizando um teste rápido e simplificado, o presente trabalho se apresenta como um produto final de cunho científico e tecnológico para os profissionais do ramo de processos de soldagem. Ainda, justifica-se a aplicação de tecnologia sem fios, para trabalho em campo com menor alteração do ambiente, não atrapalhando a atividade industrial.

1.1 Objetivos do Trabalho

Como objetivo principal do trabalho, está o estudo e criação de uma metodologia de monitoramento do processo de soldagem MAG curto-circuito pelo som, com o consequente desenvolvimento de um sistema embarcado, portátil e de baixo custo para o monitoramento e avaliação da regularidade do processo e indicar formas de melhoria do mesmo. Em síntese, os objetivos específicos são:

- Verificar a viabilidade do uso do monitoramento sonoro para a determinação da regularidade da transferência metálica por curto-circuito em equipamento de soldagem o qual não há instrumentação elétrica (medição de corrente, tensão);
- Processar o sinal do som obtendo-se as características representativas do processos de soldagem por curto-circuito;
- Implementar um sistema portátil do tipo “aponta-e-pronto” (Figura 1.1) para monitoramento sonoro do processo de soldagem MAG curto-circuito convencional em módulo com interface de tela de toque com captura e processamento do sinal sonoro do processo de soldagem, onde o operador irá definir inicialmente os consumíveis e parâmetros utilizados no processo;
- Pelo processamento do Som, determinado o Índice de Regularidade da Transferência por Curto-circuito, o IV_{cc} , e com base nas informações inseridas no sistema, o sistema deverá propor estratégias para o operador “melhorar” (buscar maior regularidade) o processo: sendo, uma das propostas do trabalho, a alteração da tensão



Figura 1.1 – Sistema de Monitoramento Sonoro para Soldagem – SiMoSS (Fonte: Próprio autor)

1.2 Organização da Tese

Neste Capítulo I são abordadas as motivações para a realização deste trabalho, bem como seus objetivos principais e secundários.

A organização do documento será realizada conforme descrito nesta seção, buscando desta forma proporcionar uma leitura mais fluida e agradável ao leitor.

No Capítulo II é realizada uma revisão bibliográfica dos tópicos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho como um todo: breve revisão sobre soldagem MIG/MAG com foco na transferência metálica por curto-circuito, introdução à área de acústica com discussão sobre o som e seu monitoramento, monitoramento e instrumentação de processos de soldagem, breve revisão e introdução a sistemas embarcados e processamento digital de sinais.

No Capítulo III é apresentada uma visão geral do trabalho, descrevendo a metodologia de trabalho, criando uma sequência de etapas para a implementação do projeto do sistema de monitoramento sonoro.

No Capítulo IV tem-se o desenvolvimento experimental e resultados do projeto, detalhando e justificando todas as etapas do projeto, desde a construção de aparatos e dispositivos, passando pela análise de viabilidade do projeto até sua implementação, conclusão e avaliação (validação prática).

No Capítulo V são apresentadas as discussões gerais e as conclusões principais de todo o trabalho desenvolvido.

No Capítulo VI são sugeridas linhas de trabalho para o desenvolvimento de trabalhos futuros, de acordo com os resultados gerais obtidos.

No Capítulo VII são listadas todas as referências das citações realizadas ao longo do trabalho.

Nos Capítulos VIII e IX, Anexos e Apêndices respectivamente, seguem informação pertinentes ao trabalho, mas que puderam ser separadas do corpo do texto por uma melhor fluidez e exposição do tema.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 Revisão Bibliográfica

Como se trata de um trabalho que envolve diferentes áreas de conhecimento como estatística, engenharia elétrica, engenharia mecânica e engenharia de computação, há a necessidade de se realizar uma revisão bibliográfica sobre diversos assuntos que serão tratados e utilizados no desenvolvimento do trabalho.

Uma atenção especial deve ser realizada sobre a ideia do monitoramento do processo de soldagem por pressão sonora ou acústica, de onde vem a base do trabalho, e é o objeto principal de estudo, ou seja, criar uma metodologia de monitoramento do processo de soldagem MAG curto-circuito por intermédio do som verificando assim a regularidade do processo de soldagem por curto-circuito. Desta forma, uma revisão sobre acústica (área de conhecimento, da Física, que estuda o som e seus fenômenos) deve ser realizada, e em termos de soldagem o que é realizado com o uso da acústica, visto que é um assunto tratado por poucos pesquisadores e com aplicação restrita a objetivos e processos específicos de soldagem.

2.1 Soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem *MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas* (também *GMAW – Gas Metal Arc Welding*) é um processo de soldagem que se utiliza de um arco elétrico entre o arame-eletrodo e a poça de fusão (metal de base). O processo utiliza uma atmosfera de proteção gasosa, e não há aplicação de pressão entre as peças (Aws, 1991). A Figura 2.1 mostra a montagem para realização dos processos de soldagem por processo MIG/MAG.



Figura 2.1 – Montagem para execução de soldagem MIG/MAG (Nascimento, 2015)

A polaridade de trabalho convencional para este processo de soldagem é , comumente, corrente contínua em polaridade reversa (CC+). Correntes e Tensões na ordem de 50 – 600 A e 10 – 32 V, respectivamente são comuns ((Fortes, 2005) apud (Nascimento, 2015)).

Scotti e Ponomarev (2008) classificam a transferência metálica em dois tipos fundamentais: o natural e o controlado. No modo de transferência natural, a transferência metálica varia “naturalmente” dentro de uma faixa de corrente e níveis de tensão de arco. Já na transferência controlada, a fonte de soldagem controla o formato de onda de corrente, de forma que a transferência ocorra de acordo com o controle dos parâmetros elétricos (Vilarinho, 2007)

O modo natural é classificado em duas classes de transferência, sendo por curto- circuito e por voo livre (globular, goticular e explosiva). De uma forma mais didática, é possível compilar estes modos de transferência em um gráfico denominado de mapa de transferência (Figura 2.2).

Scotti e Ponomarev (2008) afirmam, que quanto a proteção gasosa, o fluxo adequado para praticamente todas as condições de soldagem é de 10 a 16 l/min. Valores acima destes são normalmente ineficiente.

Além de gases de proteção puros, misturas também são comumente utilizadas. Adições de argônio ao dióxido de carbono diminuem os níveis de respingo em soldagens por curto-circuito, normalmente observados com o dióxido de carbono puro. A mistura Ar+25%CO₂ é comumente utilizada e conhecida como o gás usado na soldagem MAG (agora somente com gás ativo) com transferência por curto-circuito.

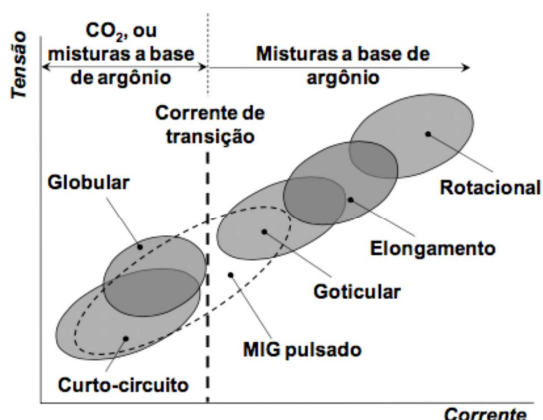


Figura 2.2 – Mapa de transferência didática – adaptado de (Vilarinho, 2007)

2.1.1 Soldagem MAG com Transferência por Curto-circuito

A transferência por curto-circuito ocorre entre 13 a 24 V classicamente, ou seja, para arcos curtos e nesse modo de transferência, o arame entra em curto-circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo (Scotti e Ponomarev, 2008). Needham (1985) afirma que a frequência de curto varia em torno de 50–90 curtos por segundo, se consideradas leituras para médias com intervalos maiores que 0,5 s. Segundo (Adolfsson, Bahrami *et al.*, 1999) está entre 50–110 curtos por segundo. A Figura 2.3 ilustra as etapas do modo curto-circuito convencional em função do comportamento da gota.

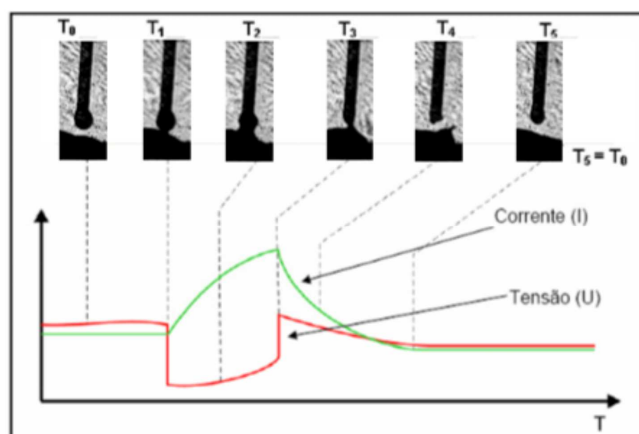


Figura 2.3 – Ciclo de transferência metálica por curto-circuito (Souza, 2010)

Souza (2010) explica o processo de curto-circuito como:

- T0 é a fase de formação e crescimento da gota na ponta do arame eletrodo. À medida que a gota é formada, o comprimento do arco diminui;
- Em T1, a gota formada toca a poça de fusão, a tensão cai bruscamente e a corrente aumenta a taxas elevadas (momento do curto-circuito – extinção do arco);
- Em T2, parte da gota já foi transferida para a poça de fusão e uma ponte formada entre o eletrodo e a poça de fusão começa a se romper;
- Em T3 ocorre o rompimento da ponte metálica e a tensão sobe caracterizando um pico de ignição ou reabertura do arco. A corrente neste mesmo instante começa a cair para valores de regime;
- Em T4, a tensão e corrente decrescem para valores de regime e começa a formar uma nova gota na ponta do eletrodo;
- Em T5 reinicia o ciclo de transferência metálica, ocorrendo o mesmo que em T0.

Com relação à aplicabilidade da transferência por curto-circuito, Vilarinho (2007) destaca que este modo de transferência tem sua aplicação em soldagem de chapas finas e soldagens posicionais, devido ao menor aporte térmico (Fortes (2004) apud (Nascimento, 2015) ressalta que a transferência por curto-circuito é caracterizada por um arco frio, ideal para passes de raiz em juntas com abertura e especialmente para a soldagem fora de posição em peças de pequena espessura, no entanto, a falta de fusão lateral pode ser um problema quando se soldam peças mais espessas que 6,0 mm, pois o aporte térmico é baixo.

Na indústria observa-se o grande emprego de transferência metálica por curto-circuito convencional forçado e pouco se observa a aplicação de transferência por voo livre. Gases de proteção a base de Ar com 15-25% de CO₂ são mais utilizados, com metal de adição sendo o arame-eletrodo ER70S-6 de 1,0 mm com maior emprego, seguido pelo 1,2 mm (Menezes Júnior, 2015).

Esta observação do uso industrial, dado a utilização do processo, reforça ainda a relevância e importância do desenvolvimento de projetos que tragam novas

técnicas e equipamentos para melhorar a qualidade dos produtos obtidos com o uso deste processo de soldagem.

2.1.1.1 Fatores que Influenciam na Transferência por Curto-Circuito

É importante destacar alguns parâmetros sobre o processo MAG curto-circuito convencional e sua influência na transferência metálica.

Muito comentada e importante a dinâmica e comportamento da transferência metálica por curto-circuito, a *Indutância* ou a taxa de variação da corrente influencia diretamente no efeito *Pinch* que governa a transferência metálica, e na geração de respingos (Souza, 2010). Para indutância baixa, um gradiente elevado da subida de corrente de curto-circuito causa o destacamento da gota de forma violenta no momento em que a gota toca a poça de fusão. Por outro lado, a indutância alta reduz a taxa de subida da corrente de curto-circuito e, assim, minimiza a ação do efeito *Pinch* e consequentemente do aumento de respingos. Entretanto, se a indutância for muito alta (a corrente se eleva muito lentamente), a gota pode levar muito tempo para se destacar e, neste caso a ponta do arame pode acabar “colando” na poça de fusão, causando à extinção do arco (Scotti e Ponomarev, 2008). Em trabalhos sobre a soldagem com curto-circuito, (Magalhães, 2012) não observou grande significância na variação desse parâmetro quando se utilizou indutância constante à 40 (fonte PipePro 450 RFC) para faixas de velocidade de alimentação entre 2,3 m/min e 3,3 m/min e velocidades de soldagem entre 26,7 cm/min e 38,4 cm/min. Informação importante, haja vista que é a mesma fonte que foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

A regulação da *tensão* de soldagem tem a função de controlar o comprimento do arco, de forma que a diminuição da tensão implica em um arco mais curto. A soldagem por curto-circuito requer níveis mais baixos de tensão, pois, utiliza-se arco mais curto (Vilarinho, 2007).

Para a *velocidade de alimentação*, ao se utilizar fonte de tensão constante, a velocidade de alimentação do arame estará diretamente relacionada com a corrente de soldagem e com a taxa de deposição. Quanto maior a velocidade de alimentação, maior é a corrente e o consumo, aumentando a produtividade

(Magalhães, 2012). Para o curto-circuito é importante também por estar relacionada ao volume da poça de fusão.

A *velocidade de soldagem*, controla a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda. A redução da velocidade de soldagem a níveis muito baixos pode resultar na redução da penetração causado pelo efeito da sobreposição da poça de fusão. Valores muito altos podem gerar falta de material, na avaliação para o curto-circuito, é importante observar a quantidade de material na poça, pois mantendo-se uma distância de bico de contato peça (DBCP) constante, essa variável influencia na transferência metálica, alterando a corrente por ter um comprimento livre de eletrodo menor.

Sobre a DBCP, Heald et al (1994) apud (Souza, 2010) construíram mapas de transferência em função da tensão de soldagem e corrente de soldagem, em função da tensão de soldagem e velocidade de alimentação e ainda para diferentes DBCPs. Quando se observa para a DBCP, em geral utiliza-se de valores curtos quando operando no modo de transferência por curto-circuito, pois, utilizando uma DBCP longa, no momento do curto-circuito o comprimento energizado de arame será excessivamente longo, produzindo um grande aquecimento por efeito Joule e desestabilizando o arame-eletrodo.

Para o gás de proteção tem-se que, uma mistura mais rica em Ar proporciona um curto-circuito mais controlado e com menor índice de respingos. Vários estudos foram realizados com objetivo de investigar a influência do gás de proteção na corrente de transição, e assim no modo de transferência metálica do processo de soldagem. Tais estudos são importantes para determinar a composição correta dos gases para cada tipo de transferência desejada. Quando é desejada transferência por curto-circuito, devem-se utilizar gases que aumentam a corrente de transição. Rhee e Kannatey-Asibu Jr. (1992) apud (Souza, 2010) determinaram a corrente de transição para vários gases de proteção. Pode-se observar, pela rápida mudança na frequência de destacamento da gota, que Ar puro e Ar+5%CO₂ tem correntes de transição muito próximas e menores do que dos outros gases. Pelo menos até 5%, o teor de CO₂ não apresentou influência considerável, já, quando o teor de CO₂ aumenta (15 e 25%) também aumenta a corrente de transição e com CO₂ puro e He, não foi possível alcançar a corrente de transição. Haidar e Lowke (1997) apud (Souza, 2010) afirmam que a adição de até 5%CO₂ diminui a tensão superficial da

gota e, conseqüentemente, diminui a corrente de transição, pois a gota precisa crescer menos antes de se destacar.

2.1.1.2 Estabilidade e Regularidade no Curto-circuito

O conceito da palavra estabilidade é a qualidade daquilo que é estável, que apresenta firmeza e segurança. Regularidade por sua vez transfere a noção de um método, uma ordem uma constância em intervalos igualmente espaçados.

Fernandes (2013) afirma que, no processo de soldagem curto-circuito, a estabilidade pode indicar que o conjunto de parâmetros que proporcionou tal condição apresenta um equilíbrio para o comprimento e rigidez do arco, tempos de arco aberto e de curto-circuito dentre outros. Já a regularidade no mesmo contexto pode ser relacionada com o quanto um parâmetro se mostra regular, constante, ou seja, não se altera ao longo do tempo de soldagem nessas condições.

Diversos trabalhos buscam critérios para estabelecer e mensurar a qualidade do processo operando no modo curto-circuito, sendo que o principal foco de estudo está na característica da estabilidade do arco ou da transferência metálica em si mas, e pouco se trata regularidade do processo.

Manz (1969) menciona que minimizando as variações do comprimento do arco atinge-se uma condição de arco estável, reduzindo-se assim as interferências no ciclo de transferência metálica. Como critério o mesmo estabeleceu que a relação (L_g) entre a velocidade de alimentação (VA_{lim}) e a frequência da transferência metálica ($Freq_{CC}$) é proporcional ao comprimento do eletrodo para cada gota transferida – Equação (1.1). Assim, ao minimizar esta relação através da formação de gotas menores implica no aumento da frequência de curtos e um menor comprimento do eletrodo transferido e conseqüentemente a estabilidade.

$$L_g = \frac{VA_{lim}}{Freq_{CC}} \quad (1.1)$$

Miranda (1999) apud (Fernandes, 2013) propõe, semelhantemente, que a estabilidade é função da transferência metálica periódica com o menor tempo de curto-circuito possível (menores tempos de transferência) implicando em gotas menores em uma e uma maior frequência. Dutra, Baixo *et al.* (1995) afirmam que a

estabilidade pode ser traduzida como a regularidade na formação e no destacamento das gotas metálicas, podendo ser medida baseando-se na repetitividade temporal dos valores instantâneos de corrente e tensão.

Ponomarev, Al-Erhayem *et al.* (1997) relatam que a estabilidade do processo de soldagem MAG é determinada pela estabilidade do arco pela regularidade da transferência metálica e pelo comportamento do processo de soldagem em si, apresentando grande interação dos fatores do processo. Para (Suban e Tušek, 2003), a estabilidade do processo de soldagem é atributo do arco elétrico, e para o curto-circuito sua estabilidade depende da uniformidade dos tempos de arco aberto e de curto-circuito aliada à ausência de respingos.

Mita, Sakabe *et al.* (1988) criaram um modelo obtido por meio dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem, e dos desvios dos tempos de arco aberto e de curto-circuito, da corrente média e da corrente média durante o período de curto-circuito.

Dutra (1989) avalia a estabilidade através da análise da regularidade (numericamente através do desvio padrão) de histogramas dos picos de corrente dos períodos entre transferências e dos tempos de curto-circuito. Com base nos mesmos critérios, (Dutra, Baixo *et al.*, 1995) mostraram que dentre os três índices avaliados, o desvio padrão dos picos de corrente foi o que apresentou maior sensibilidade a ocorrência de irregularidades na transferência, porém (Souza, Rossi *et al.*, 2011a) apontam que tal sensibilidade pode resultar em problemas de repetitividade do índice em condições semelhantes de soldagem.

Modenesi (1994) apud (Fernandes, 2013) se utilizou da distribuição dos tempos entre curtos-circuitos, relacionando as condições de elevada instabilidade aos fenômenos cíclicos de baixa frequência, cujos períodos de transferência aumentavam e diminuam.

Fonseca, Avelar *et al.* (1996) chegaram a definir matematicamente um critério – Índice de Estabilidade (IEsT), Equação (1.2) – em que a estabilidade do arco quantificada através do tempo médio de período de curto-circuito (T) e da taxa de respingos (tr) (razão entre a massa dos respingos coletados e a massa de metal de adição fundida). Os resultados indicaram que a máxima estabilidade está no ponto de mínimo das curvas relativas a tais índices.

$$IEsT = \frac{100}{T \cdot t_r} \quad (1.2)$$

Dutra e Baixo (1991) quantificaram a regularidade a partir do desvio padrão do pico de corrente de maior frequência, mostrando que para certa faixa de tensão mantendo-se os demais parâmetros inalterados existe um ponto de mínimo correspondente ao menor desvio padrão da corrente de pico, onde estaria a maior regularidade do processo.

Dada a quantidade de trabalhos envolvendo o tema de estabilidade e regularidade do processo de soldagem MAG por curto-circuito, pode-se dizer que o assunto é de grande interesse e notória aplicação sobre o desenvolvimento do processo.

Muitos trabalhos e diversos autores indicam formas de se verificar a estabilidade e regularidade do processo, porém poucos se arriscam a definir critérios para mensurar e quantifica-las.

2.1.1.3 Critério Laprosolda para Regularidade da Transferência Metálica em modo Curto-circuito

Souza (2010) propôs um critério que possibilitasse quantificar de forma sistemática a influência dos parâmetros inerentes ao processo MAG na regularidade da transferência metálica no modo curto-circuito, denominado "Critério Laprosolda para Regularidade da Transferência Metálica em modo Curto-circuito", sendo este composto pelos parâmetros, Índice de Regularidade (IVcc) e Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota (F_{corte}).

2.1.1.3.1 Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota - F_{corte}

A F_{corte} tenta correlacionar o tamanho da gota *versus* crescimento do metal de adição fundido na ponta do eletrodo antes de entrar contato com a poça com as frequências de curtos-circuitos. Gotas muito grandes não representam uma condição adequada para transferência por curto-circuito. Abaixo de certa frequência há grandes possibilidades das gotas serem grosseiras, ou seja, o processo está

operando num modo combinado conhecido como globular/curto-circuito. Sendo assim valores baixos de frequência de transferência da gota revelam grandes possibilidades das gotas serem grosseiras, ou seja, o processo está operando num modo combinado de transferência metálica entre o curto-circuito e o globular. Em seu estudo, Souza (2010) assume que gotas com diâmetro maiores do que 25% do diâmetro do arame-eletrodo já representam o modo de transferência combinado (indesejável). Assim, é possível a partir da velocidade de alimentação (V_{lim}), do diâmetro do eletrodo (d_e) e do diâmetro da gota máximo aceitável ($d_g = 1,25 \times d_e$) determinar a F_{corte} de acordo com a Equação (1.3).

$$F_{corte} = \frac{3 \cdot V_{lim} \cdot d_e^2}{2 \cdot d_g^3} \quad (1.3)$$

2.1.1.3.2 Índice de Regularidade – IVcc

Tratando da avaliação de processos de soldagem, o Índice de Regularidade (IVcc) é baseado na premissa de que a estabilidade do processo de transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto, ou seja, acredita-se que, se os tempos sofram pouca variação tanto em curto-circuito como em arco aberto, o processo está regular. Desta forma, as constâncias nos tempos é medida por meio do coeficiente de variação, que leva em conta não somente o desvio padrão da amostra, mas também sua média, mostrada na Equação (1.4), então quanto menor o valor numérico do índice melhor a regularidade do processo.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{tmcc} + \frac{\sigma_{taa}}{tmaa} \quad (1.4)$$

σ_{tcc} : desvio padrão dos tempos de curto-circuito;

σ_{taa} : desvio padrão dos tempos de arco aberto;

$tmcc$: tempo médio de curto-circuito;

$tmaa$: tempo médio de arco aberto.

O IV_{cc} é classicamente calculado pelo sinal de tensão do arco elétrico de soldagem, onde define-se um valor de tensão de referência de curto-circuito ($U_{cc_{ref}}$), e caso a tensão do arco seja maior que a referência considera-se arco aberto, caso seja menor considera-se curto-circuito. Desta forma, processando o sinal de tensão é possível determinar os tempos de cada curto-circuito (t_{cc}) e cada arco aberto (t_{aa}).

Para a análise é considerado um intervalo de tempo de análise ($t_{análise}$), e (Fernandes e Vilarinho, 2012) afirmam intervalos de tempo de análise maiores que 6 s e que $U_{cc_{ref}}$ maiores que 5 V não influenciam estatisticamente nos resultados do critério, sendo que (Fernandes, 2013) utiliza valores de 5 V e 6 s, para a tensão de referência e intervalo de tempo de análise, respectivamente, desconsiderando o início e o fim do cordão de solda (4 s no começo e 4 s no fim do cordão) para evitar perturbações da formação e estabilização do arco, bem como de seu encerramento. Costa (2014), em seu trabalho, utiliza valores de $U_{cc_{ref}}$ e $t_{análise}$ em 5 V e 7-8 s, respectivamente, desconsiderando os dois primeiros e últimos segundos de soldagem. (Silva, Borges *et al.*, 2014) consideram em seu trabalho $U_{cc_{ref}}$ em 10 V, não sendo feita referência sobre o intervalo de tempo de análise.

2.2 Instrumentação, Monitoramento, Sistemas Embarcados e Processamento Digital de Sinais

Sinais estão presentes em diversas situações, podendo ser definido como uma função que carrega uma informação. A forma mais comum é a comunicação falada (voz), nesse exemplo, o sinal gerado pelo trato vocal e o sinal recebido pelo sistema auditivo. Apesar de ser o mesmo sinal transmitido à diferentes receptores a forma como ele é *processado* é inerente ao receptor.

Pensando em processos de engenharia, o propósito do monitoramento comumente é a realização de análise dos dados obtidos. A análise de dados pode ser definida como o processo pelo qual se dá ordem, estrutura e significado aos dados transformando-os em conclusões ou lições úteis e credíveis (KACHIGAN, 1986). Ainda, para a matemática, a investigação de um problema específico por métodos algébricos ou mediante cálculos (MICHAELIS, 2009). O propósito, de uma forma geral, da análise de dados é descrever, resumir dados, identificar relações e

diferenças entre variáveis ou, ainda, fazer previsões (MEASURE EVALUATION, 2008).

É possível analisar um dado obtido por diferentes frentes científicas, como a estatística ou mesmo a matemática analítica, e ter como lições destas, infinitas características dos sinais, desde valores de periodicidade de eventos, valor máximo, valor mínimo, seu valor médio, variância até características complexas, como seu comportamento no domínio da frequência ou a determinação da função que rege a relação entre suas variáveis. Para cada tipo de análise há uma forma determinada de obtê-la e uma finalidade específica para ela, gerando significados aos dados obtidos de acordo com o interesse de quem a realiza.

Segundo (Mello, 2015), o processamento de sinais lida com a representação, transformação e manipulação dos sinais e da informação que eles contêm. Até a década de 60, a tecnologia para processamento de sinais era basicamente analógica. A evolução de computadores e sistemas embarcados micro processados juntamente com diversos desenvolvimentos teóricos causou um grande crescimento na tecnologia digital, surgindo o processamento digital de sinais (PDS). Um aspecto fundamental do processamento digital de sinais é que ele é baseado no processamento de sequências de amostras.

Sinais podem ser classificados de acordo com suas características de tempo e dos tipos de valores que eles podem assumir. Sinais *contínuos no tempo* (analógicos) são definidos para qualquer valor de tempo e eles assumem valores no intervalo contínuo (a, b) , onde a pode ser $-\infty$ e b pode ser $+\infty$, sendo representados por uma função de variáveis contínuas. Sinais *discretos no tempo* são definidos apenas para certos valores específicos de tempo, representados matematicamente por uma sequência de números reais ou complexos $x = \{x[n]\}$.

Os valores de amplitude de sinais contínuos ou discretos no tempo podem ser contínuos ou discretos, já sinais digitais são aqueles para os quais tanto o tempo quanto a amplitude são discretos.

Os sinais podem ser classificados em determinísticos ou aleatórios, se qualquer sinal pode ser unicamente descrito por uma expressão matemática, uma tabela de dados ou uma regra bem definida é chamado *determinístico*. No entanto, em aplicações práticas, os sinais não podem ser representados ou suas descrições são muito complexas para uso, implicando que tais sinais têm comportamentos imprevisíveis sendo chamados de sinais aleatórios.

Todos os dias, a ação de monitorar é aplicada por todos, monitorando ou sendo monitorados, de forma consciente ou não. Segundo o dicionário de língua portuguesa (Dicionário do Aurélio Online, 2011), monitoramento é definido como acompanhar para consideração dados ou informações fornecidas por instrumentos técnicos. Segundo (Bartle, 2010), monitoramento pode ser definido como a observação e o registro regular de um processo, realizados de forma rotineira, e acumulando as informações em todos os seus aspectos. Checar o avanço das atividades de um processo, ou seja, uma observação sistemática com propósitos; é ainda, dar uma avaliação sobre o desempenho do processo, sendo que todas as informações reunidas são utilizadas para tomadas de decisões em prol do aperfeiçoamento do desempenho do projeto.

A atividade de monitorar algum processo ao longo do tempo fornece, então, informações para:

- Analisar a situação do processo;
- Determinar se as alterações do processo estão como esperadas;
- **Identificar problemas, e encontrar soluções;**
- Utilizar de experiência de operações anteriores;
- Determinar se a maneira na qual o projeto foi elaborado é a mais apropriada para a resolução do problema em questão.

Pensando-se então no monitoramento de processos físicos, em sistemas contínuos e analógicos, há a necessidade de passar este sinal, atualmente, para o mundo digital, isto é realizado através da instrumentação e uma conversão analógico-digital dos sinais, fato que envolve alguns conhecimentos específicos.

Uma avaliação sobre o Teorema da Amostragem de Nyquist–Shannon é fundamental no campo da teoria da informação, particularmente em processamento de sinais. Sendo que amostrar é o processo no qual se converte um sinal (por exemplo, uma função contínua no tempo ou espaço) em uma sequência numérica (uma função discreta no tempo ou espaço). Seu enunciado é dado como:

"Seja um sinal, limitado em banda, e seu intervalo de tempo dividido em partes iguais, de forma que se obtenham intervalos tais que, cada subdivisão

compreenda um intervalo com período T segundos, onde T é menor do que $1/2 \cdot F_{\max}$, onde F_{\max} é a maior frequência do sinal original, e se uma amostra instantânea é tomada arbitrariamente de cada subintervalo, então o conhecimento da amplitude instantânea de cada amostra somado ao conhecimento dos instantes em que é tomada a amostra de cada subintervalo contém toda a informação do sinal original. (NYQUIST, 1928)."

Um sinal ou função é limitado em banda se não contém energia em frequências maiores do que o limite de banda B . Um sinal que é limitado em banda é condicionado a quão rápida é sua variação no tempo. Então, um sinal analógico, limitado em banda, que foi amostrado, pode ser perfeitamente recuperado, a partir de uma sequência infinita de amostras, se a taxa de amostragem for maior que $2 \cdot F_{\max}$ amostras por segundo.

A reconstrução do sinal original é um processo de interpolação que matematicamente define um sinal contínuo no tempo $x(t)$ a partir de amostras discretas $x[n]$ e, às vezes, entre os instantes de amostragem nT . Tal procedimento é Representado pela Fórmula de interpolação de Whittaker-Shannon.

Por fim, o monitoramento é muito importante no planejamento, implementação e acompanhamento de um projeto ou processo. Mas, como dito anteriormente, o monitoramento é realizado sempre com algum propósito, com um fim específico de estudo, e, quase de maneira geral, os dados acumulados nos processos de monitoramento são armazenados e representados matematicamente como funções de uma ou mais variáveis independentes. Dados ou sinais estes que deverão passar por um processamento e/ou análise de sinais.

Do objetivo do trabalho, que é a construção de um sistema móvel de monitoramento sonoro de soldagem, chega-se ao desenvolvimento de sistema um sistema embarcado. O conceito de sistemas embarcados não é comumente citado no desenvolvimento de equipamentos de tecnologia, entretanto, a existência de tais sistemas é a base para o que se chama de vida moderna no tratamento de sinais, tanto analógicos quanto (principalmente) digitais. Exemplos corriqueiros são: Videogames; Micro-ondas; Aparelhos de TV; Celulares; Aparelhos de GPS; Sistema de Controle de Automóveis, aviões, satélites; entre outros.

Para (Cunha, 2007), um sistema embarcado é colocar capacidade computacional dentro de um circuito integrado, equipamento ou sistema. Assim, é um sistema que deve ser mais do que um simples computador, ou seja, é um sistema completo e independente, mas preparado para realizar apenas uma determinada tarefa. (Oliveira e Andrade, 2006) complementam a ideia dizendo que tais sistemas podem ser definidos como sistemas que possuem capacidade de processamento de informações vinda de um software que está sendo processado dentro desta unidade.

Dentre as diversas formas de classificação dos sistemas embarcados (Oliveira e Andrade, 2006), em especial tem-se a classificação pelo modo de interação do sistema com o usuário, sendo esta uma parte de extrema importância. Passa-se por nenhuma interface ao utilizador (dedicados somente a uma tarefa) até uma interface de utilizador completa, similar à dos sistemas operacionais desktop (em sistemas como caixas eletrônicos de banco). Sistemas mais simples utilizam botões, LEDs ou telas bastante limitadas; Sistemas mais complexos utilizam uma tela gráfica completa com reconhecimento de multi-toques.

Desenvolver um sistema embarcado é uma tarefa complicada, minuciosa e trabalhosa, mas quais são as considerações que devem ser feitas pelo desenvolvedor para avaliar a aplicabilidade, e a eficiência de um sistema embarcado.

Algumas características de construção importantes são: tamanho e peso sempre os menores possíveis; minimização do consumo de energia, preferencialmente por fontes de energia móveis (baterias); e a robustez do equipamento, visto que um equipamento comercial está sujeito a trabalhar em condições adversas (vibrações, calor, poeira, variações na tensão de alimentação, interferências eletromagnéticas, raios, umidade, corrosão, etc.).

O projeto de sistemas embarcados segue, normalmente, uma sequência definida de passos, sendo uma das mais comuns a visão de projeto top-down, Figura 2.4. Quando se conhece o funcionamento e as propriedades de alguns dos componentes antes do próprio projeto, como quanta memória necessária ou tempo de execução, utiliza-se a metodologia inversa, chamada de bottom-up (Wolf, 2001).

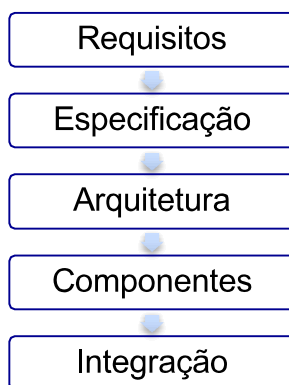


Figura 2.4 – Sequência de passos da técnica top-down (WOLF, 2001)

Quando se começa a tratar de processamento de dados, a maior parte do processamento envolve processar um sinal para obter outro sinal, ou seja, um processo conhecido como filtragem. Um *filtro* é um sistema utilizado para desempenhar a função de filtragem seletora de frequência. Filtragem é usada em processamento digital de sinais em uma grande variedade de formas, como remoção de ruído, equalização, análise espectral de sinais, etc.

Filtros são normalmente classificados de acordo com suas características no domínio da frequência como passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa e suas aplicações dependem do interesse de processamento do sinal.

Considerando que o sinal que se possui está filtrado e amostrado corretamente, um indicativo de estudo de sinal é dado por sua avaliação no domínio da frequência.

O uso de transformadas permite observar características de um sinal mas que podem não ser observáveis em determinado domínio. A mais conhecida das transformadas é a transformada de Fourier, passando um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Além da observação de outras características do sinal, a mudança de domínio também traz outras vantagens. No caso da transformada de Fourier, mudamos um sinal de um domínio o qual não temos controle (o tempo) para outro domínio que pode ser facilmente modificado (a frequência). A transformada de Fourier é uma ferramenta muito utilizada em análise e processamento de sinais.

Embora a Transformada Discreta de Fourier (DFT) seja o melhor procedimento para determinar o conteúdo espectral de sinal no tempo, ela é muito

ineficiente, sendo a que possui uma implementação da DFT mais rápida, conhecido como Transformada rápida de Fourier (FFT).

A transformada de Fourier representa um sinal como uma série de senos e cossenos, porém como a transformada considera todo o sinal, a transformada não é sensível a mudanças de frequência no sinal. Assim, ela é apropriada para os chamados sinais estacionários, o que é um problema, visto que os sinais reais são não-estacionários. Assim, nesses casos, a transformada de Fourier passa de uma ferramenta poderosa de análise de sinal para uma ferramenta de pouca relevância se aplicada à todo o sinal. A Figura 2.5 apresenta a representação de dois sinais: um estacionário e outro não estacionário.

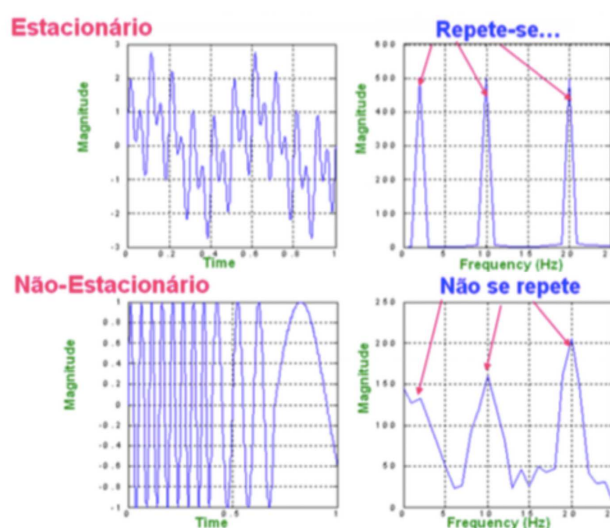


Figura 2.5 – Exemplo de sinal estacionário e não estacionário e suas respectivas DFT (Mello, 2015)

Uma solução para esse problema é a Transformada de Fourier de Tempo Curto (*Short-Time Fourier Transform*), sendo aplicada a Transformada em partes dele, sendo passado a ser visto em *janelas*, desta forma o sinal passa a ser considerado na porção da janela, sendo todo o restante desconsiderado nesse momento. Dentro da janela, considera-se que o sinal tem comportamento estacionário (Figura 2.6).

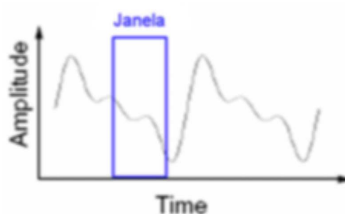


Figura 2.6 – Exemplo de Janelamento para cálculo da FFT (Mello, 2015)

O *janelamento* é uma prática comum, bastante usada em processamento digital de voz (sinal sonoro). O problema associado ao uso dessa técnica está quanto ao tamanho da janela. No caso da Transformada de Fourier de Tempo Curto, a janela tem tamanho invariante durante todo o processamento. Assim, uma janela pequena pode trazer pouca informação sobre o sinal e exige muito processamento. Já uma janela grande pode aumentar o erro na consideração de estacionariedade do sinal.

Deste modo, uma evolução da análise, é a aplicação de uma transformada em uma janela de tamanho variável. Ideia básica da Transformada *Wavelet*. As janelas podem atuar em intervalos maiores quando queremos informações mais precisas sobre baixas frequências ou em intervalos menores quando queremos informações mais precisas sobre altas frequências (Figura 2.7). A Figura 2.8 mostra um exemplo de aplicação de uma transformada *Wavelet* em um sinal sonoro, em uma decomposição de sete níveis e Janelamento Haar (Mello, 2015).

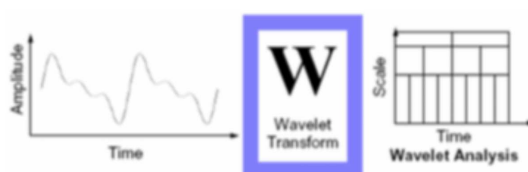


Figura 2.7 – Fundamento da Transformada *Wavelet* (Mello, 2015)

Da análise de sinais no domínio do tempo tem-se como principais análises observáveis os cálculos de média, desvio padrão, variância, energia do sinal, RMS (raiz da média quadrática), frequência, período, detecção de picos e distância entre picos, dentre outros. Outra análise importante que pode-se realizar no domínio do tempo é a distribuição das amplitudes do sinal em faixas de valores, conhecido como histograma, a Figura 2.9 mostra o exemplo deste tipo de análise de sinais.

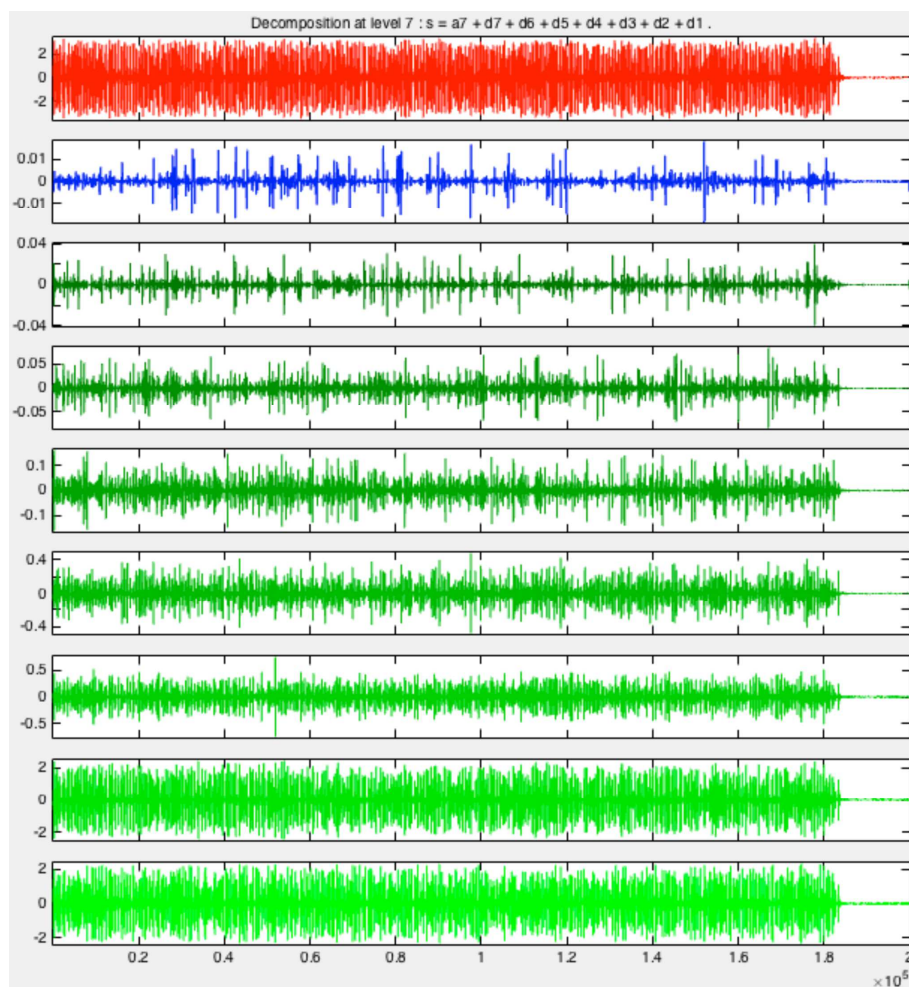


Figura 2.8 – Transformada Wavelet sinal sonoro (Soldagem MAG Curto-Circuito), Janelamento Haar e sete níveis (Fonte: Próprio autor)

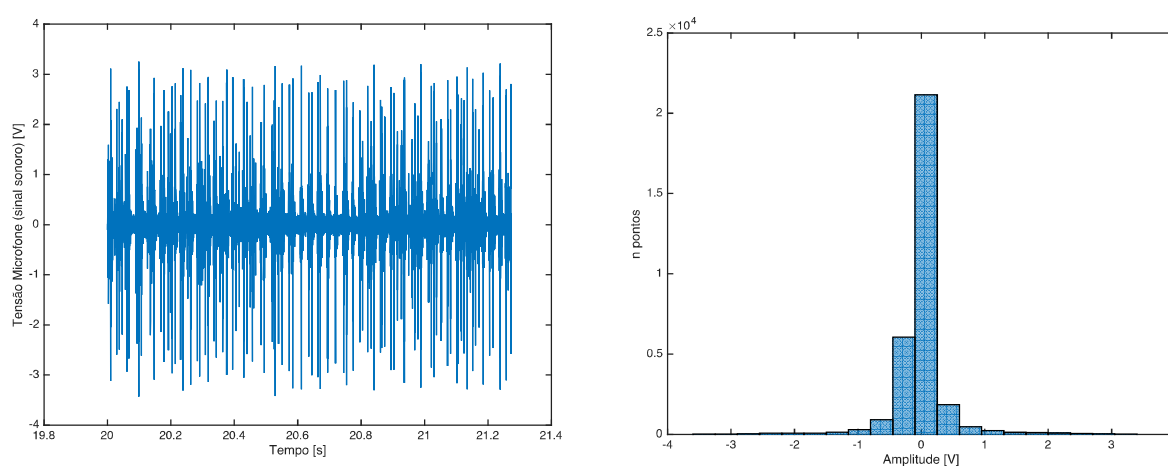


Figura 2.9 – Exemplo do histograma de um sinal sonoro (Fonte: Próprio autor)

Considerando o sinal a ser analisado, pressão sonora, e considerando o objetivo de detecção de instantes de abertura e apagamento do arco elétrico, o processamento do sinal deverá envolver etapa de detecção picos, assim, algumas

técnicas para detecção e seleção devem ser estudadas. Uma área de conhecimento que utiliza largamente essa técnica de processamento de sinais é observada na área médica, (Rogal, 2008) mostra algoritmos de processamento e diagnóstico automático de doenças do coração, com base em exames de eletrocardiograma (Figura 2.10), como arritmias, sopro, lesões secundárias a infarto do miocárdio, distúrbios hidroeletrólíticos e doenças do músculo cardíaco (Valadares, 2014). A Figura 2.11 mostra detalhe de detecção de doença pelo sinal do ECG de um paciente.



Figura 2.10 – Forma Esquemático de um ECG (Fonte: Próprio autor)



Figura 2.11 – Contração prematura ventricular. Extraído do registro 100, intervalo da grade: 0,2 s, 0,5 mV (Physionet, 2006)

Na avaliação deste tipo sinal procura-se a identificação dos pontos P, Q, R, S e T, e possíveis desvios de forma, caracterizando as anomalias (doenças do coração). Rogal (2008) utiliza em seu trabalhos métodos de detecção de picos com o uso de Redes Neurais Artificiais (RNA), enquanto Leal, Toledo *et al.* (2014) e Madeiro, Cortez *et al.* (2004) utilizam de técnicas de derivada e métricas no tempo e

em amplitude para limpar o sinal deixando apenas os picos de interesse já citados, ou seja, realiza a limpeza de pontos de acordo com a distância (Figura 2.12) entre os mesmo e com limiar de corte em amplitude.

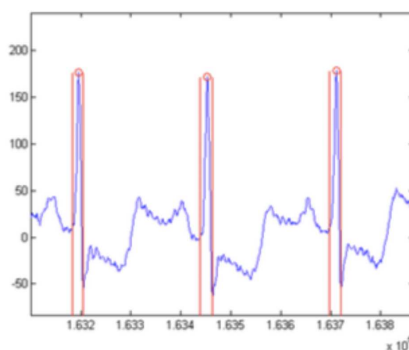


Figura 2.12 - Complexos QRS detectados no exame com filtros em amplitude e no tempo (Madeiro, Cortez *et al.*, 2004)

Tais metodologias aplicadas são observados dentre as técnicas de detecção de picos, sendo que um estudo mais profundo mostra que se pode eliminar picos em um sinal como base em diversas características, sendo que as mais notáveis são a eliminação por distância entre os pontos de picos em tempo/quantidade de amostradas e em amplitude por simples limiar, onde se compara se o valor do pico supera determinado valor numérico o mesmo é considerado, e caso contrário o pico é desconsiderado do conjunto de picos Figura 2.13, e por uma técnica de eliminação em amplitude conhecida como proeminência do pico, ou seja, o quanto que o valor do pico é proeminente em relação à curva base do pico. Matematicamente é interpretado pela relação do valor em amplitude do pico e o vale adjacente com valor de amplitude mais próximo (Figura 2.14).

É importante salientar a importância dos métodos de análises no domínio do tempo, visto que, as informações que se busca no estudo, de acordo com a Equação (1.4), e processamento são todas no domínio do tempo, como detecção de picos, frequência de picos, quantidade de picos, tempo entre picos, médias de tempos e desvios padrão. Desta forma, todo o processamento matemático a ser realizado não deve alterar características de tempo dos sinais.

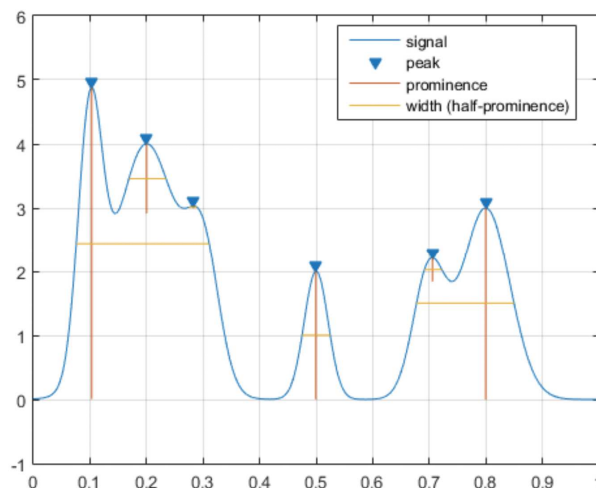


Figura 2.13 – Ilustração de filtros por amplitude e no tempo (distância entre os picos)

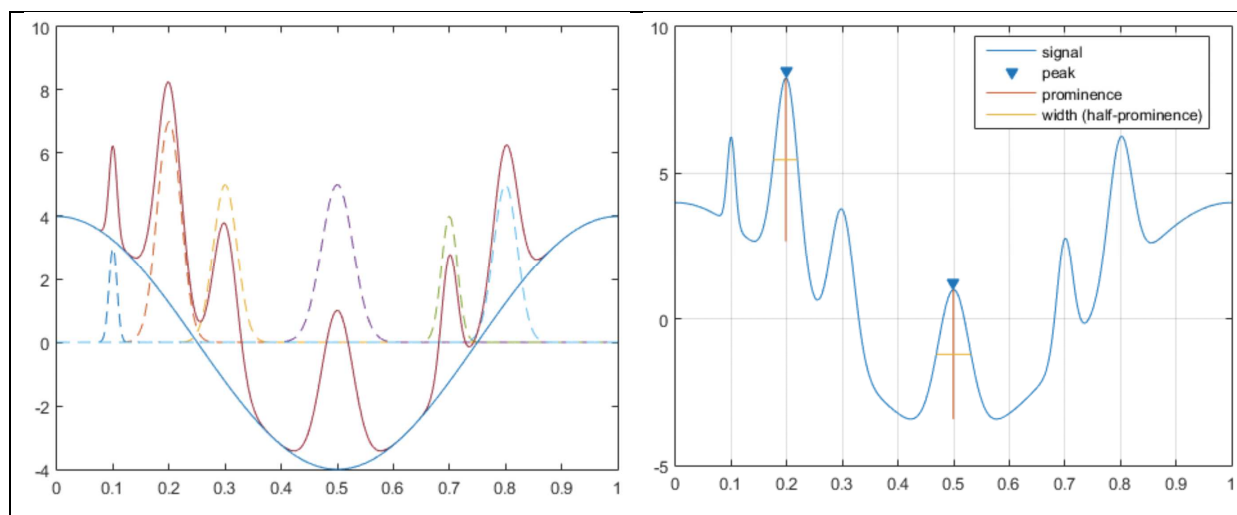


Figura 2.14 – Ilustração de métodos de eliminação de picos por proeminência (Fonte: Próprio autor)

2.3 Monitoramento Sonoro

Partindo do objetivo de realizar o monitoramento e processamento do som para uma avaliação da regularidade do processo de soldagem, é importante discorrer sobre os fundamentos do som e seu monitoramento.

2.3.1 O Som

O som é a propagação de uma onda mecânica, longitudinal que se propaga de forma circuncêntrica em meios materiais. São, na sua maior parte, combinações

de sinais, mas um som puro monotônico, representado por uma senoide pura, possui uma velocidade de oscilação ou frequência que se mede em Hertz (Hz) e uma energia que se mede em decibéis.

Seres humanos e vários animais percebem sons com o sentido da audição, com seus dois ouvidos, o que permite saber a distância e posição da fonte sonora: a chamada audição estereofônica.

Os sons são usados de várias maneiras, muito especialmente para comunicação através da fala, mas a percepção do som é também usada para adquirir informações sobre o ambiente em propriedades como características espaciais (forma, topografia) e presença de objetos, técnica conhecida como sonar, Figura 2.15.

Outra aplicação importante das ondas sonoras é a visualização de tecidos do corpo (ultrassonografia, Figura 2.16), sendo que através do eco produzido pelas ondas nos órgãos, é possível analisar as propriedades mecânicas dos tecidos e reproduzi-las em imagens em escala de cinza, coloridas, em 2D ou 3D, e ainda atualmente em 4D, onde é possível escutar o funcionamento do corpo.

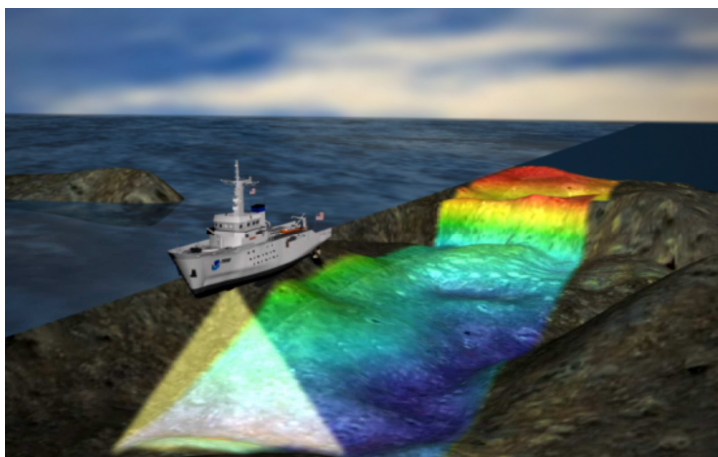


Figura 2.15 – Mapeamento de relevo submarino por sonar (NOAA, 2012)

Do princípio de que se pode obter informações e ou características do meio pelo som, e partindo da observação de que os soldadores se valem desta característica (som) quando está soldando (Tam e Huissoon, 2005), deve-se entender como é o funcionamento do sistema auditivo humano e sua relação com as percepções do ambiente, de onde pode-se buscar bases e fundamentos para o desenvolvimento do trabalho.



Figura 2.16 – Ultrassom 3D colorido de um feto humano (Gestação 3D, 2015)

2.3.2 Ouvido Humano – O Microfone Humano Natural

Buscando o fundamento do órgão humano de percepção do som que pode-se comparar ao “microfone” do corpo humano, o ouvido, (Spada, 2012b) apresenta de forma objetiva e clara, como será descrita aqui, sem grandes detalhes, visto que não é objeto maior de estudo.

O órgão então apresenta divisões envolvendo o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno, Figura 2.17.

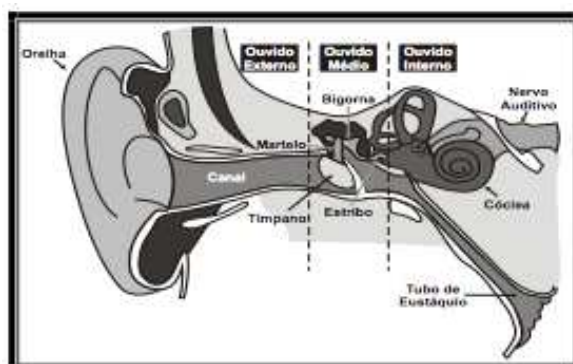


Figura 2.17 – Divisões básicas do ouvido humano (Spada, 2012b)

Cada parte do ouvido humano tem uma função específica para interpretar os sons. O ouvido externo é responsável pela coleta do som e de levá-lo pelo canal ao

ouvido médio. No ouvido médio ocorre a transformação da energia de uma onda sonora em vibrações internas de sua estrutura óssea. Estas vibrações, por sua vez, formam uma onda de compressão no ouvido interno. O ouvido interno transforma a energia da onda de compressão dentro de um fluido em impulsos nervosos que podem ser transmitidos ao cérebro (Spada, 2012b).

Afirma-se que uma pessoa jovem consegue ouvir uma faixa de frequência entre 20 Hz e 20 kHz. Observa-se que essa faixa de frequência sonora é, em grande parte, dependente da intensidade do som, isto é, se a intensidade sonora for baixa, (60 dB abaixo de 0 dB) a faixa se limita entre 500 Hz e 5 kHz, Figura 2.18. Na velhice essa faixa cai para aproximadamente 50 Hz a 8 kHz ou até menor dependendo do caso.

O ouvido humano possui ampla faixa de percepção de pressões sonoras, resistindo à amplitudes maior que 100 Pa e detectando até pressões da ordem de 0,00001 Pa (10 uPa). Percebe-se então que o ouvido é um microfone extremamente sensível, e não somente um microfone, mas um analisador de frequências juntamente com o cérebro capaz de discriminar perfeitamente as tonalidades. A característica subjetiva conhecida como altura, é uma função direta da intensidade e da frequência do som, ou seja, sons de diferentes frequências à uma mesma intensidade apresentam ao ser humano diferentes “sensações” de *altura* do som.

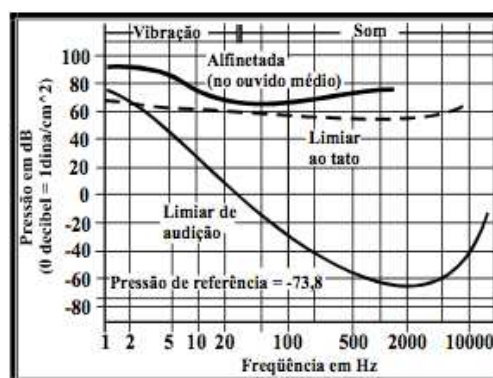


Figura 2.18. Limiar da Audição para Diferentes Frequências (Spada, 2012b)

O que comumente se chama de som alto ou baixo, na verdade é uma interpretação de uma combinação entre a frequência e uma intensidade forte ou fraca.

2.3.3 Captação do Som

Quando se fala em processamento, fala-se de cálculos. Para se fazerem cálculos, é necessário quantificar grandezas. Quando se processa o som, comumente, a grandeza essencial a medir é a variação da intensidade do som (dB), ao longo do tempo. Entretanto, no trabalho se está interessado na resposta do captador (microfone) em relação ao tempo, o que costuma chamar de sinal sonoro. A Figura 2.19 exemplifica o funcionamento de um microfone.

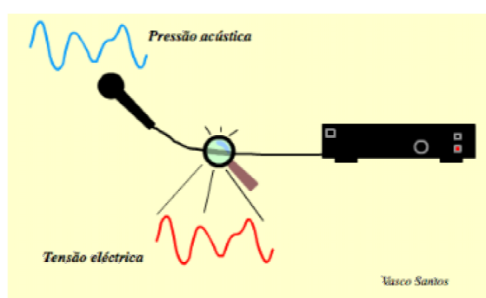


Figura 2.19 – O microfone, ao captar o som, traduz as variações de pressão acústica (dB) na sua entrada em variações de tensão elétrica (mV) (Fonseca, Santos *et al.*, 2002)

Considerando-se que o ouvido pode ser considerado o microfone natural do ser humano, que funciona no modo analógico e contínuo, um estudo sobre os microfones disponíveis para a captação do som do processo de soldagem se faz necessário.

O Teorema da Amostragem comentado anteriormente discorre sobre a capacidade de reconstruir o sinal a partir de amostras, entretanto, para o estudo não são realizadas reconstruções do sinal amostrado, mas se pretende sim representar o sinal.

Em adição, considerando-se o objetivo que é a instrumentação do som, com sua fiel representação no tempo, vale lembrar que o mesmo se apresenta como uma composição de sinais senoidais que, e que a frequência máxima que um ouvido humano pode captar é de cerca de 20000 Hz, nos sistemas baseados em amostragem de som com alta qualidade, a taxa de amostragem é de 44100 S/s (*Samples/Second* ou amostras/segundo) de acordo com (Fonseca, Santos *et al.*, 2002).

O som é representado então por uma sequência de amostras, regularmente espaçadas no tempo. Essas amostras são representadas numericamente, em formato digital. A representação digital ganha o nome de quantização e para o som, a quantidade comum de bits é de 16 bits, o que significa 65536 combinações numéricas possíveis.

Lembrando que o objetivo do trabalho é a implementação de um dispositivos móvel de baixo custo, deve-se dar atenção à escolha do instrumento de captação do som, o microfone.

2.3.3.1 Microfones Eletrônicos

Quando se fala de microfones, se vem à ideia captadores de fontes sonoras, porém, na maioria das vezes, não se dá a devida importância à complexidade de sua escolha, ignorando o fato que são eles os maiores responsáveis pela definição da qualidade dos sinais captados (Spada, 2012a).

A escolha do tipo de microfone para cada aplicação específica e as técnicas de disposição destes são pontos fundamentais para conseguirmos a máxima qualidade do sinal da fonte sonora com o mínimo de interferência externa. Entre os maiores objetivos de quando se quer captar um sinal sonoro – áudio – está maximizar o sinal da fonte em relação ao ruído de fundo, ruído ambiente, reflexões e evitar realimentações (microfonias).

2.3.3.1.1 O que é um Microfone

No ato da fala, ou qualquer evento que produza uma onda mecânica, é gerada uma vibração do ar, então um dispositivo capaz de captar tais vibrações (tímpano ou microfone) e converter tais vibrações ou ondas sonoras em outros tipos de sinais. No caso do tímpano, em impulsos nervosos para o cérebro, e, no caso dos microfones, em sinais elétricos que podem ser monitorados e adquiridos.

O microfone, que foi inventado por David Hughes, é um transdutor eletroacústico que transforma energia acústica em energia elétrica através do

deslocamento de sua membrana (como se fosse o tímpano) proporcionalmente às ondas sonoras capturadas (Spada, 2012a).

2.3.3.1.2 Diferentes tipos de Microfones

Para se escolher um microfone devem-se levar em consideração várias características fundamentais, como: aplicação prática, impedâncias dos circuitos, resposta em frequência, resistência mecânica, diagrama polar (ângulo de captação em função da frequência), resposta a transientes, níveis de pressão sonora, ruído mecânico, ruído de fundo, temperatura, umidade, sensibilidade, etc (Riffel, 2001), e, claro, pensando em um projeto de fabricação de equipamento tecnológico seu custo dada a aplicabilidade.

Tudo isso deve ser avaliado antes de adquirir um microfone para que este atenda da melhor forma a necessidade de cada aplicação. Somado a tudo isso, estão as técnicas de captação que dão o suporte para que se consiga captar os sons de várias formas e com suas características diversas. A fidelidade de captação de uma fonte é a responsável direta pelas características sônicas do sinal capturado.

Atualmente há diversos tipos de microfones, cada um com seu princípio de funcionamento e características. A definição dos tipos de transdutores pode ser dada pelos princípios de operação, que basicamente são:

- Piezoresistivo (carbono);
- Piezoelétrico (cerâmica ou cristal);
- Eletromagnético (ímã móvel);
- Eletrodinâmico (dinâmicos bobina móvel – princípio eletromagnético);
- Eletrostático (condensador / eletreto);
- Capacitivos.

O princípio de operação é que determina como um microfone captura os sons acústicos e converte estes em sinais elétricos. Pode-se ressaltar que os microfones

dinâmicos operam segundo uma das leis de Faraday ¹ e os microfones condensadores operam segundo o princípio eletrostático².

Atualmente os microfones eletreto, apesar de apresentarem limitações para medir baixos níveis de pressão sonora, são amplamente usados industrialmente e em dispositivos eletroeletrônicos de uso pessoal (celulares, por exemplo), especialmente porque necessitam de baixa tensão de polarização para o seu funcionamento, além de serem construídos com dimensões reduzidas, seu preço é bastante acessível e é encontrado facilmente no mercado de acessórios eletrônicos.

Os microfones podem ainda ser classificados e a escolha do mesmo é fortemente influenciada pela diretividade de captura (o diagrama polar), sendo os mais comumente encontrados e de grande aplicação:

- Microfones Omnidirecionais;
- Direcionais;
 - Cardióide;
 - Supercardióide;
 - Hipercardióide;
 - Ultradirecionais (*shotgun*);
- Bidirecional;
- Diferencial (canceladores de ruído).

Dada essa gama de opções e diversidade quanto ao funcionamento e construções mecânica dos microfones, serão descritos em mais detalhes (dado o interesse do trabalho) o microfone de eletreto, e com uma montagem que beneficia e provoque um funcionamento ultradirecional.

Os microfones tipo eletreto (Figura 2.20) possuem como elemento gerador uma placa de polímero especial, carregada eletricamente de forma permanente, não necessitando, por isso, de polarização externa, como os microfones capacitivos ou condensador, que necessitam de até 200 V para a sua polarização. Eles apresentam boa estabilidade elétrica, resistência à temperaturas e dependendo da aplicação o

¹ Quando um campo magnético corta um condutor, uma corrente elétrica vai fluir através do mesmo se este for incluído num circuito em que a corrente pode circular.

² Pertencente à eletricidade estática, ou seja, eletricidade ou carga elétrica em repouso. É uma forma de energia que, aplicada a alguns materiais, possibilita a atração e retenção de pequenas partículas de carga elétrica oposta.

aspecto da impedância tem sua importância. São encontrados no mercado com duas e três vias de ligação. Os com três vias de ligação são chamados com linha balanceada entre si com relação à terra, apresentando a vantagem de que, as tensões nos condutores estão sempre em antifase (defasados de 180 graus) e os ruídos elétricos eventualmente induzidos nestes condutores, ficam em fase, de forma que podem ser cancelados pelas entradas balanceadas.

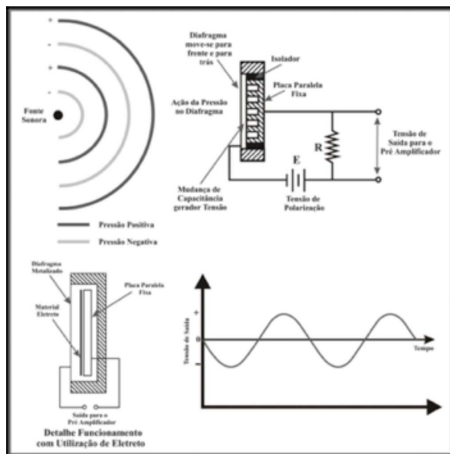
Muitos instrumentos de medição do tipo portátil, como os medidores dos níveis de pressão sonora, usam microfones eletreto (também conhecidos como microfone do tipo condensador pré-polarizado). No uso pessoal os microfones eletreto tem aplicação em praticamente todos os tipos de gravadores, dispositivos auxiliares de audição, nos telefones portáteis e residenciais, em computadores, nos intercomunicadores internos, enfim onde se necessita transmitir o som ou a voz.

Com a necessidade de captação em maiores distâncias (próximas de um metro ou mais) surgiu também a necessidade de ângulos de cobertura estreitos (30° a 60°). Isso fez com que fosse criado um microfone não apenas com cancelamentos na relação frente-costa, mas com interferências de fase (Spada, 2012a).

Na construção utiliza-se um tubo (20 a 40 cm de comprimento) com cortes transversais à frente da cápsula. Estes cortes dão origem a diferentes caminhos para o som chegar até cápsula, assim há comprimentos diferentes (diferentes impedâncias acústicas), e desta forma sons que incidirem no eixo do microfone são amplificados e sons gerados nas laterais são cancelados, pois entram pelas ranhuras e chegam à cápsula em tempos diferentes. Isto acontece porque sons que entram pela parte frontal sofrem interferências construtivas e com isso aumentam a sua diretividade. A eficiência da diretividade está ligada à frequência e comprimento do tubo, pois quanto menor a frequência, maior o seu comprimento de onda e maior deverá ser o tubo para ocorrer de forma eficaz o cancelamento das frequências vindas das partes laterais.

Dessa forma, para frequências mais baixas este microfone se comportará segundo ao padrão polar da cápsula que está sendo utilizada, e somente para frequências mais altas é que aparecerá o efeito do tubo, tornando assim o microfone mais direcional do que um hipercardióide. A Figura 2.21 ilustra um exemplo de microfone *shotgun*.

a)



b)



Figura 2.20. a) Esquema de funcionamento de microfone de eletreto (condensador pré-polarizado), b) exemplos comerciais (Riffel, 2001; Pcb Piezotronics Inc, 2012)



Figura 2.21 - Exemplo de Microfone tipo *Shotgun*

Em um microfone *shotgun* longo (tubo longo) o efeito dos cancelamentos de fase funcionam para frequência mais baixas do que em um *shotgun* curto, dessa forma torna-se ainda mais diretivo. A Figura 2.22 apresenta um exemplo de diagrama de padrão polar para um microfone *shotgun*.

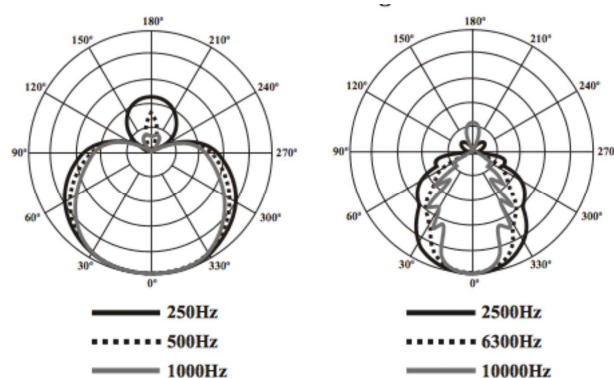


Figura 2.22 - Diagrama polar de um microfone Shotgun. (Spada, 2012a)

2.3.4 Som *versus* Áudio

O som como visto é a própria onda mecânica que carrega em si a energia que representa o impulso que gerou a onda sonora. Áudio pode-se definir como um conjunto de técnicas usadas no registro, reprodução e transmissão do som. Então o som, quando captado por um sistema de aquisição/captação recebe o nome de áudio, que carrega em si um conjunto de características, tais como: taxa de amostragem (S/s), número de canais (mono ou estéreo), tipos de codificação e outras (Saade, [20--])

2.4 Monitoramento em Soldagem

Uma coleção de técnicas e métodos para o monitoramento de diversos processos de soldagem, pelos mais diversos meios (sensores ópticos, contato, dentre outros) mostra de forma contundente as necessidades e os equipamentos desenvolvidos por pesquisadores da área. Sendo este ramo de estudo bastante impulsionado pelo advento da microeletrônica, que possibilitou a rápida evolução para dispositivos cada vez melhores, independentes, precisos e robustos. Duas perguntas realizadas pelo autor (Zhang, 2008) são simples, porém suas respostas são complexas: “porque os processos de soldagem devem ser monitorados, e como podem ser efetivamente monitorados?”. A resposta não poderia ser diferente, começando pelo ponto de demonstrar que um processo de soldagem, é um sistema extremamente complexo.

O monitoramento de forma não intrusiva e em tempo real está cada vez mais presente e necessário na indústria de manufatura para detecção de falhas em processos de soldagem a arco, fato decorrente de que, os produtos devem ser fabricados com alta produtividade e precisão, levando a necessidade de soldadores capacitados, equipamentos de soldas de alta qualidade e procedimentos especificamente desenvolvidos para a aplicação. Entretanto, instabilidades podem ocorrer durante o processo de soldagem, e seus resultados não podem ser verificados por métodos não destrutivos, o que significa tempo perdido e reparos, implicando em custos na produção (Ancona, Lugarà *et al.*, 2004).

Assim, o monitoramento e o controle de processos de soldagem são a chave para o desenvolvimento de tecnologias em processos de soldagem, especialmente aplicações de soldagem automática e robotizada (Ushio, 1992).

Neste sentido, o monitoramento do arco e sua devida armazenagem podem oferecer serviços e vantagens, tais como (Yapp, 2001):

- Calibração de fontes de soldagem;
- Testes de qualidade e desenvolvimento de procedimentos e avaliação de ensaios de soldagem;
- Análise e avaliação da forma de onda mais adequada para desenvolvimento de processos;
- Detecção de falhas para soldagens automatizadas;
- **Análise de desempenho do processo;**
- Rastreabilidade de partes da produção (lotes), além de servir como medidor de produtividade;
- E detecção de potenciais defeitos na soldagem.

Como item de interesse no trabalho tem o de **Análise do desempenho do processo**, sendo muito relevante nos dias atuais, quando se busca cada vez mais uma minimização de custo e aumento de produtividade.

2.4.1 Abordagens em Monitoramento de Processos de Soldagem

Machado (2011) afirma que existem duas vertentes quanto ao procedimento de soldagem, sendo a primeira relacionada ao desenvolvimento e estudo dos processos de soldagem (abordagem científica), e a segunda é o uso pela indústria, que se utiliza dos processos e procedimentos para realizar as tarefas necessárias na fabricação dos produtos (abordagem tecnológica).

Como o foco do trabalho está voltado para a abordagem tecnológica e que em termos de processamento de dados (sinais) deve-se procurar sempre o menor volume de dados possível (menores taxas de amostragem), contanto que a informação que se deseja seja obtida de forma que represente o processo com suas características. Desta forma, uma menor quantidade de dados possível deverá ser obtida dos processos melhorando assim a velocidade de processamento dos sinais.

2.4.2 Monitoramento Sonoro em Soldagem

Uma revisão bibliográfica sobre o uso de acústica (monitoramento do som) para o monitoramento de processos de soldagem foi realizada, verificando as técnicas, instrumentos e resultados encontrados por diferentes autores. Estes podem ser utilizados para realizar o embasamento teórico e avaliação da exequibilidade do projeto proposto.

Diferentes autores realizam trabalhos buscando encontrar formas de relacionar o sinal sonoro com o processo de soldagem, para diferentes modos de transferência metálica, cada um se utilizando de diferentes metodologias e equipamentos.

Autores como (Arata, Inoue *et al.*, 1979a) e (Cayo e Alfaro, 2009) mostraram que o som produzido pelo processo de soldagem é resultado da modulação em amplitude da tensão do arco com variação da corrente de soldagem. Pode-se pensar no arco elétrico trabalhando como um alto falante, e desta forma é possível medir e quantificar informações do processo de soldagem em tempo real. Seja a superfície (cone) do arco elétrico como a membrana de um alto-falante, sendo este influenciado diretamente pela tensão do arco (tamanho do cone), e a corrente do arco elétrico como a corrente do alto-falante, de onde se tem a intensidade sonora que será emitida, ou seja, a pressão acústica pode ser expressada como sendo a derivada da potência instantânea do arco, Equação (1.5).

$$S_a(t) = \frac{k \cdot d(U(t) \cdot I(t))}{dt} \quad (1.5)$$

A Figura 2.23 mostra a ideia do comparativo entre um arco elétrico plasma-dinâmico e um alto falante, princípio de funcionamento do “Arco Cantante” (Nascimento, Vilarinho *et al.*, 2015).

Em seus trabalhos (Arata, Inoue *et al.*, 1979a), (Arata, Inoue *et al.*, 1979b) e (Pal, Bhattacharya *et al.*, 2012) (este último utiliza o microfone B&K 4189 e taxa de amostragem de 40kS/s para os sinais de tensão corrente e som) verificam e concluem que há a influência de diversos fatores do processo de soldagem sobre o

sinal sonoro, sendo possível citar a potência da solda (corrente e tensão do arco), vazão e tipo do gás de proteção, comprimento do eletrodo livre (de onde entendeu-se que seria o comprimento do arco influenciando o sinal sonoro), mas que, o sinal sonoro é capaz de prover informações sobre o processo de soldagem com certo grau de confiabilidade.



Figura 2.23 – Esquerda: Arco de Solda (Filho, 2015). Direita: Alto Falante

Na mesma linha, (Filho, Moreira *et al.*, 2007) afirmam que pelo monitoramento sonoro é possível detectar diferentes tipos de transferência metálica e defeitos grosseiros de soldagem com métodos simples, entretanto, se é possível em tempo real e identificação de “assinaturas”, ou seja, detalhes dos processos de soldagem é uma dúvida que precisa de mais estudos e métodos mais avançados de análise. Assim, um sistema de caracterização universal do processo é bastante complicado de se alcançar, sendo que estratégias de monitoramento devem ser tomadas para cada tipo de transferência e o tipo de defeito que se deseja detectar.

O trabalho deixa ainda aberta a pergunta, de acordo com sua revisão bibliográfica, sobre a confiabilidade de se realizar medidas pelo som sem falsas respostas positivas e negativas, mostrando assim que há uma grande dificuldade de se utilizar o som para o monitoramento de processos de soldagem.

Arata, Inoue *et al.* (1980) realizam o estudo da influência da forma de onda de um arco TIG sobre o som, realizando a variação sobre a forma de onda da corrente de soldagem, ou seja, impõe as formas de onda senoidal, quadrada, triangular e dente de serra, verificando a resposta do sinal sonoro (pressão sonora). A Figura 2.24 ilustra a resposta obtida em seu trabalho.

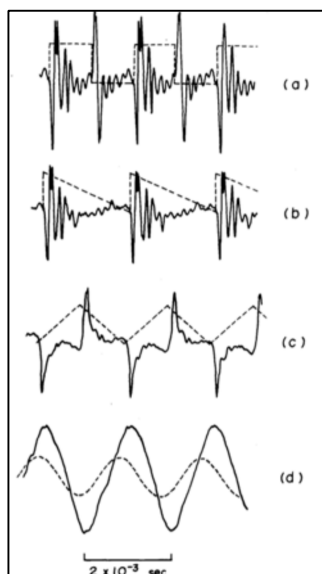


Figura 2.24 – Formas de onda do som para diferentes formas de onda da corrente de solda ($f = 500\text{Hz}$, $I_m = 100\text{A}$). A) Retangular; B) Dente de Serra; C) Triangular e D) Seno (Arata, Inoue *et al.*, 1980)

Wanga e Zhaob (2001) e (Saad, Wang *et al.*, 2006) realizaram trabalhos relacionados, sendo o monitoramento da poça de soldagem procurando identificar a o modo de penetração da mesma sobre a chapa, verificando o modo *keyhole* (em soldagem à plasma) em chapas de liga de alumínio, para o monitoramento utilizaram respectivamente, de microfones de eletreto capacitivo e uma amostragem de dados de 50 kS/s e microfones de $\frac{1}{2}$ " *free-field* à 86 mm de distância do arco e uma amostragem de 30 kS/s. Ainda segundo (Saad, Wang *et al.*, 2006), a frequência de resposta do microfone à vibração do arco elétrico está na faixa de 4500 – 7000 Hz com um pico em 11000 – 13000 Hz (Figura 2.25).

Filho, Moreira *et al.* (2007) e Arata, Inoue *et al.* (1979b) estudaram ainda a frequência de resposta e obtiveram valores similares, sendo respectivamente, 3500 – 7500 Hz e 707 – 2245 Hz e 5660 – 7120 Hz. Observa-se que o último, em seus estudos, mostra duas faixas de frequência para a resposta do som ao processo de soldagem, sendo, que o mesmo atribuiu às faixas os sinais que seriam a faixa audível do som e provavelmente a variação do arco de corrente da variação na fonte de soldagem.

Warinsiriruk e Poopat (2006) utilizaram do monitoramento sonoro para a detecção do destacamento de gota pelo processo MIG/MAG goticular, como forma alternativa ao uso de filmagem em alta velocidade, obteve bons resultados de avaliação, Para isso, utilizou-se de um microfone dinâmico e distância do microfone

ao arco de 200 mm e 48 kS/s de amostragem. Warinsiruk e Poopat (2006) também afirmam que a técnica de monitoramento sem contato por acústica pode ser usada para o estudo do comportamento dinâmico da transferência metálica e identificação da qualidade da solda, comparada com outra condição de soldagem. Entretanto não apresenta métodos e formas de se alcançar.

Cudina, Prezelj *et al.* (2008) afirmam que as ondas acústicas produzidas pelo processo MIG/MAG contém informações sobre o comportamento da coluna do arco elétrico, da transferência metálica e da poça fundida. O mesmo trabalho, ainda, afirma que dos sinais acústicos pode-se obter a *estabilidade do processo* e detectar as condições de soldagens que geram soldas defeituosas (novamente erros grosseiros). Os autores apresentam ainda dois mecanismos de geração de som durante a soldagem: ruído por impulso e ruído turbulento. Pensando em uma soldagem por curto-circuito, o ruído por impulso tem como origem a ignição e extinção do arco elétrico, e o ruído turbulento se relaciona com diferentes origens, podendo citar oscilações do arco, do eletrodo e da poça de fusão, fonte de soldagem, bomba de refrigeração da tocha.

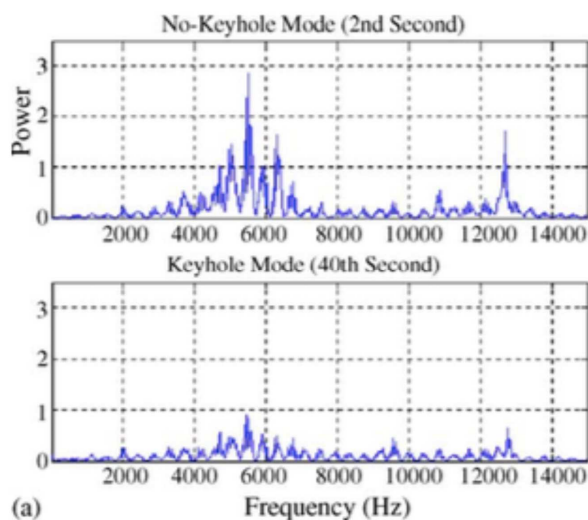


Figura 2.25 – Densidade Espectral (PSD) de uma soldagem à plasma com polaridade variável (VPPAW) (Saad, Wang *et al.*, 2006)

Um aspecto importante é que o ruído por impulso apresenta mais de 10 dBA acima do ruído turbulento, característica necessária para distinção de ruídos sonoros, representando assim o ruído dominante gerado pelo processo de

soldagem. A Figura 2.26 ilustra a relação do sinal de corrente e sonoro, indicando o ruído por impulso e turbulento.

Segundo Grad, Grumb *et al.* (2004) e (Tam e Huissoon, 2005), soldadores manuais se utilizam do som produzido pela solda para avaliar a estabilidade do processo de soldagem enquanto o mesmo é realizado como forma de avaliação da estabilidade da soldagem, sendo assim, os estudos em psico-acústica realizados mostram que se o sistema de monitoramento for capaz de adquirir e processar o sinal do som com um atraso menor que 400 ms, o sinal sonoro pode ser capaz de realizar controle sobre o processo de soldagem, sendo um bom indicador do comportamento do arco.

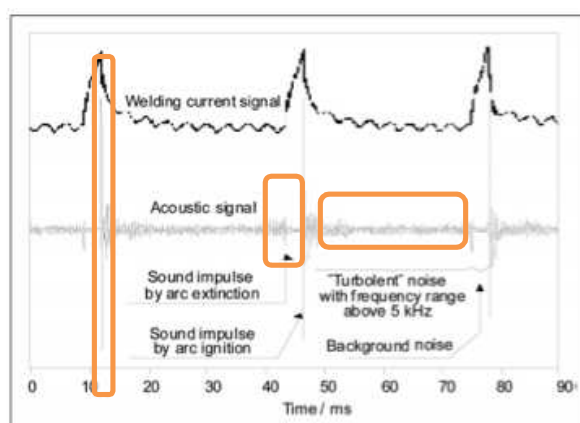


Figura 2.26. Correlação entre os sinais de corrente e sonoro. I – Ruído por impulso, II – Ruído turbulento (Cudina, Prezelj *et al.*, 2008)

Os mesmos autores concluem em seus trabalhos que a tensão do arco e o sinal sonoro do processo de soldagem apresentam o mesmo comportamento, afirmando então que o sinal do som pode ser utilizado para realizar monitoramento do processo.

Mesmo com todas as indicações de viabilidade do uso do monitoramento sonoro para processos de soldagem, o emprego do mesmo no monitoramento e controle de processos de soldagem para detecção de defeitos e instabilidades, verificação de conformidade técnica e acompanhamento de processos não são empregados em processos em ambiente industrial.

A partir então, do monitoramento da pressão acústica do arco de soldagem e de análises digitais dos sinais é possível detectar perturbações e instabilidades no processo de soldagem. Assim, o sinal acústico do arco é uma ferramenta com

grande potencial para realizar o monitoramento e avaliação de processos de soldagem de forma não-intrusiva buscando detalhes de sua dinâmica de funcionamento como indicadores de regularidade e estabilidade, e modo de transferência metálica, dentre outras.

CAPÍTULO III

SEQUÊNCIA METODOLÓGICA

3 Visão Geral da Metodologia de Trabalho

Como se trata de um trabalho que envolve a proposta de desenvolvimento e aplicação de um equipamento tecnológico aplicado à um processo produtivo de grande relevância, a sistemática da metodologia de trabalho envolve diversas etapas para a finalização do trabalho com sucesso. Neste capítulo é apresentada a sequência de desenvolvimento do sistema de monitoramento. Os passos executados são apresentados cronologicamente em detalhes no próximo capítulo como forma de informar ao leitor todo o desenvolvimento executado e que se encerra com o sistema desenvolvido, testado e validado.

3.1 Etapa A – Bancada Experimental

Para a realização dos experimentos de bancada deste trabalho se propôs a construção de uma bancada experimental dedicada, sendo composta por mesa movimentadora com um eixo paralelo ao solo (soldagem na posição plana) que apresente posicionamento fixo da tocha de soldagem em relação a mesa de movimentação da placa de teste. O sistema de fixação da tocha deve ser capaz de realizar o movimento de ajuste da distância da tocha à peça (ajuste da distância bico de contato peça - DBCP) com grande resolução e durante o processo de soldagem, pois parte dos experimento exigirá a alteração da DBCP durante o processo de soldagem. Todo conjunto deve apresentar baixa vibração e baixo ruído sonoro.

A bancada experimental tem todo o sistema de controle de movimentação (velocidade de soldagem e ajuste de DBCP) e monitoramento convencional do processo de soldagem (corrente, tensão e velocidade de alimentação), além do monitoramento sonoro do processo de soldagem. Para o desenvolvimento da instrumentação sonora da bancada experimental há a necessidade de definição do dispositivo de aquisição do som (microfone, sistema de condicionamento e amostragem) que seja capaz de captar a informação necessária do processo de

soldagem para garantir que haja exequibilidade do trabalho, assim, deve-se realizar testes para a avaliação dos microfones do sistema de monitoramento sonoro.

3.2 Etapa B – Viabilidade Técnica

Definidos os componentes do sistema de monitoramento sonoro da bancada experimental, deve-se realizar ensaios de processos de soldagem para a avaliação e verificação da viabilidade técnica de realização do projeto (exequibilidade técnica), isto é, se a partir do monitoramento sonoro do processo de soldagem por curto-circuito convencional será possível obter informações relevantes sobre o processo de soldagem, sendo para este trabalho a determinação do IVcc.

3.3 Etapa C – Processamento de Sinais

Verificada a exequibilidade técnica do trabalho, e a partir dos dados obtidos nos ensaios anteriores, deve-se realizar a elaboração de algoritmos para processamento dos sinais sonoros provenientes do processo de soldagem, eliminando possíveis ruídos e interferências no sinal, obtendo-se assim o índice de regularidade da transferência metálica para o processo MAG curto-circuito pelo método sonoro. Comparar os resultados do processamento do som com o método de obtenção do IVcc pelo sinal da tensão do arco elétrico (considerado valor de referência).

3.4 Etapa D – O Sistema de Monitoramento Sonoro (SiMoSS)

Em meio à elaboração dos algoritmos de análises de sinais, parte-se para o desenvolvimento do sistema portátil do tipo “aponta-e-pronto” para monitoramento sonoro e avaliação do processo de soldagem MAG curto-circuito convencional. O desenvolvimento do sistema é dependente dos métodos aplicados para o processamento de sinais visto que, podem demandar de maior ou menor custo computacional, além das especificações de requisitos de funcionamento.

3.5 Etapa E – Processo Decisório

Nesta etapa, definir formas e estratégias para o operador “melhorar” (definir condições mais regulares) o processo de soldagem de acordo com a avaliação do mesmo pelo dispositivo de monitoramento sonoro (alteração da tensão, velocidade de alimentação, indutância, gás de proteção, etc...) utilizando-se de um “banco de dados” para processos considerados regulares, e a partir do mesmo sugerir formas de melhorar o processo em questão. O mesmo deve ser inserido dentro do sistema móvel de monitoramento agindo em conformidade com o processamento do som.

3.6 Etapa F – Validação do Sistema

Por fim, a partir da obtenção do índice de regularidade IVccS, deve-se com o sistema implementado, realizar testes para comprovar a aplicabilidade do processamento do sinal (algoritmo de processamento e determinação do IVccS), do equipamento no monitoramento e avaliação dos processos de soldagem MAG curto-circuito, de acordo com comparativo de sistema de monitoramento de sinais elétricos (IVcc).

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

4 Desenvolvimento Experimental e Resultados

A apresentação do desenvolvimento experimental é feita de acordo com as etapas descritas na metodologia, apresentando a condução e execução do trabalho.

4.1 Etapa A – Bancada Experimental

A necessidade da construção de uma bancada específica para o desenvolvimento do projeto se dá por necessidades do trabalho que dependem de algumas capacidades e recursos específicos (repetibilidade, baixo nível de ruído, tolerância de posicionamento, etc).

A construção da bancada experimental se divide em três partes, sendo o sistema de movimentação da tocha de soldagem e placa de teste, o sistema de monitoramento elétrico e o sistema de monitoramento sonoro.

4.1.1 Mesa de Movimentação XZ Automatizada

Foi realizado o projeto e construção de uma mesa movimentadora com posição de soldagem plana, posicionamento da tocha de soldagem perpendicular em relação a translação da mesa (Figura 4.1). O sistema de posicionamento da tocha é capaz de realizar o movimento de ajuste da distância da tocha à peça com resolução suficiente para que se consiga obter o conjunto de experimentos que serão propostos, tal tarefa deve ser executada durante o processo de soldagem (uma das especificidades projeto). Esta configuração de movimentação é necessária pois junto à esta bancada será utilizado equipamento para avaliação do processo de soldagem por técnica denominada perfilografia sincronizada (Bálsamo, Vilarinho *et al.*, 2000).



Figura 4.1 – Esquerda: Mesa em construção. Direita: Mesa em funcionamento

É um desejo que o conjunto apresente baixa vibração e baixo ruído sonoro para minimizar problemas e dificuldade de execução dos experimentos quanto ao monitoramento sonoro do processo de soldagem.

O sistema de movimentação, controlado por *software*, apresenta resolução de posicionamento de 0,1 mm em ambos eixos (movimentação da chapa de teste e posicionamento da DBCP). O *hardware* de controle da mesa (fonte e drivers para os motores de passo, além dos circuitos de lógica e segurança em fim de curso) são mostrados na Figura 4.2. Nesta mesma figura é possível ver ainda o sistema de aquisição de dados (será visto na Seção 4.1.2).



Figura 4.2 – *Hardware* para controle da bancada experimental

Todo o sistema de controle da movimentação e aquisição de dados é realizado via computador com uma interface com o usuário em LABVIEW (Figura 4.3).

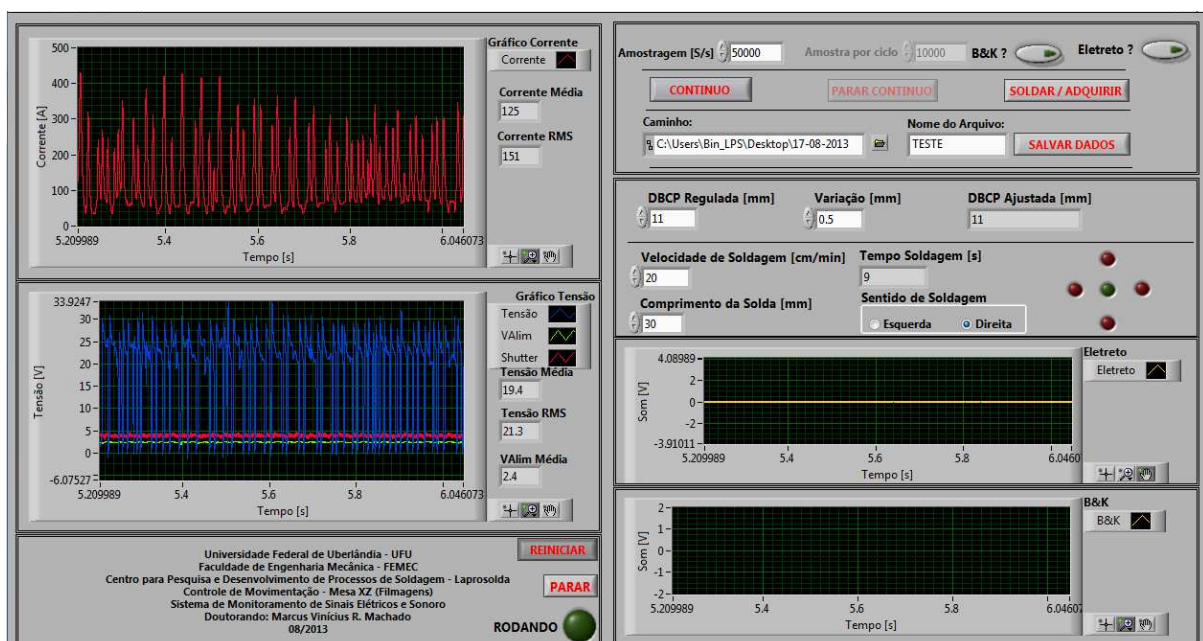


Figura 4.3 – Interface de controle da bancada experimental desenvolvida

4.1.2 Sistema de Instrumentação e Monitoramento

Para o desenvolvimento do trabalho, há a necessidade de monitoramento e aquisição dos sinais elétricos do processo de soldagem MAG curto-circuito convencional e do sinal sonoro proveniente do arco elétrico.

Os sinais de monitoramento convencionais do processo de soldagem (corrente, tensão e velocidade de alimentação), o sinal sonoro e o sinal de disparo da câmera de alta velocidade (perfilografia) foram adquiridos com uma placa NI USB 6218, de 15 bits de resolução em modo de referência única, sendo todos os sinais amostrados à uma taxa de 50 kS/s para um estudo mais detalhado dos sinais envolvidos.

4.1.2.1 Sinais Elétricos

Para sistema de monitoramento convencional dos sinais provenientes dos processos de soldagens (corrente, tensão e velocidade de alimentação) foi desenvolvido um sistema de condicionamento de sinais para a aquisição,

condicionando os sinais de suas características para sinais de tensão em amplitudes de -10 a +10 V (Machado, Mota *et al.*, 2011).

O circuito completo para o condicionamento, é composto por duas fontes de alimentação simétricas de -12 e +12 V, para a alimentação dos circuitos, sendo que a necessidade de duas se dá pela presença do isolador para o sinal de tensão, que necessita de duas fontes simétricas, sendo que uma fica do lado da potência e a outra do lado do sistema de aquisição. A segunda fonte apresenta ainda uma tensão regulada de +5 V para alimentação do encoder responsável pela medida da velocidade de alimentação do arame de adição. Seus circuitos podem ser observados na Figura 4.4, e o desenho da placa de circuito impresso confeccionada para realizar os condicionamentos é mostrada na Figura 4.5, sendo que a mesma pode ser vista na Figura 4.2 no canto inferior esquerdo da foto.

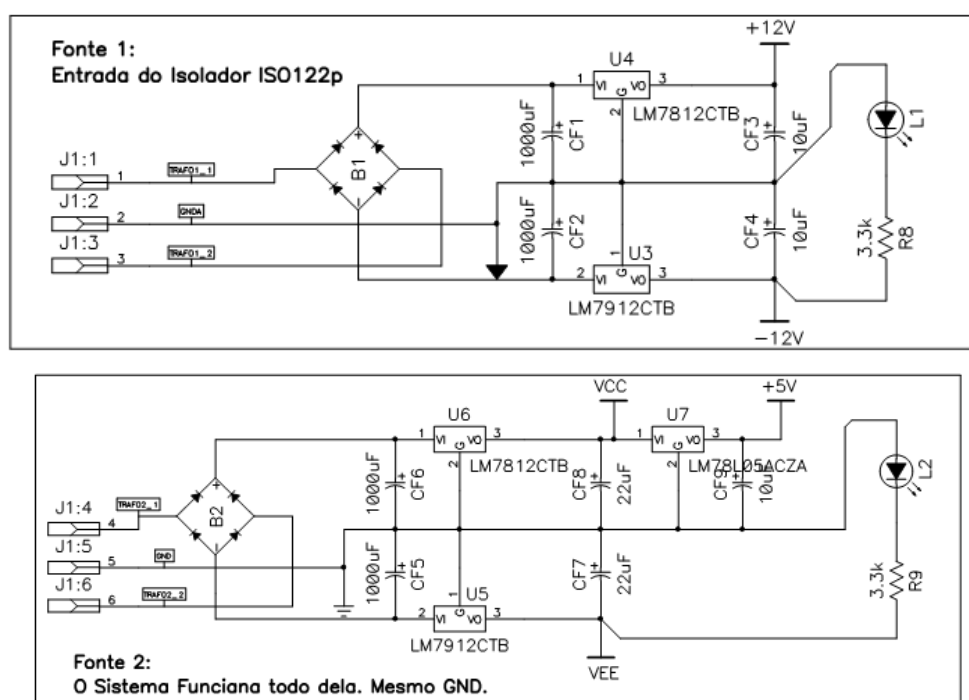


Figura 4.4 – Fonte 1: utilizada na referência da parte da solda. Fonte 2: utilizada para alimentação de todo circuito e referência para o sistema de aquisição

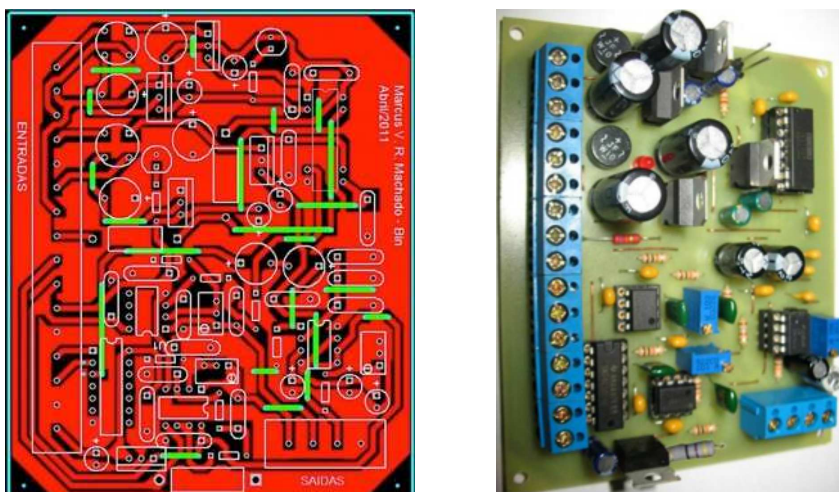


Figura 4.5 – Placa de circuito impresso utilizada para realização do condicionamento dos sinais

4.1.2.1.1 Tensão

Em termos de grandeza elétrica, deve-se adequar a faixa de tensão de soldagem (definida como -70 a +70 V no projeto) para a faixa de trabalho do sistema de aquisição citada. Além disso, há a necessidade de um circuito de isolamento galvânico – o circuito de aquisição deve ser eletricamente isolado da parte de potência (soldagem) –, filtros analógicos para a retirada de frequências fora do escopo de estudo, adequação de impedância para a ligação com as placas de aquisição, responsáveis pela conversão analógica-digital.

O condicionamento para o sinal de tensão proveniente do processo de soldagem é realizado, inicialmente, com um circuito elétrico/eletrônico composto de um divisor de tensão para a faixa de trabalho e um isolador galvânico proporcional ISO122P, ilustrado na Figura 4.6.

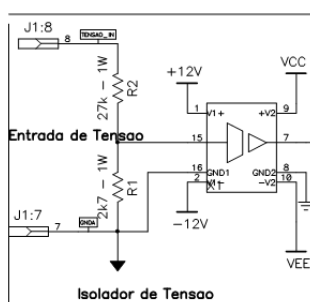


Figura 4.6 – Circuito de entrada para a tensão: divisor de tensão e isolamento

O divisor de tensão ajusta o sinal de entrada de -70 a 70 V para a faixa de -6,29 até 6,29 V, com ganho de tensão de aproximadamente $k_{divisor} \cong 1/11,14$; e o isolador galvânico tem ganho unitário, com sua saída, portanto, igual ao sinal em sua entrada, realizando apenas o isolamento galvânico.

Optou-se pela utilização de um filtro de Butterworth passa-baixa de segunda ordem com frequência de corte em 1591 Hz. Esta frequência permite uma resposta sem atenuação para frequências até cerca de 600 Hz, para atender os requisitos dos sinais de soldagem que estão até 300 Hz (MACHADO,2011). Seu circuito elétrico é apresentado conforme a Figura 4.7. Este filtro, particularmente, possui um ganho de tensão de $k_{filtro} = 1,586$, como previsto na topologia de Butterworth. Sendo então o circuito apresenta um ganho total de $k_{condicionar} = 1/7,02$.

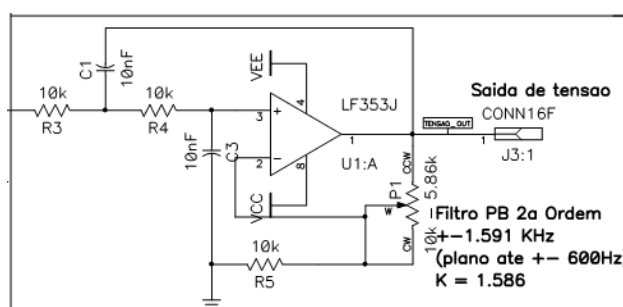


Figura 4.7 – Circuito de filtro analógico para a tensão: Butterworth de segunda ordem em 1591 Hz

4.1.2.1.2 Corrente

Para o sinal de corrente, os circuitos de condicionamento de sinal diferem-se dos utilizados para a tensão pela não necessidade de isolamento galvânico na etapa de condicionamento inicial, visto que o transdutor de efeito Hall utilizado já funciona como um isolamento galvânico. O transdutor, no entanto, apresenta em sua saída, um sinal de corrente proporcional à que passa no condutor, sendo assim deve converter o sinal de corrente para um sinal de tensão proporcional, dentro da faixa de trabalho. O mesmo circuito pode ser utilizado para transdutores Hall com saída em tensão, sendo que assim não se deve inserir no circuito o resistor R13. O circuito de condicionamento do sinal de corrente então é constituído de um como mostra a Figura 4.8.

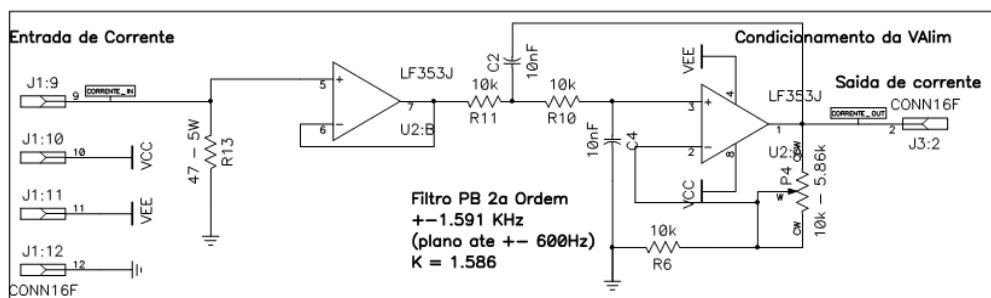


Figura 4.8 – Circuito de condicionamento da corrente

O sinal de saída do transdutor em Efeito Hall tem intervalo de corrente de -120 a +120 mA e, após a passagem pelo conversor corrente-tensão apresenta valores de -5,64 a +5,64 V, sendo que na saída do filtro (o mesmo descrito para o sinal de tensão) apresenta um intervalo de -8,96 a +8,96 V.

4.1.2.1.3 Velocidade de Alimentação

Para a velocidade de alimentação, os sinais que saem do mecanismo de medição, baseado em um *encoder* relativo, são dois trens de pulsos com 90 graus de defasagem. Os sinais apresentam 1024 pulsos por volta de resolução, e frequência variável de acordo com a rotação. Um circuito digital lógico do tipo OU EXCLUSIVO (XOR) recebe os sinais das duas fases e dobra a sua frequência no sinal de saída, sendo que em sua saída tem-se a frequência da entrada dobrada, e apenas um sinal. Este sinal então é convertido em tensão através de um circuito conversor de frequência em tensão, baseado no LM2907 (Figura 4.9).

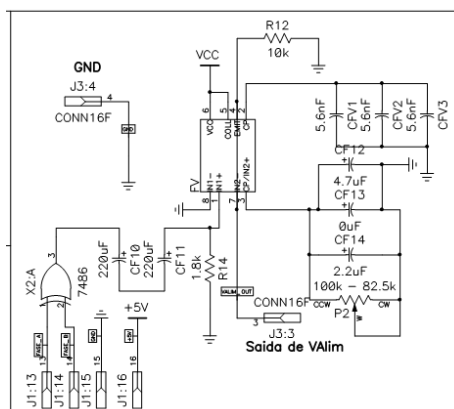


Figura 4.9 - Circuito de condicionamento para a velocidade de alimentação

4.1.2.2 Sinal Sonoro

Para a implementação do sistema de monitoramento do sinal sonoro há a necessidade de escolha do microfone a ser utilizado, devendo ser realizada com base na revisão bibliográfica e ensaios preliminares para a avaliação dos microfones.

Existem no mercado microfones de alta qualidade específicos para serem utilizados em pesquisas na área de Acústica, estes apresentam relativo alto custo e apresentam grande fidelidade e confiabilidade de captação do som. Por outro lado, microfones de eletreto são mais comuns no mercado, de baixo custo e encontrados em praticamente todos os dispositivos tecnológicos atuais que captam som. Desta forma, será considerado para uso no trabalho o Microfone Condensador de Eletreto Panasonic WM-53C01 e o mesmo será avaliado quanto ao uso considerando para a avaliação o Microfone Brüel & Kjaer Type 4957 No. 2770572 como referência.

Como proposta, visto que há o objetivo de construção de equipamento com baixo custo para o monitoramento sonoro do processo de soldagem, tem-se de verificar a viabilidade do uso de microfone comercial de baixo custo, comprovando, ou não, sua aplicabilidade comparando com microfone de instrumentação profissional.

4.1.2.2.1 Microfone de Referência

Para a aquisição do sinal sonoro do processo de soldagem, e sendo considerando como sinal de referência, foram utilizados os seguintes equipamentos, gentilmente cedidos pelo Laboratório de Acústica e Vibrações - LAV/UFU pelo Prof. Marcus A. V. Duarte:

- Placa Adaptadora NI Hi-Speed USB Carrier (USB-9162) No. E25E90;
- Placa de Aquisição NI cRIO-9233 No. 117CD88;
- Microfone Brüel & Kjaer Type 4957 No. 2770572 (Figura 4.10);
- Cabo de Conexão BNC – MiniCoaxial No. AO-0564-D-050-2011-W41.

O sistema como descrito, em sua montagem tem como características de funcionamento e resposta em frequência de 50 – 10000 Hz, sendo uma cápsula de ¼" e omnidirecional .



Figura 4.10 – Microfone Brüel & Kjaer Type 4957

4.1.2.2 Microfone de Eletreto Proposto

Como microfone proposto para utilização,, tem-se um microfone capacitivo eletroestático de Eletreto (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Microfone de Eletreto - PANASONIC WM SERIES ELECTRET CIRCUIT WM-53C01. (Fonte: Próprio autor)

Para aquisição do sinal e utilização do microfone proposto foi necessária a construção de um circuito eletrônico de alimentação e pré-amplificação ((Bennett, Mahon *et al.*, 2010), ((Bone), 2013)) com um ganho de tensão e filtro para o condicionamento do sinal de saída do mesmo (Figura 4.12 e Figura 4.13), visto que o mesmo responde em baixas amplitudes de tensão. Devido ainda as baixas amplitudes, o circuito é alimentado por uma bateria de 9 V para evitar que ruídos de alimentação sejam inseridos no sinal elétrico do microfone. O circuito além do ganho realiza um casamento de impedância para o sistema de aquisição e um filtro passa baixa ajustado para 16000 Hz. O sinal de saída será lido pela placa de aquisição e sistema da National Instruments conforme já descrito. O sistema como descrito, em

sua montagem tem como características de funcionamento e resposta em frequência de 20 – 16000 Hz, sendo uma cápsula de ½” e omnidirecional .

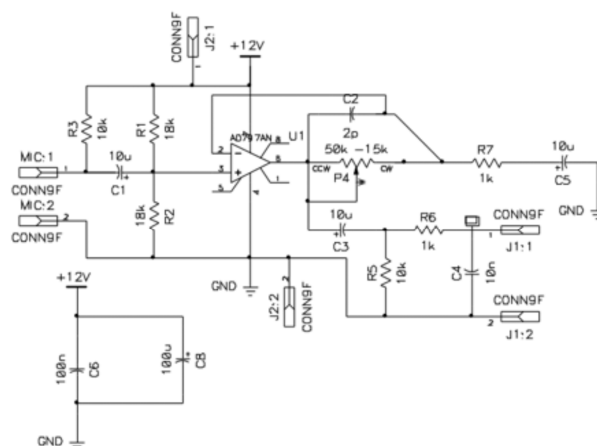


Figura 4.12 – Circuito elétrico de condicionamento do sinal do microfone de eletreto

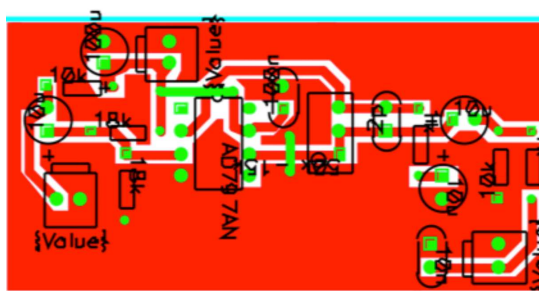


Figura 4.13 – Esquerda: Esquema da Placa de Condicionamento do Microfone de Eletreto. Direita: Placa Montada

O microfone de referência já apresenta seu corpo montado, o de eletreto proposto é comprado o mercado somente as cápsulas independentes, desta forma há a necessidade de construção de um corpo para alojamento e montagem do mesmo com seu circuito de alimentação / pré-amplificação.

Para uma primeira proposta e avaliação dos microfone, foi realizada uma implementação simples de corpo, com a inserção da capsula em um tubo metálico, sendo que o mesmo ficava na ponta do tubo. A frente foi inserido um cone com espuma para “filtrar” ruídos de baixa frequência e efeitos de vento e ou sopros, sendo esta proteção inserida montada para os dois microfones, pois há ainda a necessidade de proteção dos dispositivos contra respingos do processo de soldagem, vista a pequena distância dos mesmos ao processo, que produz respingos de metal fundido.

4.1.2.2.3 Avaliação dos Microfones

Nesta fase, um estudo foi realizado para compreender o funcionamento e as diferenças entre os microfones propostos para a aquisição do sinal sonoro e embasar a escolha do microfone, que sem dúvida, é peça importante na determinação da viabilidade do monitoramento sonoro em soldagem, levando-se em consideração ainda o custo final do equipamento. Características como dimensões, sensibilidade, resposta em frequência, e defectividade sonora influenciam na resposta do mesmo na aquisição do som proveniente do arco elétrico.

Como este tipo de informação é limitada para o microfone de eletreto, realizou-se um pequeno estudo sobre o comportamento e resposta dos microfones, buscando verificar a capacidade dos mesmos em monitorar os processos de soldagem propostos.

Geraram-se diferentes sinais (senoidal, quadrada, dente de serra e triangular) em um alto-falante e variou-se a frequência dessas entre 20 e 10000 Hz, para verificar um comparativo de resposta entre os dois microfones.

Simulando uma variação da frequência clássica da transferência por curto-circuito 20 à 200 Hz (Scotti e Ponomarev, 2008) espera-se verificar a resposta dos mesmos ao que se espera do processo de soldagem, onde o processo por curto-circuito se aproxima de uma onda quadrada.

Realizou-se uma montagem dos dois microfones (sendo o de eletreto com o corpo de montagem provisório) posicionados à mesma distância (800 mm) da fonte sonora, distância dada como referência para uma distância segura de trabalho e monitoramento durante o processo de soldagem para o utilizador. Ambos foram montados ao fundo de uma estrutura cônica para posicionamento de espuma (filtro para evitar interferências de ventos) e proporcionar certa direcionalidade aos mesmos.

Os sinais foram adquiridos com a mesma taxa de amostragem, sendo 50 kS/s, a alta taxa se baseia no fato de ser um estudo exploratório, sendo que posteriormente esta será alvo de estudo, minimizando a quantidade de dados a serem processados. Nenhum dos sinais passou por filtros adicionais aos dos próprios circuitos de condicionamento.

As Figura 4.14 e Figura 4.15 ilustram a resposta dos microfones para as frequências extremas do curto-circuito de 20 e 200 Hz, respectivamente, representando uma “simulação” de um processo de soldagem, as demais figuras comparativas (20, 60, 100, 200, 600, 1000, 2000, 6000, 10000 Hz) podem ser vistas no Apêndice I – Comparativo entre Microfones (Item 4.1.2.2.3).

Para o a frequência de 20 Hz, observou se para a onda senoidal pura, os dois microfones apresentaram resposta ineficiente para estudo. Isso pode ser uma característica da resposta de ambos, ou uma característica do sistema de reprodução do som (alto falantes).

Para as ondas quadrada e dente de serra, ambos mostraram com grande correlação a resposta esperada (derivada do sinal reproduzido pelo alto falante).

Para 200 Hz já é observável a boa resposta dos dois microfones para os três sinais. Assim, diz-se que para a faixa de frequência de interesse deste monitoramento (de 20 até 200 Hz de pulsação do arco) os dois microfones responderam de forma análoga aos sinais gerados pela caixa de som, não sinais limpos (senoide limpa e pura da frequência de 200 Hz) assim como as outras formas de onda, devido a perturbações do ar que são geradas pelo som, reverberações e a própria dinâmica de funcionamento das capsulas de conversão sonora em sinal elétrico, que apresentam certa rigidez e amortecimento a movimentação. As resposta aqui observadas coincidem com o observado no trabalho de (Arata, Inoue *et al.*, 1980) quando às respostas à forma de onda imposta no processo de soldagem, mostrando mais uma vez a correlação entre o arco e um alto falante.

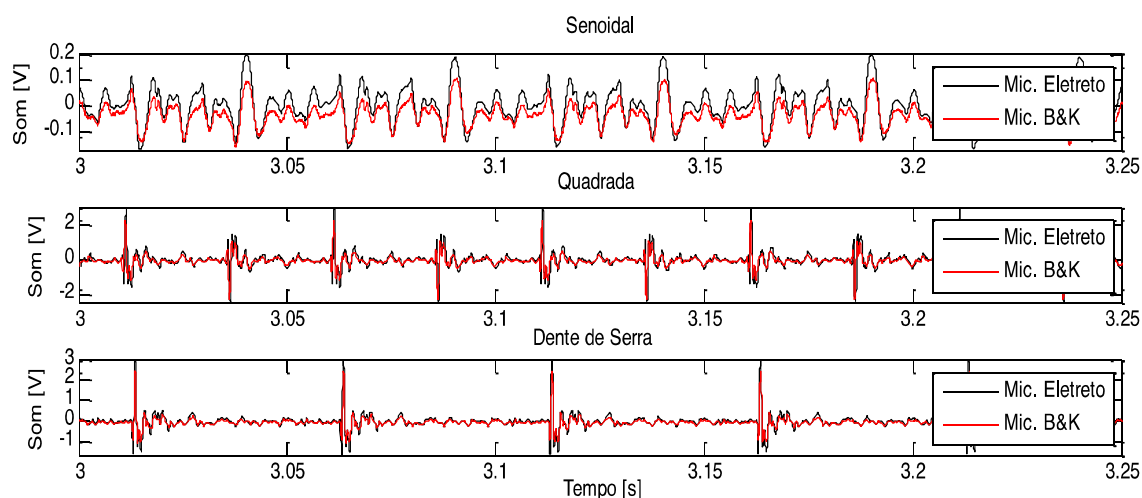


Figura 4.14 - Comparativo dos microfones com forma de onda em 20 Hz (Fonte: Próprio autor)

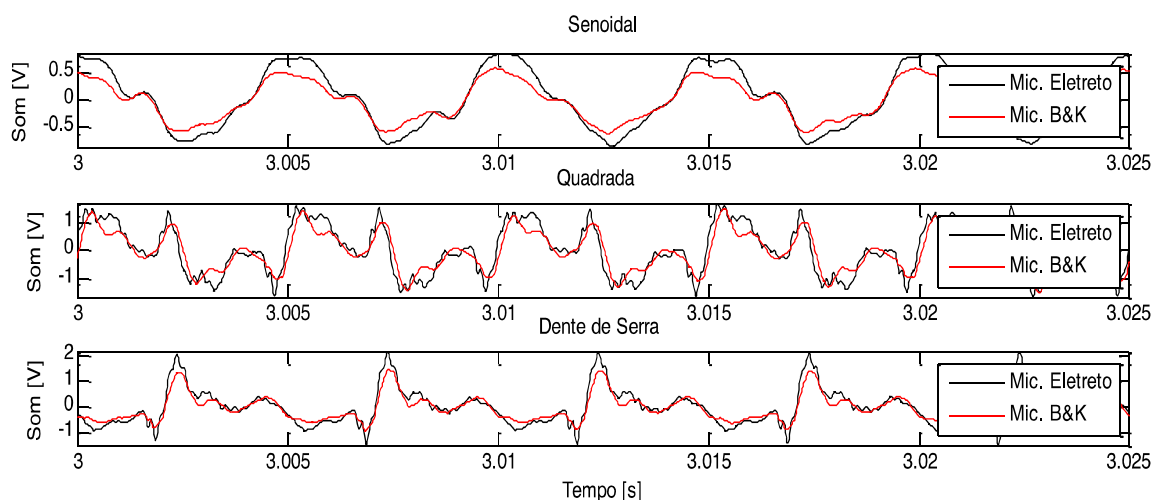


Figura 4.15 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 200 Hz (Fonte: Próprio autor)

De uma forma geral, é possível concluir que o microfone de eletreto tem variações mais abruptas de tensão quando submetido a uma mesma variação de intensidade de pressão sonora que o microfone B&K. O microfone de referência, portanto, tem um “amortecimento” maior em sua captação sonora e responde de forma mais direta aos impulsos sonoros recebidos.

Quando se observa, em específico, a forma de onda quadrada, em maiores frequências – forma de onda com maior semelhança ao comportamento da variação de tensão do arco voltaico na transferência por curto-circuito – os dois microfones são capazes de responder aos impulsos sonoros adequadamente e, apesar de apresentarem pequenas diferenças em suas respostas, sendo inseridas componentes senoidais de altas frequência pelo microfone de eletreto. Na Figura 4.16 apresenta-se o resultado e a observação para uma onda quadrada de 600 Hz, sendo possível obter as características da forma de onda (como os períodos) com ambos os microfones. O microfone de eletreto então, sendo de custo muito inferior ao microfone B&K (R\$50,00 contra US\$1.000,00 – conjunto de microfone e circuito de condicionamento de ambos), é considerado como a opção para o monitoramento sonoro dos processos de soldagem por curto-circuito para o trabalho.

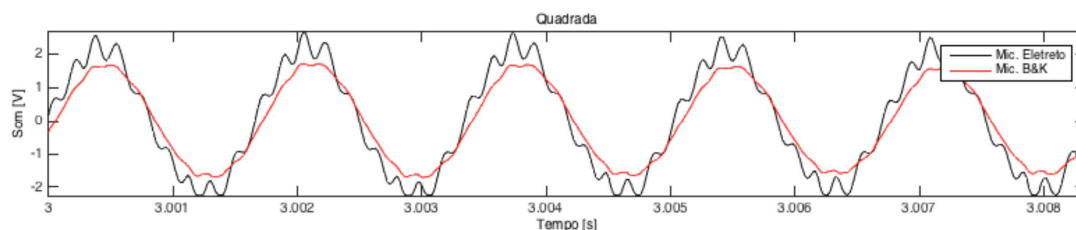


Figura 4.16 – Observação de altas frequências inseridas pela captação – Onda Quadrada de 600 HZ (Fonte: Próprio autor)

Determinada então a aplicabilidade do microfone de eletreto para o monitoramento sonoro dos processos de soldagem para realização dos trabalhos, foi construído um corpo em ABS por impressora 3D, com posicionamento do microfone, circuito de condicionamento e cone com direcionamento e espuma de absorção. A Figura 4.17 mostra o projeto e construção do microfone final para instrumentação da Bancada Experimental. Tal projeto foi baseado em estudos de construção de microfones para instrumentação baseados em cápsulas de eletreto (Hendricks, 2013) e (Dwyer, 2010).



Figura 4.17 – Esquerda: Projeto de Construção. Direita: Impresso e Montado (Fonte: Próprio autor)

4.2 Etapa B – Viabilidade Técnica

Para alcançar o objetivo proposto para este trabalho, deve-se verificar a viabilidade do uso do monitoramento sonoro para a determinação da regularidade da transferência metálica pelo Índice de Regularidade (IVcc) e a frequência de curto-circuito. Considera-se que o posicionamento entre o microfone e a fonte sonora

(arco voltaico), a os parâmetros de soldagem, ambiente de trabalho e outros fatores podem influenciar no monitoramento sonoro.

4.2.1 Relação entre o Sinais Elétricos e o Sinal Sonoro

Para a determinação do IVccS é necessário que se obtenha fundamentalmente os tempos de cada curto e arco aberto do processo curto-circuito, assim é necessário a observação pelo sinal sonoro dos pontos de extinção (apagamento) do arco e de sua ignição (abertura).

Buscando uma comparação entre os sinais elétricos e sonoro realizou-se o monitoramento de diversas soldagens MAG com transferência por curto-circuito e adquiriram-se esses sinais de forma sincronizada para cada experimento. Um exemplo do sinal adquirido (com a distância entre microfone e arco de 400 mm) é ilustrado na Figura 4.18.

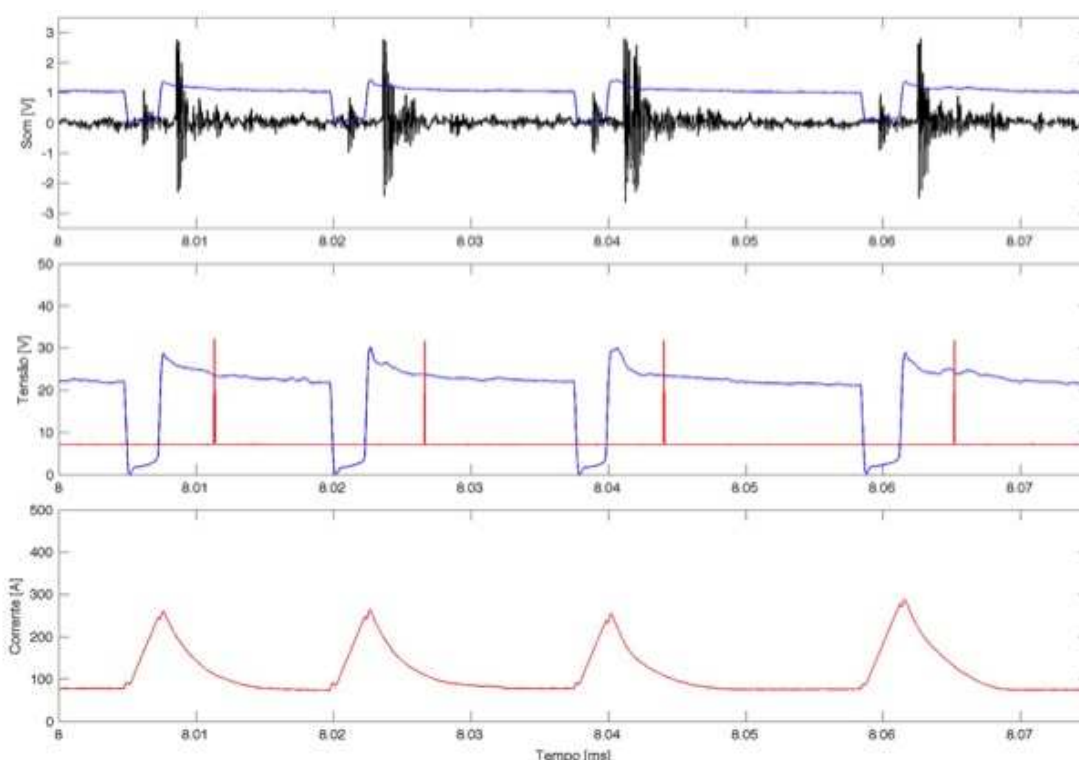


Figura 4.18 – Comparação entre sinais elétrico (acima) e sonoro (meio – tensão, baixo – corrente) (Fonte: Próprio autor)

Inicialmente, é possível observar que o sinal sonoro acompanha o sinal elétrico (especialmente a tensão) em relação aos instantes de extinção e ignição do

arco. Ambos os sinais apresentam a mesma quantidade de curtos e arcos abertos em um determinado intervalo de tempo. Pode-se observar os impulsos sonoros provenientes dos momentos de mudança brusca da tensão do arco elétrico e os intervalos de tempo entre eles seguem o mesmo padrão observado no sinal elétrico.

O sinal sonoro apresenta um atraso em relação ao sinal elétrico, sendo que ambos foram adquiridos de forma simultânea. O tempo de atraso do monitoramento sonoro é diretamente ligado ao tempo de propagação do som da fonte emissora (arco elétrico) até seu receptor (microfones) através do meio. Esse tempo varia de acordo com a distância entre os mesmos, a inércia do arco, e as características físicas do meio – incluindo variação de temperatura. Para a distância de 200 mm, o tempo de atraso entre os sinais elétrico e sonoro é ilustrado na Figura 4.19.

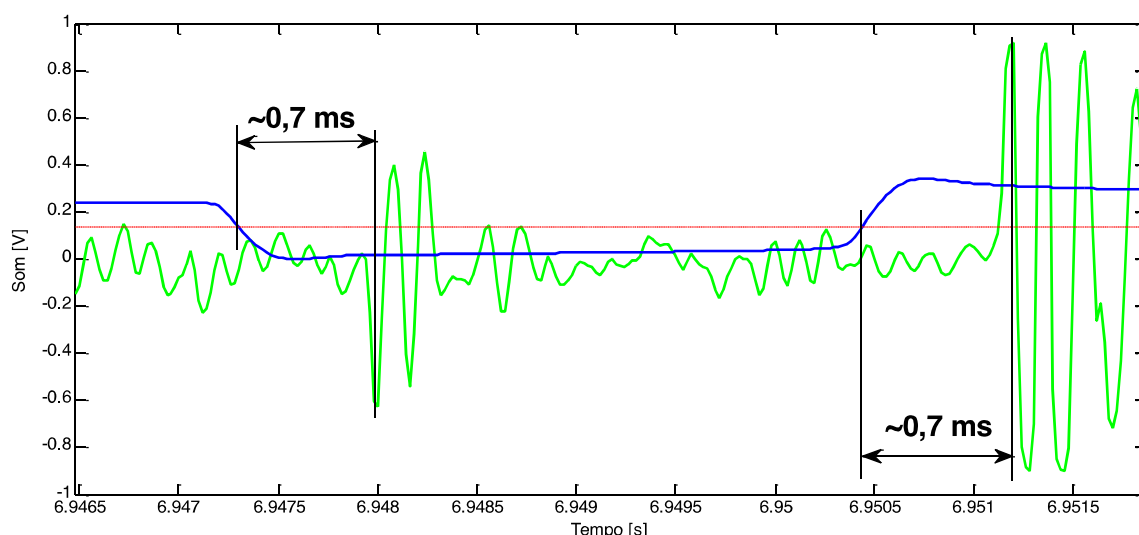


Figura 4.19 - Ilustração dos tempos de atraso entre sinais elétrico e sonoro para distância de 200 mm (Fonte: Próprio autor)

De forma similar, para as distâncias de 400 e 800 mm entre o microfone e o arco, o tempo de atraso foi de aproximadamente 1,1 e 2,1 ms, respectivamente, para um mesmo experimento. O tempo atraso se mostrou regular ao longo de toda a aquisição e sem distinção entre extinção e ignição do arco, não sendo, portanto, fator que influencie na determinação dos tempos de curto-circuito e arco aberto necessários para o cálculo do IVcc.

Realizando-se inicialmente avaliação matemática dos sinais, observou-se que o sinal sonoro lembra a característica da derivada do sinal de tensão, e lembrando do princípio da audição humana, o ouvido é sensível à variação de pressão sonora

(potência sonora) sobre o mesmo, e quando pensa-se em variação, matematicamente, nos vem a ideia de derivada.

Desta forma, então, o sinal sonoro está mais relacionado com a derivada da potência do sinal da soldagem, ou seja, o som proveniente do processo de soldagem então, veem da variação da forma e da intensidade do arco, sendo relacionado com a variação da potência do arco (conforme visto nos trabalhos de (Arata, Inoue *et al.*, 1979a) e (Cayo e Alfaro, 2009)).

A Figura 4.20 mostra em mais detalhes a observação da relação do sinal sonoro com a tensão e potência do arco.

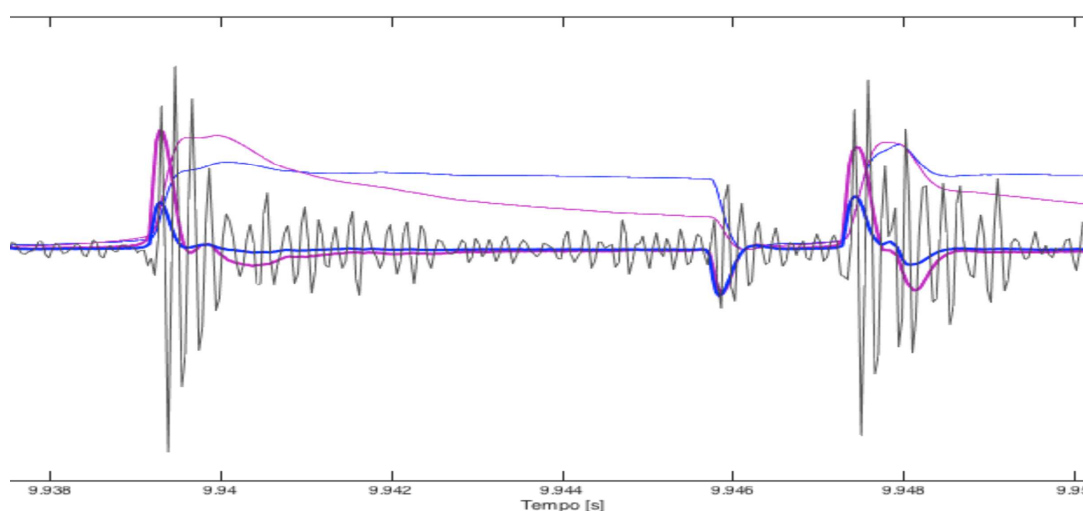


Figura 4.20 – Relação entre sinais de azul: tensão, roxo: potência e preto: pressão sonora (Fonte: Próprio autor)

Observando-se em detalhes os sinais do som, da tensão e sua derivada, da potência elétrica e sua derivada, fica mais claro a relação do sinal do som com a potência, pois observa-se que a derivada da tensão apresenta os mesmos valores, aproximadamente, para apagamento e abertura do arco elétrico (visto que a tensão sai de determinado valor de arco aberto passa para um valor próximo de zero, não chegando a zero mesmo em curto pois há uma resistência de contato e grande corrente envolvida, conforme apresentado no Apêndice II – Estudo da Tensão de Referência para Curto-circuito para Determinação do IVcc pelo Sinal da Tensão (Item 4.2.3)) e volta ao mesmo valor após ignição do arco. Já para a derivada da potência elétrica observa-se que o valor da derivada de saída de arco aberto para

curto-circuito apresenta um valor menor que o valor para ignição do arco, o que é observado também no sinal sonoro, que apresenta um impulso maior neste mesmo momento. No caso do sinal da potência do arco, uma vez que a corrente de curto altera-se rapidamente, a derivada da potência do arco é maior no instante de abertura do arco, se comparada ao instante de apagamento.

4.2.2 Influência da Distância entre o Microfone e o Arco de Soldagem

O processo de soldagem MAG é caracterizado por altas temperaturas e por questões de saúde ocupacional necessitando a devida proteção e, portanto, uma maior distância entre o microfone e o processo, certamente provém benefícios ao operador do monitoramento, mas, por outro lado, pode prejudicar o valor intensidade sonora que atinge os microfones. Tendo em vista o equilíbrio entre as variáveis, escolheram-se três distâncias distintas (com base em estudo de trabalhos passados) para a aquisição do sinal sonoro em busca de uma posição ideal: 200, 400 e 800 mm. Os sinais sonoros adquiridos pelo microfone de eletreto em uma soldagem MAG com transferência por curto-circuito nas três distâncias estabelecidas são ilustrados na Figura 4.21.

As aquisições foram realizadas para um mesmo procedimento de soldagem, onde foi interrompida a aquisição, salvos e dados e então realizada a aquisição para a próxima distância, assim feito para as três distâncias, sem interromper o arco de soldagem. É importante ressaltar que o sinal sonoro ilustrado não sofreu nenhum tipo de processamento, como filtragem, cancelamento de ruído ou direcionamento.

É possível observar que, como esperado, o aumento da distância entre o microfone e a o arco elétrico tem por consequência a queda da intensidade sonora que alcança o microfone, ou seja, uma queda na tensão gerada pelo microfone em resposta ao som. Desta forma, quanto maior a distância do microfone, menores serão os impulsos sonoros provenientes da extinção e ignição do arco (impulsos sonoros I e II, respectivamente) ilustrados na Figura 4.22. Em especial, para a distância de 800 mm, observa-se que os impulsos sonoros do momento de extinção do arco, de menor intensidade que os de ignição do arco, são dificilmente distinguíveis do ruído de fundo ou ruído turbulento (Cudina, Prezelj *et al.*, 2008).

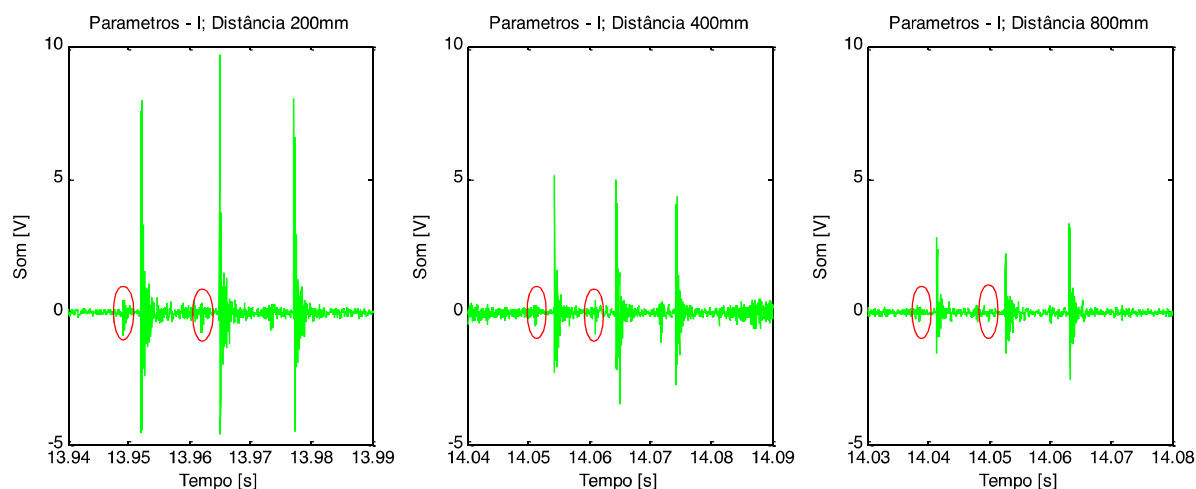


Figura 4.21 - Comparativo entre sinal sonoro adquiridos à 200, 400 e 800 mm do arco elétrico com destaque para o impulso sonoro de extinção do arco (Fonte: Próprio autor)

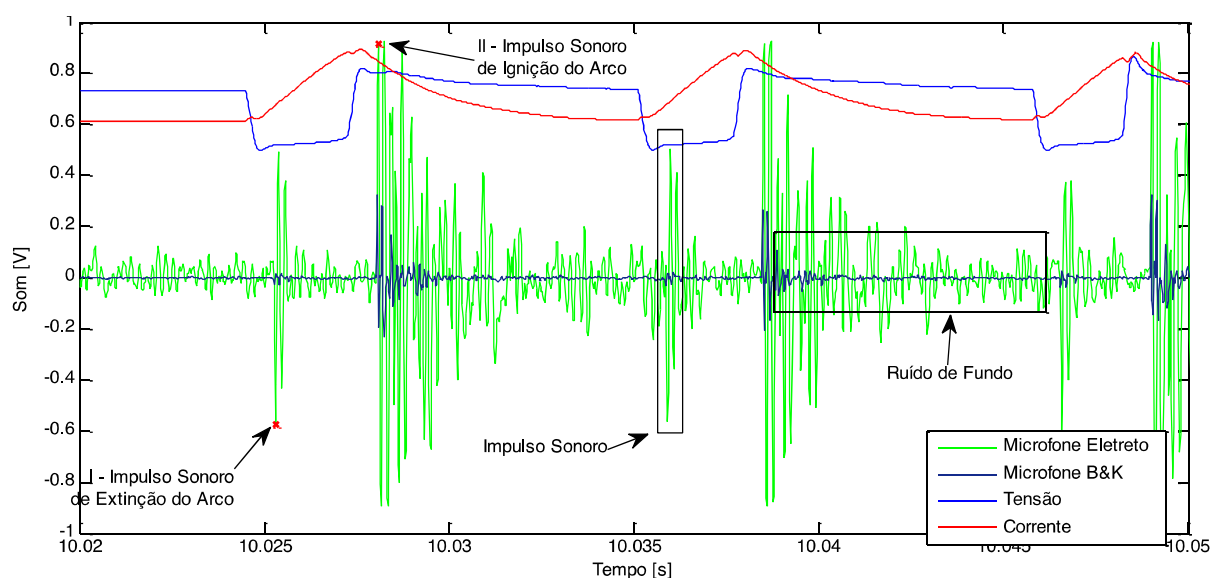


Figura 4.22 – Impulsos sonoros provenientes da extinção e ignição do arco (impulsos sonoros I e II, respectivamente) (Fonte: Próprio autor)

Observando-se o sinal de tensão gerado pelo microfone de eletreto para as distâncias de posicionamento de 400 e 200 mm, pode-se concluir que, em ambos os casos, os impulsos sonoros de extinção do arco são distinguíveis do ruído de fundo, com maior evidência para a distância de 200 mm. Os impulsos sonoros de ignição do arco tem maior intensidade e é também passível de identificação. Portanto, as duas menores distâncias – 200 e 400 mm - são consideradas viáveis para a

identificação dos impulsos sonoros de extinção e ignição do arco. Desta forma, tendo em vista uma maior segurança do equipamento e benefício do operador (visando o sistema final) optou-se pela distância de 400 mm.

4.2.3 Determinação do IVcc pelo Som - IVccS

Para a avaliação final da viabilidade de determinação do IVcc através do monitoramento sonoro, calculou-se os índices de regularidade para três processos distintos de soldagem MAG com transferência por curto-circuito pelos sinais elétrico e sonoro, comparando-os. A distância entre o arco de solda e microfone para a aquisição do sinal sonoro foi de 400 mm nos Pré-Testes 1 e 3, e de 200 mm no Pré-Teste 2. Para os sinais elétricos foi utilizado o “Programa de Análise de Curto-circuito (CURTO3)” criado pelo Laprosolda/UFU para determinar o IVcc (Tensão de Referência – 10V, veja Apêndice II – Estudo da Tensão de Referência para Curto-circuito para Determinação do IVcc pelo Sinal da Tensão (Item 4.2.3) para maiores detalhes) e para os sinais sonoros, o IVccS foi determinando manualmente, com a seleção dos impulsos de abertura e apagamento do arco por seleção manual dos pontos e medidos os pontos entre os mesmos no mesmo intervalo de avaliação do IVcc, sendo para verificação de viabilidade, pequenos tempos de soldagens foram avaliados. A determinação dos pontos para encontrar tempos de curto-circuito e arco aberto para os sinais elétrico e sonoro é ilustrada na Figura 4.23 e os resultados são exibidos na Tabela 4-1.

Os resultados obtidos por meio dos sinais elétrico e sonoro para os testes apresentaram uma pequena diferença, principalmente quando os erros de medição são diluídos através do cálculo de média e de desvio-padrão. Os valores determinados do IVcc apresentaram erros relativos entre sinais elétrico e sonoro abaixo de 1,0%. Assim, mesmo considerando o erro de marcação em processos de reconhecimento automático dos impulsos sonoros, é possível concluir que o índice de regularidade obtido pelo monitoramento sonoro é estatisticamente próximo ao obtido pelo sinal elétrico. Portanto, afirma-se que é viável a determinação do IVcc através do monitoramento sonoro (IVccS), podendo assim o trabalho seguir continuidade na determinação automática (identificação automática dos pontos de abertura e apagamento dos arcos de soldagem).

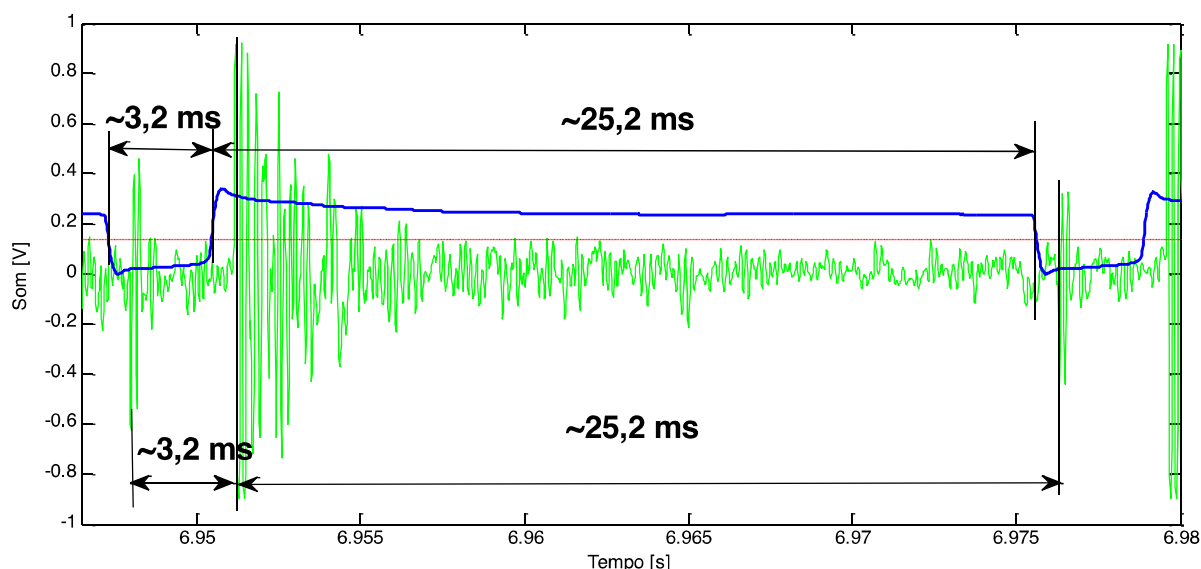


Figura 4.23 - Ilustração dos tempos de curto-circuito e abertura do arco para sinais elétrico e sonoro (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-1 - Resultados comparativos da determinação do IVcc através de monitoramento elétrico e sonoro

Parâmetro	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	Elétrico	Sonoro	Elétrico	Sonoro	Elétrico	Sonoro
$t_{cc}[ms]$	2,60	2,70	3,00	3,10	3,10	3,10
$t_{ab}[ms]$	11,50	11,40	13,50	13,40	8,00	7,90
$\sigma t_{cc}[ms]$	0,30	0,30	0,70	0,70	0,60	0,60
$\sigma t_{ab}[ms]$	4,00	4,00	9,30	9,30	2,60	2,60
IV_{cc}^*	0,463	0,462	0,922	0,920	0,519	0,523
Fcc [Hz]	70,9	70,9	60,6	60,6	90,1	90,9
Erro Relativo	0,26 %		0,26 %		0,79 %	

Nota: *O valor do IVcc deve ser exibido com até duas casas decimais, entretanto para avaliação do erro, e especialmente nestes testes onde a taxa de amostragem foi de 50 kS/s, possibilitando maior resolução no tempo, utilizou-se com três casas decimais. (Fonte: Próprio autor)

4.2.4 Influência dos Parâmetros e Consumíveis de Soldagem sobre o Som e na Determinação do IVccS

Para avaliação dos efeitos de parâmetros/variáveis e consumíveis do processo de soldagem sobre o sinal sonoro, bem como para o desenvolvimento do algoritmo de processamento do sinal sonoro para determinação do IVccS, foram realizados ensaios de soldagem por deposição de cordão sobre chapa. A fonte de soldagem utilizada para as sondagens foi a Miller PipePro 450 e como sistema de

movimentação e monitoramento foi utilizada a bancada experimental já descrita. Define-se como parâmetro o que é imposto na realização do ensaio, e variável o resultado do processo, e, desta forma, os testes realizados seguiram um planejamento experimental, para verificar os mesmos influenciam no sinal sonoro. Quatro parâmetros e/ou variáveis foram considerados para o planejamento e foi realizada testes em dois materiais, aço carbono e aço inoxidável, conforme abaixo:

- Aço Carbono- ABNT 1020: Placas com 150 mm de comprimento, 1/8" de espessura e 1" de largura, preparadas com escovamento mecânico (escova de aço rotativa) como forma de limpeza superficial.
 - Gases de proteção: Ar+25%CO₂ e 100% CO₂; (parâmetro)
 - Corrente média de soldagem: 110 e 160 A; (variável)
 - Comprimento do arco: de 1 e 2 mm; (parâmetro)
 - Diâmetro de Arame ER70S-6: 1,00 e 1,20 mm. (parâmetro)
- Aço Inox AISI/UNS 304L: Placas com 150mm de comprimento, 1/8" de espessura e 1" de largura, preparadas com escovamento mecânico (escova de aço rotativa) como forma de limpeza superficial.
 - Gás de proteção: Ar+8%O₂; (parâmetro)
 - Corrente média de soldagem: 110 e 160 A; (variável)
 - Comprimento do arco: de 1 e 2 mm; (parâmetro)
 - Diâmetro de Arame ER308L: 1,00. (parâmetro)

A Tabela 4-2 ilustra o planejamento experimental aplicado para a verificação de influência de parâmetros de soldagem sobre o comportamento do som.

Desta forma, espera observar a influência do gás de proteção, da corrente de soldagem (velocidade de alimentação), comprimento de arco (tensão) e do material de adição. Poderá ser observado a influência dos mesmos parâmetros não somente sobre o sinal sonoro, mas também sobre o IVcc.

A importância do parâmetro comprimento do arco elétrico, definido para estudo, se dá pela comparação de um arco elétrico com a vibração de um alto-falante.

Para se alcançar o planejamento experimental, foram propostas as faixas, de parâmetros operacionais do processo de Tabela 4-3, desta forma, para se ter

corrente e o comprimento de arco desejados, variou-se os níveis de velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, tensão e DBCP. A velocidade de soldagem foi determinada de acordo com a velocidade de alimentação para manter o volume de material depositado por unidade de comprimento de solda constante para todos os ensaios.

Tabela 4-2 – Planejamento experimental fatorial completo realizado

Aço Carbono			
Gás de Proteção	Material de Adição ϕ [mm]	Corrente Média [A]	Comprimento de Arco [mm]
100% CO ₂	1,2	110	1
100% CO ₂	1,2	110	2
100% CO ₂	1,2	160	1
100% CO ₂	1,2	160	2
100% CO ₂	1,0	110	1
100% CO ₂	1,0	110	2
100% CO ₂	1,0	160	1
100% CO ₂	1,0	160	2
Ar+25%CO ₂	1,2	110	1
Ar+25%CO ₂	1,2	110	2
Ar+25%CO ₂	1,2	160	1
Ar+25%CO ₂	1,2	160	2
Ar+25%CO ₂	1,0	110	1
Ar+25%CO ₂	1,0	110	2
Ar+25%CO ₂	1,0	160	1
Ar+25%CO ₂	1,0	160	2
Aço Inox			
Ar+8%O ₂	1,0	110	1
Ar+8%O ₂	1,0	110	2
Ar+8%O ₂	1,0	160	1
Ar+8%O ₂	1,0	160	2

(Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-3 – Proposição inicial para as condições operacionais

Parâmetro de soldagem	Níveis
Tensão de referência [V]	16 - 22
Velocidade de Alimentação (V _{alim}) [m/min]	2,5 - 4,5
Velocidade de Soldagem [cm/min]	Dependente de V _{alim}
DBCP [mm]	10 a 15

(Fonte: Próprio autor)

No começo dos testes, deparou-se com uma dificuldade na verificação do comprimento do arco, de acordo com o planejamento da Tabela 4-2, e esta foi bastante discutida buscando forma de se medir o comprimento do arco. Diversas formas foram abordadas, até se obter um critério para medir o valor do comprimento

do arco elétrico (Costa, 2003), visto que este parâmetro serviria como referência para a determinação de outros que compõem o planejamento. Optou-se então pelo uso da técnica de *perfilografia*, Figura 4.24 (Bálsamo, Vilarinho *et al.*, 2000), método que consiste no uso de uma contra iluminação com um feixe laser como fonte de luz, permitindo maior contraste entre o fundo e a transferência metálica, necessitando também o uso de filtros especiais.

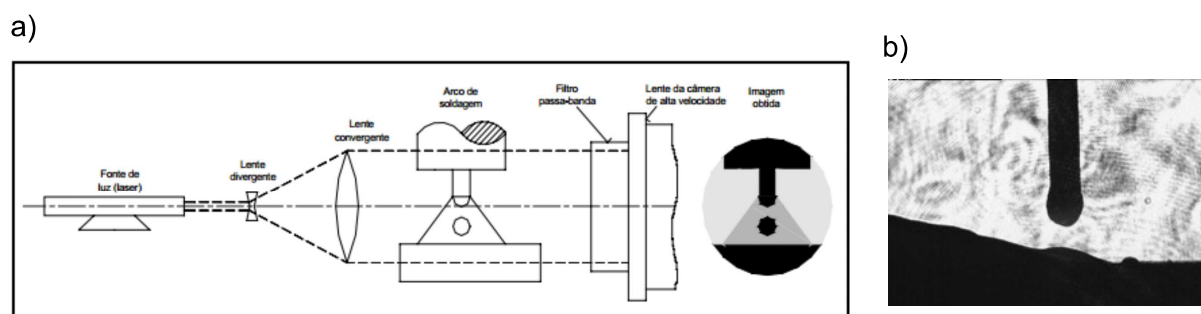


Figura 4.24 – a) Esquema de funcionamento da perfilografia (Bálsamo, Vilarinho *et al.*, 2000); b) imagem obtida pela técnica (Fonte: Próprio autor)

Com as imagens obtidas, deve-se avaliá-las uma a uma para obter os comprimentos de arcos nos instantes fora de curto-circuito. Por uma questão de quantidade de imagens a serem observadas e/ou processadas para determinação do comprimento do arco, e até mesmo por se tratar de curto-circuito onde se tem grande parte das imagens exibindo o curto entre o metal de adição e a placa de teste, um dispositivo eletrônico (Figura 4.25) foi construído sendo que o mesmo realiza o disparo da câmera de alta velocidade, e realiza a aquisição da imagem somente com o arco aberto e estabilizado (Costa, 2003), ou seja, em região onde já não ocorre grande variação na tensão, sendo assim a obtenção das imagens sincronizadas ao sinal de tensão, e por conseguinte, aos instantes de arcos abertos.

O equipamento se trata de um sistema embarcado, que monitora a tensão do arco como sinal de referência, e quando o mesmo sai de um nível inferior à 10 V (valor adotado como saída de curto-circuito) para um nível superior, o sistema aguarda 4 ms (tempo médio observado para estabilização da tensão e comprimento do arco após curto estável) e caso o nível de tensão ainda seja maior que 10 V uma imagem for capturada pela câmera de alta velocidade. A Figura 4.26 mostra o funcionamento do sistema em bancada, onde em Azul tem-se o sinal da tensão como um curto-circuito (onda quadrada), em Rosa o sinal que o sistema envia à

câmera para realizar o disparo da foto, e em Amarelo o *Shutter* da câmera, que indica o momento exato em que a câmera esteve com o obturador aberto para captar a imagem.



Figura 4.25 – Sistema de sincronia entre curto-circuito e imagem por perfilografia (Fonte: Próprio autor)

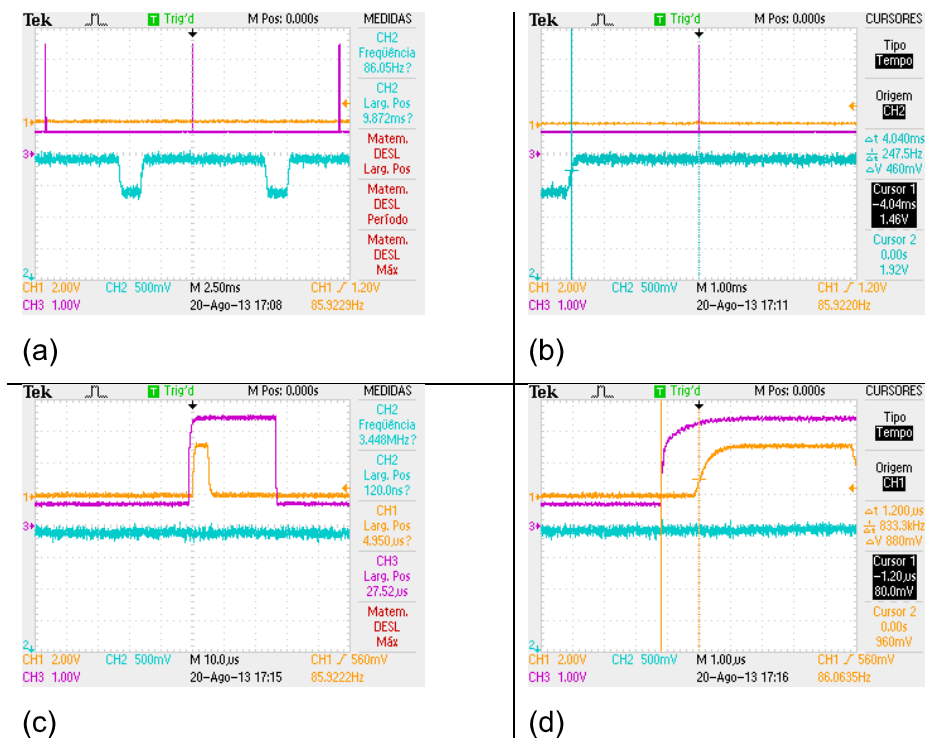


Figura 4.26 – Funcionamento do dispositivo de disparo sincronizado da câmera de alta velocidade (Fonte: Próprio autor)

Assim, como observado pelo funcionamento do sistema, pode se então garantir que a imagem é obtida em aproximadamente 4 ms após o sinal de tensão

ultrapassar o limiar de 10 V, observando que o tempo de atraso da câmera para realizar a imagem após receber o sinal do sistema é de apenas 1,2 μ s. A Figura 4.27 mostra o sistema em funcionamento durante a realização de um processo de soldagem por transferência metálica por curto-circuito convencional.

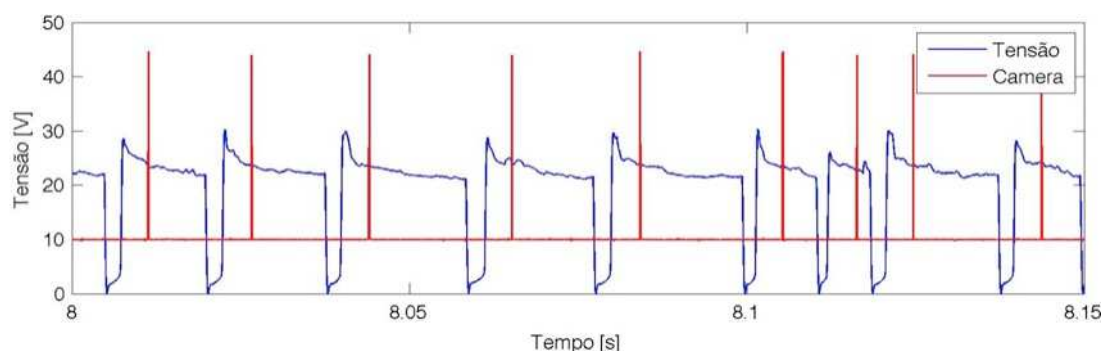


Figura 4.27 – Sinal de disparo da câmera sincronizado com o sinal de tensão do arco (Fonte: Próprio autor)

A Figura 4.28 mostra o funcionamento do sistema para garantir que as imagens sejam obtidas apenas quando o arco está aberto.

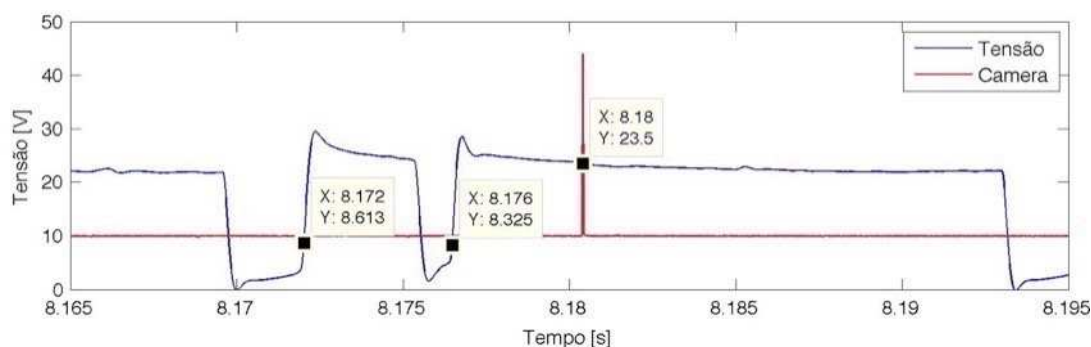


Figura 4.28 – Sinal de tensão mostrando que o sistema realiza a captura de imagem apenas se a tensão do arco for superior ao limiar estabelecido (10V) (Fonte: Próprio autor)

Após a obtenção das imagens, foi necessário a elaboração de um critério de quantificação do comprimento do arco. Assim, foram definidos dois critérios, de acordo com a característica dinâmica do processo de soldagem:

- **Critério 1:** Quando o arco tocava a chapa de teste, adotou-se o critério de referência para medição do comprimento do arco: a distância entre a chapa e o início da parte fundida do arame, exemplificado pela Figura 4.29.

- **Critério 2:** Quando o arco estava em contato com a poça fundida (poça de fusão com elevação acima do nível da chapa), adotou-se um segundo critério: referenciar para a medição do comprimento do arco como a distância entre a metade da poça fundida do cordão de solda e a metade da parte fundida do arame, exemplificado pela Figura 4.30.

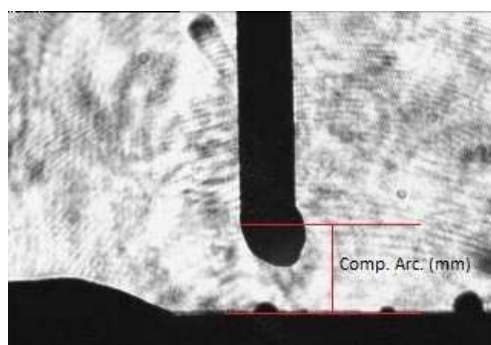


Figura 4.29 – Critério 1 de comprimento de arco durante o curto-circuito (Fonte: Próprio autor)

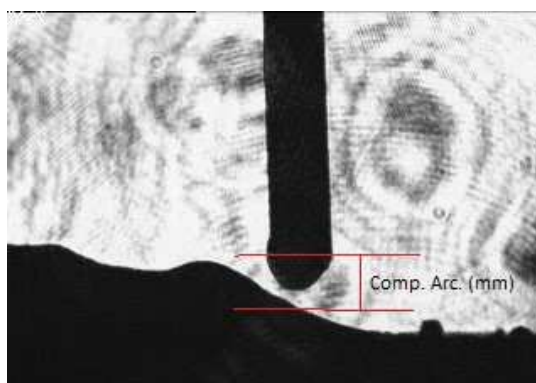


Figura 4.30 – Critério 2 de comprimento de arco durante o curto-circuito (Fonte: Próprio autor)

Utilizando-se as filmagens em altas velocidades em testes preliminares para determinação do comprimento do arco, refinou-se as faixas dos parâmetros operacionais, sendo utilizadas aquelas apresentadas na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 –Condições operacionais utilizadas

Parâmetro de soldagem	Níveis
Tensão de referência [V]	13 - 27
Velocidade de alimentação [m/min]	2,2 - 6,5
DBCP [mm]	8 a 17

(Fonte: Próprio autor)

A Figura 4.31 mostra a montagem experimental utilizada para a realização dos testes com os equipamento e posicionamento do microfone em relação ao arco do solda.

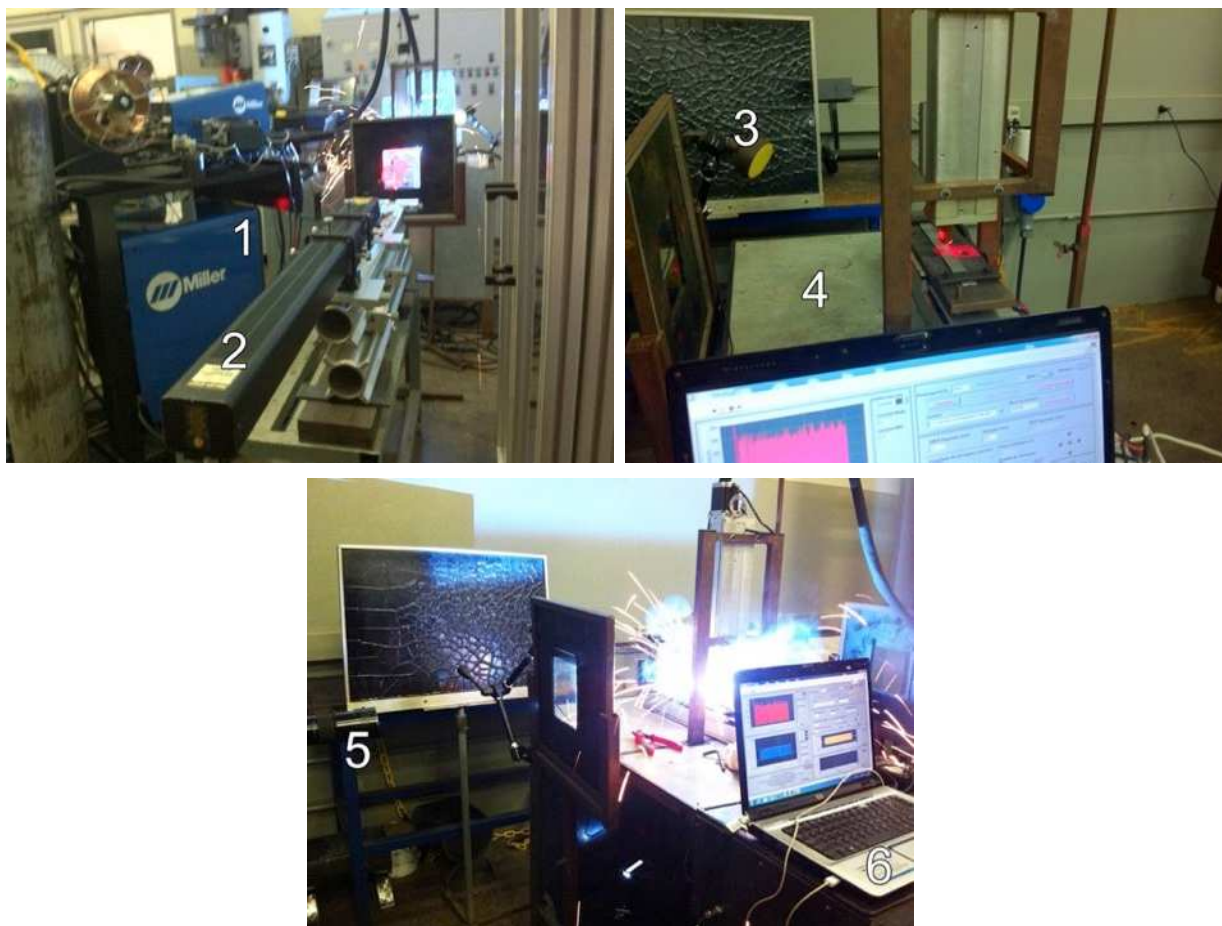


Figura 4.31 – Montagem Experimental. 1 – Fonte de Soldagem Miller, 2 – Laser (Perfilografia), 3 – Microfone, 4 – Mesa XZ, 5 – Lentes da Câmera, 6 – Computador (Fonte: Próprio autor)

A Tabela 4-5 mostra todos ensaios realizados para obtenção do planejamento experimental, observando-se que para cada teste há mais de uma repetição (em **negrito a final**) até que se alcançasse as condições da Tabela 4-2.

Para a avaliação das influências dos parâmetros sobre o sinal do som a partir dos experimentos realizados, foram montadas imagens com os gráficos de tensão com o sinal de obtenção das imagens do comprimento de arco, tensão com o sinal do som, corrente e as imagens do arco e do próprio cordão de solda, de onde pode-se observar as influências dos parâmetros sobre o sinal sonoro.

Tabela 4-5 – Tabela de ensaios realizados para verificação de influência de parâmetros sobre o comportamento do som e do IVcc.

Teste Número	Gás de Proteção	ϕ Arame [mm]	LaD (desejado) [mm]	ID (desejada) [A]	U [V]	VALimD [m/min]	DBCP [mm]	VSolda [cm/min]	La [mm]	Im [A]
1a	100%CO2	1,20	1	110	20,5	2,2	12	22,0	1,0	109
2a	100%CO2	1,20	2	110	21,5	2,2	13	22,0	1,5	106
2b	100%CO2	1,20	2	110	22,0	2,2	13	22,0	1,8	106
2c	100%CO2	1,20	2	110	22,5	2,2	13	22,0	2,0	105
2d	100%CO2	1,20	2	110	22,5	2,2	12	22,0	2,0	107
3a	100%CO2	1,20	1	160	22,0	3,6	12	36,0	0,5	164
3b	100%CO2	1,20	1	160	23,5	3,5	12	35,0	1,0	160
4a	100%CO2	1,20	2	160	25,5	3,5	12	35,0	1,8	148
4b	100%CO2	1,20	2	160	26,0	3,5	11	35,0	2,0	148
4c	100%CO2	1,20	2	160	26,0	3,5	9	35,0	2,0	169
4d	100%CO2	1,20	2	160	26,0	3,5	10	35,0	2,0	158
5a	100%CO2	1,00	1	110	20,0	3,5	12	24,3	1,0	112
6a	100%CO2	1,00	2	110	22,0	3,5	12	24,3	1,2	108
6b	100%CO2	1,00	2	110	23,5	3,5	10	24,3	2,0	104
6c	100%CO2	1,00	2	110	24,0	3,5	8	24,3	2,0	111
7a	100%CO2	1,00	1	160	21,0	4,7	12	32,6	0,5	139
7b	100%CO2	1,00	1	160	22,5	5,2	12	36,1	0,5	144
7c	100%CO2	1,00	1	160	24,0	6,8	12	47,2	1,8	167
7d	100%CO2	1,00	1	160	24,0	6,3	12	43,7	1,0	160
8a	100%CO2	1,00	2	160	26,0	6,3	8	43,7	0,5	183
8b	100%CO2	1,00	2	160	27,0	6,3	10	43,7	2,0	177
8c	100%CO2	1,00	2	160	27,0	6,3	12	43,7	2,0	168
8d	100%CO2	1,00	2	160	27,0	6,3	14	43,7	2,0	157
9a	25%CO2	1,00	1	110	19,0	3,5	13	24,3	1,5	114
9b	25%CO2	1,00	1	110	18,0	3,5	14	24,3	1,5	109
9c	25%CO2	1,00	1	110	17,0	3,5	14	24,3	1,0	109
10a	25%CO2	1,00	2	110	20,0	3,5	14	24,3	2,0	109
11a	25%CO2	1,00	1	160	21,0	6,3	14	43,7	0,5	170
11b	25%CO2	1,00	1	160	22,0	6,3	16	43,7	2,0	165
11c	25%CO2	1,00	1	160	21,0	6,3	17	43,7	1,0	161
12a	25%CO2	1,00	2	160	23,0	6,3	17	43,7	1,5	160
12b	25%CO2	1,00	2	160	24,0	6,3	17	43,7	2,0	161
13a	25%CO2	1,20	1	110	18,0	2,2	14	22,0	1,5	109
13b	25%CO2	1,20	1	110	17,0	2,2	14	22,0	1,5	107
13c	25%CO2	1,20	1	110	16,0	2,2	15	22,0	1,5	112
13d	25%CO2	1,20	1	110	15,0	2,2	15	22,0	1,0	114
14a	25%CO2	1,20	2	110	19,0	2,2	14	22,0	1,5	110
14b	25%CO2	1,20	2	110	21,0	2,2	13	22,0	2,0	107
15a	25%CO2	1,20	1	160	21,0	3,5	14	35,0	1,0	157
16a	25%CO2	1,20	2	160	24,0	3,5	14	35,0	2,0	157
17a	2%O2	1,00	1	110	15,0	4,0	10	27,7	1,5	106
17b	2%O2	1,00	1	110	14,0	4,0	10	27,7	2,0	104
17c	2%O2	1,00	1	110	14,0	4,0	8	27,7	1,5	112
17d	2%O2	1,00	1	110	12,0	4,0	8	27,7	1,0	117
17e	2%O2	1,00	1	110	13,0	4,0	9	27,7	1,0	110
18a	2%O2	1,00	2	110	16,0	4,0	11	27,7	2,0	109
19a	2%O2	1,00	1	160	14,0	6,5	12	45,1	1,0	149
19b	2%O2	1,00	1	160	16,0	6,5	12	45,1	1,5	155
19c	2%O2	1,00	1	160	16,0	6,8	10	47,2	1,0	163
20a	2%O2	1,00	2	160	18,0	6,5	12	45,1	2,0	158
20b	2%O2	1,00	2	160	18,0	6,5	12	45,1	2,0	160

(Fonte: Próprio autor)

A seguir serão exibidas figuras representativas dos sinais com as características mais marcantes, e todas as imagens (dos 20 testes) são mostradas no Apêndice III – Resultados das Soldagens para Avaliação dos Parâmetros (item 4.2.4). A Tabela 4-6 apresenta os resultados da avaliação dos sinais elétricos dos testes que serão citados nesta avaliação. As observações aqui realizadas são

representativas dos testes executados, ou seja, outros testes que não são citados aqui apresentam características semelhantes a um dos casos mostrados.

Tabela 4-6 – Resultados da avaliação dos sinais elétricos.

Teste	tinic	tfim	IVcc	FreqCC	F _{corde}	Um [V]	Im [A]	Urms [V]	Irms [A]
teste_01a	5	10	0,87	73,6	23,5	20,1	112,6	21,5	124,0
	10	15	0,88	74,8	23,5	20,1	112,2	21,5	123,6
	15	20	0,91	72,6	23,5	20,1	111,0	21,5	122,5
	20	25	0,85	74,4	23,5	20,1	113,0	21,5	123,9
	5	25	0,88	73,9	23,5	20,1	112,2	21,5	123,5
teste_03b	2	7	1,04	58,2	37,3	22,8	165,9	24,1	178,0
	7	12	1,16	61,2	37,3	22,8	165,3	24,1	177,8
	12	17	1,02	55,4	37,3	22,8	163,9	24,1	176,4
	2	17	1,08	58,3	37,3	22,8	165,0	24,1	177,4
teste_04d	2	7	1,25	29,4	37,3	25,1	164,7	25,9	175,7
	7	12	1,43	32,8	37,3	25,1	163,6	25,9	175,3
	12	17	1,28	31,0	37,3	25,1	164,8	25,9	177,7
	2	17	1,32	31,1	37,3	25,1	164,4	25,9	176,2
teste_13d	5	10	0,83	65,8	23,5	14,6	105,1	15,9	122,4
	10	15	0,88	65,6	23,5	14,6	107,0	16,0	125,1
	15	20	0,91	62,6	23,5	14,6	106,7	15,9	126,2
	20	25	0,87	62,2	23,5	14,6	106,8	15,9	126,2
	5	25	0,88	64,1	23,5	14,6	106,4	16,0	125,0
teste_14b	5	10	0,83	8,0	23,5	20,6	107,7	20,8	116,3
	10	15	0,77	6,4	23,5	20,6	106,7	20,8	115,1
	15	20	0,61	5,6	23,5	20,6	106,2	20,8	113,9
	20	25	0,60	6,4	23,5	20,6	105,7	20,8	114,8
	5	25	0,74	6,6	23,5	20,6	106,6	20,8	115,0
teste_15a	2	7	0,66	31,0	37,3	20,3	163,1	21,2	175,2
	7	12	0,61	30,0	37,3	20,3	161,5	21,1	172,9
	12	17	0,60	29,2	37,3	20,3	160,0	21,1	171,7
	2	17	0,62	30,1	37,3	20,3	161,5	21,2	173,3
teste_16a	2	7	1,29	20,2	37,3	23,3	164,9	23,8	175,0
	7	12	1,46	21,8	37,3	23,3	161,6	23,8	170,2
	12	17	1,20	18,2	37,3	23,3	162,7	23,8	172,9
	2	17	1,32	20,1	37,3	23,3	163,1	23,8	172,7
teste_18a	5	10	0,25	40,2	42,7	15,5	110,0	16,2	121,3
	10	15	0,24	40,8	42,7	15,4	109,8	16,2	121,2
	15	20	0,30	39,2	42,7	15,5	109,7	16,2	121,0
	20	25	0,24	41,0	42,7	15,5	108,7	16,2	119,8
	5	25	0,26	40,3	42,7	15,4	109,5	16,2	120,8

(Fonte: Próprio autor)

As Figura 4.32 (teste_01a) e Figura 4.33 (teste_03b) mostram uma transferência por curto-circuito onde dos parâmetros de soldagem o único alterado é a corrente média de soldagem (Valim), 110 para 160 A respectivamente, e comparando os sinais é possível verificar que o sinal sonoro tanto de extinção quanto de ignição do arco elétrico se apresentam mais turbulentos e oscilantes para o de maior corrente, isto é explicado pela maior energia do processo (potência).

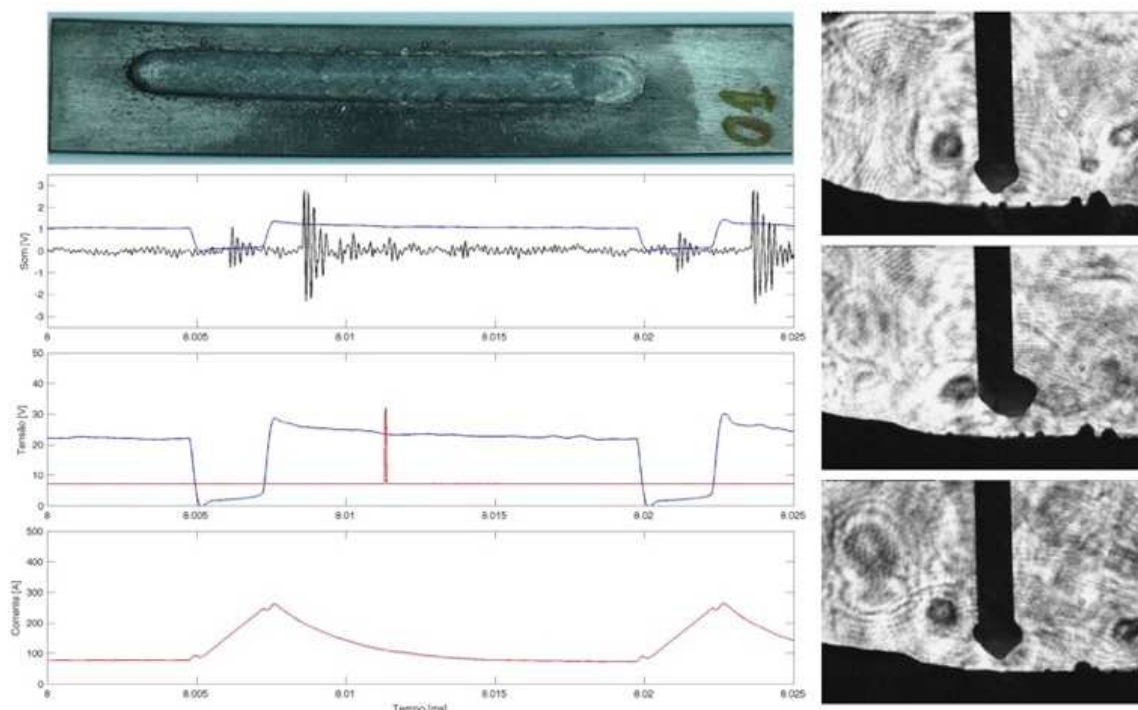


Figura 4.32 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_01a – 110A (Fonte: Próprio autor)

Quando se compara a Figura 4.33 (teste_03b) com a Figura 4.34 (teste_04d), apenas o valor do comprimento de arco é alterado (a tensão média de $\sim 2,0$ V é maior), sendo a do teste_04d maior. Desta forma, fica bem claro que na ignição do arco o sinal se apresentou bastante turbulento (comparando os três sinais) o que reflete diretamente o fato do tamanho do arco estar relacionado com o tamanho de um alto falante, sendo que então, da forma como observado tanto a corrente quanto a tensão (comprimento do arco) são responsáveis por maiores turbulências no arco e que se refletem no sinal sonoro, por se ter uma maior potência sonora. Observa-se que para tais condições teste_03b e teste_04d há uma maior saturação do sinal do microfone nos picos de ignição do arco, estando relacionado com a distância do mesmo ao arco. O que também pode provocar maior turbulência no sinal. A característica de resposta mais turbulenta do teste_04d pode estar relacionada com o fato de sua frequência de curto circuito estar abaixo da F_{corte} , de acordo com o Critério F_{corte} (item 2.1.1.3.1).

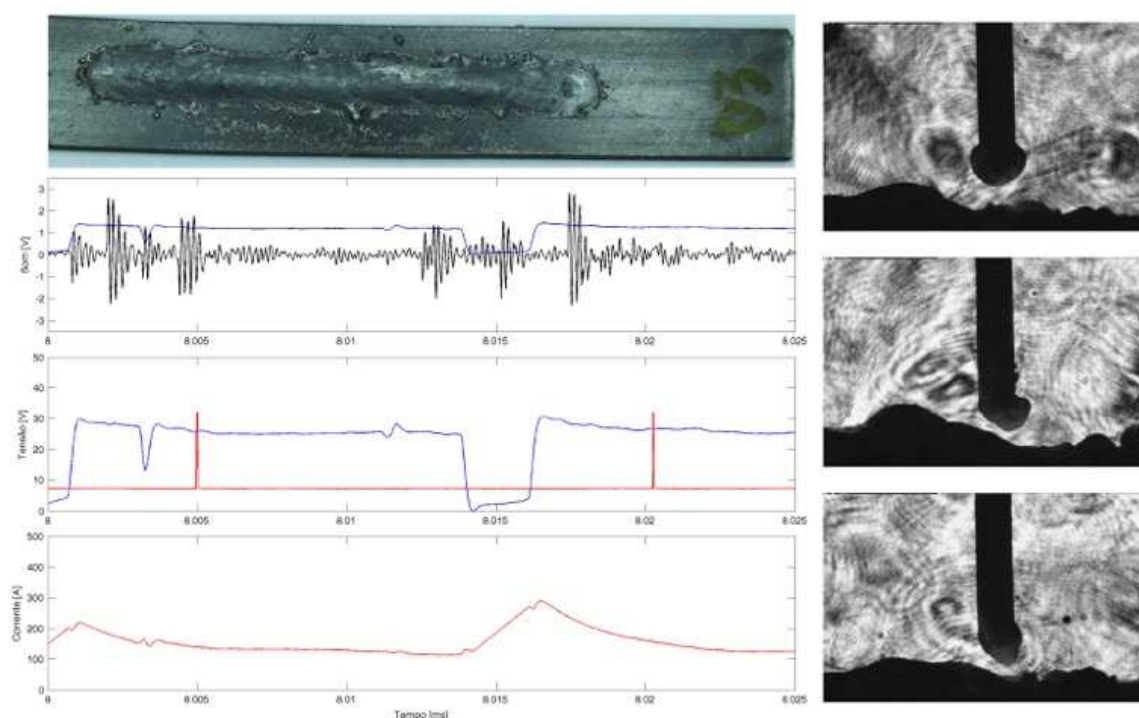


Figura 4.33 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_03b – 160A (Fonte: Próprio autor)

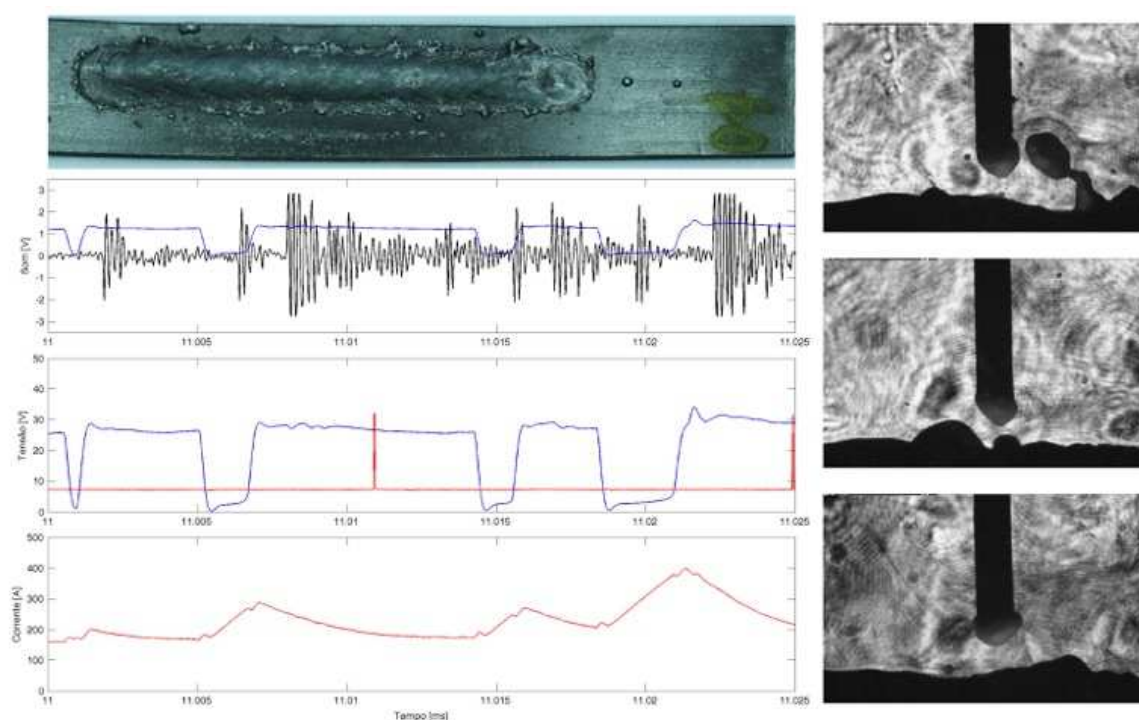


Figura 4.34 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_04d – 160A (Fonte: Próprio autor)

Quando se compara os sinais Figura 4.32 (teste_01a) e Figura 4.35 (teste_13d) onde há a alteração do gás de proteção de 100%CO₂ para Ar+25%CO₂,

observa-se que o sinal se mantém sem grande oscilação, mas para a extinção do arco não fica tão evidente no sinal sonoro, o que se relaciona à menor tensão do arco dada a adição de Argônio no mesmo, fazendo com que a tensão média caia $\sim 5,0$ V, apesar de manter o mesmo comprimento de arco há uma maior energia (potência) no arco, que se reflete no sinal com uma menor energia para o som.

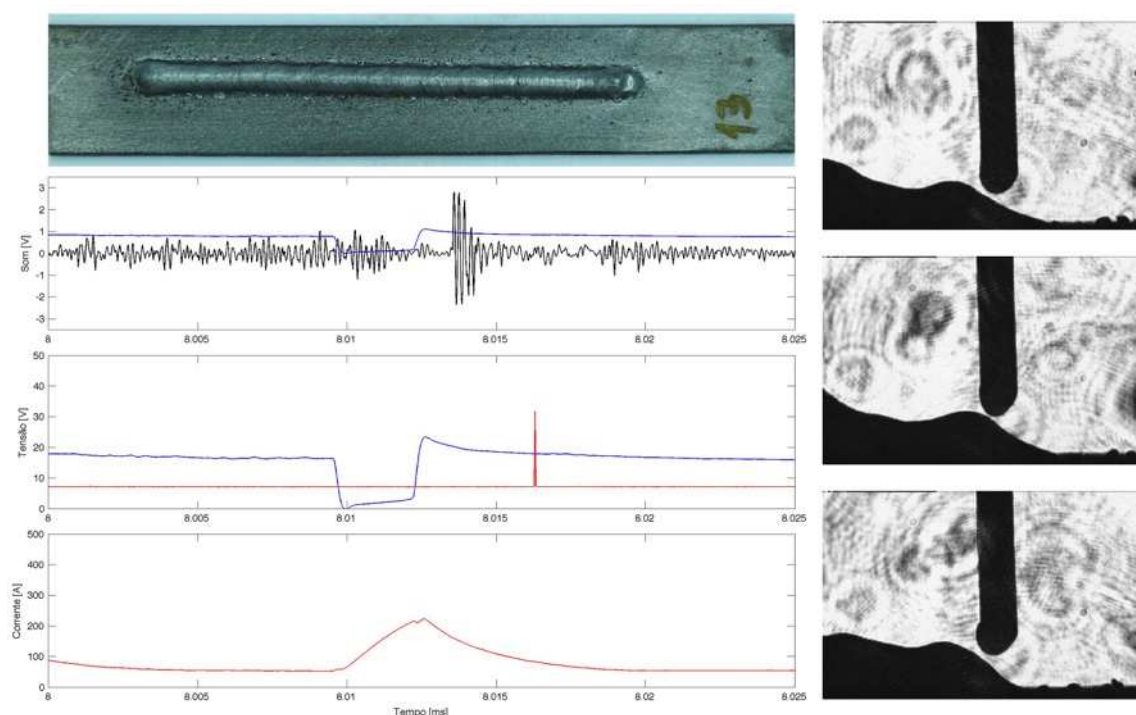


Figura 4.35 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_13d – 110A (Fonte: Próprio autor)

Pelas respostas dos sinais do teste_13d e teste_14b (Figura 4.35 e Figura 4.36, respectivamente), pode-se dizer que o último perde a característica (comportamento) de uma transferência por curto-circuito devido à grande flutuação do arco sobre a ponta do arame eletrodo na hora do destacamento/curto. Atribui-se tal comportamento pela baixa frequência de curto (~ 7 Hz), já que não mais fica caracterizando uma transferência por curto-circuito, tendo um modo de transferência misto (globular-curto-circuito). Juntamente a este fato, baixa frequência de curto-circuito, podem haver possíveis ruídos de alta intensidade em baixas frequências, ocasionando este comportamento anormal no sistema de condicionamento.

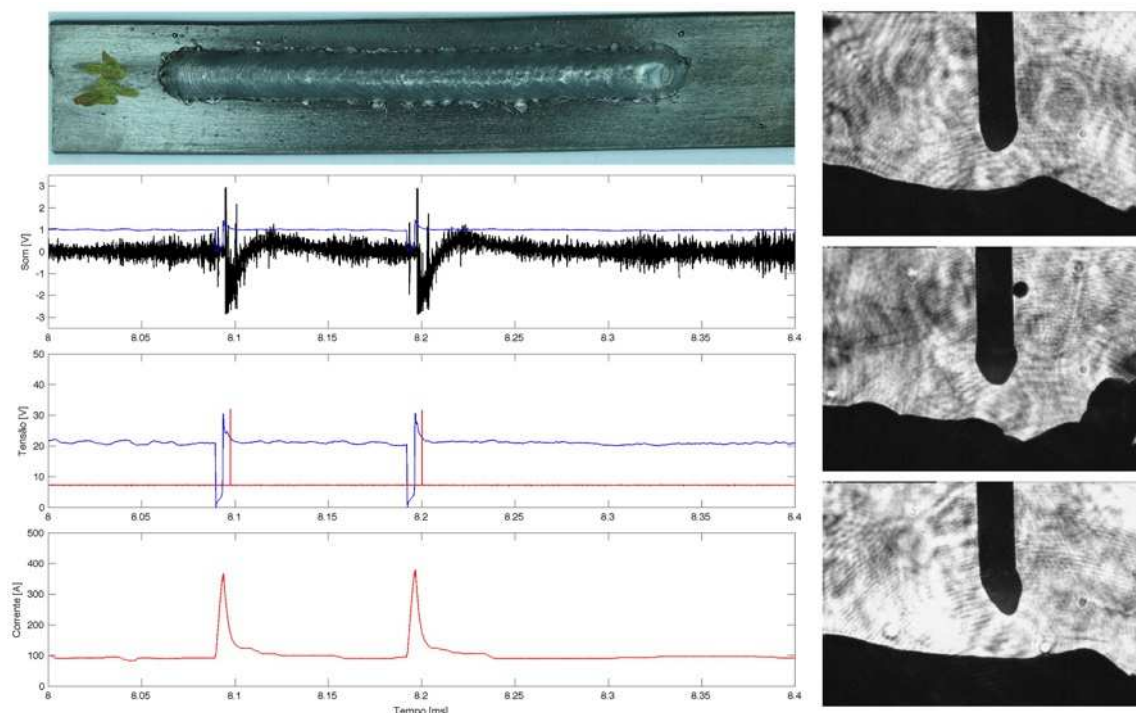


Figura 4.36 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_14b – 110A (Fonte: Próprio autor)

Em uma comparação feita entre os teste_04d (Figura 4.32), teste_13d (Figura 4.35), teste_14b (Figura 4.36), teste_15a (Figura 4.37), teste_16a (Figura 4.38) e teste_18a (Figura 4.39) – verificar Tabela 4-5 e Tabela 4-6, é observável que apenas o teste_13d apresenta frequência de curto-circuito maior que F_{corte} , porém ao se avaliar a relação entre as FreqCC e F_{corte} de cada teste, é verificado que nos testes que apresentaram maior problemas nos sinais teste_14b e teste_16a $\text{FreqCC} \sim \leq 50\% F_{\text{corte}}$, enquanto os outros estão ligeiramente menores, com $\text{FreqCC} \sim \geq 75\% F_{\text{corte}}$.

Desta forma, é esperado para o processamento dos sinais sonoros com maiores distúrbios, ou seja provenientes de processos de soldagem com frequência de curto-circuito inferiores às frequência de corte para caracterizar curto-circuito, corrente médias elevadas e maiores comprimentos de arco apresentem maior dificuldades de identificação dos picos abertura de apagamento do arco, tendo grande possibilidade de apresentarem erros quanto a detecção de frequências de curtos circuitos e nas característica (quantidade e tempos) para determinar o IVccS , levando a erro de cálculo.

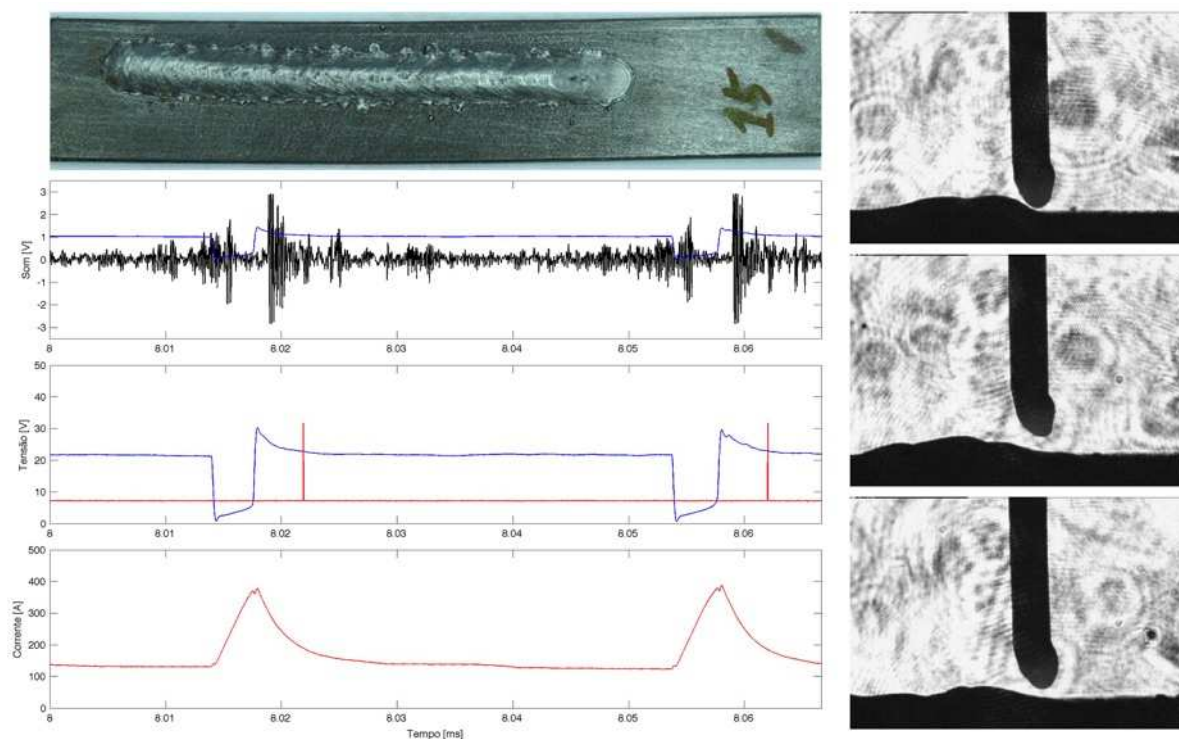


Figura 4.37 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_15^a – 160A (Fonte: Próprio autor)

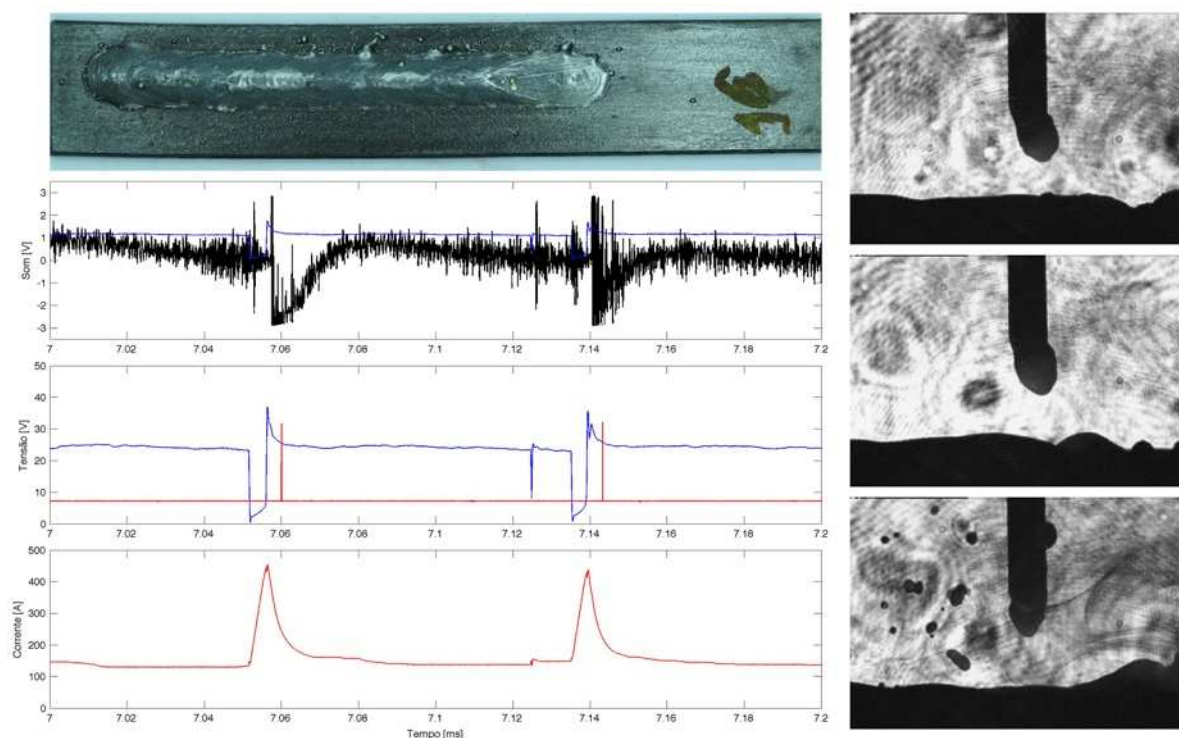


Figura 4.38 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_16^a – 160A (Fonte: Próprio autor)

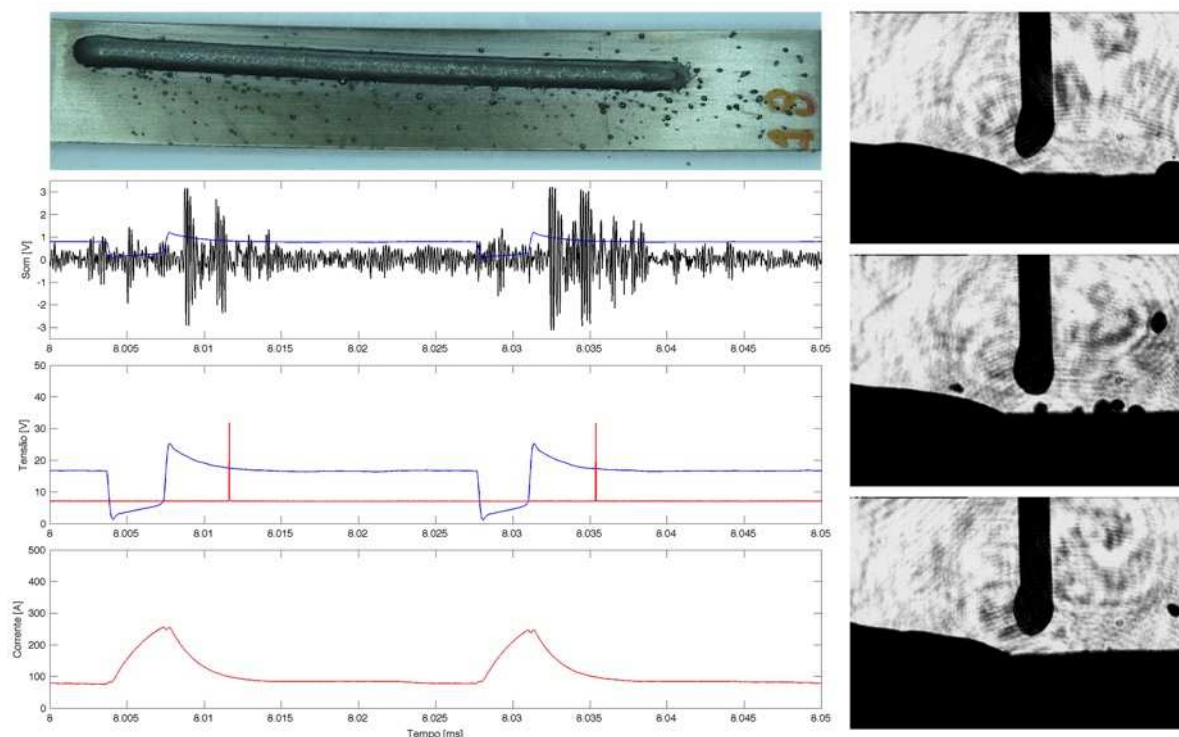


Figura 4.39 – Detalhe dos sinais obtidos para o teste_18^a – 110A (Fonte: Próprio autor)

Wanga e Zhaob (2001), (Saad, Wang *et al.*, 2006) e Warinsiriruk e Poopat (2006) afirmam que é possível verificar a flutuação/oscilação da poça fundida, geração de respingos e ruído da vazão do gás de proteção dentre outros, entretanto não foram observadas influências aparentes sobre o sinal sonoro na transferência por curto-circuito, o que pode estar relacionado ao fato da maior intensidade sonora nos momentos de ignição e extinção comparados aos outros ruídos.

A Figura 4.40 mostra ruído da vazão do gás de proteção no momento de abertura (durante o pré-gás), o instante de abertura da tensão em vazio da fonte e início da alimentação de arame e o tempo de soldagem. Porém em regime contínuo (após estabilização do fluxo) e com a presença dos curtos-circuitos, sua amplitude inferior é suprimida pelos picos sonoros dos curtos.

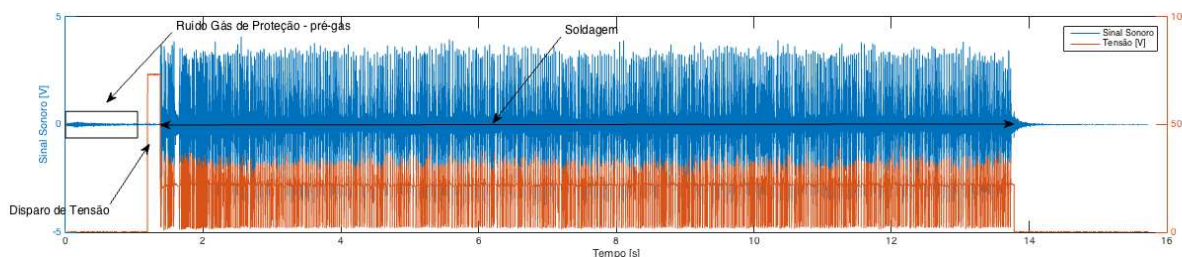


Figura 4.40 – Detalhe do ruído gerado pela abertura do pré-gás (fluxo do gás de proteção) (Fonte: Próprio autor)

4.3 Etapa C – Processamento do Sinal Sonoro

Nesta etapa é apresentada a elaboração de algoritmos e aplicação de técnicas para o desenvolvimento de programas para o processamento e avaliação dos sinais sonoros provenientes do processo de soldagem, eliminando possíveis ruídos e interferências no sinal, obtendo o Índice de Regularidade (IVcc) da transferência metálica para o processo MAG curto-circuito pelo método sonoro. Para tanto, o sistema deve ser capaz de identificar, no tempo, as posições de abertura e apagamento dos arcos elétricos, caracterizando os intervalos de curto-circuito e arco aberto, e desta forma ser possível a determinação das seguintes características do processo:

- FreqCC: frequência média de curto-circuito;
- tmcc: tempo médio de curto-circuito;
- dptcc: desvio padrão do tempo de circuito;
- tmaa: tempo médio de arco aberto;
- dptaa: desvio padrão do tempo de arco aberto;

e com estas informações a determinação do IVccS de acordo com a Equação (1.4).

Primeiramente, realizou-se a implementação em computador, linguagem Mathworks MATLAB, devido a facilidade de programação, visualização de resultados por gráficos e ferramentas de processamento disponíveis. Em seguida, verificou-se o desempenho do código, e após transcreveu o mesmo algoritmo de processamento para o dispositivo móvel.

É de suma importância lembrar-se que o algoritmo de processamento deve ser executado em um sistema embarcado, ou seja, com baixo poder de

processamento se comparado a computadores. Essa observação é importante, pois toda elaboração do procedimento de processamento (técnicas) buscou menores recursos computacionais, o que leva ao uso de métodos mais clássicos de processamento, tentando evitar o uso de técnicas modernas e de grande custo computacional (tempo de processamento).

4.3.1 Princípios Relevantes dos Processos de Soldagem por Curto-circuito para o Processamento do Sinal

A primeira etapa do desenvolvimento do algoritmo de processamento é a verificação das características principais dos curtos-circuitos que podem ser utilizadas como técnicas detecção dos curtos e/ou eliminação de ruídos. Assim, esta etapa é caracterizada pelo aprendizado das características do curto e suas implicações sobre o processamento do sinal sonoro.

A primeira característica a ser considerada refere-se à frequência máxima de curto-circuito. Da revisão bibliográfica tem-se que o valor máximo dessa frequência máxima é menor que 200 Hz (Scotti e Ponomarev, 2008). Souza, Rossi *et al.* (2011a) afirmam ainda que o tempo de curto-circuito (tcc – tempo que o metal de adição fica em contato com a poça de fusão) deve ser maior que 2 ms ($tcc > 2ms$), ou seja, este é o tempo mínimo de curto-circuito (tccmin). Os curtos-circuitos com valores inferiores à este valor são denominados de curtos incipientes.

Durante as análises dos sinais de tensão realizados no Item 4.2.4 e a partir dos resultados apresentados na Tabela 4-7, observa-se que ao se considerar o período de cada curto-circuito (T), o tempo de arco aberto (taa) e o tempo de curto-circuito (tcc), o tcc se apresenta com um relação de tempo médio menor que 31% do período de curto-circuito. A Tabela 4-7 são exibidos os resultados de menor, maior e média percentual do tcc. São mostrados ainda uma avaliação onde se passa os dados (tempos de curto-circuito) pelo critério de Chauvenet, buscando uma maior confiabilidade, eliminando pontos espúrios. A avaliação foi realizada para um tempo de 15 s de soldagem para cada teste, tendo assim uma quantidade razoável de curtos-circuitos avaliados.

Para a avaliação não foram excluídos os curtos incipientes ($tcc \leq 2ms$), bem como do estudo do Item 4.2.4. Deve-se lembrar que nesta gama de testes há

soldagem em transição do curto-circuito para o globular, mas que ainda assim apresenta curtos-circuitos, sendo importante seus estudos para aprendizado dos curtos-circuitos e sua posterior identificação.

Os valores de percentual máximo e mínimo de tempo de curto-circuito foram verificados a critério de exploração, mas o interesse maior está na média do percentual de curto, os valores de máximo e mínimo apresentam valores que extrapolam o esperado, mas isto se justifica pela medida de curtos incipientes e soldagens em modo misto (curto-circuito e globular).

Tabela 4-7 – Avaliação dos tempos percentuais médios de curto

Teste	min(% tcc)		max(% tcc)		média (% tcc)	
	Total	Total - Chauvenet	Geral	Total - Chauvenet	Geral	Total - Chauvenet
01a	1	1	88	88	17	17
02d	0	0	81	49	12	11
03b	0	0	71	47	15	14
04d	0	0	97	49	11	9
05a	0	0	65	65	21	21
06c	0	0	97	66	12	10
07d	0	0	92	58	16	15
08d	0	0	47	29	8	8
09c	1	1	54	54	20	20
10a	0	0	37	36	12	12
11c	0	0	84	52	17	16
12b	0	0	81	74	15	14
13d	7	7	61	61	26	26
14b	0	0	21	11	4	4
15a	0	0	59	32	11	11
16a	0	0	85	65	12	10
17e	5	5	97	97	31	31
18a	8	8	49	21	15	15
19c	1	1	72	72	24	24
20a	0	0	78	77	23	22
MÁXIMO			97	97	31	31

(Fonte: Próprio autor)

Desta forma, considerando que os tempos de curto-circuito são maiores que 2 ms, e adotando que o percentual de curto-circuito no período de curto é menor igual à 35% (pouco acima do máximo da média observada), tem-se o que seria definido uma frequência máxima de curto ($FreqCC_{max}$) de 175 Hz, sendo o período de curto-circuito (T) maior igual à 5,715 ms, valor dentro do esperado pela literatura (Scotti e Ponomarev, 2008) e Needham (1985)). A Figura 4.41 mostra a interpretação gráfica do curto-circuito.

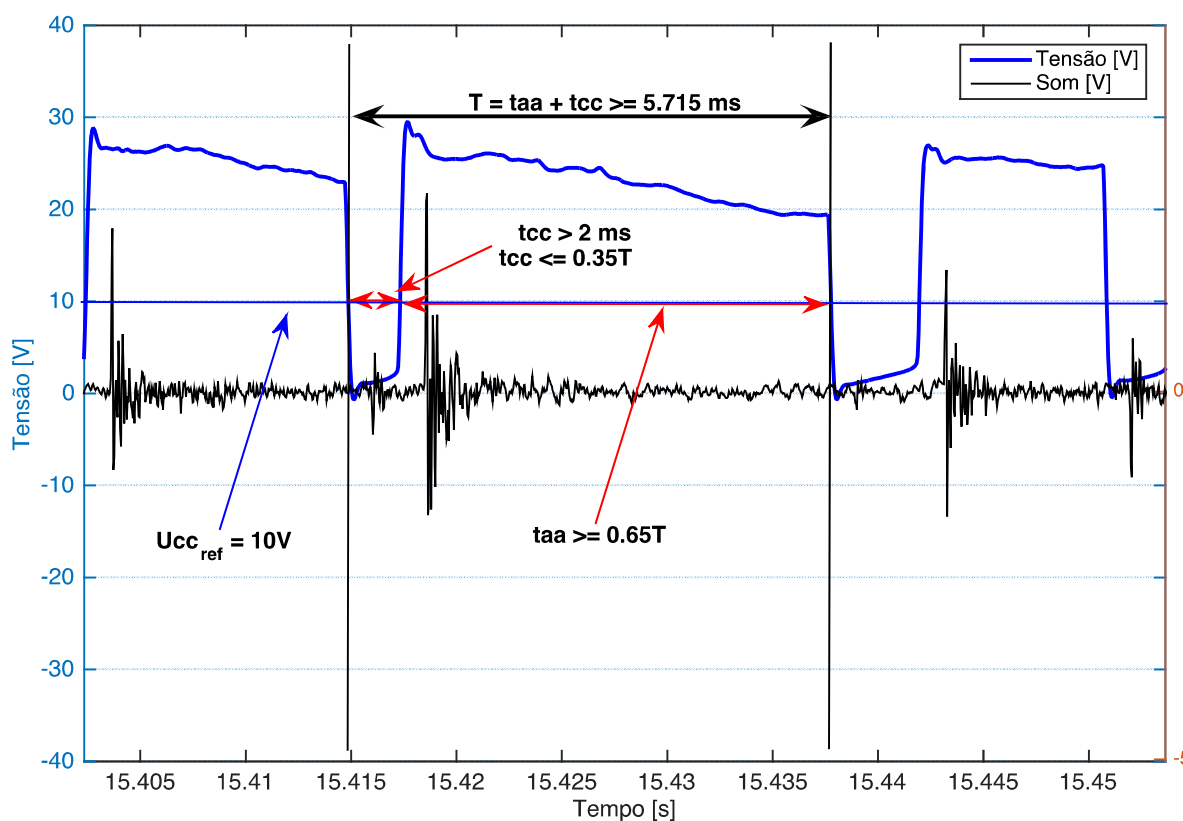


Figura 4.41 – Relações de percentual entre os tempos de arco aberto e curto-circuito (Fonte: Próprio autor)

Assim, como uma das premissas para processamento dos sinais sonoros e detecção dos pontos de abertura e apagamento dos arcos elétricos, sendo um critério para filtragem do sinal, será considerado que o valor de $t_{cc} \leq 0,35T$.

4.3.2 Estudo das Características dos Sinais Sonoros

Para que se possa realizar o reconhecimento ou cálculo do índice de regularidade pelo sinal sonoro (IVccS) o mesmo deverá ser processado digitalmente. Para isto, um estudo sobre as características do mesmo deve ser realizada, sendo que, pode-se separar a análise de um sinal em duas partes, Análise no Domínio da Frequência e do Tempo.

4.3.2.1 Domínio da Frequência

A primeira tarefa que se pensa em realizar com a análise do sinal no domínio da frequência é a análise das frequências contidas no sinal. Para verificar as frequências contidas em um sinal pode-se utilizar a Transformada Discreta de Fourier (DFT) ou da Transformada Wavelet, dentre outras. Partindo-se de avaliações sobre os sinais do som provenientes do processo de soldagem por curto-circuito, optou-se por utilizar a avaliação dos sinais de acordo com a DFT e, desta forma, deve-se começar com intervalos de tempo que possuam um período da informação de interesse (no caso um período de curto-circuito), e assim aumenta-se o tempo para verificar as componentes gerais do sinal. A avaliação foi utilizada da função FFT do MATLAB.

Como já dito, os sinais sonoros foram amostrados à uma taxa de 50 kS/s, sendo assim possível observar frequências até 25 kHz, valor acima das respostas do microfone – 16 kHz, esperando assim ser possível verificar com segurança as informações dos sinais.

São discutidos e mostrados os resultados para três testes que apresentaram características de frequências marcantes e que representam o comportamento observado nos demais testes realizados. Os resultados dos espectros de frequência para todos os ensaios completos são exibidos no Apêndice IV – Espectros de Frequência dos Sinais Sonoros (item 4.3.2.1).

As Figura 4.42 e Figura 4.43 apresentam as respostas do sinal do teste_01a à FFT para 1 (um) período de curto, cinco períodos de curto e 5 s de soldagem. Observa-se que as frequências de interesse estão na faixa de 4000 – 8000 Hz, como esperado, uma alta frequência por se tratar de um sinal sonoro. Certa energia também é observada abaixo de 2500 Hz, mas em menor expressividade que o intervalo de maior frequência. Demais testes que não citados especificamente abaixo, apresentaram o mesmo comportamento.

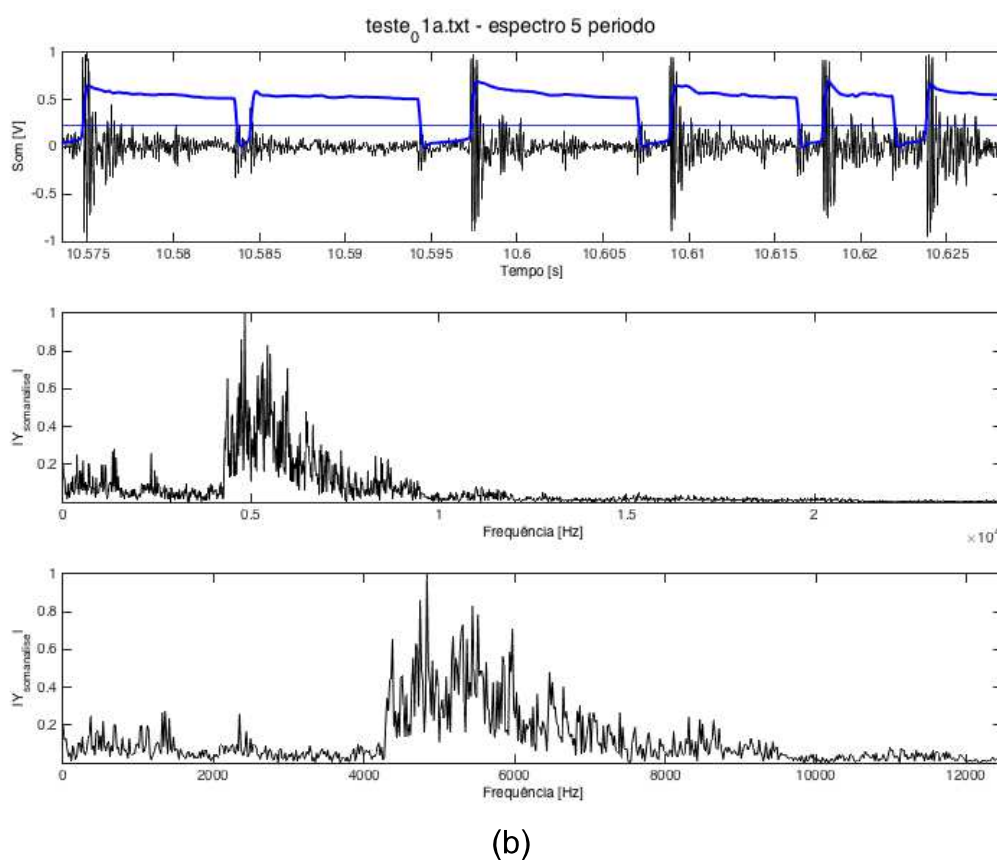
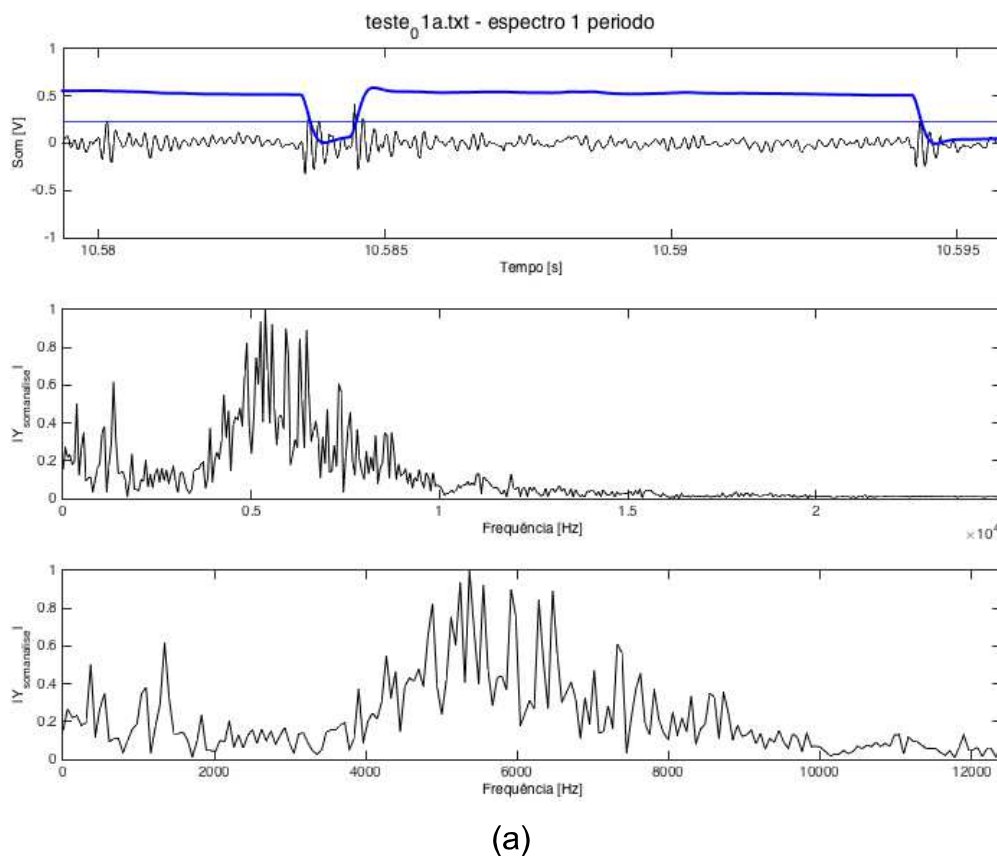


Figura 4.42 – Amostra de Sinal do teste_01a para (a) um e (b) cinco períodos de curto, com sua FFT. (Fonte: Próprio autor)

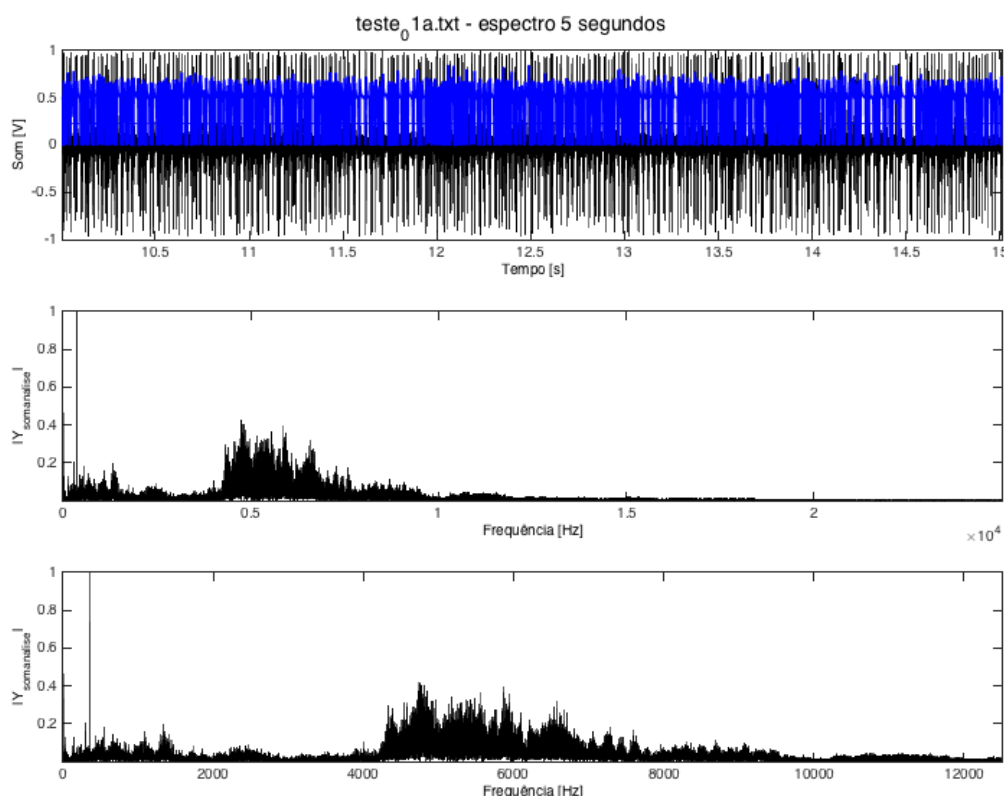


Figura 4.43 – Amostra de Sinal do teste_01a para 5 s de soldagem, com sua FFT (Fonte: Próprio autor)

As Figura 4.44 e Figura 4.45 apresentam as respostas do sinal do teste_17a e da mesma forma dos anteriores, as frequência de interesse estão na faixa de 4000 – 8000 Hz, como observado para o teste01_a. Entretanto, entre 500 e 2500 Hz, há energia mais expressiva, sendo esta mesma característica observada em outros testes. Atribui-se tal resposta a possível ruído de fundo (proveniente de algum equipamento ligado) que ocorreu durante a realização dos testes, visto que os mesmo foi realizado em laboratório enquanto outros alunos trabalhavam em seus trabalhos, muito dessa interferência foi evitada, mas não totalmente.

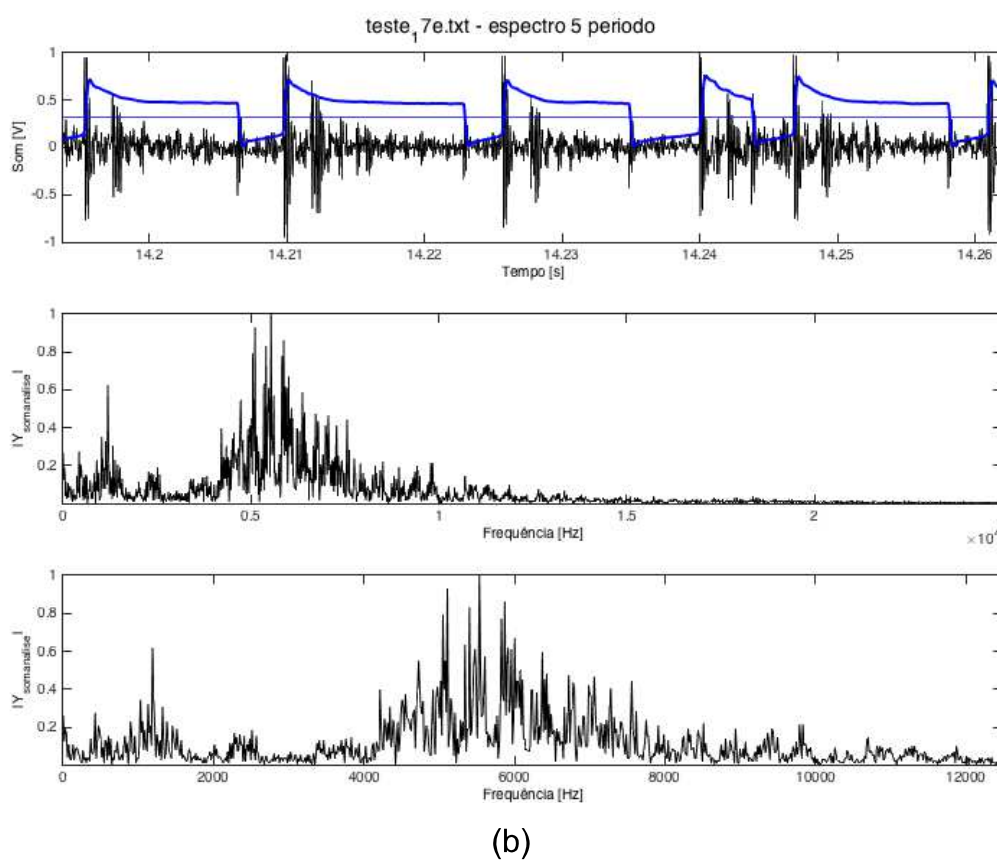
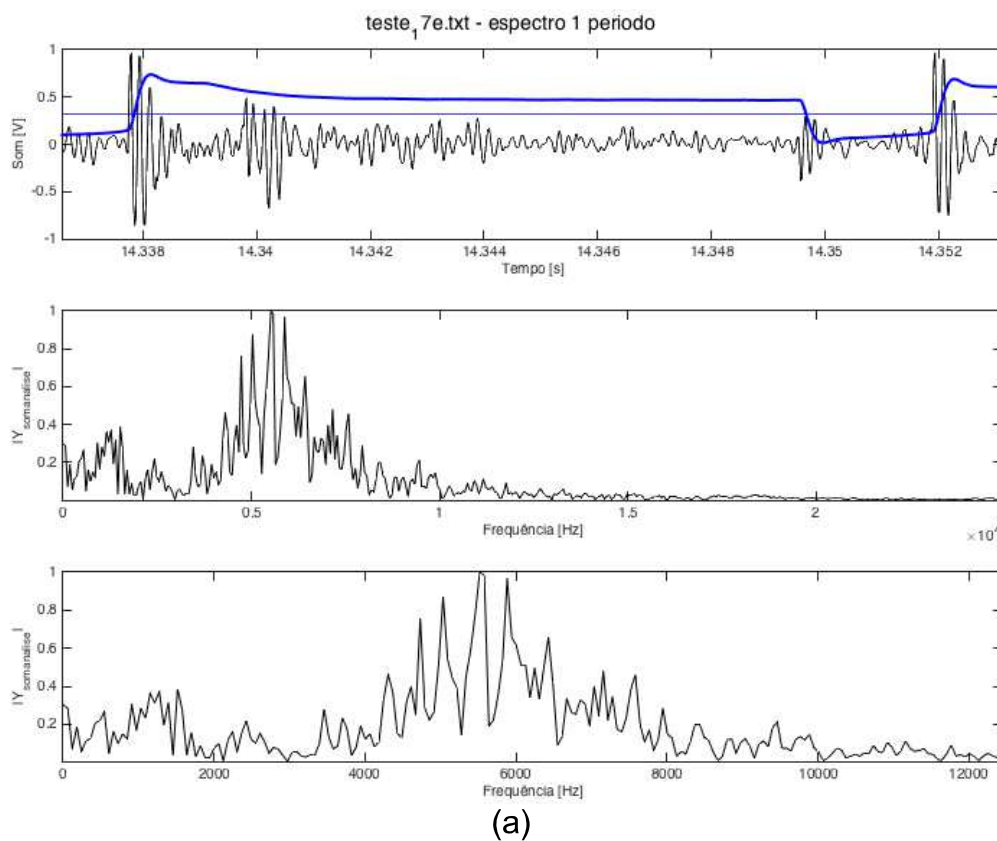


Figura 4.44 – Amostra de Sinal do teste_17a para (a) um e (b) cinco períodos de curto, com suas FFT (Fonte: Próprio autor)

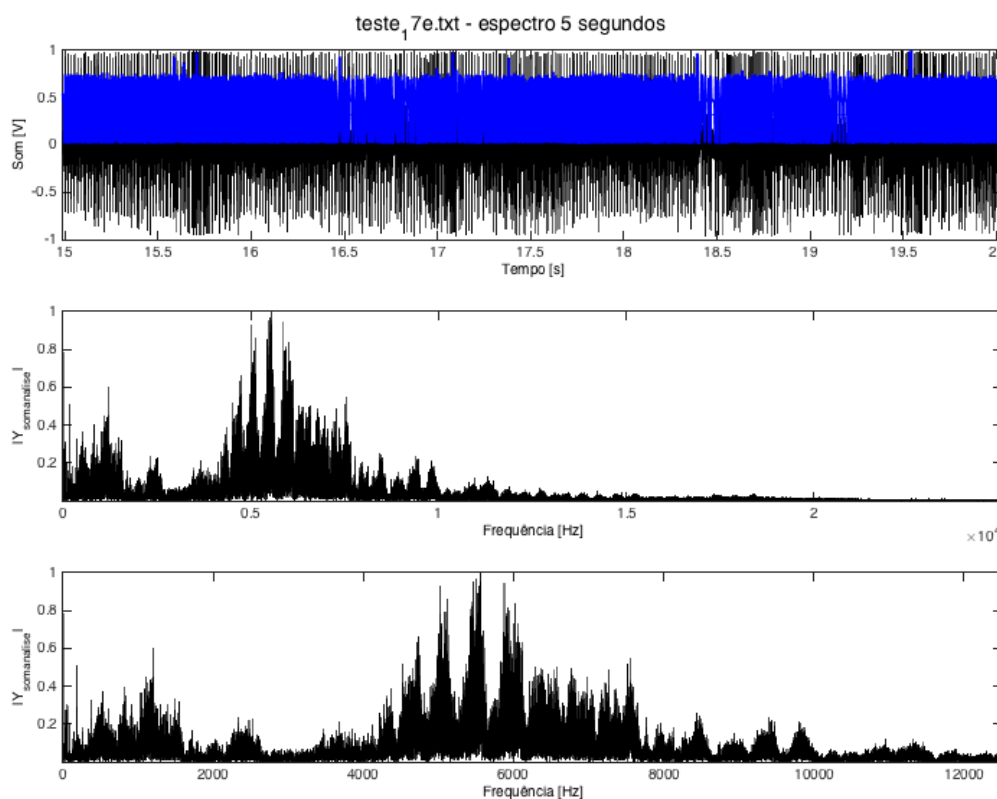
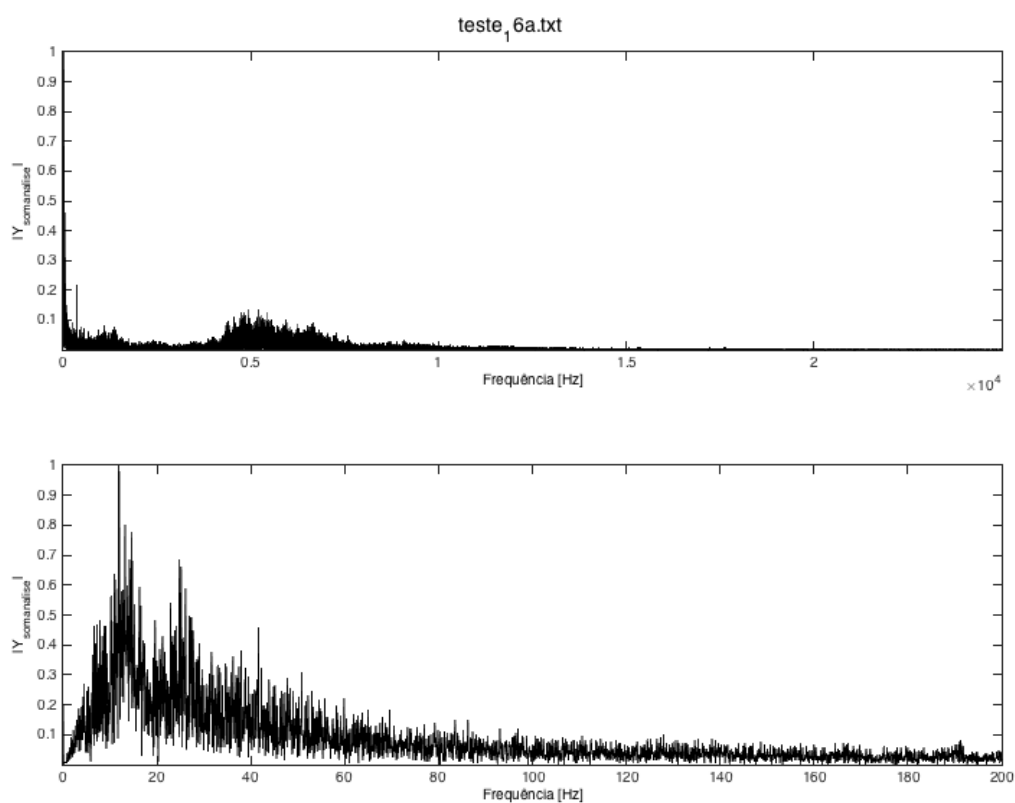
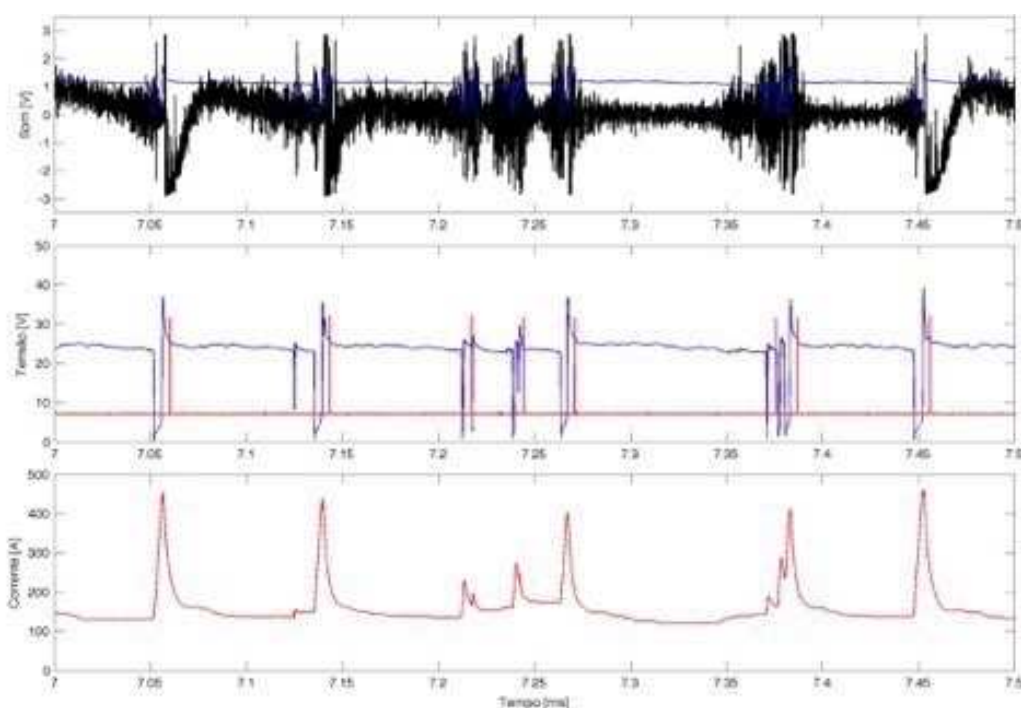


Figura 4.45 – Amostra de Sinal do teste_17a para 5 s de soldagem, com sua FFT. (Fonte: Próprio autor)

No teste_14b e no teste_16, observou-se frequência com energia mais acentuada em frequências abaixo de 80 Hz, conforme mostrado na Figura 4.46 para o teste 16a. Entretanto, especialmente neste teste os sinais apresentaram uma resposta no sinal do som no domínio do tempo diferente (como já visto anteriormente). Do estudo realizado no Item 4.2.4, mostrado na Tabela 4-6, verificou-se que estes dois testes apresentaram frequência de curto menores que 50% da F_{corte} , e, desta forma, associou-se a oscilação dos sinais em baixa frequência, conforme comprovado agora, ao crescimento exagerado da gota na ponta do eletrodo, fazendo com o arco tenha oscilações influenciando no sinal sonoro.



(a)



(b)

Figura 4.46 – (a) Espectro de frequência do teste_16a com detalhe em baixas frequências; (b) Detalhe dos sinais do teste_16^a (Fonte: Próprio autor)

De acordo com o exposto, as informações do sinal de interesse para análise e tratamento para obtenção do IVccS estão na faixa de 4000 – 8000 Hz. Tal informação é coerente com o observado na literatura, sendo que (Saad, Wang *et al.*, 2006); Filho, Moreira *et al.* (2007) e Arata, Inoue *et al.* (1979b) afirmam que as frequências de interesse do sinal sonoro para obtenção de informações do processo de soldagem está na faixa de 3500 – 7500 Hz.

Realizando-se uma última análise, e considerando-se que o sinal da pressão sonora é uma onda senoide portadora dos sinais em outras frequências (chamada de frequência de oscilação - freq_osc – mostrada na Figura 4.47), pode-se observar que a frequência principal do sinal está dentro da faixa de interesse definida para todos os testes. A Tabela 4.8 apresenta as frequências preponderantes/portadoras médias para cada teste realizado.

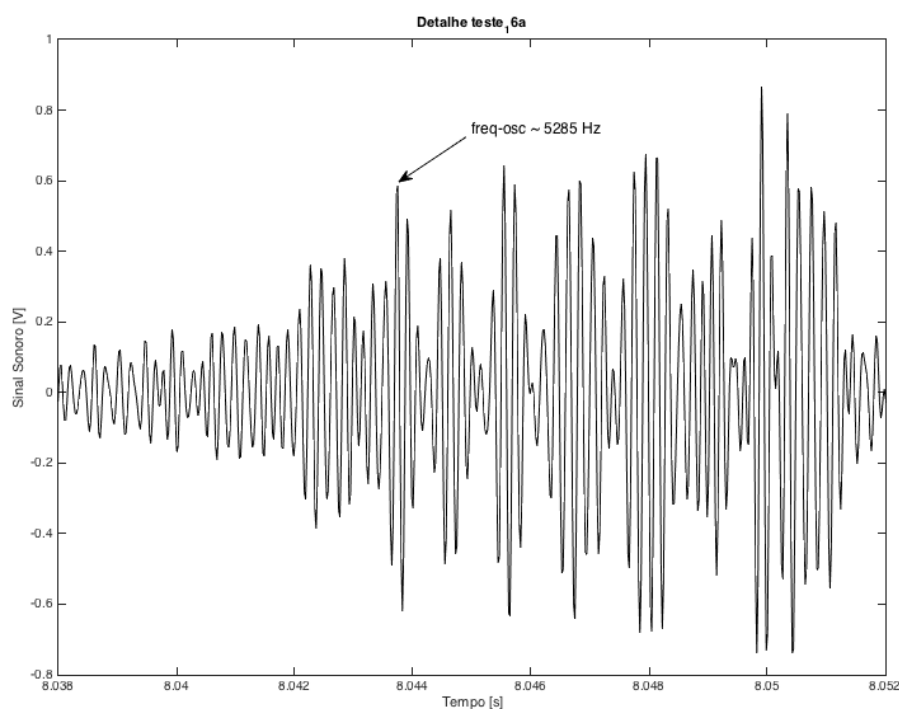


Figura 4.47 – Exemplo de oscilação do sinal sonoro – teste_16a. (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4.8 – Frequências de oscilação do sinal sonoro.

Teste	1a	2d	3b	4d	5a	6c	7d	8d	9c	10a
freq_osc	5216	5307	5484	5394	5582	5408	5855	5579	5220	5514
Teste	11c	12b	13d	14b	15a	16a	17e	18a	19c	20a
freq_osc	5225	4565	5767	5218	5511	5285	5613	5601	5625	5586

(Fonte: Próprio autor)

Desta forma, os sinais para a implementação do equipamento podem ser adquiridos com 25000 S/s, e é proposto ser aplicado um filtro passa-faixa em 4000 – 8000 Hz, Butterworth de 4ª ordem.

Para verificar a eficácia e aplicabilidade deste procedimento, um processo de filtragem conforme mencionado e decimação (duas vezes) foi aplicado aos sinais adquiridos, obtendo sinais como se filtrados em 4000 – 8000 Hz e amostrados em 25 kS/s. Como sinal que apresentou maior característica específica para os demais, será exemplificado o teste_16a , sendo o resultado mostrado na Figura 4.48.

Em continuidade, todos sinais passaram pelo procedimento (filtragem e decimação) antes de serem avaliados no domínio do tempo.

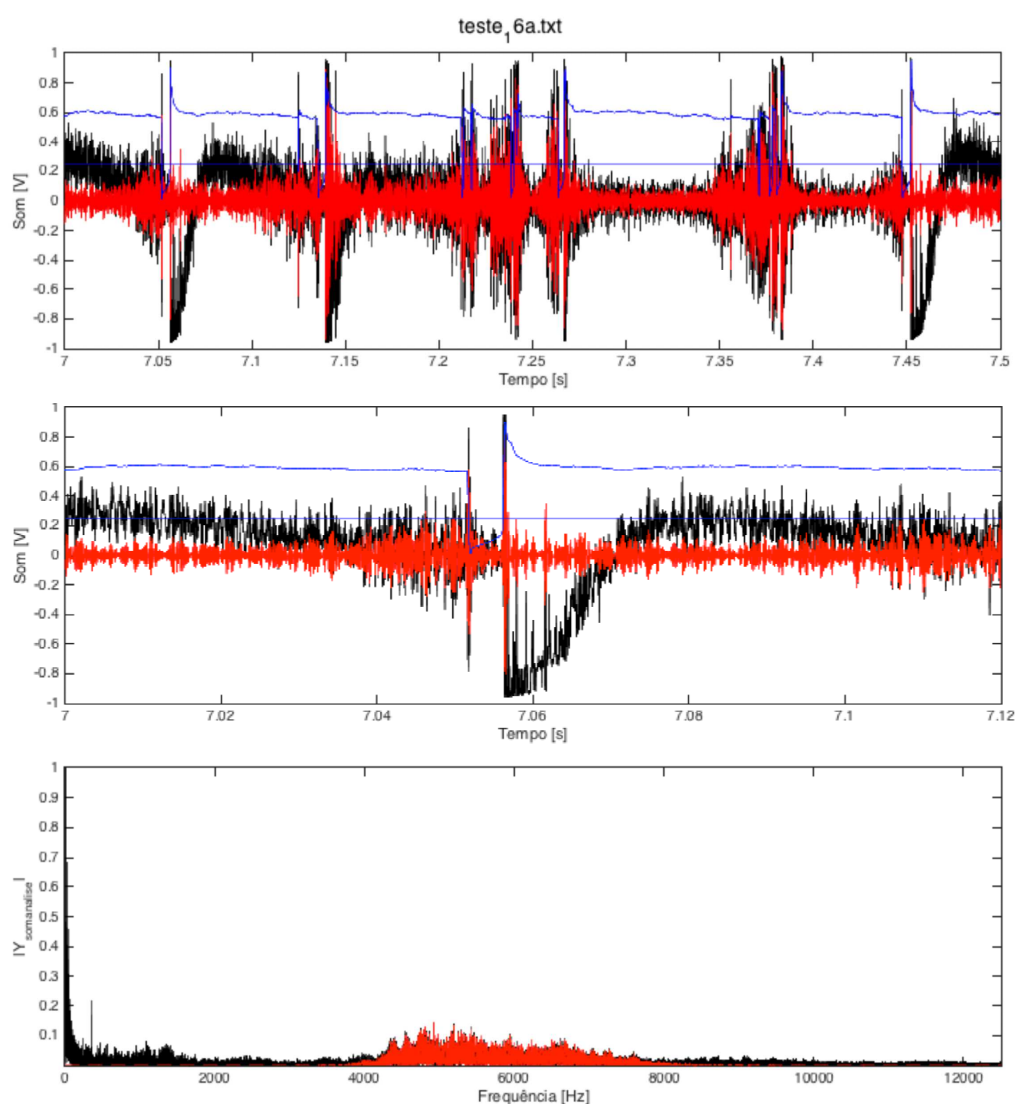


Figura 4.48 – Resultado demonstrativo do sinal filtrado em 4 – 8 kHz e amostrado em 25 kS/s (Fonte: Próprio autor)

4.3.2.2 Domínio do Tempo

Realizado o estudo no domínio da frequência e com base em suas observações, pode-se passar para um estudo no domínio do tempo.

A taxa de amostragem do sinal, bem como a frequência de oscilação sinal do som são relevantes, pois o trabalho almeja realizar medidas no domínio do tempo (FreqCC, tcc, taa, dptcc e dptaa). Assim, uma boa resolução de tempo é requerida, haja vista que os fenômenos são da ordem de milissegundos. Com amostragem em 25 kS/s consegue-se resolução no tempo de 0,04 ms, e um número de amostras de ~5 pontos por período da frequência média da portadora (freq._osc). Da Tabela 4-7, tem-se uma frequência média de oscilação de 5401 Hz (período de 0.185 ms, doravante chamado TOSC), e considerando-se que os picos de abertura e apagamento do arco são representados por picos desta onda (Figura 4.22), tem-se uma resolução em tempo aproximada de 0.185 ms em suas medidas. Essa resolução representa um erro possível de 9.25%, considerando-se curtos de 2 ms, o que, sem dúvida, agrega erros ao cálculo do IVccS.

Como avaliação no domínio do tempo, e buscando uma maior legibilidade do sinal, aplicou-se a ideia de que o som é a derivada da potência do arco elétrico, e uma das formas de se obter a energia (comparando a potência) de um sinal é o cálculo de seu valor eficaz (RMS). Entretanto, neste caso o valor RMS deve ser aplicado em janelas, buscando obter a energia do sinal na janela especificada, sendo esta janela deslizante de uma em uma amostra do sinal.

Foi idealizado um cálculo do valor RMS com uma janela simétrica (50 % pontos passados e 50% pontos futuros, sendo com um ponto central), e a quantidade de pontos determinada de acordo com TOSC, ficando determinada $2 \cdot \text{TOSC}$, 0.37 ms, ou seja, 9 pontos. As Figura 4.49 e Figura 4.50 mostram o estudo e análise para diferentes ensaios considerados, sendo que o estudo completo do tempo de cálculo do RMS pode ser visto no Apêndice V – Estudo do número de pontos para cálculo do RMS móvel (item 4.3.2.2).

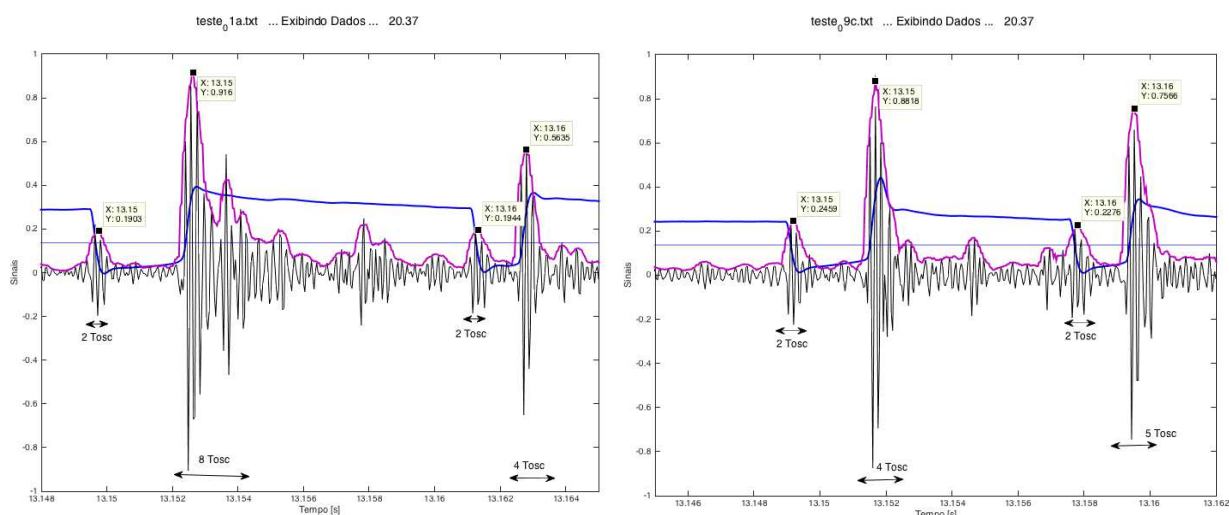


Figura 4.49 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($2 \cdot TOSC$) do teste_01a e teste09_c. (Fonte: Próprio autor)

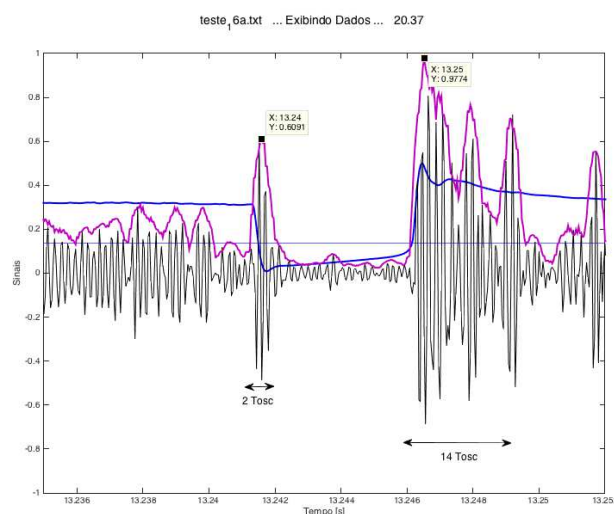


Figura 4.50 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($2 \cdot TOSC$) do teste_16a. (Fonte: Próprio autor)

Os resultados do processamento dos sinais podem ser observado na Figura 4.51 e na Figura 4.52 para dois testes de soldagem realizados, considerados como um bom sinal sonoro, limpo e sem perturbações de fundo e outro com perturbações, sendo considerado um sinal ruidoso e que considera-se de difícil processamento).

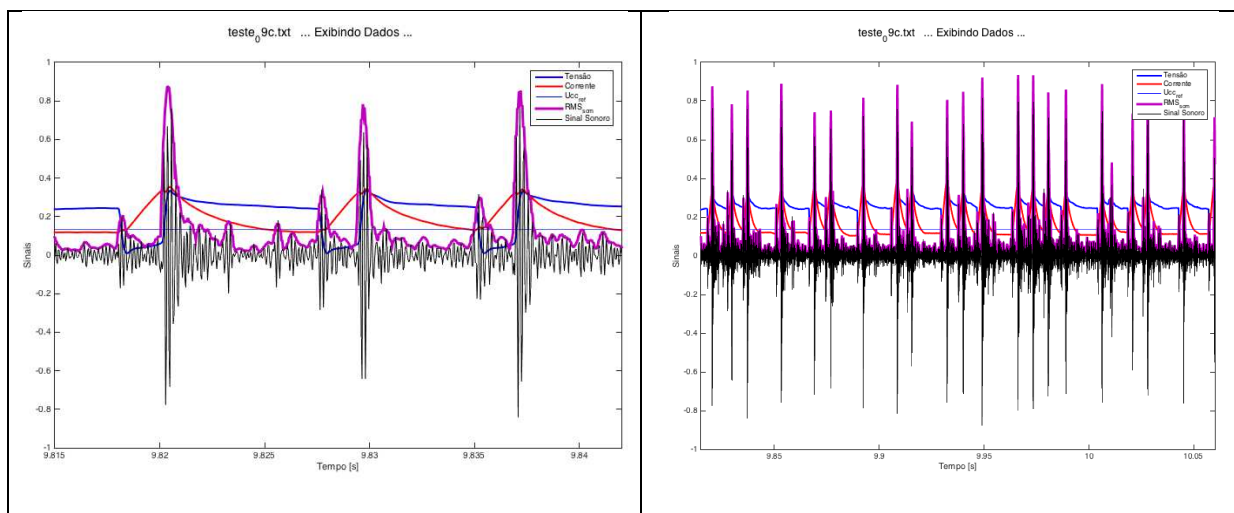


Figura 4.51 – Resposta da aplicação da técnica do valor RMS ($2 \cdot TOSC$) móvel para um sinal considerado bom. (Fonte: Próprio autor)

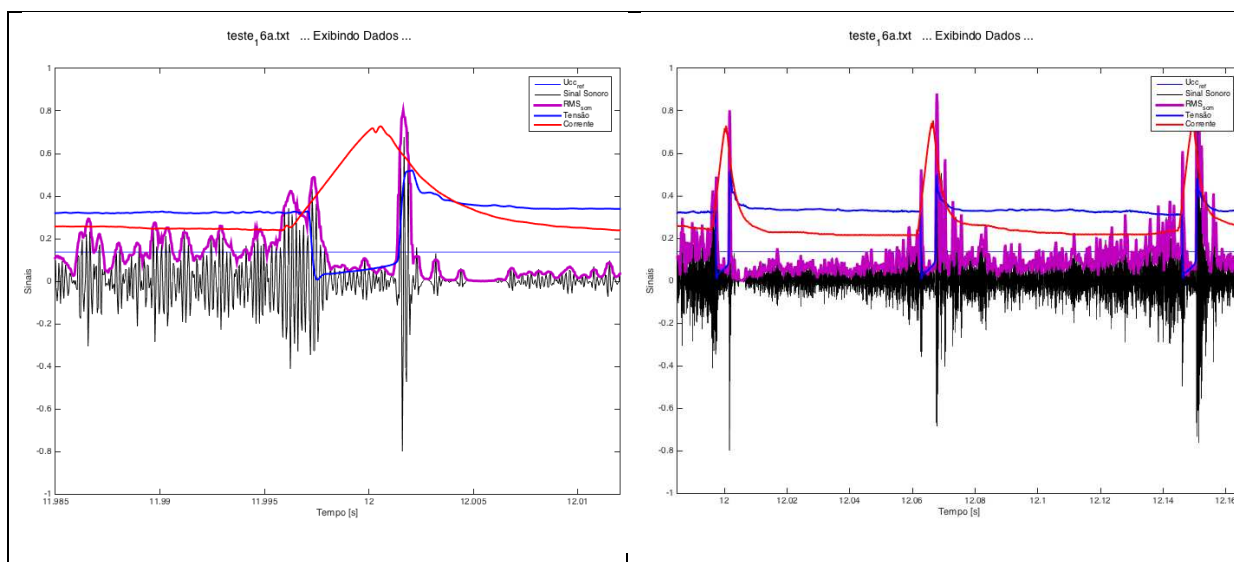


Figura 4.52 – Resposta da aplicação da técnica do valor RMS ($2 \cdot TOSC$) móvel para um sinal considerado ruidoso (baixa frequência de curto e ruído de fundo). (Fonte: Próprio autor)

4.3.3 Algoritmos de Determinação do IVcc pelo Som (IVccS)

Para o desenvolvimento do algoritmo de processamento dos sinais, utilizou-se, como sinais de base para a implementação e verificação do algoritmo, os sinais de análise dos testes realizados no Item 4.2.4, que perfazem um total de 20 testes. Assim, processou-se, para a detecção dos instantes (picos) de abertura e apagamento do arco, 66 janelas de 5 s, 4 janelas de 10 s, 6 janelas de 15 s e 10 janelas de 25 s, totalizando 86 conjuntos de sinais sonoros como base de

aprendizado do comportamento do sinal sonoro. Em seguida, extraiu-se as informações e características necessárias do som para a determinação do IVccS.

Nesta seção será descrito o último algoritmo implementado, após se passar por diversas técnicas de processamento para detecção do picos de ignição e extinção do arco. Este algoritmo final apresentou maior robustez e repetitividade de resultados quando aplicado aos 86 conjuntos de dados e comparados os resultados aos valores de referência medidos do sinal de tensão. Todos os algoritmos foram implementados em busca do menor custo computacional e, inicialmente, foram utilizadas as funções de processamento do MATLAB e, ao final, todas foram reimplementadas em linguagem C, realizando a técnica de processamento de modo aberto, considerando que a utilização das funções internas do MATLAB é a utilização de caixas pretas, e que não estarão disponíveis para implementação no sistema embarcado.

4.3.3.1 Algoritmo Final Implementado – Exemplo passo-a-passo

Abaixo tem-se uma aplicação do funcionamento do algoritmo de processamento do sinal sonoro, mostrando passo-a-passo o funcionamento e o princípios de funcionamento.

Como parâmetros de entrada o algoritmo recebe o vetor de dados do sinal sonoro e a taxa de amostragem. Na aplicação, os sinais foram adquiridos à uma taxa de amostragem de 25 kS/s, filtrados com filtro passa-faixa de Butterworth 4ª Ordem em 4 – 8 kHz. Conforme descrito no item 4.3.2.1.

Para um melhor entendimento o Algoritmo será dividido em Etapas.

4.3.3.1.1 Etapa 1 – Identificação dos Picos

O primeiro passo é gerar um vetor de índices de amostragem (neste momento não se trabalha com o tempo). Com o vetor de índices e o vetor de dados (amplitudes da pressão sonora) é realizado o cálculo do valor RMS Móvel de acordo com o Item 4.3.2.2. Após o cálculo da curva RMS do sinal sonoro detecta-se todos os picos da nova curva (RMS) para o próximo passo do processamento.

A Figura 4.53 mostra o resultado do procedimento até o momento. Ao fundo tem-se em azul a curva da tensão do arco, como referência dos instantes de abertura e apagamento do arco durante o processo de processamento, visto que é o sinal de referência para o processamento e determinação do IVcc clássico.

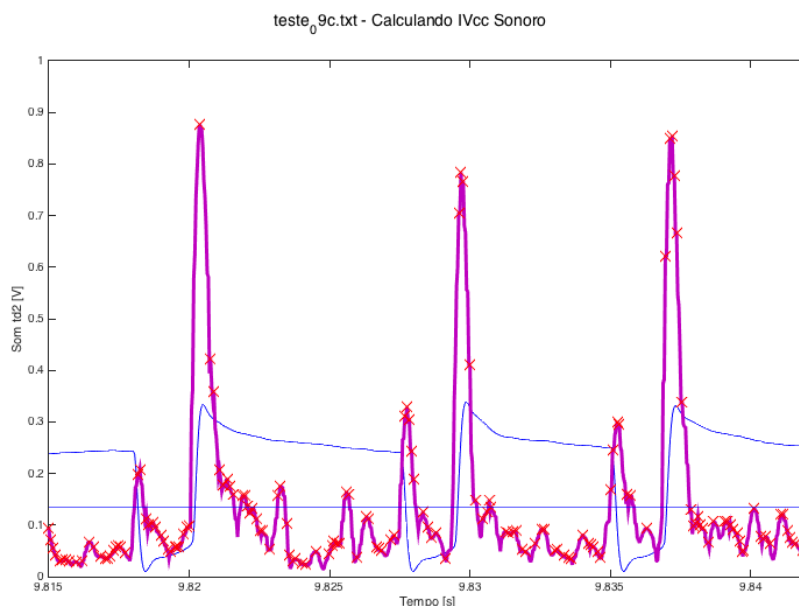


Figura 4.53 – Picos da curva RMS do sinal sonoro (Fonte: Próprio autor)

4.3.3.1.2 Etapa 2 – Estratificação e Detecção dos Picos de Abertura de Arcos

Neste momento, os picos são classificados e estratificados de acordo com a Figura 4.54, sendo Picos Altos, Médios e Baixos. Dentro de cada estrato citado ainda há a estratificação em outros três níveis.

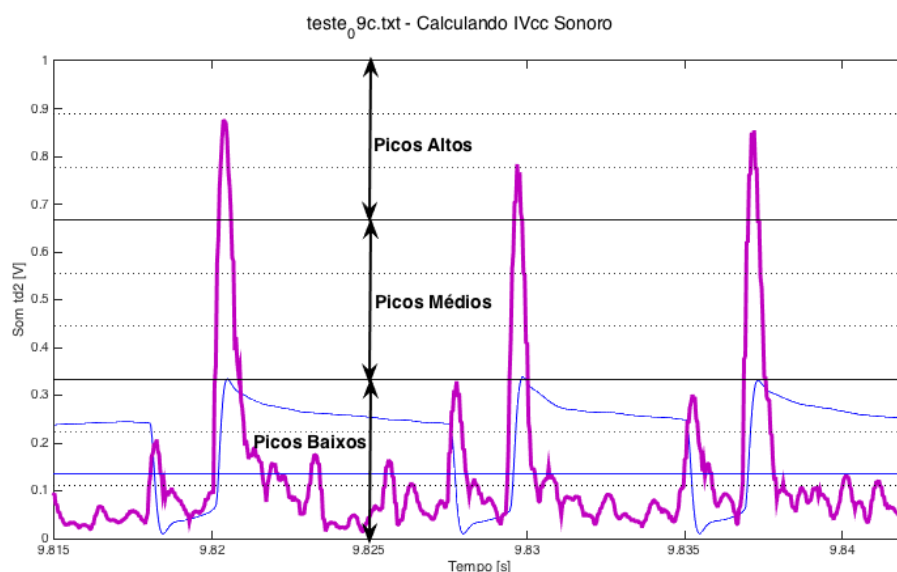


Figura 4.54 – Estratificação dos picos na curva RMS (Fonte: Próprio autor)

A estratificação é realizada para o cálculo do histograma do sinal, sendo a quantidade de estratos do mesmo igual à nove, conforme descrito acima. Na Figura 4.55 tem-se os picos para um intervalo de análise de 5 s e seu histograma.

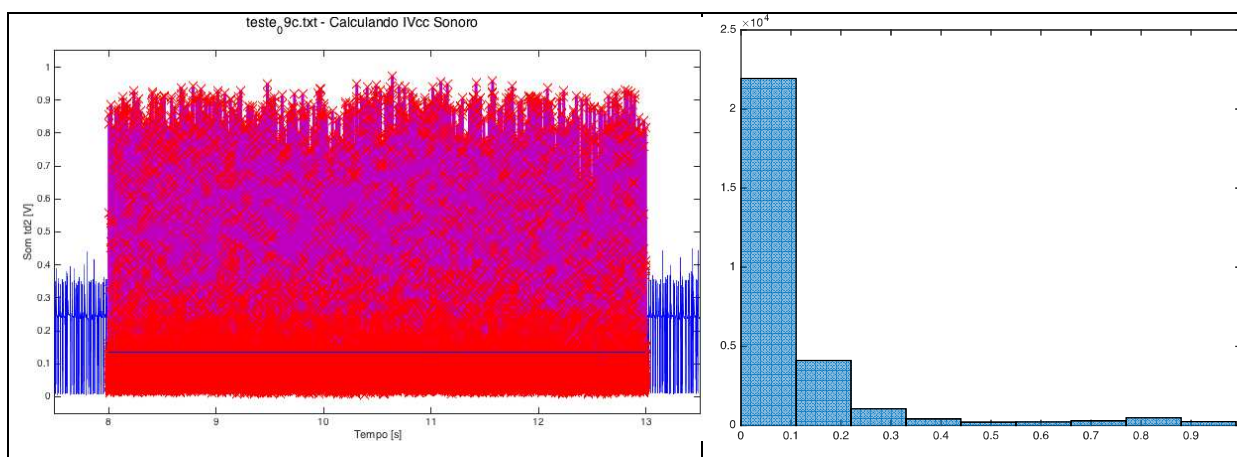


Figura 4.55 – Picos da curva RMS (em vermelho) para 5s e seu histograma (Fonte: Próprio autor)

A partir da análise da Figura 4.55 é difícil obter alguma informação relevante, mas quando se realiza a limpeza dos picos de acordo com critério descrito no Item 4.3.1, ou seja, não há outra abertura de arco em intervalo menor que 2 ms à vizinhança de uma nova abertura de arco, passa-se a obter maiores informações acerca do sinal, conforme mostrado na Figura 4.56.

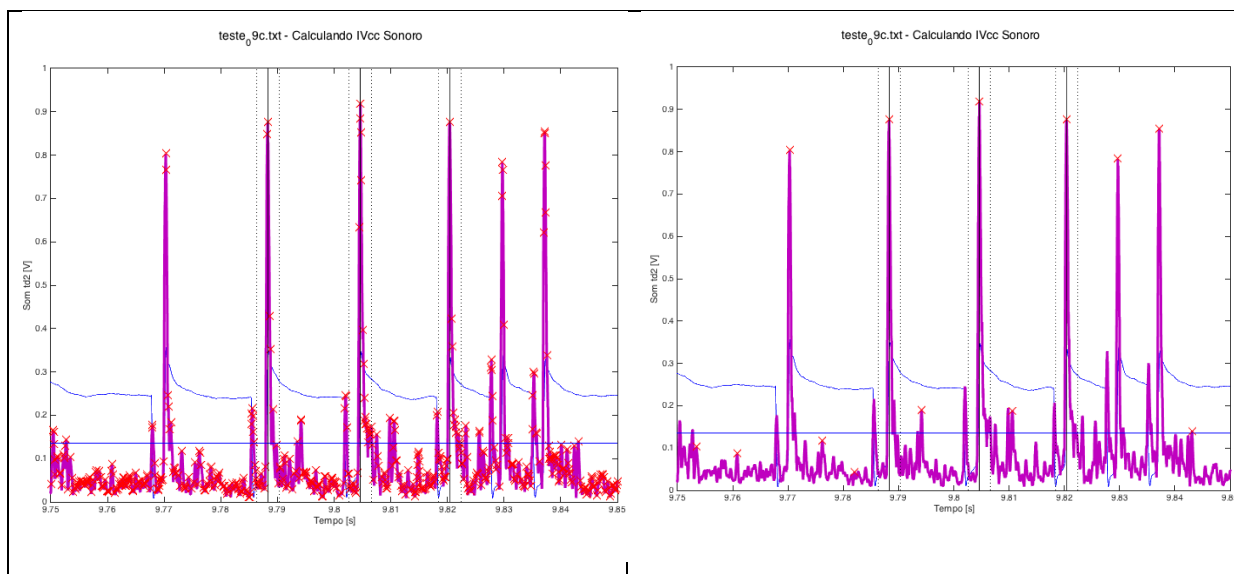


Figura 4.56 – Exemplo da limpeza dos picos de abertura de arcos de acordo com o tempo mínimo de curto-circuito ($t_{ccmin} \geq 2ms$) (Fonte: Próprio autor)

Realizando uma nova avaliação dos picos, o histograma, passa a apresentar a distribuição de acordo com Figura 4.57.

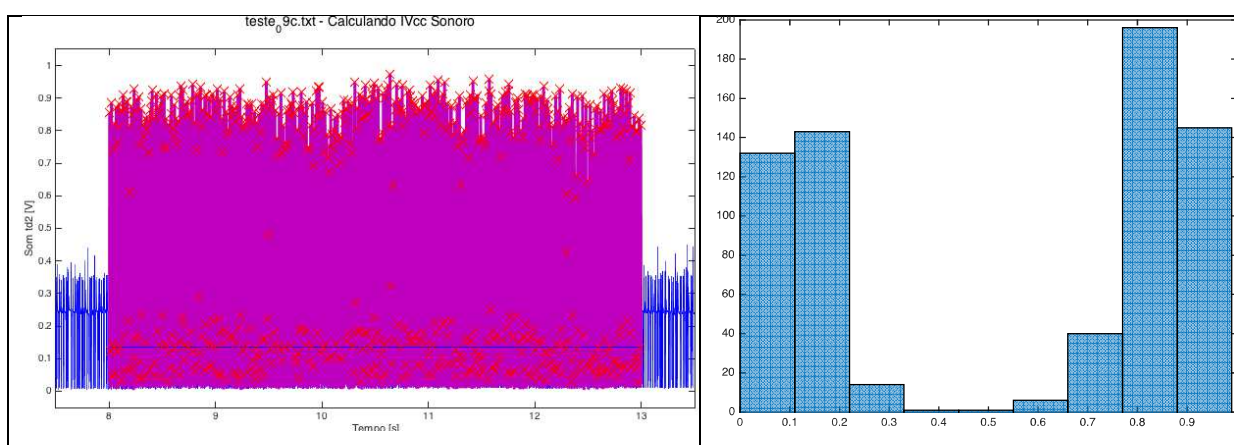


Figura 4.57 – Picos da curva RMS (em vermelho) para 5 s após limpeza por t_{ccmin} e seu histograma (Fonte: Próprio autor)

Para a continuidade do processamento, deve-se ter um critério de seleção em amplitude para os picos de aberturas de arco, como um limiar, separando os picos de ignição de arco. Observando-se as distribuições dos picos, verifica-se que há uma grande concentração (quantidade) de Picos Baixos, seguida por uma quantidade menor de Picos Altos e para os Picoes Médios há um ponto de transição, onde a quantidade de picos deixa de diminuir e volta a aumentar.

Aplicou-se um ajuste de curva para os centros das faixas do histogramas e a quantidade de pontos, obtendo uma curva de ajuste da quantidade de pontos por valor do ponto. Calculando o ponto de mínimo, normalmente na faixa dos Pontos Médios, determina-se um limiar inferior para prever potencialmente picos de aberturas de arco. A Figura 4.58 ilustra a metodologia. O Apêndice VI – Estudo da Determinação do Limiar de Amplitude dos Picos de Abertura de Arcos (4.3.3.1.2) mostra os resultados desta análise para um conjunto de sinais sonoros de 5 s para cada ensaio realizado no Item 4.2.4.

As Figura 4.59 e Figura 4.60 mostram os picos pré-selecionados de aberturas de arco, baseados nos critérios de seleção:

- Picos maiores que o limiar definido; e
- Picos com distância mínima de 2 ms.

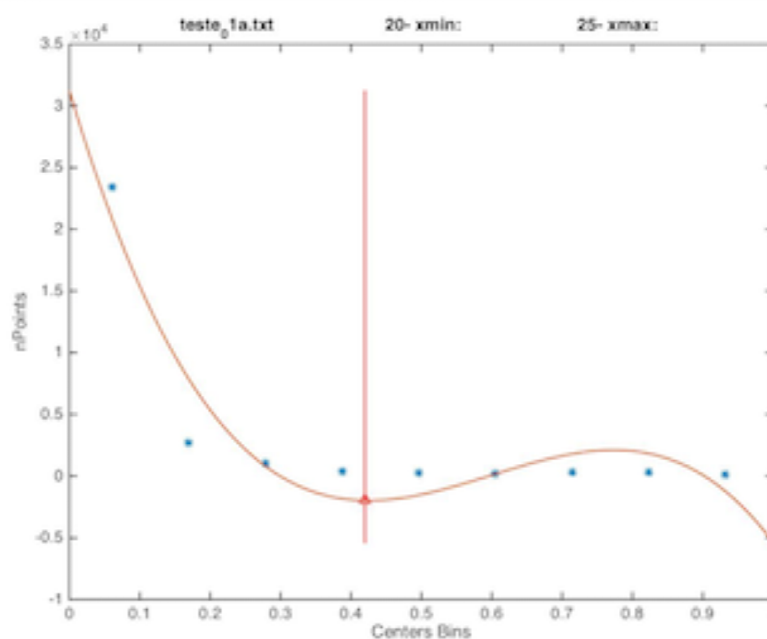


Figura 4.58 – Determinação do limiar de amplitude para picos de abertura de arco para o teste 1 (Fonte: Próprio autor)

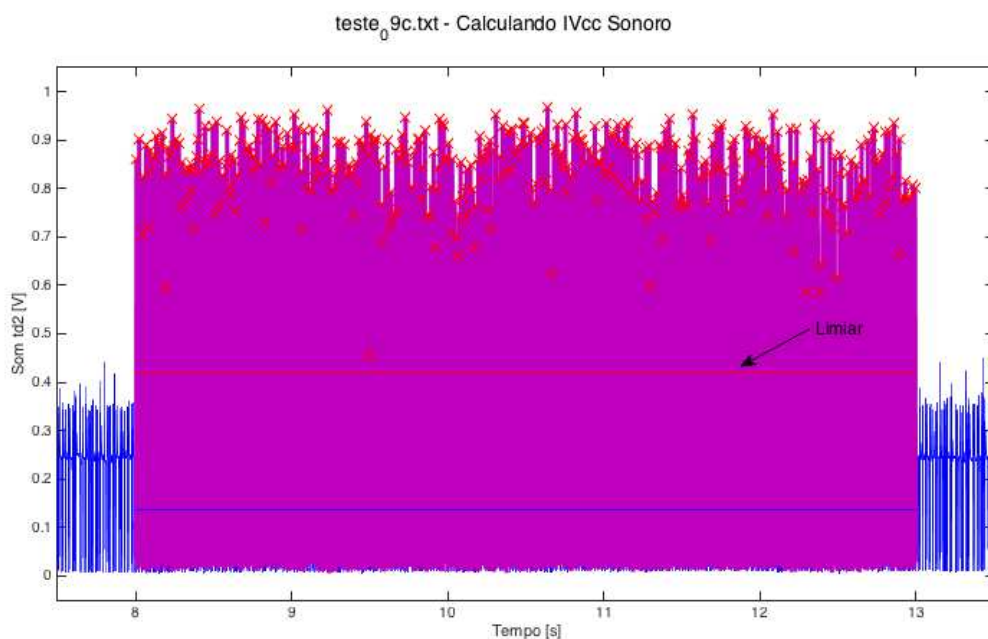


Figura 4.59 – Picos pré-selecionados de aberturas de arco (Fonte: Próprio autor)

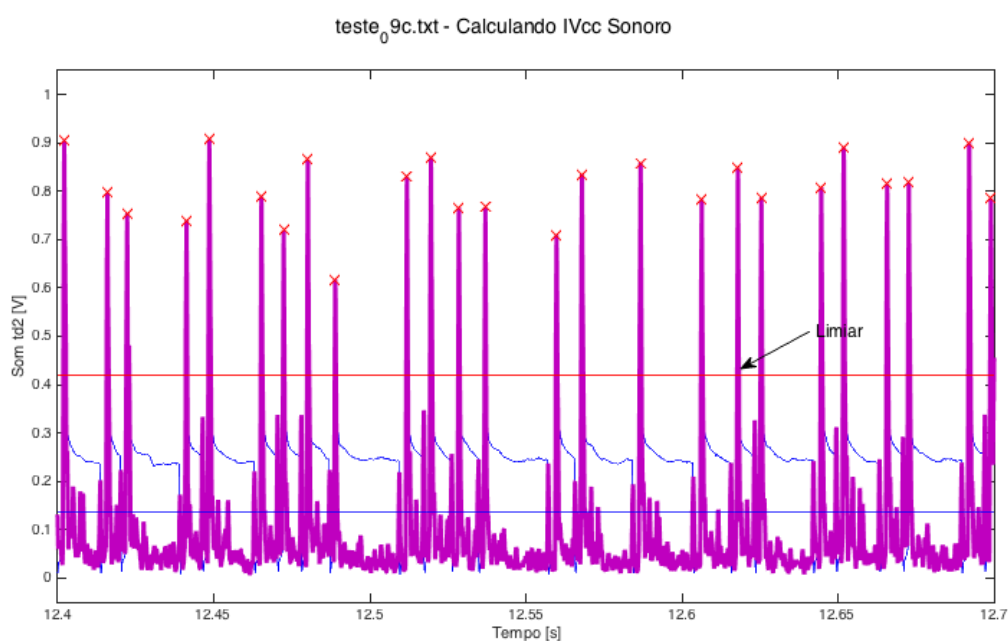


Figura 4.60 – Detalhe mostrando a pré-seleção dos picos de abertura de arco (Fonte: Próprio autor)

As Figura 4.61 e Figura 4.62 ilustram a aplicação do método para um sinal com perturbações de fundo, mostrando sua validade.

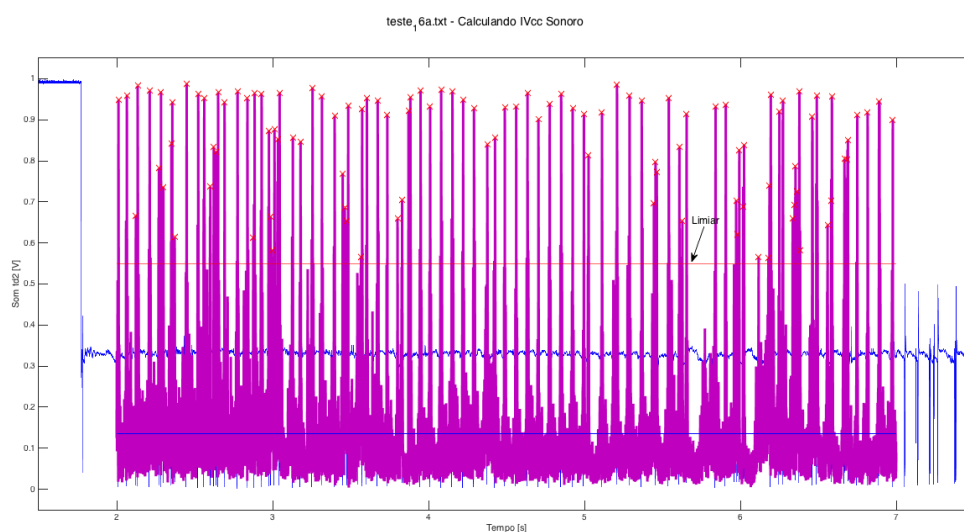


Figura 4.61 – Pré-seleção dos picos de abertura de arco para um sinal com perturbações de fundo (Fonte: Próprio autor)

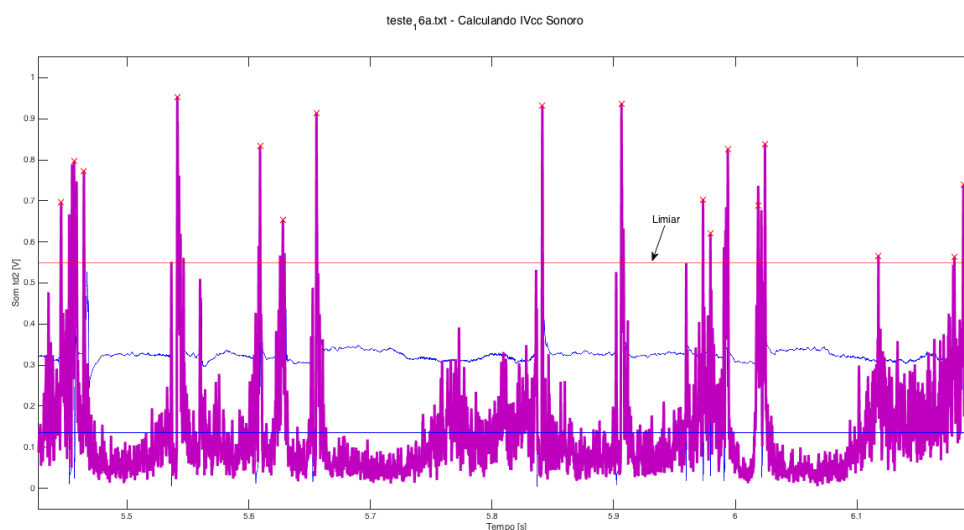


Figura 4.62 – Detalhe da pré-seleção dos picos de abertura de arco para um sinal com perturbações de fundo (Fonte: Próprio autor)

4.3.3.1.3 Etapa 3 – Detecção dos Picos de Apagamento dos Arcos

Para a identificação dos picos de apagamento do arco na curva RMS do sinal sonoro aplicou-se o conceito da Figura 4.41, onde afirma-se que o apagamento do arco anterior a sua abertura ocorre dentro de 35% do tempo entre um pico de abertura de arco e o pico de abertura de arco do curto anterior, definindo assim esse ponto como o início da faixa de busca do pico de apagamento do arco (T_{busca_inic}).

O fim da faixa de busca (T_{busca_fim}) é definido como um ponto 0,75 ms anterior ao pico de abertura do arco, para evitar que se utilize, erroneamente, um ponto que está na subida do pico de abertura ao invés do pico de apagamento.

Desta forma, o algoritmo calcula estes tempos para cada curto, e procura o máximo valor da curva RMS do sinal sonoro na faixa de T_{busca_inic} e T_{busca_fim} .

A detecção dos pontos de apagamento do arco elétrico é mais simplificada se compara à detecção das aberturas, pois inicialmente, com a detecção dos pontos de abertura do arco define-se as posições dos curtos, e necessariamente antes de cada abertura há o apagamento do arco.

A Figura 4.63 ilustra a obtenção da faixa de busca do pico de apagamento do arco.

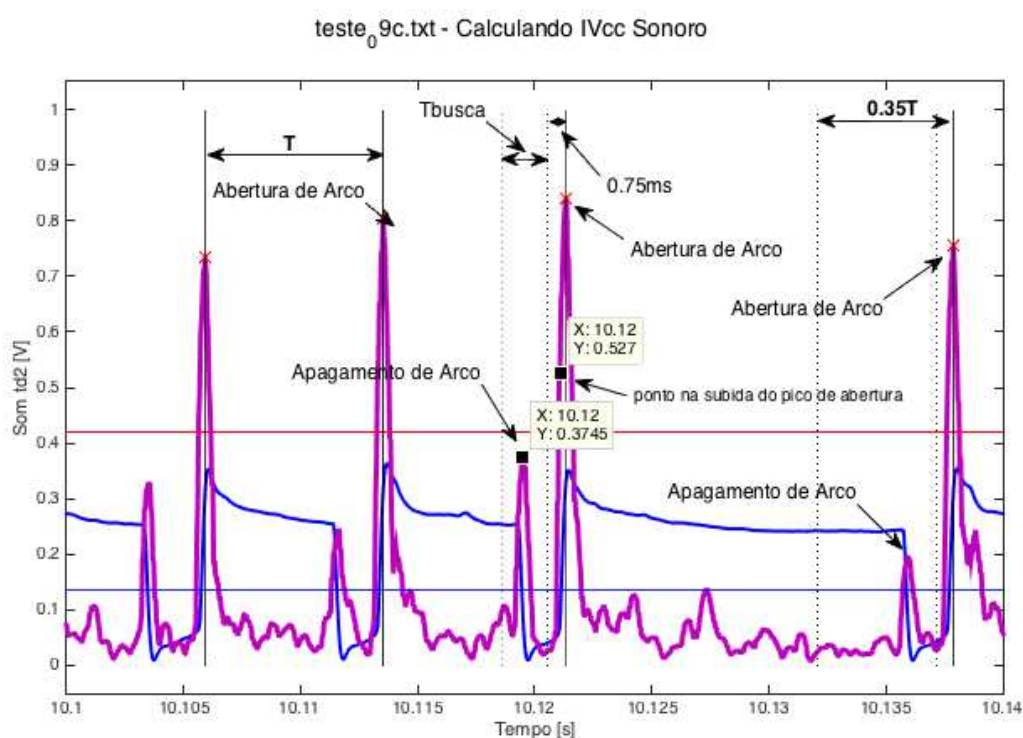


Figura 4.63 – Determinação da faixa de tempo para busca do pico de apagamento do arco anterior a abertura de um novo arco (Fonte: Próprio autor)

4.3.3.1.4 Etapa 4 – Cálculo do IVccS

Determinados os picos de apagamento e abertura do arco, determina-se os tempos de curto-circuito, os tempos de arco aberto e assim a determinação do IVccS, FreqCCS (frequência de curto-circuito pelo som) e demais parâmetros. A

Tabela 4-9 mostra os resultados do processamento proposto, conforme descrito, comparando aos resultados do processamento do sina com os resultados da avaliação do tensão com $U_{cc,ref}$ em 10 V (referência) e em 5V.

Tabela 4-9 – Resultados do processamento dos sinais pelo algoritmo

	IVcc 10V	IVcc 5V	IVcc S	Erro IVcc 5V	Erro IVccS	FreqCC U 10V	FreqCC U 5V	FreqC	Erro FreqCC 5V	Erro FreqCCS
ERRO MÉDIO				5,0%	13,7%				2,3%	8,9%
teste_01a	0,87	0,88	0,81	0,9%	-7,2%	73,6	73,0	65,8	-0,8%	-10,6%
	0,88	0,89	0,83	1,3%	-5,6%	74,8	74,2	69,3	-0,8%	-7,4%
	0,91	0,91	0,85	-0,2%	-7,1%	72,6	72,0	64,7	-0,8%	-10,9%
	0,84	0,84	0,78	-0,6%	-7,7%	74,4	73,4	69,6	-1,3%	-6,5%
	0,88	0,88	0,82	0,5%	-6,5%	73,85	73,2	67,3	-0,9%	-8,9%
teste_02d	1,08	1,07	0,98	-0,9%	-9,6%	37,6	37,0	34,8	-1,6%	-7,3%
	1,15	1,17	1,09	1,5%	-5,4%	34,2	34,0	32,0	-0,6%	-6,4%
	1,14	1,11	1,13	-2,3%	-0,1%	36,4	35,8	33,7	-1,6%	-7,4%
	1,16	1,14	1,07	-1,7%	-7,5%	35,6	34,8	34,1	-2,2%	-4,3%
	1,13	1,12	1,08	-0,8%	-4,8%	35,95	35,4	33,2	-1,5%	-7,6%
teste_03b	1,04	1,01	0,97	-3,0%	-7,1%	58,2	56,2	60,9	-3,4%	4,7%
	1,16	1,09	0,97	-6,1%	-16,5%	61,2	57,8	59,1	-5,6%	-3,4%
	1,02	0,98	0,97	-4,1%	-5,2%	55,4	53,8	57,5	-2,9%	3,9%
	1,08	1,03	0,97	-4,5%	-10,3%	58,33	56,0	57,6	-4,0%	-1,3%
	1,25	1,27	1,19	1,5%	-4,8%	29,4	29,0	34,9	-1,4%	18,8%
teste_04d	1,43	1,35	1,19	-5,4%	-16,5%	32,8	30,6	35,2	-6,7%	7,3%
	1,28	1,24	1,19	-2,9%	-6,5%	31	29,6	34,9	-4,5%	12,7%
	1,32	1,29	1,18	-2,0%	-10,1%	31,07	29,7	34,4	-4,4%	10,8%
	0,67	0,66	0,62	-1,1%	-6,8%	97,8	97,4	86,7	-0,4%	-11,3%
	0,70	0,66	0,67	-5,5%	-4,4%	94,6	93,8	87,3	-0,8%	-7,7%
teste_05a	0,77	0,75	0,71	-2,3%	-7,5%	99,6	99,2	89,2	-0,4%	-10,5%
	0,73	0,72	0,66	-1,9%	-9,8%	96,8	96,6	86,9	-0,2%	-10,3%
	0,72	0,70	0,69	-2,5%	-3,5%	97,2	96,8	85,8	-0,4%	-11,7%
	1,00	0,97	0,99	-3,1%	-1,0%	29,4	28,8	27,1	-2,0%	-7,7%
	1,21	1,15	1,15	-5,1%	-4,8%	30	29,0	24,4	-3,3%	-18,7%
teste_06c	1,17	1,10	1,17	-6,2%	0,0%	30	28,4	28,5	-5,3%	-5,1%
	1,22	1,15	1,10	-6,0%	-9,7%	30,6	29,2	28,1	-4,6%	-8,1%
	1,15	1,09	1,11	-5,4%	-3,7%	30	28,9	26,7	-3,7%	-11,1%
	1,15	1,05	1,18	-8,7%	2,5%	46,4	43,8	62,7	-5,6%	35,2%
	1,15	1,07	1,18	-7,0%	2,5%	47,4	45,6	58,4	-3,8%	23,2%
teste_07d	1,15	1,06	1,16	-7,7%	1,0%	46,9	44,7	58,1	-4,7%	23,9%
	1,17	1,03	1,27	-11,6%	8,6%	28,4	26,6	43,9	-6,3%	54,5%
	1,08	0,94	1,23	-13,1%	13,9%	23,6	22,2	38,9	-5,9%	65,0%
	1,13	1,00	1,23	-11,6%	8,9%	26	24,4	40,8	-6,2%	57,1%
	0,60	0,59	0,61	-1,4%	2,0%	76,8	76,8	76,9	0,0%	0,1%
teste_09c	0,64	0,61	0,62	-4,0%	-2,9%	78,2	78,0	78,0	-0,3%	-0,3%
	0,64	0,62	0,64	-3,0%	0,1%	76,4	76,4	76,7	0,0%	0,4%
	0,67	0,64	0,65	-3,9%	-1,8%	75,6	75,4	75,9	-0,3%	0,3%
	0,64	0,62	0,63	-2,5%	-0,8%	76,8	76,7	76,7	-0,1%	-0,2%
	0,54	0,50	0,70	-6,9%	29,6%	35,8	35,6	36,3	-0,6%	1,3%
teste_10a	0,56	0,49	0,71	-12,7%	27,0%	36,2	35,8	35,9	-1,1%	-0,7%
	0,52	0,52	0,67	-0,6%	27,5%	34,6	34,6	34,9	0,0%	1,0%
	0,50	0,47	0,61	-5,4%	21,8%	34,4	34,4	35,0	0,0%	1,8%
	0,53	0,50	0,69	-5,9%	29,8%	35,3	35,2	35,4	-0,3%	0,3%
	0,99	0,83	0,83	-15,9%	-16,4%	49,2	47,0	46,3	-4,5%	-5,9%
teste_11c	1,14	1,00	0,87	-12,5%	-23,6%	55,6	53,0	47,6	-4,7%	-14,4%
	1,07	0,92	0,85	-14,0%	-20,6%	52,4	50,0	46,9	-4,6%	-10,5%
	1,30	1,10	0,94	-15,3%	-27,9%	36,6	33,4	30,8	-8,7%	-15,7%
	1,45	1,21	1,09	-16,6%	-25,2%	42,4	38,2	33,4	-9,9%	-21,2%
	1,38	1,17	1,01	-15,3%	-26,8%	39,5	35,8	31,9	-9,4%	-19,4%
teste_13d	0,83	0,83	0,84	-0,2%	0,4%	65,8	65,8	66,0	0,0%	0,3%
	0,88	0,87	0,86	-0,7%	-1,8%	65,6	65,4	65,6	-0,3%	0,0%
	0,91	0,90	0,89	-1,3%	-2,0%	62,6	62,4	62,8	-0,3%	0,3%
	0,87	0,87	0,89	-0,3%	2,2%	62,2	62,2	62,9	0,0%	1,1%
	0,88	0,87	0,87	-0,6%	-0,5%	64,05	64,0	64,2	-0,1%	0,2%
teste_14b	0,83	0,84	1,06	1,2%	28,1%	8	8,0	8,0	0,0%	0,1%
	0,77	0,78	1,01	0,9%	30,1%	6,4	6,4	6,5	0,0%	1,9%
	0,61	0,61	1,35	0,3%	121,8%	5,6	5,6	5,6	0,0%	0,2%
	0,60	0,60	1,04	0,5%	73,4%	6,4	6,4	6,9	0,0%	8,1%
	0,74	0,74	1,14	0,5%	54,9%	6,6	6,6	6,6	0,0%	0,5%
teste_15a	0,66	0,64	0,64	-3,6%	-3,7%	31	30,8	30,1	-0,6%	-2,9%
	0,61	0,58	0,56	-4,9%	-8,9%	30	29,8	29,7	-0,7%	-1,0%
	0,60	0,58	0,62	-2,8%	3,7%	29,2	29,2	30,3	0,0%	3,9%
	0,62	0,60	0,60	-3,7%	-4,5%	30,07	29,9	29,7	-0,6%	-1,3%
	1,27	1,17	1,15	-8,2%	-10,0%	20	19,0	20,5	-5,0%	2,7%
teste_16a	1,46	1,34	1,18	-8,0%	-19,3%	21,8	20,6	18,4	-5,5%	-15,5%
	1,20	1,12	0,96	-6,6%	-20,2%	18,2	17,4	17,2	-4,4%	-5,3%
	1,31	1,21	1,09	-7,9%	-16,9%	20,07	19,0	18,2	-5,3%	-9,6%
	1,01	0,91	0,78	-9,5%	-22,0%	81,2	81,8	78,7	0,7%	-3,1%
	1,12	1,05	0,90	-6,0%	-19,0%	85,8	86,2	85,0	0,5%	-1,0%
teste_17e	0,79	0,73	0,67	-8,1%	-16,0%	82,2	82,4	80,5	0,2%	-2,1%
	0,82	0,76	0,65	-7,2%	-21,1%	78,2	78,8	77,6	0,8%	-0,7%
	0,95	0,88	0,77	-7,3%	-19,4%	81,9	82,4	80,3	0,6%	-1,9%

Tabela 4.9 – Resultados do processamento dos sinais pelo algoritmo (continuação)

	IVcc 10V	IVcc 5V	IVccS	Erro IVcc 5V	Erro IVccS	FreqCC U 10V	FreqCC U 5V	FreqCC S 1	Erro FreqCC 5V	Erro FreqCCS
teste_18a	0,26	0,22	0,36	-13,8%	39,7%	40,2	40,2	40,1	0,0%	-0,2%
	0,24	0,21	0,34	-14,2%	39,7%	40,8	40,8	40,7	0,0%	-0,3%
	0,30	0,26	0,40	-12,3%	36,2%	39,2	39,2	39,2	0,0%	0,0%
	0,24	0,21	0,37	-12,8%	54,8%	41	41,0	41,3	0,0%	0,7%
	0,26	0,23	0,37	-12,1%	42,2%	40,3	40,3	40,2	0,0%	-0,3%
teste_19c	0,50	0,43	0,53	-14,4%	5,4%	74,2	73,6	73,5	-0,8%	-1,0%
	0,50	0,46	0,50	-7,6%	0,3%	71,2	71,4	71,0	0,3%	-0,3%
	0,51	0,46	0,53	-10,6%	3,6%	71,6	71,6	70,8	0,0%	-1,2%
	0,50	0,45	0,53	-10,9%	4,0%	72,4	72,2	71,6	-0,3%	-1,1%
teste_20a	1,06	0,82	0,82	-22,8%	-22,8%	55	51,4	46,6	-6,5%	-15,2%
	1,07	0,81	0,91	-24,3%	-15,0%	50,6	46,8	45,1	-7,5%	-10,8%
	1,02	0,86	0,90	-15,5%	-11,5%	50,8	48,8	47,0	-3,9%	-7,4%
	1,05	0,83	0,88	-21,0%	-16,7%	52,2	49,0	46,1	-6,1%	-11,7%

Da Tabela 4-9 e Tabela 4-23 pode-se ter duas frentes para avaliação dos resultados do processamento dos sinais. A primeira é observando a detecção dos curtos, refletida na frequência de curto-circuito (FreqCC), e a segunda pela medida do IVccS propriamente dito.

Considerando a análise da frequência e que a mesma depende da detecção inicial dos picos de abertura do arco elétrico, visto então como a parte mais importante do algoritmo de processamento do sinal, e observando o erro mínimo foi de 0,0%, o erro máximo de 65% e o erro médio é 8,9%, é possível afirmar que o algoritmo de detecção dos picos pelo sinal sonoro apresentou bom resultado, se comparado com o erro observado ao se realizar os cálculos com sobre o sinal de tensão com um valor de referência inapropriado (5 V, por exemplo) apresentando erros na ordem de 0%, 9,9% e 2,3%, sendo mínimo, máximo e médio respectivamente.

Para os valores de erros da determinação de FreqCCS (frequência de curto circuito pelo som) verifica-se que há valores entre 0-10% (em laranja) e valores acima de 10%, sendo que estes observados (em vermelho), exceto os testes 01a e 05a, apresentam frequência de curto-circuito inferior ao valor de F_{corte} .

Verificando os valores dos índices de regularidades, é observado erro mínimo de 0,1%, máximo de 121,8% e erro médio de 13,7%. Realizando a mesma avaliação para uma análise de tensão inapropriada, conforme anteriormente, obteve-se erros de 0,3%, 24,3% e 5,0%, sendo mínimo, máximo e médio respectivamente. Assim como observado para a avaliação da FreqCCS, os maiores erros são observados para os testes que apresentaram frequência de curto-circuito inferior à F_{corte} .

Relacionando os erros apresentados na medida da FreqCCS e no IVccs, sendo que o IVccS depende da correta identificação das aberturas de arcos (ligado à FreqCCs), observa-se que há testes que apresentaram baixo erro na medida das

duas características, como esperado. Entretanto, em outros testes, mesmo com erros na detecção dos curtos (erro na FreqCCS), o erro apresentado por IVccS é baixo (exemplo, teste_07d). O contrário também ocorreu, sendo que o que o teste_10a apresenta baixo erro na identificação dos arcos mas alto erro no IVccS. Tais comportamentos podem ser explicados, respectivamente, pelo fato de que, mesmo não identificando todos os arcos corretamente (quantidade e não posições), o cálculo do IVccS é baseado em valores estatísticos, e mesmo que não se detecte todos os curtos corretamente, o cálculo ainda é válido, e, mesmo quando se reconhece corretamente os arcos, pode haver erros na identificação dos instantes de apagamento do arco, que, como já mostrado, apresentam baixos valores em amplitude, que podem sofrer interferência de ruídos de fundo mais facilmente que os de abertura do arco.

Desta forma, afirma-se que o desempenho do algoritmo de processamento é satisfatório para a avaliação de soldagem pelo processo por curto-circuito quando se considera o erro médio do processamento para determinação do IVccS (13,7%) frente aos 9,25% de erro em se errar apenas em uma posição de tempo na amostragem em casos de curtos com 2 ms, como visto no Item 4.3.2.2.

4.4 Etapa D – O Sistema de Monitoramento Sonoro (SiMoSS)

Esta seção descreve o desenvolvimento do dispositivo móvel para realizar o monitoramento sonoro do processo de soldagem com transferência metálica por curto-circuito, sendo baseado na ideia de um aparelho do tipo “aponta-e-pronto”, como mostrado na Figura 1.1.

O dispositivo de monitoramento, sendo um sistema embarcado, passa por algumas etapas para a execução de sua tarefa, medir o IVccS e indicar melhorias de processo para o usuário.

4.4.1 Etapas de Funcionamento do Sistema de Monitoramento Idealizado

4.4.1.1 Etapa 1 – Checagem e Calibração

A Etapa 1 é específica do sistema de monitoramento móvel, onde o mesmo realiza a checagem de todo sistema de aquisição, verificando a integridade de cabos e outros elementos, além de realizar a calibração do sistema para compensar efeitos do meio ambiente temperatura e ruídos elétricos/eletromagnéticos.

4.4.1.2 Etapa 2 – Aquisição do Sinal Sonoro

A Etapa 2 também é específica do sistema de monitoramento móvel, sendo que o mesmo realiza a aquisição propriamente dita do sinal sonoro e armazenamento dos dados, definida a taxa de amostragem, tempo de aquisição, local de armazenamento dos dados, sendo que pode-se optar por realizar o processamento dos dados antes de realizar novas amostragem ou realizar concomitantemente, sendo esta abordagem definida por requisitos e limitações de *Hardware* ainda a serem discutidas.

4.4.1.3 Etapa 3 – Processamento do Sinal

Implementação do processamento do sinal, sendo o pré-processamento responsável por realizar o cancelamento de ruído do som (possível abordagem), filtragem e outros processamentos para melhor identificação do som.

Passa-se então para o processamento sinal propriamente dito. Nesta fase do algoritmo deve-se caracterizar o sinal sonoro correlacionando o mesmo com o processo de soldagem, reconhecendo características como pontos de ignição e extinção do arco elétrico, para assim a determinação do período e frequência de curto-circuito, e o valor do IV_{ccS} , de acordo com o algoritmo desenvolvido e mostrado no Item 4.3.

4.4.1.4 Etapa 4 – Proposição de Melhoria

Ao iniciar o uso do sistema de monitoramento, será solicitado ao usuário a configuração dos parâmetros básicos do processo de soldagem a ser monitorado (gás de proteção, material do metal de adição, diâmetro do arame de adição, velocidade alimentação e tensão de soldagem).

Com base nas informações de um banco de dados e estimativas estatísticas, o valor do IVccS medido será confrontado com o esperado e realizada uma sugestão de melhoria do processo (processo descrito no Item 4.5), dando ao usuário sugestões para variação dos parâmetros de soldagem, para se alcançar maior regularidade na realização do procedimento de soldagem.

4.4.2 Sistema Físico de Monitoramento

Para o desenvolvimento do dispositivo pode-se optar por três abordagens de desenvolvimento: a primeira, o desenvolvimento completo de hardware e software independentes (sistema embarcado próprio); a segunda, a utilização de placas de desenvolvimento proprietárias, e sua adaptação para as necessidades do projeto, abordagem utilizada por (Machado, 2011) no desenvolvimento do Sistema de Monitoramento de Soldagem Sem Fio (MoSo Wi-Fi); e finalmente, a terceira opção, que é o uso de hardware completo, já desenvolvido e testado, com sistema operacional capaz de gerenciar aplicativos de terceiros (nesta abordagem a tarefa é o desenvolvimento de um aplicativo para rodar em um sistema embarcado, como um celular/tablet por exemplo), abordagem também já utilizada no desenvolvimento de equipamentos, como (Siqueira, 2009) se utilizando de um PDA Dell Axim x51V para o desenvolvimento de um controle móvel de célula de soldagem MIG/MAG, mostrando que é possível e viável a aplicação desta abordagem no desenvolvimento de produtos voltados ao meio industrial.

Pensando no sistema e na interface com o usuário foi idealizada e proposta uma tela gráfica (e indicadores de LEDs) colorida, com interface por toque (sendo ainda possível a utilização de botões externos), onde o usuário seja capaz de selecionar os parâmetros de entrada e visualização da resposta do processamento.

Como se trata de um sistema embarcado o mesmo deve possuir sistema de alimentação autônomo (bateria e seu carregamento).

O sistema deve ser capaz de se utilizar do microfone desenvolvido no item 4.1.2.2.2 para aquisição do sinal sonoro.

4.4.2.1 Desenvolvimento de Tecnologia e Hardware Independente

Apesar da primeira opção ser a melhor abordagem para o desenvolvimento de um equipamento proprietário, com toda tecnologia conhecida e direitos autorais sobre a comercialização, o desenvolvimento de toda tecnologia de hardware e software é uma tarefa onerosa, tanto do ponto de vista de pessoal, tempo de desenvolvimento e investimento financeiro.

Como o objetivo é a construção de dispositivo comercial de monitoramento do processo de soldagem, o recurso financeiro sempre é levado em conta quando se pensa no desenvolvimento de equipamento, visto que se propõe a construção de equipamento de baixo custo, desta forma destacou-se a terceira opção

Do ponto de vista de pessoal, é um grande desafio realizar o desenvolvimento de tal equipamento, em todas suas partes por somente uma pessoa, visto que o desenvolvimento tecnológico de um produto envolve comumente uma equipe de desenvolvimento, com profissionais de diferentes áreas.

E, para o tempo de desenvolvimento, um produto tecnológico completo e funcional, pode envolver tempos de desenvolvimento e amadurecimento da ideia na ordem anos. Os fatores que mais influenciam a estratégia de empresas quanto a produtos são o tempo para desenvolvimento e introdução de novos produtos juntamente à imagem da marca (Sobeet, 2000).

4.4.2.2 Utilização de Placas de Desenvolvimento de Terceiros

O próximo passo foi testar a segunda opção, uma abordagem e proposta inicialmente para o desenvolvimento do sistema embarcado de monitoramento, é a de utilização e integração de diferentes dispositivos e placas de desenvolvimento de micro-controladores.

O uso de um sistema comercial de desenvolvimento foi escolhido como ponto de partida, e possivelmente como implementação final do protótipo, para a criação do dispositivo móvel.

4.4.2.2.1 Placas de Desenvolvimento

Dada experiência adquirida no desenvolvimento do trabalho (Machado, 2011), os itens e placas da Microchip Inc foram consideradas para o desenvolvimento do trabalho, sendo a primeira placa considerada, a placa *Multimedia Expansion Board* da Microchip (MEB) que agrega em um único corpo várias características e periféricos (**Multimedia Expansion Board User's Guide**, 2012), conforme mostrado nas Figura 4.64 e Figura 4.65.

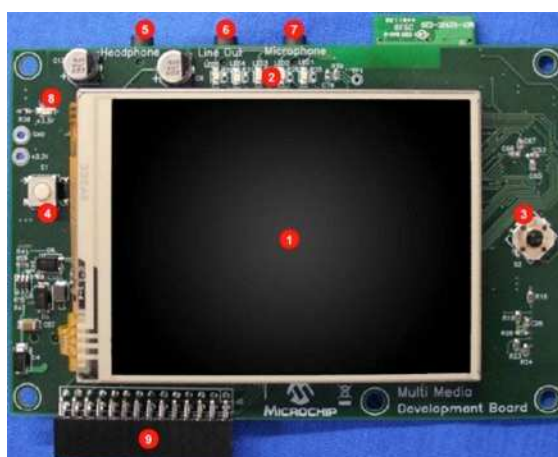


Figura 4.64 – Parte Frontal MEB, sendo:

1. 3.2 inch (8.1 cm) QVGA touch screen display with backlight
2. Five user-controlled LEDs
3. Four-way joystick (S2)
4. Fire button (S1)
5. Headphone jack
6. Line output jack
7. Microphone input jack
8. Power LED
9. PICtail™ compatible expansion connector



Figura 4.65 – Parte Posterior MEB, sendo:

1. Solomon Systech Graphics Controller (SSD1926)
2. microSD card slot.
3. Regulated 3.3V and 1.8V power supply for the board via a starter kit or 9-14V power supply
4. Accelerometer and temperature sensor (BMA150)
5. 24LC08 EEPROM.
6. SPI Flash (SST25VF016)
7. 24-bit audio codec (WM8731)
8. CPLD for SPI and Chip Select configuration
9. Starter kit connector
10. Integrated 802.11 wireless connectivity

Como processador para executar as tarefas de gerenciamento da interface de toque (necessita de um sistema operacional para controlar o funcionamento de todas as partes), aquisição e processamento do sinal sonoro escolheu-se o PIC32 USB Starter Kit II (Figura 4.66), que possui as seguintes características:

- Programador do Micro-controlador (PIC32MX795F512L 32-bit) Integrado;
- PIC32 @ 80 MHz com 512K Flash, 128K RAM, 8 ch. DMA + 4 ch. DMA dedicados à USB e CAN.

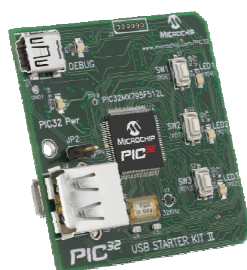


Figura 4.66 – Placa com micro-controlador com encaixe compatível com MEB

Verificou-se também a possibilidade de uso da placa Raspberry Pi Model B para o trabalho, mostrada na Figura 4.67. Suas características principais são: computador baseado em um *system on a chip* (SoC) Broadcom BCM2835, que inclui

um processador ARM1176JZF-S de 700 MHz, GPU VideoCore IV e 512 MB de memória RAM. O projeto não inclui uma memória não-volátil - como um disco rígido - mas possui uma entrada de cartão SD para armazenamento de dados. É presente ainda 2 portas USB, Saídas de vídeo: RCA Composto (PAL & NTSC), HDMI e Painéis LCD via DSI; Saídas de áudio: Conector de 3.5 mm; Rede onboard: 10/100 Mbit/s Ethernet (RJ45); Periféricos de baixo nível: 8 × GPIO, UART, I²C, SPI com dois seletores de chip, +3.3 V, +5 V, terra. Sistemas Operativos/Operacionais, Debian GNU/Linux, Fedora, Arch Linux, Raspbian24 , RISC OS25.

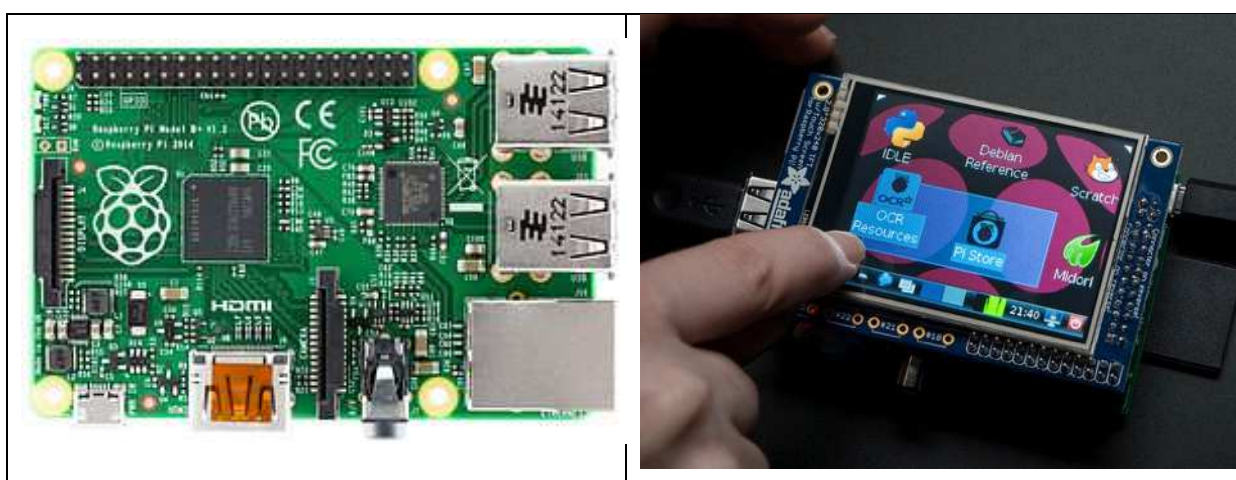


Figura 4.67 – Esquerda: Placa Raspberry Pi Model B (Raspi). Direita: Interface Gráfica de toque compatível com a Raspi

4.4.2.2.2 Sistema de Alimentação

Como se trata de um dispositivo idealizado para ser móvel, o mesmo deve trabalhar com alimentação tanto por Fonte de Alimentação Externa - FAE (rede elétrica), quanto com a Fonte de Alimentação por Bateria (FAB). O dispositivo deve apresentar capacidade de carga da bateria no próprio equipamento. A troca de uma fonte de alimentação por outra deve ser automática sem interromper o uso do equipamento.

A Fonte de Alimentação Externa deve ser bivolt automática (100 -240V @ 50 - 60Hz, apresentar baixa geração de EMI por meio de filtros internos de entrada, e para facilitar a integração da FAE com a FAB, opta-se por definir uma SMPS com voltagem de saída de 12V e capacidade de até 1A de corrente.

Diversos fabricantes nacionais e internacionais fornecem módulos OEM - Original Equipment Manufacturer - de SMPS com as características requisitadas. O módulo em questão é apresentado na Figura 4.68.



Figura 4.68 – Módulo OEM SMPS. (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-10 – Dados técnicos da FAE especificada

Parâmetro	Valores nominais
Temperatura de operação	-20°C – 60°C
Voltagem de entrada	85V _{AC} – 265V _{AC}
Corrente de entrada	0.0273(AC110V), 0.014(AC220V)
Voltagem de saída	11.9 – 12.1V
Corrente máxima de saída em regime	0 – 1000mA
Pico de corrente de saída	1300mA
Eficiência	85%
Dimensões	67mm x 31mm x 20mm
Proteção contra curto-circuito na saída	sim
Proteção contra sobre aquecimento	sim
MTBF (25°C, 80% de carga)	16000 horas

A alimentação do sistema por baterias exige as seguintes especificações:

- Grande vida útil em ciclos de carga-descarga e que não sofra do chamado “efeito memória” a curto prazo;
- Máxima redução no peso/volume → alta densidade de carga;
- Grande profundidade de descarga sem considerável degradação da capacidade de carga da bateria;
- Autonomia de uso (tempo sem necessidade de recarga) satisfatória.

Atualmente, a tecnologia de bateria mais utilizada, e que inclui as características citadas seria a baseada em lítio, mais especificamente, a baseada em Polímero de Lítio (LiPo) – como as utilizadas em celulares e aeromodelos. Com base nessa escolha, inicialmente definiu-se a bateria **Radio TX 9xr Safe 2.200mAh 3S 1.5C** (11.1V). A referida bateria é produzida pela empresa *Turnigy Power*

Systems e apresenta diversos fornecedores e representantes no Brasil. A Figura 4.69 ilustra a bateria especificada.



Figura 4.69 – Imagem da Bateria TX 9xr Safe N2200.3S.25C / 2200mAh / 3S1P / 3 Cell / 11.1V - 139g - 100x33x19mm.

É importante observar que o sistema proposto não exige, especificamente, esta bateria para operar corretamente. Qualquer bateria com voltagem de saída na faixa de 9 – 12V e capacidade maior ou igual a 2200 mAh pode ser usada.

Outra ressalva que deve ser feita está relacionada à capacidade da bateria. Cálculos iniciais projetam que a capacidade de 2200 mAh será suficiente para uma operação de até duas horas em qualquer um dos possíveis hardware a serem escolhidos, com a bateria 100% carregada. Tal projeção poderá ser frustrada caso equipamento montado em processamento de dados especificado consuma mais corrente do que o inicialmente previsto. O nível de corrente consumido é função direta do programa a ser escrito para o mesmo e de dispositivos periféricos que possam ser utilizados e não previstos. Existem diversas outras baterias, do mesmo fabricantes com capacidades de até 5000 mAh (modelo N5000.3S.25C).

O conjunto de alimentação proposto (FAE e FAB) deve possuir um sistema interno de carregamento da bateria especificada, além de ser possível ainda carregamento externo. No caso do carregador externo, qualquer produto comercial capaz de carregar baterias LiPo de três células pode ser usado.

Dentre as diversas opções existentes no mercado, optou-se pelo módulo OEM **B3AC 2S/3S** produzido pela empresa *Mistery*. A Figura 4.70 apresenta o módulo OEM e a versão “produto final”, respectivamente. O módulo de carregamento interno deve, principalmente, ser adaptado para a carga da bateria especificada observando os terminais específicos disponibilizados para o processo de carga individualizado das células da FAB.

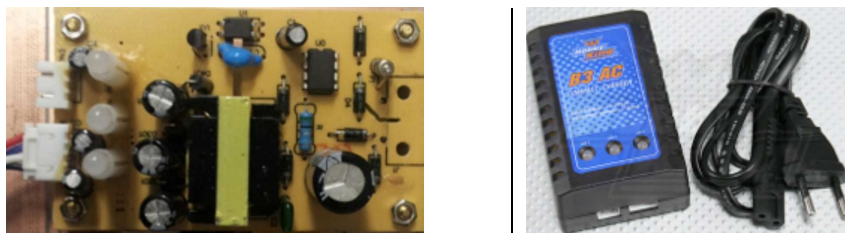


Figura 4.70 – Esquerda: Módulo OEM (Interno). Direita: Carregador externo

O processo de carga de FAB é automatizado e sempre ocorrerá quando o dispositivo for conectado à tomada elétrica. O processo é inteiramente monitorado pelo três LEDs do módulo. Os LEDs permanecem em vermelho durante a carga das células da FAB e tornam-se verdes quando o processo é concluído. Cargas parciais são aceitáveis e não comprometem a vida útil do Banco de Bateria especificado.

Em finalização às fontes de alimentação propostas para o sistema de monitoramento móvel é necessário um módulo compatibilizar a integração das fontes de alimentação, isolamento e auto-troca.

É necessário isolar as saídas da FAB e da FAE para evitar curtos de operação quando o mesmo estiver conectado à tomada. Um relê eletromecânico, é utilizado para realizar o chaveamento da fonte de alimentação em uso. Quanto ligado à rede elétrica (FAE) o sistema deve carregar as baterias da FAB e funcionar pela FAE de 12V. O circuito é mostrado na Figura 4.71.

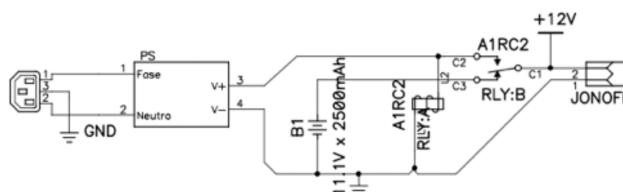


Figura 4.71 – Circuito de Isolamento entre a FAE e FAB proposto para uso na alimentação do sistema portátil.

Os equipamentos comerciais foram então adquiridos, as placas auxiliares projetadas e avaliadas. Desta forma, pôde-se testar os equipamentos para verificar sua aplicabilidade ao projeto.

Apesar de inicialmente parecerem outras boas opções para o desenvolvimento do projeto, cada uma das placas comerciais citadas, e outras não citadas também avaliadas, apresentaram empecilhos que inviabilizaram suas especificações.

Quanto à Microchip MEB, característica importante e que fez parte da escolha da placa de desenvolvimento, é o fato da mesma possuir um *codec* de áudio integrado, ou seja, uma entrada de áudio, que pode facilitar a interface do microfone de eletreto escolhido para o trabalho. Entretanto, ao se verificar as necessidades de processamento de dados, como descrito no Item 4.3, observou-se que o hardware disponível seria insuficiente (pouca quantidade de memória RAM e processador de baixo desempenho frente ao custo computacional do algoritmo sendo um grande volume de dados a serem processados), ou ineficaz na execução do processamento dos sinais sonoros dos processos de soldagem, além de, apresentar certa dificuldade de implementação da interface gráfica.

Já para a placa Raspi, o hardware se apresenta suficiente para o processamento, as bibliotecas de implementação da interface gráfica são satisfatórias, porém, a mesma não apresenta conversores analógico-digitais para a amostragem/aquisição do sinal sonoro nem entrada de áudio, como na MEB. Uma solução seria o acoplamento de conversores discretos à mesma, entretanto a interface de comunicação com tais conversores é ocupada pela comunicação da placa de interface gráfica.

Diversos outros modelos de placas de desenvolvimento foram estudados e cada uma apresentando inviabilidades similares às já citadas, como a plataforma Arduino. Recentemente no mercado foram apresentadas as plataformas Intel Galileo e Edson que apresentam um alto poder de processamento, interfaces de comunicação e recursos, sendo que, em tempo, poderia ter sido objeto de estudo e aplicação visto que à este andamento do trabalho .

Assim, com os problemas de implementação encontrados, partiu-se para a terceira abordagem para a do sistema de monitoramento sonoro – SiMoSS.

4.4.3 Utilização de Hardware e Software Comercial – *Smartphones*

Quando se fala no uso de *Hardware* e *Software* comercial, com o foco no uso de *Smartphones* o desenvolvimento deixa de ser a construção de um aparelho/equipamento e passa a ser o desenvolvimento de um Aplicativo Móvel.

Se por um lado tem-se o benefício do equipamento já ser testado e comprovadamente funcional com seus periféricos, fica-se refém dos mesmos quanto

à disponibilidade e limitação, sejam de hardware ou que são impostas pelo sistema operacional do dispositivo.

Comercialmente o uso de equipamento de cotidianos no desenvolvimento do trabalho pode ser interessante, pois não há a necessidade o usuário (no caso deste trabalho um consultor, especialista de soldagem ou comercial de empresa de equipamentos e insumos de soldagem) adquirir e carregar consigo mais um equipamento eletrônico para o trabalho.

4.4.3.1 Sistema Físico e Interface com Usuário

Como dispositivo para implementação do Sistema de Monitoramento Sonoro de Soldagem (SiMoSS), escolheu-se por trabalhar com a plataforma de dispositivos móveis da Apple Inc., ou seja, sobre os dispositivos iPhones/iPads e sistemas operacionais iOS.

Foi uma escolha arbitrária, por maior afinidade do autor com os dispositivos, mas nada impedia de ser utilizada uma outra plataforma, como a Android ou Windows Phone.

Como dispositivo escolhido, adotou como referência mínima o dispositivo iPhone 4, com iOS 7.1.2, sendo o Aplicativo (App) funcional até as versões atuais de hardware e softwares, iPhone 6 e iOS 8.3. A Figura 4.72 e a Tabela 4-11 mostram o dispositivo e seus principais recursos. Pela tabela de recursos, é possível verificar que o dispositivo apresenta recursos computacionais e periféricos que, são suficientes para a implementação do Aplicativo, agora denominado SiMoSS IVccS.



Figura 4.72 – Apple iPhone 4

Dentre os recursos disponíveis destaca-se a unidade de processamento com 1GHz, 512MB de RAM, tela de alta resolução e interface multi-toque, entrada de áudio por conexão de microfone (além do próprio microfone interno), segundo microfone interno que pode ser utilizado para cancelamento de ruído ambiente (que pode ser muito vantajoso na aquisição do sinal) e bateria de longa duração.

Tabela 4-11 – Recursos disponíveis no dispositivo Apple iPhone 4.

LAUNCH	Announced	2010, June
BODY	Dimensions	115.2 x 58.6 x 9.3 mm (4.54 x 2.31 x 0.37 in)
		- Scratch-resistant glass back panel
DISPLAY	Type	LED-backlit IPS LCD, capacitive touchscreen , 16M colors
	Size	3.5 inches (~54.0% screen-to-body ratio)
	Resolution	640 x 960 pixels (~330 ppi pixel density)
	Multitouch	Yes
	Protection	Corning Gorilla Glass, oleophobic coating
PLATFORM	OS	iOS 4, upgradable to iOS 7.1.2
	Chipset	Apple A4
	CPU	1 GHz Cortex-A8
	GPU	PowerVR SGX535
	Internal	8/16/32 GB, 512 MB RAM
	Loudspeaker	Yes
	3.5mm jack	Yes
COMMS	WLAN	Wi-Fi 802.11 b/g/n, hotspot
	Bluetooth	v2.1, A2DP
	GPS	Yes, with A-GPS
FEATURES	Sensors	Accelerometer, gyro, proximity, compass
		- Active noise cancellation with dedicated mic
BATTERY		Non-removable Li-Po 1420 mAh battery
	Stand-by	Up to 300 h (2G) / Up to 300 h (3G)

O recurso de cancelamento de ruído em tempo real foi proposto no início do trabalho, mas durante a execução do mesmo foi descartado seu uso, por se tratar de área muito específica de acústica, e que demandaria tempo de desenvolvimento não disponível (e um estudo aprofundado em tema fora do escopo do trabalho). Como exemplo de dificuldade de implementação de tal técnica tem-se que o tempo de desenvolvimento de um fone de ouvidos da Nokia, BH-905i, que apresenta tal recurso de cancelamento de ruído é descrito por seus criadores como sendo de muitos anos. Miniman (2010) afirma que o cancelamento de ruído nos dispositivos de celular, como o disponível, funciona para ambientes ruídos, mas que o tempo de processamento para que o cancelamento atue (não sendo imediato, e sim processado em atraso) pode levar alguns segundos. Assim, devido à este atraso e mudando de ambiente para uma área mais quieta, pode aparecer uma voz robótica (o sinal sendo processado de forma errônea, cancelando um ruído não mais existente, e distorcendo assim a informação a ser enviada – a voz). Desta forma, optou-se por desativar o cancelamento de ruído no aplicativo.

4.4.3.2 Implementação e Conclusões

Apesar de ser um dispositivo comercial bem difundido e aceito no mercado, a construção de aplicativos não é uma tarefa trivial, ainda mais quando se leva em conta que o aplicativo é para processamento de sinais, ou seja, um aplicativo de processamento matemático em um hardware que não foi desenvolvido para tal tarefa especificamente.

A vantagem da experiência que se tinha em desenvolvimento com dispositivos embarcados da Microchip (uso da MEB) é perdida com essa implementação, onde tanto o dispositivo quanto as linguagem de programação são desconhecidas. Trata-se de um hardware fechado, e linguagens de programação (Objective C e Swift) orientada à objetos, e não mais procedural como o C.

A implementação da interface gráfica é em termos simplificada, por ser em uma grande Framework da fabricante e ser um ambiente voltado para interação com o usuário. O ambiente de desenvolvimento de software (aplicativos) é o XCode, rico em elementos gráficos. Entretanto, funções de processamento de sinais, manipulações de dados (matrizes e vetores) são inexistentes em tal linguagem,

sendo que a simples média de um vetores de dados deve ser implementada e calculada pelo usuário, o que dificulta bastante o uso da linguagem. Isto não deve ser visto como uma falha das linguagens, apenas não é uma linguagem voltada para processamento matemático como outras específicas, MATLAB por exemplo, onde o mesmo “aplicativo” foi implementado inicialmente.

Uma vez que o algoritmo estava todo implementado e funcionando no MATLAB, passou sua conversão para a linguagem de programação do aplicativo (Swift), tarefa que somente não foi mais complicada pois, como já discutido, optou-se por algoritmos simplificados, baseados em estatísticas para o processamento dos sinais, sendo que o mesmo deveria rodar em sistema embarcado.

O aplicativo, que possui cerca de 2000 linhas de código, além da parte gráfica, envolve todas as etapas do trabalho, com todas as funções necessárias:

- geração de interface gráfica;
- captura do sinal sonoro;
- processamento do sinal sonoro;
- manipulação do banco de dados;
- estimativa do IV_{cc} ; e,
- exibição dos resultados e sugestão ao usuário.

O desenvolvimento, implementação e programação do aplicativo para celular foi suprimida do texto por se considerar que é muito extenso e, não enriquece o texto, visto que pode-se considerar como sendo apenas (mas não simplesmente) a codificação do algoritmo (Item 4.3.3.1) e a sugestão de melhoria do processo de acordo com Item 4.5, passando por todas etapas descritas no Item 4.4.1. A Figura 4.73 exemplifica a interface com o usuário finalizada.

Para mostrar a validade do dispositivo no processamento e determinação do IV_{ccS} , inseriu-se os dados de um dos testes iniciais (teste_01a) no celular (criou-se um vetor de dados e o colocou como um banco de dados de testes) e executou o aplicativo para processar tal sinal, sendo que se espera que os valores calculados via computador e aplicativo sejam estatisticamente próximos, levando em consideração a diferença de precisão computacional dos mesmos. A Tabela 4-12 e Figura 4.74 mostram o resultado desta avaliação para todas as características calculadas, via MATLAB para $U_{cc_{ref}}$ em 10 V, via processamento sonoro pelo

MATLAB e via aplicativo SiMoSS IVccS. Por esses resultados, fica validado o aplicativo desenvolvido.



Figura 4.73 – Interface com o Usuário do SiMoSS IVccS (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-12 – Resultado de processamento comparativo para o teste_01a

	xmin	xmax	IVcc	mtcc	mtaa	dptcc	dptaa	freqcc
Ucc _{ref} 10-MATLAB	5	10	0,87	0,0019	0,0116	0,0007	0,0060	73,60
Som-MATLAB	5	10	0,80	0,0023	0,0128	0,0008	0,0059	66,20
Som-App	5	10	0,80	0,0023	0,0128	0,0008	0,0059	66,20

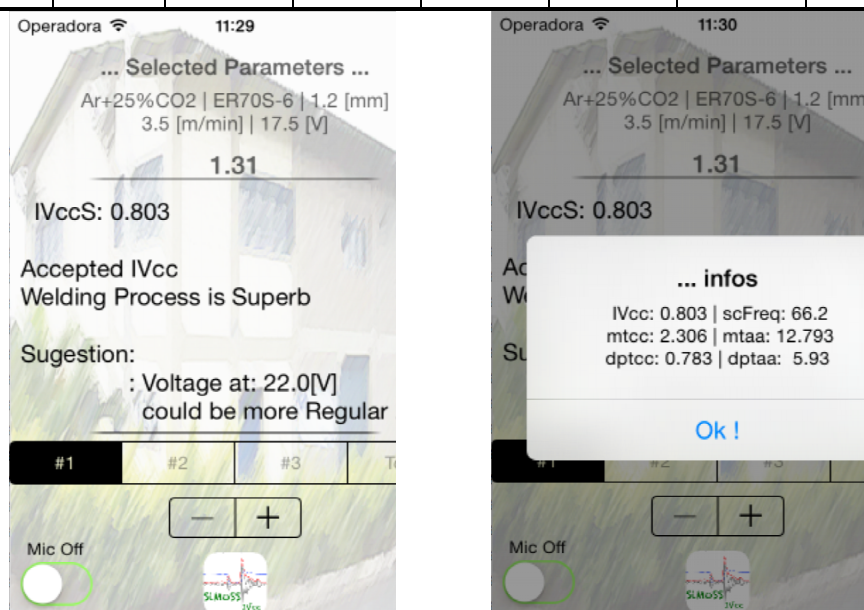


Figura 4.74 – Resultado de avaliação do teste_01a pelo SiMoSS IVccS (Fonte: Próprio autor)

4.5 Etapa E – Processo Decisório

O processo decisório é, basicamente, o conjunto de estratégias para propor ao operador melhorias no processo de soldagem, unicamente pelo ponto de vista do índice de regularidade medido pelo dispositivo de monitoramento sonoro com base nos parâmetros de soldagem do processo. Essa melhoria se traduz na alteração de parâmetros do próprio processo, tais como tensão, velocidade de alimentação, indutância ou mesmo o gás de proteção.

Para que o sistema de monitoramento sonoro (SiMoSS) seja capaz de tomar tal decisão, sem que haja a introdução de algoritmos de aprendizagem (como redes neurais), deve-se disponibilizar a ele uma ampla gama de processos de soldagem conhecidos, fornecendo em detalhes seus parâmetros e regularidade. Assim, com base neste banco de dados, é possível extrair estatisticamente o valor esperado para o Índice de Regularidade ($IV_{cc}Esperado$) para a situação, e buscar um ótimo em situação mais próxima possível à utilizada pelo operador comparando o $IV_{cc}S$ com o IV_{cc} .

Poder-se-ia estender a discussão sobre as possibilidades de algoritmos de aprendizagem nesta etapa, porém resume-se a decisão da inserção do banco de dados e procedimentos estatísticos visto sua maior aplicabilidade e menor tempo de processamento (custo computacional) quando se pretende utilizar sistemas embarcados, se comparados ao desenvolvimento de técnicas inteligentes de tomada de decisão.

4.5.1 Banco de Dados de Soldagem

O levantamento de um banco de dados de processos de soldagem por curto-circuito considerado regulares é uma tarefa árdua e constantemente em desenvolvimento, já que a diversidade de parâmetros e materiais envolvidos é extensa. Portanto, a criação de um banco de dados de soldagem rico e abrangente fugiria ao escopo do trabalho. Sendo assim, a melhor forma de levantamento de um banco de dados é a utilização de trabalhos confiáveis já realizados na área.

Por se tratar de um índice desenvolvido em pesquisa, e por ser relativamente recente, primeiros trabalhos datam do ano de 2010, o número de trabalhos

desenvolvidos que contenham os detalhes necessários para o banco de dados é limitado. Estabeleceu-se o banco de dados inicial através de trabalho de levantamento do mapa operacional para soldagens MIG/MAG na posição plana (Souza, 2010), dentre outros trabalhos – (Fernandes, 2013), (Souza, Rossi *et al.*, 2011b), (Costa, Mota *et al.*, 2014) e (Nascimento, 2015), por se tratar de um banco de dados rico dentro de seus limites paramétricos, listados na Tabela 4-13. Sendo que os diferentes trabalhos podem ser adicionando ao banco de dados, o deixando mais rico em diferentes condições de soldagem.

Tabela 4-13 - Parâmetros utilizados em banco de dados

Gás de Proteção	Corrente [A]	Tensão [V]
Ar + 8% CO ₂ ; Ar + 15% CO ₂ ; Ar + 25% CO ₂	100; 133; 166 e 200	12 – 30

Nota: Soldagem em deposição sobre chapa de aço carbono comum com arame ER70S-6, 1,2 mm de diâmetro para todos os testes. Demais parâmetros como DBPC, velocidade de soldagem e outros melhor descritos no documento de origem. (Fonte: Próprio autor)

O banco de dados totalizou-se 155 testes para as combinações mencionadas. Para cada ensaio de soldagem realizado, também foi calculado o IV_{CC} através do sinal elétrico de tensão adquirido. Todos os resultados e parâmetros de soldagem foram transferidos para uma única tabela, que pode ser vista em sua forma completa no Anexo I – Banco de Dados de Soldagem (item 4.5.1).

4.5.2 Estimativa do IV_{CC}

Com o banco de dados montado deve-se propor técnicas para a estimativa do IV_{CC} para os parâmetros de soldagem do usuário, a saber, gás de proteção, material e diâmetro do arame de adição, velocidade de alimentação e tensão de soldagem. Com estes dados é calculada uma curva de resposta para os valores de IV_{CC} , e assim, determinado o IV_{CC} Esperado para a condição de especificada. A Figura 4.75, Figura 4.76 e Figura 4.77 mostram as curvas de resposta do IV_{CC} dependendo da tensão, para cada conjunto gás, arame e velocidade de alimentação (em função dos valores de corrente de soldagem apresentada na Tabela 4-13) .

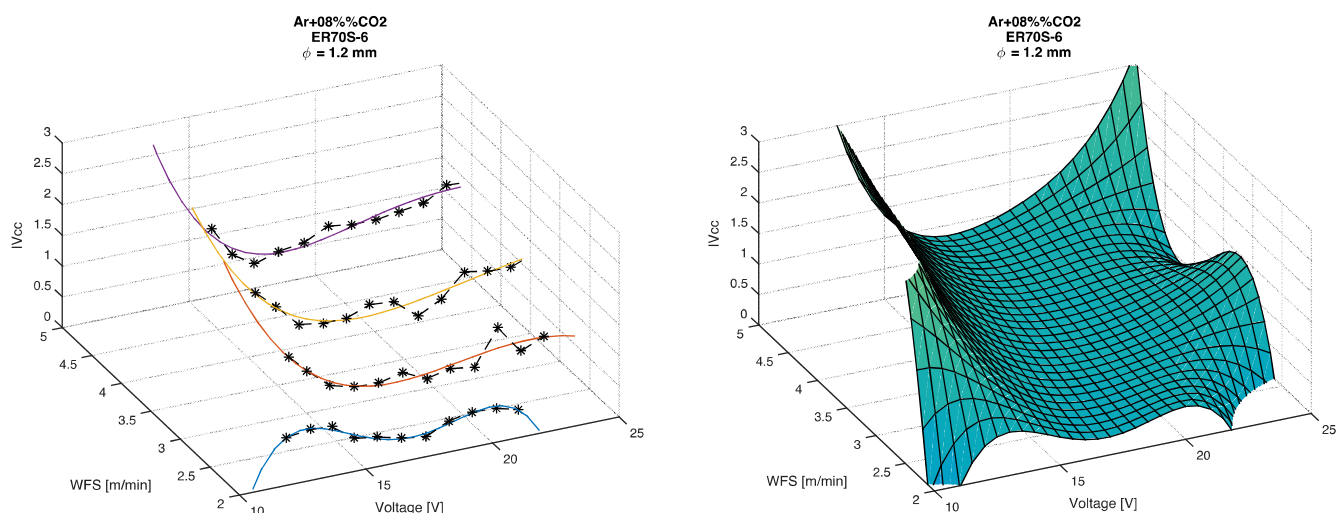


Figura 4.75 – Esquerda: curvas de ajuste da tensão. Direita: superfície de ajuste de resposta tensão velocidade de alimentação para Ar+8%CO₂ e ER70S-6 de 1.2mm (Fonte: Próprio autor)

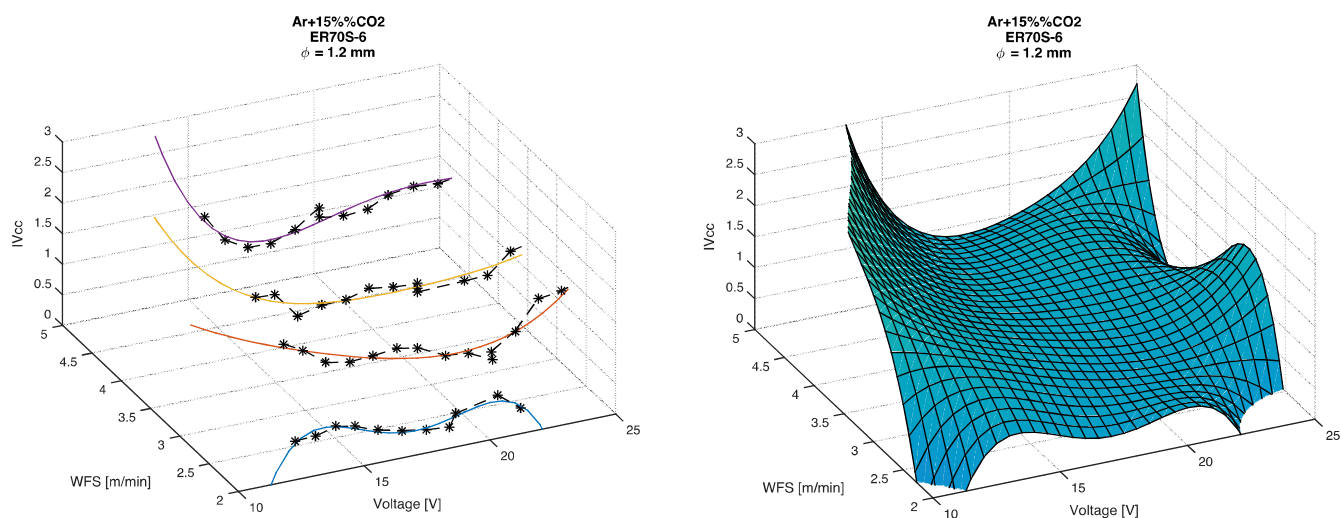


Figura 4.76 – Esquerda: curvas de ajuste da tensão. Direita: superfície de ajuste de resposta tensão velocidade de alimentação para Ar+15%CO₂ e ER70S-6 de 1.2mm (Fonte: Próprio autor)

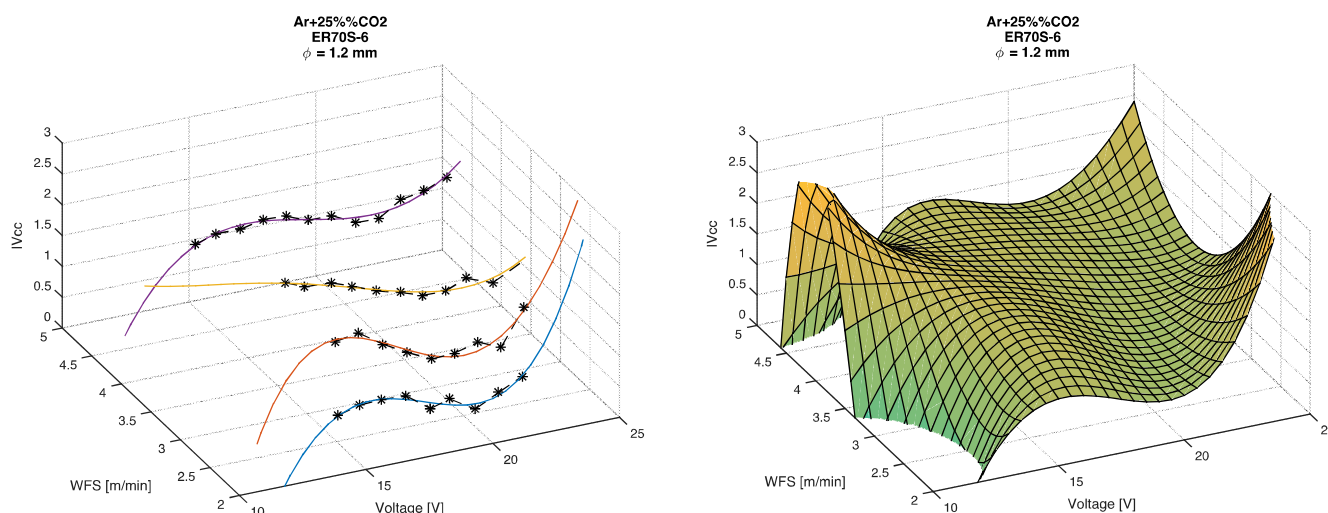


Figura 4.77 – Esquerda: curvas de ajuste da tensão. Direita: superfície de ajuste de resposta tensão velocidade de alimentação para Ar+25%CO₂ e ER70S-6 de 1.2mm (Fonte: Próprio autor)

Primeiramente, realiza-se um ajuste dos pontos³ de Tensão x IVcc. À esquerda nas mencionadas figuras, estão as curvas de ajuste para cada velocidade de alimentação (em cores contínuas) e os pontos originais do banco de dados (em tracejados e marcadores *). Após o ajuste dos dados para a obtenção do IVcc para os valores de tensão, realiza-se a montagem do que se chamou de uma superfície de resposta do IVcc para um conjunto gás, material de adição, em função da tensão e da velocidade de alimentação. Para se encontrar os valores para velocidades de alimentações intermediárias, também foi realizado um ajuste de curvas.

A Figura 4.78 ilustra a estimativa do IVcc de acordo com a entrada de parâmetros. Essa figura mostra as curvas para as velocidades de alimentação do banco de dados ajustadas, e em adição (verde escuro – linha grossa) a curva da velocidade de alimentação informada. A nota de dados sobre o ponto marcado com Δ representa o ponto da tensão com o IVccEsperado estimado pela técnica.

³ É realizado um ajuste de curva (método dos mínimos quadrados) e não uma interpolação entre os pontos por se buscar um modelo que melhor represente ao banco de dados.

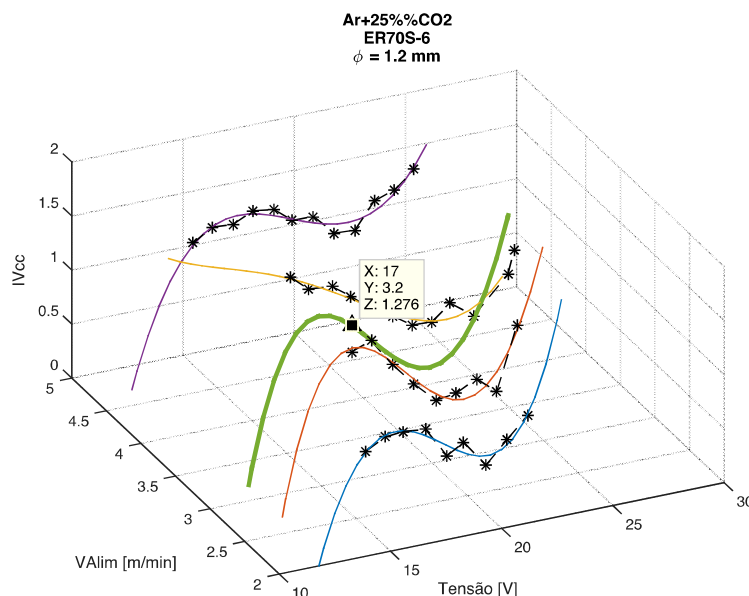


Figura 4.78 – Estimativa de IVcc em 1.276 para Ar+25%CO₂; ER70S-6 de 1.2mm; 3,2 m/min e 17,0 V (Fonte: Próprio autor)

4.5.3 Sugestões de Ajuste de Parâmetros para o Usuário

Realizada a medição do IVccS pelo sistema de monitoramento sonoro e estimada a curva de obtenção do IVccEsperado com base no banco de dados, deve-se realizar a sugestão de melhoria ao usuário com base no parâmetros informados previamente.

Poder-se-ia partir para diferentes abordagens para proposição de melhoria do processo ao usuário, algumas como alteração da tensão, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, regulagem de indutância, gás de proteção, etc. Entretanto, os parâmetros de velocidade de soldagem e velocidade de alimentação estão diretamente ligados as necessidades de produção do processo (quantidade de material adicionado) sendo assim, de difícil sugestão de mudança. O parâmetro de indutância, apesar de extremamente importante para o processo de soldagem por MAG curto-circuito é dependente da fonte de soldagem, e sua alteração envolve maiores problemas e dificuldades técnicas, sendo a melhor avaliação do parâmetro pela variação da corrente pelo tempo ($\frac{dI}{dt}$). O gás de proteção é comumente uma restrição de disponibilidade.

Desta forma, como seria um campo vasto de possibilidade, optou-se neste trabalho por trabalhar com a sugestão somente sobre o parâmetro de tensão. Assim,

a tarefa então é determinar o IVccS para a condição sendo soldada e compará-lo com o IVccEsperado.

Dados obtidos dos experimentos realizados para o processamento de dados, corroborados por autores (Rezende, LiskéVych *et al.*, 2011) e (Silva, Borges *et al.*, 2014) mostram que o IVcc de um processo regular, em aço carbono, se apresenta na faixa de 0,4 até 1,4. Valores inferiores à 0,4 foram observados neste trabalho e por (Costa, 2014) como 0,2, sendo assim considerado um processo extremamente regular, mas não contrariando o critério a ser proposto.

A curva de resposta da Tensão x IVcc para uma dada velocidade de alimentação apresenta, de acordo como já visto, o comportamento exibido na Figura 4.79 e que servirá de auxílio para exemplificação dos critérios aplicados para sugestão de parâmetros, observando que há um ponto de mínimo para a curva de resposta e em seus extremos tendência ao infinito, observável pelo ajuste realizado. No estudo, o interesse está na faixa compreendida no vale da curva de resposta, no intervalo que compreende valores de IVcc menores que 1,4.

A sugestão de melhoria passa então pela consideração se o IVccS medido está nesta faixa e, caso afirmativo, passa para a avaliação e classificação em três casos definidos para proposição de alteração no processo de soldagem, sendo:

- Caso 1: o IVccS é maior que 1,1 vezes do IVcc Esperado. O fator de aceitação de 10% vem da observação que para o mesmo processo regular (Tabela 4-14) as medidas do valor de IVcc apresentam leves flutuações de valores em média menores que 10%, sendo aqui empregado como uma correção. Esta variação de 10% também contempla um erro mínimo de medida do IVccS, conforme Item 4.3.2.2. É classificado também neste caso valores de IVccS maiores que 1,4.
- Caso 2: se o IVccS é menor que 1,1 vezes o valor de IVccEsperado, e maior que 1,1 vezes o valor do IVccMínimo para o conjunto de parâmetros, é classificado neste caso;
- Caso 3: se IVccS já é menor que o valor mínimo, ou menor que 0,4, é classificado neste caso.

Tabela 4-14 – Variações do valor de IV_{cc} para um mesmo processo, calculados com base nos resultados da Tabela 4-23

Teste	1a	2d	3b	4d	5a	6c	7d	8d	9c	10a
Variação	2,7%	2,8%	5,8%	5,9%	5,2%	7,7%	0,0%	3,7%	3,8%	4,4%
Teste	11c	12b	13d	14b	15a	16a	17e	18b	19c	20a
Variações	7,3%	5,6%	3,2%	14,5%	4,6%	8,1%	14,3%	8,6%	1,4%	2,2%

(Fonte: Próprio autor)

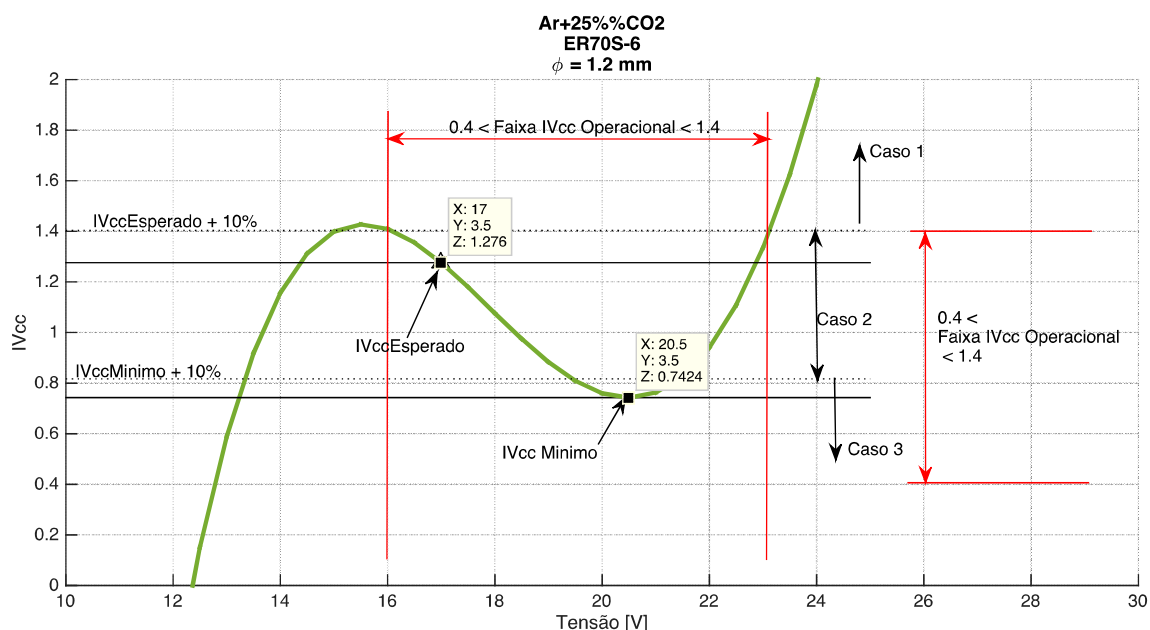


Figura 4.79 – Exemplo de aplicação dos critérios de sugestões do ajuste de parâmetros (baseados unicamente na tensão regulada) (Fonte: Próprio autor)

As respostas e sugestões ao usuário são exemplificados nas Tabela 4-15 e Tabela 4-16. Os valores de IV_{ccS} , estão grifados em vermelho por terem sido manipulados em um mesmo teste para que caísse nos três casos.

Tabela 4-15 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software computacional, de acordo com a configuração dos parâmetros de soldagem

Parametros Seleccionados: GÁS: Ar+25%%CO2 MATERIAL: ER70S-6 TAMANHO ARAME: 1.2 VAlim: 3.5 TENSAO: 21 Resultado Esperado: IVccEsperado: 0.763 IVccMinimo: 0.742 U IVccMinimo: 20.5 =====
Taxa de Amostragem: 25000 S/s Resolução de Tempo: 0.04 ms =====

(Fonte: Próprio autor)

A Figura 4.80 mostra as janelas de respostas exibidas ao usuário no uso do software embarcado do Sistema de Monitoramento Sonoro (SiMoSS). O resultado de processamento foi para um mesmo processo, e para obter as três imagens (cada Caso) alterou-se o que seria os parâmetros de soldagem para se encaixar em cada um dos Casos 1, 2 e 3.

A Figura 4.81 exemplifica a tela de **+i** do programa, que exibe mais informações ao usuário do processamento, como frequência de curto-circuito, media de tempo de arco aberto e de curto-circuito, desvio padrão de tempo de arco aberto e de curto-circuito.

Tabela 4-16 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software computacional, de acordo com classificação do Caso, conforme descrito.

<p>----- Resultados para a Avaliação da Repetição: 1 -----</p> <p>Caso 1 IVccS: 0.855 maior IVccRef: 0.763</p> <p>Verifique a composição do GÁS: Ar+25%%CO2 Verifique o MATERIAL: ER70S-6 Verifique o TAMANHO ARAME: 1.2 Verifique a VALim: 3.5 Verifique a TENSAO: 21 Verifique a DBCP e VSoldagem. Alterando a tensão de: 21 para: 20.5 obtem-se maior Regularidade: 0.742</p> <p>Outras Informações: IVcc: 0.855 FreqCCS: 34.5 tcc: 3.24 ms dptcc: 1.24 ms taa: 25.87 ms dptaa: 12.21 ms</p>	<p>----- Resultados para a Avaliação da Repetição: 2 -----</p> <p>Caso 2 IVccS: 0.824 OK! para 0.763 Para os parametros ajustados de: GÁS : Ar+25%%CO2 MATERIAL: ER70S-6 TAMANHO ARAME: 1.2 VALim: 3.5 Alterando a tensão de: 21 para: 20.5 obtem-se maior Regularidade: 0.742</p> <p>Outras Informações: IVcc: 0.824 FreqCCS: 31.3 tcc: 3.37 ms dptcc: 1.03 ms taa: 28.78 ms dptaa: 10.65 ms</p>
<p>----- Resultados para a Avaliação da Repetição: 3 -----</p> <p>Caso 3 Parametros Seleccionados: GÁS: Ar+25%%CO2 MATERIAL: ER70S-6 TAMANHO ARAME: 1.2 VALim: 3.5 TENSAO: 21</p> <p>Apresentaram Excelente Regularidade !</p> <p>Outras Informações: IVccS: 0.813 FreqCCS: 30.9 tcc: 3.52 ms dptcc: 1.03 ms taa: 28.99 ms dptaa: 11.03 ms</p>	<p>----- Resultados para a Avaliação da Aquisição Completa. -----</p> <p>Caso 3 Parametros Seleccionados: GÁS: Ar+25%%CO2 MATERIAL: ER70S-6 TAMANHO ARAME: 1.2 VALim: 3.5 TENSAO: 21</p> <p>Apresentaram Excelente Regularidade !</p> <p>Outras Informações: IVccS: 0.658 FreqCCS: 31 tcc: 3.47 ms dptcc: 1 ms taa: 28.89 ms dptaa: 10.74 ms</p>

(Fonte: Próprio autor)

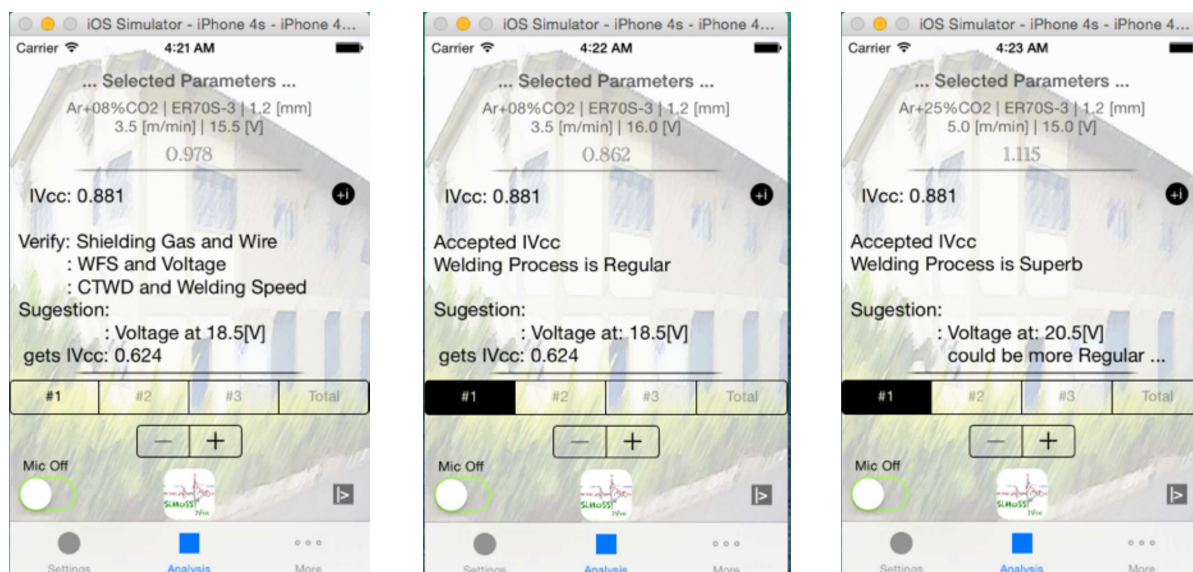


Figura 4.80 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software embarcado, de acordo com classificação do Caso, conforme descrito. (Fonte: Próprio autor)

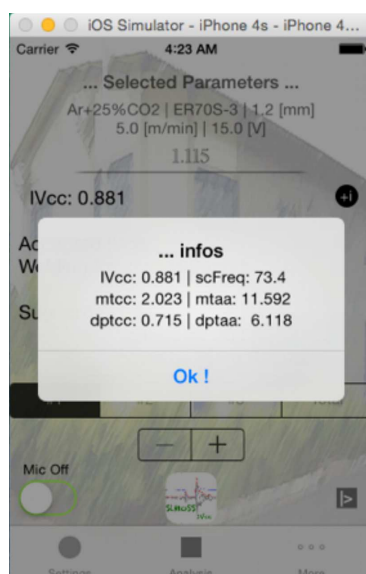


Figura 4.81 – Exemplo de resposta dada ao usuário em software para mais informações sobre as medidas. (Fonte: Próprio autor)

4.1 Etapa F – Validação do SiMoSS

Para a finalização do trabalho, soldagens foram realizadas para a validação da técnica desenvolvida (algoritmo de processamento do sinal sonoro e a

determinação do IVccS), bem como a avaliação do funcionamento do sistema de monitoramento sonoro implementado.

Dos resultados observados no Item 4.2.4, decidiu-se realizar a validação do sistema realizando soldagens para o aço carbono e com arame de 1,2 mm de diâmetro. Os ensaios de validação foram determinados à partir dos testes iniciais, sendo repetições dos testes já realizados, a partir de um planejamento fatorial fracionário apresentado na Tabela 4-17. Adicionalmente, novos ensaios foram realizados em condições intermediárias às selecionadas como repetições, mostradas na Tabela 4-18.

Tabela 4-17 – Repetições de ensaios a serem realizados – Fatorial Fracionário

Teste	Gás de Proteção	Comprimento do Arco [mm]	Corrente Média [A]
03b_a	100%CO ₂	1	160
n3d_a	Ar+25%CO ₂	1	110
02d_a	100%CO ₂	2	110
16a_a	Ar+25%CO ₂	2	160

Nota: Todos ensaios realizados com os mesmos critérios e materiais dos descritos no Item 4.2.4, porém foram conduzidas com a Fonte de Soldagem *IMC Digitec 450*, devido à indisponibilidade da fonte originalmente utilizada. (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-18 – Novos ensaios de soldagem a serem realizados.

Teste	Gás de Proteção	Comprimento do Arco [mm]	Corrente Média [A]
n3_	100%CO ₂	1	120 A
n4_	Ar+25%CO ₂	1	120 A
n7_	100%CO ₂	2	120 A
n8_	Ar+25%CO ₂	2	120 A

Nota: testes realizados com mesmos materiais e métodos das repetições. (Fonte: Próprio autor)

Os ensaios foram realizados e monitorados tanto em sinais de tensão, câmera, corrente, velocidade de alimentação, sinal sonoro (via computador) e, agora, também pelo sistema de monitoramento implementado em hardware específico.

A Tabela 4-19 mostra os resultados do comparativo dos sinais elétricos do ensaios realizados. Verificou-se que as correntes médias dos ensaios de repetição em alguns testes ficaram ligeiramente diferentes, o que foi associado à diferentes indutâncias das fontes. A Figura 4.82 mostra o aspecto dos cordões (85 mm de comprimento) de soldas dos testes de validação.

Tabela 4-19– Resultados dos sinais elétricos para as novas soldas de validação

Teste	Um [V]	Um teste_inicial* [V]	Im [A]	Im teste_inicial* [A]
teste_01_03_n3d	18,8	-	117	-
teste_02_04_n7c	23,0	-	114	-
teste_02d_a	20,3	22,1 (teste_02d)	94	106
teste_03b_a	20,0	22,8 (teste_03b)	152	165
teste_13_15_n4b	15,2	-	122	-
teste_13d_a	12,8	14,6 (teste_13d)	101	108
teste_14_16_n8b	20,2	-	119	-
teste_16a_a	20,4	23,3 (teste_16a)	151	163

*teste_inicial: relativo ao teste realizado de acordo com o planejamento dos testes iniciais da Tabela 4-5. (Fonte: Próprio autor)



Figura 4.82 – Cordões de soldas dos testes de validação (como escala adotar largura da chapa de 25,4 mm – 1”) (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-20– Resultados dos de regularidade para as novas soldas de validação

Teste	IVcc	IVccS	IVcc teste_inicial*	IVccS teste_inicial*	FreqCC (Hz)	FreqCCS (Hz)	FreqCC teste_inicial (Hz)	FreqCCS teste_inicial (Hz)
teste_01_03_n3d	1,043	1,116	-	-	50,4	47	-	-
teste_02_04_n7c	0,8093	1,062	-	-	29,8	25,4	-	-
teste_02d_a	1,1391	1,306	1,132	1,07	42,6	34,5	35,95	33,56
teste_03b_a	0,8784	1,247	1,318	0,97	46,2	35,3	31,02	58,77
teste_13_15_n4b	1,3579	1,044	-	-	55,4	47,9	-	-
teste_13d_a	0,9474	1,099	0,873	0,97	37,6	35,8	64,05	64,3
teste_14_16_n8b	0,9106	0,922	-	-	27,2	28,3	-	-
teste_16a_a	0,4145	0,606	1,316	1,09	37,6	37,4	20,01	18,57

*teste_inicial: relativo ao teste realizado de acordo com o planejamento dos testes iniciais da Tabela 4-5. (Fonte: Próprio autor)

É possível verificar então que com a diminuição da corrente houve uma variação no comportamento das soldagens, sendo mais expressivo a variação nas frequências de curto-circuito. Com as variações do comportamento do processo de soldagem, o índice de regularidade reflete de forma numérica a mudança da

regularidade dos mesmo. Sendo que que forma geral os testes ficaram mais instáveis, ou seja, menos regulares.

Entretanto, ao se verificar a validade do sistema de monitoramento sonoro, o mesmo se apresentou robusto e realizou as medidas das características de frequência de curto-circuito e índice de regularidade de forma satisfatória, dentro do esperado com base nos testes iniciais.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Partindo-se do objetivo principal de estudo e criação de uma metodologia de monitoramento do processo de soldagem MAG curto-circuito pelo som, com o consequente desenvolvimento de um sistema embarcado, portátil e de baixo custo para o monitoramento e avaliação da regularidade do processo e indicar formas de melhoria do mesmo, e seus objetivos específicos, é possível concluir que:

a) Em relação viabilidade do monitoramento sonoro

- O microfone de eletreto é capaz de responder de forma adequada aos impulsos sonoros provenientes da abertura e extinção do arco elétrico;
- Quanto maior a distância do microfone, menores são os impulsos sonoros e, neste trabalho foi determinada uma distância de medição de 400 mm;
- Os resultados iniciais do índice de regularidade através dos sinais elétrico e sonoro (cálculo manual) apresentaram erros relativos entre sinais abaixo de 1,0%;
- É possível concluir que o índice de regularidade obtido pelo monitoramento sonoro é suficientemente próximo ao obtido pelo sinal elétrico;
- Desta forma, o uso do monitoramento sonoro é viável para a determinação do Índice de Regularidade.

b) Em relação ao processamento do som com determinação do IV_{CCS} :

- O algoritmo implementado inicialmente em computador (ambiente MATLAB) para o processamento do sinais sonoros, levando-se em consideração a necessidade de sua adaptação em um dispositivo embarcado, apresentou processamento automático final com erros médios de 13,7%, considerando todos os erros inerentes à medida, como a resolução de tempo (9,25% em curtos de 2,0 ms) e erros de cálculos de números de pequenas grandezas;

- Assim, é possível afirmar que o algoritmo de determinação do IV_{CCS} , mesmo com sua simplicidade de técnicas matemáticas, é capaz de realizar o processamento dos sinais sonoros satisfatoriamente.

c) *Em relação ao processo decisório:*

- O banco de dados com base em resultados obtidos por outros autores para soldagens MAG curto-circuito em aço carbono foi adequado para o desenvolvimento do aplicativo;
- O ajuste de curvas do banco de dados criando uma superfície de resposta do IV_{CC} para soldagens com as mesmas características de consumíveis e parâmetros (gás de proteção, material e diâmetro do arame de adição) foi adequado para a interpolação de valores, que porventura sejam requeridos pelo usuário do aplicativo;
- Ao final, a sugestão de melhoria do processo é feita com base na curva de IV_{CC} da velocidade de alimentação correspondente ao processo do usuário, sugerindo alteração do valor de tensão, se necessário, para obter uma maior regularidade.

d) *Em relação ao desenvolvimento de um sistema portátil:*

- Por se tratar de um dispositivo com alto poder de processamento aliado a uma IHM de fácil implementação com maior complexidade, assim como possuir um *hardware* totalmente desenvolvido e testado, optou-se pelo uso de *smartphone* (iPhone) para o sistema portátil a frente à desenvolvimento de *hardware* próprio;
- O sistema portátil desenvolvido (aplicativo do *smartphone*) apresentou resultados iguais ao implementado em computador quando se analisa um mesmo sinal;
- Para as soldagens de validação do equipamento, os resultados foram similares ao monitoramento do sinal elétrico e processamento do som pelo computador;
- Conclui-se, por fim, a aplicabilidade e validade da técnica e metodologia criada para a determinação da regularidade do

processo de soldagem MAG curto-circuito, bem como a proposição de melhoria de parâmetros para o mesmo.

- Como os testes de validação foram realizados em fonte de soldagem diferente das realizadas os testes de desenvolvimento, e apresentou resposta correta quanto a análise do sinal sonoro, conclui-se que o sistema é robusto à mudança da fonte de soldagem, podendo ser aplicado para o fim de acompanhamento de processos em geral.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a complexidade de desenvolvimento de um sistema de monitoramento sonoro para soldagens que seja robusto e flexível, e a natureza mutável quando se trata de inovação e de desenvolvimento de um produto final de uso tecnológico, tem-se propostos os seguintes trabalhos futuros para o aprofundamento e otimização dos resultados obtidos nesta tese:

- Aprimorar a topologia de condicionamento de sinais elétricos (tensão, corrente e velocidade de alimentação) da bancada experimental com o uso de filtros de Bessel, melhorando a qualidade e confiabilidade dos sinais;
- Aprimorar a topologia de condicionamento da velocidade de alimentação com o uso de *encoder* de maior resolução e medida direta da velocidade pela frequência de pulsos, calculando ainda o volume de material adicionado;
- Desenvolver um sistema controle de movimentação e de aquisição de sinais elétricos para a bancada experimental independente de *softwares* comerciais (LabVIEW);
- Desenvolver topologia de condicionamento de sinal do microfone com *hardware* específico para adaptação às características específicas do *smartphone* (iPhone);
- Implementar o uso de uma construção de microfone do tipo *shotgun* (direcional) para otimização da aquisição sonora em ambiente com superfícies refletivas e maior ruído de fundo;
- Realizar o estudo da influência da geração de respingos no sinal sonoro, bem como um estudo exploratório mais aprofundado sobre a influência da F_{corte} sobre o sinal sonoro.
- Desenvolver um algoritmo probabilístico e iterativo de segmentação de dados (*Data Clustering*) para agrupamento e detecção dos picos de ignição do arco, como o método K-Means (Jain, 2010);

- Otimizar o algoritmo de detecção de picos: aproveitamento dos resultados na detecção inicial de picos para re-escolha e ordenamento utilizados posteriormente (diminuição do tempo de processamento do sinal);
- Estender o banco de dados em soldagem para: diferentes posições de soldagem, materiais (aço inox, duplex), arames (materiais e bitolas), soldagens de tubulações e curto-circuito forçado (velocidades de alimentação acima de 5 m/min), entre outros.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(BONE), P. V. Microfone (Cápsula) de Eletreto - Para que complicar? , 2013. Disponível em: < <http://www.qsl.net/p/pp5vx/artigos/Microfone-de-Eletreto.pdf> >.

ADOLFSSON, S. et al. On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding. **WELDING RESEARCH SUPPLEMENT**, v. february, p. 59s-74s, February 1999.

ANCONA, A. et al. A sensing torch for on-line monitoring of the gas tungsten arc welding process of steel pipes. **MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 15, n. 1, p. 2412-2418, 19 November 2004.

ARATA, Y. et al. Investigation on Welding Arc Sound (Report I) - Effect of Welding Method and Welding Condition of Welding Arc Sound. **Transactions of Joining and Welding Research Institute**, v. 8, n. 1, p. 25-31, 1979a.

_____. Investigation on Welding Arc Sound (Report II) - Evaluation by Hearing Acuity and Some Characteristics of Arc Sound. **Transactions of Joining and Welding Research Institute**, v. 8, n. 2, p. 33-38, 1979b.

_____. Investigation on Welding Arc Sound (Report III) - Effects of Current Waveforms on TIG Welding Arc Sound. **Transactions of Joining and Welding Research Institute**, v. 8, n. 1, p. 167-172, 1980.

_____. Investigation on Welding Arc Sound (Report IV) - Vibration Analysis of Base Metal During Welding. **Transactions of Joining and Welding Research Institute**, v. 10, n. 1, p. 39-45, 1981.

AWS. **Welding Handbook: Weinding Process**. 8th Ed. 1991. 955 ISBN 0-87171-354-3.

BÁLSAMO, P. S. S. et al. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. **Int. J. for the Joining of Materials**, 2000.

BARTLE, P. THE NATURE OF MONITORING AND EVALUATION: Definition and Purpose. 2010.10.22 2010. Disponível em: < <http://www.scn.org/cmp/modules/mon-wht.htm> >. Acesso em: 7 de março de 2011.

BENNETT, G. J. et al. **DESIGN OF AN ELECTRET BASED MEASUREMENT MICROPHONE** 2010.

CAYO, E. H.; ALFARO, S. C. A. A Non-Intrusive GMA Welding Process Quality Monitoring System Using Acoustic Sensing. **Sensors**, n. 9, p. 7150-7166, 9 September 2009.

COSTA, A. V. **DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE QUEDAS DE TENSÃO EM ARCOS DE SOLDAGEM**. 2003. 210p (tese de Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia

COSTA, T. F. **AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE DO PROCESSO MIG/MAG CURTO-CIRCUITO NA SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO E DUPLEX**. 2014. 208 (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia

COSTA, T. F. et al. **Correlação entre o Aspecto Superficial do Cordão e a Regularidade da Transferência Metálica por Curto-Circuito para a Soldagem MIG/MAG de Aços Inoxidáveis Austenítico e Duplex**. XL CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM (Consolda 2014). São Paulo, SP: 11 p. 2014.

CUDINA, M.; PREZELJ, J.; POLAJNAR, I. USE OF AUDIBLE SOUND FOR ON-LINE MONITORING OF GAS METAL ARC WELDING PROCES. **METALURGIJA**, v. 47, n. 2, p. 81-85, 2008.

CUNHA, A. F. O que são sistemas embarcados? **Saber Eletrônica**, v. 43, n. 414, p. 1-6, Julho 2007.

Dicionário do Aurélio Online. 2011. Disponível em: < <http://www.dicionariodoaurelio.com/Monitorar> >. Acesso em: 9 de março de 2011.

DUTRA, J. C. **Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito**. XV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. São Paulo: 327-347 p. 1989.

DUTRA, J. C.; BAIXO, C. E. I. **Processo MIG/MAG: Metodologia para Determinação de Relações Paramétricas Tensão/Corrente para transferência curto-circuito**. XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. Recife/PE: 265-283 p. 1991.

DUTRA, J. C. et al. **Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito**. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem: 867-888 p. 1995.

DWYER, B. **Design of an Electret based Measurement Microphone**. 2010. 115 Graduate Degree Department of Mechanical & Manufacturing Engineering,

FERNANDES, D. B. **Correlação entre a Regularidade da Transferência Metálica no Modo Curto-Circuito com o Desempenho do Processo para a Soldagem MIG/MAG Posicional**. 2013. 114p (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia

FERNANDES, D. B.; VILARINHO, L. O. **Verificação da Significancia Estatística da tensão de curto-circuito e do tempo de análise no Critério Laprosolda para Regularidade da Transferência Metálica no modo curt-circuito.** Relatório Laprosolda/UFU. 2012. (07/2012)

FILHO, E. B. **Avaliação da Emissão de Fumos do Processo MIG/MAG.** 2015. (Graduação em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

FILHO, F. A. R.; MOREIRA, T. A. A.; BRACARENSE, A. Q. **ACOUSTIC MONITORING OF THE WELDING PROCESS.** 19th International Congress of Mechanical Engineering. Brasília, DF: 9 p. 2007.

FONSECA, A. F.; AVELAR, R. C.; MODENESI, P. J. **Efeito de Variações nas Características de Arames na Soldagem GMAW por Curto-Circuito.** XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. Blumenau/SC: 187-196 p. 1996.

FONSECA, H.; SANTOS, V.; FERREIRA, A. Processamento do som. INESC TEC Centre for Telecommunications and Multimedia (CTM), 2002. Disponível em: < http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/processamento_som.htm >. Acesso em: 08/07/2015.

GRAD, L. et al. Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, p. 555–561, 2004. ISSN 0890-6955/\$.

HENDRICKS. **Hendricks Electret Microphone Assembly:** Pacific Antennas: 5 p. 2013.

ISO3834. **Quality requeriments for fusion welding of metallic materials:** ISO 3834 2005.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. **Pattern Recognition Letters**, v. 31, p. 651–666, 2010.

LEAL, F. S. et al. **ALGORITMO PARA DETECÇÃO DE PICOS DE ONDAS CARACTERÍSTICAS DO ECG.** XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica – CBEB 2014: 4 p. 2014.

MACHADO, M. V. R. **Sistema Embarcado Sem Fio para Monitoramento de Sinais em Soldagem a Arco Elétrico com Abordagem Tecnológica.** 2011. 115 p. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MACHADO, M. V. R. et al. **Topologia de Condicionamento de Sinais para Monitoramento de Processos de Soldagem a Arco.** XXXVII Consolda - Congresso Nacional de Soldagem. Natal - RN: 11 p. 2011.

MADEIRO, J. O. P. D. V. et al. **Algoritmo para Detecção do Complexo QRS e Reconhecimento de Contração Ventricular Prematura em Eletrocardiograma.** IX Congresso Brasileiro de Informática em Saúde: Departamento de Engenharia de Teleinformática (DETI) 2004.

MAGALHÃES, V. A. N. **Simulação Física Por Retificação Da Soldagem De Dutos Com Processo GMAW.** 2012. 151p (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia

MANZ, A. F. Inductance vs slope control for Gas Metal-Arc Power. **Welding Journal**, v. 48, n. 9, p. 6, 1969.

MELLO, C. A. **Processamento Digital de Sinais.** Centro de Informática – UFPE: 335 p. 2015.

MINIMAN, B. iPhone 4 Noise Cancellation Demonstration. 2010. Acesso em: 20/07/2015.

MITA, T.; SAKABE, A.; YOKOO, T. Quatitative estimats of arc stability for CO2 gas shielded arc welding., v. 2, n. 2, p. 8, 1988.

Multimedia Expansion Board User's Guide. INC., M. T.: Microchip Technology Inc. 2012.

NASCIMENTO, L. A. **Avaliação dos Processos GMAW com Transferência por Curto- Circuito Convencional e Controlado (STT) Aplicados na Soldagem Circunferencial Mecanizada.** 2015. 311 (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia

NASCIMENTO, L. A. D. et al. **Projeto e Construção de um Protótipo Didático e Interativo para Estudo da Física do Arco Elétrico Baseado em um Alto-Falante à Arco de Plasma-Dinâmico ("Arco Cantante").** Universidade Federal de Uberlândia. Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem. 2015

NEEDHAM, J. C. What do you mean by current? **The Welding Institute Research Bulletin**, v. 26, n. 8, p. 273-278, August 1985.

OLIVEIRA, A. S. D.; ANDRADE, F. S. D. **Sistemas Embarcados - Hardware e Firmware na Prática** 1a edição. 2006. 315 ISBN 85-365-0105-7.

PAL, K.; BHATTACHARYA, S.; PAL, S. K. Investigation on arc sound and metal transfer modes for on-line monitoring in pulsed gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, p. 1397–1410, 2012. ISSN 0924-0136/\$.

PCB PIEZOTRONICS INC. **Microphone Handbook Test and Measurement Microphones.** NY: PCB PIEZOTRONICS, INC., 2012. 13

PHYSIONET. Computers in Cardiology Challenge. 2006. Disponível em: < <http://physionet.org/challenge/2006/> >.

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BÖLMSJO, G. **Welding robots: technology, systems issues and applications**. London: Springer-Verlag London Limited, 2006. 180 ISBN 1852339535.

PONOMAREV, V. et al. **Arc Welding Process Statistical Analysis: Methodical approaches, analysis conceptions, experiences**. 1 Ed. JOM-Institute, 1997. 158 ISBN 87-89582-05-5.

REZENDE, G. M. C. D. et al. Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. **Soldagem & Inspecao**, v. 16, n. 2, p. 6, 2011.

RIFFEL, G. **Desenvolvimento de um Sistema para Medição e Avaliação da Atenuação dos Protetores Auditivos: Estudo de Caso Comparativo em Laboratório e em Campo**. 2001. 229 Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina

ROGAL, S. R. R. **Deteccção Automática de Arritmias Cardíacas Utilizando Redes Neurais Artificiais Auto-Organizáveis**. 2008. 89 Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Informática, Pontifícia Universidade Católica do Paraná

SAAD, E.; WANG, H.; KOVACEVIC, R. Classification of molten pool modes in variable polarity plasma arc welding based on acoustic signature. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 174, p. 127–136, 2006.

SAADE, D. B. C. M. **Fundamentos de Sistemas Multimídia**. Departamento de Engenharia de Telecomunicações - UFF, p.90. [20--]

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber, 2008. 284

SILVA, N. D. L. et al. **Desenvolvimento De Uma Plataforma Experimental Para Cálculo Da Regularidade Da Transferência Metálica Em Mig/Mag Por Curto-Circuito**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2014. Uberlândia - MG 2014.

SIQUEIRA, T. A. **DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE DE CONTROLE MÓVEL PARA UTILIZAÇÃO EM CÉLULAS DE SOLDAGEM MIG/MAG**. 2009. (DISSERTAÇÃO DE MESTRADO). Universidade de Brasília

SOBEET, S. B. P. O. E. D. E. T. Comportamento tecnológico das empresas transnacionais em operação no Brasil. **Conjuntura Econômica**, 2000.

SOUZA, D. **LEVANTAMENTO DE MAPAS OPERACIONAIS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA PARA SOLDAGEM MIG/MAG DE AÇO AO CARBONO NA POSIÇÃO PLANA**. 2010. 288 (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia

SOUZA, D. et al. Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito. **Soldagem & Inspecao**, v. 16, n. 1, p. 022-032, Jan/Mar 2011a. ISSN 0104-9224 printed/ISSN 1980-6973 on-line.

_____. Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. **Soldagem & Inspecao**, v. 16, n. 2, p. 114-122, Abr/Jun 2011b. ISSN 0104-9224 printed/ISSN 1980-6973 on-line.

SPADA, A. L. **Microfones – Parte 1, 2, 3 e 4. Artigos Técnicos**: Attack do Brasil: 67 p. 2012a.

_____. **O Ouvido Humano. Artigos Técnicos**: Attack do Brasil: 6 p. 2012b.

SUBAN, M.; TUŠEK, J. Methods for the determination of arc stability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, p. 430–437, 2003. ISSN 0924-0136/\$

TAM, J.; HUISSOON, J. **Developing Psycho-Acoustic Experiments in Gas Metal Arc Welding**. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation. Niagara Falls, Canada: 6 p. 2005.

USHIO, M. **Sensors in Arc Welding**. XVIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. Rio de Janeiro - Brasil: 9 p. 1992.

VALADARES, L. C. ELETROCARDIOGRAMA (ECG): um exame simples que traz grandes informações. 2014. Disponível em: < <http://saudeparamim.com.br/eletrocardiograma-ecg-um-exame-simples-que-traz-grandes-informacoes/> >.

VILARINHO, L. O. Modos Fundamentais De Transferência Metálica: Naturais E Controlados. *Revista da Soldagem*. **Soldagem & Inspecao**, 2007.

WANGA, Y.; ZHAOB, P. Noncontact acoustic analysis monitoring of plasma arc welding. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 78, p. 43±47, 2001.

WARINSIRIRUK, E.; POOPAT, B. **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: 3 p. 2006.

WOLF, W. **Computers as Components - Principles of Embedded Computing System Design**. 1st edition. San Francisco: 2001. 688

YAPP, D. Trends in Data Acquisition for Weld Monitoring. **Recent Developments and Future Trends in Welding Technology**, p. 1-13, 3rd and 4th September 2001.

ZHANG, Y. M., Ed. **Real-time weld process monitoring**. Cambridge, p.310ed. 2008.

CAPÍTULO VIII

ANEXOS

Anexo I – Banco de Dados de Soldagem (item 4.5.1)

O banco de dados inserido no programa de avaliação é oriundo do trabalho de (Souza, 2010).

Tabela 4-21 – Dados que compõem o banco de dados do sistema atual.

Fonte Banco Dados	Gás de Proteção	Material do Arame	Diâmetro Arame [mm]	VALim [m/min]	Tensão Média [V]	IVcc
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	12.0	0.724
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	12.9	0.775
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	13.8	0.745
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	14.6	0.485
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	15.6	0.423
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	16.5	0.328
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	17.5	0.262
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	18.4	0.447
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	19.3	0.520
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	20.3	0.493
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.05	21.2	0.400
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	13.7	1.247
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	14.4	0.957
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	15.4	0.634
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	16.3	0.534
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	17.3	0.517
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	18.2	0.606
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	19.2	0.428
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	20.1	0.512
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	21.1	0.452
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	22.0	1.015
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	22.9	0.558
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	2.76	23.8	0.725
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	14.5	1.415
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	15.3	1.117
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	16.2	0.750
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	17.1	0.692
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	18.1	0.695
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	19.0	0.839
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	20.0	0.800
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	20.9	0.492
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	21.8	0.685
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	22.7	1.056
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	23.7	0.985
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	24.6	0.971
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	25.5	1.131
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	26.4	1.201
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	3.65	27.3	1.200
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	15.2	1.455

Fonte Banco Dados	Gás de Proteção	Material do Arame	Diâmetro Arame [mm]	VALim [m/min]	Tensão Média [V]	IVcc
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	16.0	0.959
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	16.9	0.736
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	17.8	0.861
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	18.8	0.918
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	19.8	1.104
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	20.7	1.050
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	21.7	1.048
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	22.6	1.104
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	23.5	1.152
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	24.5	1.373
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	25.4	1.351
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	26.3	1.244
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	27.2	1.187
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	28.1	1.209
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	29.1	1.249
Souza, 2010	Ar+8%CO2	ER70S-6	1.2	4.69	30.0	1.113
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	12.2	0.638
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	13.1	0.649
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	13.9	0.737
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	14.6	0.678
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	15.5	0.539
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	16.5	0.449
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	17.5	0.379
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	18.4	0.346
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	18.6	0.547
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	20.3	0.702
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	21.2	0.411
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	13.7	1.368
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	14.5	1.203
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	15.4	0.920
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	16.3	0.855
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	17.2	0.874
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	18.2	0.915
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	19.0	0.856
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	20.1	0.639
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	21.0	0.596
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	22.0	0.412
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	22.0	0.549
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	22.9	0.803
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	23.8	1.251
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	24.7	1.301
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	2.81	25.6	1.426
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	14.4	1.352
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	15.2	1.338
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	16.1	0.909
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	17.0	1.004
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	18.0	1.017
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	18.9	1.119
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	19.9	1.061
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	20.9	1.033
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	20.8	0.959
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	20.8	0.895
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	22.7	0.922
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	23.7	0.936
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	24.6	1.254
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	26.4	1.421
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	27.3	1.418
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	15.2	1.513

Fonte Banco Dados	Gás de Proteção	Material do Arame	Diâmetro Arame [mm]	VALim [m/min]	Tensão Média [V]	IVcc
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	16.0	1.072
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	16.9	0.871
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	17.8	0.859
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	18.8	1.016
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	19.7	1.286
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	19.7	1.124
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	20.7	1.065
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	21.7	1.097
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	22.5	1.265
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	23.5	1.317
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	24.4	1.274
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	25.4	1.340
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	26.3	1.434
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	27.2	1.269
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	28.1	1.261
Souza, 2010	Ar+15%CO2	ER70S-6	1.2	4.80	29.1	1.515
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	13.9	0.974
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	14.7	1.066
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	15.6	1.084
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	16.6	1.059
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	17.5	0.776
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	18.3	0.868
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	19.3	0.616
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	20.2	0.811
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.00	21.2	0.994
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	15.5	1.395
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	16.3	1.464
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	17.3	1.199
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	18.3	0.982
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	19.2	0.791
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	20.1	0.812
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	21.1	0.909
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	22.0	0.754
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	2.71	22.9	1.329
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	15.5	1.543
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	16.3	1.404
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	17.3	1.383
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	18.2	1.258
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	19.1	1.102
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	20.1	0.994
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	21.0	0.875
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	21.8	0.866
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	22.7	1.005
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	23.7	0.845
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	25.3	1.160
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	3.60	25.5	1.369
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	14.5	1.239
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	15.4	1.350
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	16.3	1.337
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	17.2	1.425
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	18.2	1.396
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	19.0	1.260
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	19.9	1.257
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	20.9	1.063
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	21.8	1.052
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	22.7	1.283
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	23.6	1.350
Souza, 2010	Ar+25%CO2	ER70S-6	1.2	4.70	24.5	1.501

CAPÍTULO IX

APÊNDICES

Neste Capítulo são apresentados dados, imagens, programas e demais informações complementares ao documento, que foram aqui dispostos para uma melhor leitura do texto.

Apêndice I – Comparativo entre Microfones (Item 4.1.2.2.3)

Seguem abaixo as figuras com o comparativos dos dois microfones propostos para uso no trabalho, para diferentes formatos de ondas reproduzidas em alto falantes, sendo senoidal, quadrada, dente de serra, dente de serra invertida e retangular, variando a frequência entre 20 e 10000Hz.

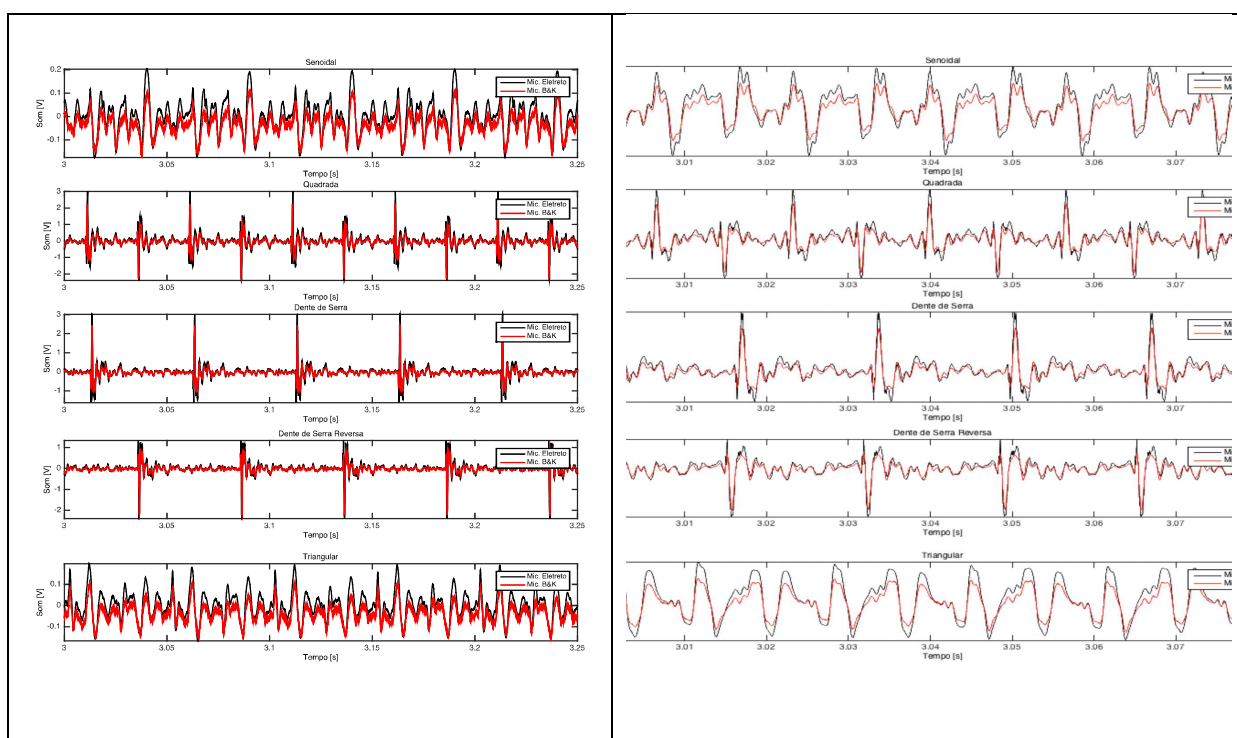


Figura 4.83 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 20 e 60 Hz. (Fonte: Próprio autor)

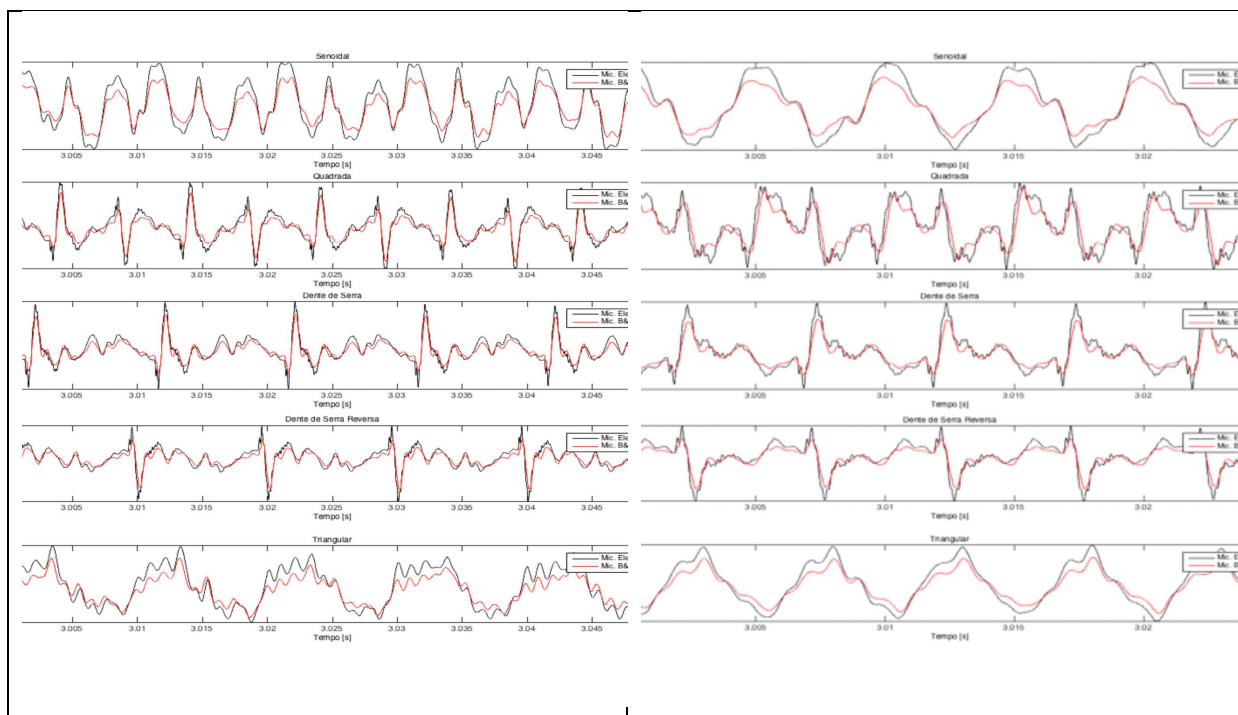


Figura 4.84 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 100 e 200 Hz.
(Fonte: Próprio autor)

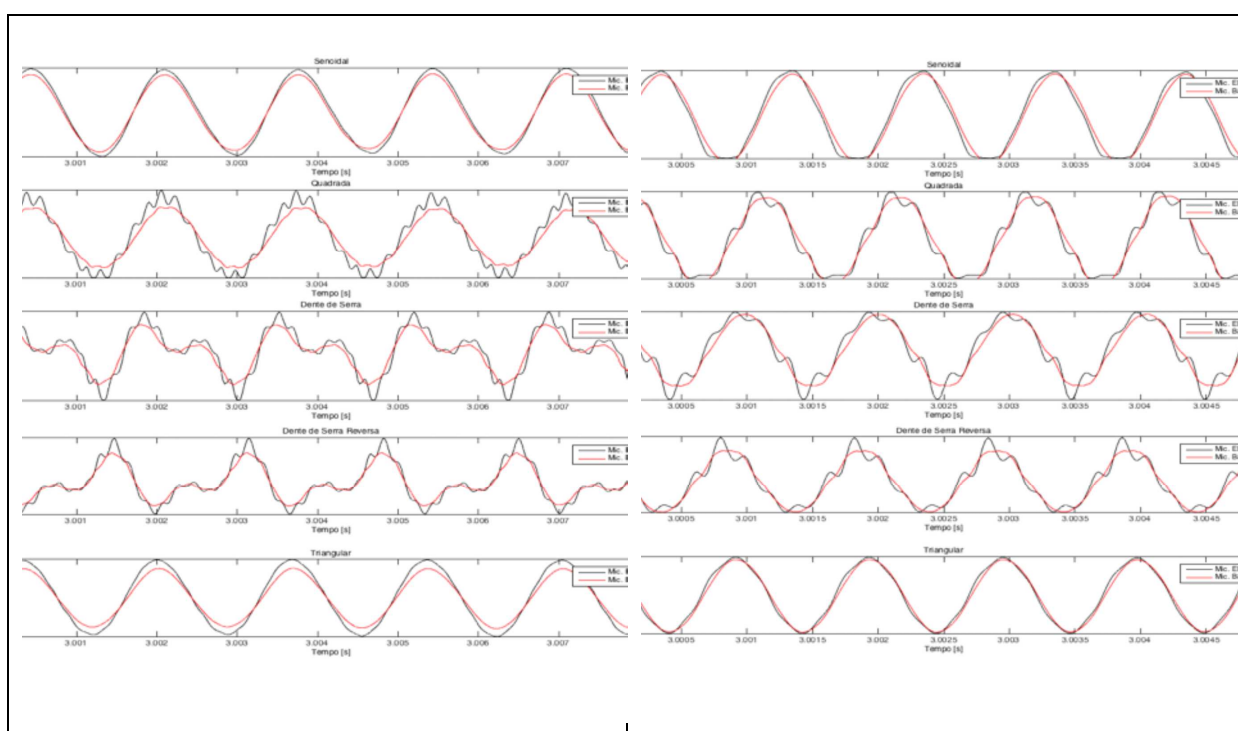


Figura 4.85 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 600 E 1000 Hz.
(Fonte: Próprio autor)

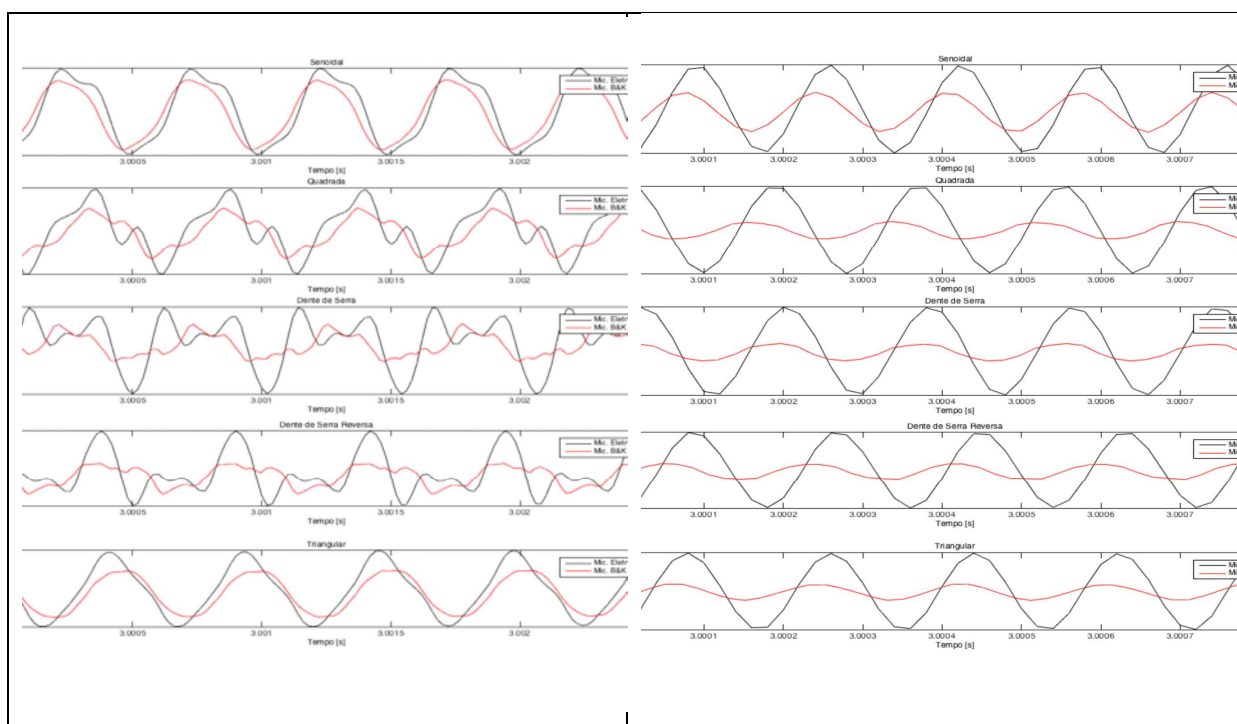


Figura 4.86 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 2000 e 6000 Hz. (Fonte: Próprio autor)

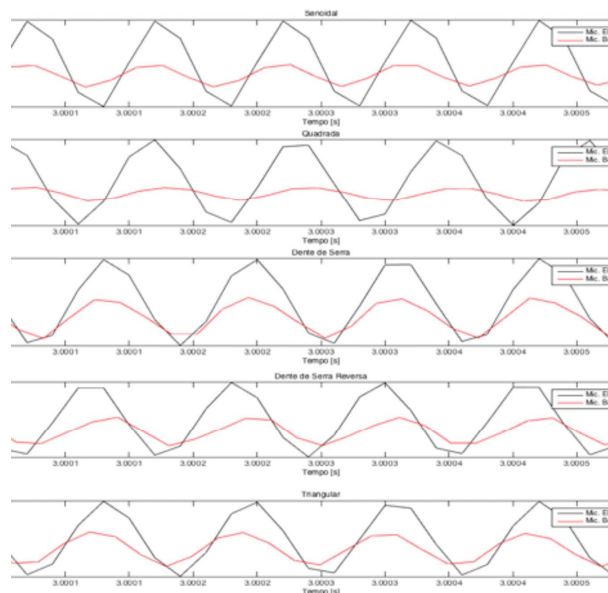


Figura 4.87 – Comparativo dos microfones com forma de onda em 10000 Hz. (Fonte: Próprio autor)

Apêndice II – Estudo da Tensão de Referência para Curto-circuito para Determinação do IV_{cc} pelo Sinal da Tensão (Item 4.2.3)

Diferentes autores utilizam diferentes tensões de referência para identificação e determinação de dos instantes de curto-circuito ($U_{cc_{ref}}$) no processo de soldagem à arco elétrico com transferência metálica por curto-circuito. Valores recorrentemente utilizados e observados foram de $U_{cc_{ref}}$ em 5,0 V e 10,0 V, desta forma decidiu-se realizar um estudo sobre a influência dos parâmetros e consumíveis de soldagem utilizados sobre o sinal de tensão e no valor do IV_{cc} para as soldagens realizadas.

As Figura 4.88, Figura 4.89 e Figura 4.90 mostram a avaliação do valor de $U_{cc_{ref}}$ na obtenção dos instantes de curtos circuitos para diferentes testes realizados de acordo com a Tabela 4-5, sendo que se escolheu apenas os testes com arame de adição de 1,0 mm de diâmetro, observando então a influência do gás de proteção/material eletrodo, corrente de soldagem e comprimento do arco.

Observa-se então que pode haver influência do nível da tensão de referência sobre os valores do IV_{cc} e da frequência de curto-circuito visto que, mesmo considerando que está em curto-circuito há um tensão sobre o contato (a medição da tensão de arco foi realizada entre a chapa e o bico de contato), fato observável pela Lei de Ohm, e que há grandes valores de corrente envolvidos.

Assim, valores baixos de referência podem mascarar instantes de curto dados a tensão de contato ser alta.

Como pode ser observado para soldagens de maiores valores de corrente, maiores percentuais de oxigênio no gás de proteção e maiores comprimentos de arco, o valor de referência em 5,0 V é baixo, medindo de forma errônea tanto as frequências de curto, os tempos de arco e curto-circuito, o que leva a erros no IV_{cc} .

A Tabela 4-22 mostra a avaliação do curto-circuito para $U_{cc_{ref}}$ em 5,0 V e 10,0 V, com erros de até 24,5% na determinação do IV_{cc} e de até 9,9% na detecção de curtos circuito (FreqCC).

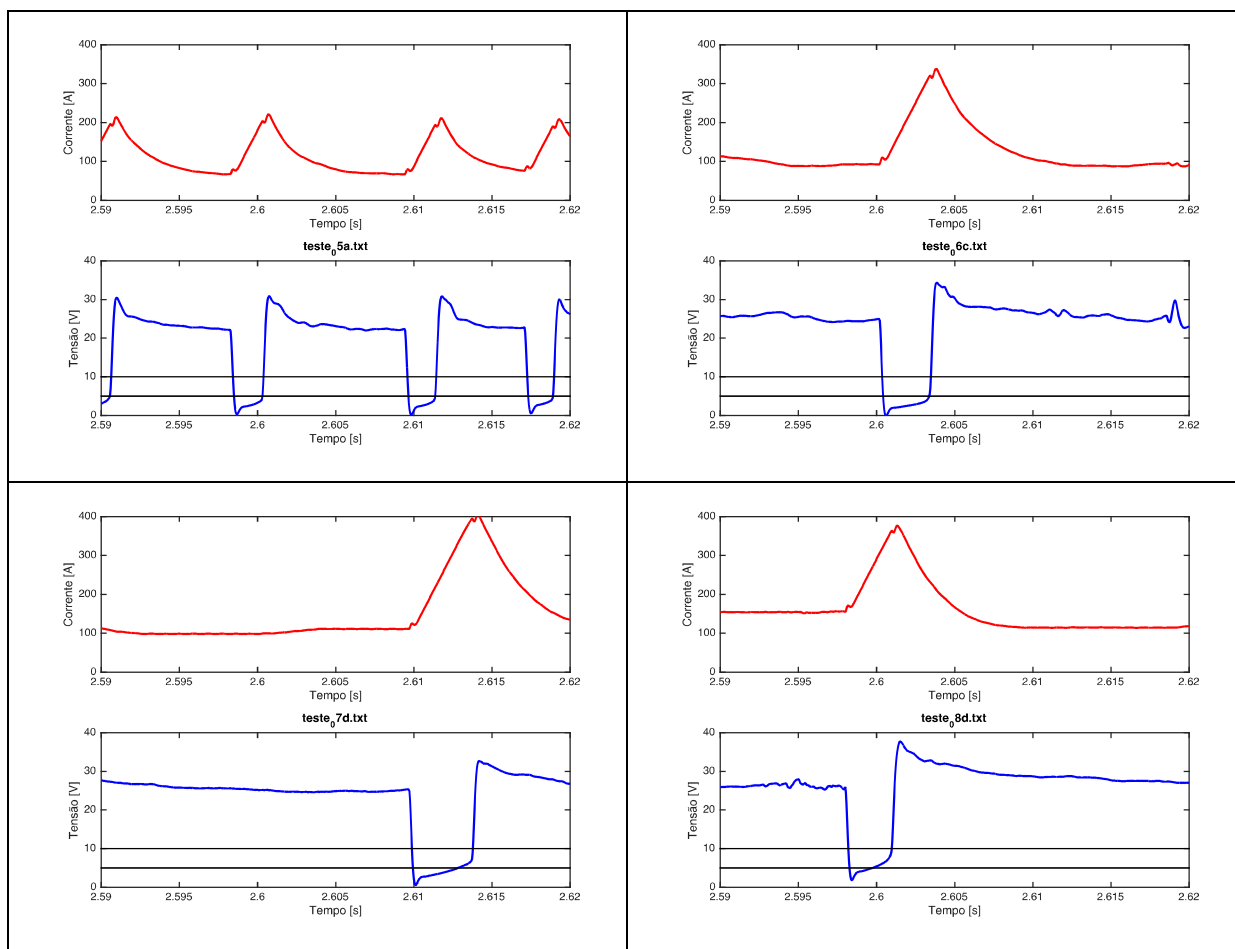


Figura 4.88 – Detalhes da Tensão de Curto das Soldagens com 000%Ar+100%CO₂, ER70S-6 1,0 mm. (Fonte: Próprio autor)

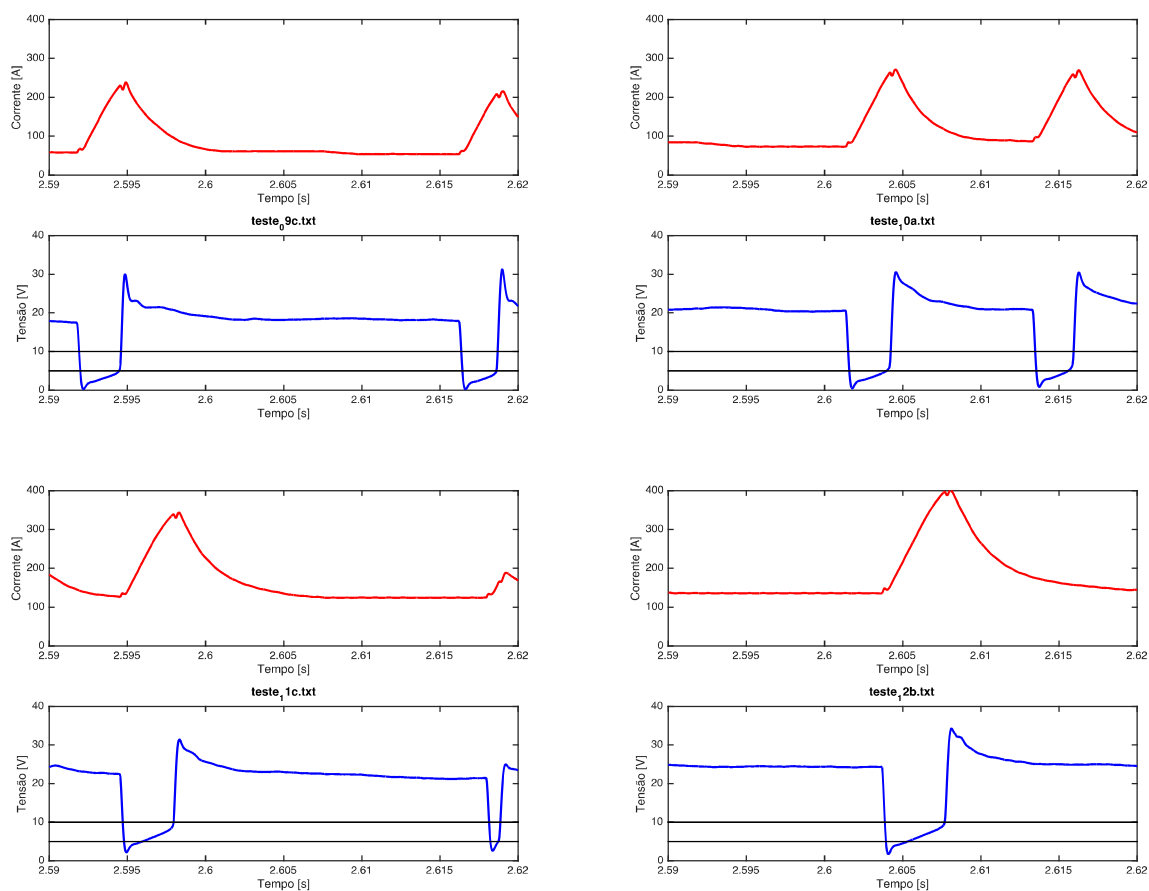


Figura 4.89– Detalhes da Tensão de Curto das Soldagens com 075%Ar+025%CO₂, ER70S-6 1,0 mm. (Fonte: Próprio autor)

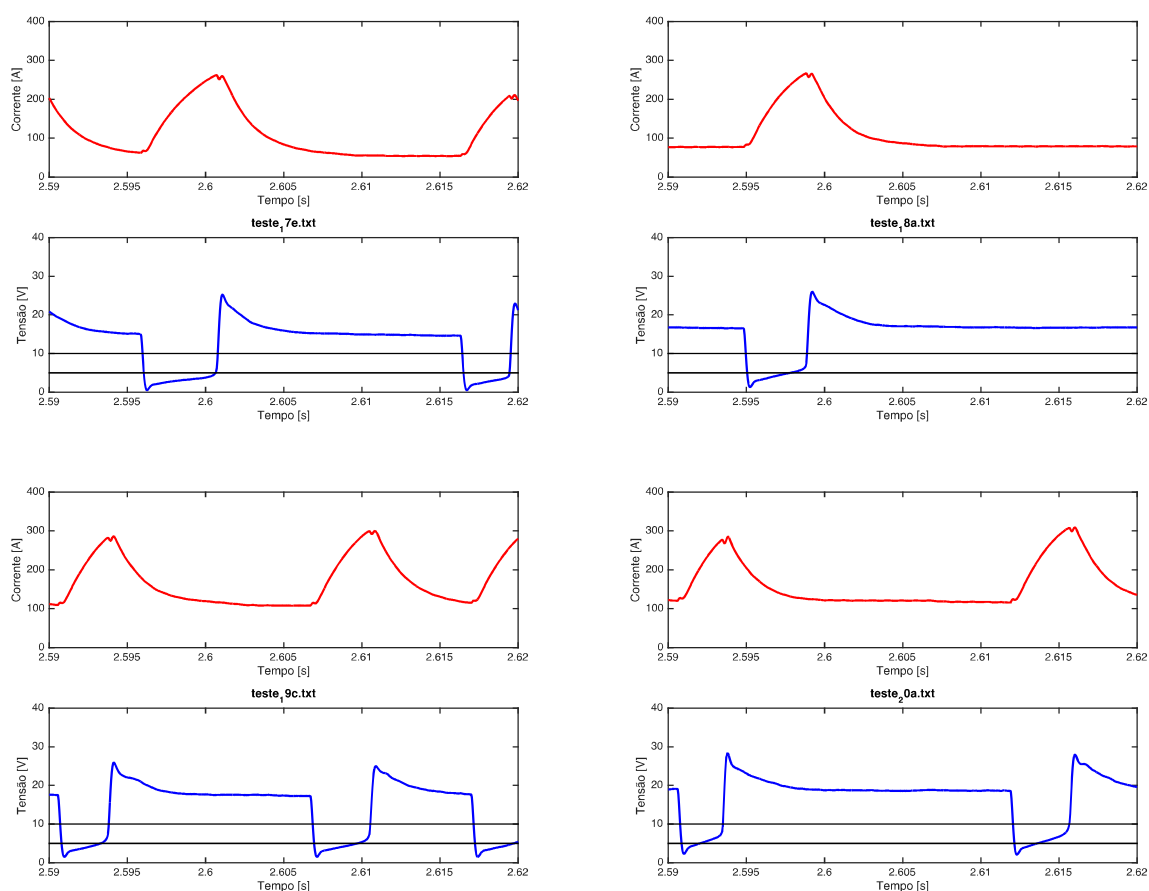


Figura 4.90– Detalhes da Tensão de Curto das Soldagens com 098%Ar+002%O₂, Inox ER308L 1,0 mm. (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-22 – Tabela de avaliação da $U_{cc\text{ref}}$ no IV_{cc} e Frequência de Curto-circuito

Numero Teste	tinic	tfim	IV _{cc} 10V	IV _{cc} 5V	Erro % IV _{cc}	FreqCC 10V	FreqCC 5V	Erro % FreqC C
MAX			1,457	1,353	24,5%	99,600	99,200	9,9%
MIN			0,24	0,21	-1,9%	5,60	5,60	-0,8%
MEDIA					6,3%			2,2%
DESV.PAD					5,9%			2,7%
teste_01a	5	10	0,87	0,88	-0,5%	73,6	73,0	0,8%
	10	15	0,88	0,89	-0,7%	74,8	74,2	0,8%
	15	20	0,91	0,91	0,0%	72,6	72,0	0,8%
	20	25	0,85	0,84	0,5%	74,4	73,4	1,3%
	5	25	0,88	0,88	-0,2%	73,9	73,2	0,9%
teste_02d	5	10	1,08	1,07	0,5%	37,6	37,0	1,6%
	10	15	1,15	1,17	-1,0%	34,2	34,0	0,6%
	15	20	1,14	1,11	1,9%	36,4	35,8	1,6%
	20	25	1,16	1,14	1,6%	35,6	34,8	2,2%
	5	25	1,13	1,12	0,8%	36,0	35,4	1,5%

Numero Teste	tinic	tfim	IVcc 10V	IVcc 5V	Erro % IVcc	FreqCC 10V	FreqCC 5V	Erro % FreqC C
teste_03b	2	7	1,04	1,01	3,3%	58,2	56,2	3,4%
	7	12	1,16	1,09	5,8%	61,2	57,8	5,6%
	12	17	1,02	0,98	3,9%	55,4	53,8	2,9%
	2	17	1,08	1,03	4,5%	58,3	56,0	4,0%
teste_04d	2	7	1,25	1,27	-1,9%	29,4	29,0	1,4%
	7	12	1,43	1,35	5,2%	32,8	30,6	6,7%
	12	17	1,28	1,24	3,0%	31,0	29,6	4,5%
	2	17	1,32	1,29	2,4%	31,1	29,7	4,3%
teste_05a	3	8	0,67	0,66	0,5%	97,8	97,4	0,4%
	8	13	0,70	0,66	5,6%	94,6	93,8	0,8%
	13	18	0,77	0,75	1,9%	99,6	99,2	0,4%
	18	23	0,73	0,72	1,5%	96,8	96,6	0,2%
	3	23	0,72	0,70	2,3%	97,2	96,8	0,5%
teste_06c	3	8	1,00	0,97	3,0%	29,2	28,8	1,4%
	8	13	1,21	1,15	5,0%	30,0	29,0	3,3%
	13	18	1,17	1,10	5,9%	30,0	28,4	5,3%
	18	23	1,22	1,15	6,2%	30,6	29,2	4,6%
	3	23	1,15	1,09	5,2%	30,0	28,9	3,7%
teste_07d	2	7	1,15	1,05	8,9%	46,4	43,8	5,6%
	7	12	1,15	1,07	6,8%	47,4	45,6	3,8%
	2	12	1,15	1,06	7,9%	46,9	44,7	4,7%
teste_08d	2	7	1,17	1,03	11,4%	28,4	26,6	6,3%
	7	12	1,08	0,94	12,8%	23,6	22,2	5,9%
	2	12	1,13	1,00	12,0%	26,0	24,4	6,2%
teste_09c	3	8	0,60	0,59	0,8%	76,8	76,8	0,0%
	8	13	0,64	0,61	3,7%	78,2	78,0	0,3%
	13	18	0,64	0,62	2,5%	76,4	76,4	0,0%
	18	23	0,67	0,64	3,6%	75,6	75,4	0,3%
	3	23	0,64	0,62	2,6%	76,8	76,7	0,1%
teste_10a	3	8	0,54	0,50	7,7%	35,8	35,6	0,6%
	8	13	0,56	0,49	13,2%	36,2	35,8	1,1%
	13	18	0,52	0,52	0,9%	34,6	34,6	0,0%
	18	23	0,50	0,47	6,2%	34,4	34,4	0,0%
	3	23	0,53	0,50	6,2%	35,3	35,2	0,4%
teste_11c	2	7	0,99	0,83	15,8%	49,2	47,0	4,5%
	7	12	1,14	1,00	12,8%	55,6	53,0	4,7%
	2	12	1,07	0,92	14,0%	52,4	50,0	4,6%
teste_12b	2	7	1,30	1,10	15,2%	36,6	33,4	8,7%
	7	12	1,45	1,21	16,5%	42,4	38,2	9,9%
	2	12	1,38	1,17	15,5%	39,5	35,8	9,4%

teste_13d	5	10	0,83	0,83	-0,2%	65,8	65,8	0,0%
	10	15	0,88	0,87	1,0%	65,6	65,4	0,3%
	15	20	0,91	0,90	1,2%	62,6	62,4	0,3%
	20	25	0,87	0,87	-0,2%	62,2	62,2	0,0%
	5	25	0,88	0,87	0,4%	64,1	64,0	0,2%
teste_14b	5	10	0,83	0,84	-0,8%	8,0	8,0	0,0%
	10	15	0,77	0,78	-0,6%	6,4	6,4	0,0%
	15	20	0,61	0,61	-0,4%	5,6	5,6	0,0%
	20	25	0,60	0,60	-0,7%	6,4	6,4	0,0%
	5	25	0,74	0,74	-0,6%	6,6	6,6	0,0%
teste_15a	2	7	0,66	0,64	4,4%	31,0	30,8	0,6%
	7	12	0,61	0,58	5,6%	30,0	29,8	0,7%
	12	17	0,60	0,58	2,0%	29,2	29,2	0,0%
	2	17	0,62	0,60	4,1%	30,1	29,9	0,5%
teste_16a	2	7	1,29	1,17	9,7%	20,2	19,0	5,9%
	7	12	1,46	1,34	8,3%	21,8	20,6	5,5%
	12	17	1,20	1,12	6,7%	18,2	17,4	4,4%
	2	17	1,32	1,21	8,3%	20,1	19,0	5,6%
teste_17e	5	10	1,01	0,91	9,3%	81,2	81,8	-0,7%
	10	15	1,12	1,05	5,7%	85,8	86,2	-0,5%
	15	20	0,79	0,73	7,7%	82,2	82,4	-0,2%
	20	25	0,82	0,76	7,3%	78,2	78,8	-0,8%
	5	25	0,95	0,88	7,4%	81,9	82,4	-0,5%
teste_18a	5	10	0,25	0,22	13,8%	40,2	40,2	0,0%
	10	15	0,24	0,21	12,6%	40,8	40,8	0,0%
	15	20	0,30	0,26	12,3%	39,2	39,2	0,0%
	20	25	0,24	0,21	11,8%	41,0	41,0	0,0%
	5	25	0,26	0,23	11,1%	40,3	40,3	0,0%
teste_19c	2	7	0,50	0,43	15,1%	74,2	73,6	0,8%
	7	12	0,50	0,46	7,3%	71,2	71,4	-0,3%
	12	17	0,51	0,46	11,0%	71,6	71,6	0,0%
	2	17	0,50	0,45	10,2%	72,4	72,2	0,3%
teste_20a	2	7	1,06	0,82	23,2%	55,0	51,4	6,5%
	7	12	1,07	0,81	24,5%	50,6	46,8	7,5%
	12	17	1,02	0,86	16,0%	50,8	48,8	3,9%
	2	17	1,05	0,83	21,4%	52,2	49,0	6,1%

(Fonte: Próprio autor)

Apêndice III – Resultados das Soldagens para Avaliação dos Parâmetros (item 4.2.4)

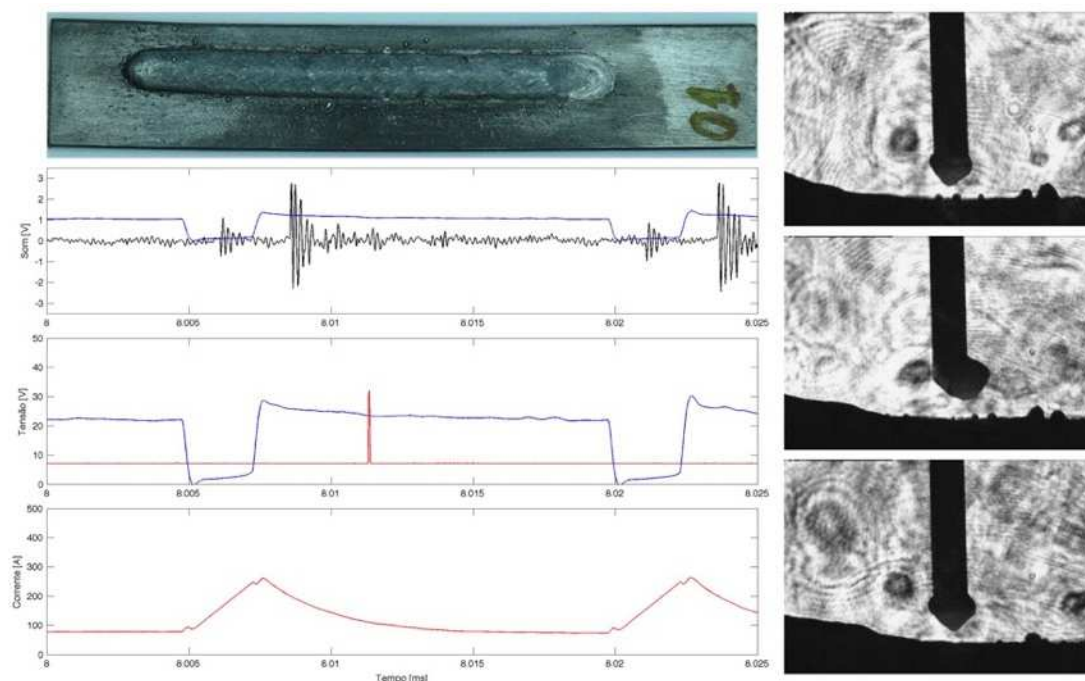


Figura 4.91 – Detalhe dos sinais do teste_01a (Fonte: Próprio autor)

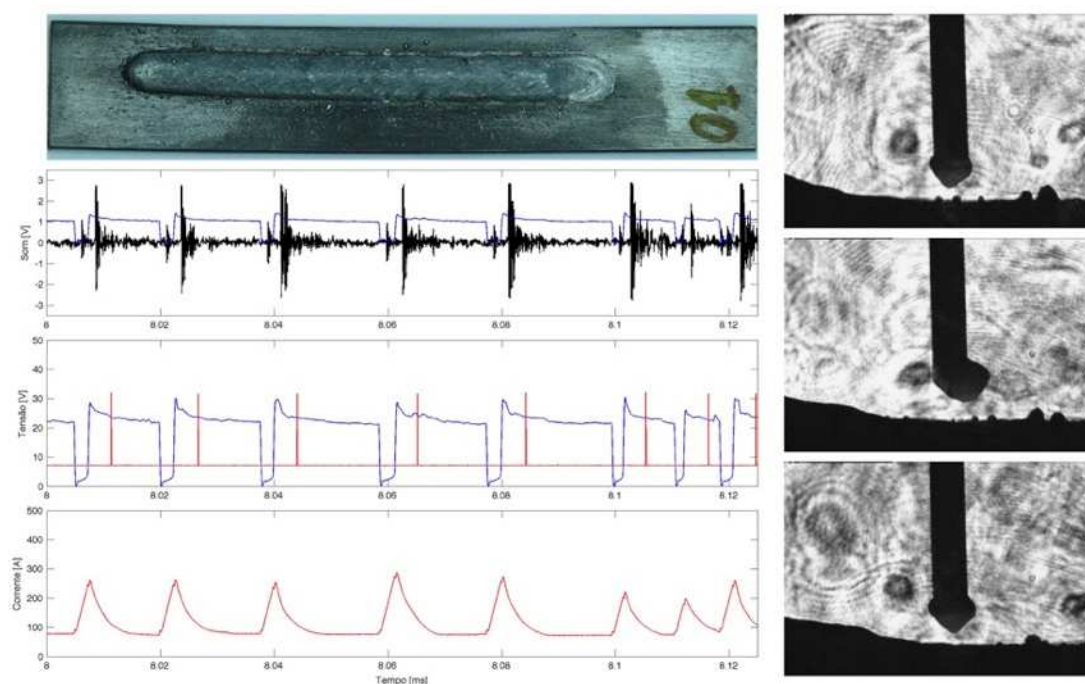


Figura 4.92 – Observação de trecho dos sinais do teste_01a (Fonte: Próprio autor)

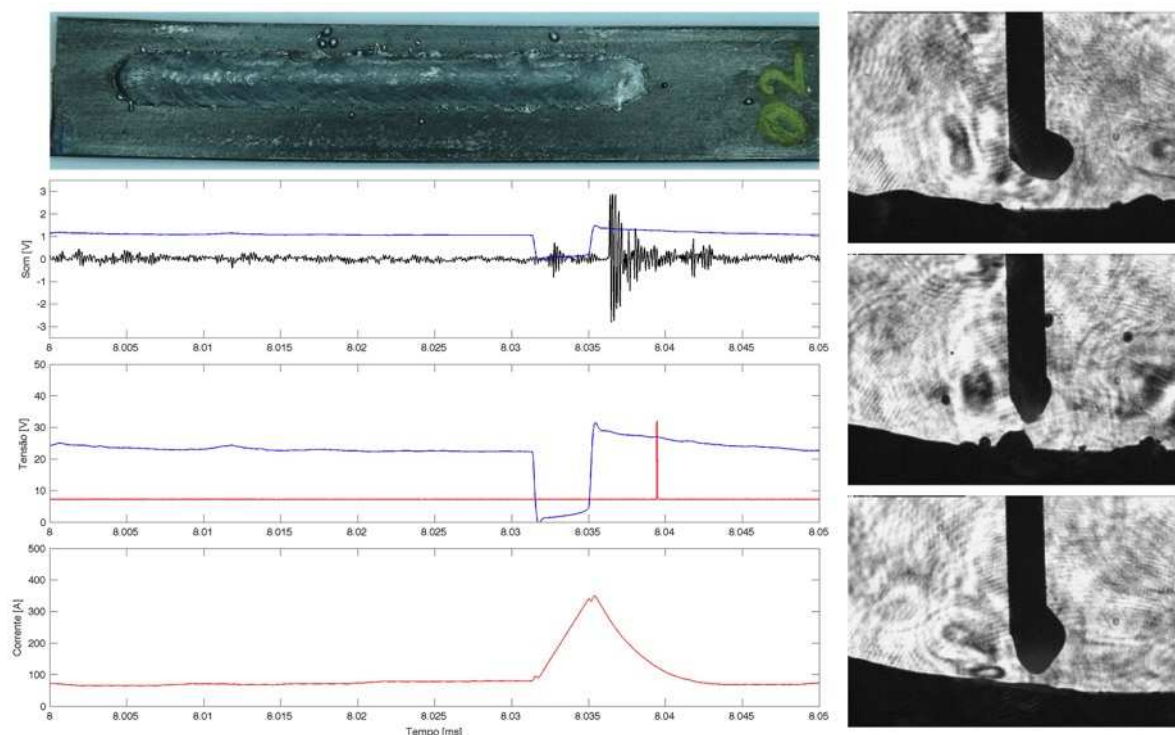


Figura 4.93 – Detalhe dos sinais do teste_02d (Fonte: Próprio autor)

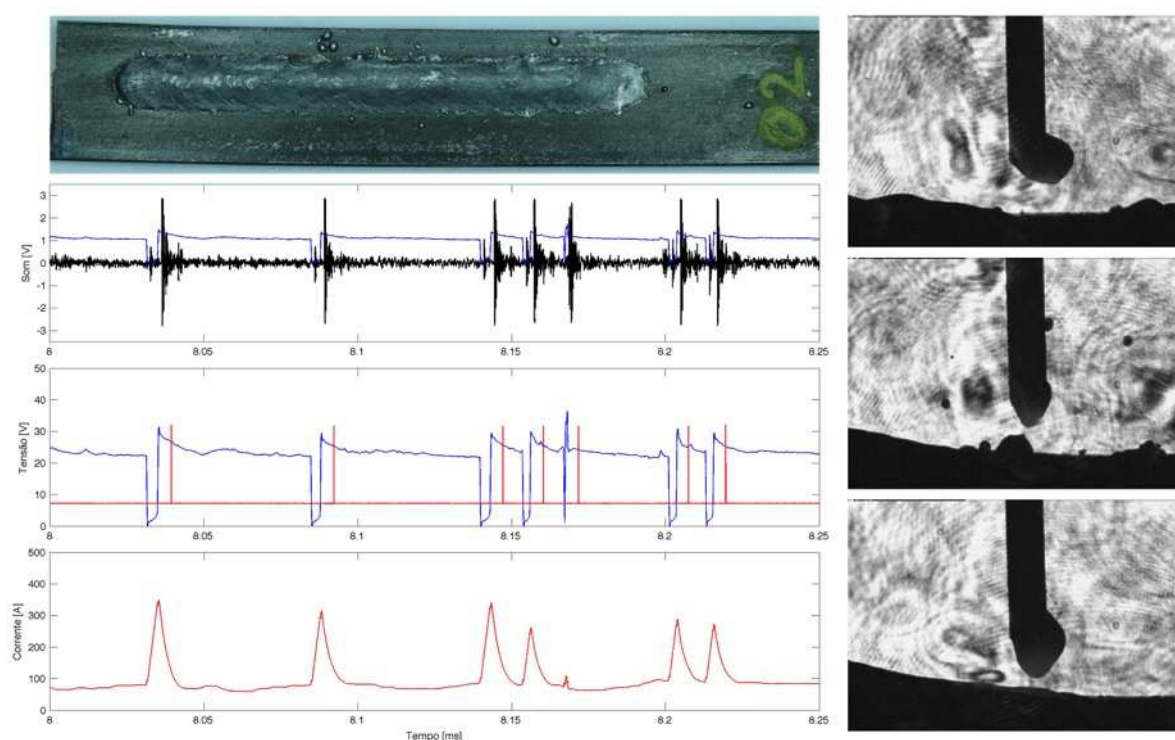


Figura 4.944.95 – Observação de trecho dos sinais do teste_02d (Fonte: Próprio autor)

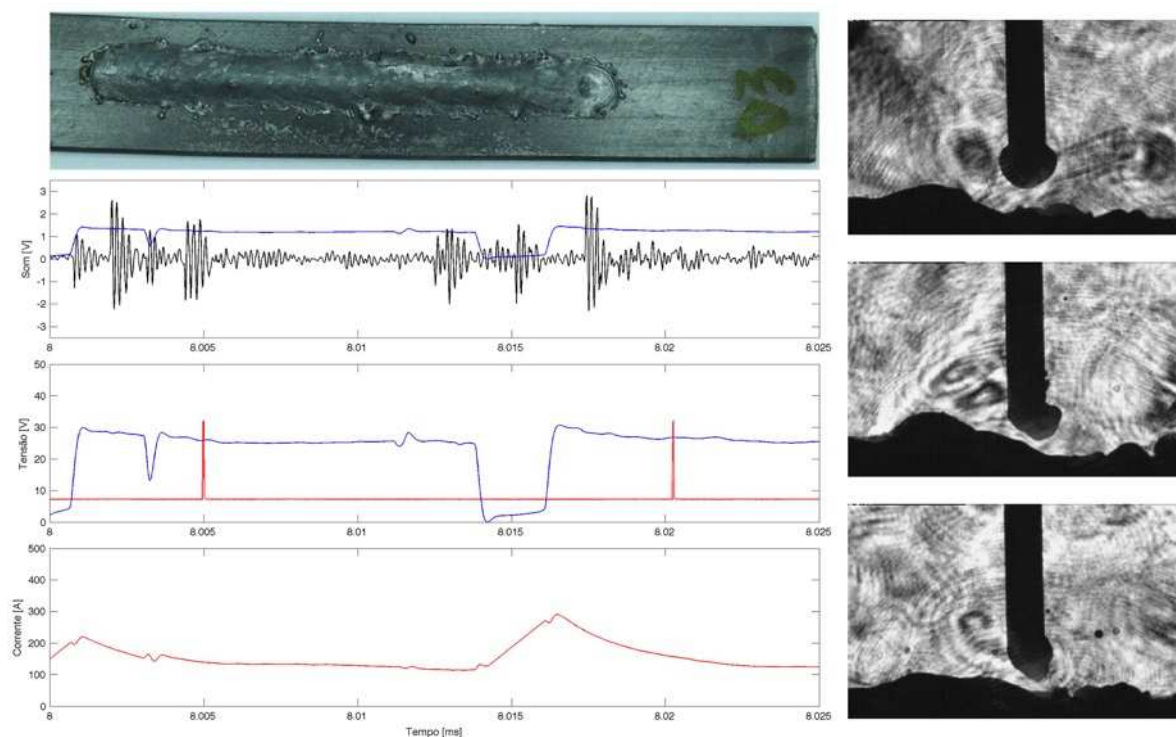


Figura 4.96 – Detalhe dos sinais do teste_03b (Fonte: Próprio autor)

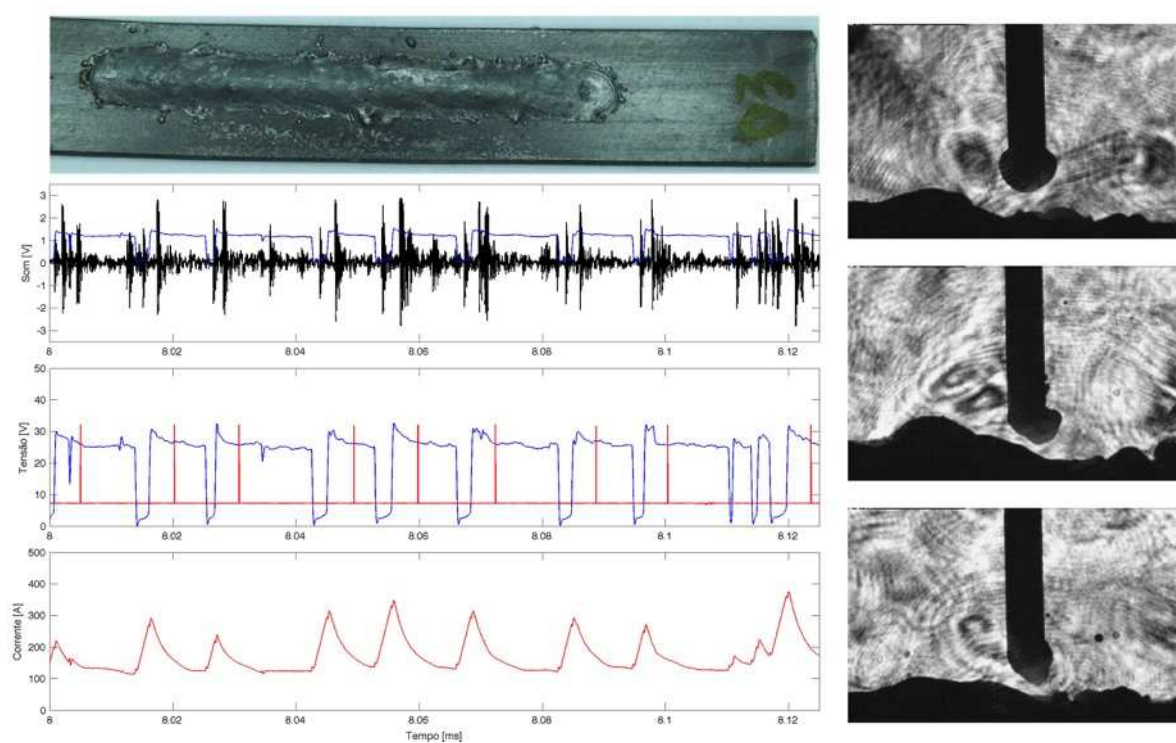


Figura 4.97 – Observação de trecho dos sinais do teste_03b (Fonte: Próprio autor)

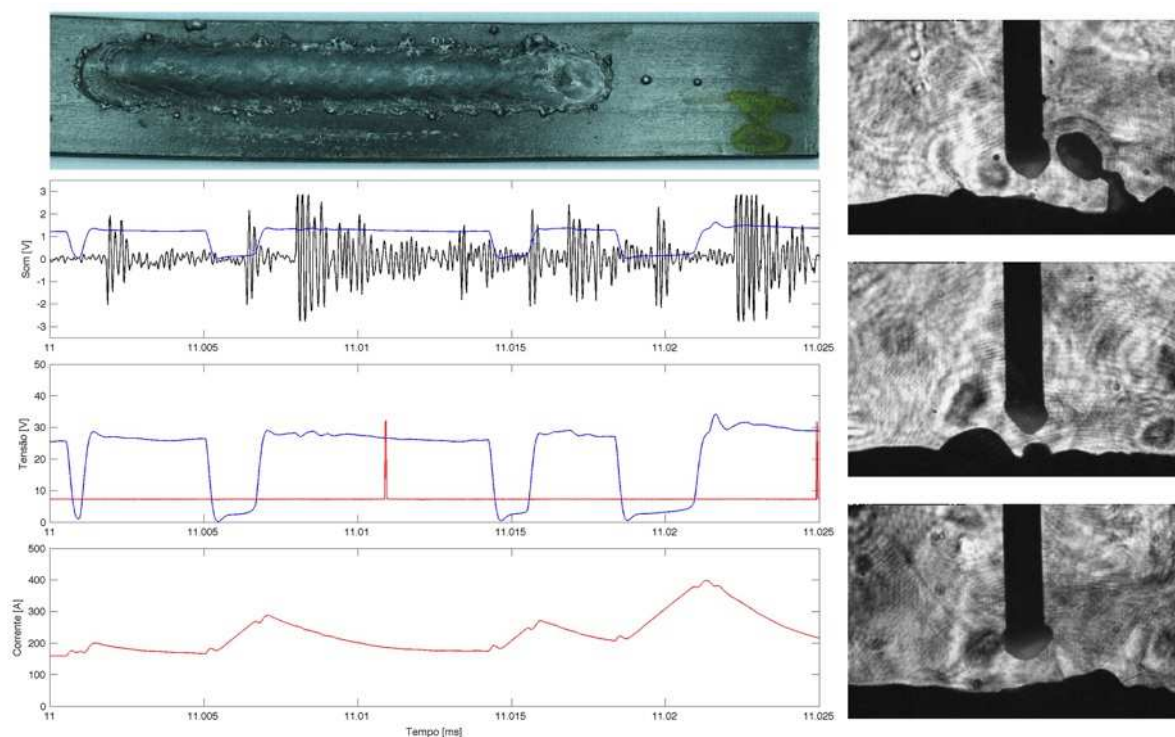


Figura 4.98 – Detalhe dos sinais do teste_04d (Fonte: Próprio autor)

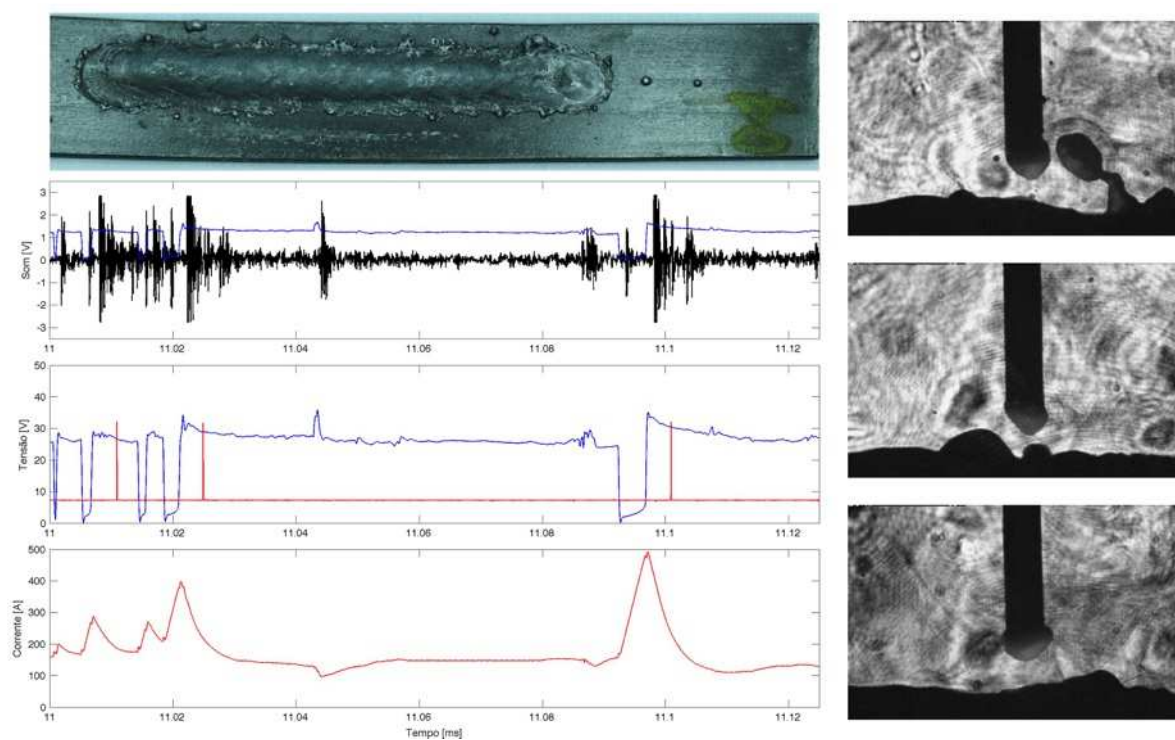


Figura 4.99 – Observação de trecho dos sinais do teste_04d (Fonte: Próprio autor)

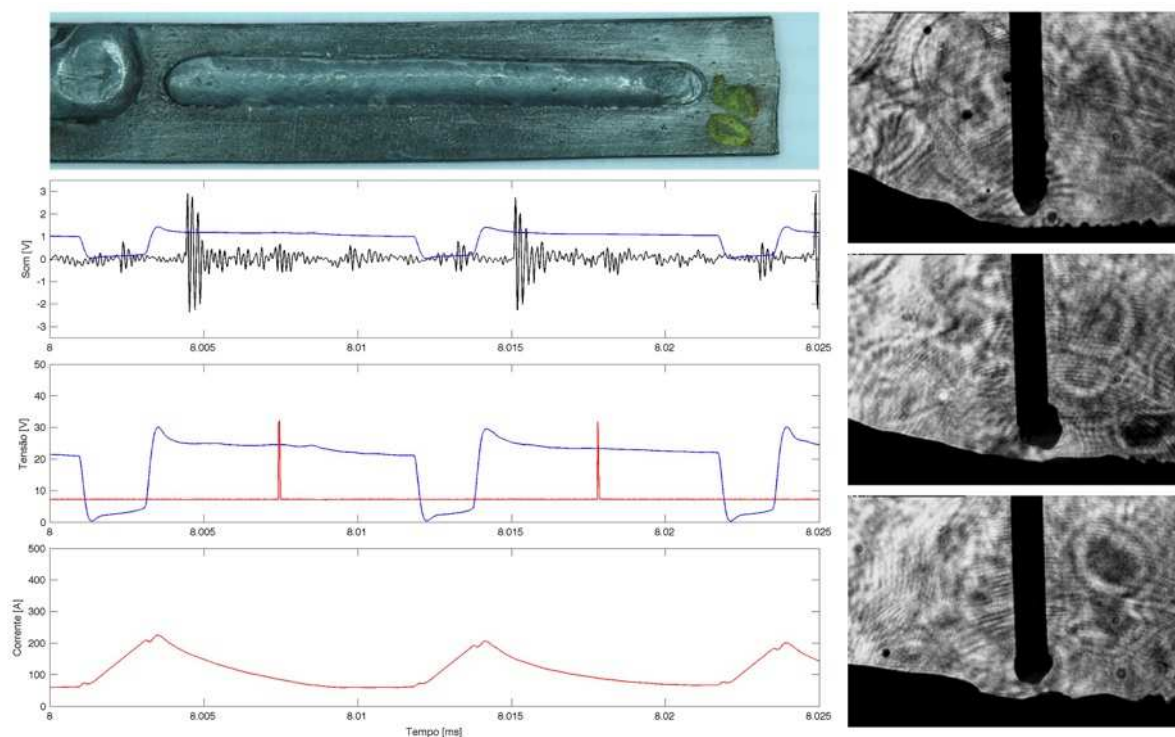


Figura 4.100 – Detalhe dos sinais do teste_05a (Fonte: Próprio autor)

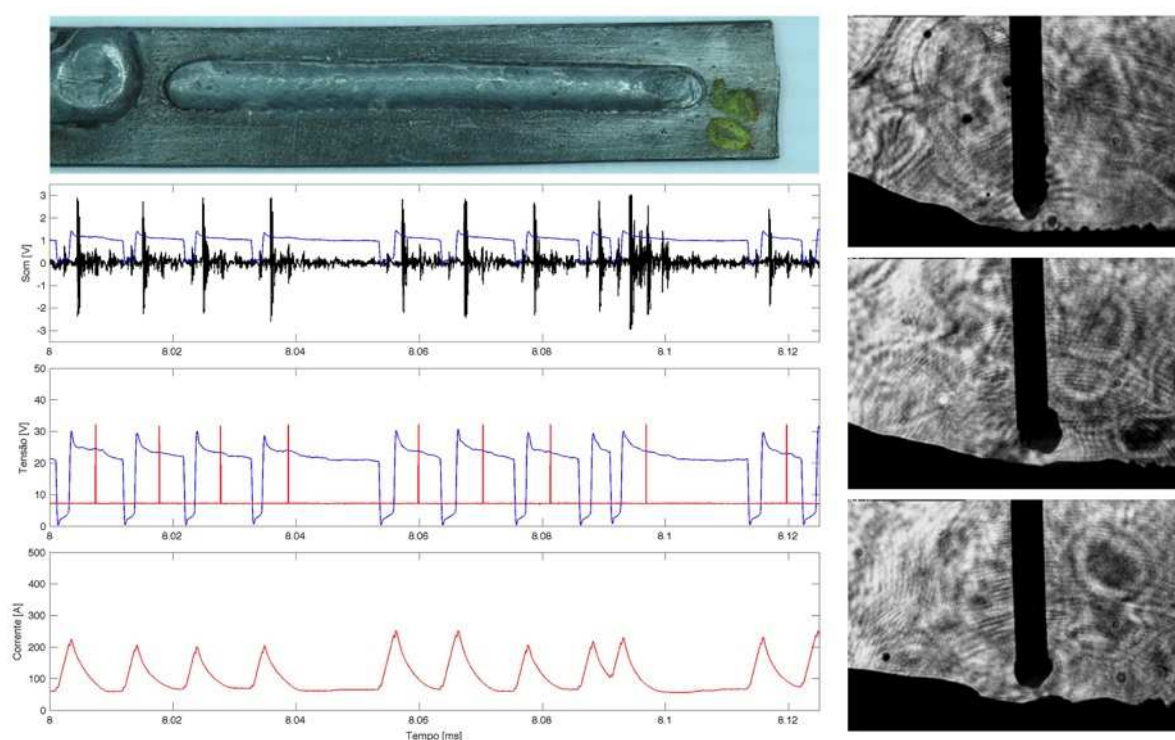


Figura 4.101 – Observação de trecho dos sinais do teste_05a (Fonte: Próprio autor)

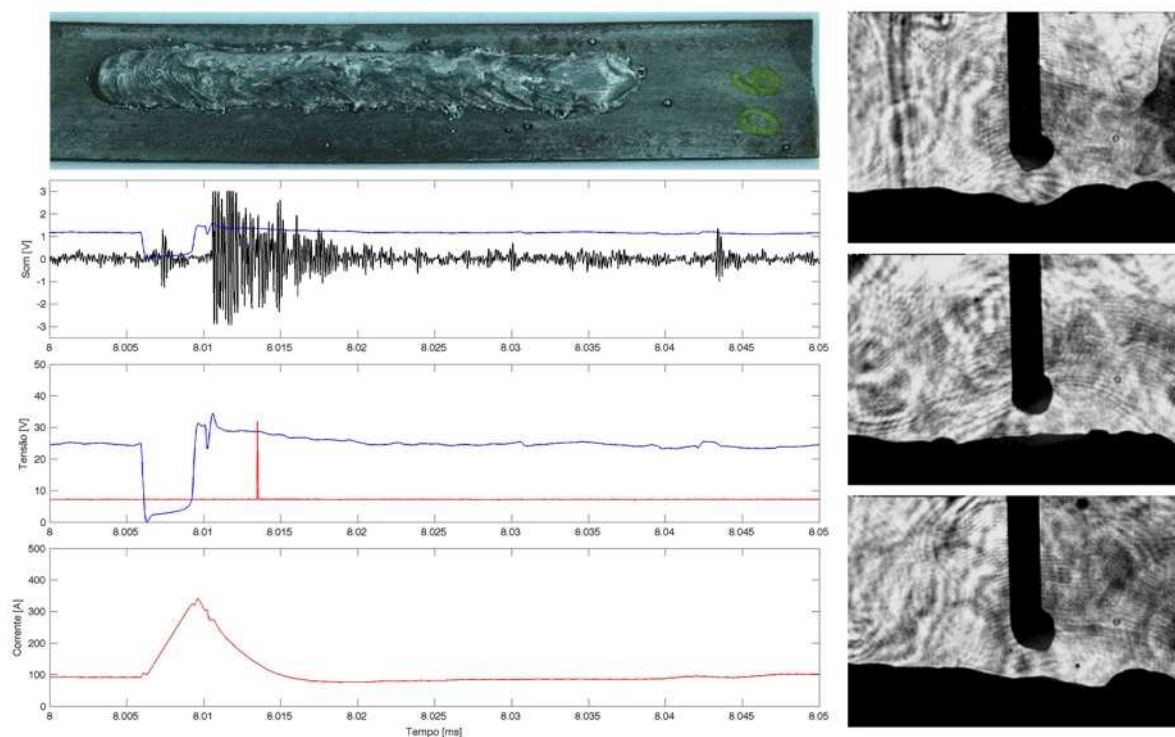


Figura 4.102 – Detalhe dos sinais do teste_06c (Fonte: Próprio autor)

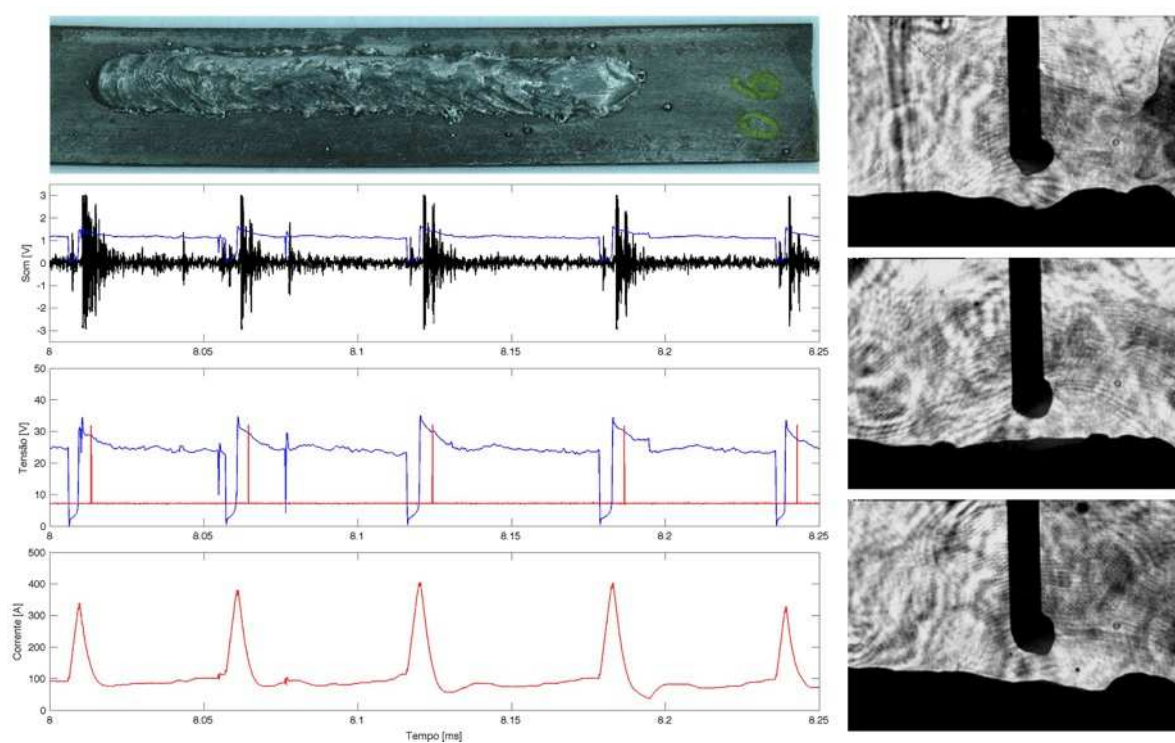


Figura 4.103 – Observação de trecho dos sinais do teste_06c (Fonte: Próprio autor)

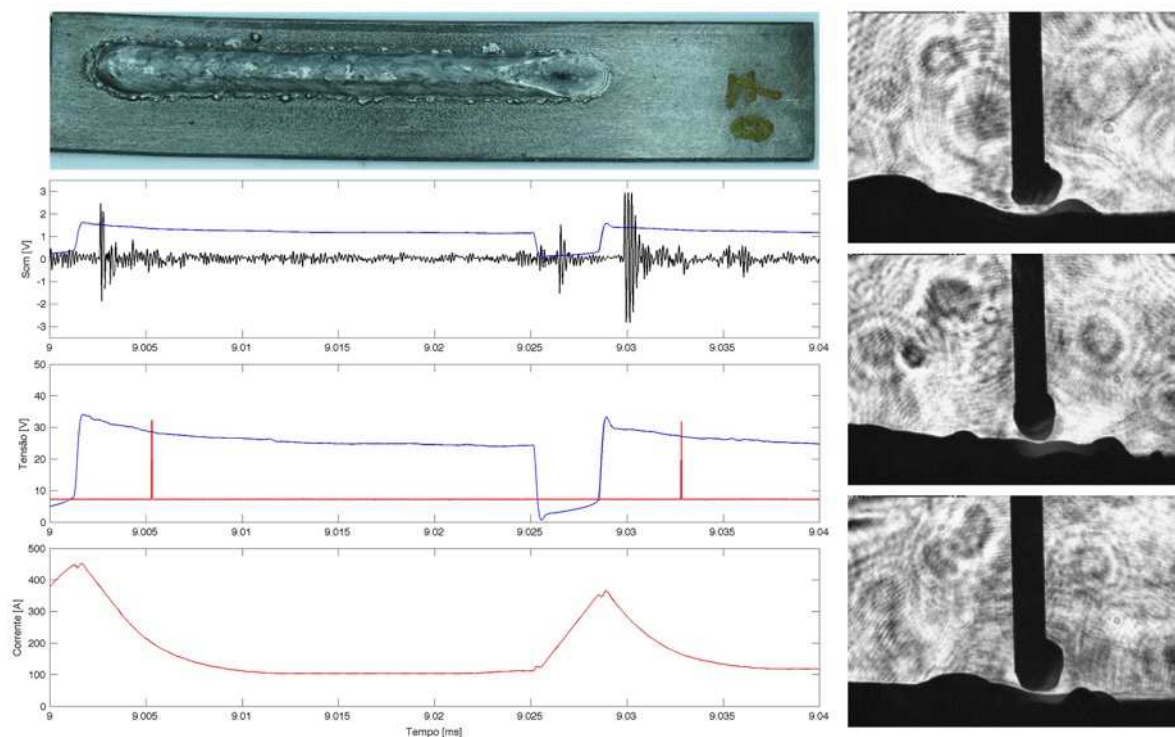


Figura 4.104 – Detalhe dos sinais do teste_07d (Fonte: Próprio autor)

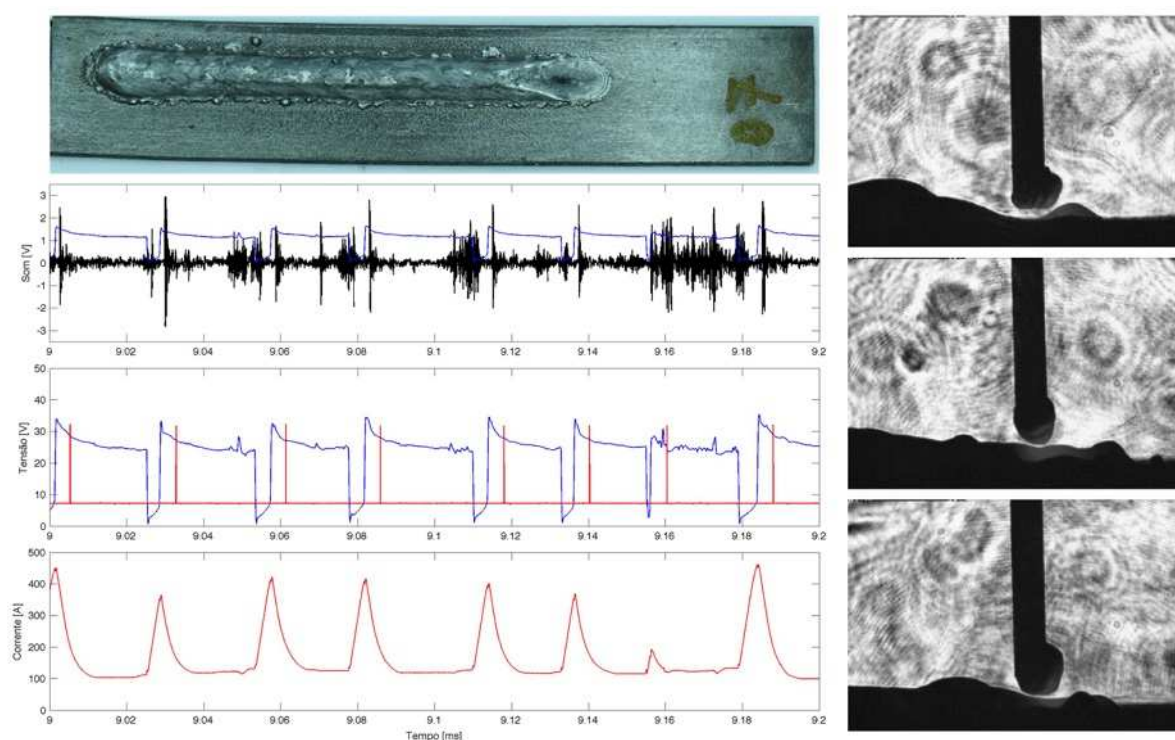


Figura 4.105 – Observação de trecho dos sinais do teste_07d (Fonte: Próprio autor)

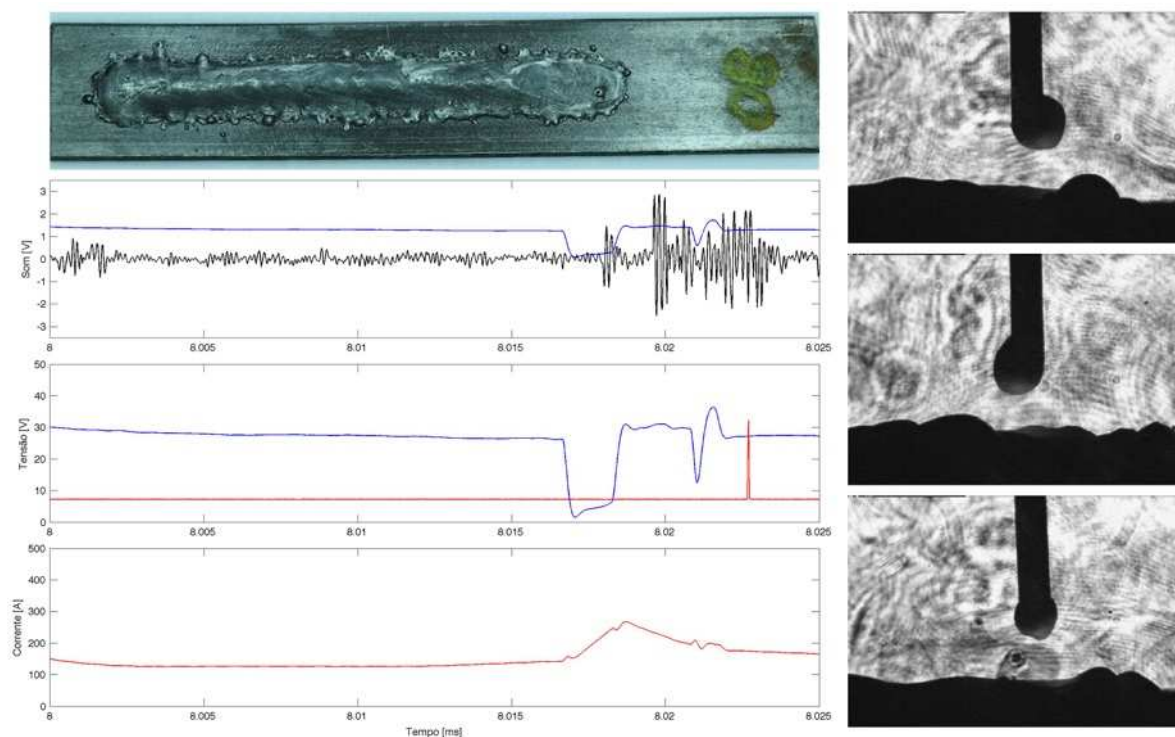


Figura 4.106 – Detalhe dos sinais do teste_08d (Fonte: Próprio autor)

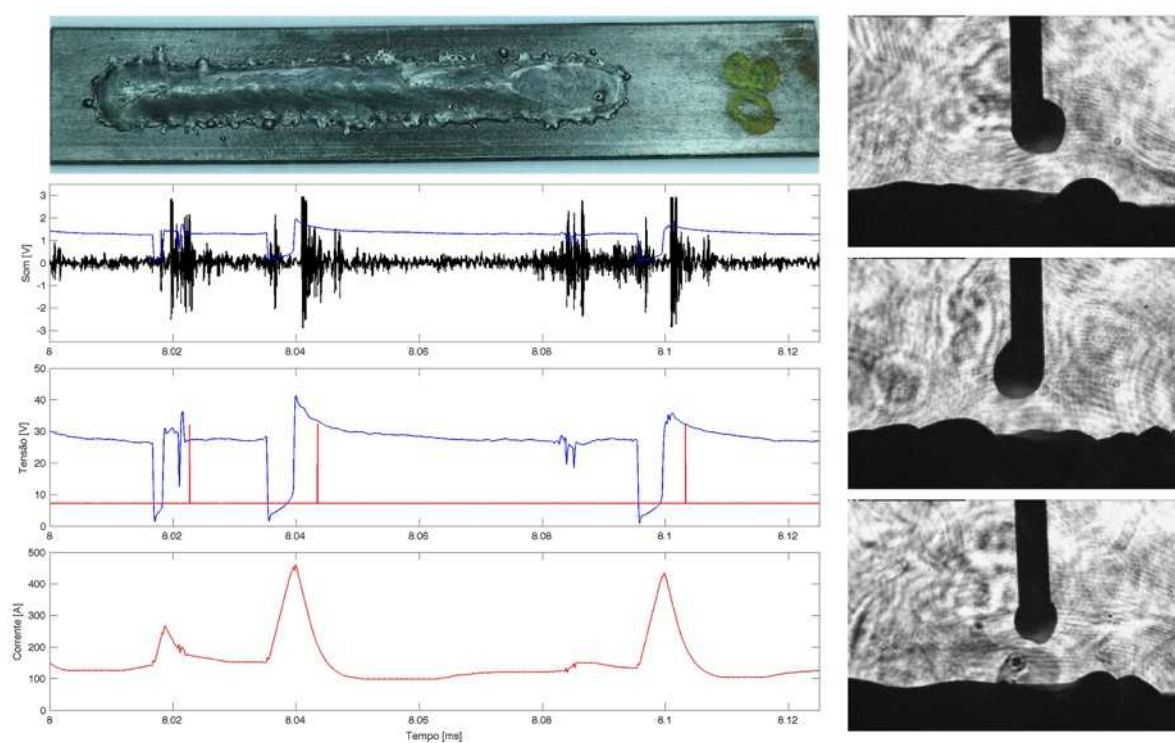


Figura 4.107 – Observação de trecho dos sinais do teste_08d (Fonte: Próprio autor)

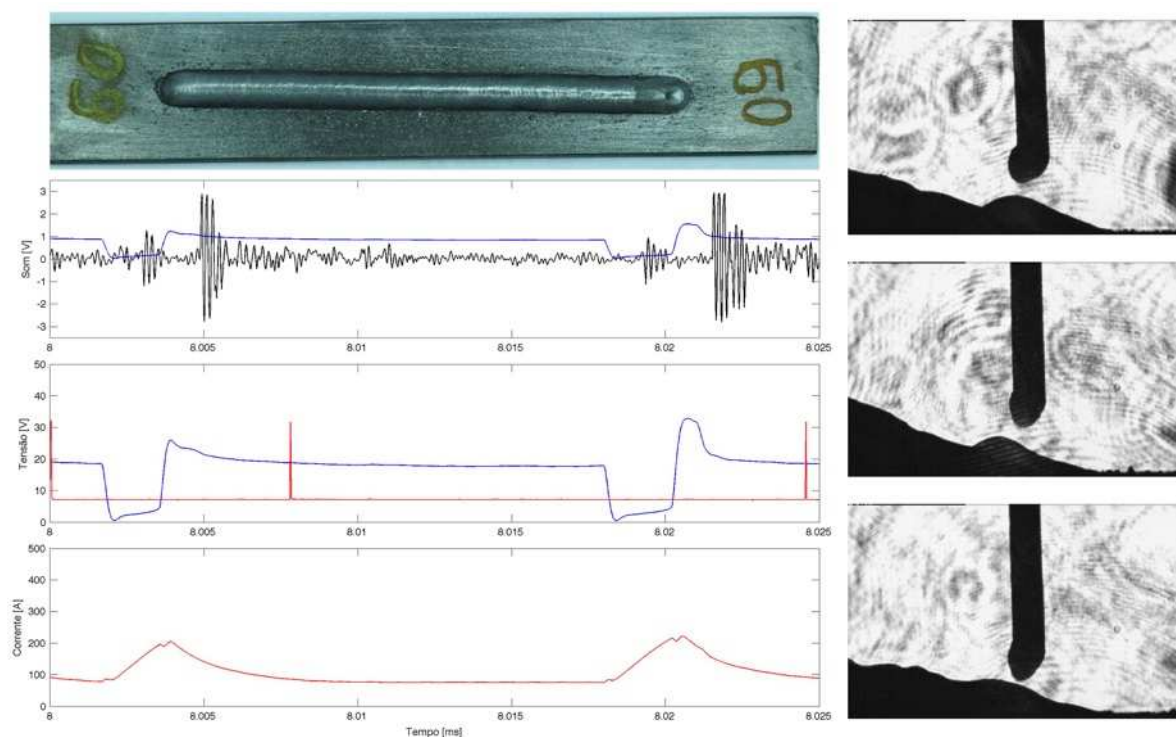


Figura 4.108 – Detalhe dos sinais do teste_09c (Fonte: Próprio autor)

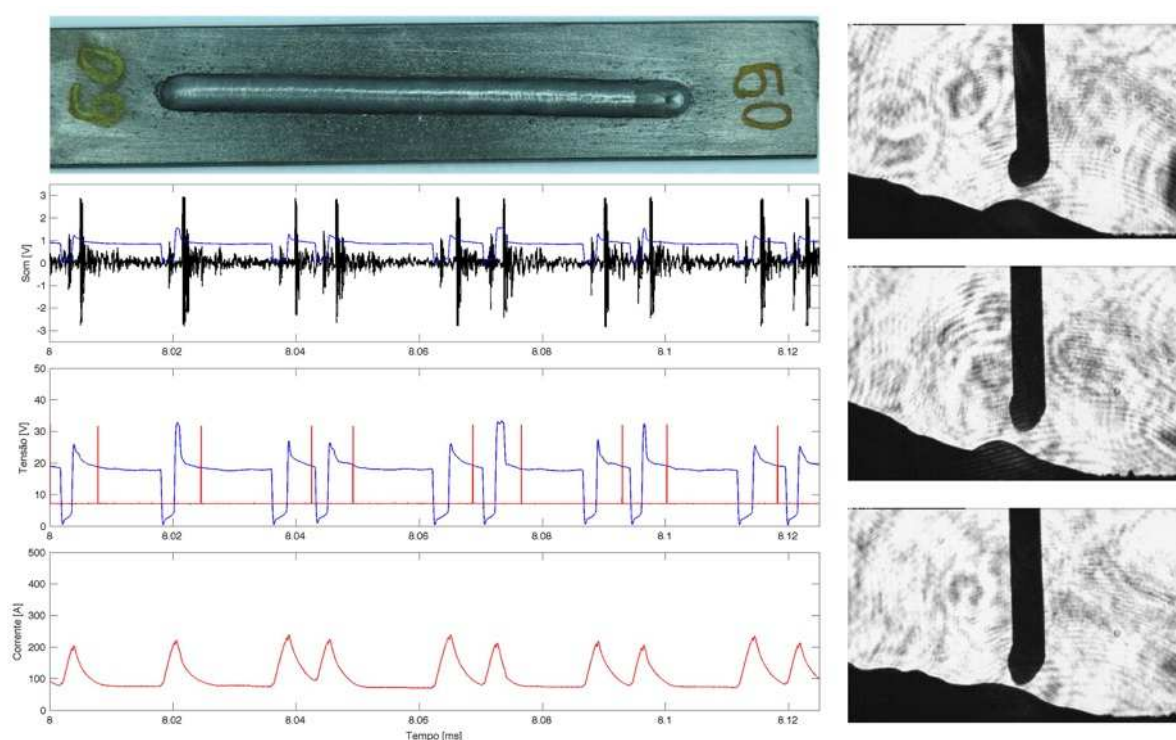


Figura 4.109 – Observação de trecho dos sinais do teste_09c (Fonte: Próprio autor)

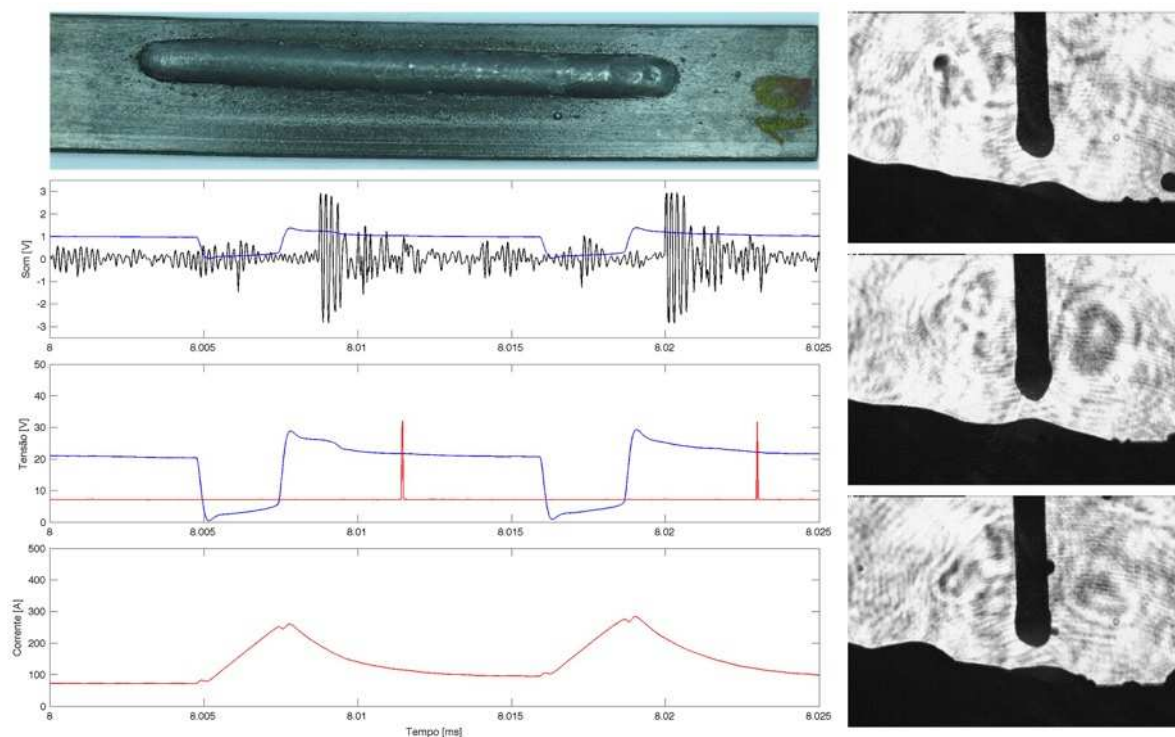


Figura 4.110 – Detalhe dos sinais do teste_10a (Fonte: Próprio autor)

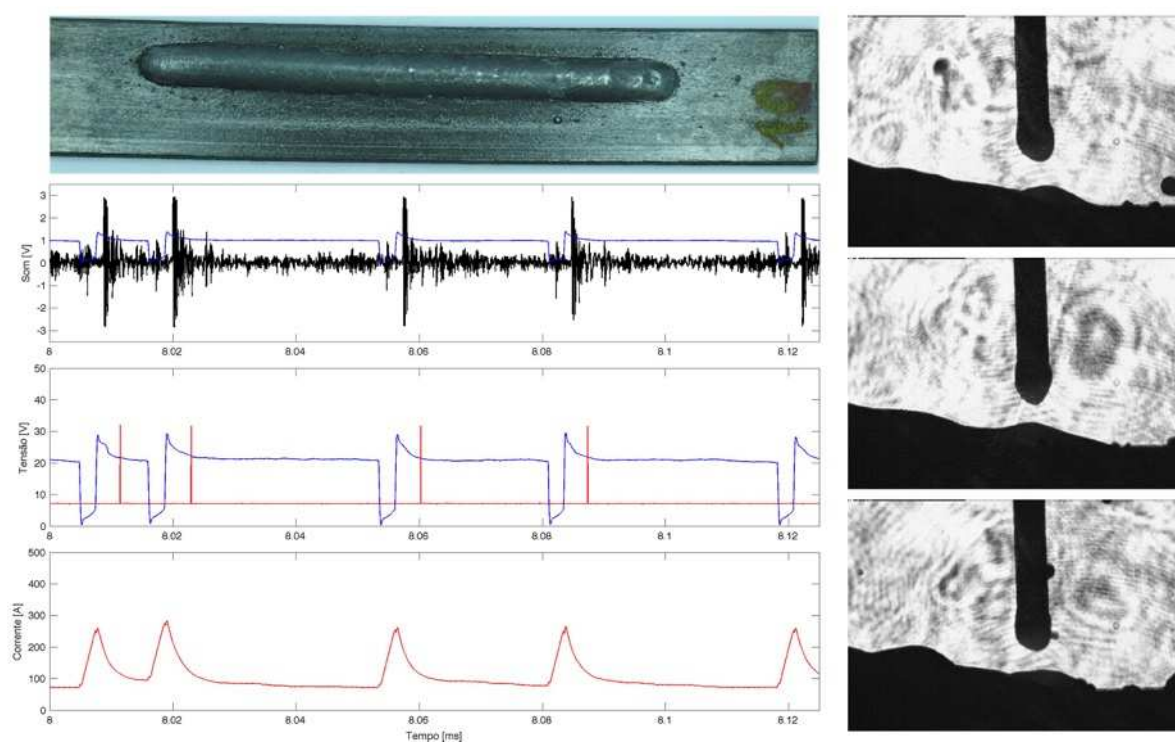


Figura 4.111 – Observação de trecho dos sinais do teste_10a (Fonte: Próprio autor)

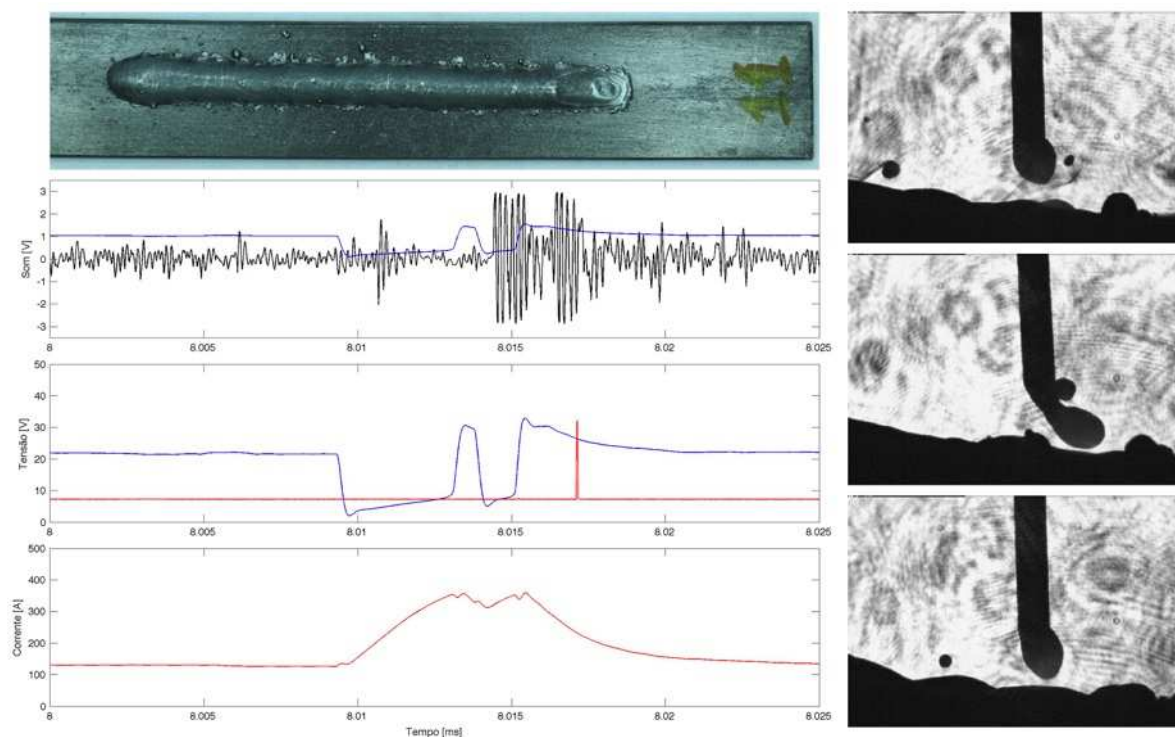


Figura 4.112 – Detalhe dos sinais do teste_11c (Fonte: Próprio autor)

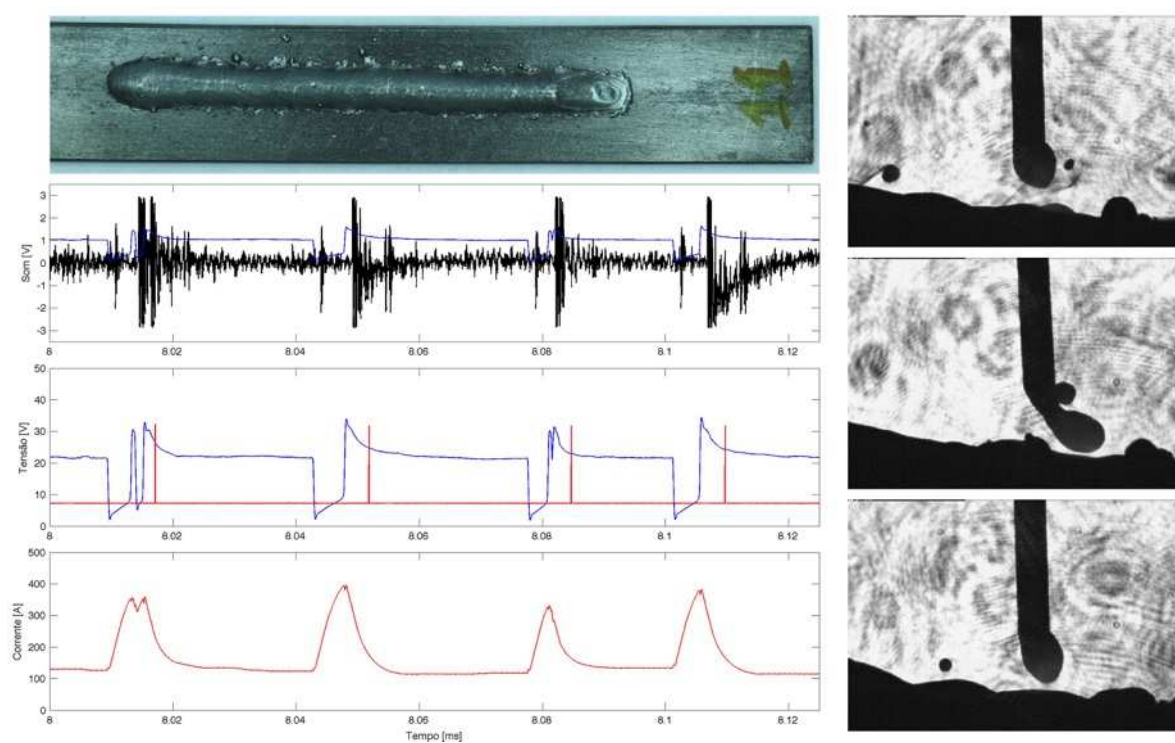


Figura 4.113 – Observação de trecho dos sinais do teste_11c (Fonte: Próprio autor)

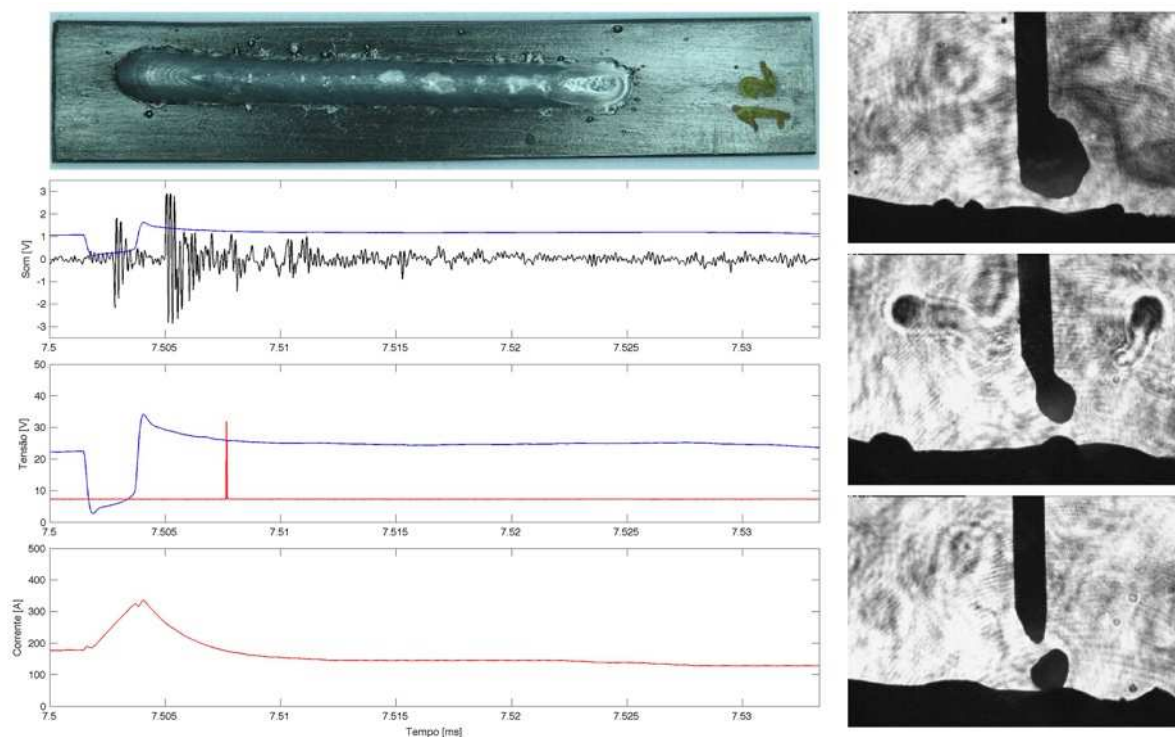


Figura 4.114 – Detalhe dos sinais do teste_12b (Fonte: Próprio autor)

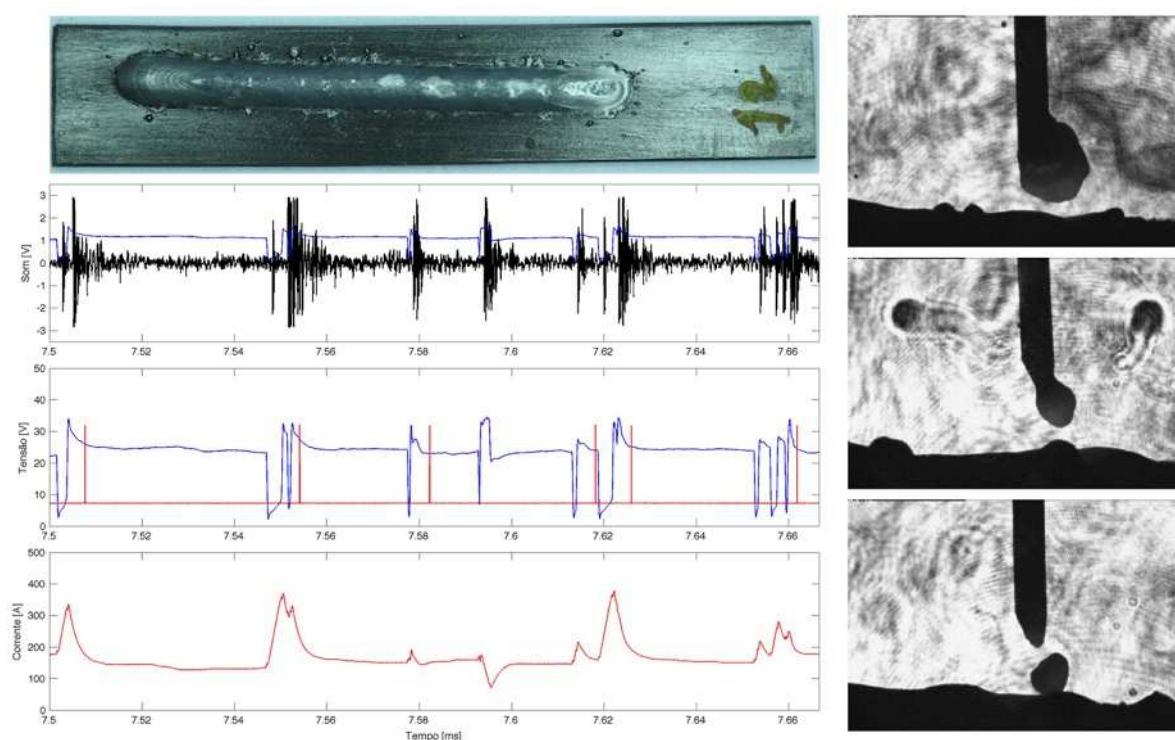


Figura 4.115 – Observação de trecho dos sinais do teste_12b (Fonte: Próprio autor)

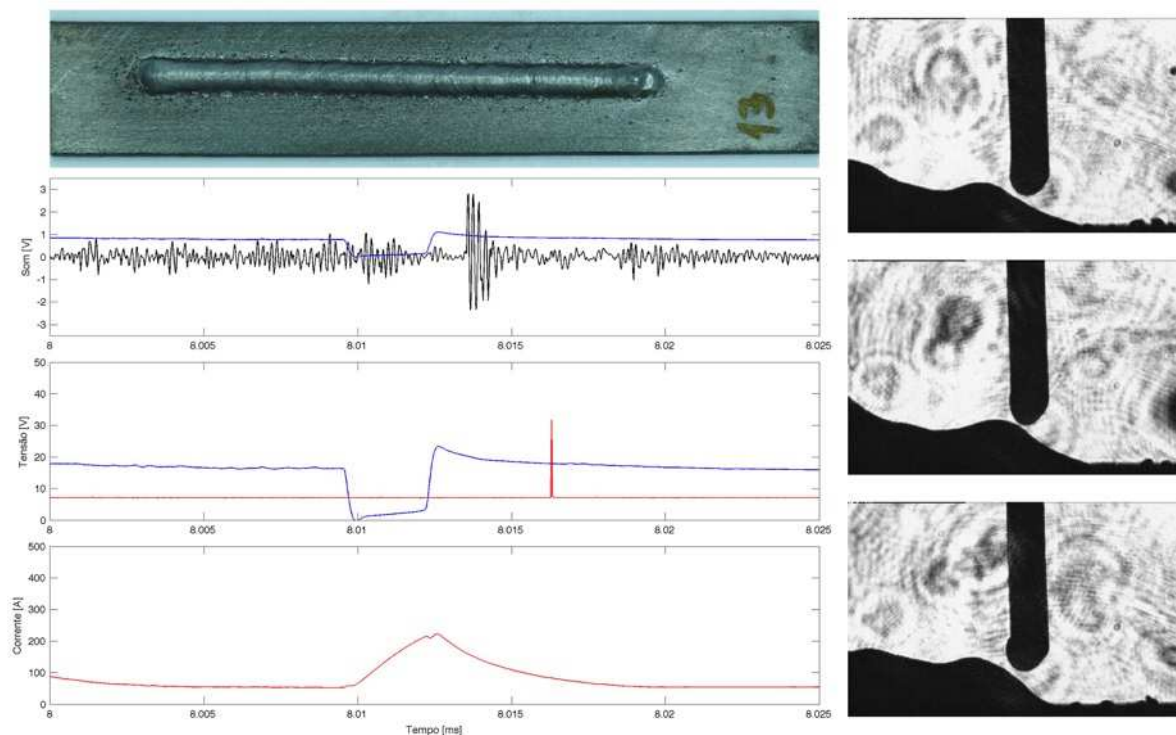


Figura 4.116 – Detalhe dos sinais do teste_13d (Fonte: Próprio autor)

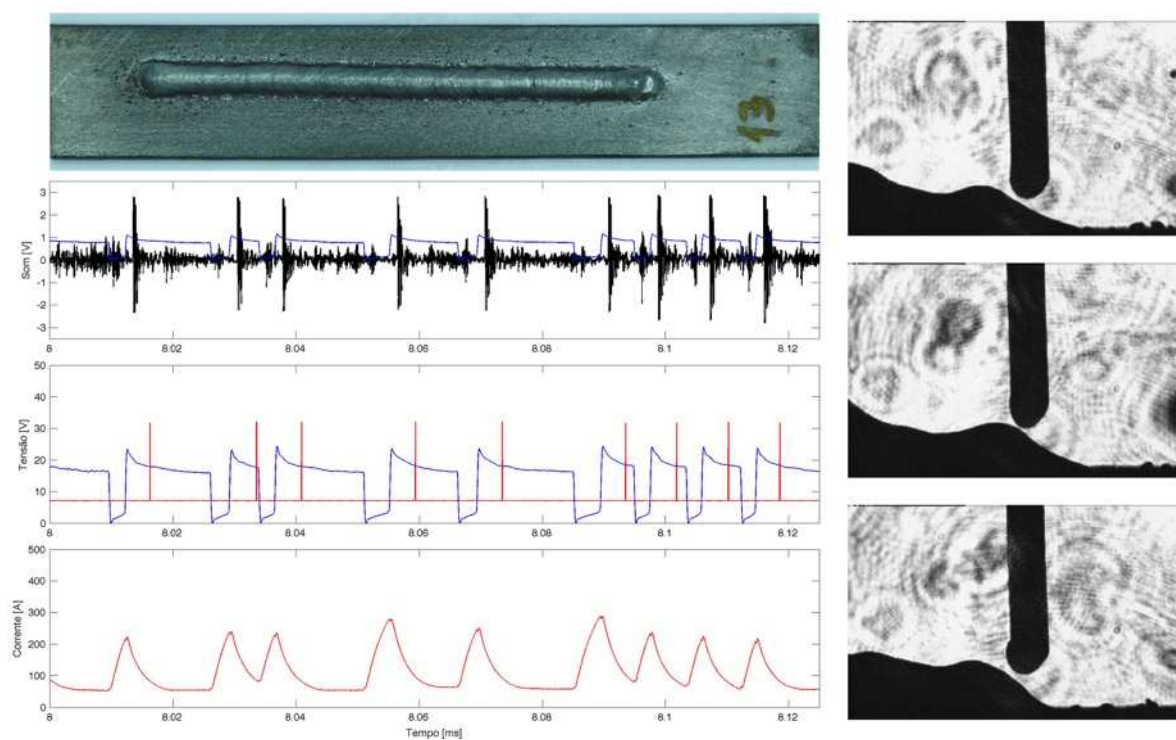


Figura 4.117 – Observação de trecho dos sinais do teste_13d (Fonte: Próprio autor)

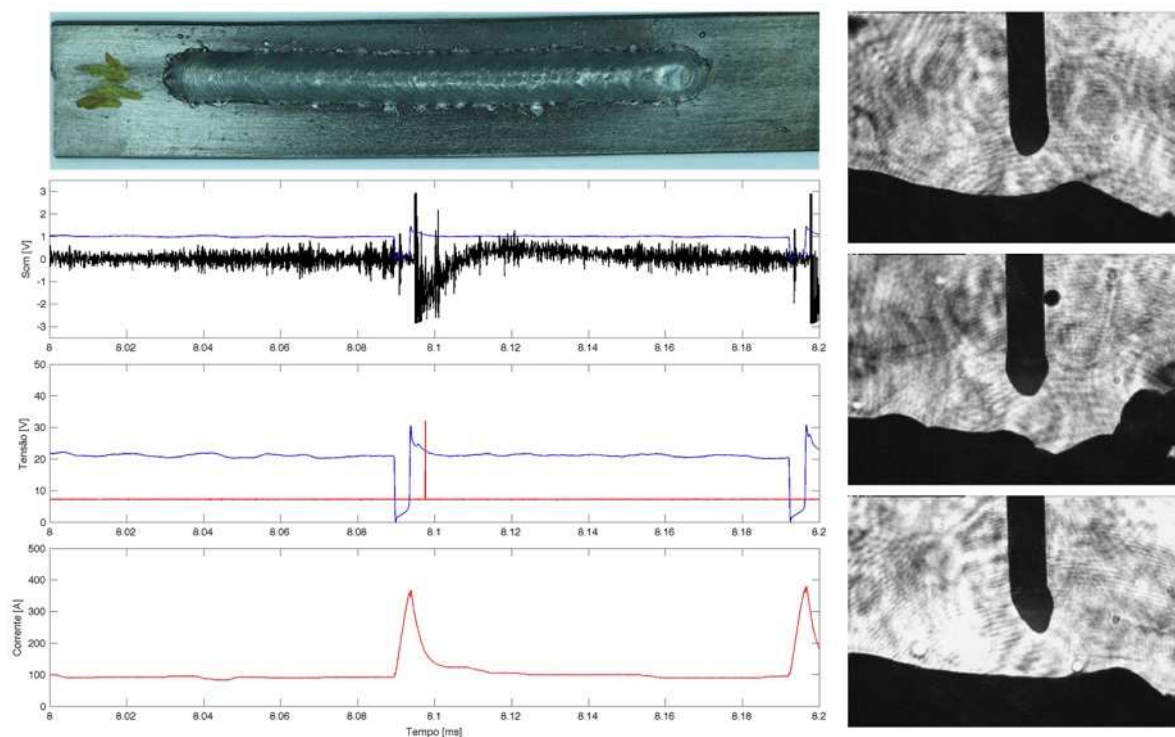


Figura 4.118 – Detalhe dos sinais do teste_14b (Fonte: Próprio autor)

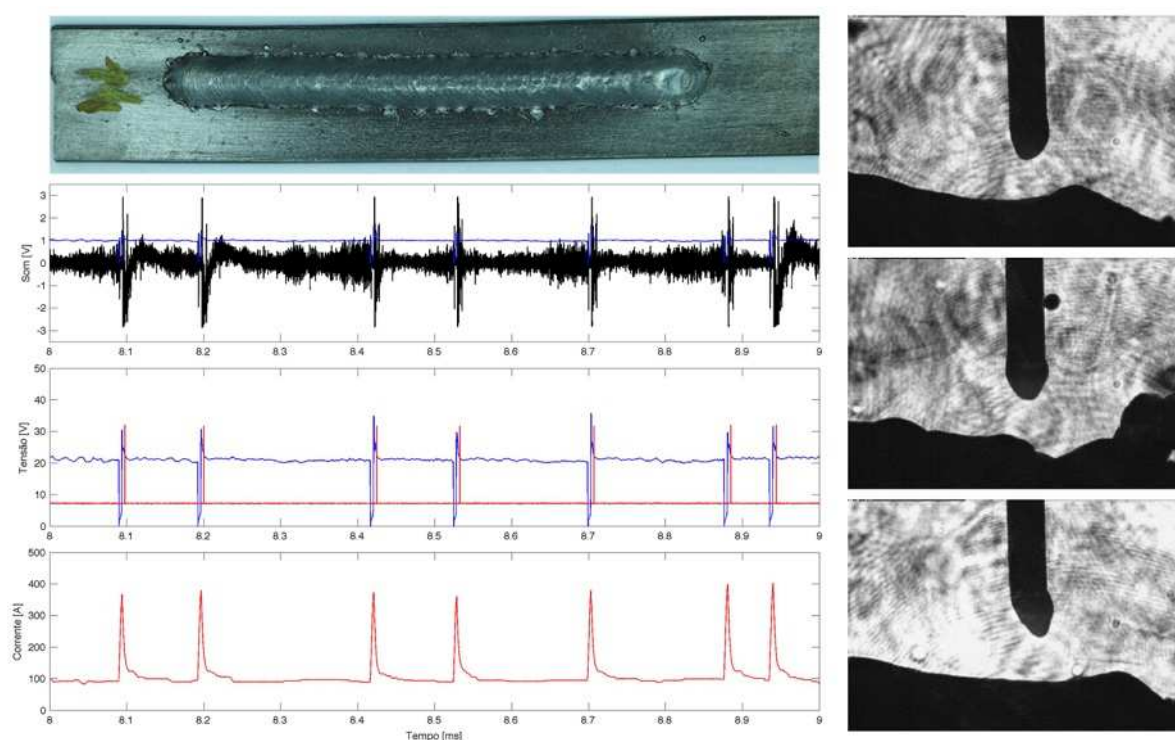


Figura 4.119 – Observação de trecho dos sinais do teste_14b (Fonte: Próprio autor)

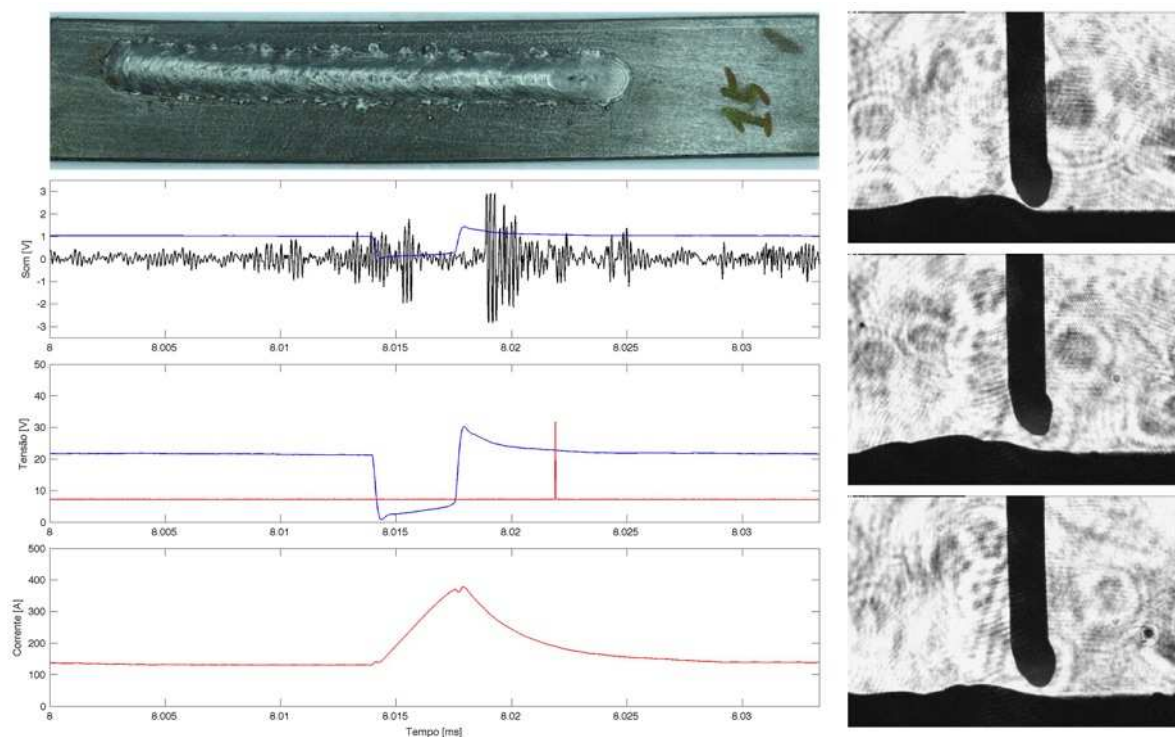


Figura 4.120 – Detalhe dos sinais do teste_15a (Fonte: Próprio autor)

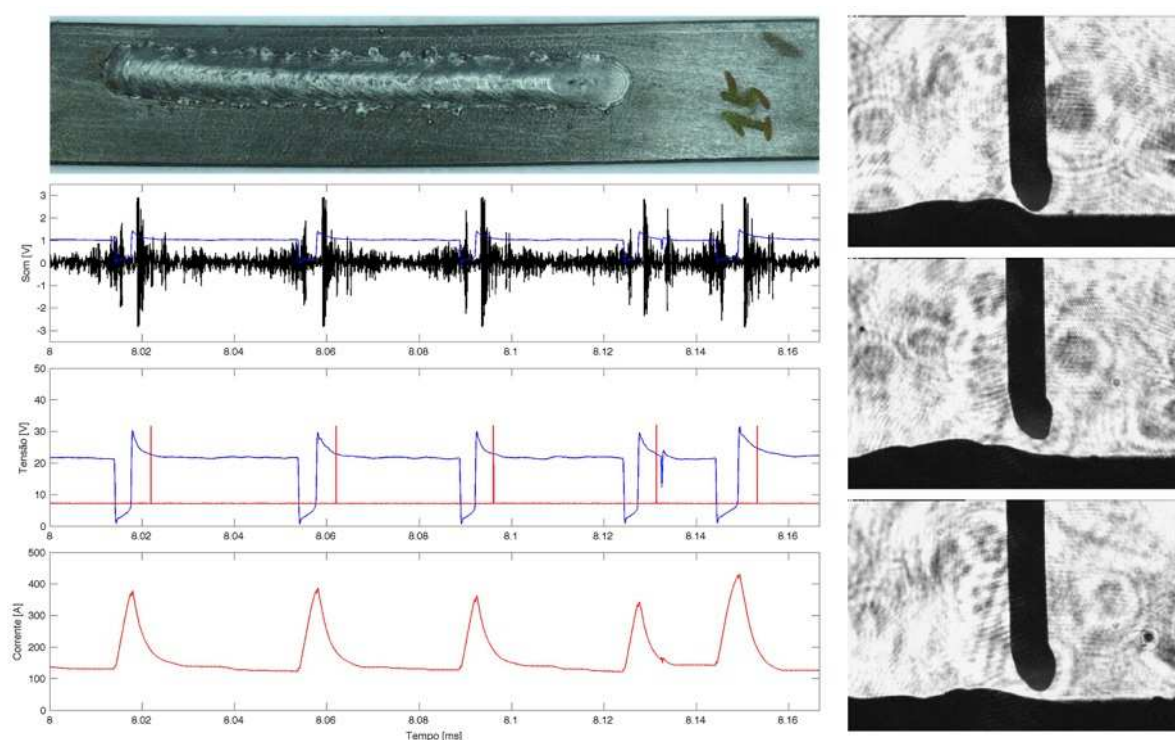


Figura 4.121 – Observação de trecho dos sinais do teste_15a (Fonte: Próprio autor)

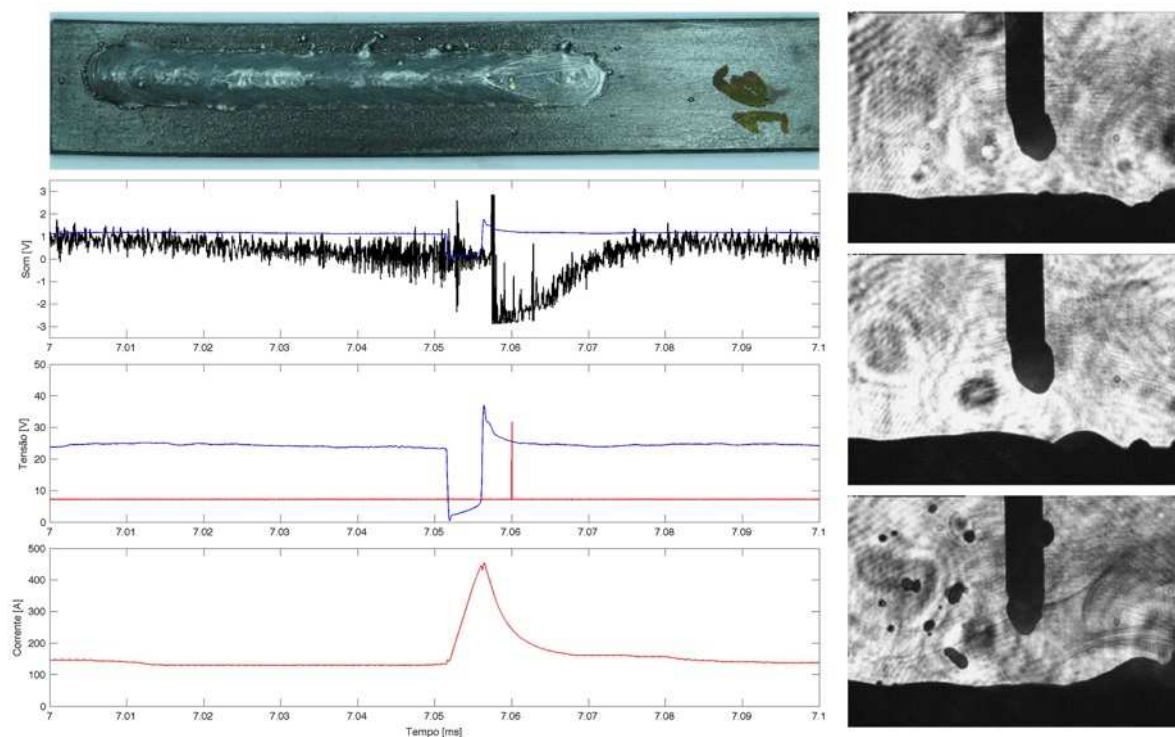


Figura 4.122 – Detalhe dos sinais do teste_16a (Fonte: Próprio autor)

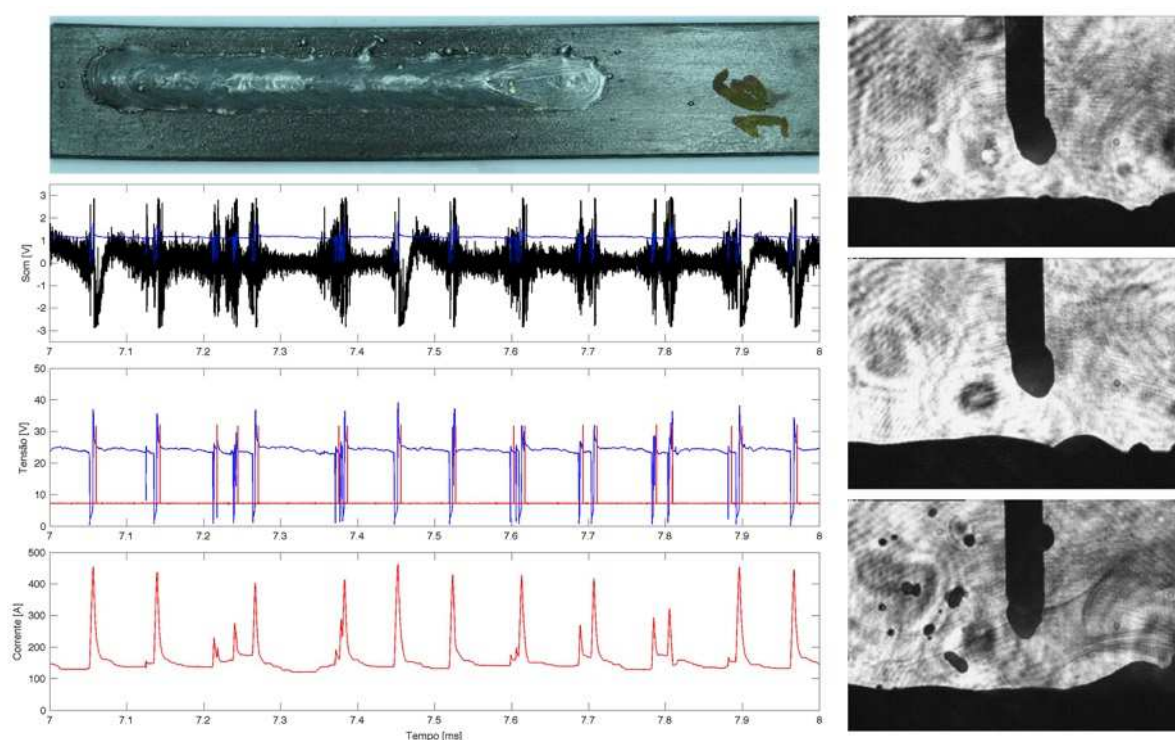


Figura 4.123 – Observação de trecho dos sinais do teste_16a (Fonte: Próprio autor)

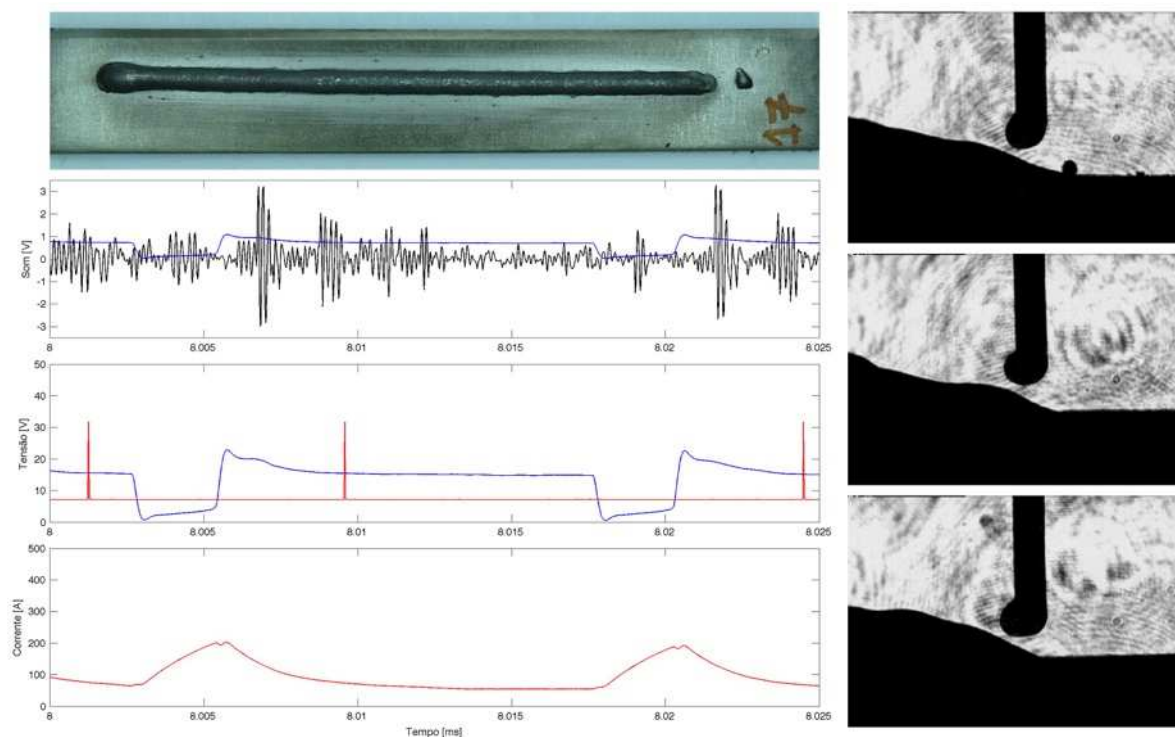


Figura 4.124 – Detalhe dos sinais do teste_17e (Fonte: Próprio autor)

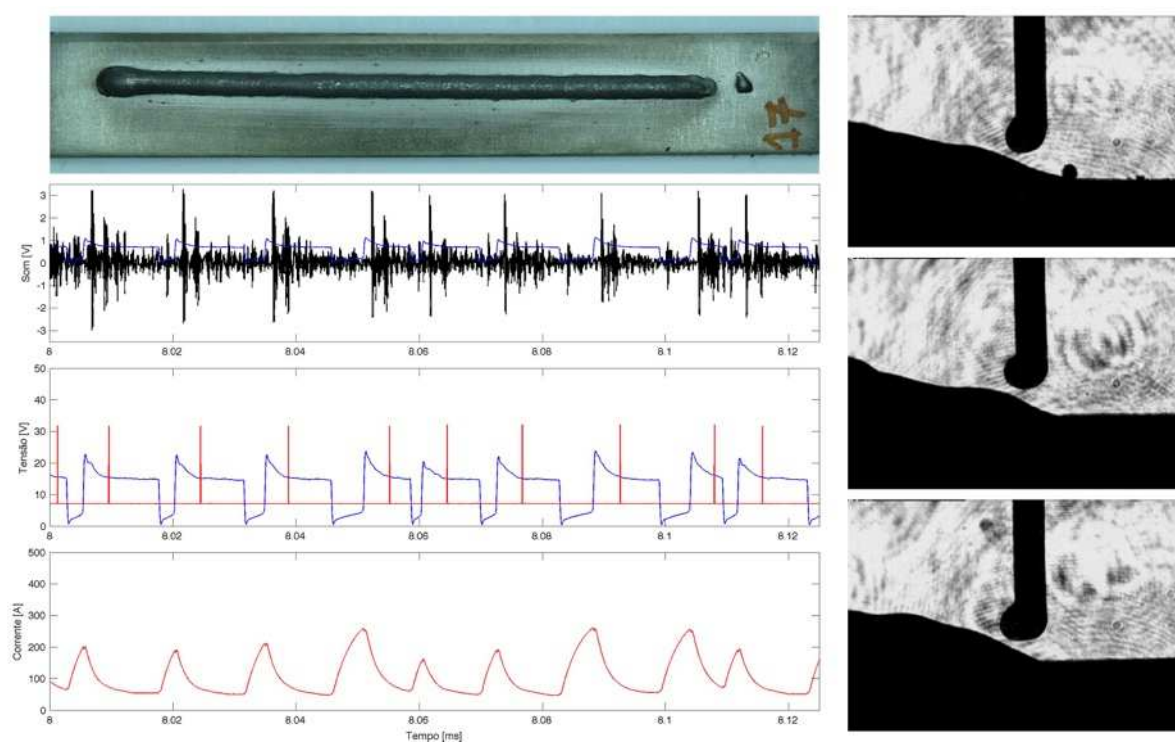


Figura 4.125 – Observação de trecho dos sinais do teste_17e (Fonte: Próprio autor)

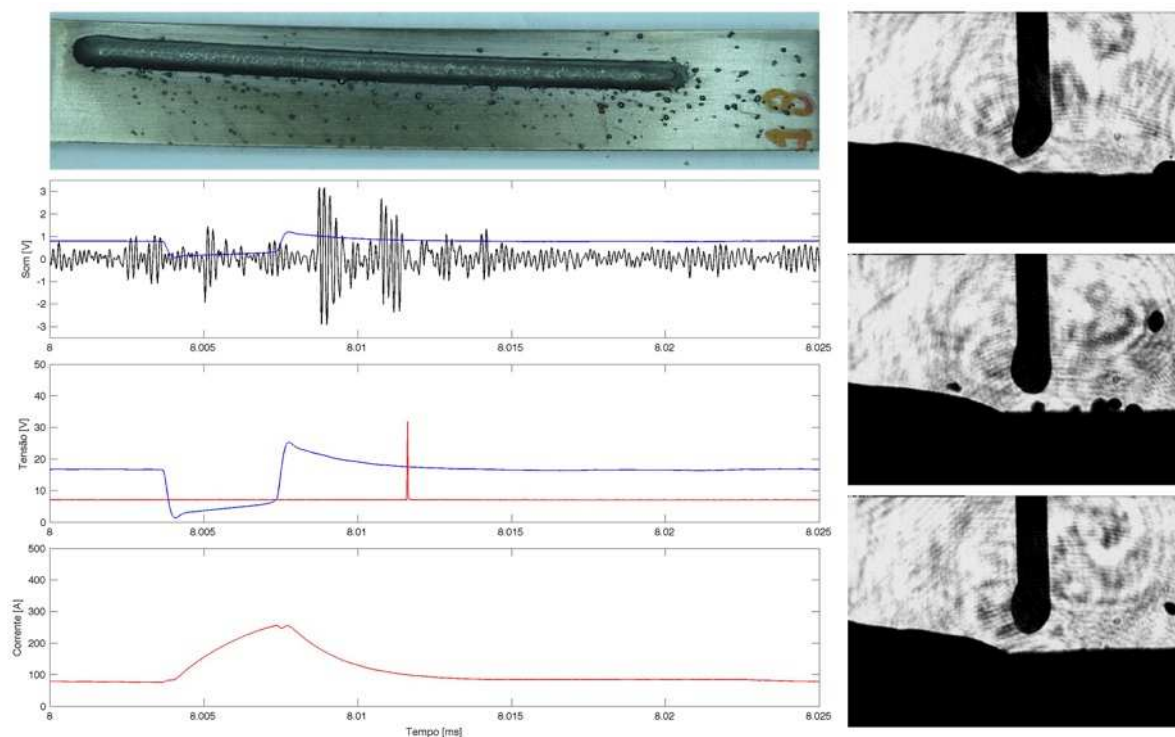


Figura 4.126 – Detalhe dos sinais do teste_18a (Fonte: Próprio autor)

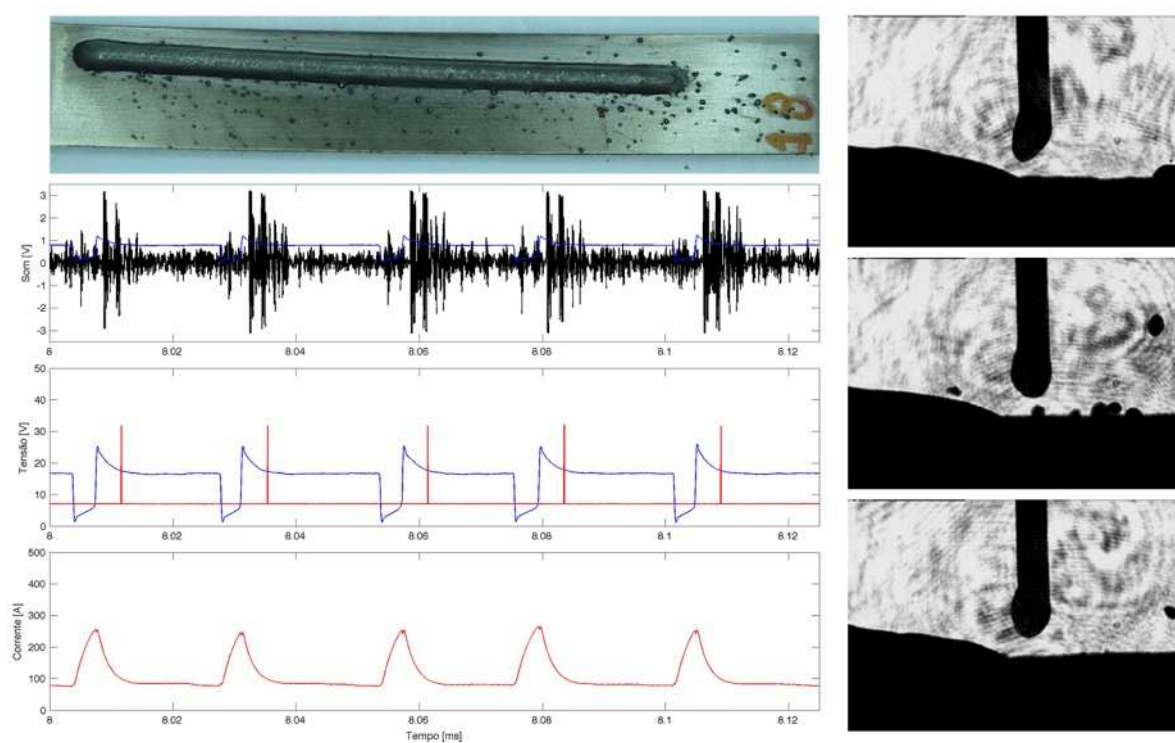


Figura 4.127 – Observação de trecho dos sinais do teste_18a (Fonte: Próprio autor)

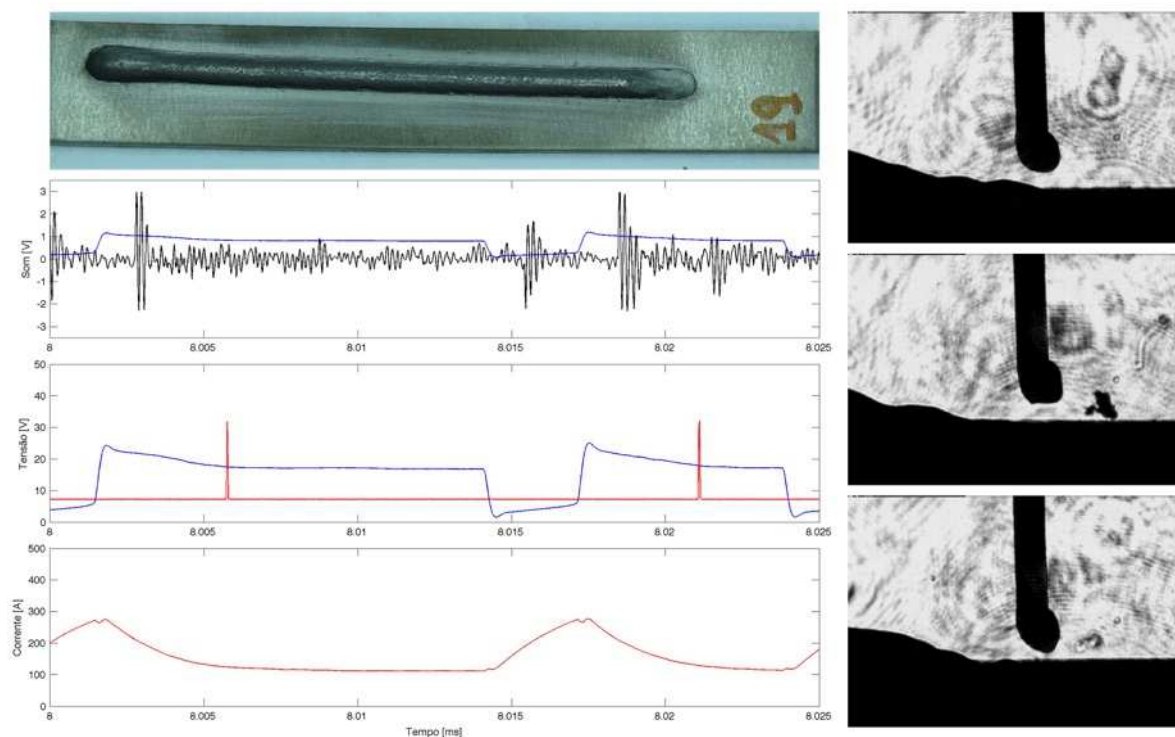


Figura 4.128 – Detalhe dos sinais do teste_19c (Fonte: Próprio autor)

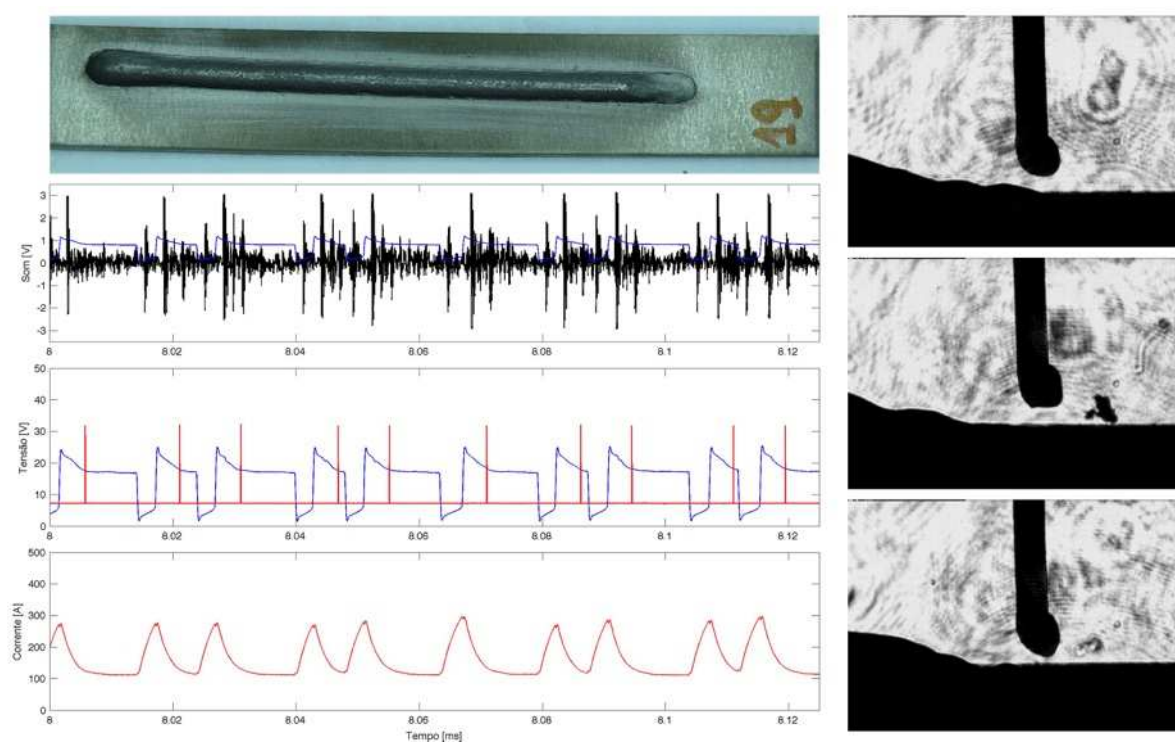


Figura 4.129 – Observação de trecho dos sinais do teste_19c (Fonte: Próprio autor)

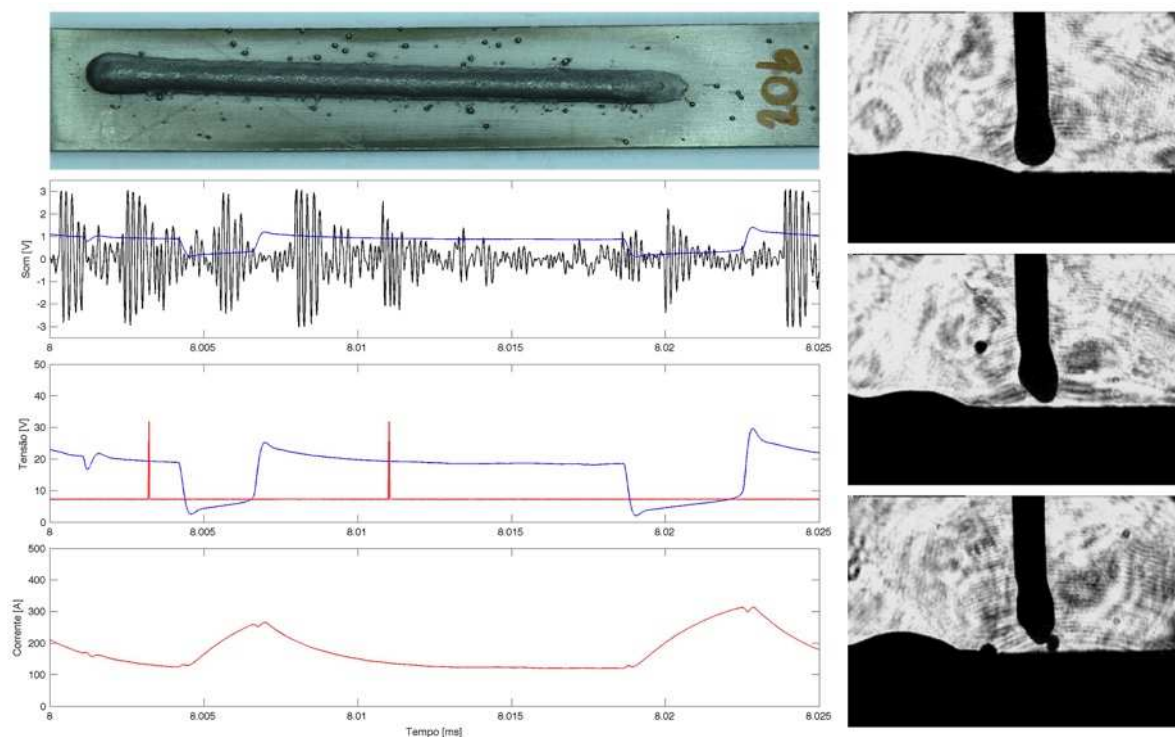


Figura 4.130 – Detalhe dos sinais do teste_20b (Fonte: Próprio autor)

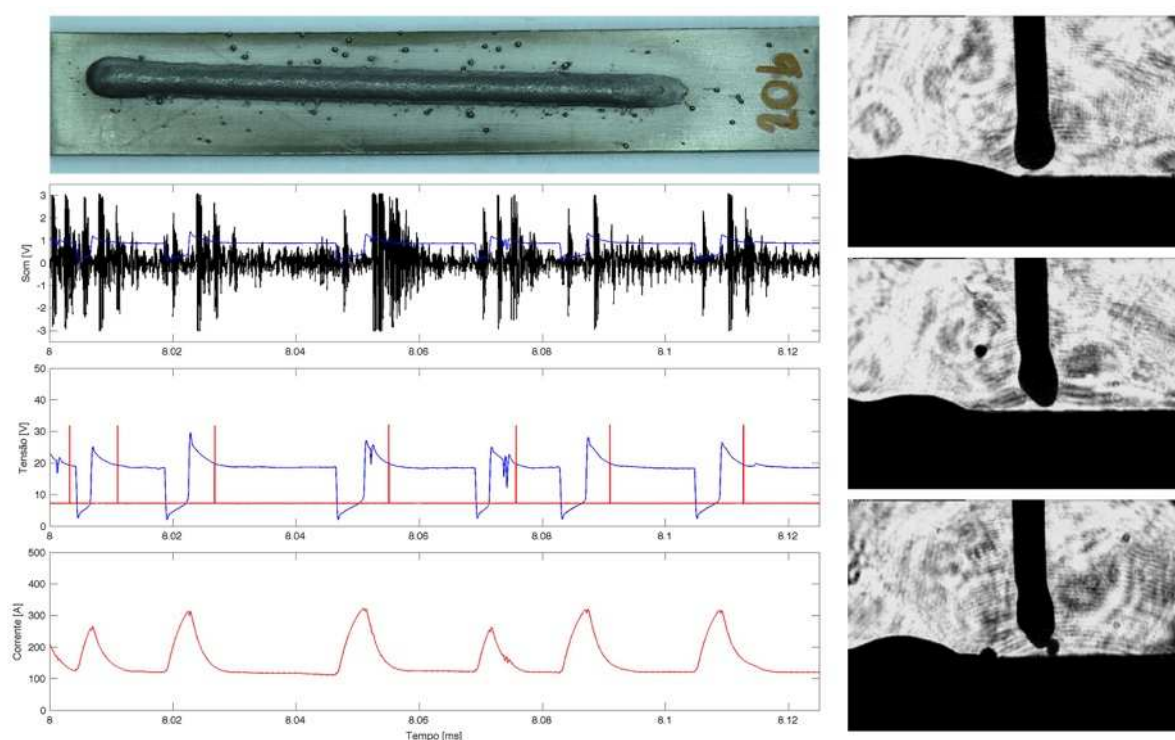


Figura 4.131 – Observação de trecho dos sinais do teste_20b (Fonte: Próprio autor)

Tabela 4-23 – Tabela completa de resultados do testes para avaliação de parâmetros

Teste	tinic	tfim	IVcc	FreqCC	F _{corte}	mt	mc	RMSt	RMSc
teste_01a	5	10	0,87	73,6	23,5	20,1	112,6	21,5	124,0
	10	15	0,88	74,8	23,5	20,1	112,2	21,5	123,6
	15	20	0,91	72,6	23,5	20,1	111,0	21,5	122,5
	20	25	0,85	74,4	23,5	20,1	113,0	21,5	123,9
	5	25	0,88	73,9	23,5	20,1	112,2	21,5	123,5
teste_02d	5	10	1,08	37,6	23,5	22,0	108,1	22,9	122,4
	10	15	1,15	34,2	23,5	22,3	103,8	23,5	119,6
	15	20	1,14	36,4	23,5	22,0	106,5	22,9	121,6
	20	25	1,16	35,6	23,5	22,0	105,4	22,9	120,4
	5	25	1,13	36,0	23,5	22,1	106,0	23,1	121,0
teste_03b	2	7	1,04	58,2	37,3	22,8	165,9	24,1	178,0
	7	12	1,16	61,2	37,3	22,8	165,3	24,1	177,8
	12	17	1,02	55,4	37,3	22,8	163,9	24,1	176,4
	2	17	1,08	58,3	37,3	22,8	165,0	24,1	177,4
teste_04d	2	7	1,25	29,4	37,3	25,1	164,7	25,9	175,7
	7	12	1,43	32,8	37,3	25,1	163,6	25,9	175,3
	12	17	1,28	31,0	37,3	25,1	164,8	25,9	177,7
	2	17	1,32	31,1	37,3	25,1	164,4	25,9	176,2
teste_05a	3	8	0,67	97,8	37,3	19,5	112,7	21,2	123,1
	8	13	0,70	94,6	37,3	19,5	109,0	21,2	120,3
	13	18	0,77	99,6	37,3	19,5	110,1	21,2	120,9
	18	23	0,73	96,8	37,3	19,5	110,0	21,2	121,1
	3	23	0,72	97,2	37,3	19,5	110,4	21,2	121,4
teste_06c	3	8	1,00	29,2	37,3	23,5	111,6	24,3	127,3
	8	13	1,21	30,0	37,3	23,5	109,3	24,2	124,2
	13	18	1,17	30,0	37,3	23,5	110,2	24,3	125,5
	18	23	1,22	30,6	37,3	23,5	108,9	24,3	126,2
	3	23	1,15	30,0	37,3	23,5	110,0	24,3	125,8
teste_07d	2	7	1,15	46,4	67,2	23,2	160,9	24,4	179,3
	7	12	1,15	47,4	67,2	23,1	164,3	24,3	181,3
	2	12	1,15	46,9	67,2	23,1	162,6	24,4	180,3
teste_08d	2	7	1,17	28,4	67,2	26,2	157,6	27,1	172,2
	7	12	1,08	23,6	67,2	26,2	158,9	26,9	172,3
	2	12	1,13	26,0	67,2	26,2	158,2	27,0	172,3
teste_09c	3	8	0,60	76,8	37,3	16,5	109,8	17,7	119,5
	8	13	0,64	78,2	37,3	16,5	106,4	17,7	115,9
	13	18	0,64	76,4	37,3	16,5	104,9	17,6	114,6
	18	23	0,67	75,6	37,3	16,5	106,7	17,6	116,5
	3	23	0,64	76,8	37,3	16,5	106,9	17,7	116,6
teste_10a	3	8	0,54	35,8	37,3	19,7	108,9	20,4	119,7
	8	13	0,56	36,2	37,3	19,7	107,3	20,4	118,1
	13	18	0,52	34,6	37,3	19,7	108,9	20,4	119,9
	18	23	0,50	34,4	37,3	19,7	106,4	20,4	117,6
	3	23	0,53	35,3	37,3	19,7	107,9	20,4	118,8

Teste	tinic	tfim	IVcc	FreqCC	F _{corte}	mt	mc	RMSt	RMSc
teste_11c	2	7	0,99	49,2	67,2	20,5	157,6	21,4	170,1
	7	12	1,14	55,6	67,2	20,4	162,5	21,4	174,3
	2	12	1,07	52,4	67,2	20,4	160,0	21,4	172,2
teste_12b	2	7	1,30	36,6	67,2	23,2	165,7	23,9	174,3
	7	12	1,45	42,4	67,2	23,2	165,4	23,8	172,9
	2	12	1,38	39,5	67,2	23,2	165,6	23,8	173,6
teste_13d	5	10	0,83	65,8	23,5	14,6	105,1	15,9	122,4
	10	15	0,88	65,6	23,5	14,6	107,0	16,0	125,1
	15	20	0,91	62,6	23,5	14,6	106,7	15,9	126,2
	20	25	0,87	62,2	23,5	14,6	106,8	15,9	126,2
	5	25	0,88	64,1	23,5	14,6	106,4	16,0	125,0
teste_14b	5	10	0,83	8,0	23,5	20,6	107,7	20,8	116,3
	10	15	0,77	6,4	23,5	20,6	106,7	20,8	115,1
	15	20	0,61	5,6	23,5	20,6	106,2	20,8	113,9
	20	25	0,60	6,4	23,5	20,6	105,7	20,8	114,8
	5	25	0,74	6,6	23,5	20,6	106,6	20,8	115,0
teste_15a	2	7	0,66	31,0	37,3	20,3	163,1	21,2	175,2
	7	12	0,61	30,0	37,3	20,3	161,5	21,1	172,9
	12	17	0,60	29,2	37,3	20,3	160,0	21,1	171,7
	2	17	0,62	30,1	37,3	20,3	161,5	21,2	173,3
teste_16a	2	7	1,29	20,2	37,3	23,3	164,9	23,8	175,0
	7	12	1,46	21,8	37,3	23,3	161,6	23,8	170,2
	12	17	1,20	18,2	37,3	23,3	162,7	23,8	172,9
	2	17	1,32	20,1	37,3	23,3	163,1	23,8	172,7
teste_17e	5	10	1,01	81,2	42,7	12,5	111,6	14,0	128,2
	10	15	1,12	85,8	42,7	12,5	111,6	14,0	126,6
	15	20	0,79	82,2	42,7	12,5	110,1	14,0	125,0
	20	25	0,82	78,2	42,7	12,5	109,2	14,0	124,8
	5	25	0,95	81,9	42,7	12,5	110,6	14,0	126,2
teste_18a	5	10	0,25	40,2	42,7	15,5	110,0	16,2	121,3
	10	15	0,24	40,8	42,7	15,4	109,8	16,2	121,2
	15	20	0,30	39,2	42,7	15,5	109,7	16,2	121,0
	20	25	0,24	41,0	42,7	15,5	108,7	16,2	119,8
	5	25	0,26	40,3	42,7	15,4	109,5	16,2	120,8
teste_19c	2	7	0,50	74,2	69,3	15,2	159,8	16,5	169,7
	7	12	0,50	71,2	69,3	15,2	158,4	16,4	168,1
	12	17	0,51	71,6	69,3	15,2	156,6	16,5	166,4
	2	17	0,50	72,4	69,3	15,2	158,3	16,5	168,1
teste_20a	2	7	1,06	55,0	69,3	17,1	156,3	18,0	167,4
	7	12	1,07	50,6	69,3	17,1	156,9	18	168,7
	12	17	1,02	50,8	69,3	17,1	157,1	18	168,6
	2	17	1,05	52,2	69,3	17,1	156,8	18	168,2

(Fonte: Próprio autor)

Apêndice IV – Espectros de Frequência dos Sinais Sonoros (item 4.3.2.1)

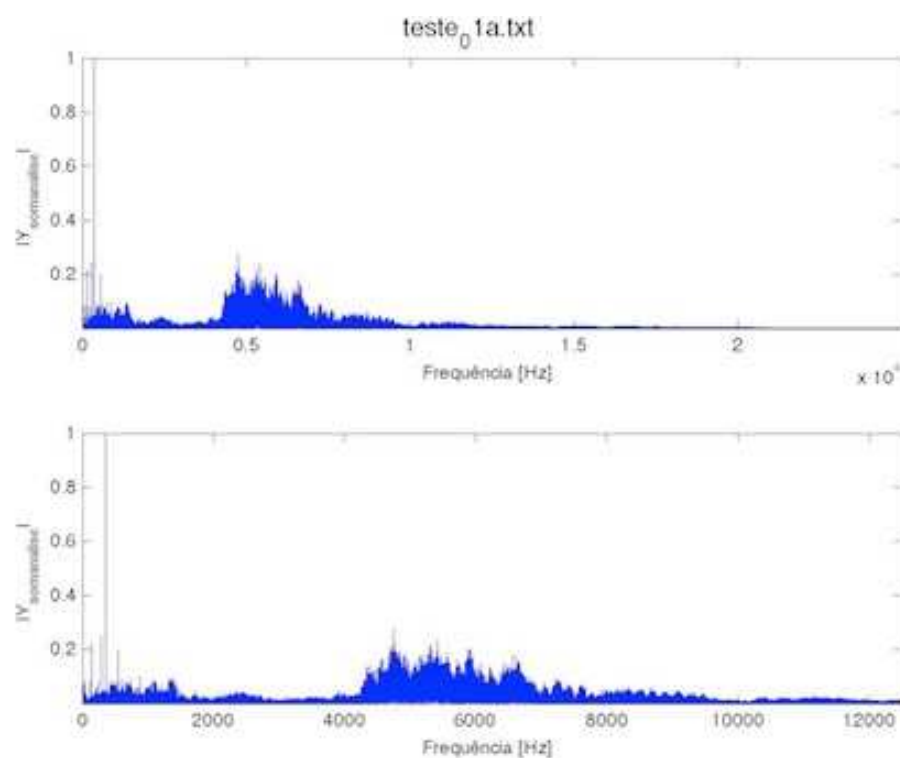


Figura 4.132 – Espectro de Frequência do teste_01a para 5 segundos de soldagem.

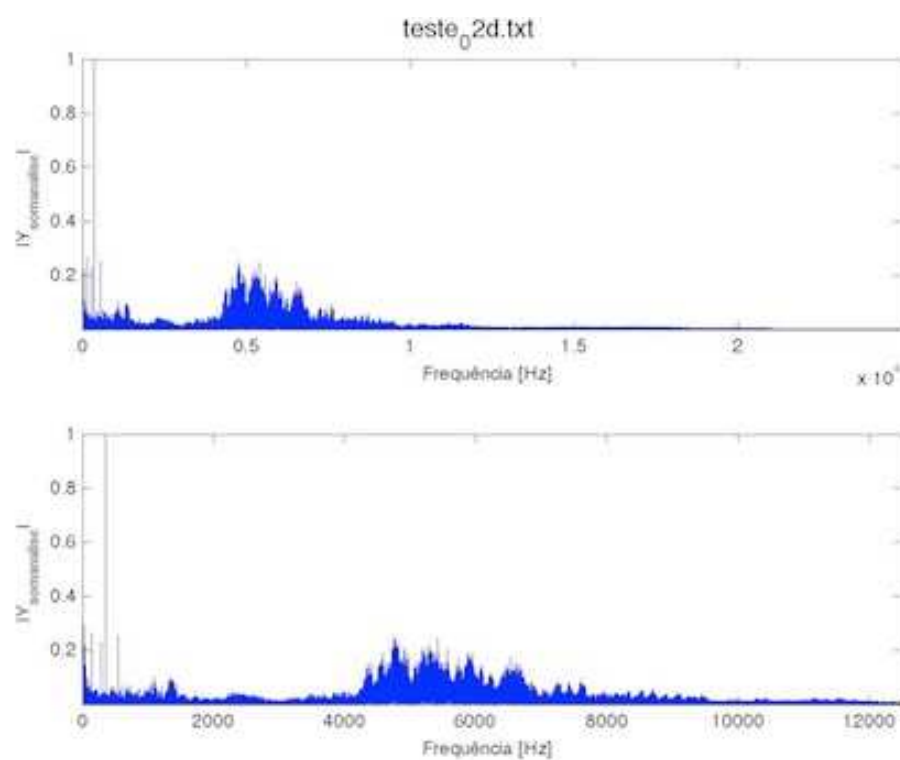


Figura 4.133 – Espectro de Frequência do teste_02d para 5 segundos de soldagem.

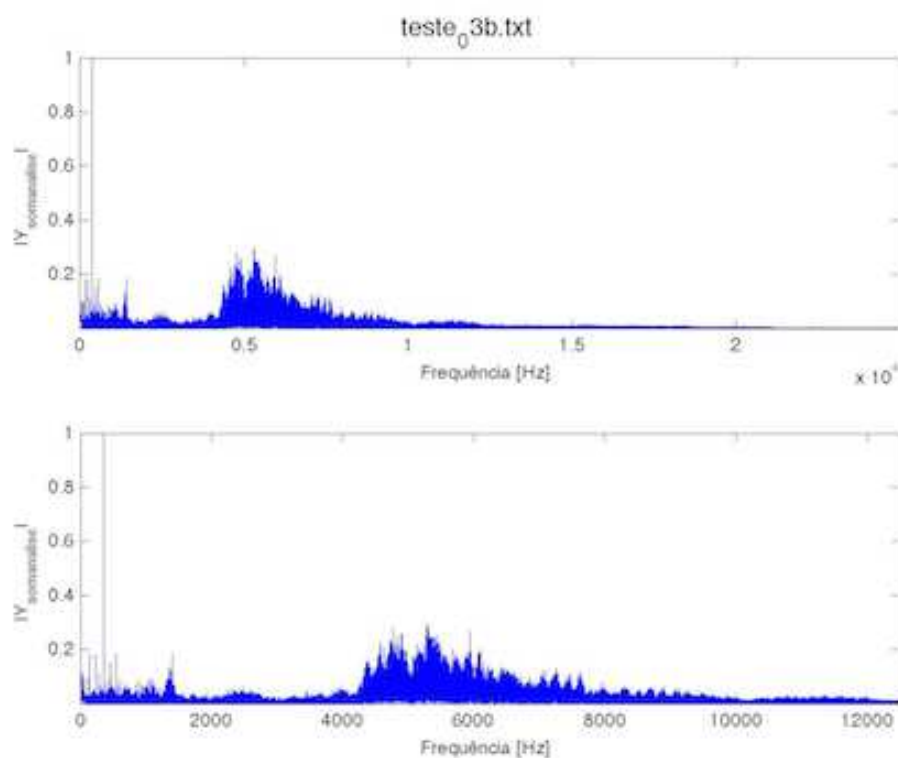


Figura 4.134 – Espectro de Frequência do teste_03b para 5 segundos de soldagem.

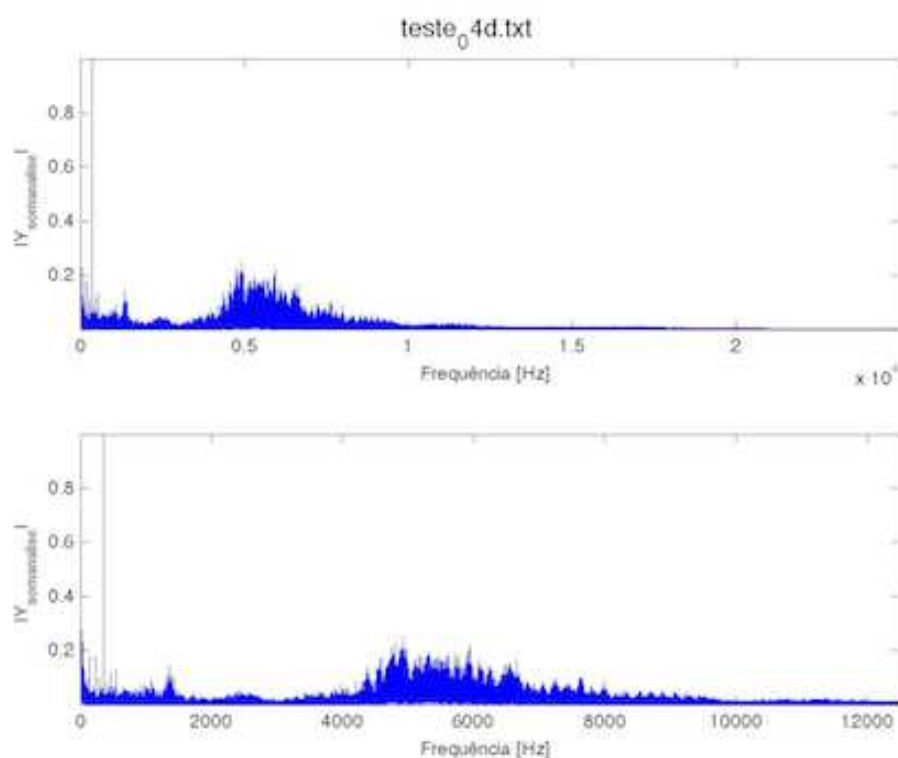


Figura 4.135 – Espectro de Frequência do teste_04d para 5 segundos de soldagem.

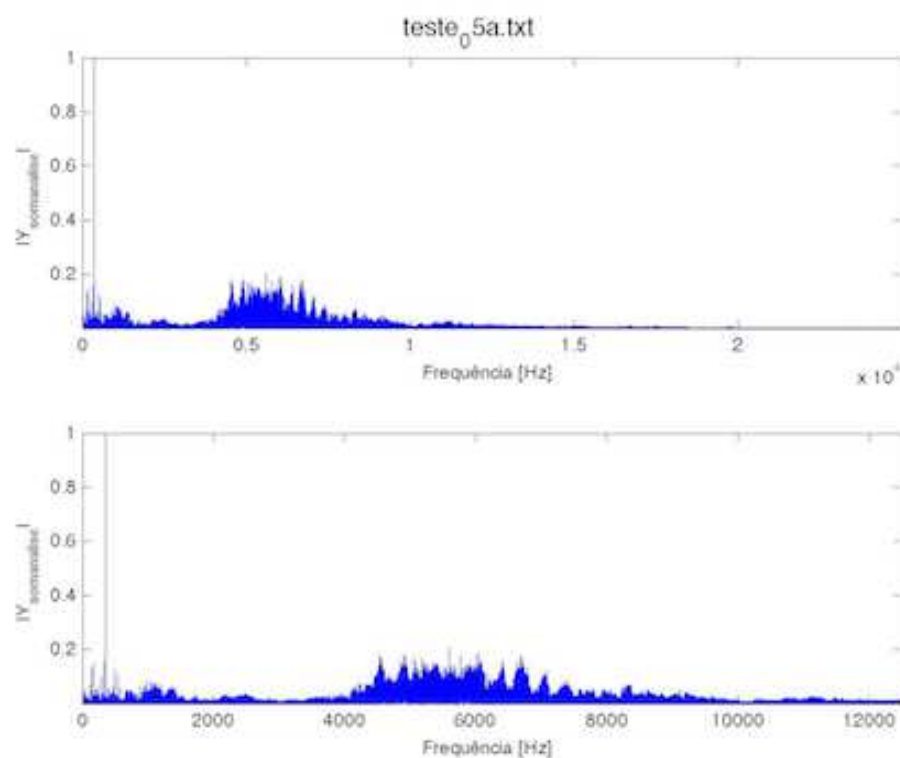


Figura 4.136 – Espectro de Frequência do teste_05a para 5 segundos de soldagem.

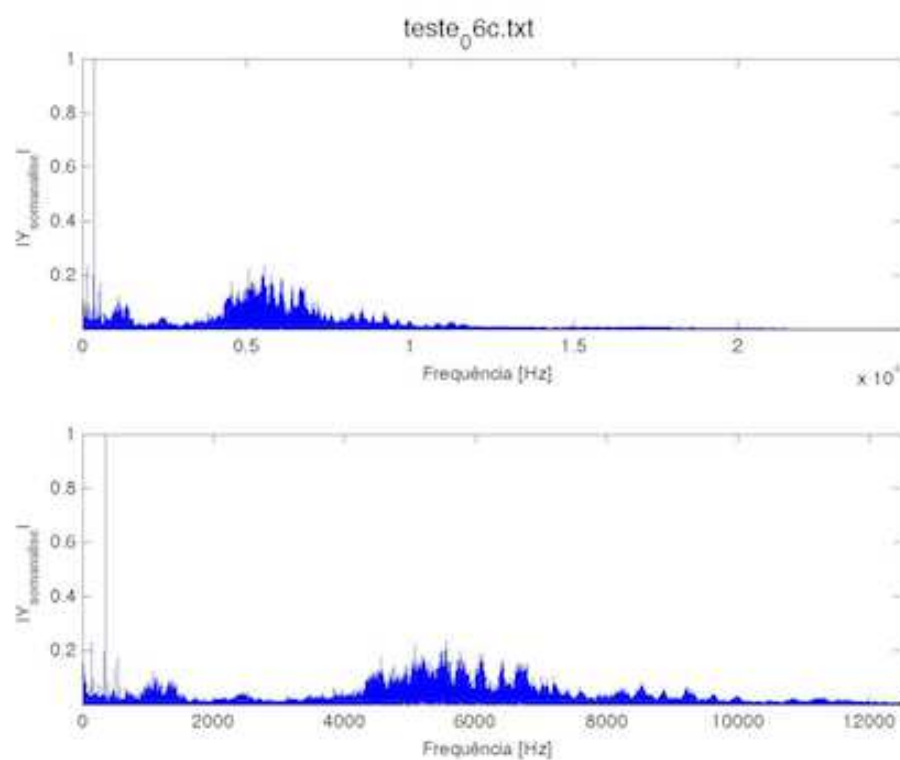


Figura 4.137 – Espectro de Frequência do teste_06c para 5 segundos de soldagem.

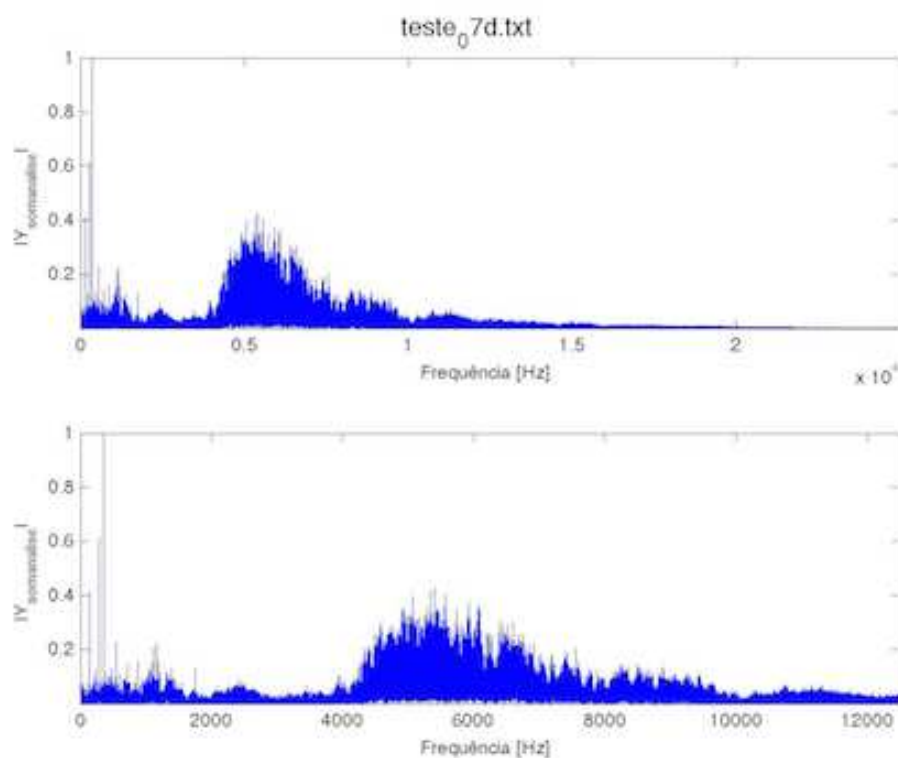


Figura 4.138 – Espectro de Frequência do teste_07d para 5 segundos de soldagem.

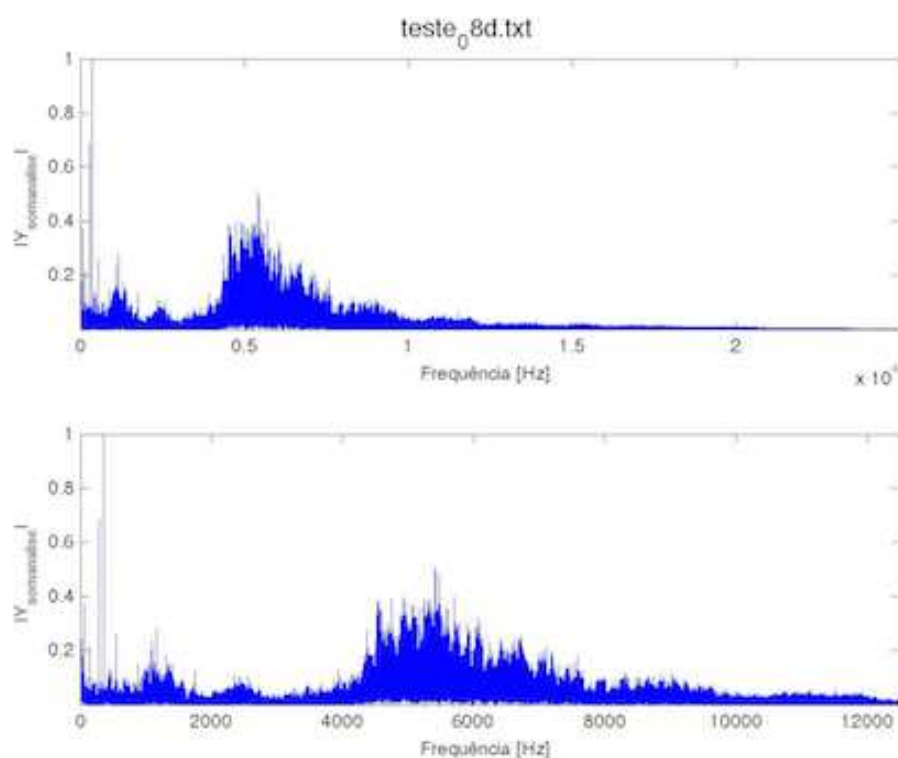


Figura 4.139 – Espectro de Frequência do teste_08d para 5 segundos de soldagem.

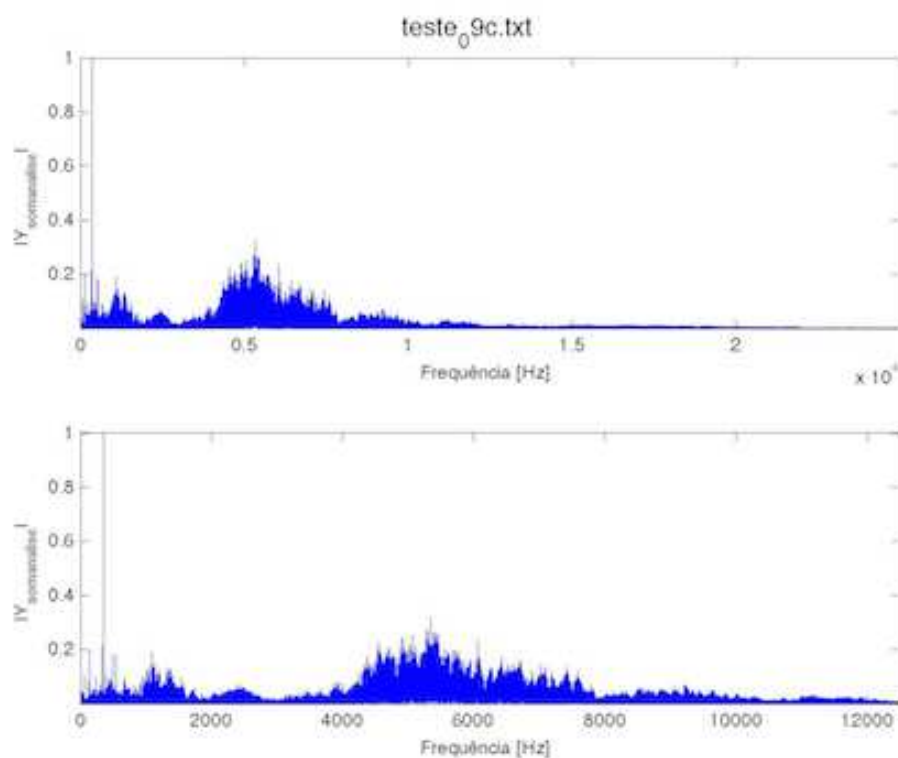


Figura 4.140 – Espectro de Frequência do teste_09c para 5 segundos de soldagem.

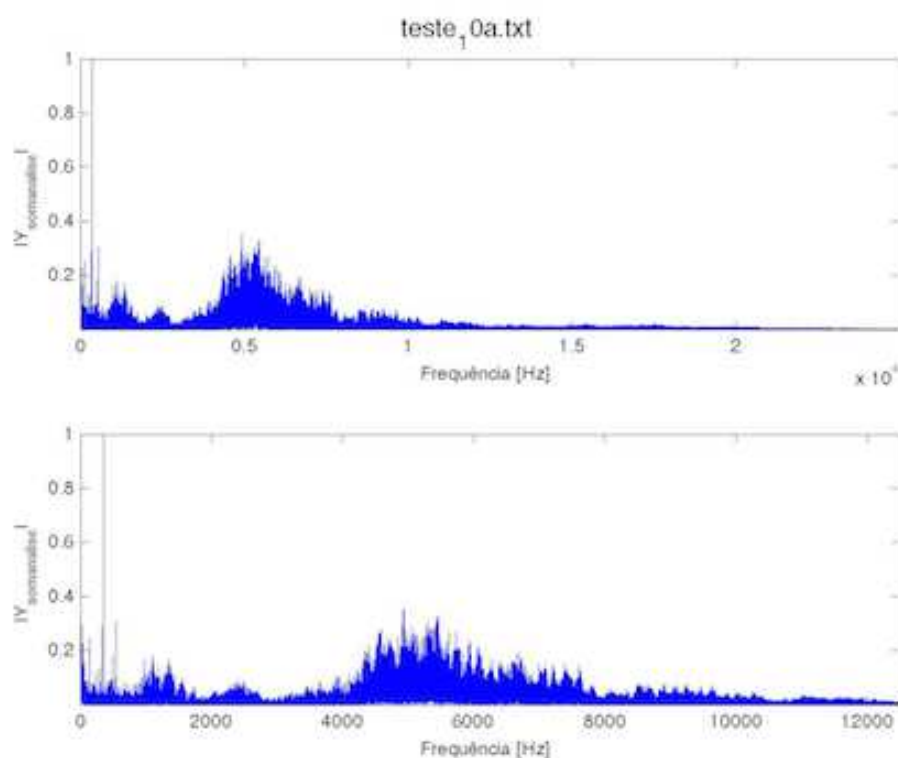


Figura 4.141 – Espectro de Frequência do teste_10a para 5 segundos de soldagem.

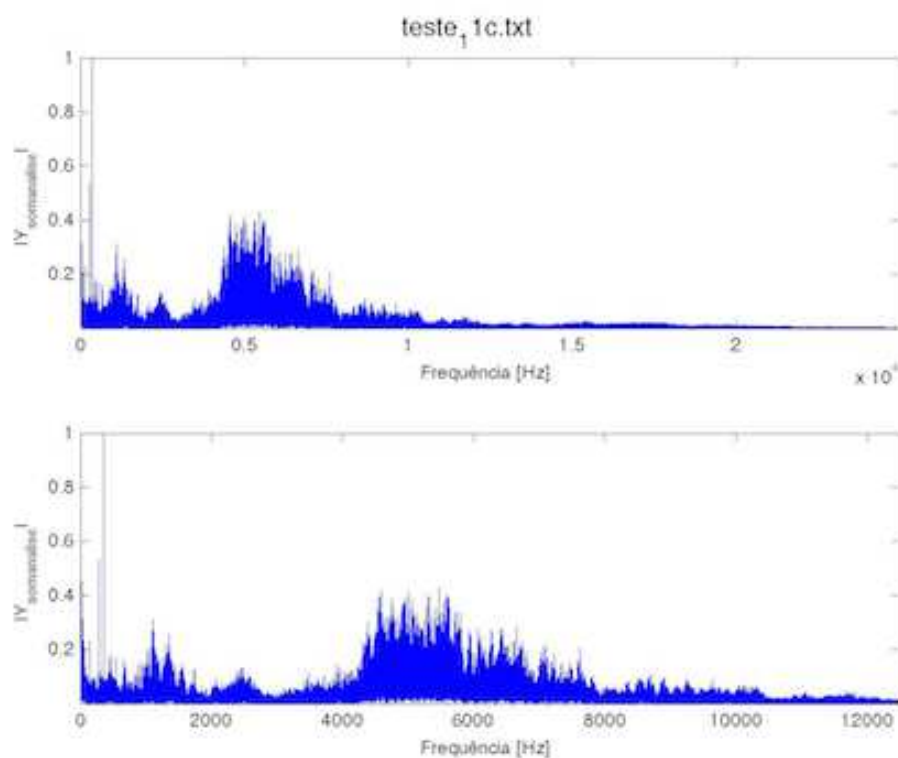


Figura 4.142– Espectro de Frequência do teste_11c para 5 segundos de soldagem.

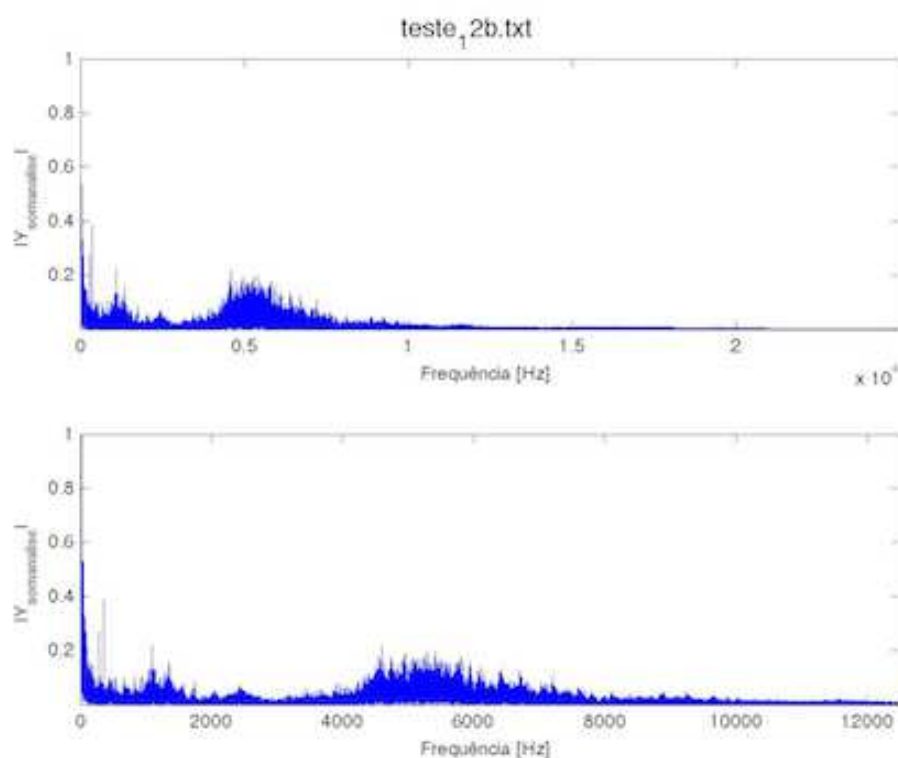


Figura 4.143– Espectro de Frequência do teste_12b para 5 segundos de soldagem.

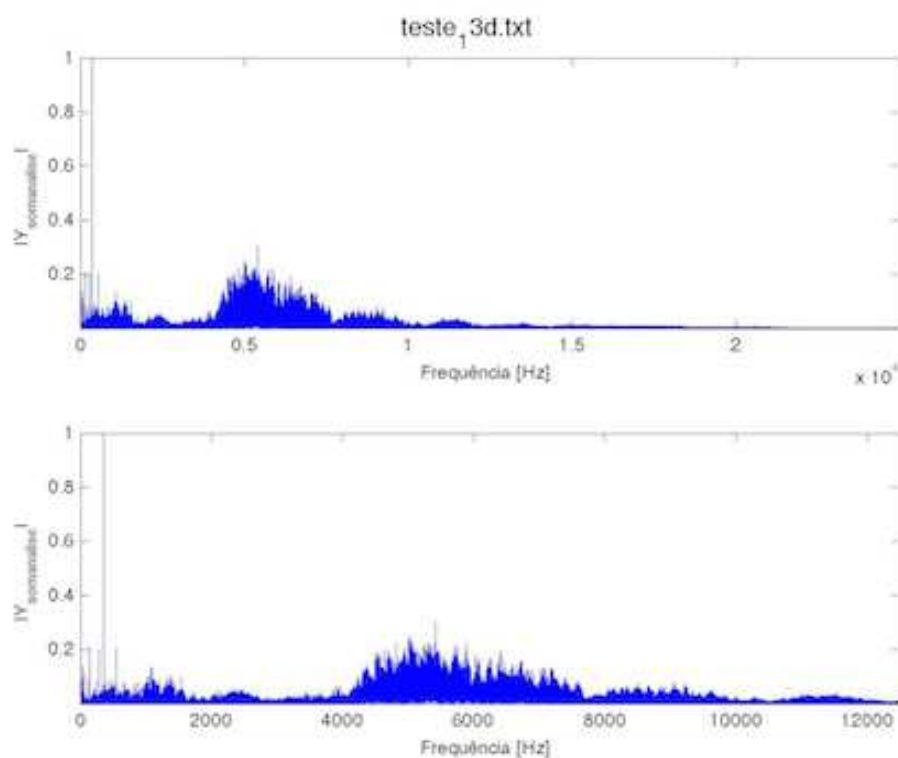


Figura 4.144– Espectro de Frequência do teste_13d para 5 segundos de soldagem.

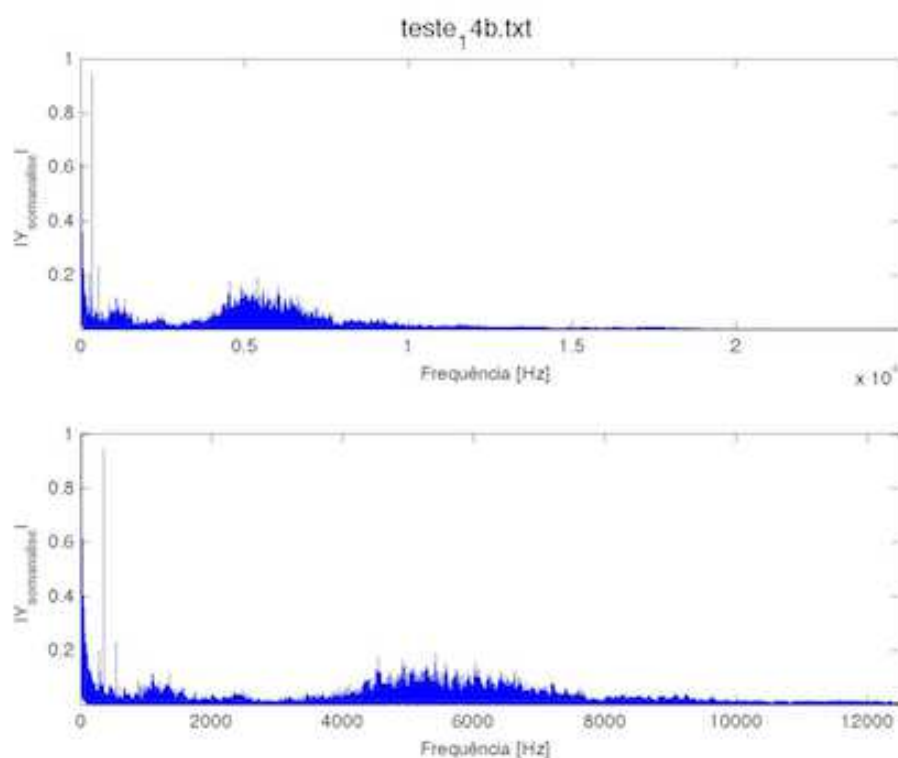


Figura 4.145– Espectro de Frequência do teste_14b para 5 segundos de soldagem.

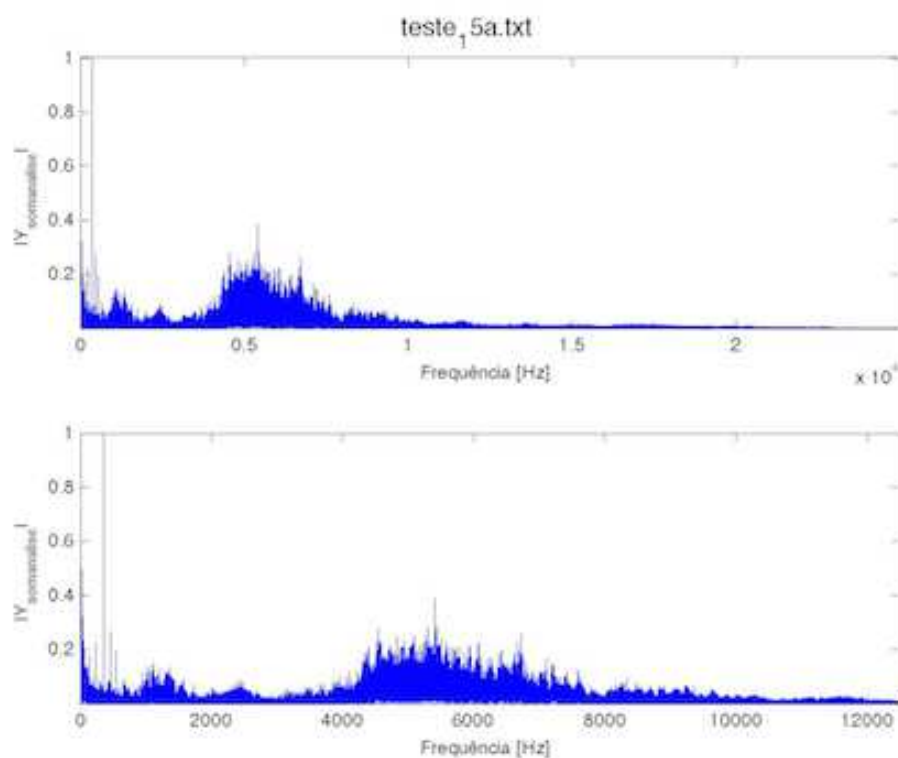


Figura 4.146– Espectro de Frequência do teste_15a para 5 segundos de soldagem.

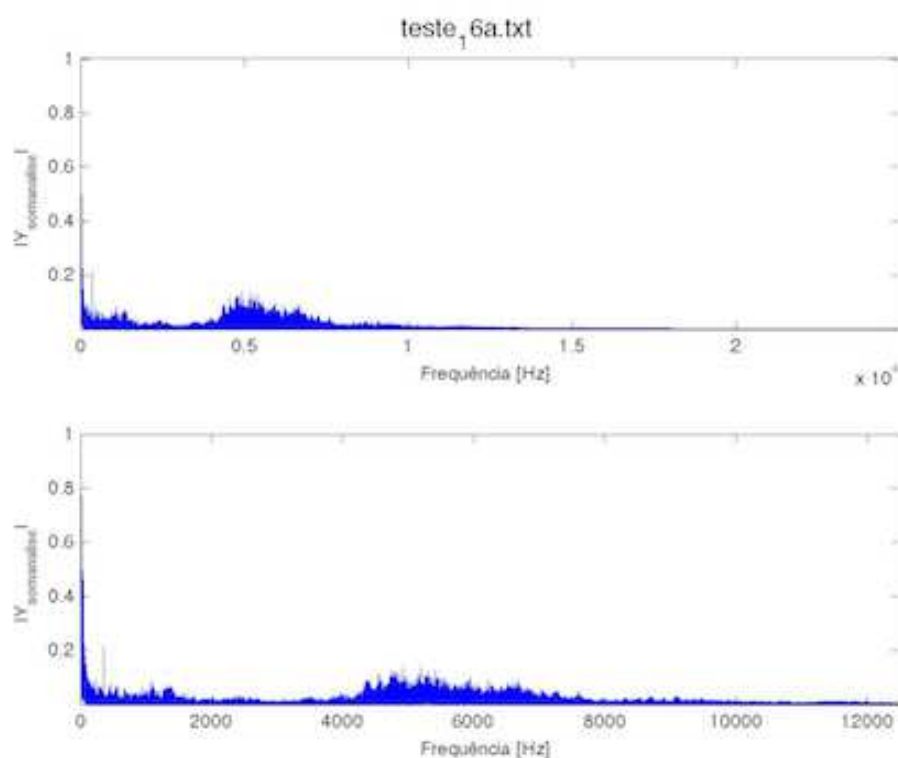


Figura 4.147– Espectro de Frequência do teste_16a para 5 segundos de soldagem.

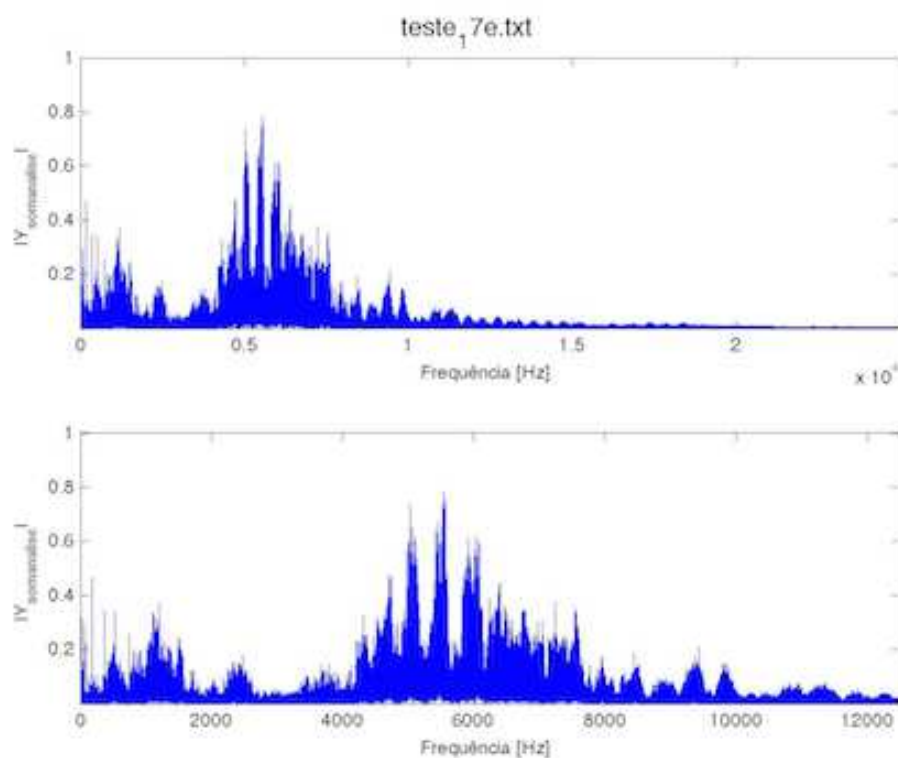


Figura 4.148– Espectro de Frequência do teste_17e para 5 segundos de soldagem.

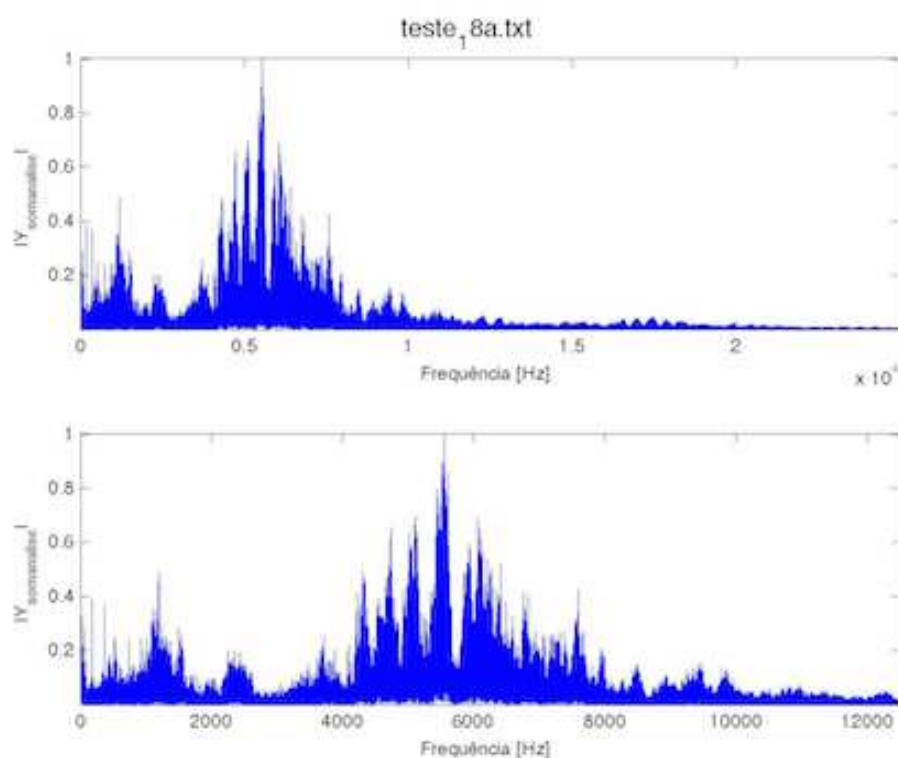


Figura 4.149– Espectro de Frequência do teste_18a para 5 segundos de soldagem.

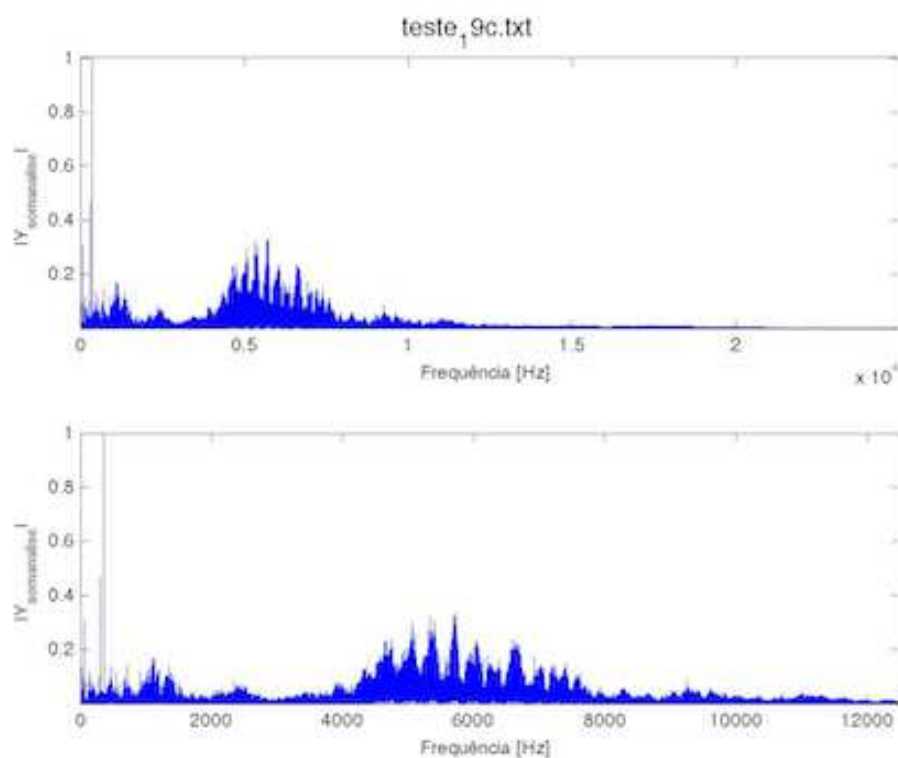


Figura 4.150– Espectro de Frequência do teste_19c para 5 segundos de soldagem.

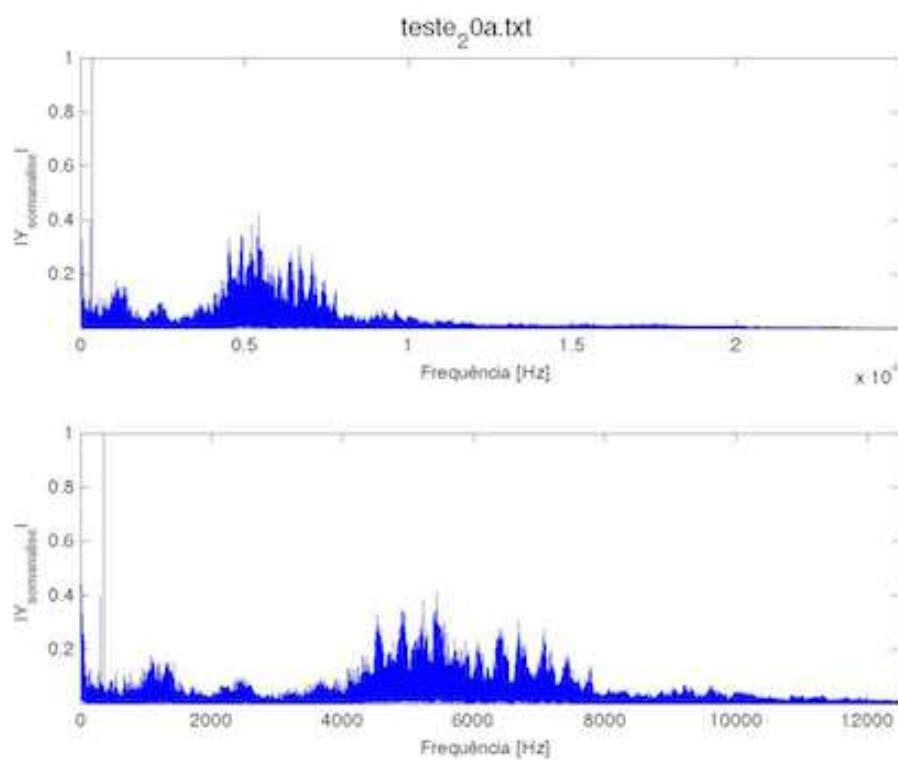


Figura 4.151– Espectro de Frequência do teste_20a para 5 segundos de soldagem.

Apêndice V – Estudo do número de pontos para cálculo do RMS móvel (item 4.3.2.2)

Pode-se observar pelas Figuras, que saindo de $0,5 \cdot \text{TOSC}$ até $13 \cdot \text{TOSC}$, passa-se de uma condição onde há ganho no sinal, tem-se a legibilidade ótima do sinal ($2 \cdot \text{TOSC}$) e chega-se ($\geq 5 \cdot \text{TOSC}$) à uma descaracterização dos pontos de apagamento e abertura do arco de solda.

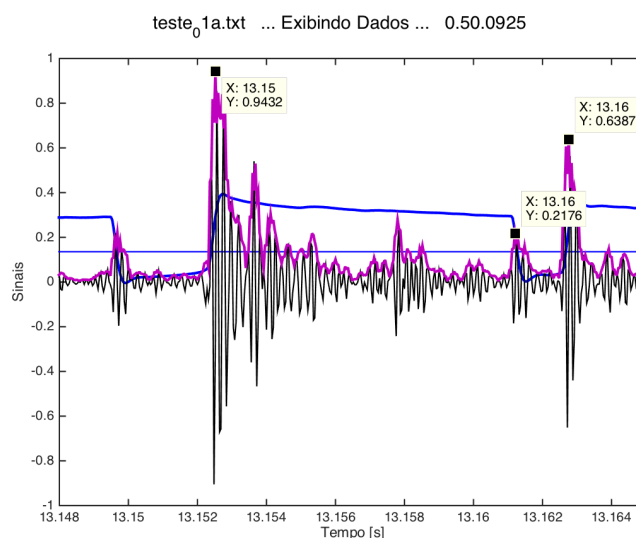


Figura 4.152 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($0,5 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 0,0925 \text{ ms} \rightarrow 3$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

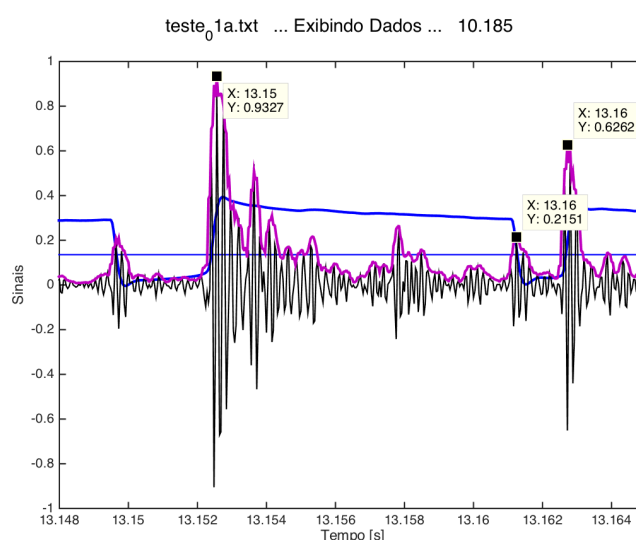


Figura 4.153 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($1,0 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 0,185 \text{ ms} \rightarrow 5$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

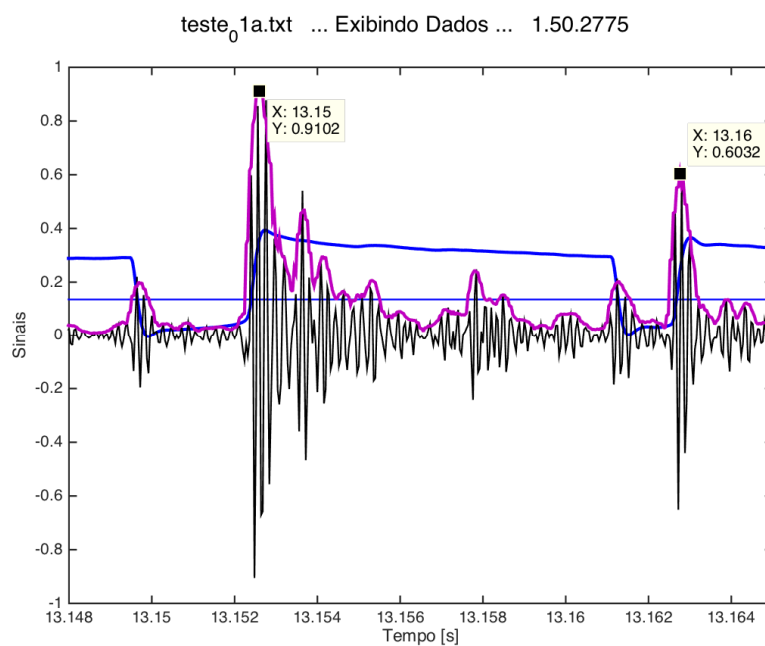


Figura 4.154 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($1.5 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 0,2775 \text{ ms} \rightarrow 7$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

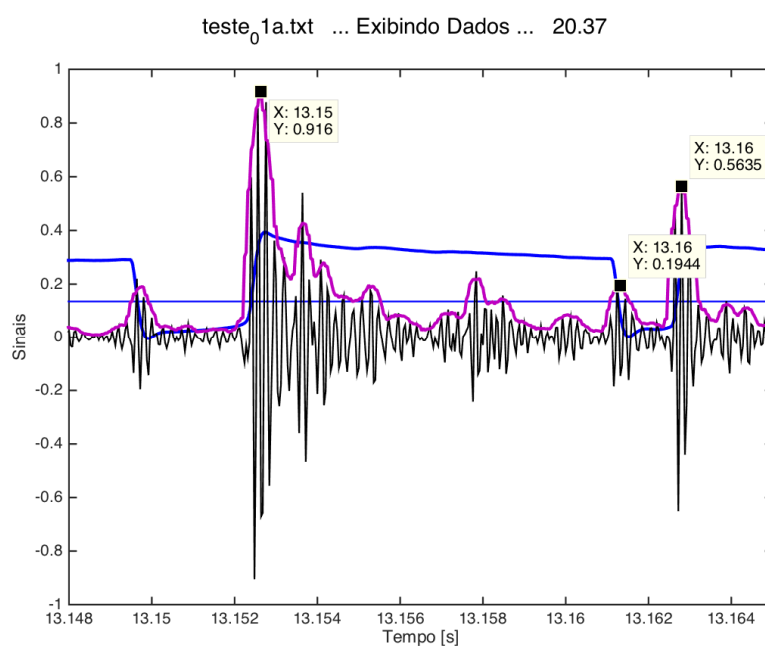


Figura 4.155 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($2.0 \cdot \text{TOSC} \rightarrow 0,370 \text{ ms} \rightarrow 9$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

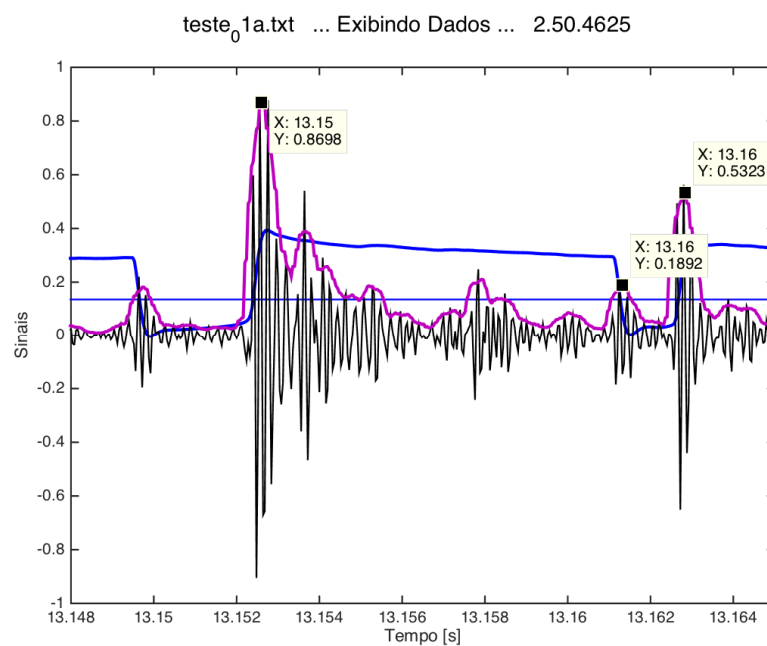


Figura 4.156 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($2.5 \cdot TOSC \rightarrow 0,4625 \text{ ms} \rightarrow 11$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referência para o processamento).

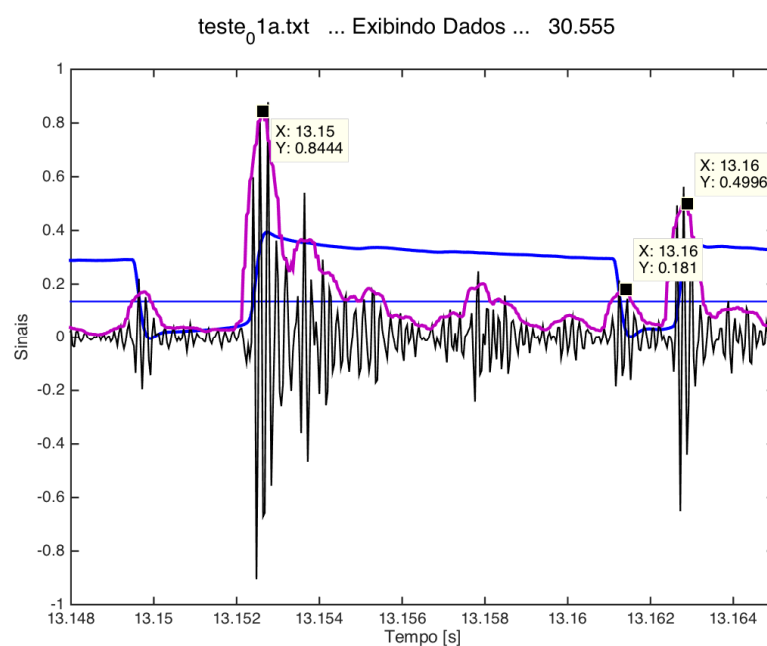


Figura 4.157 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($3.0 \cdot TOSC \rightarrow 0,555 \text{ ms} \rightarrow 13$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referência para o processamento).

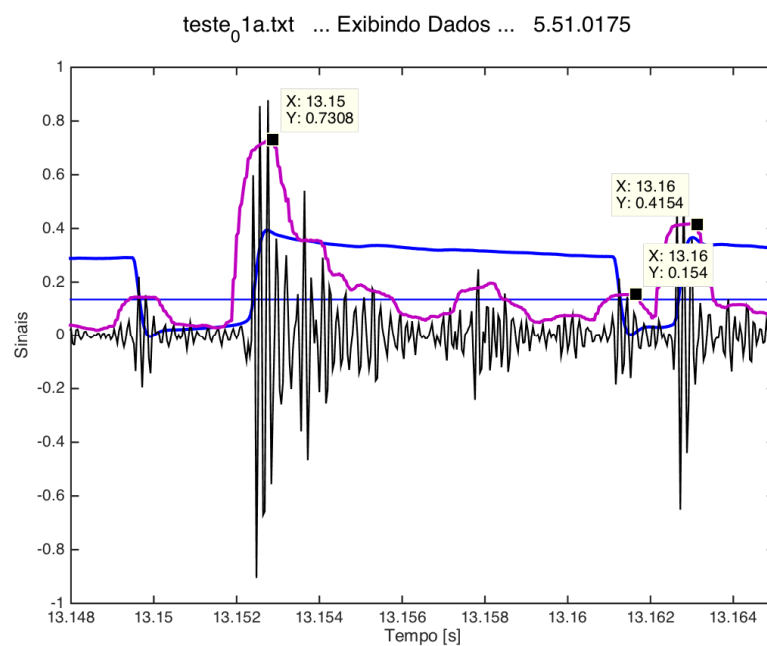


Figura 4.158 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($5.5 \cdot TOSC \rightarrow 1,0175 \text{ ms} \rightarrow 25$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

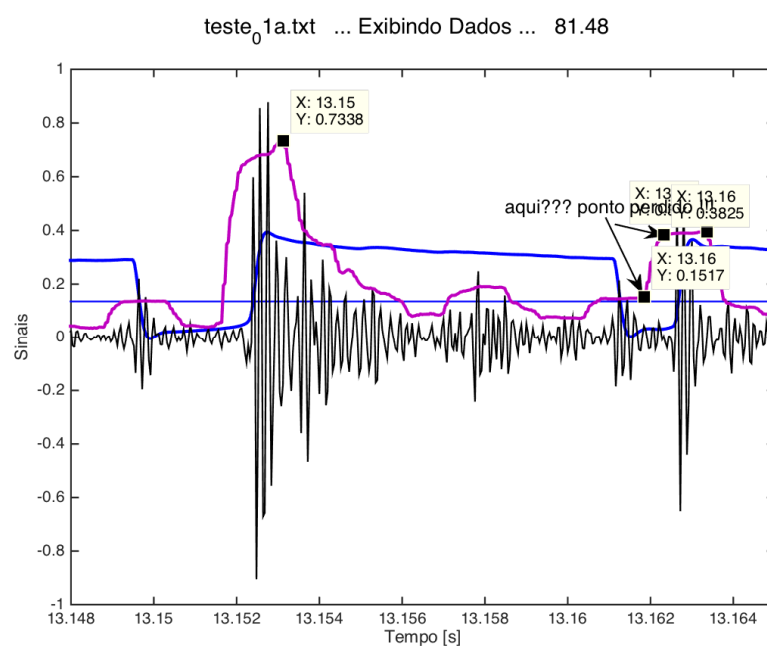


Figura 4.159 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($8.0 \cdot TOSC \rightarrow 1,48 \text{ ms} \rightarrow 37$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

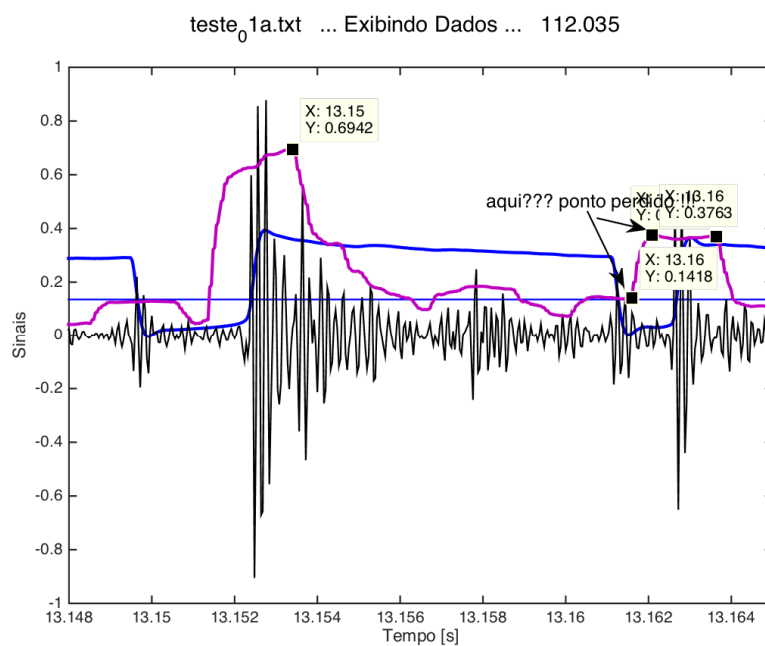


Figura 4.160 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($11.0 \cdot TOSC \rightarrow 2,035 \text{ ms} \rightarrow 51$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

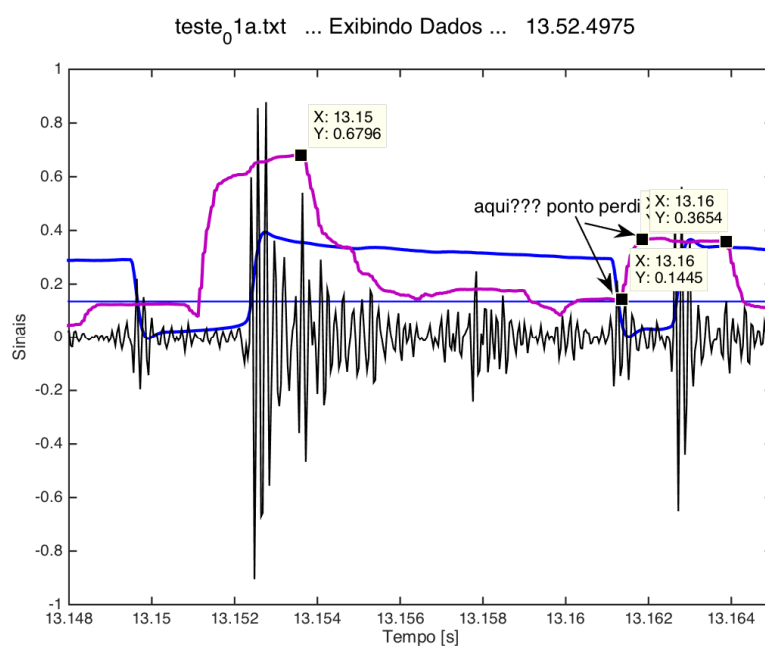


Figura 4.161 – Detalhes do sinal sonoro e RMS ($13 \cdot TOSC \rightarrow 2,405 \text{ ms} \rightarrow 61$ pontos) do teste_01a (considerado um sinal de referencia para o processamento).

Apêndice VI – Estudo da Determinação do Limiar de Amplitude dos Picos de Abertura de Arcos (4.3.3.1.2)

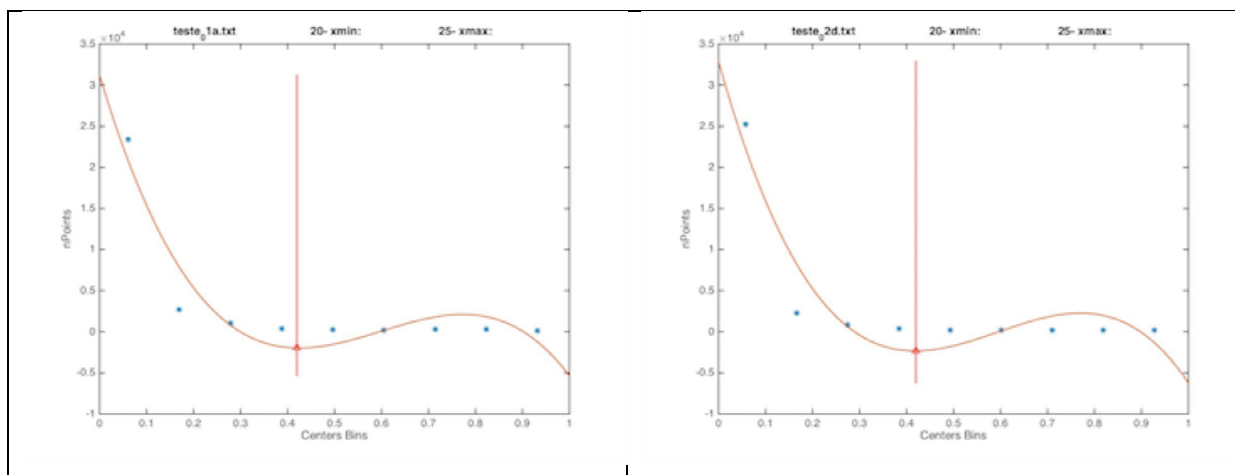


Figura 4.162 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 01 e 02.

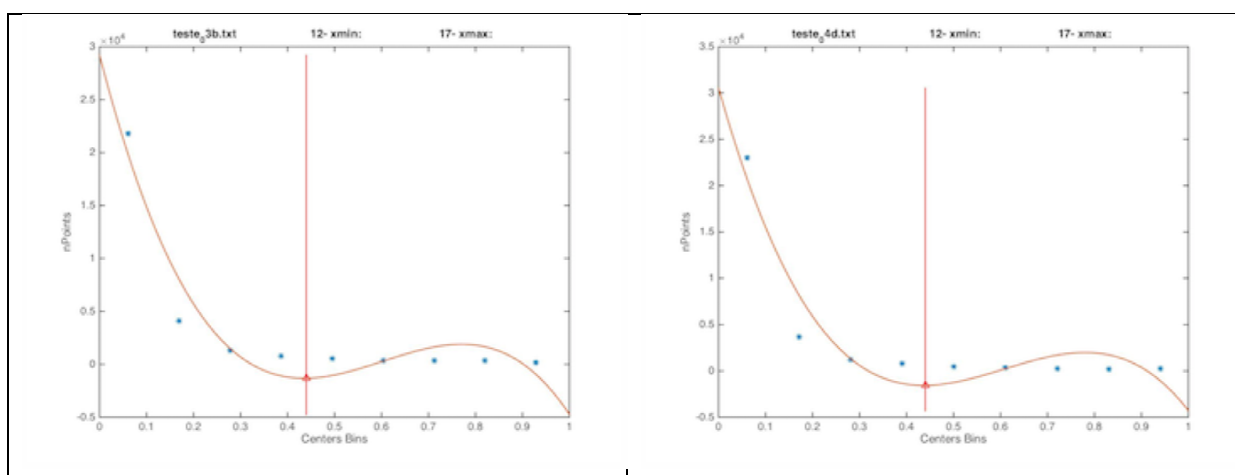


Figura 4.163 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 03 e 04.

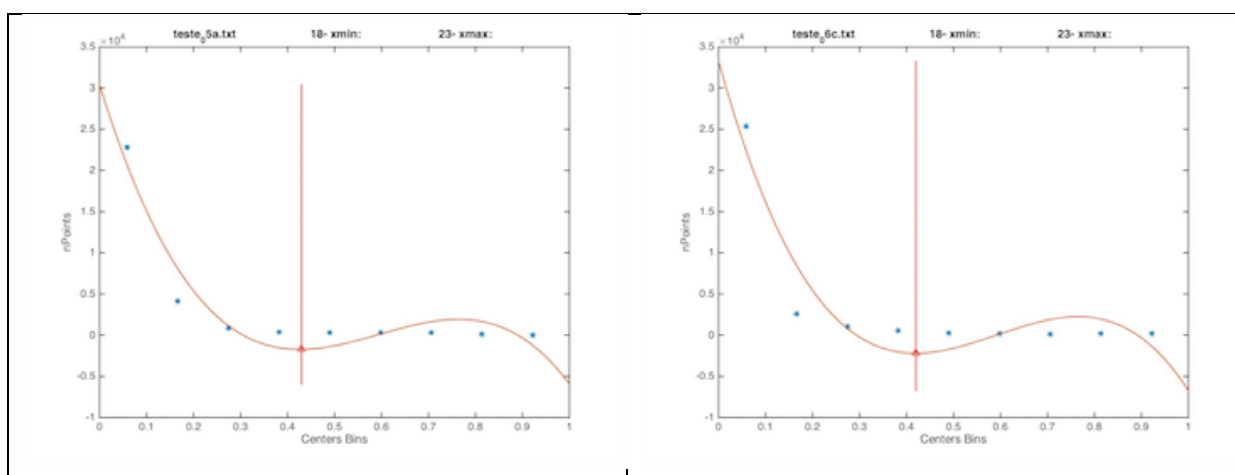


Figura 4.164 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 05 e 06.

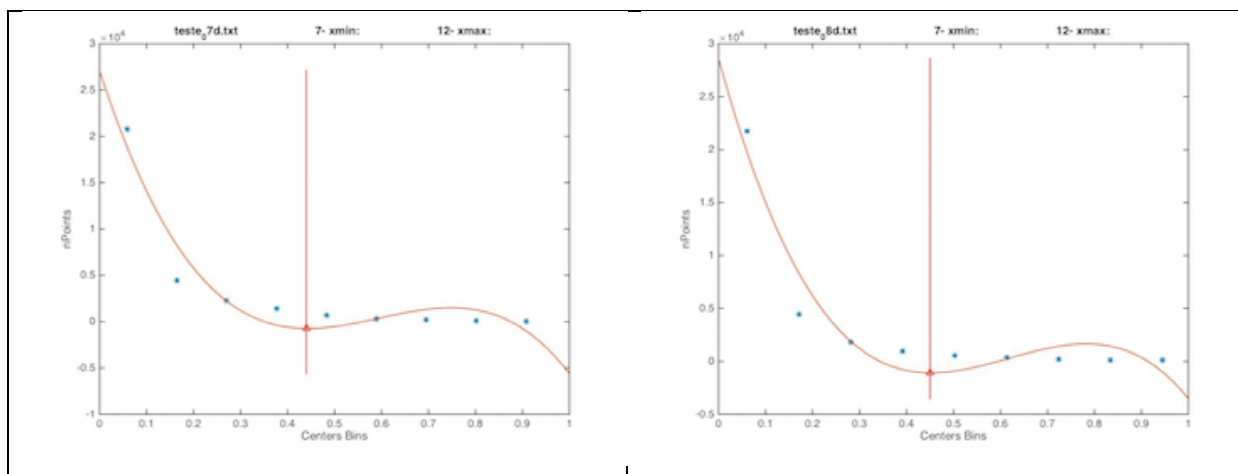


Figura 4.165 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 07 e 08.

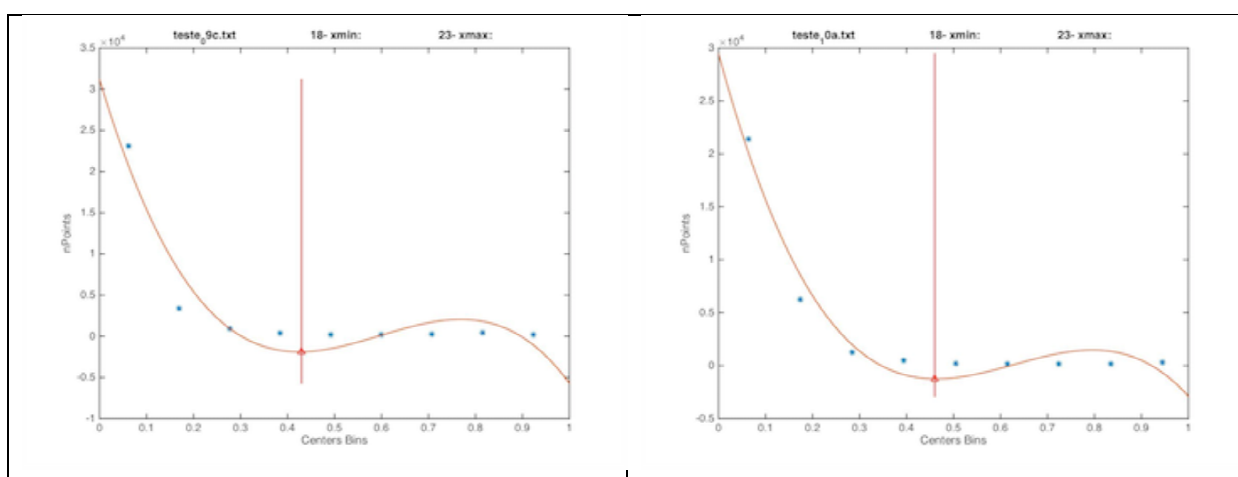


Figura 4.166 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 09 e 10.

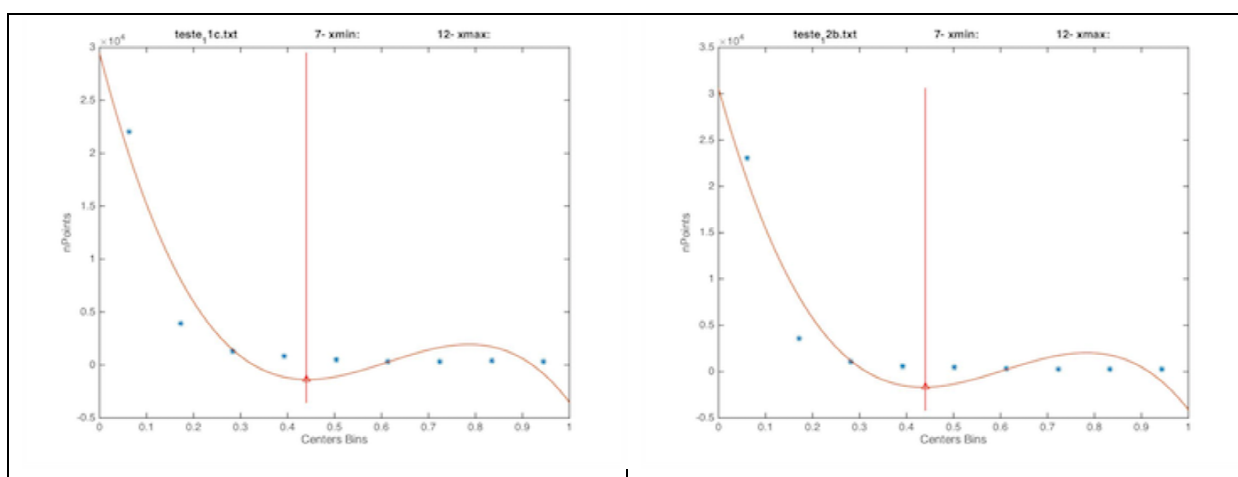


Figura 4.167 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 11 e 12.

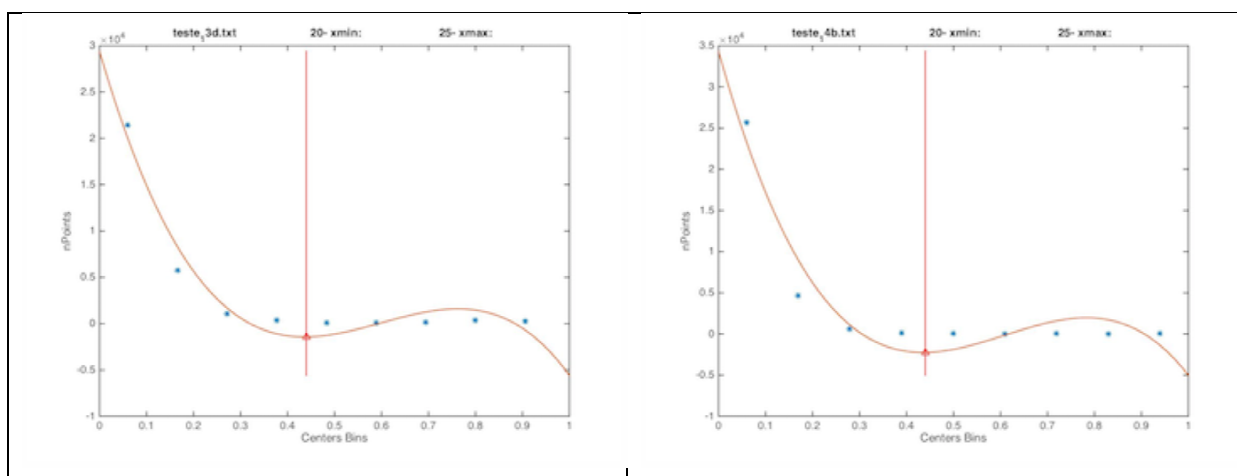


Figura 4.168 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 13 e 14.

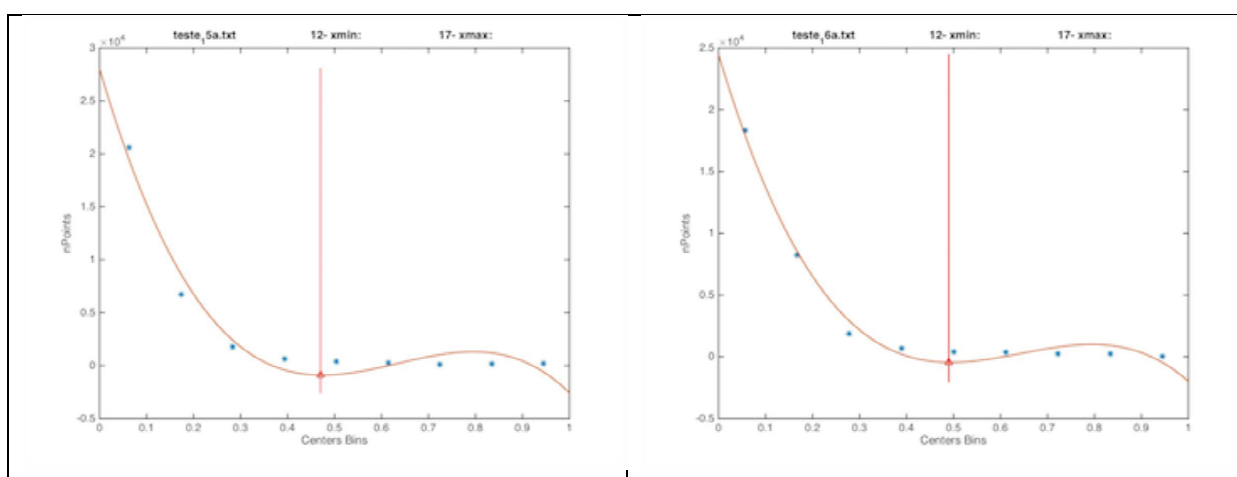


Figura 4.169 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 15 e 16.

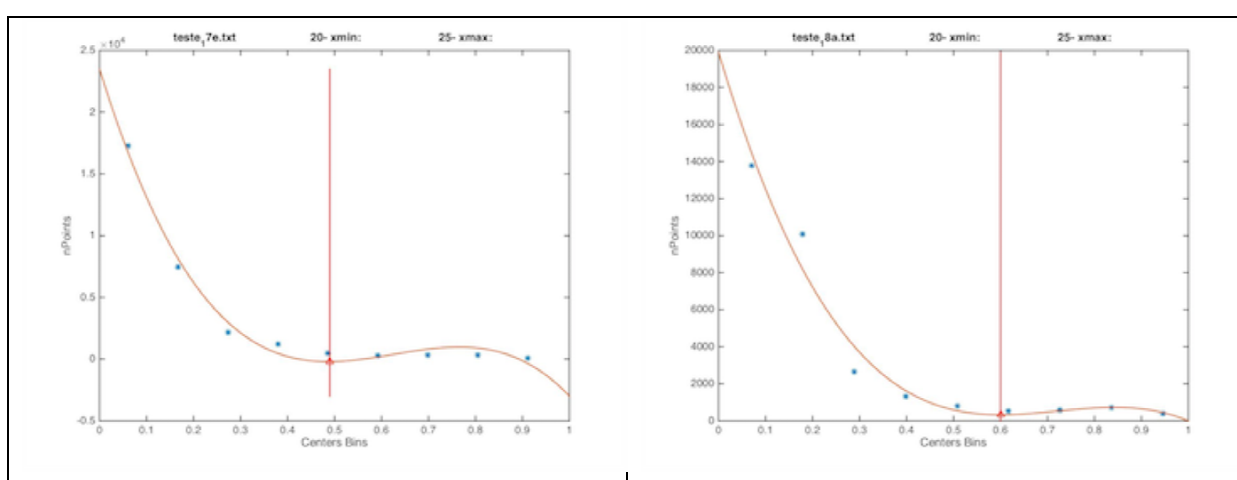


Figura 4.170 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 17 e 18.

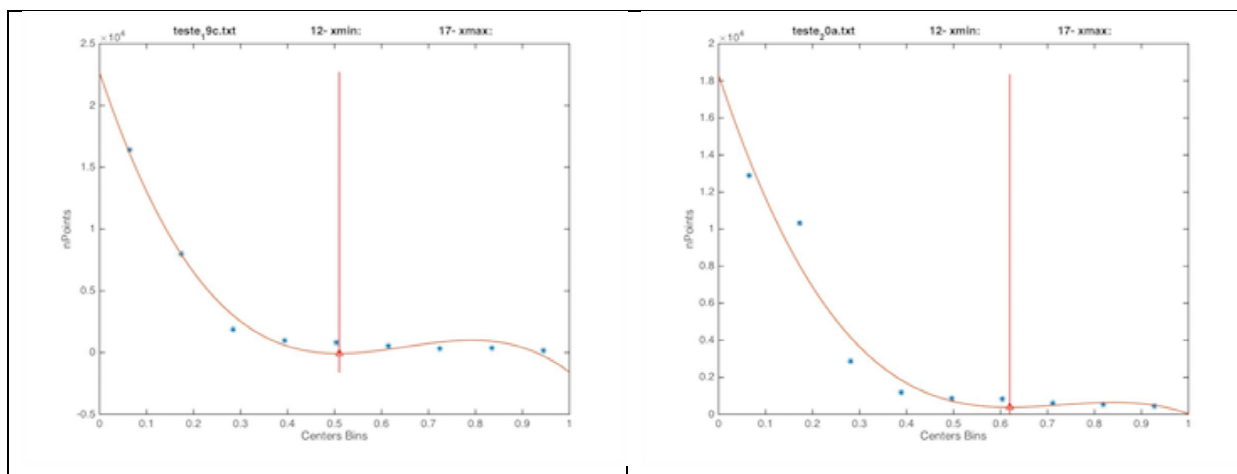


Figura 4.171 – Limiar de amplitude para picos de abertura de arco, testes 19 e 20.