

**MONITORAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFETOS NA SOLDAGEM TIG
UTILIZANDO TÉCNICAS DE ESPECTROMETRIA**

DANIEL FLÁVIO VIDAL BEBIANO

MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

DANIEL FLÁVIO VIDAL BEBIANO

ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM – 024A/08

BRASÍLIA/DF: JULHO - 2008

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

**MONITORAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA
SOLDAGEM TIG UTILIZANDO TÉCNICAS DE
ESPECTROMETRIA**

DANIEL FLÁVIO VIDAL BEBIANO

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

APROVADA POR:

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

**Prof. Geovany Araújo Borges (DSc, UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Louriel Oliveira Vilarinho (DSc, UFU)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 25 DE JULHO DE 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

BEBIANO, DANIEL FLÁVIO VIDAL

Monitoração e Localização de Defeitos na Soldagem TIG Utilizando Técnicas de Espectrometria [Distrito Federal] 2008.

xv, 141p, 210 x 297mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2008).

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

Departamento de Engenharia Mecânica.

1 Monitoração

4 TIG

2 Localização

5 Espectroscopia

3 Defeitos

6 Detecção de mudança

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BEBIANO, D. F. V. (2008). Monitoração e Localização de Defeitos na Soldagem TIG Utilizando Técnicas de Espectrometria [Distrito Federal] 2008. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-024A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniel Flávio Vidal Bebiano

TÍTULO: Monitoração e Localização de Defeitos na Soldagem TIG Utilizando Técnicas de Espectrometria

GRAU: Mestre

ANO: 2008

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

Daniel Flávio Vidal Bebiano

SHIN Qi 7 conjunto 7 casa 10

70.515 – 070 Brasília – DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me possibilitado todas as condições para realizar este trabalho.

À minha família, meu pilar e refúgio.

Aos colegas e amigos do GRACO, em especial Marrocos, Fernad, Éber e Luciano Franco.

Aos professores pelos ensinamentos, dicas e suporte, em especial ao orientador prof. Sadek e ao prof. Guilherme.

À Capes pelo apoio financeiro.

RESUMO

MONITORAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDAGEM TIG UTILIZANDO TÉCNICAS DE ESPECTROMETRIA

Autor: Daniel Flávio Vidal Bebiano

Programa de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, julho de 2008.

Há um esforço das indústrias em aumentar a qualidade dos produtos, aprimorar os métodos produtivos e reduzir o custo do processo. Dentre esses processos encontra-se a soldagem. Há vários estudos sobre controle da soldagem e utilização de sensores para monitorar a solda. Nesse sentido, este trabalho apresenta um sistema de monitoração *on-line* não intrusivo capaz de detectar defeitos na soldagem TIG. Desse modo, a etapa de inspeção terá seu tempo reduzido assim como os custos envolvidos. O sensor avaliado é o espectrômetro. Esse dispositivo capta perturbações no arco elétrico por meio da espectroscopia de emissão. A monitoração é feita por meio do cálculo da temperatura dos elétrons - pelo método da razão das intensidades relativas - ou pela intensidade de algumas linhas espectrais escolhidas. Alguns experimentos foram realizados para a simulação de defeitos. Foram utilizados algoritmos baseados em métodos estatísticos (estocásticos) para tratamento dos dados a fim de indicar a presença de defeitos e a sua localização. Por fim, é feita uma correlação entre a solda defeituosa, o sinal obtido e a indicação da posição dos defeitos. Demonstra-se que o sistema aplicado (sensor e algoritmos) é capaz de detectar os defeitos após a realização da solda e discute-se a possibilidade da detecção em tempo real.

ABSTRACT

GTAW WELDING DEFECTS MONITORIMENT AND LOCALIZATION USING SPECTROMETRY TECHNIQUES

Author: Daniel Flávio Vidal Bebiano
Master degree in Mechatronic Systems
Brasília, 2008, july.

There is an effort made by industries to improve product quality and production methods, and to decrease the production costs. Welding is one of these processes. There are several studies about controlling or monitoring the welding process. This work presents an on-line non-intrusive monitoring system capable of detecting TIG weld defects. In this way, inspection step will take less time and lower costs. The sensor applied was a spectrometer. It captures perturbations on the electrical arc. Monitoriment is made by the calculation of electronic temperature of relative intensity lines or the normalized absolute intensity of chosen lines. Experiments were made to simulate weld defects. Statistical (stochastic) algorithms were tested to indicate those defects presence and their localization. The work demonstrates that the applied system composed by sensor and algorithms is capable of detecting defects after the welding process and it is discussed the possibility of real-time detection.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	SOLDAGEM.....	3
2.1.1	Técnica de União	3
2.1.2	Solda a Arco Elétrico.....	4
2.1.3	Solda TIG ou GTAW	6
2.1.3.1	Avaliação Geral	6
2.1.3.2	Variáveis de Influência na Soldagem TIG	8
2.2	ESPECTROSCOPIA	9
2.2.1	Introdução	9
2.2.2	Espectroscopia de emissão e caracterização do plasma	12
2.2.3	Temperatura Eletrônica	12
2.3	PROCESSOS ESTOCÁSTICOS E DETECÇÃO DE MUDANÇA	16
2.3.1	Processos estocásticos	17
2.3.1.1	Variável aleatória.....	17
2.3.1.2	Função e Distribuição de Probabilidade.....	17
2.3.1.3	Processos estocásticos	19
2.3.2	Detecção de mudança	20
2.3.2.1	Fluxograma de detecção	21
2.3.2.2	Filtros Adaptativos	22
2.3.2.3	Medição da Distância	25
2.3.2.4	Regras de Parada ou Alarme	26
2.3.2.5	Exemplos de algoritmos de detecção.....	28
2.3.2.6	Algoritmos Baseados em Janela Móvel.....	30
2.4	MONITORAÇÃO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM	33
3	MONTAGENS, EXPERIMENTOS E METODOLOGIA.....	35
3.1	MONTAGEM DE COMUNICAÇÃO COM A MÁQUINA DE SOLDA	35
3.2	NOVA PROPOSTA DE COMUNICAÇÃO COM A MÁQUINA DE SOLDA	36
3.3	TESTE DE CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA DO ARCO.....	37
3.4	MONTAGEM PARA ESTUDO DO ESPECTRO DO ARCO	39
3.5	MONTAGEM DA PRIMEIRA BATERIA DE TESTES	45
3.6	MONTAGEM DA SEGUNDA BATERIA DE TESTES	53

3.7	TESTE DA RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE RELATIVA E CORRENTE	61
3.8	TEMPERATURA ELETRÔNICA E LINHAS ESPECTRAIS.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1	DETECÇÃO DE MUDANÇA BASEADA EM UM MODELO	75
4.2	DETECÇÃO DE MUDANÇA BASEADA EM JANELA MÓVEL	79
4.3	DETECÇÃO BASEADA EM TESTE DE HIPÓTESES NA CURVA NORMAL	89
5	MONITORAMENTO E DETECÇÃO EM TEMPO REAL	94
6	CONCLUSÕES	96
7	RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
	APÊNDICES.....	105
	APÊNDICE A – Figuras das experiências.....	106
	APÊNDICE B – Tabelas de Desempenho	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processos de soldagem (modificado, Norish, 1992).....	3
Figura 2.2 - Detalhe da junta soldada (Marques, 1991).	4
Figura 2.3 - Característica estática do arco (Modenesi, 2001).	5
Figura 2.4 - Relação entre tensão e comprimento do arco (Modenesi, 2001).	6
Figura 2.5 - Região do arco no processo TIG (Modenesi e Marques, 2000).	7
Figura 2.6 - Equipamentos básicos para soldagem TIG (modificado Millerwelds).....	7
Figura 2.7 - Relação entre a tensão do arco e a largura do cordão de solda (Modenesi, 2001).....	8
Figura 2.8 – Fenômeno da emissão de fótons (modificado, How Stuff Works, 2001).	10
Figura 2.9 – Linhas espectrais no mesmo estado de ionização (Vilarinho, 2003).	13
Figura 2.10 – Esquema de variável aleatória.....	17
Figura 2.11 - Exemplos de distribuição normal (Shimakura, 2004)	18
Figura 2.12 – Exemplos de processos estocásticos segundo diferentes distribuições (modificado Manolakis <i>et al</i> , 2005).	20
Figura 2.13 – Fluxograma da detecção de mudança (modificado Gustafsson, 2000).....	22
Figura 2.14 – Detalhe da regra de parada(modificado Gustafsson, 2000).	22
Figura 2.15 – Proposta de diferentes modelos para a janela móvel (Gustafsson, 2000).	30
Figura 3.1 – Montagem original para comunicação entre máquina e PC.....	35
Figura 3.2 – Nova montagem para comunicação entre máquina e PC.....	36
Figura 3.3 – Característica estática do arco TIG.	38
Figura 3.4 - Relação encontrada entre tensão e comprimento do arco para diferentes correntes.....	39
Figura 3.5 – Observação do espectro do arco elétrico na base refrigerada.	39
Figura 3.6 – Funcionamento do CCD do espectrômetro (modificado, Spectral Products).	40
Figura 3.7 – Região para captação do espectro do arco.	41
Figura 3.8 – Esquema para focalização da área de interesse no plasma.	42
Figura 3.9 – Espectro do argônio para correntes de 90 e 130A.....	43
Figura 3.10 - Espectro do arco de uma placa de aço, correntes de 90 e 130 A.	44
Figura 3.11 – Comparativo entre espectros sobre placa de cobre e de aço.	45
Figura 3.12 – Montagem da primeira bateria de testes.....	46
Figura 3.13 – Ilustração da mesa posicionadora.....	46

Figura 3.14 - Temperatura Eletrônica numa chapa sem defeitos.	49
Figura 3.15 - Defeito no fluxo do gás de proteção.	50
Figura 3.16 - Experimento com “defeitos” de 2 segundos na corrente.	51
Figura 3.17 - Defeitos de graxa e inclusão metálica.....	52
Figura 3.18 - Montagem da segunda bateria de testes.....	54
Figura 3.19 – Resultado do experimento 13.....	56
Figura 3.20 - Resultado do experimento 14.	58
Figura 3.21 - Resultado do experimento 18.	59
Figura 3.22 – Experimento com grandes jatos de água.	60
Figura 3.23 – Experiência com água borrifada.....	61
Figura 3.24 – Experimento da relação entre intensidade relativa e penetração.	62
Figura 3.25 – Experimento com corrente variável	63
Figura 3.26 – Gráfico comparativo entre volume da solda e intensidade de linha.....	64
Figura 3.27 – Primeiro comparativo entre Te e linhas espectrais do ferro.....	66
Figura 3.28 – Segundo comparativo entre Te e linhas espectrais do ferro.....	67
Figura 3.29 – Terceiro comparativo entre Te e linhas espectrais do ferro.	68
Figura 3.30 – Primeiro comparativo entre Te e linhas espectrais do argônio.	69
Figura 3.31 – Segundo comparativo entre Te e linhas espectrais do argônio.	70
Figura 3.32 – Comparativo entre Te e linhas espectrais do hidrogênio.	71
Figura 4.1 – Teste de normalidade dos dados de linhas espectrais a 90 A.....	73
Figura 4.2 - Teste de normalidade dos dados de linhas espectrais a 150 A.	74
Figura 4.3 – Resultado do algoritmo <i>CUSUM LS</i> para o experimento 14.	75
Figura 4.4 – Resultado do algoritmo <i>CUSUM RLS</i> para o experimento 14.....	76
Figura 4.5 – Comparativo entre filtros adaptativos para o experimento 14.	77
Figura 4.6 – Comparativo entre <i>CUSUM LS</i> e o <i>KF</i> para o experimento 14.....	78
Figura 4.7 – Detecção com <i>KF</i> e <i>CUSUM</i> para o experimento 14.	79
Figura 4.8 - Resultado do algoritmo <i>Brandt’s GLR</i> para o experimento 14.	80
Figura 4.9 – Desempenho do <i>KF</i> com janela móvel para o experimento 14.	81
Figura 4.10 – Comparativo de algoritmos de medição da distância, experimento 14.....	83
Figura 4.11 – Novos parâmetros do algoritmo de Diferenças Médias, experimento 14.	84
Figura 4.12 – Comparativo de algoritmos de medição da distância, experimento 14.....	86
Figura 4.13 - Novos parâmetros para o algoritmo Brandt para o experimento 14.....	87
Figura 4.14 – Comparativo de algoritmos de medição da distância, experimento 14.....	88
Figura 4.15 – RLS com distância de Mahalanobis para o experimento 14.	90

Figura 4.16 - <i>WLS</i> com distância de Mahalanobis para o experimento 14.	91
Figura 4.17 - <i>KF</i> com distância de Mahalanobis para o experimento 14.....	92
Figura 4.18 – Algoritmo com 2 modelos e distância de Mahalanobis, experimento 14.	93
Figura 4.19 – <i>KF</i> com janela móvel e distância de Mahalanobis para o experimento 14...	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados das linhas espectrais escolhidas.....	47
Tabela 3.2 – Parâmetros base para as primeiras experiências.....	48
Tabela 3.3 – Listagem dos experimentos da segunda bateria.....	55
Tabela 3.4 – Penetração obtida no ensaio de corrente variável.....	64

SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

Soldagem:

GTAW	- Gas Tungsten Arc Welding (Solda a eletro de tungstênio)
I	- Corrente de soldagem (A)
l	- Altura do arco, distância entre eletrodo e peça (mm)
MIG	- <i>Metal Inert Gas</i> (Solda a eletrodo consumível com gás inerte)
MAG	- <i>Metal Active Gas</i> (Solda a eletrodo consumível com gás ativo)
TIG	- <i>Tungsten Inert Gas</i> (Solda a eletrodo de Tungstênio)
v	- Velocidade de soldagem (mm/s)
V	- Tensão de soldagem (V)
vg	- Vazão do gás (L/min)
ZTA	- Zona Termicamente Afetada

Espectroscopia:

A_{mr}	- Probabilidades espontâneas de transição de m para r (-)
A_{ji}	- Probabilidades espontâneas de transição de j para i (-)
c	- Velocidade da luz (m/s)
dt	- Tempo muito curto (s)
E	- Energia de um nível ou estado (eV)
E_i	- Energia no estado menos energético (eV)
E_n	- Energia do estado mais energético (eV)
g	- Peso estatístico do estado (-)
g_j	- Pesos estatísticos do estado j (-)
g_m	- Pesos estatísticos do estado m (-)
h	- Constante de Planck (J.s)
i	- Estado de ionização
I	- Intensidade de emissão da linha espectral (eV)
j	- Estado de ionização.

K_B	- Constante de Boltzmann (J/K)
LTE	- Equilíbrio Termodinâmico Local
m	- Estado de ionização.
N	- Número de partículas
N_e	- Densidade eletrônica (m^{-3})
NIST	- <i>National Institute of Standards and Technology</i>
r	- Estado de ionização
t	- Tempo (s)
T_e	- Temperatura Eletrônica (K)
ΔE	- Diferença dos intervalos de transição de energia (eV)
$Z(T_e)$	- Função de partição (-)
λ	- Comprimento de onda (nm)
ν	- Frequência da emissão do fóton (Hz)

Detecção de mudança e Estatística:

CEP	- Controle Estatístico de Processo
CUSUM	- <i>CUmulative SUM</i> (Somas Cumulativas)
$f(x)$	- Função de x
$F(x)$	- Função de distribuição de x
F_{t+1}	- Matriz de transição
fdp	- Função densidade de probabilidade
g	- Teste estatístico
GLR	- <i>Generalized Likelihood Ratio</i> (Razão de Similhança Generalizada)
GMA	- <i>Geometric Moving Average</i> (Média Geométrica Móvel)
h	- Valor de referência
H	- Matriz de medição
H_0	- Hipótese nula
H_1	- Hipótese alternativa
K	- Ganho de Kalman
KF	- <i>Kalman Filter</i> (Filtro de Kalman)
L	- Tamanho da janela móvel

LS	- <i>Least Squares</i> (Mínimos Quadrados)
P	- Matriz de covariância
$P(X)$	- Probabilidade de X
Q	- Covariância de w
R	- Covariância de v
RLS	- <i>Recursive Least Squares</i> (Mínimos Quadrados Recursivo)
s	- Valor de distância
$SPRT$	- <i>Sequential Probability Ratio Test</i> (Teste de Razão Sequencial de Probabilidade)
ta	- Tempo, instante do alarme
x	- Número real qualquer
v	- Ruído causado por uma variável aleatória
v.a.	- Variável aleatória
v.a.c.	- Variável aleatória contínua
v.a.d.	- Variável aleatória discreta
w	- Ruído causado por uma variável aleatória
WLS	- <i>Windowed Least Squares</i> (Mínimos Quadrados com Janela)
y	- Leitura, medida de um valor
α	- Nível de significância
ε	- Resíduo
λ	- Fator de esquecimento
μ	- Média variância.
σ	- Desvio-padrão
σ^2	- Variância
θ	- Estado
$\hat{\theta}$	- Estimação de θ
v	- Deslocamento, compensação

1 INTRODUÇÃO

Um dos processos de manufatura mais usados na indústria é a soldagem. Ela participa da montagem de peças e conjuntos, além da recuperação de superfícies nos diversos segmentos industriais. Para se garantir a qualidade do processo, são tomados certos cuidados, como o uso de EPS – Especificação do Processo de Soldagem – , aplicação do CEP – Controle Estatístico do Processo – e outros mais utilizados pela indústria. A verificação da qualidade faz parte do processo da sua garantia. Há métodos mais simples, como inspeções visuais, métodos pouco mais criteriosos, como ensaios não-destrutivos (ultra-som, partículas magnéticas, líquido penetrante) e também os rigorosos, realizados pelos ensaios destrutivos: tração, dureza, metalografia. As inspeções e ensaios são feitos após o processo de soldagem, e, dependendo da aplicação do produto, são feitos em todas as peças ao longo de toda a superfície soldada. Isso aumenta o custo final de produção, pois são necessários pessoas capacitadas, equipamento, insumos e horas trabalhadas.

Este trabalho faz parte de um projeto maior baseado na construção de um equipamento capaz de monitorar algumas variáveis físicas do processo de soldagem por técnicas de fusão de sensores e controlá-lo por meio da retroalimentação das informações por uma malha fechada. O objetivo desta dissertação é demonstrar a possibilidade de se implantar um sistema de monitoração de defeitos de soldagem não-destrutivo de forma *on-line* com a localização das regiões defeituosas após o processo. Há estudos nesse sentido, porém este trabalho apresenta uma nova forma para o tratamento dos dados obtidos e novas técnicas para a detecção dos defeitos. Para o estudo, foram seguidos alguns passos, como o estudo de uma nova fonte de soldagem, realização de montagens experimentais, desenvolvimento de sistema de aquisição de sinais, uso de ferramentas computacionais, entre outros.

A monitoração proposta consiste em observar o espectro que o arco elétrico da solda TIG emite. A maneira mais utilizada para a monitoração é o cálculo da Temperatura Eletrônica pelo método da intensidade relativa de certas linhas espectrais. Ela pode ser obtida na coluna do arco de solda – plasma- por meio de um espectrômetro. Porém apresenta-se outra forma de monitoração por meio da captura da intensidade de algumas linhas espectrais, sem a necessidade do cálculo da Temperatura Eletrônica.

Para a detecção e localização dos defeitos são utilizados algoritmos de detecção de mudança baseados em processos estocásticos. Faz-se um estudo do desempenho dos algoritmos, e, baseados nestes, sugerem-se novas formas para se atingir a melhor performance. A partir da localização dos defeitos não é mais necessário efetuar a inspeção em toda a peça, mas apenas naquelas regiões em que o sistema acusar uma maior probabilidade de haver defeitos. Haverá um menor custo de operação (pessoal, insumos), além do ganho no tempo de produção.

No capítulo 2 é feita uma apresentação das ferramentas utilizadas para alcançar os objetivos estabelecidos. São utilizadas principalmente três áreas de conhecimento: processos de soldagem, espectroscopia, métodos estocásticos. Na primeira área, faz-se uma breve apresentação e destacam-se os pontos mais importantes para o entendimento do trabalho. Na segunda área, o fenômeno físico envolvido no processo de monitoramento do arco elétrico é explicado. Também é apresentada a formulação do cálculo da Temperatura Eletrônica. A terceira área, que abrange a parte estatística envolvida na dissertação, faz-se uma introdução a conceitos para um melhor entendimento dos algoritmos de detecção de mudança responsáveis por acusar os defeitos durante a soldagem.

A parte prática, realizada por algumas montagens e experimentos, é apresentada no capítulo 3. É apresentada uma seqüência para se compreender os passos utilizados para atender os objetivos.

No capítulo 4 encontram-se os resultados e discussões. É feita a análise da detecção de defeitos pelos algoritmos escolhidos.

As conclusões e propostas de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM

2.1.1 Técnica de União

A soldagem ou soldadura é um processo de união de materiais utilizada para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (AWS, 1991). Objetiva-se a continuidade metálica e manutenção das características do metal base (propriedades mecânicas e metalúrgicas). Há diferentes técnicas de soldagem, cada qual para atender diferentes necessidades e garantir distintas finalidades. O esquema apresentado pela Figura 2.1 demonstra o variado leque existente. Destaca-se o processo utilizado nesta dissertação:

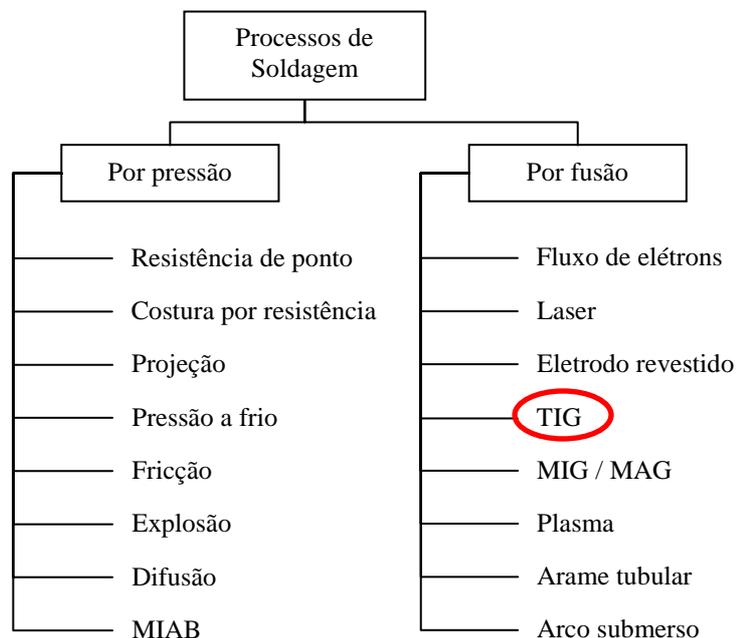


Figura 2.1 - Processos de soldagem (modificado, Norish, 1992).

2.1.2 Solda a Arco Elétrico

Dentre as técnicas de soldagem por fusão, o arco elétrico se apresenta como a principal fonte de energia utilizada, principalmente no campo da indústria. Algumas vantagens são: uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores (Modenesi, 2001).

O objetivo é fundir o metal em uma área localizada afetando ao mínimo as regiões vizinhas e antes que o calor se difunda para outras regiões. A região do arco receberá o maior aporte térmico, a vizinhança sofrerá certa alteração. Quanto mais afastado do ponto da solda, menor o calor recebido e menor a interferência da solda. À região vizinha do ponto de solda dá-se o nome de ZTA (Zona Termicamente Afetada). Ela é de suma importância, pois sofre um ciclo térmico e se não for tratada termicamente pode comprometer o funcionamento da peça em serviço. A Figura 2.2 mostra um corte do cordão de solda para visualização:

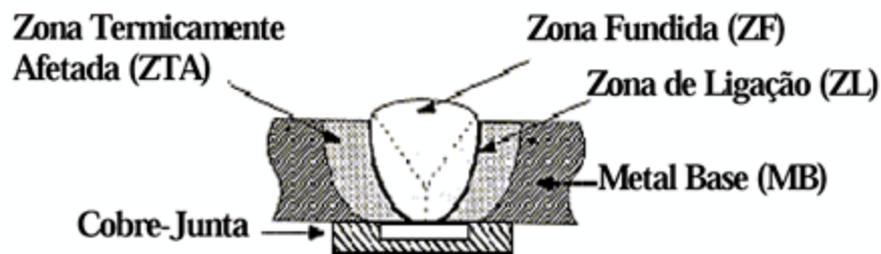


Figura 2.2 - Detalhe da junta soldada (Marques, 1991).

Um fator relevante é a característica estática do arco. Para o presente estudo, define a região de trabalho da corrente, pois é desejável operar em uma região linear. O levantamento da curva característica do arco permite essa avaliação. Isso pode ser comprovado pela Figura 2.3.

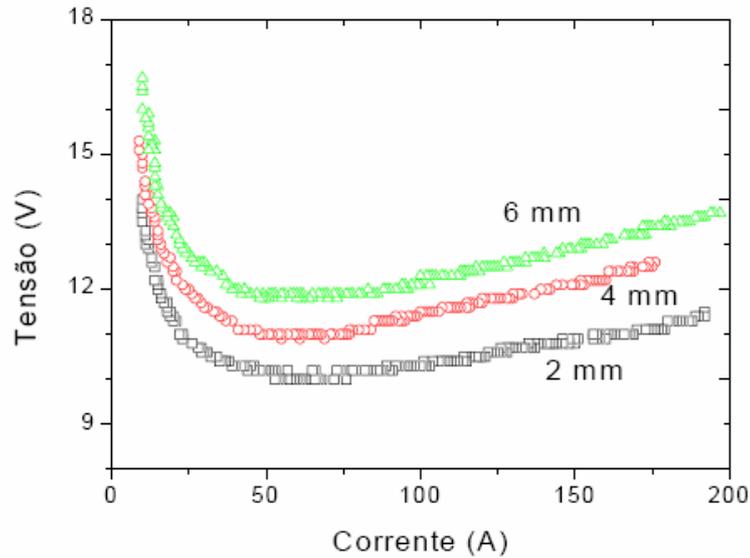


Figura 2.3 - Característica estática do arco (Modenesi, 2001).

Nota-se que para a faixa inicial a relação entre corrente e tensão não é linear. Inicialmente apresenta um alto valor, conforme se aumenta a corrente em valores intermediários tende-se a um mínimo e depois há um aumento linear e gradativo. Para baixos valores de corrente ainda não há um intenso fluxo de elétrons. Com pequenos aumentos na corrente, a temperatura aumenta e o arco tende a ficar mais largo. Com isso, o resultado final seria como uma diminuição na altura do arco, sendo assim, a tensão diminui. Esse fenômeno acontece até um determinado valor de corrente em que o fluxo de elétrons é mais intenso, aumenta-se densidade do arco. A partir desse ponto, um aumento na corrente reflete em um aumento da tensão (Parmar, 1995).

A posição e formato da curva dependem do tamanho, geometria, material e temperatura dos eletrodos; da composição e pressão do gás de proteção e do comprimento do arco.

No caso acima tem-se a avaliação para três comprimentos de arco distintos. E a relação entre ele e a tensão é linear e pode ser observada pela Figura 2.4.

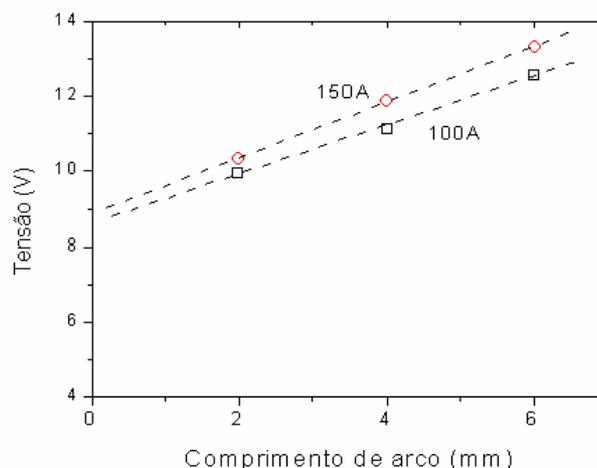


Figura 2.4 - Relação entre tensão e comprimento do arco (Modenesi, 2001).

2.1.3 Solda TIG ou GTAW

2.1.3.1 Avaliação Geral

Para a execução do trabalho realizado nesta dissertação, foi utilizada a soldagem TIG, ou GTAW. Trata-se de um tipo de soldagem que é realizado por meio de um eletrodo não consumível, geralmente feito do metal Tungstênio, por isso a denominação TIG, do inglês *Tungsten Inert Gas* (Tungstênio Gás Inerte), ou ainda GTAW, também do inglês *Gas Tungsten Arc Welding* (Soldagem a Arco-Gás Tungstênio). O termo “inerte” faz referência ao gás de proteção utilizado, ele não pode reagir quimicamente com a solda, mas sim proteger.

O processo consiste em injetar o gás de proteção e depois estabelecer um arco elétrico entre o eletrodo não consumível e a peça de deseja soldar. Com isso, o gás é ionizado e surge uma coluna de plasma. Os íons e elétrons em seu constante movimento geram a energia necessária para fusão do metal de base na região do arco, a chamada poça de fusão. Desse modo é possível unir as partes desejadas.

Para uma melhor compreensão, um esquema da região do arco é mostrado na Figura 2.5.

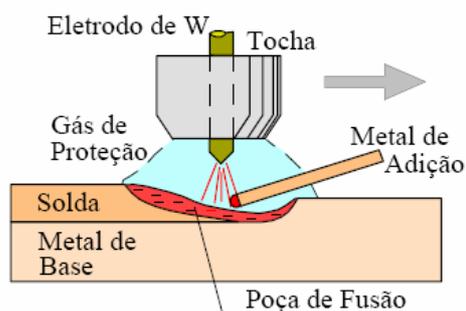


Figura 2.5 - Região do arco no processo TIG (Modenesi e Marques, 2000).

Nota-se que além da solda autógena (sem adição de metal), também é possível aplicar metal de adição por meio de varetas que contenham propriedades equivalentes às do metal de base.

A Figura 2.6 demonstra um esquema simplificado dos equipamentos necessários para a soldagem TIG.

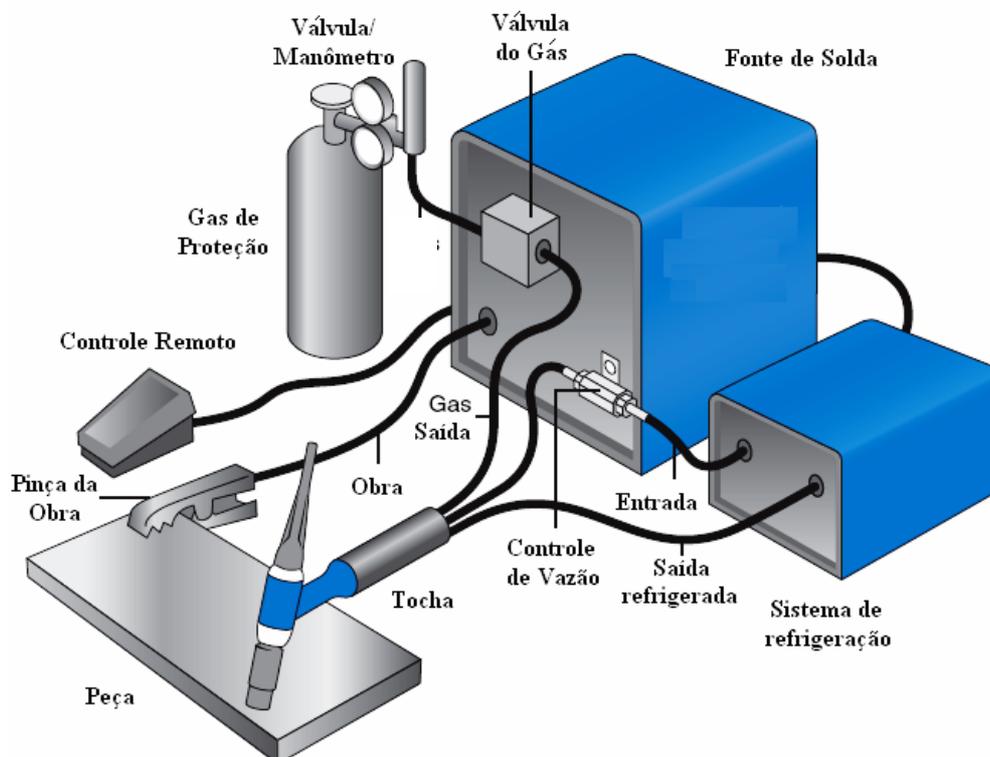


Figura 2.6 - Equipamentos básicos para soldagem TIG (modificado Millerwelds).

Consiste na tocha, que contém o eletrodo não consumível e por onde sai o gás inerte; na fonte de solda, responsável por estabelecer e manter o contato elétrico entre eletrodo e

metal de base. A refrigeração pode ser externa ou embutida no corpo da fonte. Também há o gás de proteção que pode ter a sua vazão controlada.

Esse tipo de soldagem é largamente utilizado na fabricação de tubos. Há os de parede fina de aço inoxidável, tubos de pressão em ligas de aço, tubos em laminadores contínuos. No caso dos de parede fina, a solda TIG, por ser de qualidade, é feita no passe raiz. Ele é o primeiro passe, o mais importante, uma vez que a partir dele serão depositados os outros cordões de solda. A soldagem por eletrodo de Tungstênio também é muito aplicada nas indústrias aeronáutica, atômica e de instrumentos.

2.1.3.2 Variáveis de Influência na Soldagem TIG

As variáveis que determinam basicamente o processo são a tensão do arco, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e o gás de proteção. Deve-se considerar que as variáveis não agem especificamente de forma independente havendo forte interação entre elas (Bracarense, 2000).

A tensão apresenta uma forte relação com a distância entre eletrodo e peça (l). Devido a essas características, e lembrando-se que o arco elétrico gerado apresenta a forma de cone, diz-se que a tensão reflete na largura do cordão de solda. Quanto maior a altura do arco (l), mais largo o cordão será, pois maior será a área projetada na peça a ser soldada. A Figura 2.7 demonstra essa relação:

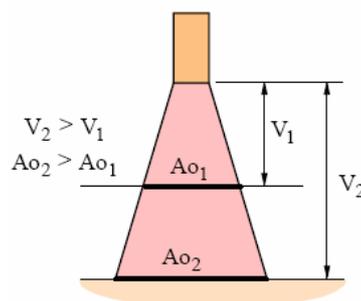


Figura 2.7 - Relação entre a tensão do arco e a largura do cordão de solda (Modenesi, 2001).

A velocidade de soldagem, ou de avanço, é um parâmetro mais ligado à otimização de processo. Sempre é mais desejável executar o mesmo processo com menor tempo.

Contudo, se essa variável é aumentada, há menos tempo para fusão e deposição de material. Em consequência disso, o cordão tende a ficar mais fino e com menor penetração. Desse modo, se há o desejo de manter o mesmo perfil de solda com o aumento de velocidade, tem de se compensar com o aumento da corrente e/ou da tensão. Essa estratégia irá aumentar a energia associada ao processo, o que acarreta em maior custo de produção. Portanto, é uma decisão que deve ser levada com muito critério.

O gás de proteção é um importante fator para garantir a qualidade da solda (Jönsson et al, 1995). Ele protege o ambiente da solda, que inclui eletrodo, poça de fusão e o próprio arco de solda. A ausência dessa proteção faz com que os gases da atmosfera reajam quimicamente com a solda. Geralmente são usados dois gases para proteção, hélio e argônio. O tipo do gás, se é puro ou uma mistura entre eles, influi no perfil da solda (Norrish, 1992).

Na solda TIG a variável que talvez tenha maior influência é a corrente. Há uma forte interação entre corrente e tensão em uma proporção direta. A corrente está mais ligada à penetração da solda (Modenesi, 2001). Aumentando-se a corrente, aumenta-se a penetração, mas também a tensão e conseqüente aumento da largura do cordão. Portanto, o resultado final do aumento da corrente reflete um aumento do volume da poça de fusão (Nagesh e Datta, 2002). A corrente pode ser alternada ou contínua. A corrente contínua é mais utilizada na polarização direta. Maior energia é concentrada na peça e a fusão do material é maior. Na polarização inversa, o sentido da corrente muda, o calor fica mais concentrado no eletrodo.

2.2 ESPECTROSCOPIA

2.2.1 Introdução

Espectroscopia é um conjunto de métodos e técnicas para estudar a emissão, absorção e difusão da radiação de uma substância ou meio (Larousee *apud* Vilarinho, 2003).

Sempre quando se excita uma substância com uma fonte de energia, esta pode transmitir, emitir ou absorver radiação em determinado comprimento de onda. Com isso, pode-se

observar o comportamento de uma substância ou meio e extrair algumas informações. É importante salientar que um dado elemento químico pode se apresentar em vários comprimentos de onda diferentes. Porém, eles são exclusivos, ou seja, um determinado comprimento de onda observado está diretamente relacionado a somente um elemento químico.

O fenômeno físico da emissão pode ser observado pela Figura 2.8.

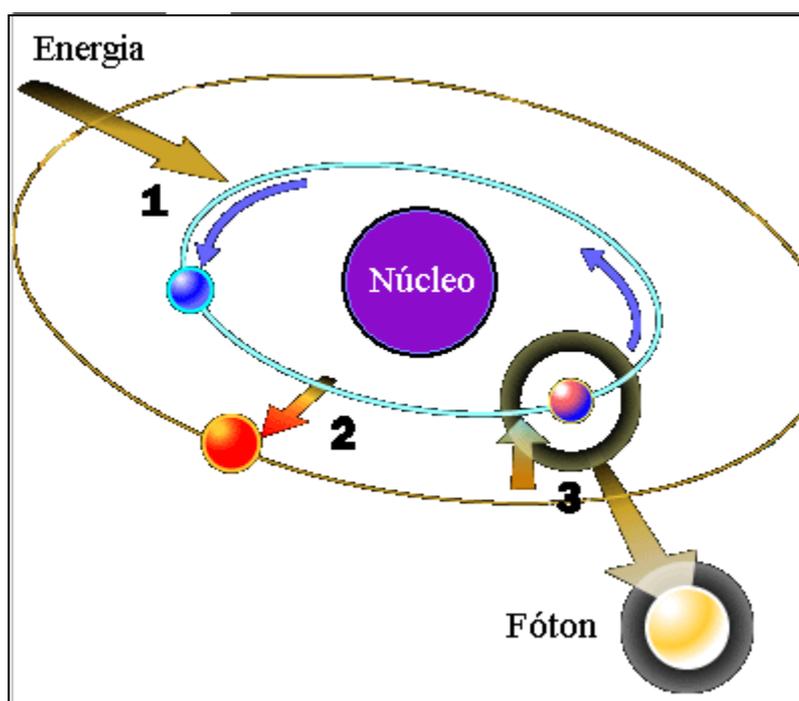


Figura 2.8 – Fenômeno da emissão de fótons (modificado, How Stuff Works, 2001).

(1) O átomo absorve energia e resulta na excitação de um elétron. (2) Com isso, ele busca um nível energético superior. (3) Todavia, a fim de manter o equilíbrio, esse elétron procura a estabilidade e volta ao nível anterior. Desse modo, um fóton é emitido em uma determinada frequência ou comprimento de onda.

Planck descobriu que todos os fótons, associados a uma frequência particular de luz, possuem a mesma energia diretamente proporcional à frequência. Essa conclusão pode ser observada na Equação 2.1 do item subsequente.

A espectroscopia é classificada de acordo com o seu princípio básico operacional. Desse modo ela pode ser dividida em (Vilarinho *apud* Vilarinho, 2003): emissão, absorção,

ultravioleta/visível, no infravermelho, de massa, de absorção atômica, Raman, de plasma. Neste trabalho interessa descrever melhor a última técnica.

Primeiramente, deve-se abordar o que é o plasma. Considerado o quarto estado da matéria, é um estado distinto que contém um número significativo de partículas eletricamente carregadas. Um número suficiente para afetar suas propriedades elétricas e o seu comportamento. É constituído por um conjunto quase neutro de partículas eletricamente carregadas formado pela ionização de átomos e moléculas por excitação energética de radiações eletromagnéticas, como calor (radiação térmica), microondas e etc. Este processo faz com que haja a formação de íons que durante a recombinação de seus elétrons emitem radiação visível ou não. Na natureza, isso pode ser observado no fogo e nas auroras boreal e austral. Esses últimos são fenômenos provocados pela excitação de átomos da atmosfera por correntes de partículas carregadas do vento solar.

Para produzir um plasma é preciso liberar elétrons que se encontram ligados ao átomo. Um gás parcialmente ionizado pode ser afetado por campos elétricos ou magnéticos aplicados intensamente e podem conduzir corrente elétrica. Os íons e elétrons servem como portadores de cargas, onde os campos das partículas carregadas do gás ionizado produzirão conseqüências de efeito coletivo. Este efeito coletivo constitui a principal característica do plasma. A medição quantitativa do gás pode ajudar na observação da distância entre a partícula carregada e o campo elétrico. Quando o gás é ionizado pela influência de campo elétrico intenso gerado por uma corrente é chamado de plasma de corrente contínua. Isso é o que acontece quando se efetua a solda TIG. Aplica-se uma corrente em um eletrodo a uma certa distância da peça a ser soldada, libera-se o gás de proteção. Esse é ionizado e ocorre a formação do plasma. Por isso, pode-se considerar que esse processo de soldagem é uma fonte do plasma para análise espectroscópica.

O ensaio de espectroscopia consiste em aplicar o plasma na amostra desejada e observam-se os comprimentos de onda emitidos. Mediante programas, faz-se a comparação das linhas espectrais obtidas com um banco de dados e determina-se quais elementos estão presentes naquela amostra em estudo.

A espectroscopia de plasma é subdividida em dois tipos de medição: passivo de emissão e ativo de absorção. No primeiro caso, a transição entre os níveis energéticos é devido a

excitação das partículas (átomos, íons, moléculas). Analisa-se a luz emitida pelo plasma. Já no segundo caso, a excitação no nível energético inferior para o nível superior é devido a um campo de radiação. A informação avaliada é o quanto esse campo de radiação se enfraqueceu devido àquela mudança energética (Fantz, 2006).

2.2.2 Espectroscopia de emissão e caracterização do plasma

Pela Teoria Quântica, átomos e moléculas podem apenas existir em níveis permitidos de energia, que são caracterizados por porções de energia que são específicas para cada átomo ou molécula. Quando é irradiada energia à amostra, os elétrons dos átomos ou das moléculas absorvem ou emitem uma quantidade específica de energia em comprimento de onda definido. Esse, por sua vez, relacionado à energia de ambos os estados. Essa teoria pode ser matematicamente expressa como (Griem, 1997):

$$E_i - E_n = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Em que E_i é a energia no estado menos energético, E_n é a energia do estado mais energético, c corresponde a velocidade da luz, h é a constante de Planck ($6,6260755 \times 10^{-34}$ J.s) e λ é o comprimento de onda.

Dois tipos de análises podem ser feitos no plasma: qualitativo e quantitativo. No primeiro, é possível identificar os elementos presentes no plasma, enquanto o segundo corresponde à monitoração de intensidades das linhas espectrais escolhidas. Nesse último caso, é possível calcular a Temperatura Eletrônica do plasma.

2.2.3 Temperatura Eletrônica

Uma propriedade física muito importante no universo da espectroscopia é a Temperatura Eletrônica, dada em Kelvin.

De acordo com a hipótese de Equilíbrio Termodinâmico Local (LTE), a temperatura do plasma é calculada a partir da temperatura dos elétrons. Essa teoria admite que as partículas possuam uma distribuição de energia dada pelas equações de Maxwell e que os

processos de colisão são predominantes em relação aos processos radioativos, conseqüentemente, a temperatura dos elétrons é similar à temperatura das partículas pesadas. A hipótese LTE é válida quando (Fujimoto 2004):

$$N_e \geq 1,6 \cdot 10^{12} \sqrt{T_e} (\Delta E)^3 \quad (2.2)$$

Onde N_e é a densidade eletrônica, T_e é a temperatura absoluta do elétron e ΔE é a diferença dos intervalos de transição de energia.

O método utilizado para calcular a Temperatura Eletrônica neste trabalho foi o da intensidade relativa das linhas espectrais (Griem, 1997). Há outros métodos, como o Fowler-Milne e Fowler-Milne modificado. Esses não serão abordados, uma vez que esse trabalho, em um outro capítulo, propõe um comparativo, para se detectar perturbações no plasma, entre um método comumente utilizado para o cálculo da T_e com um método de monitoração sugerido. Para o método da intensidade relativa das linhas, considera-se um conjunto de duas linhas de transição, $m \rightarrow r$ e $j \rightarrow i$, em um mesmo estado de ionização. Portanto, essas transições possuem o mesmo estado de referência. Um desenho esquemático segue abaixo – Figura 2.9 - em que N é o número de partículas, E é a energia do nível, g é o peso estatístico do estado, h é a constante de Planck e ν é a freqüência da emissão do fóton:

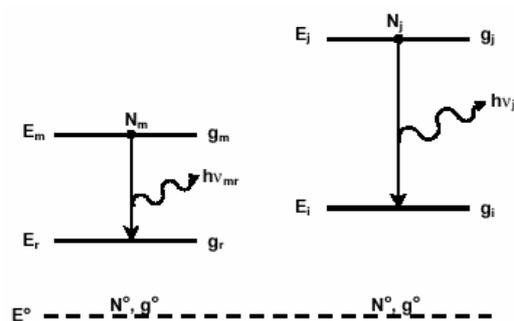


Figura 2.9 – Linhas espectrais no mesmo estado de ionização (Vilarinho, 2003).

O número de elétrons nos níveis m e j é dado pela Lei de Boltzmann (Chian, 1979):

$$N_m = \frac{g_m}{g^0} \cdot N^0 \cdot \exp\left(-\frac{E_m - E^0}{K_B \cdot T_e}\right) \quad (2.3)$$

$$N_j = \frac{g_j}{g^0} \cdot N^0 \cdot \exp\left(\frac{E_j - E^0}{K_B \cdot T_e}\right) \quad (2.4)$$

Em que g_m e g_j são os pesos estatísticos dos estados m e j , K_B é a constante de Boltzmann (8,6173 E-5 eV/K). Essas informações a respeito dos elementos podem ser obtidas no sítio do *NIST (National Institute of Standards and Technology)*. O peso estatístico é representado como uma função de $Z(T_e)$, chamada função de partição, dada pela Equação 2.5:

$$Z(T_e) = \sum g_s \cdot \exp\left(\frac{h \cdot \nu_{1s}}{k \cdot T_e}\right) = g_1 + g_2 \cdot \exp\left(\frac{h \cdot \nu_{12}}{k \cdot T_e}\right) + \dots + g_s \cdot \exp\left(\frac{h \cdot \nu_{1s}}{k \cdot T_e}\right) \quad (2.5)$$

Equações 2.3 e 2.4 podem ser escritas como (Griem, 1997):

$$N_m = \left(\frac{N^0}{Z \cdot T_e}\right) \cdot g_m \cdot \exp\left(\frac{-E_m}{K_B \cdot T_e}\right) \quad (2.6)$$

$$N_j = \left(\frac{N^0}{Z \cdot T_e}\right) \cdot g_j \cdot \exp\left(\frac{-E_j}{K_B \cdot T_e}\right) \quad (2.7)$$

O número de átomos excitados que deixa um nível de energia em um curto período de tempo dt é proporcional à população de átomos naquele nível em um tempo t . Isso pode ser escrito como (Griem, 1997):

$$\frac{dN_m}{dt} = -A_{mr} \cdot N_m \quad (2.8)$$

$$\frac{dN_j}{dt} = -A_{ji} \cdot N_j \quad (2.9)$$

Onde A_{mr} e A_{ji} são as probabilidades espontâneas de transição, também disponíveis no sítio do *NIST*.

A intensidade da linha de emissão, medida pelo pico apresentado no espectro, para uma transição do estado m para o estado r e do estado j para o i é dada por (Griem, 1997):

$$I_{mr} = N_m \cdot A_{mr} \cdot h\nu_{mr} \quad (2.10)$$

$$I_{ji} = N_j \cdot A_{ji} \cdot h\nu_{ji} \quad (2.11)$$

Substituindo as equações 2.6 e 2.7 nas equações 2.10 e 2.11 resulta em:

$$\frac{I_{mr}}{A_{mr} \cdot g_m \cdot \nu_{mr}} = \left(\frac{N^0 \cdot h}{Z \cdot T_e} \right) \exp\left(-\frac{E_m}{K_B \cdot T_e} \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{I_{ji}}{A_{ji} \cdot g_j \cdot \nu_{ji}} = \left(\frac{N^0 \cdot h}{Z \cdot T_e} \right) \exp\left(-\frac{E_j}{K_B \cdot T_e} \right) \quad (2.13)$$

Aplicando o logaritmo em ambos os lados:

$$\ln\left(\frac{I_{mr}}{A_{mr} \cdot g_m \cdot \nu_{mr}} \right) = \ln\left(\frac{N^0 \cdot h}{Z \cdot T_e} \right) - \frac{E_m}{K_B \cdot T_e} \quad (2.14)$$

$$\ln\left(\frac{I_{ji}}{A_{ji} \cdot g_j \cdot \nu_{ji}} \right) = \ln\left(\frac{N^0 \cdot h}{Z \cdot T_e} \right) - \frac{E_j}{K_B \cdot T_e} \quad (2.15)$$

A Temperatura Eletrônica é calculada por meio da relação entre as intensidades relativas de um par de linhas espectrais de um elemento no mesmo estado de ionização. Isso é obtido ao se dividir as equações 2.14 e 2.15:

$$\frac{E_m - E_j}{K_B \cdot T_e} = \ln\left(\frac{I_{ji} \cdot A_{mr} \cdot g_m \cdot \nu_{mr}}{I_{mr} \cdot A_{ji} \cdot g_j \cdot \nu_{ji}} \right) \quad (2.16)$$

É melhor expressar a frequência de emissão do fóton (ν) em termos de comprimento de onda (λ). Uma vez que a informação passada pelo espectrômetro é em função dessa variável. Isso pode ser feito por meio da Equação 2.17:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.17)$$

Substituindo essa última equação na anterior para as duas linhas e isolando a Temperatura Eletrônica:

$$T_e = \frac{E_m - E_j}{K_B \cdot \ln \left(\frac{I_{ji} \cdot A_{mr} \cdot g_m \cdot \lambda_{ji}}{I_{mr} \cdot A_{ji} \cdot g_j \cdot \lambda_{mr}} \right)} \quad (2.18)$$

Para o caso particular do plasma do arco de soldagem, onde se necessita apenas da temperatura da coluna do plasma, T_e pode ser calculada como (Marotta, 1994):

$$T_e = \frac{E_m - E_j}{K_B \cdot \ln \left(\frac{E_m \cdot I_{ji} \cdot A_{mr} \cdot g_m \cdot \lambda_{ji}}{E_j \cdot I_{mr} \cdot A_{ji} \cdot g_j \cdot \lambda_{mr}} \right)} \quad (2.19)$$

A diferença entre as equações 2.18 e 2.19 pode ser observada pela inclusão no logaritmo de um fator de excitação de energia das linhas espectrais selecionadas. Essa consideração permite o cálculo aproximado da temperatura axial local em plasmas axissimétricos sem utilizar um método mais complexo, a transformada de Abel (Marotta, 1994).

Com esse método simples é possível monitorar em tempo real, uma vez que o tempo de processamento é pequeno. Porém, as linhas têm de respeitar a seguinte condição:

$$E_m - E_j > K_B \cdot T_e \quad (2.20)$$

2.3 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS E DETECÇÃO DE MUDANÇA

A idéia central da detecção de mudança está no próprio nome da técnica. Mediante o acompanhamento de um sinal, se houver mudança em seu comportamento, seja em magnitude, frequência, picos abruptos, o sistema deverá ser capaz de perceber. Justamente essas perturbações poderão ser características de defeitos na solda.

Porém, inicialmente, é necessária a abordagem de processos estocásticos para um melhor entendimento da detecção de mudança

2.3.1 Processos estocásticos

A base dessa abordagem estatística se encontra nos conceitos de probabilidade e variável aleatória, ou simplesmente, v.a.

2.3.1.1 Variável aleatória

Variável aleatória é uma função X que associa a cada elemento s do espaço de amostra S um número real x . Supõe-se o caso de um lançamento de uma moeda, em que cara será denominado por “C” e coroa por “K”. Um exemplo de função seria quantas vezes aparece o resultado cara para três lançamentos. Desse modo, obtém-se o seguinte esquema:

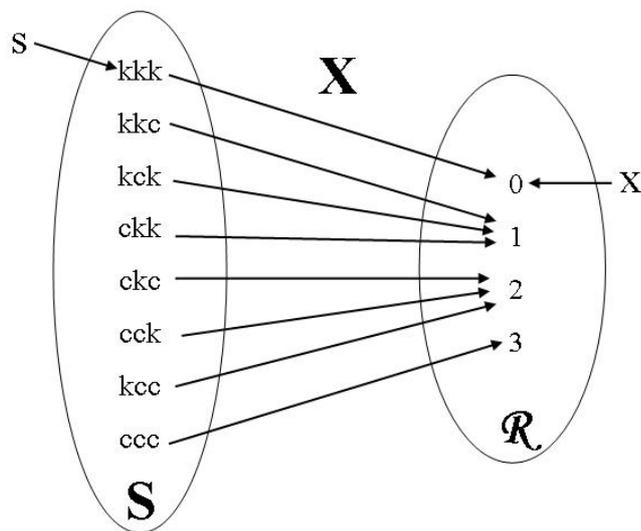


Figura 2.10 – Esquema de variável aleatória.

A v.a. pode ser discreta ou contínua. A primeira quando o conjunto de valores for finito ou infinito enumerável. Já a segunda para aquele conjunto de valores infinito não enumerável.

2.3.1.2 Função e Distribuição de Probabilidade

Para o caso discreto, a função densidade de probabilidade, fdp, de uma v.a.d. (variável aleatória discreta) é a função que associa a cada $x_i \in X(S)$ o valor $f(x_i) = P(X=x_i)$ que satisfaz as seguintes propriedades:

- $f(x_i) \geq 0$ para todo i ;
- $\sum f(x_i) = 1$.

Já para o caso contínuo, a fdp é uma função que associa a cada $x \in X(S)$ um número $f(x)$ que satisfaz as seguintes propriedades:

- $f(x_i) \geq 0$;
- $\int f(x) \cdot dx = 1$.

A distribuição de probabilidade é uma forma de visualizar para cada x_i o seu valor $f(x_i)$, no caso discreto, e de visualizar o par $(x, f(x))$ no caso contínuo. Essa forma pode ser por uma tabela, um diagrama ou fórmulas matemáticas. A função de distribuição normalmente é grafada por $F(x)$. Mas genericamente, pode-se dizer que para o caso discreto:

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum f(u). \text{ E para o caso contínuo: } F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(u) \cdot du$$

Alguns exemplos de distribuição discreta são: Bernoulli, Binomial, Hipergeométrica, Poisson. E para distribuições contínuas, pode-se citar, entre outras: Normal, Uniforme, Cauchy, χ^2 (qui-quadrado). Será dada maior ênfase à distribuição normal, também chamada gaussiana (curva de Gauss). É uma curva na forma de sino. Para a sua representação bastam dois parâmetros: média (μ) e variância (σ^2). Ela pode ser definida como $N(\mu, \sigma^2)$. A Figura 2.11 ilustra alguns exemplos de curvas com a variação desses parâmetros.

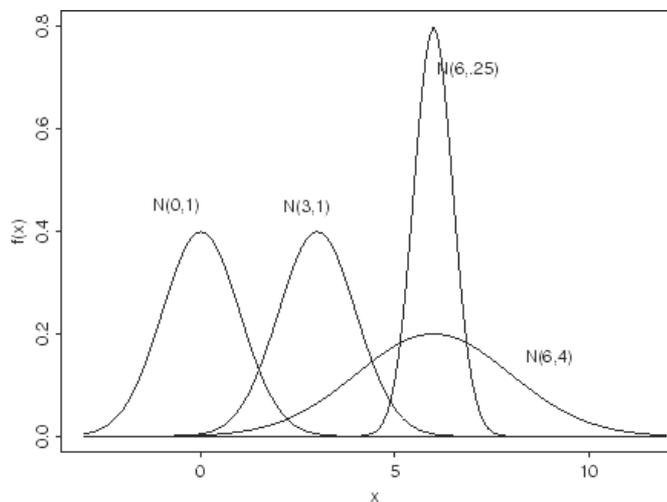


Figura 2.11 - Exemplos de distribuição normal (Shimakura, 2004)

Essa curva é dada pela fórmula (Soong, 2004):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.21)$$

A vantagem dessa distribuição é a facilidade tanto para a sua definição quanto para operações matemáticas entre distribuições. Quando se soma duas funções normais, a nova média será a soma das médias daquelas que a deram origem. A nova variância também é dada pela soma das variâncias daquelas que a deram origem. Assim (Soong, 2004)

$$\begin{aligned} X &\sim N(\mu_X, \sigma_X^2) \\ Y &\sim N(\mu_Y, \sigma_Y^2) \\ Z = X + Y &\therefore Z \sim N(\mu_X + \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Muitos processos, inclusive o da soldagem, podem ser representados ou aproximados (Teorema do Limite Central) pela curva normal. Isso facilita cálculos, como no caso deste trabalho, da detecção de mudança.

2.3.1.3 Processos estocásticos

Após essa introdução pode-se definir processo estocástico. Pode-se dizer que é uma variável aleatória em função do tempo. Alguns fenômenos da natureza podem ser modelados por processos estocásticos, uma vez que se trata de uma v.a., sob uma certa distribuição, que se propaga ao longo do tempo. Seguem exemplos de comportamento do sinal segundo determinadas distribuições para as variáveis aleatórias, dados pela Figura 2.12.

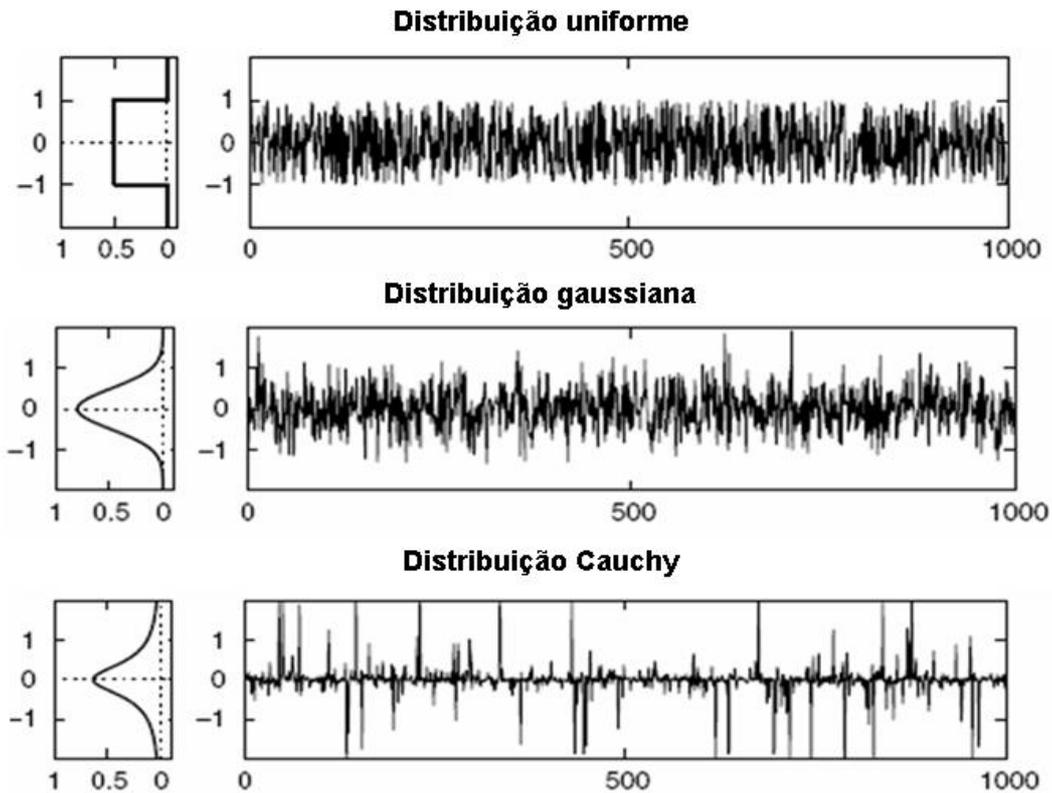


Figura 2.12 – Exemplos de processos estocásticos segundo diferentes distribuições (modificado Manolakis *et al*, 2005).

2.3.2 Detecção de mudança

Sabendo-se que um sinal se comporta segundo um processo estocástico é possível determinar um modelo probabilístico e aplicar alguns algoritmos para processar esse sinal. Exemplos de cálculos são filtros, estimação do sinal, soma de sinais, reconhecimento de padrão e algoritmos diversos para inúmeras tarefas.

Há vários algoritmos propostos por autores (Basseville & Benveniste, 1983; Appel & Brandt, 1983; Benveniste *et al*, 1987; Basseville e Nikiforov, 1993; Gustafsson, 2000; Tartakovsky & Kim, 2006). Também podem ser encontradas algumas aplicações (Paxson, 1999; Melo *et al*, 2006; Tartakovsky *et al*, 2006).

Inicialmente, é necessário considerar um modelo para a aplicação das técnicas. No caso deste trabalho, o processo envolvido pode ser encarado como um sistema linear em tempo discreto. A equação do processo pode ser dada por (Basseville e Nikiforov, 1993):

$$\theta_{t+1} = F_{t+1}\theta_t + w_t \quad (2.23)$$

Em que:

F_{t+1} : matriz de transição do estado θ_t , ao estado posterior θ_{t+1} ;

w_t : ruído causado por uma variável aleatória que segue distribuição gaussiana com média zero e matriz de covariância dada por (Basseville e Nikiforov, 1993):

$$E\{w_n w_t^T\} = \begin{cases} Q_t & \text{para } n = t \\ 0 & \text{para } n \neq t \end{cases} \quad (2.24)$$

Portanto, $\theta \sim N(\theta, Q)$.

A equação de medição tem o seguinte modelo (Basseville e Nikiforov, 1993):

$$y_t = H_t \theta_t + v_t \quad (2.25)$$

Em que y_t é o sinal lido, H_t é a matriz de medição e v_t é o ruído. De modo similar ao ruído do processo, esse último segue distribuição gaussiana com média zero, porém matriz de covariância dada por (Basseville e Nikiforov, 1993):

$$E\{v_n v_t^T\} = \begin{cases} R_t & \text{para } n = t \\ 0 & \text{para } n \neq t \end{cases} \quad (2.26)$$

Nesse caso, $y \sim N(\theta, R)$.

Importante frisar que os ruídos w_t e v_t não estão correlacionados. Para facilitar os cálculos e diminuir o tempo de processamento, admitiu-se que a matriz de transição F_{t+1} e a matriz de medição H_t são iguais a 1. Não se causa prejuízo ao modelo.

2.3.2.1 Fluxograma de detecção

O algoritmo de detecção de mudança é dividido em algumas etapas. O fluxo dos dados e operações podem ser visualizados no fluxograma dado pela Figura 2.13.

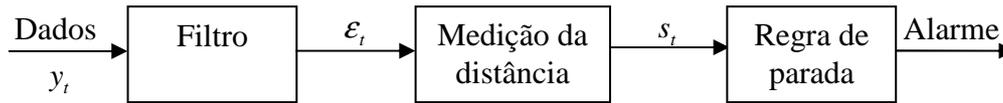


Figura 2.13 – Fluxograma da detecção de mudança (modificado Gustafsson, 2000).

Sendo que o processo da regra de parada consiste em:

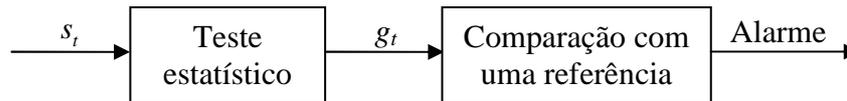


Figura 2.14 – Detalhe da regra de parada(modificado Gustafsson, 2000).

Os dados lidos (y) passam por um filtro. Este contém o modelo proposto para estimar θ . Assim, separa-se, no caso do espectrômetro, a intensidade relativa (ou Temperatura Eletrônica), dada por θ , do sinal ruído causado pela variável aleatória (v). Calcula-se o resíduo, ε_t , e posteriormente a distância, s_t , entre o valor estimado e o sinal lido. Posteriormente, efetua-se um teste estatístico, g . Compara-se esse resultado a um valor pré-estabelecido para decidir se aquilo que foi lido trata-se ou não de um possível defeito. Cada etapa desse processo será explicada a seguir.

2.3.2.2 Filtros Adaptativos

Há uma propriedade dos filtros adaptativos que serve de base para a detecção de mudança: a geração de resíduos. Sob certas condições do modelo, os filtros adaptativos fazem a medição do sinal e os transformam em uma seqüência de resíduos que resultam em um ruído branco antes que a mudança ocorra (Gustafsson, 2000).

Se não há mudança no sistema e se esse estiver correto, então os resíduos são um encadeamento de variáveis estocásticas independentes com média zero e variância conhecida. Da ocorrência de uma mudança, pode haver uma variação na média, variância ou ambos, de forma que os resíduos se tornam grandes. O ponto central é estabelecer quão grande é esse valor para se assumir que houve uma mudança (Gustafsson, 2000).

Diante dessa idéia, serão apresentados alguns filtros para dar prosseguimento ao fluxograma apresentado no item anterior. Costumeiramente trabalha-se com aqueles filtros digitais, como Butterworth, Chebyshev, Bessel e outros. Para esses filtros, interessa retirar certas frequências do sinal restando uma parte mais suave. Para os filtros estatísticos também é possível suavizar o sinal. Mas isso é realizado pela retirada de ruídos causados por variáveis aleatórias. O método de filtragem é diferente, pois nesse caso é feita uma estimação do sinal lido.

Não é objeto de análise a formulação do filtro. Mas sim se aqueles propostos são capazes de efetuar a tarefa da estimação do sinal. Portanto, serão apresentados os filtros utilizados neste trabalho.

- Filtro de Kalman (*Kalman Filter – KF*)

Ele é dividido em duas etapas: predição e correção (Haykin, 2001).

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

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

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

E na correção são calculados os demais fatores:

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

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

Matriz de covariância *a posteriori*: $P_t = (I - K_t H_t) P_t^-$

- Mínimos Quadrados Recursivo (*Recursive Least Squares – RLS*)

Outro exemplo de um algoritmo de filtro é o dos mínimos quadrados recursivo. É um caso particular do Filtro de Kalman. O cálculo dos fatores é dado pela Equação 2.27 (Gustafsson, 2000):

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_t &= \lambda \hat{\theta}_{t-1} + (1 - \lambda) \cdot y_t \\
\hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + (1 - \lambda) \cdot \varepsilon_t \\
\text{onde } \varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1}
\end{aligned}
\tag{2.27}$$

Em que λ é o fator de esquecimento. É uma influência dos valores antigos, já calculados, naqueles que estão sendo calculados.

- Mínima Média Quadrática (*Least Mean Square - LMS*)

Também caso particular do KF. É o mesmo que o Mínimos Quadrados, apenas um fator muda de nome. A estimação é dada pela Equação 2.28 (Widrow e Stearns, 1985).

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + \mu \cdot \varepsilon_t \\
\text{onde } \varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1}
\end{aligned}
\tag{2.28}$$

Em que μ é o novo fator, denominado passo. Mas os dois filtros se comportam de modo igual quando $\mu = (1 - \lambda)$.

- Mínimos Quadrados com Janela (*Windowed Least Squares - WLS*)

Em alguns casos, pode-se analisar uma janela que se desloca contemplando uma parcela de dados do que analisá-los individualmente. Há um algoritmo de Mínimos Quadrados com essa ferramenta. Essa janela funciona como fator de esquecimento (Gustafsson, 2000).

$$\hat{\theta}_t = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=t-L+1}^t y_i = \hat{\theta}_{t-1} + \frac{y_t - y_{t-L}}{L}
\tag{2.29}$$

A escolha do tamanho da janela é importante. O valor oscila entre um número grande para ser ter uma boa estimação do sinal lido e um número pequeno para se detectar a mudança o quanto antes. Como para este trabalho não é importante detectar o erro o mais rápido possível a fim de corrigi-lo, mas sim determinar a localização do defeito, pode-se trabalhar com janelas maiores.

2.3.2.3 Medição da Distância

Com o filtro, obtém-se o valor estimado, θ_t . Esse valor apresenta uma diferença para a medida de y_t do mesmo instante. A distância em questão pode ser entendida como essa diferença, ou seja, o quão divergente se está da estimação para o valor real daquele instante. Pode-se associar essa idéia a do casamento probabilístico de padrões, da teoria de reconhecimento de padrões (Duda *et al*, 2004). Comparam-se vetores que possuem distribuição gaussiana a um vetor padrão. Calcula-se a distância probabilística entre o padrão e os candidatos. Aquele que apresentar menor valor calculado, é o que melhor se encaixa no modelo padrão.

A medição da distância pode ser dada pelo cálculo de resíduos. É a diferença entre o valor atual lido e o valor real estimado anterior, ou seja (Gustafsson, 2000):

$$s_t = \varepsilon_t = y_t - \hat{\theta}_{t-1} \quad (2.30)$$

Este caso é mais usado para detecção de variações no valor médio de uma variável. Para que o detector seja também sensível à variância, pode ser usada a forma da Equação 2.31 (Gustafsson, 2000):

$$s_t = \varepsilon_t^2 \quad (2.31)$$

Outra possibilidade é a distância de Mahalanobis, dada pela Equação 2.32 (Duda *et al*, 2004):

$$s_t = \frac{\varepsilon_t^2}{\sigma^2} \quad (2.32)$$

No caso de uma variável, ela é utilizada para normalização de dados. É o número z avaliado nas tabelas de distribuição gaussiana padronizada $N(0,1)$, a Tabela Z. Para uma amostra contendo valores x , é feito o seguinte cálculo (Soong, 2004):

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2.33)$$

O cálculo por essa última técnica envolve a estimação da variância. Sendo assim, não pode ser utilizado para aqueles filtros que não executam essa tarefa.

Cálculos mais elaborados da medição da distância serão abordados posteriormente em algoritmos mais completos. Mas todos são baseados nos resíduos. Há outras técnicas para se avaliar o distúrbio do sinal além da medição do resíduo. Mas este tem um papel fundamental nesse exercício.

2.3.2.4 Regras de Parada ou Alarme

Essa etapa é dividida no teste estatístico e conseqüente comparação com um valor de referência.

O teste estatístico é um teste de hipóteses. Quando existe um particular interesse em decidir sobre a verdade ou não de uma hipótese específica (se dois grupos têm a mesma média ou não, ou se o parâmetro populacional tem um valor em particular ou não) o teste de hipóteses fornece a estrutura para que se faça isso. Assume-se uma hipótese, denominada hipótese nula, dada por H_0 e apresenta-se uma hipótese alternativa, dada por H_1 . Essa será assumida caso a primeira falhe.

No caso deste trabalho, a hipótese H_0 é a de que não há mudança no sinal lido, ou seja, não há defeito. Logo, assumir H_1 significa que houve mudança, há probabilidade da presença de um defeito.

Há dois tipos de erro que podem ser acometidos no teste de hipótese. O erro do tipo I acontece quando se rejeita H_0 sendo essa hipótese verdadeira. Já o erro do tipo II se verifica quando se aceita H_0 sendo falsa. Nos termos deste trabalho seria dizer que se acusou um defeito em uma região de solda de boa qualidade, para o erro do tipo I. E o erro do tipo II seria a afirmação de que a solda está isenta de defeitos quando houve a sua presença.

Baseado no cálculo da distância, é avaliado se o valor estimado $\hat{\theta}_{t-1}$ está dentro de um intervalo aceito por y_t lido, ou seja, se aquele faz parte da distribuição deste, ou se está nos limites de dispersão estabelecidos. Um valor pequeno de distância significa que a diferença entre aqueles dois valores não é apreciável. Aceita-se H_0 . Mas se o valor for grande, pode

ultrapassar os limites estabelecidos pelo padrão e a divergência será notável. Rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 .

Nos termos deste trabalho significa que há um padrão de espectro em que a solda está isenta de defeitos. Alterações nesse padrão podem estar relacionadas à presença de defeitos. O que vai determinar é a medição da divergência do valor estimado durante a solda a um padrão, comparando-se a um limite estabelecido.

Um dos algoritmos mais utilizados para essa tarefa é o de Somas Cumulativas, cujo mnemônico é *CUSUM*, do inglês *CUmulative SUM*. Ele é um caso particular de um outro algoritmo cuja sigla é *SPRT*, *Sequential Probability Ratio Test*, também do inglês. A forma e a lógica são dadas pela Equação 2.34 (Basseville e Nikiforov, 1993):

$$g_t = g_{t-1} + s_t - v$$
$$\text{se } g_t > h: g_t = 0 \text{ e } t = ta \quad (2.34)$$

O teste estatístico g_t soma o seu próprio valor ao da distância medida, daí o nome “somas cumulativas”. Se o valor calculado for maior que um valor pré-estabelecido, h , é dado o alarme. O termo ta , tempo do alarme, é o instante em que foi dado o alarme. Se for lido um sinal próximo a um ruído branco, o teste estatístico se comportará como um passeio aleatório (*random walk*). Para sinais positivos, o qual pode levar a alarmes falsos, termo v vêm subtrair o teste para cada instante de tempo. Para sinais negativos, que poderia aumentar o tempo para a detecção de mudança, o teste estatístico é igualado a zero.

Há um algoritmo chamado GMA, do inglês *Geometric Moving Average*. Possui a forma da Equação 2.35 (Basseville e Nikiforov, 1993):

$$g_t = (1 - \lambda) \cdot g_{t-1} + \lambda \cdot s_t$$
$$\text{se } g_t > h: t = ta \quad (2.35)$$

O termo λ trabalha como um fator de esquecimento. Os outros fatores foram explicados anteriormente.

Outra possibilidade, quando se calcula a distância de Mahalanobis, é efetuar um teste na distribuição normal. Escolhe-se o nível de significância (confiabilidade de assumir H_0) e

coleta-se o limite. Por exemplo, se se deseja 95% de confiança ($\alpha = 0,05$), então pela tabela z bicaudal tem-se o limite de 1,96; já para 98% o valor é 2,55. Desse modo, compara-se a distância com valor de referência escolhido pela confiança. Se for menor que o limite, aceita-se H_0 , de modo contrário, rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 . O cálculo é dado pela Equação 2.36 (Duda *et al*, 2004):

$$s_t = \frac{\varepsilon_t}{\sqrt{\sigma^2}} = \frac{\varepsilon_t}{\sqrt{R+P}} \quad (2.36)$$

Também é possível efetuar o teste sob a distribuição χ^2 . Porém o cálculo da distância passa a ser (Duda *et al*, 2004):

$$s_t = \frac{\varepsilon_t^2}{\sigma^2} = \frac{\varepsilon_t^2}{P^2} \quad (2.37)$$

E o limite dessa distribuição tem valor de 3,84 quando se tem 95% de confiança e 6,50 quando utilizado 98% de significância.

2.3.2.5 Exemplos de algoritmos de detecção

Há um algoritmo baseado na estimação por Mínimos Quadrados e detecção por Somas Cumulativas. Ele é denominado *CUSUM LS Filter* (Gustafsson, 2000). Interessante notar que são feitos dois testes estatísticos em paralelo. Desse modo permite-se avaliar mudanças para valores positivos e negativos do sinal lido. Seguem os cálculos na Equação 2.38:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t &= \frac{1}{t-t_0} \cdot \sum_{k=t_0+1}^t y_k \\ \varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \\ s_t^{(1)} &= \varepsilon_t \\ s_t^{(2)} &= -\varepsilon_t \\ g_t^{(1)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(1)} + s_t^{(1)} - v, 0) \\ g_t^{(2)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(2)} + s_t^{(2)} - v, 0) \end{aligned} \quad \text{se } g_t^{(1)} > h \text{ ou } g_t^{(2)} > h \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme: } t = t_a \\ g_t^{(1)} = g_t^{(2)} = 0 \\ t_0 = t \end{array} \right. \quad (2.38)$$

Há a versão recursiva contemplada pelo fator de esquecimento, é o *CUSUM RLS Filter*. Tem-se a seguinte configuração, dada pela Equação 2.39 (Gustafsson, 2000):

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_t &= \lambda \cdot \hat{\theta}_{t-1} + (1-\lambda)y_t \\
\varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \\
s_t^{(1)} &= \varepsilon_t \\
s_t^{(2)} &= -\varepsilon_t \\
g_t^{(1)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(1)} + s_t^{(1)} - v, 0) \\
g_t^{(2)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(2)} + s_t^{(2)} - v, 0)
\end{aligned}
\quad \text{se } g_t^{(1)} > h \text{ ou } g_t^{(2)} > h \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme : } t = t_a \\ g_t^{(1)} = g_t^{(2)} = 0 \\ \hat{\theta}_t = y_t \end{array} \right. \quad (2.39)$$

O ponto que merece mais atenção é o fato de após uma mudança ser detectada, $\hat{\theta}_t = y_t$. É porque a estimação terá esquecido toda informação passada.

As possibilidades de algoritmos são variadas. Pode-se por exemplo utilizar o Filtro de Kalman e detecção de mudança por Somas Cumulativas. É uma proposta deste trabalho para alcançar um melhor desempenho. O algoritmo é dado pela Equação 2.40.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \\
K_t &= \frac{P_{t-1}}{P_{t-1} + R} \\
\hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + K_t \cdot \varepsilon_t \\
P_t &= (1 - K_t) \cdot P_{t-1} + Q
\end{aligned}
\quad \text{se } g_t^{(1)} > h \text{ ou } g_t^{(2)} > h \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme : } t = t_a \\ g_t^{(1)} = g_t^{(2)} = 0 \end{array} \right. \quad (2.40)$$

Percebe-se uma forma mais resumida do *KF*. Mas garante-se a recursividade.

Pode-se também montar um algoritmo envolvendo-se Filtro de Kalman e medição de distância por Mahalanobis com teste de hipóteses na curva normal, dada pela Equação 2.41:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} & s_t &= \frac{|\varepsilon_t|}{\sqrt{R + P_t}} \\
K_t &= \frac{P_{t-1}}{P_{t-1} + R} & & \\
\hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + K_t \cdot \varepsilon_t & \text{se } s_t > h: \text{ alarme: } t = t_a \\
P_t &= (1 - K_t) \cdot P_{t-1} + Q & &
\end{aligned}
\tag{2.41}$$

Sendo h o valor da Tabela Z para o nível de confiança escolhido. Os algoritmos de Somas Cumulativas podem também aplicar essa medição da distância e teste estatístico.

2.3.2.6 Algoritmos Baseados em Janela Móvel

Anteriormente foi apresentado o *WLS*, Equação 2.29, baseado em uma janela móvel que trabalha como um fator de esquecimento. No caso presente, a janela funciona como um modelo que será comparado a outro modelo e realizada uma comparação entre eles. O teste estatístico será feito por meio da diferença existente entre os modelos.

Os modelos utilizados são um lento e um rápido. A divisão pode ser feita de duas formas. Elas podem ser visualizadas na Figura 2.15.

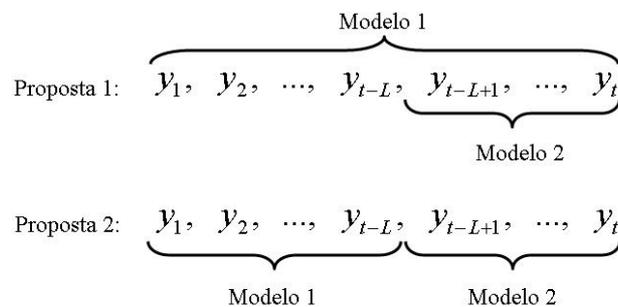


Figura 2.15 – Proposta de diferentes modelos para a janela móvel (Gustafsson, 2000).

Na primeira proposta, o Modelo 1, o filtro lento, contempla toda a informação disponível. É claro que esse recurso somente pode ser utilizado em uma análise posterior ao experimento, não pode ser em tempo real. Compara-se toda a informação a uma amostra de menor tamanho, modelo rápido, que irá varrer todos os dados.

A segunda proposta pode ser aplicada em tempo real. O Modelo 1 acumula informação até o dado imediatamente anterior à posição da janela do Modelo 2. Esta tem tamanho pequeno e definido, enquanto o Modelo 1 aumenta de tamanho conforme o tempo.

Nos dois casos, se não há muita diferença entre os dois modelos, eles serão bem próximos entre si, conseqüentemente, a distância entre eles será pequena. Do contrário pode-se assumir uma disparidade, uma distância maior, e revela-se mudança no sinal. Segue o cálculo dos parâmetros para cada modelo:

Uma forma simples de estimação do sinal com a medição da distância entre os modelos dada por Mahalanobis é apresentada na Equação 2.42:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t^{(1)} &= \frac{1}{t-L} \cdot \sum_{k=1}^{t-L} y_k & \hat{\theta}_t^{(2)} &= \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=t-L+1}^t y_k & s_t &= \frac{|\hat{\theta}_t^{(1)} - \hat{\theta}_t^{(2)}|}{\sqrt{P_t^{(1)} + P_t^{(2)}}} \\ P_t^{(1)} &= \frac{R}{t-L} & P_t^{(2)} &= \frac{R}{L} & \text{se } s_t > h, \text{ alarme: } t = t_a \end{aligned} \quad (2.42)$$

Em que L é o tamanho da janela e h é aquele valor referente ao nível de confiança escolhido.

Um algoritmo completo com essa idéia foi proposta por Appel e Brandt, 1983. É denominado *Brandt's GLR*, o que seria a Razão de Verossimilhança Generalizada de Brandt (*Brandt's Generalized Likelihood Ratio*).

Seu cálculo é visualizado na Equação 2.43:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t^{(1)} &= \frac{1}{t-t_0} \cdot \sum_{k=t_0+1}^t y_k & \hat{R}_t^{(1)} &= \frac{1}{t-t_0} \cdot \sum_{k=t_0+1}^t (y_k - \hat{\theta}_t^{(1)})^2 \\ \hat{\theta}_t^{(2)} &= \frac{1}{t-L} \cdot \sum_{k=L+1}^t y_k & \hat{R}_t^{(2)} &= \frac{1}{t-L} \cdot \sum_{k=L+1}^t (y_k - \hat{\theta}_t^{(2)})^2 \\ \varepsilon_t^{(1)} &= y_t - \hat{\theta}_{t-1}^{(1)} & s_t &= \log \left(\frac{\hat{R}_t^{(1)}}{\hat{R}_t^{(2)}} \right) + \frac{(\varepsilon_t^{(1)})^2}{\hat{R}_t^{(1)}} - \frac{(\varepsilon_t^{(2)})^2}{\hat{R}_t^{(2)}} \\ \varepsilon_t^{(2)} &= y_t - \hat{\theta}_{t-1}^{(2)} & \text{se } g_t > h & \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme: } t = t_a, \quad t_0 = t \\ g_t = 0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$g_t = g_{t-1} + s_t$$

Também é possível desenhar uma proposta com modelos baseados no Filtro de Kalman. Um será lento, o outro rápido. O cálculo da distância pode ser efetuado pelo algoritmo anterior ou outras propostas, como o Teste de Divergência, Média das Diferenças ou ainda por Mahalanobis. As regras de parada também podem ser variadas. Pode-se fazer o uso das Somas Cumulativas, *Brandt* ou o *GMA*, que será apresentada em seguida. O cálculo pela distância de Mahalanobis pode ter o teste estatístico efetuado sobre a curva normal com um dado percentual de confiança.

O Teste de Divergência é dado por (Gustafsson, 2000):

$$s_t = \log\left(\frac{R_t^{(1)}}{R_t^{(2)}} - 1\right) + \left(1 + \frac{R_t^{(1)}}{R_t^{(2)}}\right) \cdot \frac{(\varepsilon_t^{(1)})^2}{R_t^{(1)}} - 2 \cdot \frac{(\varepsilon_t^{(1)} - \varepsilon_t^{(2)})}{\hat{R}_t^{(2)}} \quad (2.44)$$

E o das Médias das Diferenças é dado pela diferença entre os resíduos (Gustafsson, 2000):

$$s_t = \varepsilon_t^{(1)} - \varepsilon_t^{(2)} \quad (2.45)$$

O algoritmo do Filtro de Kalman com a medição da distância por Mahalanobis e teste estatístico sobre a curva normal, sugestão deste trabalho, é dado pela Equação 2.46:

<p>Janela Modelo 1</p> $\varepsilon_t^{(1)-} = y_{t-L} - \hat{\theta}_{t-1}^{(1)}$ $K_t^{(1)-} = \frac{P_{t-1}^{(1)}}{P_{t-1}^{(1)} - R}$ $\hat{\theta}_t^{(1)-} = \hat{\theta}_{t-1}^{(1)} + K_t^{(1)-} \cdot \varepsilon_t^{(1)-}$ $P_t^{(1)-} = (1 - K_t^{(1)-}) \cdot P_{t-1}^{(1)} + Q_1$	<p>Atualização Modelo 1</p> $\varepsilon_t^{(1)} = y_t - \hat{\theta}_t^{(1)-}$ $K_t^{(1)} = \frac{P_t^{(1)-}}{P_t^{(1)-} + R}$ $\hat{\theta}_t^{(1)} = \hat{\theta}_t^{(1)-} + K_t^{(1)} \cdot \varepsilon_t^{(1)}$ $P_t^{(1)} = (1 - K_t^{(1)}) \cdot P_t^{(1)-} + Q_1$
<p>Modelo 2</p> $\varepsilon_t^{(2)} = y_t - \hat{\theta}_{t-1}^{(2)}$ $K_t^{(2)} = \frac{P_t^{(2)}}{P_t^{(2)} + R}$ $\hat{\theta}_t^{(2)} = \hat{\theta}_{t-1}^{(2)} + K_t^{(2)} \cdot \varepsilon_t^{(2)}$ $P_t^{(2)} = (1 - K_t^{(2)}) \cdot P_t^{(2)} + Q_2$	
<p>(2.46)</p>	

se $s_t > h$, alarme: $t = t_a$

Novamente, h é o valor da Tabela Z para o nível de confiança escolhido.

2.4 MONITORAÇÃO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM

Vários estudos foram realizados com o objetivo de agregar elementos para monitorar e ou controlar os processos de soldagem. Alguns deles utilizam os parâmetros entregues pela própria fonte de soldagem (Quinn *et al*, 1999; Wang & Qiang, 2002) e também com detecção de defeitos (Adolfsson *et al*, 1998). Outros empregaram câmeras (Agapakis *et al*, 1986; Stone *et al*, 1990; Stone *et al*, 1991; Stone *et al*, 1994; Zhang *et al*, 1996; Song & Zhang, 2008).

Há também a utilização de ultra-som (Miller *et al*, 2002) e som (Wang & Zhao, 2001; Grad *et al*, 2004) para monitorar o processo, tendo autores que incorporaram a detecção de defeitos (Luo *et al*, 2005). Um sensor bastante utilizado é o infravermelho, tanto do tipo câmera (Chen *et al*, 1990; Bicknell *et al*, 1994; Al-Habaibeh & Parkin, 2003;) quanto pirômetro (Franco *et al*, 2008, Nagarajan *et al*, 1989; Nagarajan *et al*, 1992; Wikle III *et al*, 1999; Wikle III *et al*, 2001; Fan *et al*, 2003).

Também foram utilizados equipamentos de inspeção agregados ao processo (Sun *et al*, 2005). Há alguns trabalhos envolvendo o espectrômetro como sensor (Dunn *et al*, 1986; Vervisch *et al*, 1990; Szymanski *et al*, 1997; Lacroix *et al*, 1999; Li & Zhang, 2000; Sforza & Blasiis, 2002; Vilarinho *et al*, 2002; Alfaro *et al*, 2005; Alfaro *et al*, 2006; Mirapeix *et al*, 2006; Mirapeix *et al*, 2006; Mirapeix *et al*, 2007; Mendonça *et al*, 2006; Mendonça *et al*, 2007). Há trabalhos variados envolvendo mais de um sensor (Bonss *et al*, 2004; Alfaro & Drews, 2006).

A maioria dos trabalhos que envolvem o espectrômetro como sensor capaz de detectar defeitos apresenta uma análise visual. Ou seja, demonstra-se a área defeituosa e a perturbação no sinal adquirido. Foram encontrados poucos trabalhos que apresentam alguma forma de detectar e localizar os defeitos na solda de uma forma automática. Um trabalho se valeu da utilização de redes neurais para tal tarefa (Mirapeix *et al*, 2007). Outros autores utilizaram técnicas estatísticas de Controle Estatístico de Processo (Ancona

et al, 2004). A detecção pode ser feita após a soldagem ou de forma *on-line*. Esta dissertação apresentou um algoritmo que se aproxima mais dessa idéia de CEP, aquele que utiliza o cálculo da distância de Mahalanobis com teste de hipótese sobre a curva normal. Porém, a detecção e localização de defeitos abordados nesta dissertação vão além. Aborda-se também a idéia da detecção de mudança.

Buscou-se na literatura cálculos que envolvessem estatística para analisar o comportamento de um certo sinal. A idéia central era de estabelecer um comparativo entre o sinal sem defeito aparente com um sinal proveniente de uma região defeituosa. Uma das áreas de abordagem é a de classificação e reconhecimento de padrões. Há uma vasta literatura para este tema, principalmente na área de imagens digitais. A partir disso, descobriu-se algoritmos que detectavam mudanças nas imagens por meio de uma detecção abrupta. Com isso, chegou-se à formulação final de detecção de mudança sugerida neste trabalho. Houve inovações no sentido de propor novas configurações de algoritmos a fim de atingir o melhor desempenho.

3 MONTAGENS, EXPERIMENTOS E METODOLOGIA

Seguindo a proposta de alguns autores, mencionados na seção 2.4, foram feitas algumas montagens e experimentos para atender diferentes objetos de estudos que compõem este trabalho, como estudo do arco elétrico, estudo do sinal obtido pelo espectrômetro, testes com defeitos de soldagem, e avaliação de algoritmos de detecção de defeitos. A fim de estabelecer uma linha de raciocínio coerente para essas montagens, será mostrada uma seqüência com modificações, adaptações e melhorias.

3.1 MONTAGEM DE COMUNICAÇÃO COM A MÁQUINA DE SOLDA

Foi utilizada a máquina de soldagem IMC Inversal 450A multiprocesso. O sistema de monitoramento e controle original da máquina se observa no esquema da Figura 3.1.

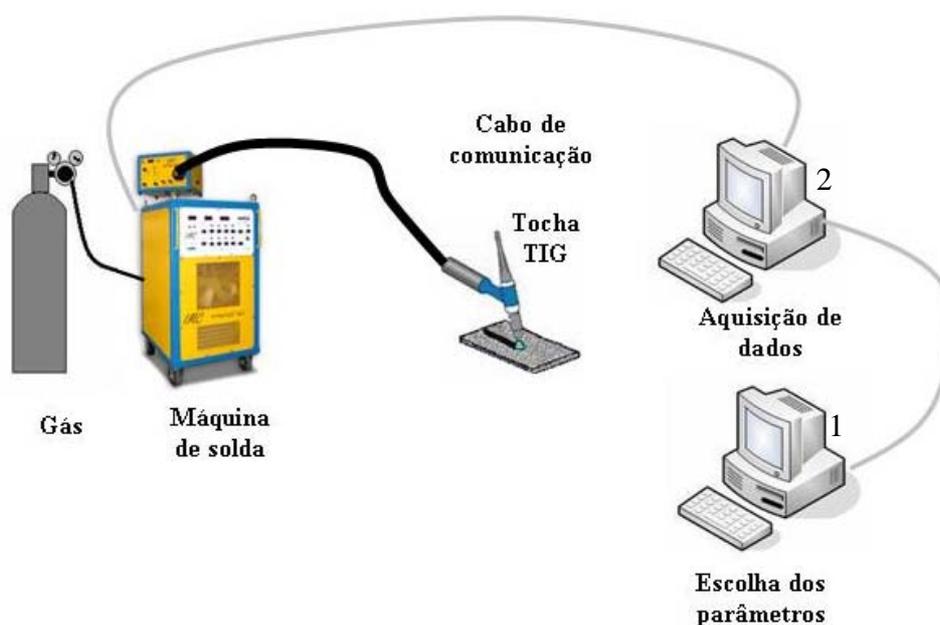


Figura 3.1 – Montagem original para comunicação entre máquina e PC.

Essa configuração consiste em estabelecer a comunicação de dados entre dois computadores e a máquina de solda. Há um computador responsável pela inserção dos parâmetros de soldagem (1) como corrente, tensão, velocidade do arame, segundo o tipo de processo que é ajustado manualmente. Este PC se comunica com um segundo computador (2) por meio do protocolo RS232.

O computador 2 contém o *hardware* de aquisição de dados (conversores A/D, D/A e portas digitais) que possibilita o monitoramento e controle do processo de soldagem. Esse computador converte os parâmetros de soldagem enviados pelo computador 1 em sinais analógicos e digitais para o controle da máquina. Há um programa de aquisição de dados que gerencia as principais variáveis envolvidas: tensão e corrente. Por meio dele é possível modificar o tamanho da janela de amostragem, alterar os parâmetros para visualização dos dados, salvar a informação coletada em arquivo, carregar arquivos gerados por experiências passadas, entre outros.

A tocha de soldagem utilizada possuía um protetor do bocal de cerâmica, número 6, com um eletrodo de tungstênio com 1,6 mm de diâmetro e 2% de tório. Os outros parâmetros de soldagem serão apresentados conforme os experimentos.

3.2 NOVA PROPOSTA DE COMUNICAÇÃO COM A MÁQUINA DE SOLDA

Apesar de a montagem original apresentasse flexibilidade quanto à inserção dos parâmetros de soldagem e aquisição dos dados, não era possível fazer alterações e adaptações para a realização dos experimentos necessários, uma vez que o programa utilizado não era aberto. Portanto, essa configuração foi abandonada. A solução adotada consistiu em criar um programa de aquisição e controle utilizando apenas um PC que possuía uma placa de aquisição de dados. Chegou-se a configuração dada pela Figura 3.2.

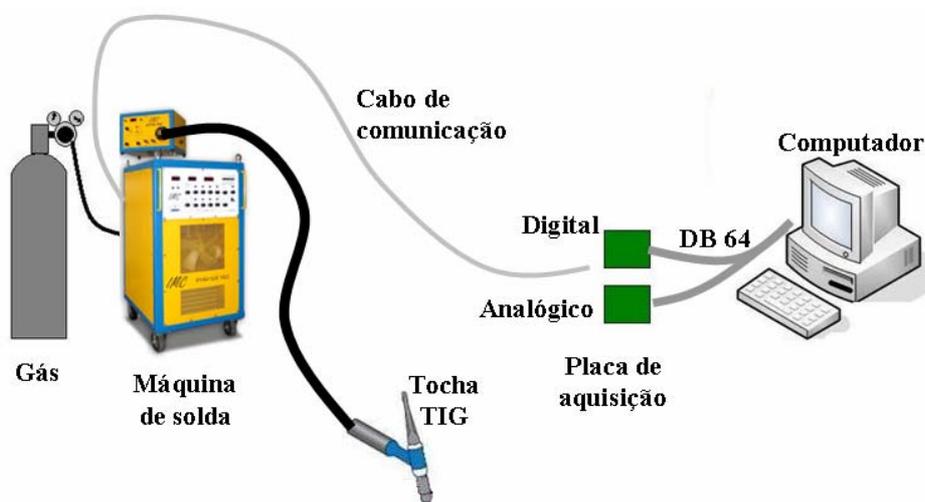


Figura 3.2 – Nova montagem para comunicação entre máquina e PC.

A placa de comunicação é do fabricante *Eagle Technologies*, modelo 703S. Possui dois conectores, um para comunicação analógica e outra para digital. Ambos com conectores DB 37, sendo a saída do computador, um DB 64.

No caso do primeiro conector, as variáveis de processo utilizadas foram tensão, corrente e velocidade do arame. O máximo de envio são dois parâmetros analógicos e eles dependem do processo escolhido. Portanto, entre aqueles três parâmetros apresentados, pode-se utilizar um ou dois. Para o caso do TIG, apenas a corrente era manipulada. Já para MIG/MAG, poderiam ser escolhidas tensão e velocidade do arame ou corrente e velocidade do arame.

O segundo conector, das variáveis digitais, ficou responsável para início e término do processo. Isto foi feito com portas digitais de saída que controlam a liberação e corte do gás de proteção, ignição e extinção do arco elétrico e alimentação do arame. Esta última foi implementada, mas não representava função alguma no processo TIG.

O programa desenvolvido em LabVIEW foi projetado para adquirir sinais de diversos sensores utilizados para monitorar diferentes processos de soldagem, como também para ajustar os parâmetros de funcionamento da máquina de solda. Uma vantagem da utilização desse programa é a disponibilidade de bibliotecas de alguns fabricantes de dispositivos para esse ambiente de instrumentação virtual.

3.3 TESTE DE CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA DO ARCO

Foi feita a montagem dada pela Figura 3.2 com a inclusão de base de cobre com um sistema de refrigeração a água para que não houvesse consumo, desgaste do metal de base. Também foi utilizada uma base fixa para a tocha. Com essas duas medidas, obteve-se um arco estável e foi possível executar a experiência em um tempo relativamente grande sem a fusão do cobre.

O teste da característica estática foi feito para descobrir qual seria a faixa linear de corrente a fim de se escolher os valores de corrente que seriam usados para os testes posteriores.

Para a análise, foi escolhida a faixa entre 10 e 200 A, com intervalos de 2 A. O teste foi elaborado com distâncias entre eletrodo e peça de 3, 5 e 7 mm. O perfil das curvas teria de ser semelhante ao dado pela Figura 2.3. A Figura 3.3 mostra o resultado do teste:

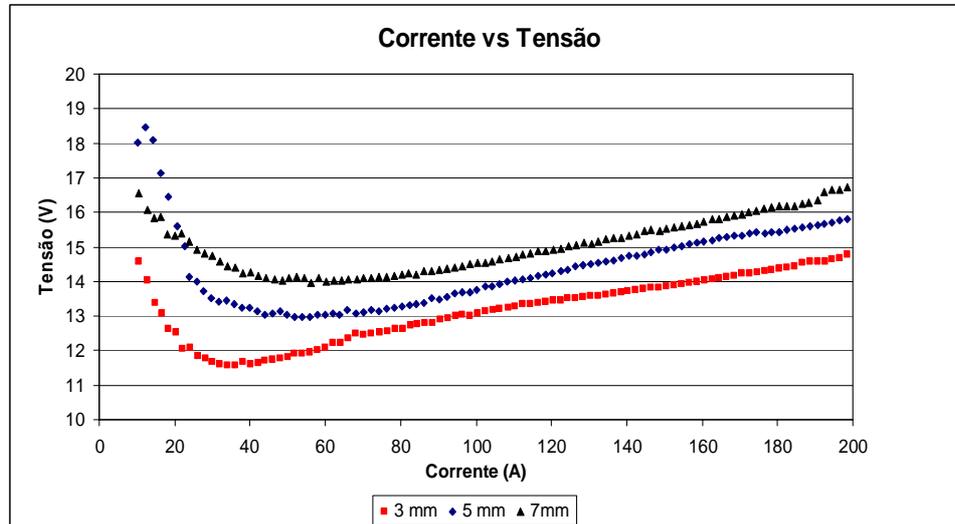


Figura 3.3 – Característica estática do arco TIG.

O gráfico levantado correspondeu à teoria. Observa-se o comportamento semelhante entre esse gráfico e aquele apresentado pela Figura 2.3. A partir dessa curva escolheu-se a faixa de operação para os testes seguintes que teria o mínimo de 90 A e o máximo de 200 A (faixa linear). Porém, os experimentos serão feitos em placas de aço, não de cobre. Sendo assim, há uma mudança na curva quando se muda o metal de base. O perfil é o mesmo, porém o valor da corrente correspondente ao mínimo de tensão – em que ocorre a inflexão da curva – é menor e a inclinação da curva na parte linear é mais acentuada – mais próxima a noventa graus. Ocorre que o aço tem uma condutividade térmica menor do que o cobre. Sendo assim, o arco fica mais denso com menores valores de corrente, dessa forma, mais fácil atingir a região linear em que um aumento na corrente reflete um aumento na tensão.

A relação entre comprimento de arco e tensão foi levantada e também ficou de acordo com a teoria. O resultado é dado pela Figura 3.4.

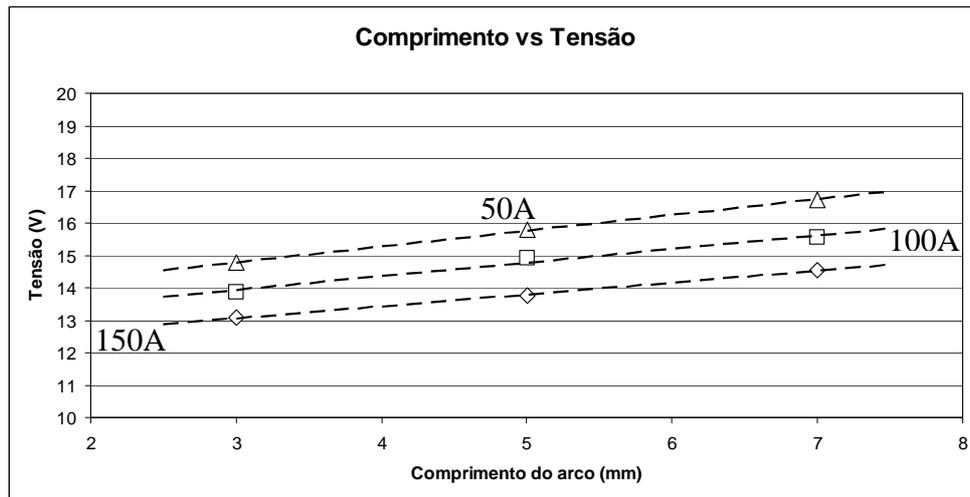


Figura 3.4 - Relação encontrada entre tensão e comprimento do arco para diferentes correntes.

3.4 MONTAGEM PARA ESTUDO DO ESPECTRO DO ARCO

Depois de escolhido o intervalo de corrente, foi possível iniciar o estudo do espectro do arco elétrico e levantamento do gráfico da Temperatura Eletrônica. O primeiro teste consistiu em observar o espectro do arco sem influência externa. Para isso foi utilizada a mesma base refrigerada, dessa forma não houve consumo do metal de base e o espectro observado foi apenas o do argônio. Os equipamentos ficaram dispostos na forma apresentada pela Figura 3.5, com as alterações para a montagem anterior em destaque:

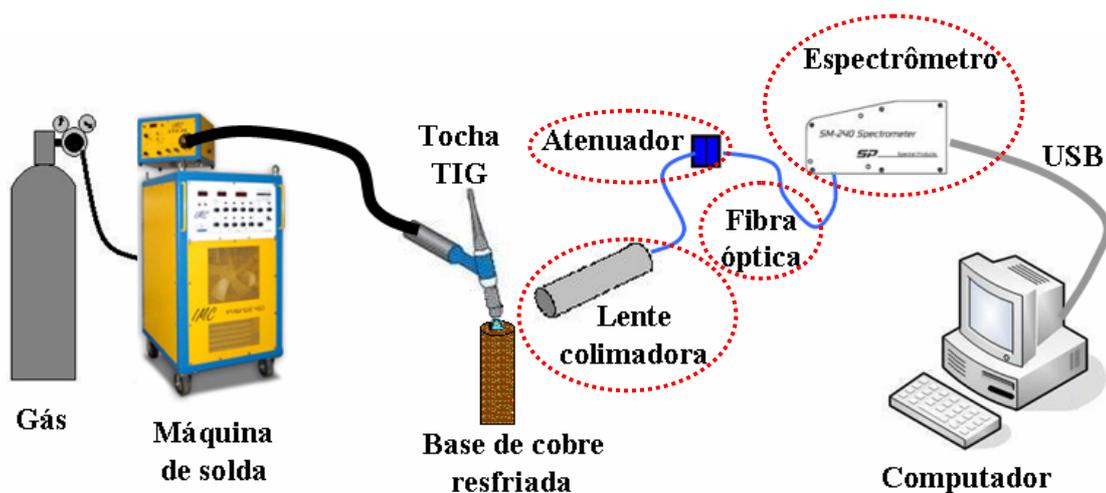


Figura 3.5 – Observação do espectro do arco elétrico na base refrigerada.

Nessa montagem, a corrente foi controlada de forma manual diretamente do painel de controle da máquina. Outra mudança foi o desenvolvimento de um programa em LabVIEW para capturar os dados do espectrômetro e conseqüente visualização do espectro.

O espectrômetro utilizado foi o SM 240-USB da Spectral Products. É do tipo policromático com resolução de 0,3 nm. Esse equipamento recebe certa quantidade de luz da fonte de interesse que se transmite por uma fibra óptica. Ao chegar ao equipamento, a luz é decomposta em 2048 parcelas. Posteriormente, cada parcela é digitalizada por um sensor CCD da Sony, modelo ILX511. A Figura 3.6 apresenta esquemas que demonstram o trajeto da luz até atingir o CCD.

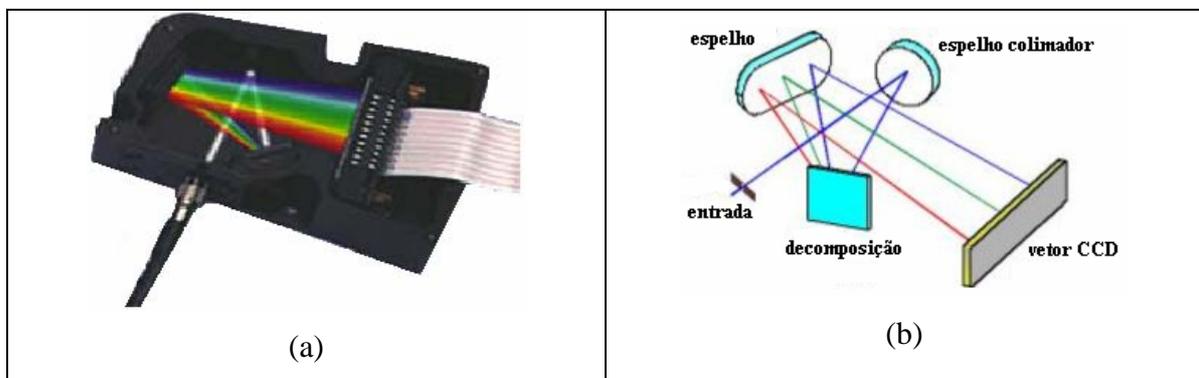


Figura 3.6 – Funcionamento do CCD do espectrômetro (modificado, Spectral Products).

A Figura 3.6 (a) fornece a visão geral do equipamento. Embora ela apresente a comunicação via serial com o PC, o equipamento utilizado dispõe de comunicação via USB 2.0. A Figura 3.6 (b) detalha o trajeto da luz até atingir o CCD.

Portanto, o dado de saída do dispositivo é um vetor de 2048 posições. Esse contém a intensidade relativa das linhas correspondentes à faixa desejada de comprimento de onda. O modo padrão opera na faixa (máxima) que vai de 257,7 a 677,2 nm. Isso pode ser mudado, mas sempre será entregue um vetor de 2048 posições. Para todos os experimentos foi usada a faixa máxima com um tempo de integração de 2 ms e o sinal obtido é o resultado da média de 3 amostras do espectro.

As fibras ópticas (Ocean Optics código P200-5-UV/VIS) transportaram a luz produzida pelo arco. Uma delas ligou a lente colimadora até o atenuador. A outra fibra conectou o atenuador à entrada do espectrômetro (Figura 3.5).

O atenuador, como o próprio nome sugere, serviu para atenuar a luz proveniente do arco. Isso foi necessário porque a intensidade da luz do processo é tamanha que satura a intensidade máxima captada pelo espectrômetro. É um dispositivo que permite restringir a quantidade de luz que será passada de uma fibra óptica a outra por meio de um dial. Foi adquirido do fabricante *Ocean Optics*, modelo FVA-UV.

A lente colimadora focou a região de medição no arco, sua distância focal é de 80 mm. Essa região de captação deve compreender uma área suficiente para obter boa amostragem do arco, mas não pode incluir o eletrodo nem a peça. A vizinhança desses dois elementos prejudica a medição porque não se poderiam aplicar fórmulas para o cálculo da T_e (Vervisch *et al*, 1990). Para saber a região que a lente foca no arco, basta conectar uma ponta da fibra óptica no sistema que contem a lente colimadora, o outro extremo da fibra deve receber uma fonte luminosa de alta intensidade, no caso foi usado um laser de comprimento de onda 633 nm. Ao se acionar o laser, aponta-se a lente para a região entre o eletrodo e a peça. Um anteparo pode ser posicionado nessa área objetivando melhor visualização. Logo, fixa-se o suporte que contem a lente de modo a abranger a região citada anteriormente. O suporte montado possibilitava regular a altura e inclinação da lente colimadora. A título de ilustração segue a Figura 3.7 abrangendo a área a ser focada:

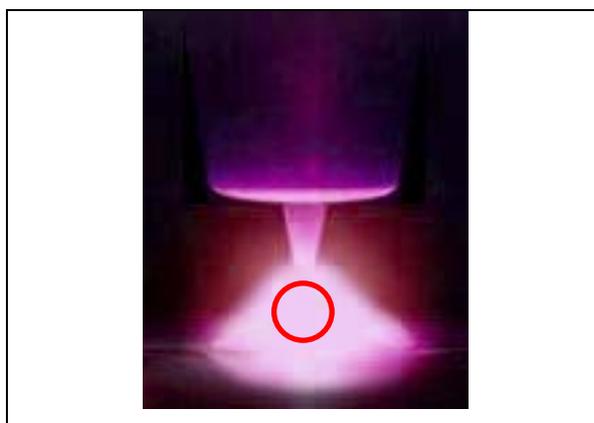
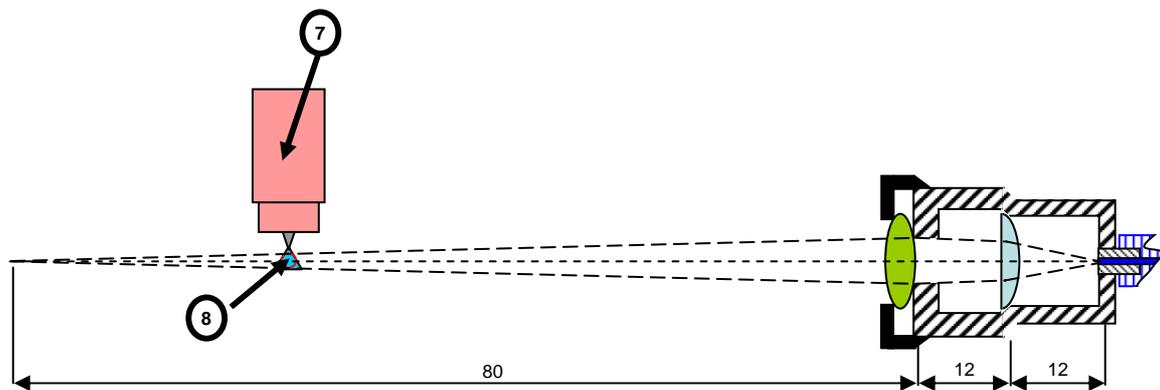


Figura 3.7 – Região para captação do espectro do arco.

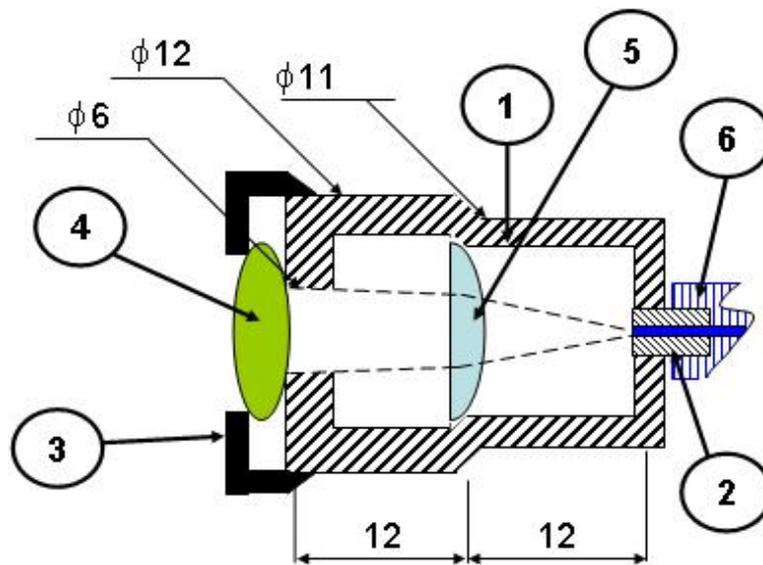
A escolha dessa área foi para tentar captar o maior número de linhas espectrais em seus diferentes níveis de ionização. Com essa grande área, não se pode aplicar a hipótese de equilíbrio termodinâmico.

O arranjo de lentes e suporte está esquematizado como uma vista de corte na Figura 3.8, medidas em milímetros. Esse sistema é composto pelas seguintes partes principais:

- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| (1) Suporte | (5) Lente convexa |
| (2) Conector do suporte | (6) Fibra óptica |
| (3) Suporte da lente biconvexa | (7) Parte da tocha |
| (4) Lente biconvexa | (8) Plasma |



(a)



(b)

Figura 3.8 – Esquema para focalização da área de interesse no plasma.

Observa-se a área focada – representada pelo círculo vermelho - no plasma do arco elétrico (8) formado pela tocha (7). A luz passa por uma lente biconvexa (4), de distância focal de 80 mm, que se encontra à saída de um suporte (1). Essa lente é fixada por um suporte próprio (3). O suporte (1) conta com um furo de 6 mm na entrada. Depois da luz passar na lente biconvexa, ela passa por uma lente convexa, que possui distância focal de 12 mm (5), cujo objetivo é focar a luz na entrada da fibra óptica (6). A fibra é presa ao suporte por meio do conector SMA 905 (2).

Depois de toda a montagem, o que foi observado por meio do programa é mostrado pela Figura 3.9.

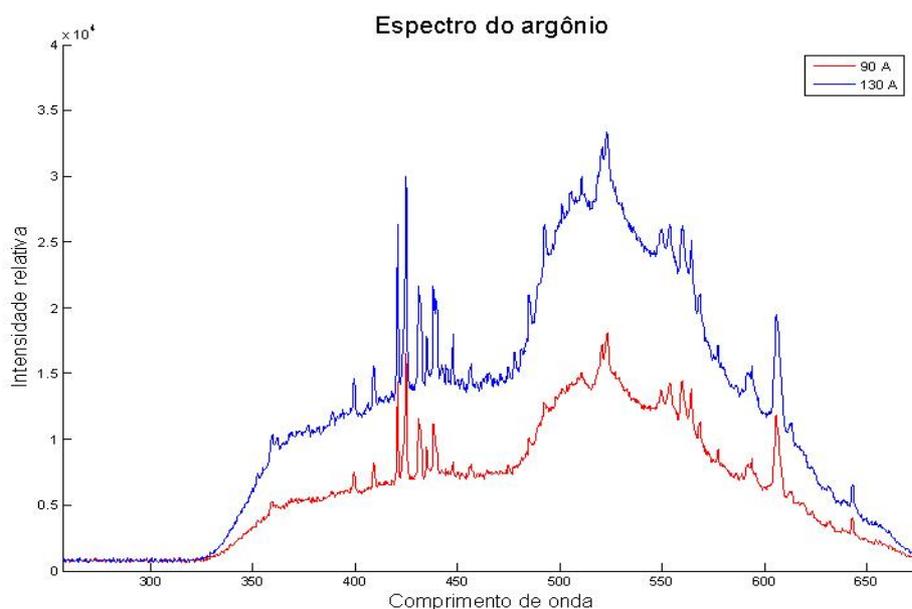


Figura 3.9 – Espectro do argônio para correntes de 90 e 130A.

A linha identificada de vermelho foi levantada com a imposição de uma corrente de 90 A, a linha azul, 130 A. Nota-se que foi coerente que a intensidade luminosa do arco a 130 A fosse maior do que a outra. Além disso, o espectro foi similar, as linhas espectrais resultaram semelhantes, o que muda é a intensidade relativa entre elas.

Os espectros desses experimentos poderiam ser chamados de padrões (um padrão para cada corrente), pois se houver alteração na intensidade de qualquer linha espectral ou em

todo o espectro (mantendo-se a corrente constante) além de um limite estabelecido é porque houve uma perturbação no arco elétrico.

Os espectros apresentados dessa maneira podem ser usados para uma avaliação qualitativa do arco elétrico. Tem-se uma visão geral das linhas espectrais, desse modo é possível notar qualquer mudança e detectar qual elemento químico responsável pela alteração, uma vez sabido seu comprimento de onda.

Desse modo, foi feito um experimento para avaliar o espectro do arco elétrico quando se solda uma placa de aço. A montagem foi praticamente a mesma, o que mudou foi a substituição da base de cobre resfriada por uma placa de aço ABNT 1020. Para evitar uma grande fusão dessa placa, o tempo de exposição do arco foi menor. As correntes utilizadas foram as mesmas da experiência anterior. O resultado está demonstrado na Figura 3.10.

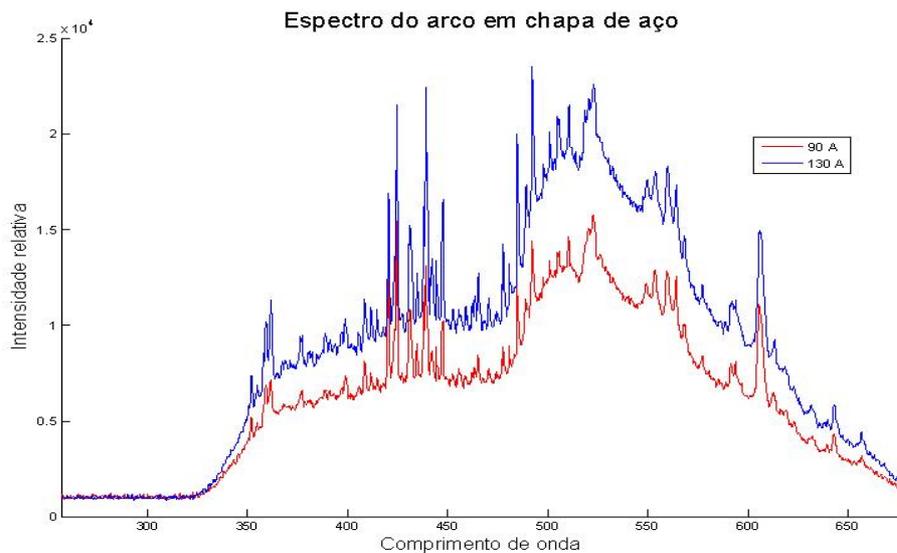


Figura 3.10 - Espectro do arco de uma placa de aço, correntes de 90 e 130 A.

Inicialmente não se percebe nítida diferença entre os espectros do argônio e da chapa de aço. A comparação pode ser visualizada na Figura 3.11.

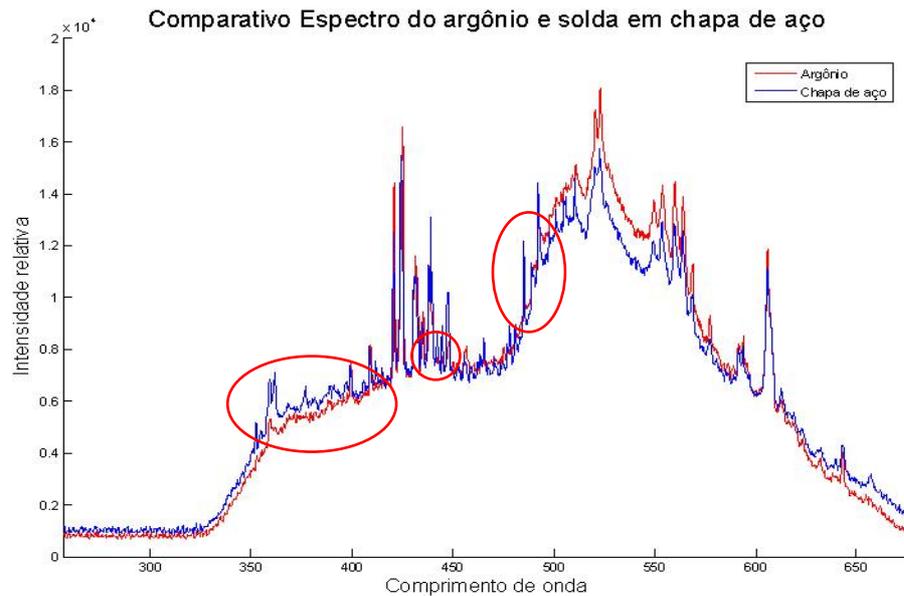


Figura 3.11 – Comparativo entre espectros sobre placa de cobre e de aço.

As regiões destacadas demonstram as diferenças mais notórias entre os espectros. As alterações foram a cargo de novos elementos encontrados no ambiente do arco elétrico, devido ao ferro, carbono e outros encontrados na liga do aço utilizado.

Além da análise qualitativa, também há a quantitativa. Esta avalia a intensidade de algumas linhas espectrais ao longo de um experimento. Dessa maneira é possível estudar durante um intervalo de tempo o comportamento da Temperatura Eletrônica de um certo elemento. Com isso, observam-se possíveis flutuações nessa variável e pode-se fazer uma análise para saber se isso está relacionado a um defeito ou não.

3.5 MONTAGEM DA PRIMEIRA BATERIA DE TESTES

Para executar essa análise quantitativa, foram agregados novos equipamentos (destacados por círculos pontilhados) em uma montagem mais complexa. O objetivo foi capturar dados do espectro em situações sem defeito e com defeitos a fim de avaliar o comportamento da Temperatura Eletrônica. A montagem é dada pela Figura 3.12.

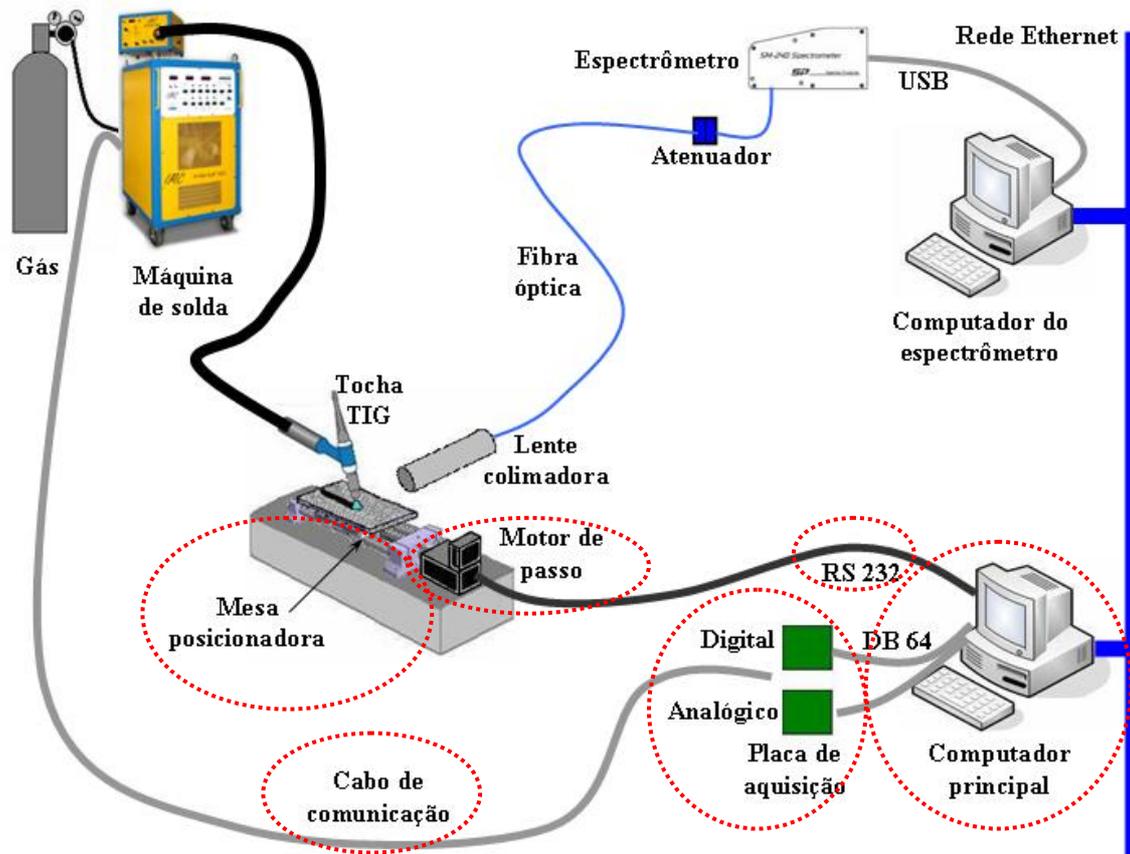


Figura 3.12 – Montagem da primeira bateria de testes.

Um dos equipamentos inseridos foi a mesa posicionadora, do fabricante egroj modelo 2EF-16, vide Figura 3.13. Consiste em uma placa que se movimenta em uma direção e em dois sentidos por meio de um parafuso sem-fim. Logo, o que se movimenta é a chapa, não a tocha. Dessa forma, garante-se uma melhor leitura do espectrômetro, pois esse também fica fixo durante a experiência.

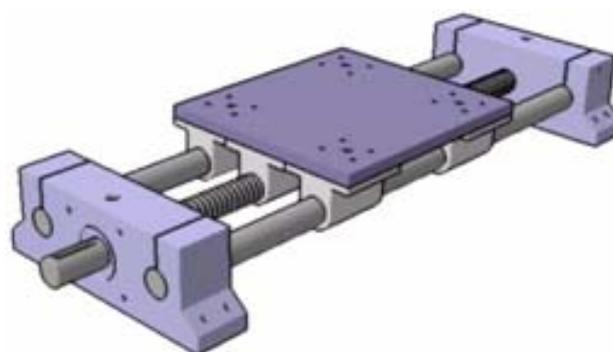


Figura 3.13 – Ilustração da mesa posicionadora.

Com o objetivo de evitar problemas nos sinais, como interferência, há um isolamento elétrico (também térmico), feito com baquelite, entre a base da mesa posicionadora e a chapa que se deseja soldar.

O dispositivo responsável por movimentar a mesa é um motor de passo Berger Lahr IDS91. São necessários dois sinais pulsados para seu controle. Um para estabelecer o sentido do movimento e o outro rege a velocidade, esta é determinada por meio da variação da frequência do pulso enviado.

Finalmente, pode ser observada a inserção de outro computador na montagem. O esquema exigiu que houvesse comunicação entre os equipamentos. Necessitava-se coletar os dados da máquina de solda e também do espectrômetro. Decidiu-se dividir as tarefas, uma vez que, com a placa de aquisição empregada, não foi possível coletar dados do espectrômetro e da máquina de soldagem com uma alta frequência de amostragem, principalmente para os dados do sensor. Estes são os mais importantes para este trabalho, sendo assim, um PC ficou dedicado à tarefa de aquisição dos sinais.

Os experimentos foram realizados sobre uma chapa plana (*bead-on-plate*). Os elementos escolhidos para análise da Te são argônio, ferro e hidrogênio. A tabela abaixo apresenta para cada um deles as linhas espectrais selecionadas para o cálculo da Temperatura Eletrônica.

Tabela 3.1 – Dados das linhas espectrais escolhidas.

Elemento	Nível de ionização	Comprimento de onda do nível inferior(nm)	Comprimento de onda do nível superior(nm)
Ar	II	349,1536	460,9567
Fe	I	373,4864	382,0425
H	I	486,1365	656,2852

O argônio está presente no gás de proteção e é o que apresenta maior abundância no arco elétrico. O ferro está contido na chapa de aço e também em inclusões metálicas que serão abordadas em experimentos posteriores. O hidrogênio é um elemento fundamental para observação, uma vez que a sua presença (seja devido à água, graxa, lubrificantes ou

quaisquer materiais orgânicos) é nociva à solda. Pode-se resultar em contaminação e porosidade, com isso, o comportamento da peça em serviço pode ser comprometido.

O critério para as escolhas das linhas, também o nível de ionização, foi a observação do espectro após a solda com a identificação de quais linhas apresentaram mais oscilações quando da presença de defeitos.

Os parâmetros utilizados para os experimentos são dados pela seguinte tabela:

Tabela 3.2 – Parâmetros base para as primeiras experiências.

Parâmetro	Valor
Corrente	90 A
Distância eletrodo- peça	5 mm
Velocidade de soldagem	2,5 mm/s
Gás	argônio puro
Vazão do gás	10 L/min
Eletrodo	tungstênio com 2% de tório 1,6 mm de diâmetro

É importante salientar que a o valor da Temperatura Eletrônica absoluta calculada não é o mais importante para a identificação de defeitos, mas sim as flutuações que ela apresenta durante a perturbação.

Inicialmente foi feita uma solda sobre uma chapa sem defeitos aparentes com o intuito de observar o comportamento da Te dos elementos escolhidos. Os dados estão em função do comprimento do cordão de solda (mm). O resultado pode ser observado na Figura 3.14.

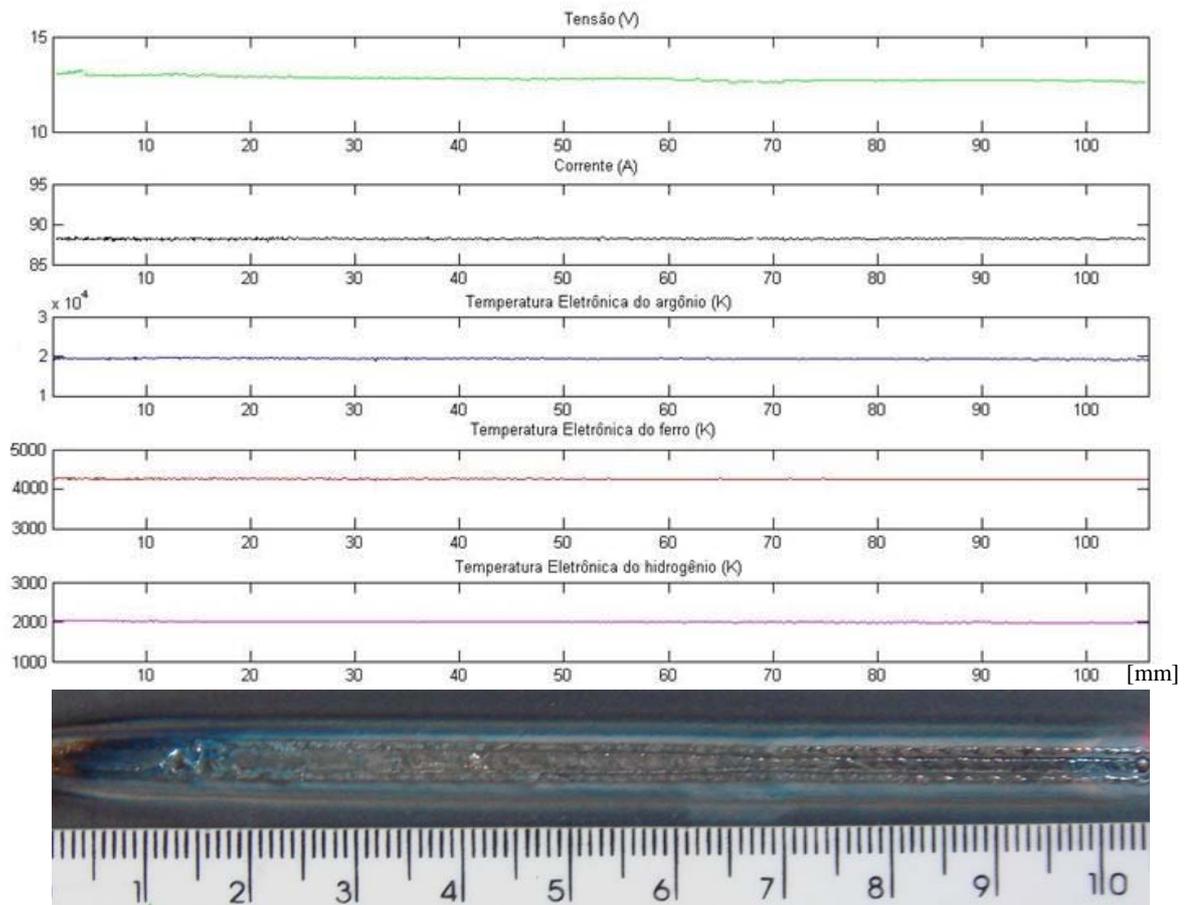


Figura 3.14 - Temperatura Eletrônica numa chapa sem defeitos.

Observa-se para as Temperaturas Eletrônicas escolhidas valores praticamente constantes. Há algumas tênues flutuações, mas não há picos nem grandes oscilações. É o comportamento esperado quando da ausência de defeitos.

Na próxima experiência apresentada os parâmetros básicos foram mantidos, com exceção da vazão do gás. O objetivo é simular defeitos devido à variação no fluxo do gás de proteção durante o processo de soldagem. Simplesmente houve atuação na válvula de alimentação. Segue o resultado na Figura 3.15.

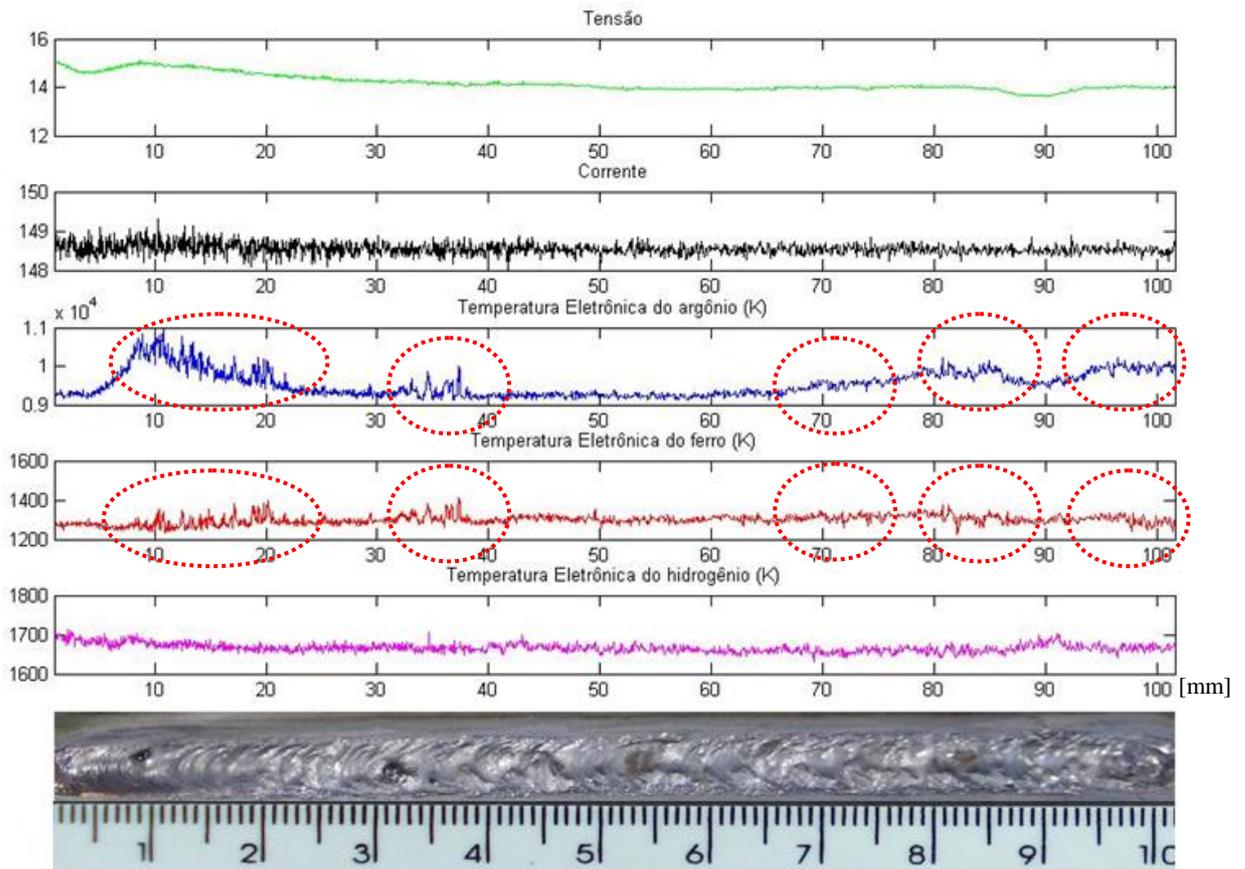


Figura 3.15 - Defeito no fluxo do gás de proteção.

Há uma flutuação inicial na tensão, porém não se encontra correlação com a perturbação no fluxo do gás. A corrente permanece basicamente a mesma em todo o processo, apenas inicialmente há um maior ruído no sinal. Ao se observar as Temperaturas Eletrônicas, quando medidas pelas linhas de emissão do ferro e argônio, observa-se um ruído e também flutuações perceptíveis. Sendo que a maior perturbação é percebida pelo argônio, pois está presente no gás de proteção. Os círculos pontilhados demarcam as regiões de alteração no fluxo do gás. Já para a Te calculada a partir de linhas do hidrogênio, são há grandes variações no sinal. A foto do resultado da soldagem indica algumas falhas ao longo do cordão.

A Figura 3.16 representa um experimento que consistiu na variação da corrente de soldagem de 75 a 150 A em um intervalo de dois segundos. Isso foi feito três vezes ao longo do experimento. Serviu para simular possíveis defeitos na corrente. Os outros dados de entrada obedecem ao padrão estabelecido.

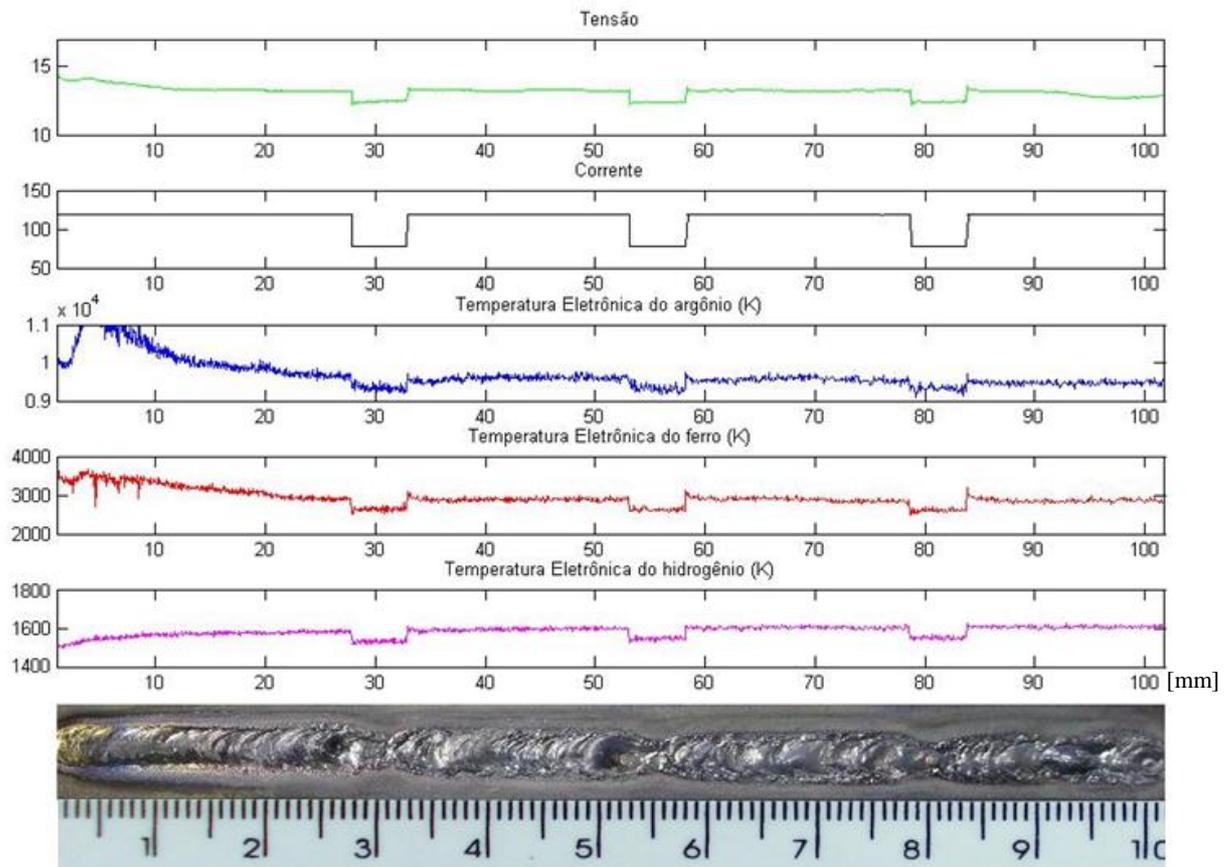


Figura 3.16 - Experimento com “defeitos” de 2 segundos na corrente.

É possível observar que os parâmetros de soldagem e das Temperaturas Eletrônicas são estáveis - sem grandes flutuações - nas regiões sem a variação da corrente. Mas quando essa varia, observa-se a sua influência na tensão devido à física envolvida no processo, pois ela mantém um valor proporcional à corrente investida.

A luz emitida pelo arco é proporcional à energia contida no arco. Essa energia, por sua vez, está relacionada aos parâmetros de soldagem: tensão e corrente. Quanto mais se aumenta a corrente, maior energia será aplicada no processo e uma maior intensidade luminosa é percebida.

Desse modo, pode ser visto na Figura 3.16 que as três Temperaturas Eletrônicas variam proporcionalmente quando a corrente varia. Na verdade, a intensidade de todas as linhas do espectro captado aumenta quando a corrente aumenta.

A Figura 3.17 ilustra um experimento diferente dos demais. Foram colocados alguns pequenos pedaços de arame no trajeto da solda e também uma pequena porção de graxa. Com isso, simularam-se incrustação metálica e inclusão de produtos orgânicos.

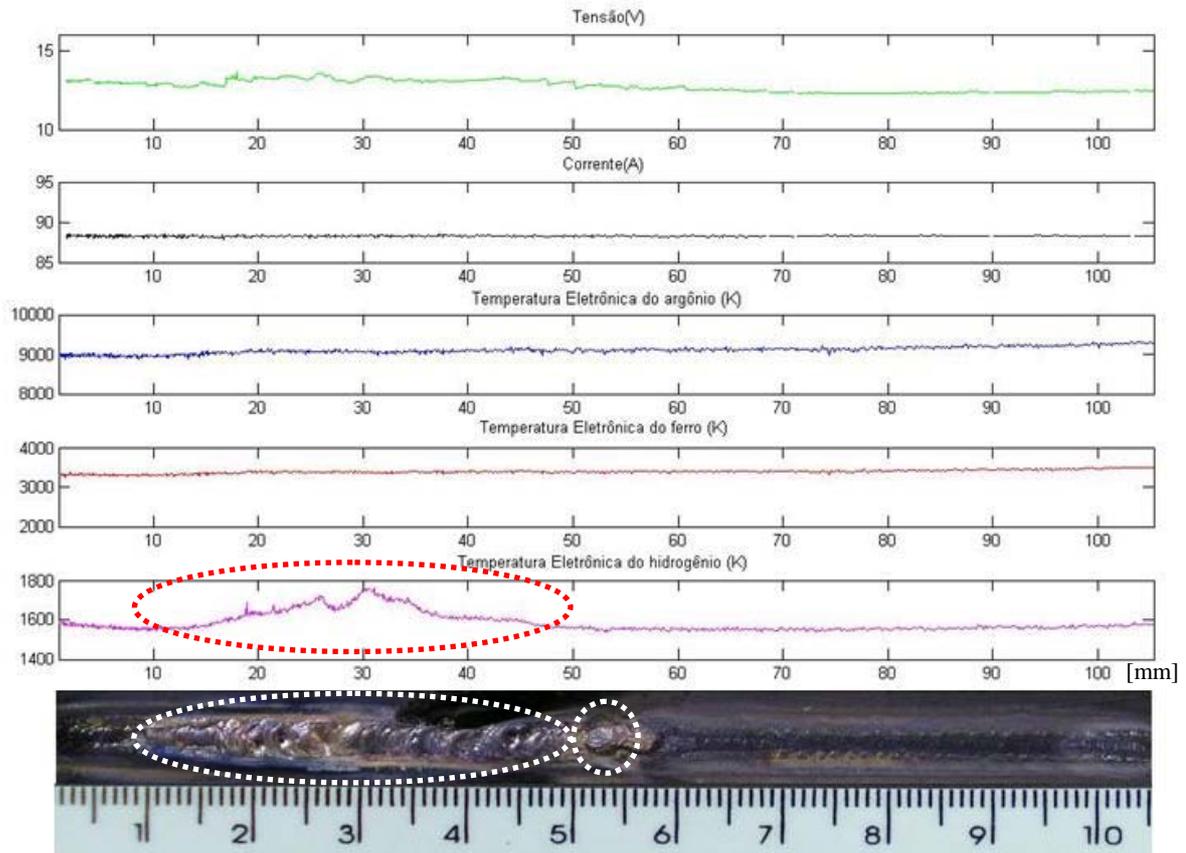


Figura 3.17 - Defeitos de graxa e inclusão metálica.

O resultado mostrou que para a inserção do arame as Temperaturas Eletrônicas não apresentaram variação. Há duas teorias. A primeira é que a quantidade de ferro no arame não foi suficiente para variar a intensidade relativa das linhas espectrais escolhidas. Deve ser lembrado que a chapa também contém ferro, então isso pode ter mascarado o sinal. A outra teoria é que o pequeno volume de arame se fundiu antes da leitura pelo espectrômetro. Além do comprimento de onda de ferro selecionado, podem ser usados outros para o estudo. As outras inclusões metálicas não apareceram na solda, foram deslocadas por alguma perturbação.

Porém, para a graxa, a Te do hidrogênio variou durante a presença do defeito. A graxa contém carbono, hidrogênio, nitrogênio e outros elementos. Mas por meio da observação

do espectro durante o experimento notou-se que as linhas de emissão do hidrogênio apresentaram grande variação, já para os outros elementos, isso não acontece.

Logo, com essa primeira bateria, provou-se que é possível monitorar a qualidade da solda de forma quantitativa por meio do cálculo da Temperatura Eletrônica. Houve um erro no último experimento, mas esse tipo de defeito será repetido em outras experiências. Também é possível uma análise qualitativa, se o interesse é a presença ou não de um ou mais elementos. Os testes mostraram que uma mudança na corrente afeta a Temperatura Eletrônica. Outro parâmetro pode ser a variação na vazão do gás de proteção.

3.6 MONTAGEM DA SEGUNDA BATERIA DE TESTES

A montagem anterior foi remodelada devido a alguns fatores. Um deles foi a percepção de um som ruidoso durante a operação devido ao cabo de conexão do computador com a máquina de solda. Outro foi a idéia de tornar o sistema possível de ser utilizado em outras fontes de soldagem.

A fonte de soldagem apresenta dois modos de operação – manual e automático. No modo automático, a máquina recebe os comandos do PC (no caso, corrente) e devolve os sinais atualizados de corrente e tensão. Observou-se que quando operado nesse modo, o equipamento causava um ruído nessas variáveis de saída. Já no modo manual, os parâmetros são inseridos na própria máquina. Quando se retira o cabo de comunicação entre PC e fonte de soldagem o ruído se atenua. Ficou a questão de como capturar os sinais de corrente e tensão, uma vez que o cabo de comunicação foi retirado. Para a corrente, foi usado um amperímetro Fluke, modelo i1010. Segundo o fabricante, 1 mV de sinal equivale a 1 A medido. A leitura da tensão de operação foi feita por um voltímetro que havia sido desenvolvido para essa atividade no próprio laboratório. Os sinais desses dois equipamentos foram conectados à placa de aquisição e enviados ao computador. A partir dessa montagem não houve mais a preocupação em se coletar o valor absoluto de tensão e corrente, mas sim observar se haveria variações em seu comportamento. Esses dados foram obtidos para eventuais consultas, mas já não apresentam mais grande interesse para avaliação. O sinal de estudo é aquele proveniente do espectrômetro. Por isso, nos demais gráficos, esses sinais não serão mais apresentados.

Além das variáveis analógicas, havia três variáveis digitais responsáveis pelo início e término de processo. No caso da solda TIG, são utilizadas duas variáveis, ignição e fluxo de gás. Como o cabo de comunicação entre o computador e a fonte foi abandonado, o disparo passou a ser realizado pelo modo manual. Mas para tornar o processo mais integrado, foi feita uma placa contendo um relé para efetuar o disparo do processo por meio de uma saída analógica da placa de aquisição.

E para esta última mudança, a diferença de modo remoto e manual não gerou grandes alterações. Apenas nas portas de saída (início e fim de processo), que a partir de então se tornaram analógicas. Pelos experimentos anteriores, foram estudadas as linhas espectrais do ferro e efetuou-se uma substituição. Os novos comprimentos de onda analisados foram 358,1 e 516,5 nm. Outra melhoria foi a diminuição da área focalizada pelo espectrômetro no arco elétrico. A distância entre a lente e o arco ficou menor e o foco ficou mais nítido. Diante dessas alterações, destacadas na Figura 3.18, observa-se a nova montagem.

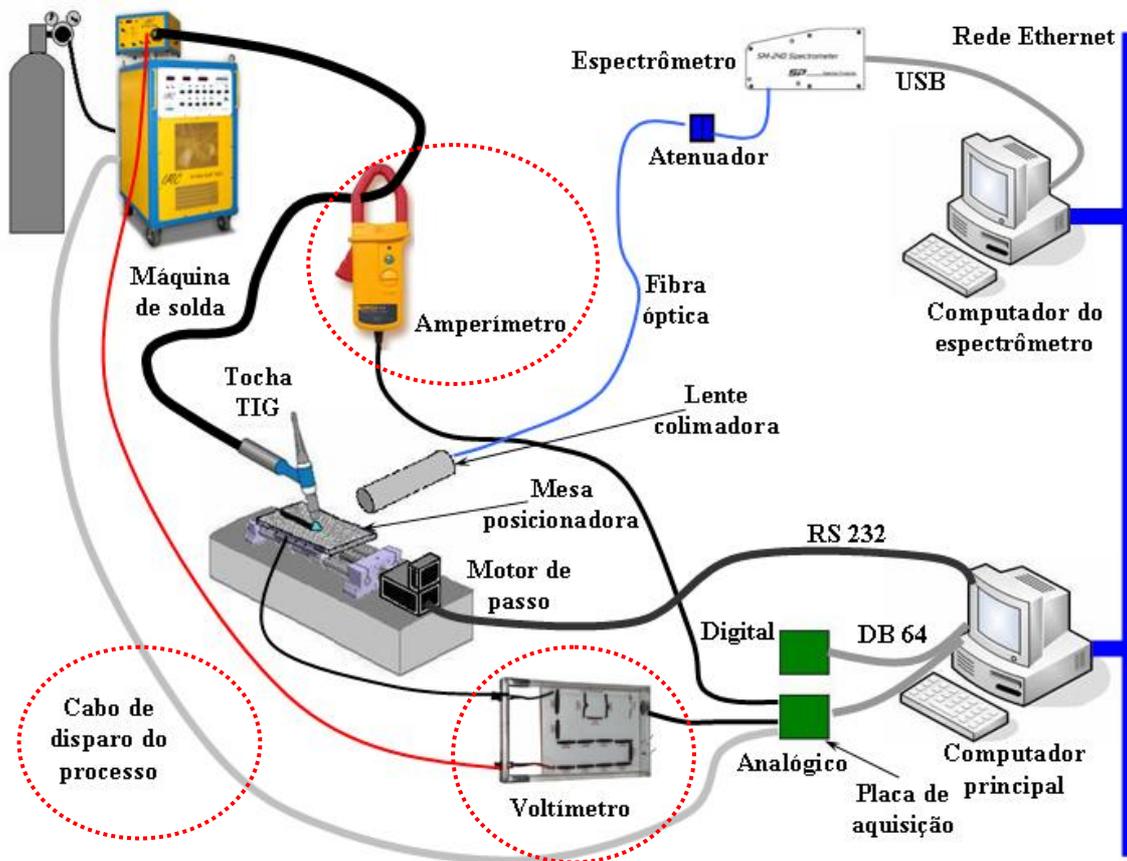


Figura 3.18 - Montagem da segunda bateria de testes.

Esta segunda bateria de testes focou mais o estudo das Temperaturas Eletrônicas e seus comportamentos com relação aos defeitos conforme segue a tabela abaixo. Os parâmetros de soldagem que não mudaram para esses experimentos seguintes foram vazão de gás a 10 L/min; velocidade de soldagem de 2,5 mm; o gás, que foi o argônio puro, e o eletrodo de tungstênio com 1,6 mm de diâmetro e 2 % de tório. As demais variáveis de processo e respectivos experimentos são citados pela seguinte tabela:

Tabela 3.3 – Listagem dos experimentos da segunda bateria.

Nº	I (A)	<i>l</i> (mm)	Observações
11	160	5	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa.
12	120	5	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa.
13	90	5	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa.
14	90	7	Presença de cola no início da placa. Três primeiras inclusões metálicas com cola. A última inclusão e os grãos de areia sem cola.
15	90	7	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa..
16	120	7	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa. Três últimos arames sem cola.
17	160	7	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa. Todos os arames sem cola.
18	90	3	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa. Primeiro arame sem cola.
19	120	3	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa. Segundo arame sem cola.
20	160	3	Defeitos de arame e grãos de areia colados na placa. Todos os arames sem cola.

Nesta parte inicial, para demonstrar os experimentos, serão apresentados apenas três deles e em anexo são apresentados os outros. Aqueles escolhidos são os relativos aos testes com 90 A, com distância entre eletrodo e peça diferentes, os experimentos 13, 14 e 18.

Em alguns experimentos foi utilizada uma cola para fixação da inclusão metálica e dos grãos de areia. Foi observado que o fluxo do gás de proteção proveniente da tocha expulsava esses defeitos. Sendo assim, pode-se observar a presença da inclusão metálica pelo cálculo da Te pelo elemento ferro, os grãos de areia pelo silício e a cola pelo hidrogênio.

O resultado do experimento 13 segue na Figura 3.19.

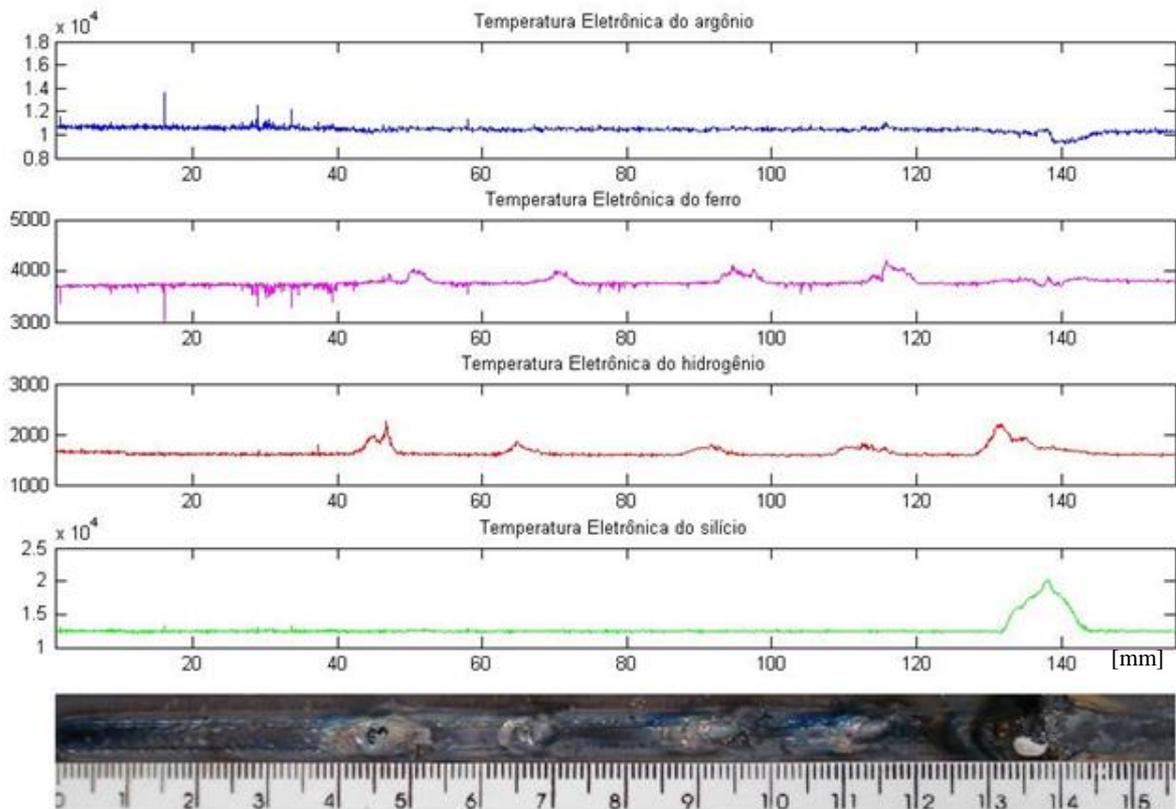


Figura 3.19 – Resultado do experimento 13.

A intenção inicial das inclusões de grãos de areia era de promover uma obstrução no fluxo do gás, mas também serviu como demonstração da flexibilidade do espectrômetro em detectar diferentes elementos químicos. A Temperatura Eletrônica relativa ao elemento pode ser calculada desde que se saiba quais linhas espectrais deve-se escolher devido ao íon que irá surgir no arco elétrico. Nessas experiências foram avaliadas a contribuição desses experimentos e a possibilidade do uso de técnicas para detecção dos defeitos.

Foi feita uma análise para cada Temperatura Eletrônica. A primeira, referente ao argônio, apresenta suavidade, só interrompida no início do processo – possivelmente devido à instabilidade gerada pela mordedura – e ao final da experiência, por causa da perturbação do fluxo de gás devido à presença dos grãos de areia.

Para a segunda temperatura, a do ferro, percebe-se cinco picos e algumas perturbações iniciais. No começo do processo havia um pouco de sujeira e a solda apresentou falhas. Mas depois, cada pico está nitidamente relacionado à inclusão de um pedaço de arame. Já no final do experimento, os grãos de areia também prejudicaram o fluxo do gás e o sensor foi capaz de detectar essa perturbação nessa linha espectral.

A presença dos cinco picos para a Te do hidrogênio foi devido ao uso da cola nesses cinco defeitos. Percebe-se que o pico do hidrogênio é anterior ao do ferro. Esse fenômeno se deve ao fato da aproximação do arco elétrico. A alta temperatura daquele ambiente evapora a cola antes da fusão do ferro contido no arame.

Por último há o silício. O pico só aparece realmente quando da presença dos grãos de areia. Verifica-se que o espectrômetro pode ser utilizado para detectar quaisquer elementos desejados durante o processo.

Os experimentos seguintes consistiram na deposição de grãos de areia de tamanhos diversificados a fim de verificar se haveria a obstrução da vazão do argônio proveniente da tocha de soldagem.

O experimento 14 segue na Figura 3.20.

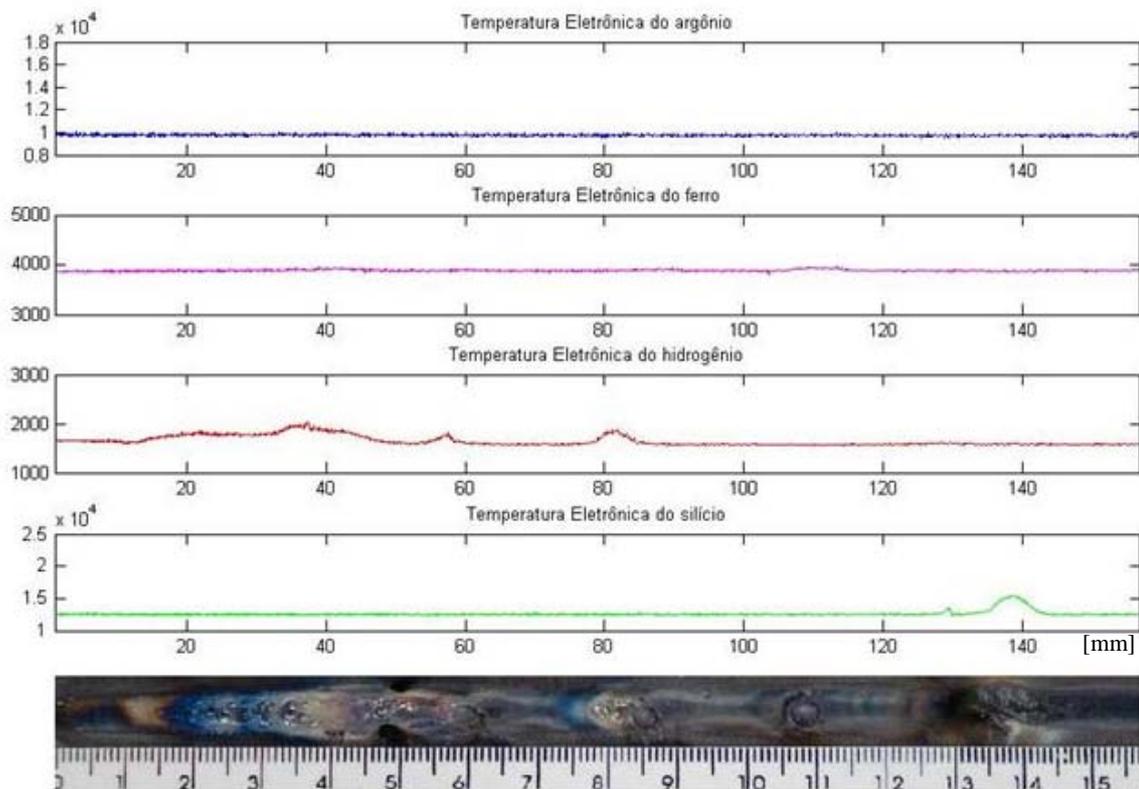


Figura 3.20 - Resultado do experimento 14.

A Te do argônio já não sofreu aquela perturbação no início do processo. A colocação de pequenos grãos de areia fez com que a vazão do gás não fosse tão prejudicada. Ela se manteve estável durante toda a experiência.

Nota-se uma diferença no comportamento da temperatura do ferro. No experimento anterior, a magnitude do pico era maior. Nesse, a perturbação foi mais suave, porém ainda perceptível para cada inclusão metálica. A escala não foi aumentada para efetuar os comparativos.

A grande perturbação inicial no caso do hidrogênio foi para confirmar se era devido à presença da cola. Foi colocada uma certa quantidade no início do caminho. A última inclusão metálica e os grãos de areia, sem cola, não apresentaram picos. Portanto, a Te do hidrogênio foi capaz de detectar a presença da cola.

O silício também apresentou um pico menor quando o arco passou pelos grãos de areia.

E para o teste 18, segue o resultado na Figura 3.21.

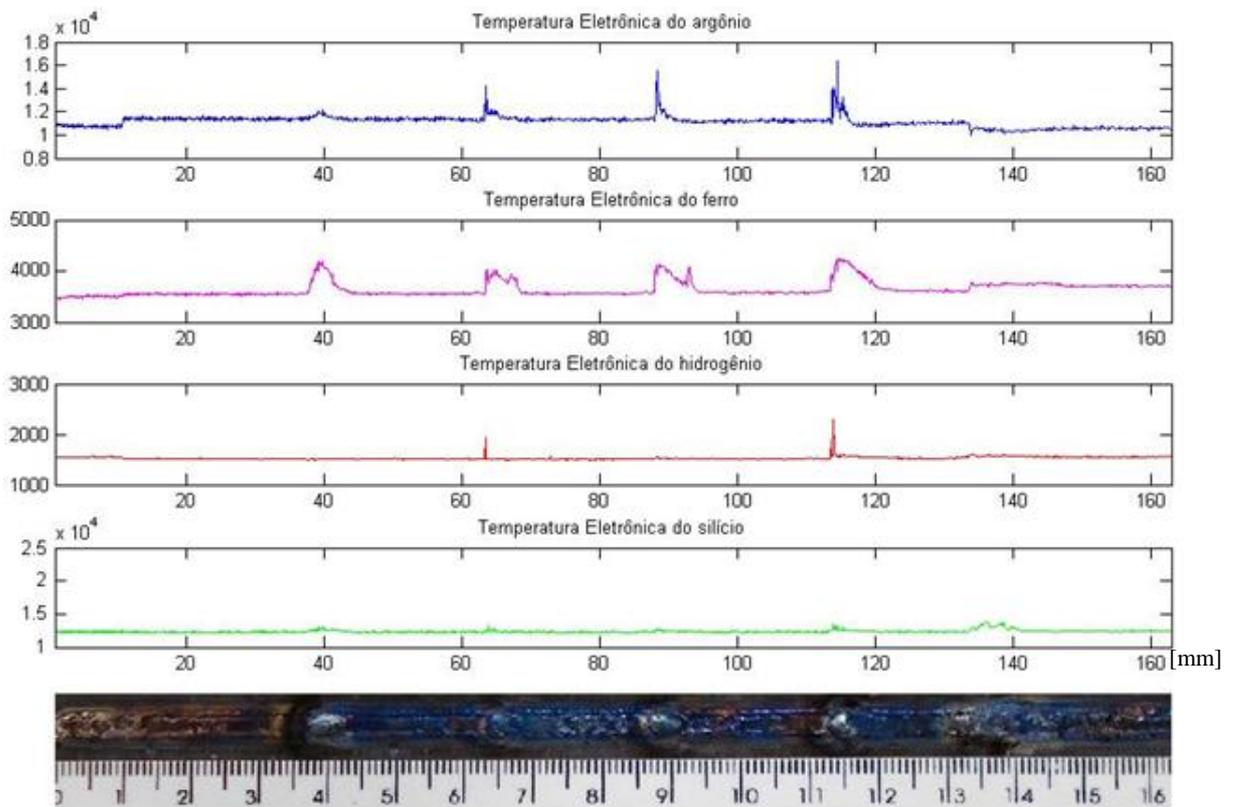


Figura 3.21 - Resultado do experimento 18.

Para o argônio, novamente os grãos de areia se tornaram um elemento de perturbação no final do processo. Mas nota-se ainda uma perturbação em todas as linhas próximo a 135 mm. Esse experimento não teve um acompanhamento visual, logo, a causa não pôde ser bem determinada. Possivelmente os grãos de areia deslocaram-se. Não foi utilizada cola para fixá-los – a Te da linha do hidrogênio deixou claro a ausência da cola. Outras evidências do fato do deslocamento dos grãos de areia foram a ausência de um pico na Temperatura Eletrônica da linha do silício e ausência do defeito na solda. A variação foi pequena. Os picos da Te do ferro foram fidedignos à presença dos pedaços de arame. As perturbações para o hidrogênio corresponderam à presença da cola.

No caso do estudo da presença de água foram aplicadas duas técnicas diferentes. Na primeira, a água foi inserida por meio de pequenos jatos, na segunda, foi simplesmente borrifada.

Para o primeiro caso, foi encontrado o resultado dado pela Figura 3.22, já se excluindo a Te do silício, pois não se vislumbra aplicação neste caso.

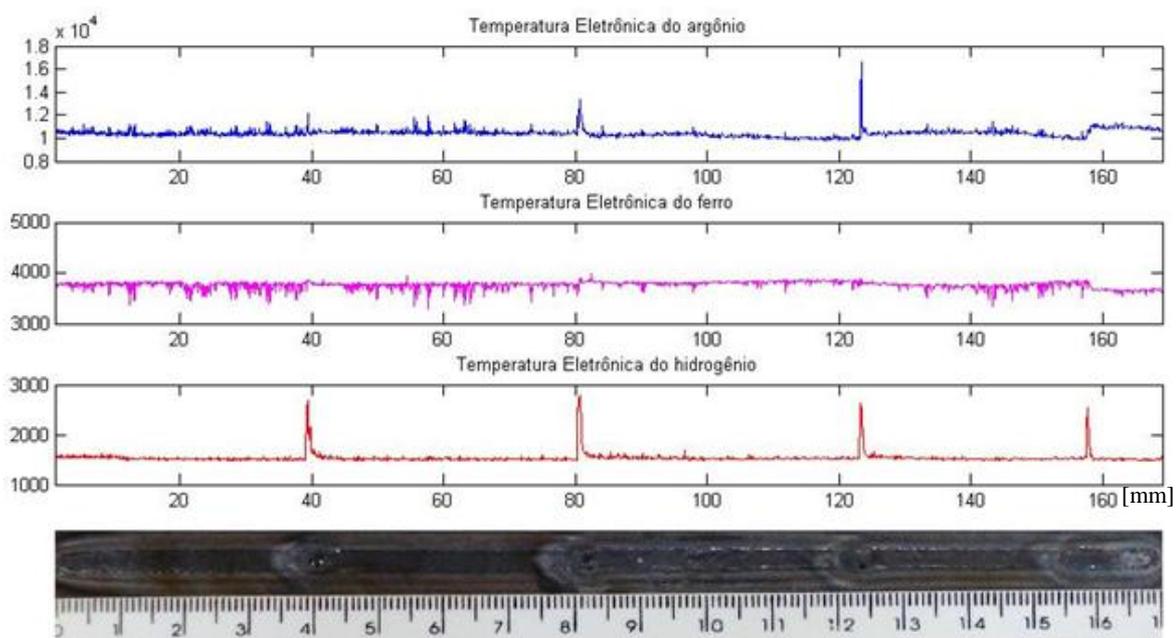


Figura 3.22 – Experimento com grandes jatos de água.

Como a inclusão da água foi por meio de jatos, houve uma grande perturbação no arco. Percebe-se pelos picos das linhas do hidrogênio e também por um transiente nas outras duas temperaturas analisadas. Nota-se também na solda um círculo com alteração de coloração, demonstrando a ocasião de um fenômeno térmico que afetou o processo. Mais uma vez mostrou-se que ocorrência de grandes perturbações no arco pôde ser captada por vários elementos, e naquele que contém o elemento causador percebeu-se a presença mais marcante pelos picos.

E para o caso da inclusão de água por meio de borrifos ainda nota-se os picos na Temperatura Eletrônica do hidrogênio, mas não foram perceptíveis para as demais Temperaturas, como pode ser visto na Figura 3.23.

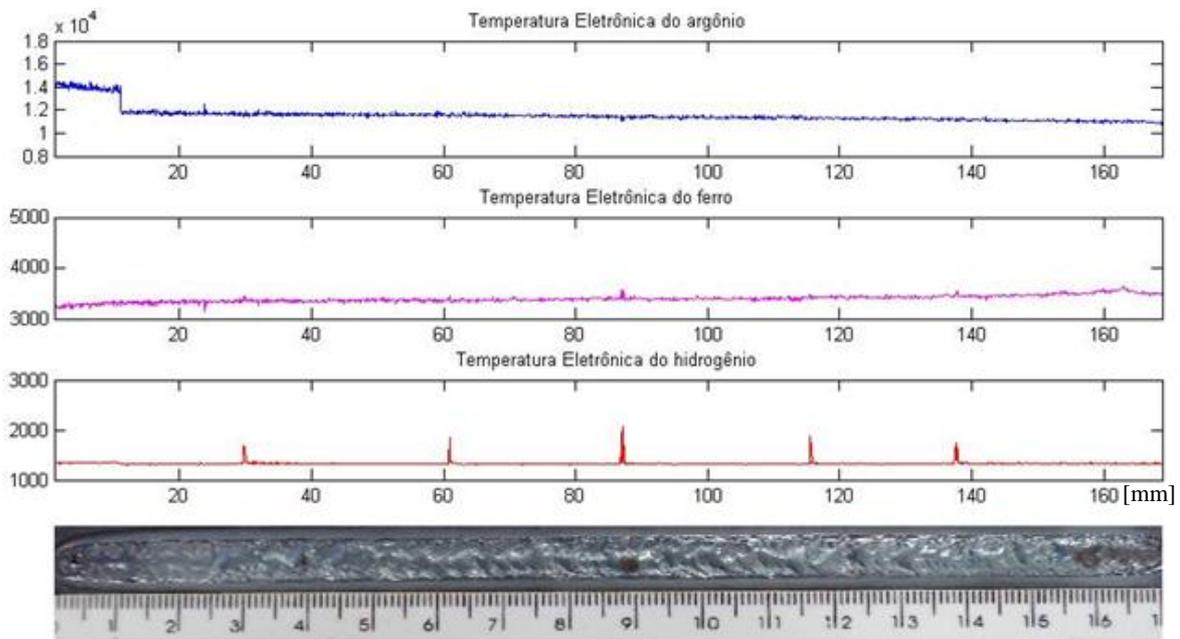


Figura 3.23 – Experiência com água borrifada.

3.7 TESTE DA RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE RELATIVA E CORRENTE

Esse teste teve como objetivo estabelecer uma relação entre a intensidade relativa de algumas linhas com a corrente de soldagem. Foi afirmado que existe essa relação diretamente proporcional.

A montagem foi realizada com a máquina Migatronik modelo TIG Navigator 240 AC/DC. Aproveitou-se para testar o sistema de aquisição de dados e demonstrar a utilização para diferentes máquinas de soldagem. É uma fonte tiristorizada, sendo assim, apresenta mais oscilações no valor médio da corrente. A consequência é uma maior inclusão de calor na solda com um aumento da taxa de fusão do metal de base. Foi montado o esquema apresentado pela Figura 3.24. As mudanças em relação à montagem da segunda bateria são destacadas pelos círculos vermelhos pontilhados.

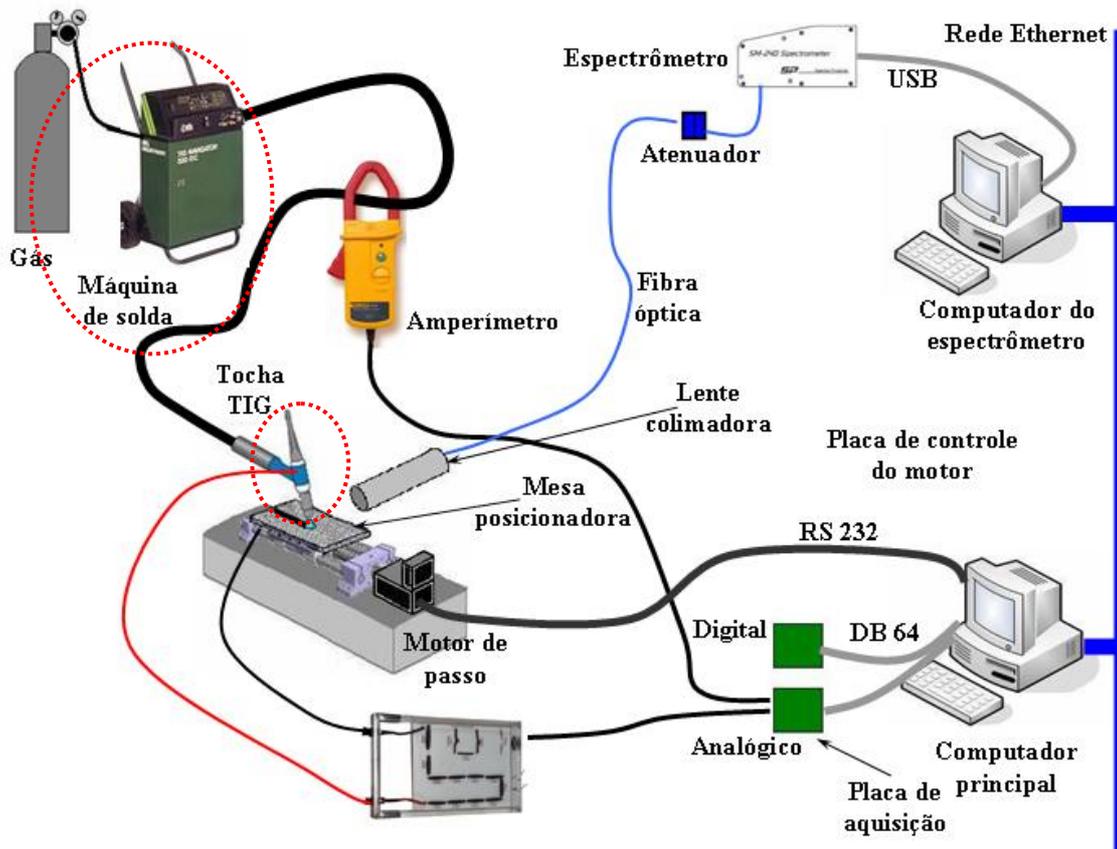


Figura 3.24 – Experimento da relação entre intensidade relativa e penetração.

Além da própria máquina de soldagem, outra diferença se encontra no local de aquisição da tensão de soldagem. Antes foi efetuada nos bornes do cabo que conectam na fonte de soldagem. Nesse experimento, foi feita diretamente na tocha.

O experimento foi realizado com gás argônio puro, vazão de 11 L/min, $l = 5$ mm e velocidade de soldagem igual a 2,5 mm/s. Aumentou-se um pouco a vazão de gás devido à ocorrência de porosidades. Ao longo de um cordão de solda foi variada a corrente. Posteriormente, amostras foram retiradas da chapa e levadas a um ensaio metalográfico. A penetração da solda foi evidenciada no ensaio.

Em seguida, na Figura 3.25, pode ser observado o experimento e a intensidade relativa ao longo da solda.

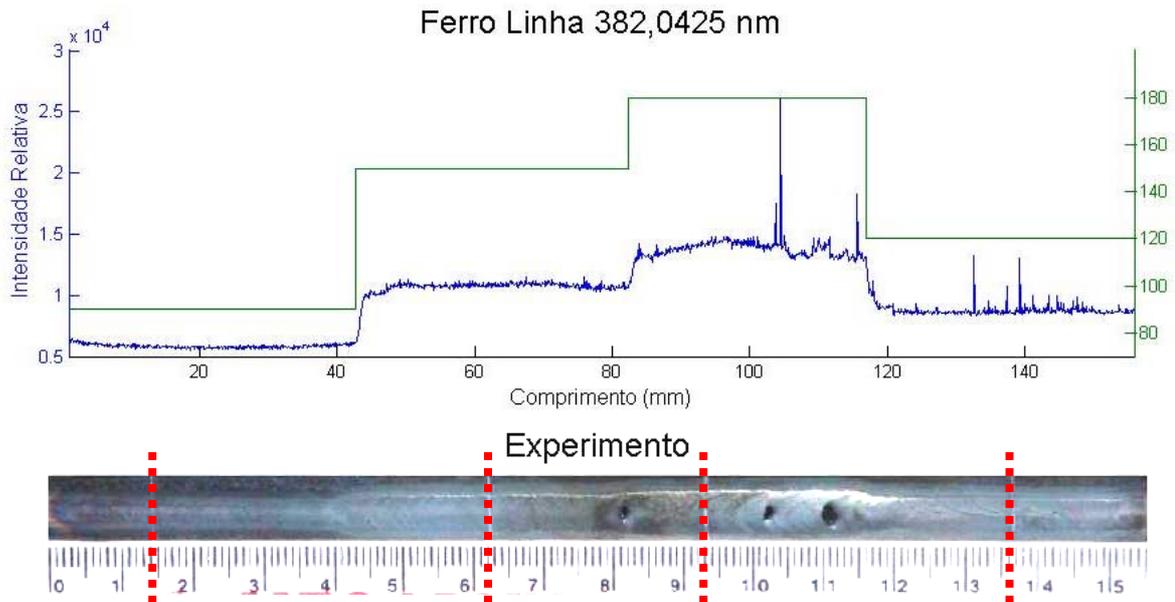


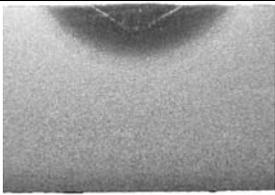
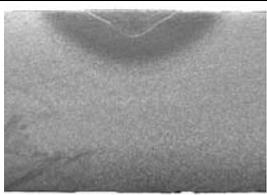
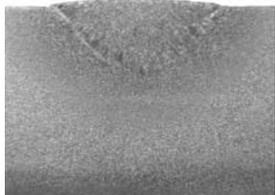
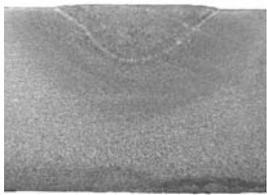
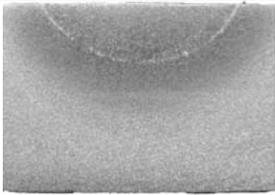
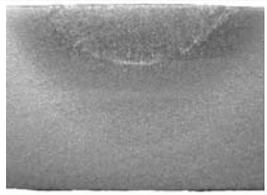
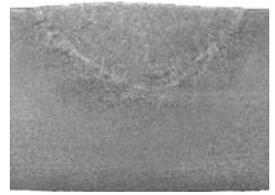
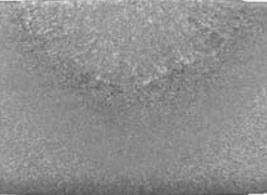
Figura 3.25 – Experimento com corrente variável

As correntes foram de 90, 150, 180 e 120 A. Todos os parâmetros seguiram constantes, exceto a corrente. Observou-se que para a maior corrente, a vazão de gás foi insuficiente para proteger a soda, por isso ocasionou as porosidades. Interessante notar que o sinal apresentou perturbações nessas regiões.

Os cortes para o ensaio foram feitos próximos às regiões destacadas pelas linhas pontilhadas da Figura 3.25. Portanto, foram obtidos 5 corpos para o ensaio metalográfico.

Segue a Tabela 3.4 contendo os dados e a comparação entre penetração e intensidade relativa em função da corrente. As fotos apresentadas mostram toda a espessura da chapa, que é de $\frac{1}{4}$ '' polegada. Nota-se que a penetração aumenta proporcionalmente à corrente. Bem como a intensidade relativa de emissão a linha escolhida também apresenta um aumento conforme o incremento na corrente.

Tabela 3.4 – Penetração obtida no ensaio de corrente variável.

Corrente (A)	Intensidade Relativa Média	Fotos Penetração	
90	5,75 E3		
120	8,79 E3		
150	10,85 E3		
180	14,24 E3		

Colocando os valores em forma de gráfico, percebe-se a correlação.

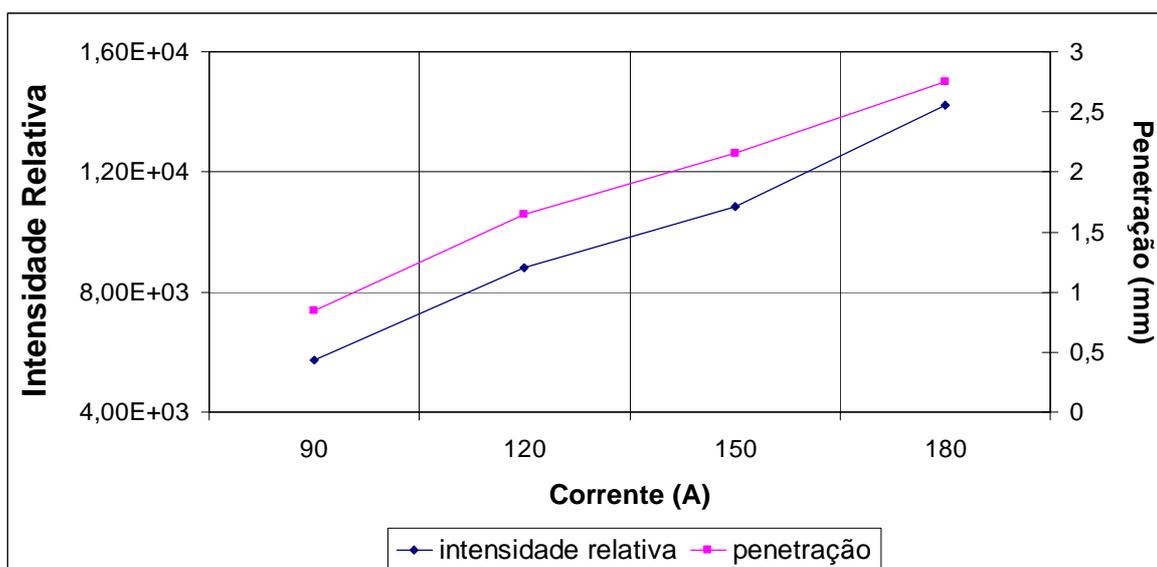


Figura 3.26 – Gráfico comparativo entre volume da solda e intensidade de linha.

3.8 TEMPERATURA ELETRÔNICA E LINHAS ESPECTRAIS

Durante o estudo surgiu a questão da necessidade do cálculo da Temperatura Eletrônica para extrair o sinal a fim de detectar defeitos na soldagem. A T_e leva em conta a intensidade relativa de duas linhas espectrais feita por meio da fórmula mostrada na Equação 2.19.

A discussão se deve ao fato de que para este trabalho é indiferente o valor absoluto da Temperatura Eletrônica. O importante é analisar as oscilações do sinal e avaliar se isso se deve ao fato da ocorrência de um defeito. Inclusive, no estudo da detecção de mudança, o sinal será normalizado.

Portanto, foi avaliado o uso de apenas uma linha espectral com o seu valor de intensidade relativa. A vantagem é a dispensa do cálculo da T_e e conseqüente redução do tempo de cálculo e do custo computacional.

Em todas as experiências efetuadas, todo o espectro foi salvo em um arquivo “.lvm”, que pode ser encarado como um arquivo de texto “.txt”. Dessa forma, foi possível efetuar diversas combinações para o cálculo da T_e e depois para a escolha de linhas espectrais.

Foi feito um programa em Matlab para a observação do espectro (análise qualitativa) ao longo do experimento. Observou-se que algumas linhas praticamente não sofrem variação quando da presença de um defeito, outras sofrem pequenas variações e ainda há aquelas em que a flutuação é bem elevada. Houve casos em que uma linha em um experimento é ideal na tarefa da indicação de defeitos. Porém, para outra experiência, analisando-se o mesmo tipo de defeito, essa mesma linha não apresentou um comportamento similar, a variação não foi tão apreciável ou ainda não houve variação do sinal. Esse fato se deve à energia necessária para a ionização de uma linha espectral, no caso deste trabalho, esse fenômeno está relacionado à corrente aplicada na soldagem.

Dessa forma, deve ser escolhida mais de uma linha espectral para cada elemento a fim de captar os defeitos que poderão surgir.

A partir dessas considerações, efetuou-se um comparativo entre a intensidade relativa de linhas espectrais e algumas Temperaturas Eletrônicas para um mesmo experimento (14) e um mesmo elemento, no caso, o ferro.

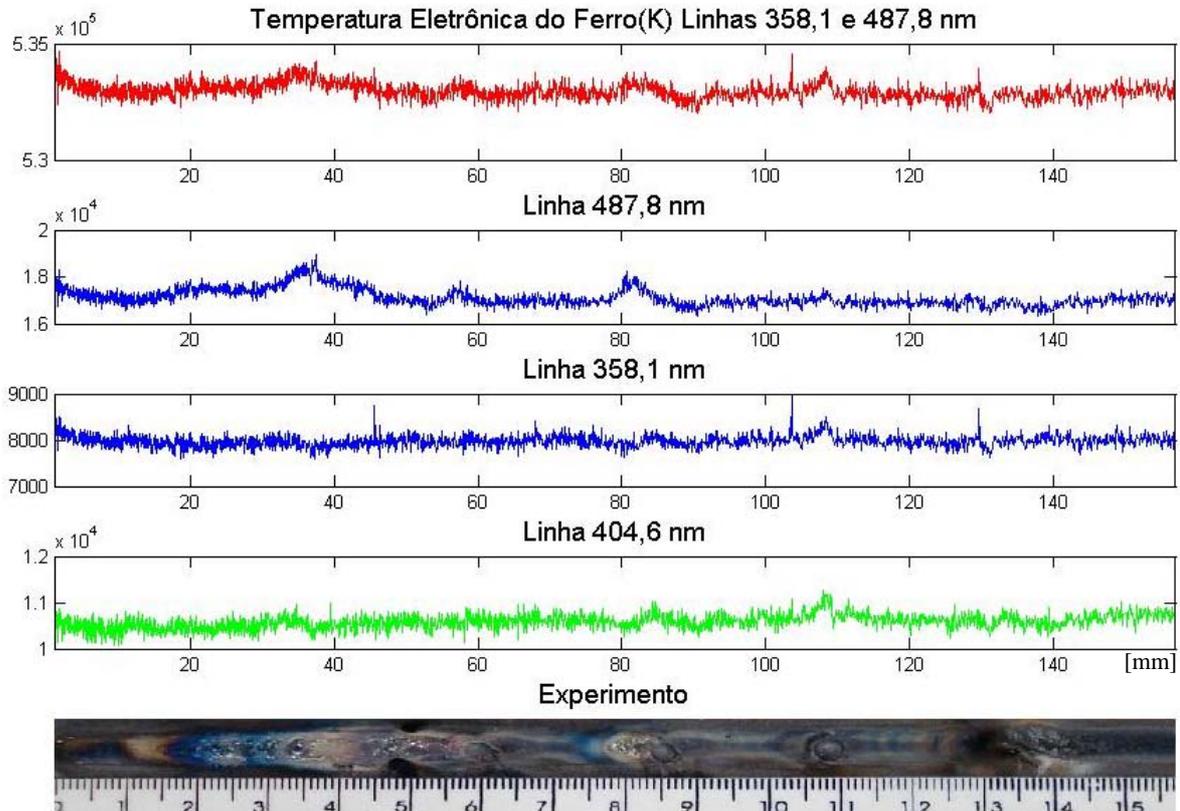


Figura 3.27 – Primeiro comparativo entre Te e linhas espectrais do ferro.

A Figura 3.27 mostra no primeiro gráfico um cálculo de Te feito a partir das linhas indicadas pelo título. No eixo das ordenadas está a intensidade relativa, no das abscissas o comprimento do cordão de solda em milímetros. No segundo e terceiro gráficos estão as linhas que participam do cálculo daquela Temperatura Eletrônica. O quarto sugere outra linha espectral. Os perfis da primeira e terceira curvas são bem parecidos. A diferença entre eles pode ser observada pelos dados do segundo gráfico. Observa-se que o comportamento da linha espectral localizada em 487,8 nm foi melhor quando analisada isoladamente. Nos trechos que não apresentaram defeitos o sinal se mostrou estável. Naquelas regiões que acusaram defeito na solda o sinal apresentou oscilação. Além disso, nota-se uma maior variação do sinal (maiores picos) sem o cálculo da Te. Isso é muito interessante para a detecção de defeitos. Deseja-se para regiões isentas de defeitos uma

intensidade relativa constante. Para o intervalo em que haja uma deformidade, o sinal deve apresentar distorção. A última linha sugerida não apresentou um bom comportamento.

Há várias linhas para serem analisadas. Foram escolhidas aquelas que ofereceram maiores oscilações quando da presença de defeitos durante o experimento. Seguem mais alguns exemplos apresentados pela Figura 3.28.

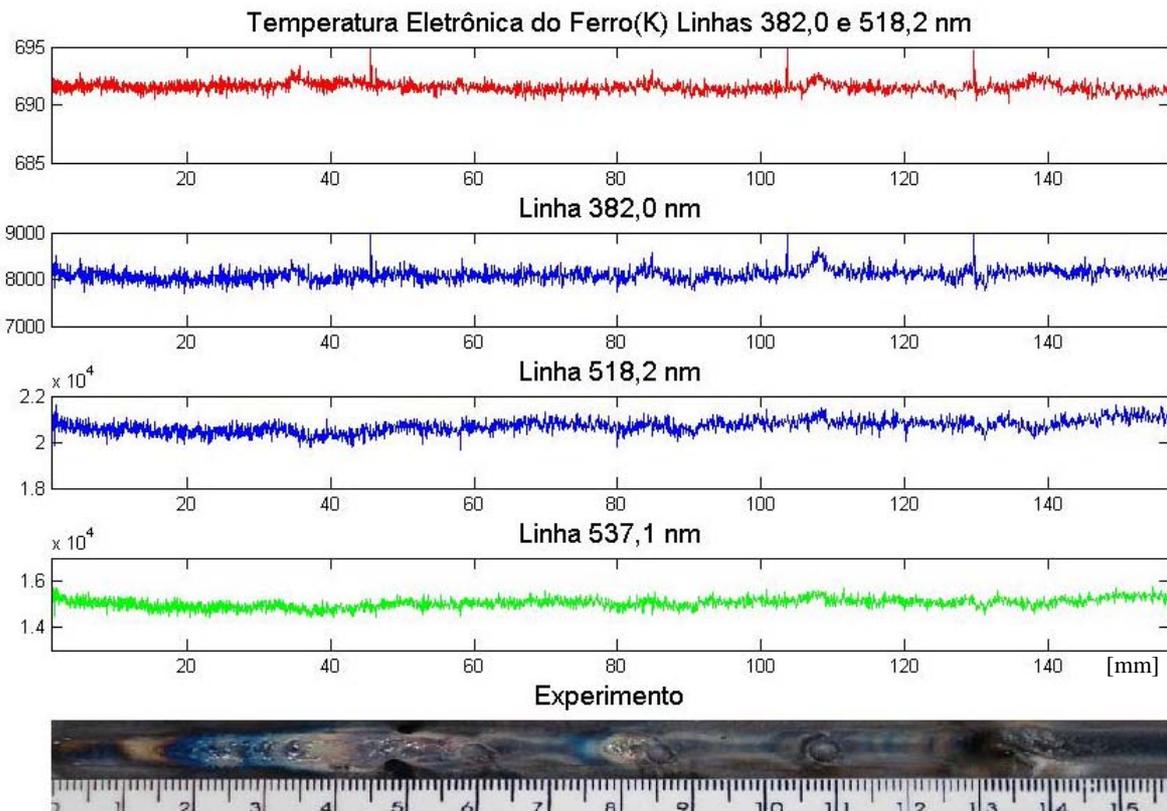


Figura 3.28 – Segundo comparativo entre Te e linhas espectrais do ferro.

Nesse bloco, novamente percebe-se uma semelhança entre o resultado obtido pelo cálculo da Temperatura Eletrônica e as suas linhas espectrais. Observa-se na Te e na linha 382,0 nm perturbações quando há um defeito na solda. As oscilações na linha 518,2 nm são menos perceptíveis, mas ocorreram. Já para a outra linha sugerida, não é possível reparar bem no sinal a oscilação devido à presença dos defeitos. Neste caso, poder-se-ia utilizar a linha 382,0 nm ao invés do resultado obtido pelo cálculo da Te.

Seguem mais sugestões de linhas espectrais na Figura 3.29.

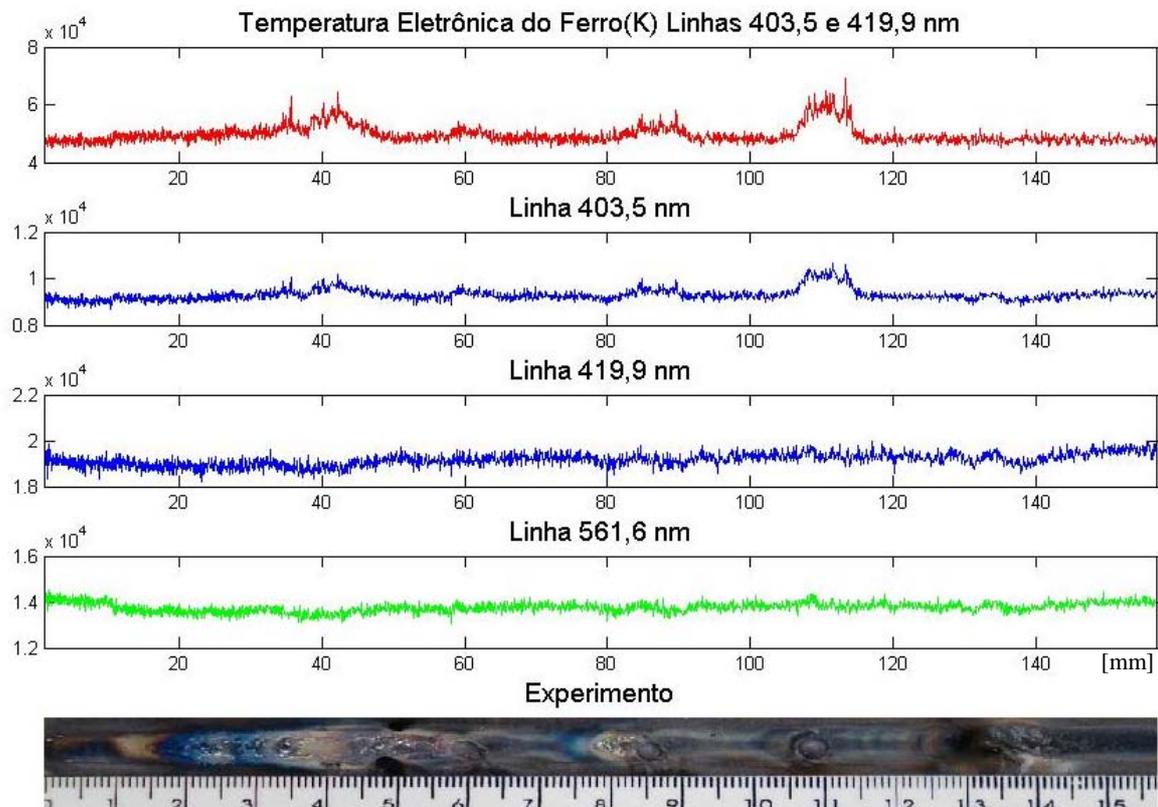


Figura 3.29 – Terceiro comparativo entre Te e linhas espectrais do ferro.

Na Figura 3.29, percebe-se um comportamento similar para a Temperatura Eletrônica com as linhas sugeridas e uma das linhas espectrais que compõe o seu cálculo. A Te é calculada por meio da intensidade relativa, percebe-se que aquele maior contribuidor foi a linha 403,5 nm. As outras duas linhas apresentaram comportamentos similares entre si e não têm muito a contribuir na tarefa da determinação dos defeitos.

Pode-se afirmar que aquela linha que apresentar oscilações nas regiões defeituosas pode ser analisada isoladamente ao invés de participar com outra linha no cálculo da Te. Foram apresentados dois casos em que o uso isolado ou por meio da determinação da Temperatura Eletrônica garantiram resultados semelhantes. Inclusive o primeiro caso oferece uma melhoria quando a linha foi analisada separadamente.

A escolha da linha correta fica mais a cargo de qual corrente será aplicada no processo. Para correntes próximas a 90 A sugere-se a linha 487,8 nm. Já para faixas maiores,

próximas a 120 A, utilizou-se a linha 518,2 nm. Para correntes maiores, a linha 403,5 nm é uma opção. Além do ferro, os outros elementos, como argônio e hidrogênio, também tiveram linhas espectrais escolhidas.

No caso do argônio, a experiência escolhida é da primeira bateria de testes, aquele caso em que houve a variação no fluxo de gás. Segue a Figura 3.30 com um primeiro comparativo:

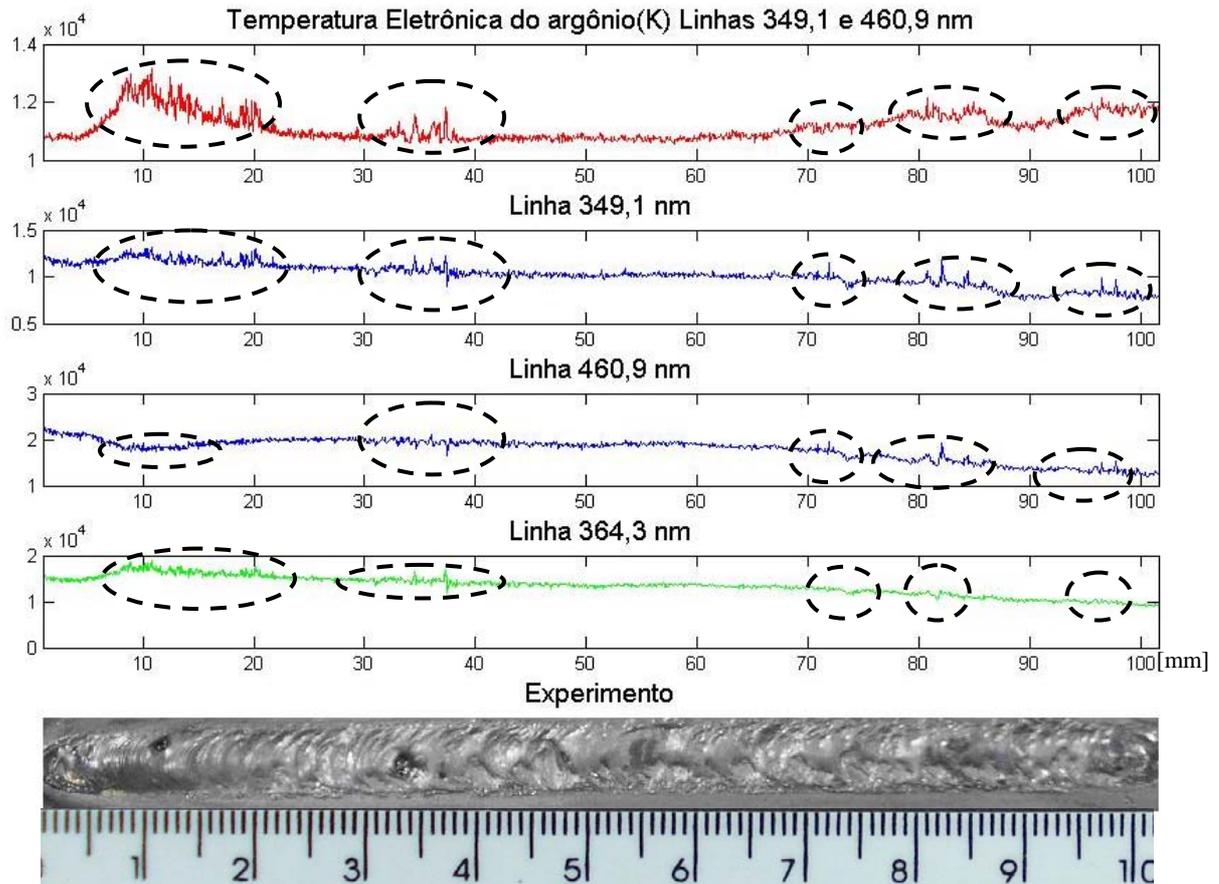


Figura 3.30 – Primeiro comparativo entre Te e linhas espectrais do argônio.

Comparando-se a Temperatura Eletrônica do par de linhas 349,1 e 460,9 nm com essas mesmas linhas de modo isolado, nota-se que há uma relação entre eles. O primeiro gráfico refletiu uma fusão entre o segundo e terceiro gráfico. O gráfico Te apresentou mais oscilações do que o da linha 349,1 nm e da linha 460,9 nm. Os círculos destacam as regiões que apresentaram variação no fluxo do gás. Novamente revelou-se que se pode utilizar uma linha espectral do que o cálculo da Te, uma vez que as linhas apresentaram as variações nas mesmas regiões no caso do cálculo da Te. A última linha apresentada revelou menos variações em comparação com as demais.

Ainda com o mesmo experimento, seguem mais sugestões, na Figura 3.31, de linhas espectrais em comparação com um cálculo de Temperatura Eletrônica.

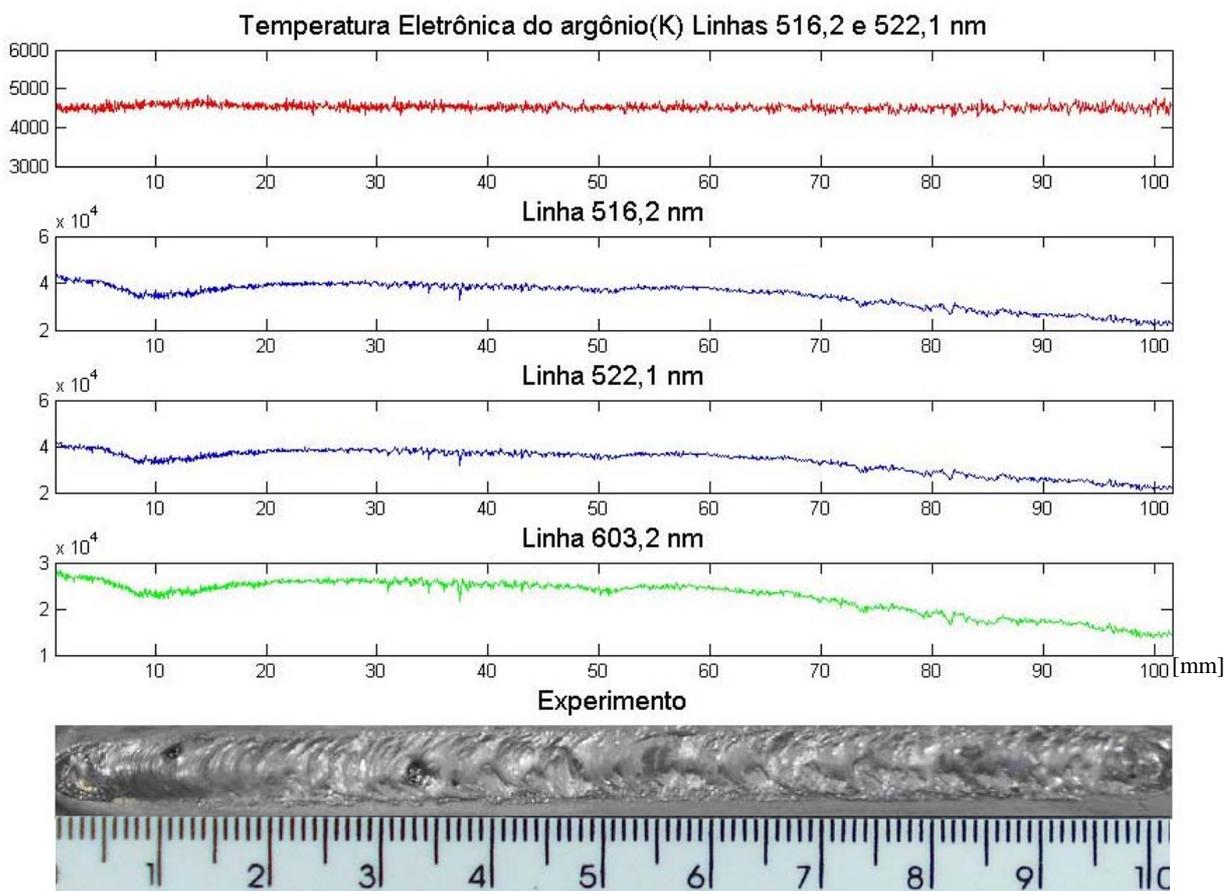


Figura 3.31 – Segundo comparativo entre Te e linhas espectrais do argônio.

Nesse caso, observa-se uma grande semelhança entre as linhas avaliadas de modo isolado. As oscilações se apresentaram de modo semelhantes nas mesmas regiões, bem como a variação na média do sinal. Mas quando se calculou a Te, o resultado obtido não apresentou variação na média, como nas outras linhas, nem grandes variações na variância do sinal nas regiões em que houve variação no fluxo do gás. Portanto, houve grande vantagem na utilização da linha em relação ao cálculo da Te, considerando-se a qualidade do sinal obtido, além do ganho computacional.

O experimento analisado para o hidrogênio é o 27 da segunda bateria de testes. Tal experiência consistiu em borrifar água na região do arco a fim de analisar se linhas

espectrais correspondentes ao hidrogênio seriam capazes de captar a perturbação causada pela presença desse elemento químico.

Foram utilizadas as seguintes linhas espectrais: 486,4; 486,1 e 656,3 nm. A Te foi calculada a partir da primeira e última linhas apresentadas.

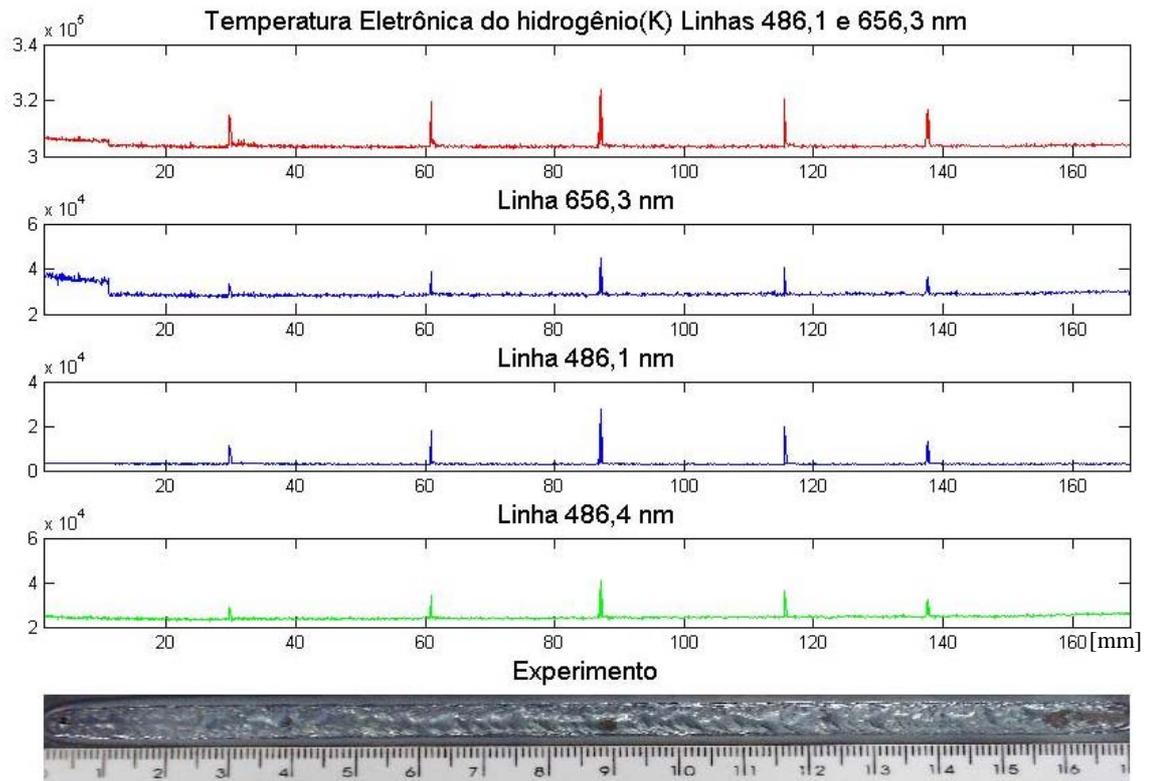


Figura 3.32 – Comparativo entre Te e linhas espectrais do hidrogênio.

Todas as linhas se comportam de modo parecido por acusarem a presença do hidrogênio praticamente nas mesmas posições em relação à solda. Com o cálculo da Temperatura Eletrônica aumentou-se um pouco a magnitude dos picos, porém não foi tão apreciável. Nesse caso também podem-se aplicar apenas as linhas espectrais isoladamente ao invés de se calcular a Te para monitorar o arco elétrico. Sugere-se a linha 486,1 nm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pelo o que foi apresentado, o espectrômetro foi capaz em detectar alterações no arco elétrico. Mas ainda é objetivo estabelecer um sistema capaz de acompanhar o sinal lido e determinar quando ou aonde ocorreu tal perturbação. Desse modo, as inspeções após o processo de soldagem, como os ensaios não destrutivos, podem ter o seu trabalho reduzido. É possível que o equipamento a ser desenvolvido gere um relatório contendo a localização dos pontos, regiões, ou qualquer artifício capaz de indicar aonde há uma maior probabilidade da presença de um defeito. Para essas regiões deve ser dada uma maior atenção ou apenas serão os pontos a serem verificados.

O uso daquelas técnicas estatísticas de detecção de mudança foi possível, pois o processo de soldagem é estocástico (Alfaro *et al*, 2006). Também foi demonstrado que a corrente de soldagem e a intensidade relativa guardam uma correspondência. Resta provar que o sinal do espectrômetro obedece a uma função distribuição de probabilidade. Para se verificar isso, coletou-se uma amostra do sinal lido e foram efetuados testes de distribuição

Foram realizados dois experimentos sobre uma placa de aço. Ambos a uma velocidade de 2,5 mm/s, vazão do argônio, gás de proteção, de 10 L/min a uma distância eletrodo peça de 5 mm. O que diferencia os experimentos é o valor da corrente, um de 90 A e outro de 150 A. Foram analisadas algumas linhas espectrais dos elementos em estudo: argônio, ferro e hidrogênio. Os dados foram salvos e foi feita a análise se os dados obedeciam à distribuição normal. Para se certificar da afirmação, foram levantados os gráficos de probabilidade normal dos dados com um nível de significância de 95%, com uma amostra de 400 pontos. No eixo das ordenadas se encontra a porcentagem – probabilidade. No eixo das abscissas os valores da intensidade da linha. Para que os valores obtidos obedecam à distribuição normal, o valor p deve se encontrar acima de 0,005.

Desse modo, com corrente igual a 90 A foram levantados os gráficos da Figura 4.1.

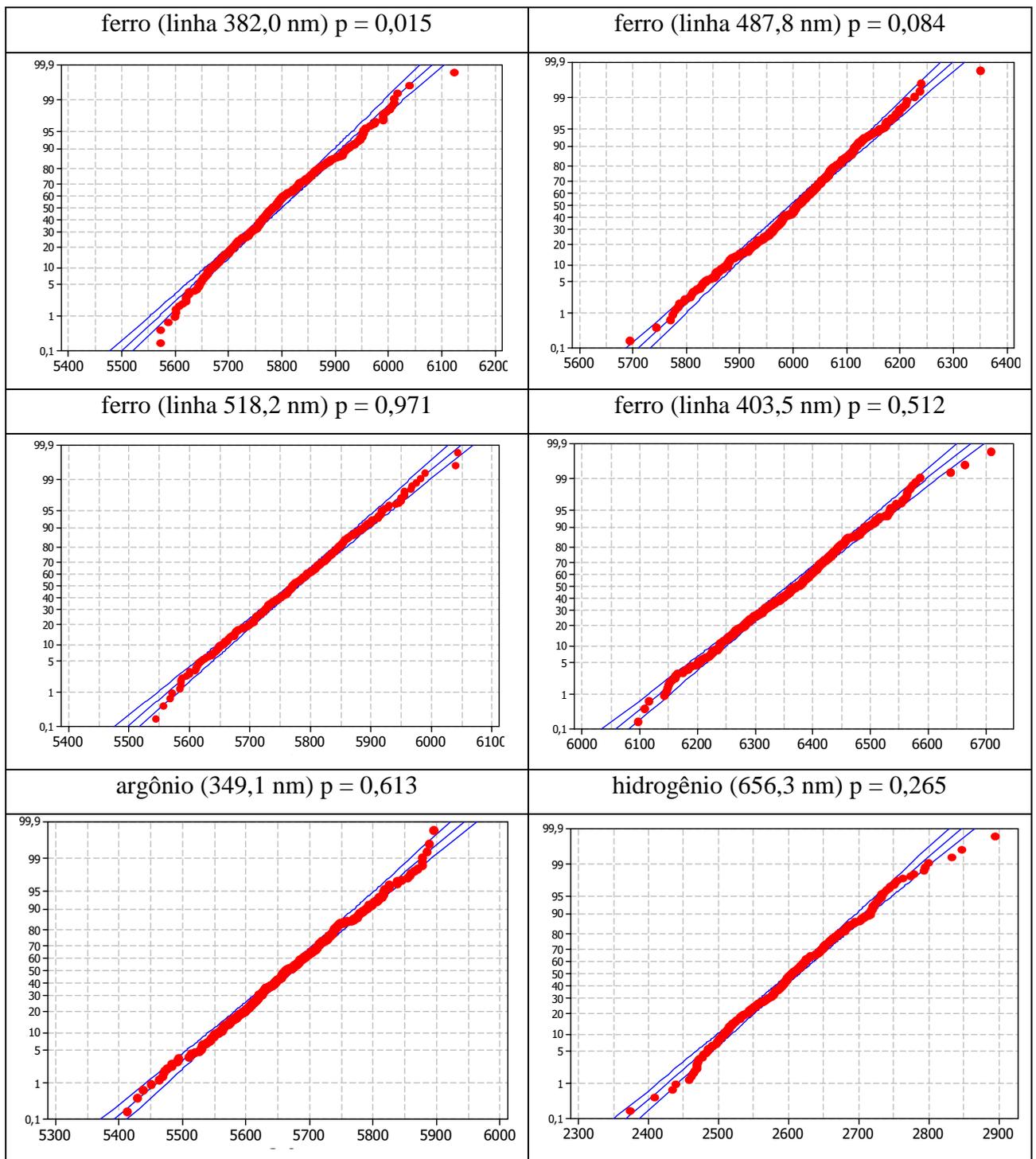


Figura 4.1 – Teste de normalidade dos dados de linhas espectrais a 90 A.

Como pode ser visto, foi possível aproximar os dados coletados pela distribuição normal, pois todos os valores p obtidos foram maiores do que 0,005. Os gráficos para a corrente 150 A se encontram na Figura 4.2.

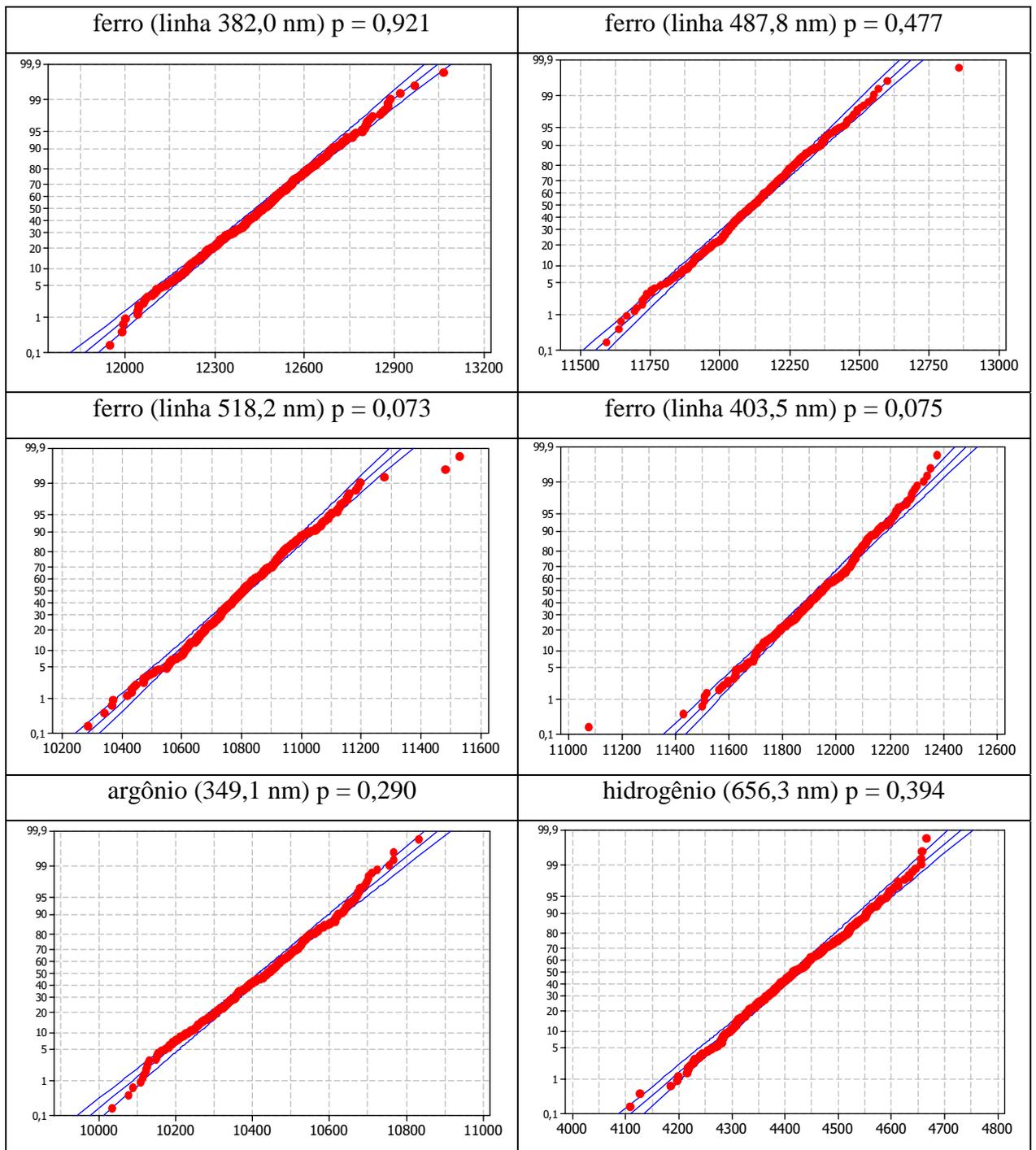


Figura 4.2 - Teste de normalidade dos dados de linhas espectrais a 150 A.

Também pode-se afirmar que os dados seguem distribuição normal, os valores p foram maiores do que o mínimo 0,005. Dessa forma, o modelo adotado é válido. O sinal lido é um valor médio somado a um ruído que segue a distribuição normal de média nula e variância definida.

4.1 DETECÇÃO DE MUDANÇA BASEADA EM UM MODELO

Nesta seção é apresentado o comportamento de alguns algoritmos de detecção bem como são feitos alguns comparativos. No apêndice B são apresentadas tabelas de desempenho dos diferentes algoritmos apresentados. Primeiramente serão apresentados alguns algoritmos mais simples, baseados em um modelo. É o caso do Soma Cumulativas (*CUSUM*) nas suas duas formas, o *LS* e o *RLS* e também o Filtro de Kalman com teste estatístico por Somas Cumulativas.

O experimento escolhido para apresentar é o 14 da segunda bateria de testes. O sinal adquirido apresenta uma perturbação inicial; dois defeitos evidentes, o primeiro e o terceiro; um defeito pouco menos evidente, o segundo; e outro com menor perturbação, o quarto. Também há os grãos de areia, o defeito mais sutil de todos. Desse modo, com esse experimento pode-se avaliar o desempenho do algoritmo. Os outros experimentos estão apresentados no apêndice A. Para o *CUSUM LS*, algoritmo apresentado na Equação 2.38, foram usados os valores de $v = 0,5$ e $h = 4$. Com eles foi alcançado um bom desempenho. Obteve-se o resultado mostrado na Figura 4.3.

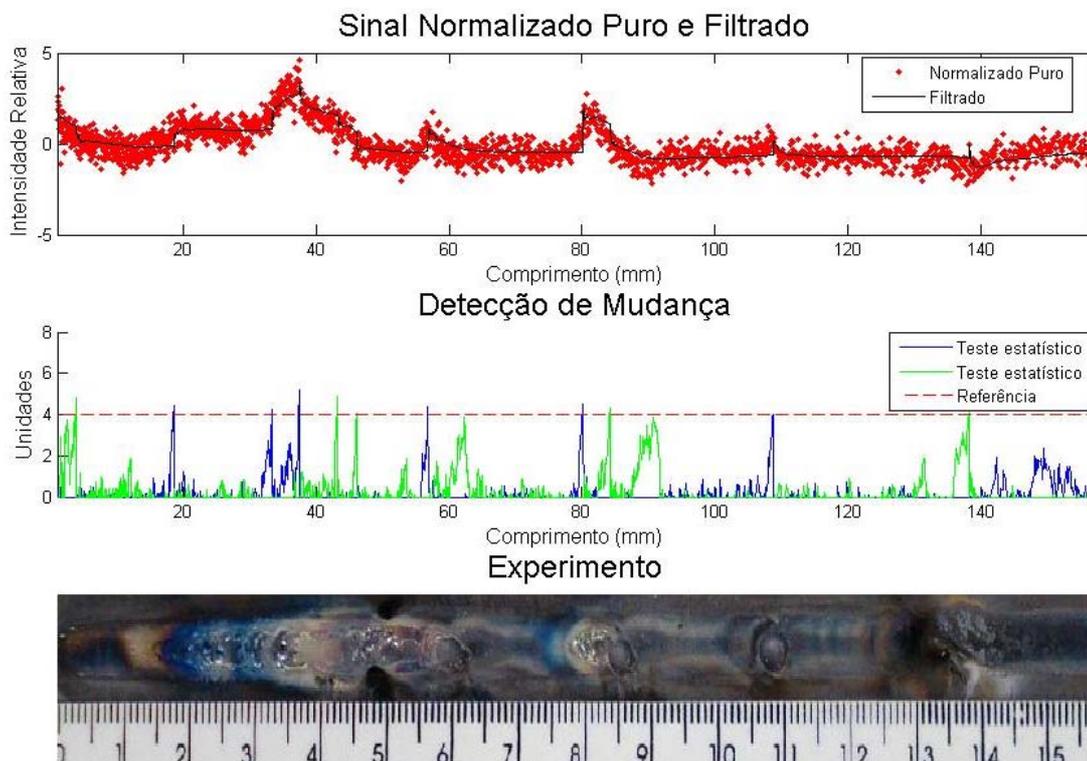


Figura 4.3 – Resultado do algoritmo *CUSUM LS* para o experimento 14.

Observa-se claramente que o filtro cumpriu com o seu papel, ou seja, houve boa estimação do sinal lido e o ruído causado pela variável aleatória não aparece. Nas regiões em que não houve defeito o sinal filtrado permaneceu estável. Quando houve um pico, o filtro estimou o valor e acompanhou o valor médio. Todos os defeitos foram detectados pelos testes estatísticos – estes relacionados com os valores positivos e negativos dos resíduos. O algoritmo foi apresentado pela Equação 2.38.

Para todos os experimentos, serão desconsideradas as perturbações no arco no início e final da solda, uma vez que são inerentes ao processo.

Um algoritmo um pouco mais elaborado, o *CUSUM RLS*, observado na Equação 2.39, mediante os parâmetros $\lambda = 0,96$; $\nu = 0,5$; $h = 4$ se comportou da forma da Figura 4.4.

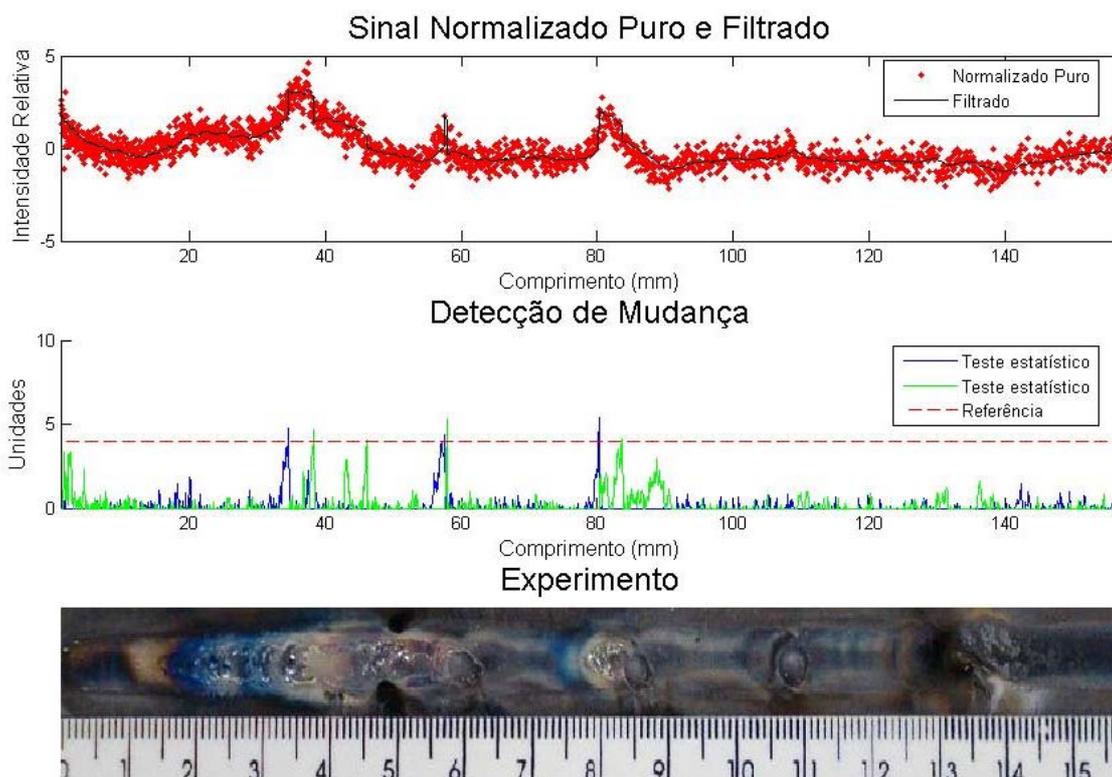


Figura 4.4 – Resultado do algoritmo *CUSUM RLS* para o experimento 14.

Nesse caso houve mais fatores para se controlar. Buscou-se o melhor desempenho, mantiveram-se os parâmetros do filtro anterior, e houve sucesso. Mesmo sendo mais

elaborado foi menos eficiente na detecção que o anterior. Os dois últimos defeitos passaram no teste estatístico. Porém os outros foram percebidos pelo algoritmo.

Outra sugestão é o uso do Filtro de Kalman com o teste por Somas Cumulativas. Primeiramente será avaliado o uso desse filtro nas técnicas de detecção de mudança.

Foi explicitado que esse filtro é um estimador de mínima variância. Pode-se efetuar uma comparação entre ele outros de mínima variância, como o de Mínimos Quadrados e Mínimos Quadrados com Janela. Para um mesmo experimento, a filtragem do sinal, utilizando-se parâmetros ótimos de desempenho. O resultado é observado nos gráficos apresentados na Figura 4.5, em que no eixo das ordenadas se encontra a intensidade da linha e nas abscissas o comprimento do cordão de solda em milímetros.

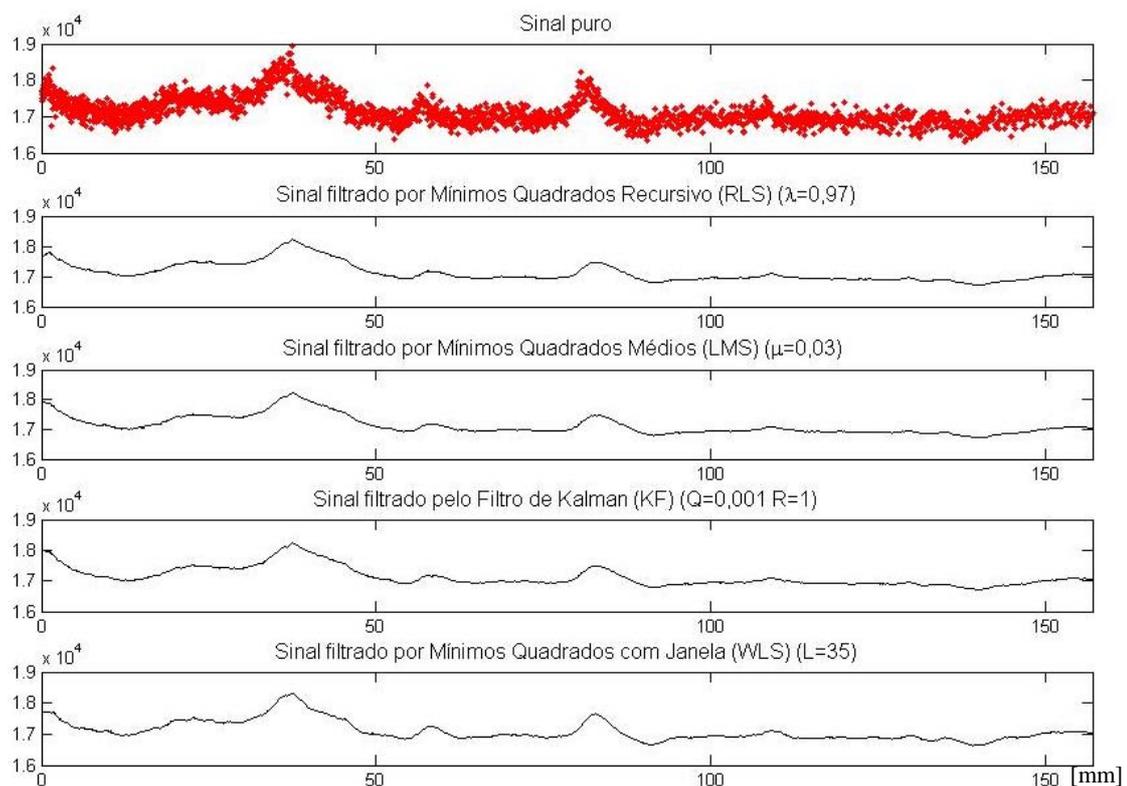


Figura 4.5 – Comparativo entre filtros adaptativos para o experimento 14.

No eixo das abscissas se encontra a posição do ponto no vetor de dados, nas ordenadas está a Intensidade Relativa. Todos os filtros cumpriram com a sua tarefa. Estimaram o valor lido e retiraram a variável aleatória responsável pelo ruído. O filtro *RLS* apresentou comportamento idêntico ao *LMS*, pois foi obedecida a relação $\mu = 1 - \lambda$. A janela para os

Mínimos Quadrados resultou em um valor alto para que as oscilações no sinal fossem descartadas. É possível obter uma melhora com o aumento da janela. Comparando-se o *KF* com os dois anteriores a ele percebe-se uma grande semelhança. Consta-se que eles são estimadores de mínima variância, assim como o Kalman.

E para o *KF* foi escolhido um valor baixo para Q , a variância da variável aleatória do processo. Portanto, o ruído apresentado é devido à leitura da medição causado pela v.a. v , cuja variância é R .

Mesmo com a retirada da variável aleatória pelos filtros, eles ainda não apresentam comportamento semelhante ao *CUSUM LS*. É desejável a existência de uma mudança mais abrupta no sinal. Nos trechos sem defeito o sinal deveria ser constante, mas quando se aproxima do defeito deveria ocorrer uma elevação brusca. Segue uma comparação na Figura 4.6.

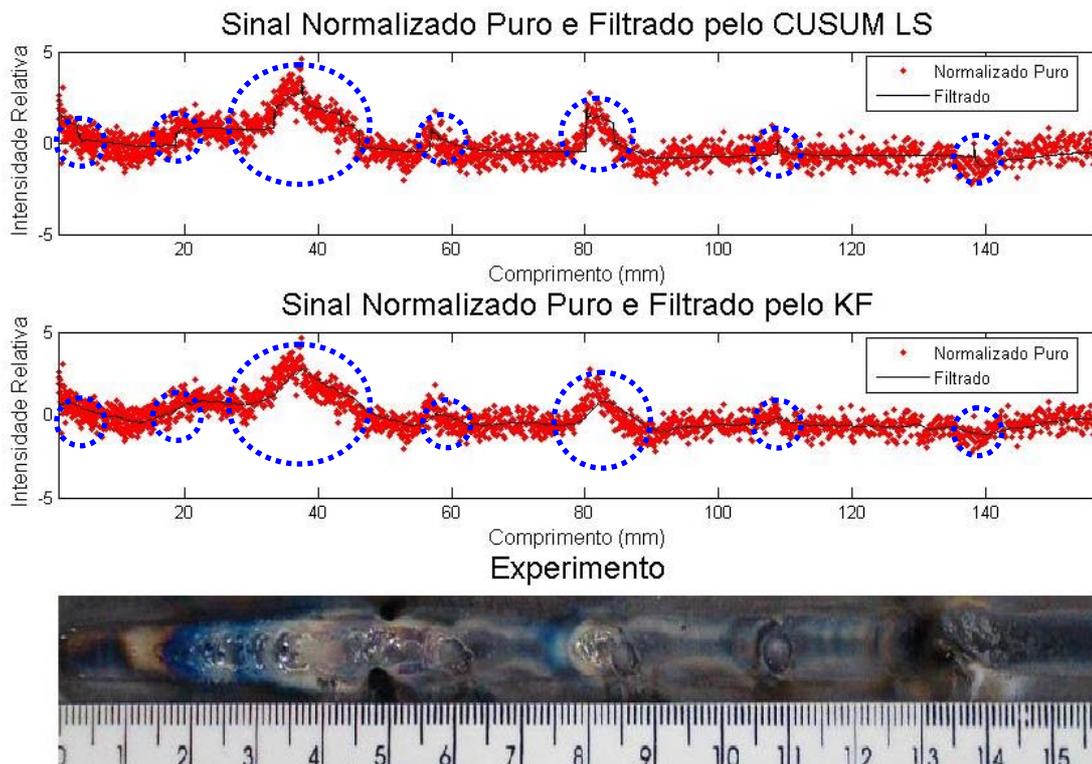


Figura 4.6 – Comparativo entre *CUSUM LS* e o *KF* para o experimento 14.

Desse modo, o Filtro de Kalman não apresentará desempenho similar ao de Somas Cumulativas de Mínimos Quadrados. Finalmente, segue o experimento com a utilização do

Filtro de Kalman com a detecção de mudança efetuada por Somas Cumulativas – Equação 2.38. Os parâmetros que apresentaram bom desempenho foram $Q = 0,001$; $R = 1$; $\nu = 0,5$; $h = 4$. O resultado é dado pela Figura 4.7.

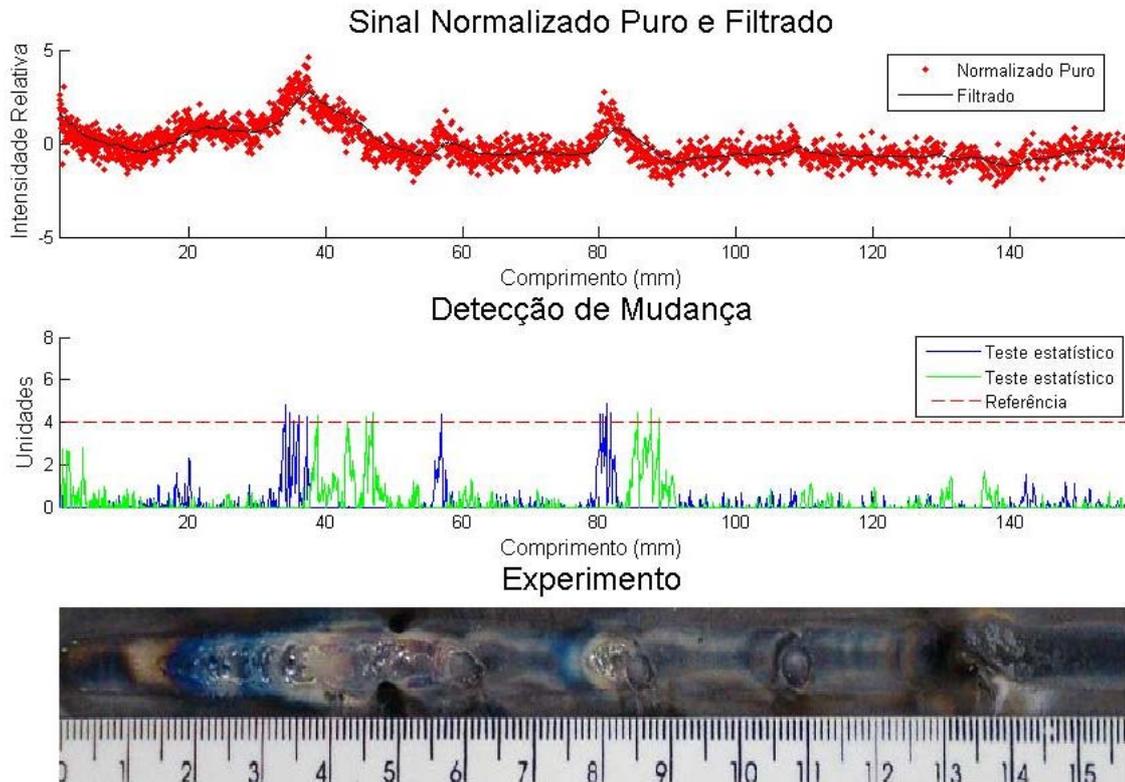


Figura 4.7 – Detecção com KF e $CUSUM$ para o experimento 14.

Constata-se que a tarefa da detecção dos defeitos não foi eficaz. O valor da medida da distância dos dois últimos foi baixo. No sinal filtrado percebe-se uma pequena oscilação nessas duas regiões, mas não bastou para atingir o valor de referência.

4.2 DETECÇÃO DE MUDANÇA BASEADA EM JANELA MÓVEL

A solução para a questão anterior é a aplicação da técnica que utiliza a comparação entre dois modelos.

Analisa-se o comportamento do *Brandt's GLR*, dado pela Equação 2.43. Foram escolhidos os valores: $L = 10$, $h = 4$. Resultado dado pela Figura 4.8.

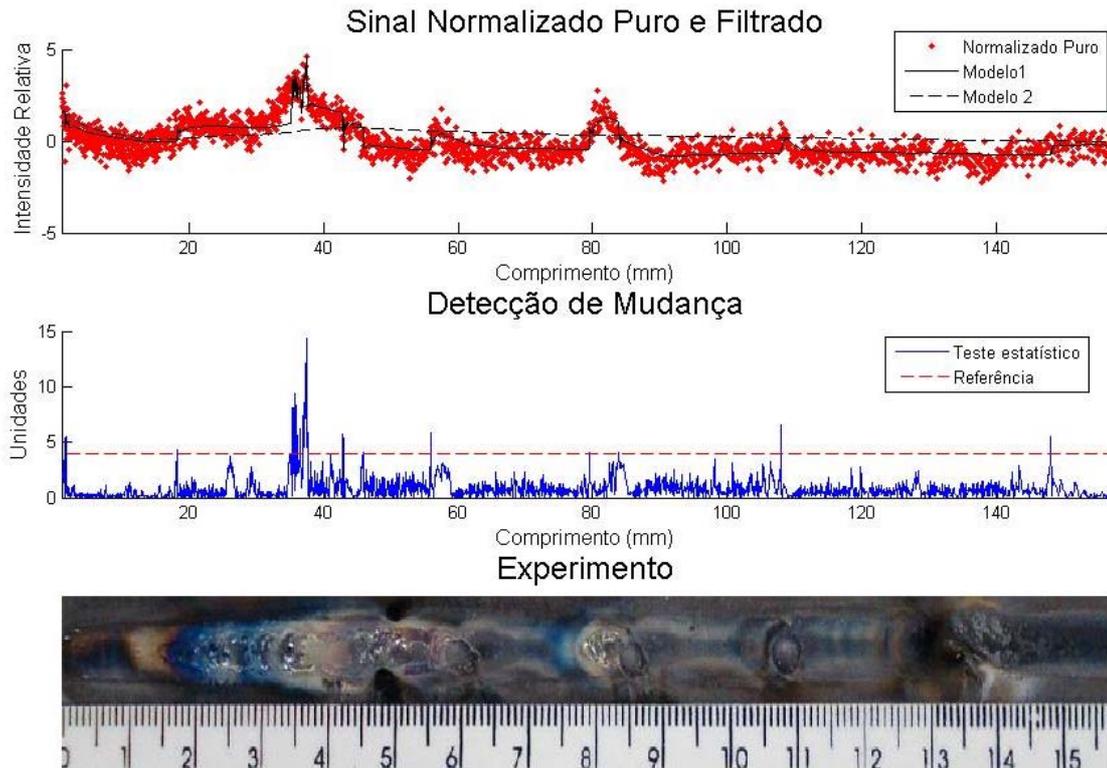


Figura 4.8 - Resultado do algoritmo *Brandt's GLR* para o experimento 14.

Nota-se a atuação dos dois modelos. O lento, Modelo 2, realmente não acompanhou as variações abruptas. Ele trabalha com o acúmulo de dados anteriores, por isso quando se aproximou do final do experimento houve uma tendência a um valor médio do total de dados. O Modelo 1, baseado no filtro rápido, apresenta um bom desempenho, porém não apresentou variação na região dos grãos de areia

Também pode ser aplicado o Filtro de Kalman ou Mínimos Quadrados com janela móvel dado pela Equação 2.46. A detecção de mudança pode apresentar formas variadas de cálculo tanto para a distância quanto para o teste estatístico.

Portanto, seguindo o fluxograma da Figura 2.13 e da Figura 2.14 serão analisadas algumas combinações de algoritmos variando-se os cálculos intermediários de filtros, medição de distância e teste estatístico.

Inicialmente, segue o Filtro de Kalman com algoritmo de Brandt para determinação da distância e o de Somas Cumulativas como regra de parada. Será analisado o desempenho

do *KF*. Foram escolhidos os parâmetros com $Q_0 = Q_1 = 0,0001$ e $R_1 = R_2 = 1$. O teste estatístico foi feito com $h = 1$ e $\nu = 0,8$. Obteve-se o seguinte resultado:

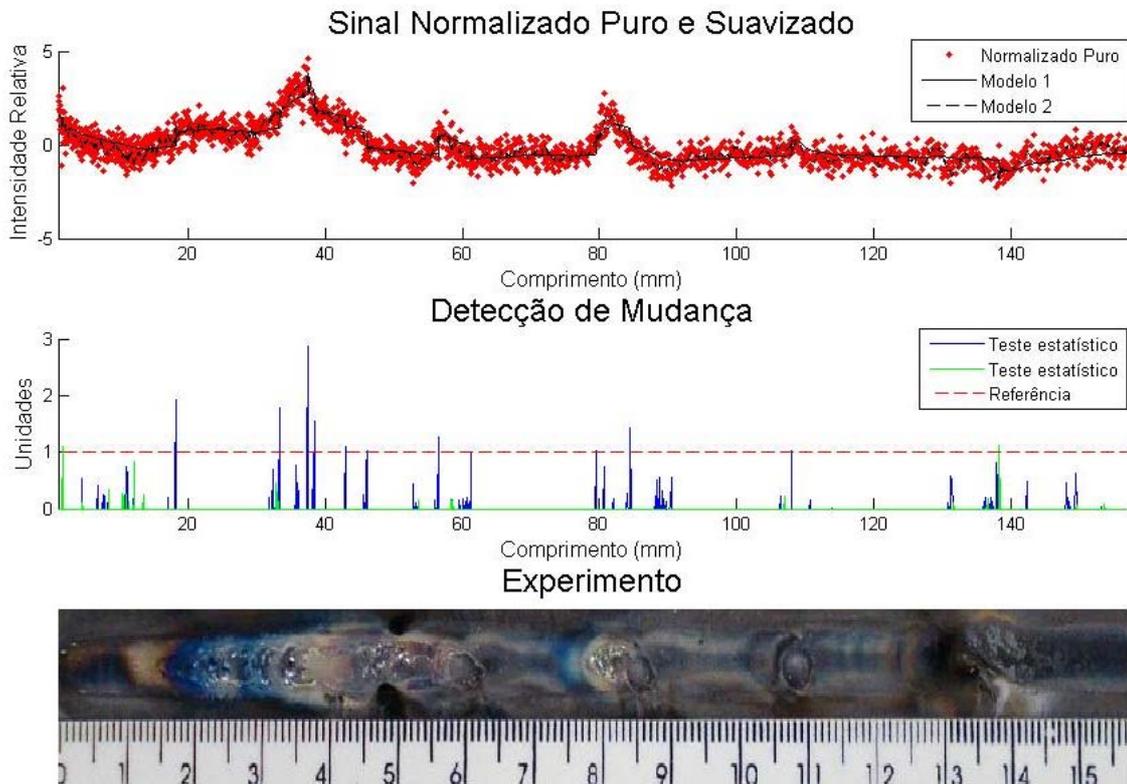
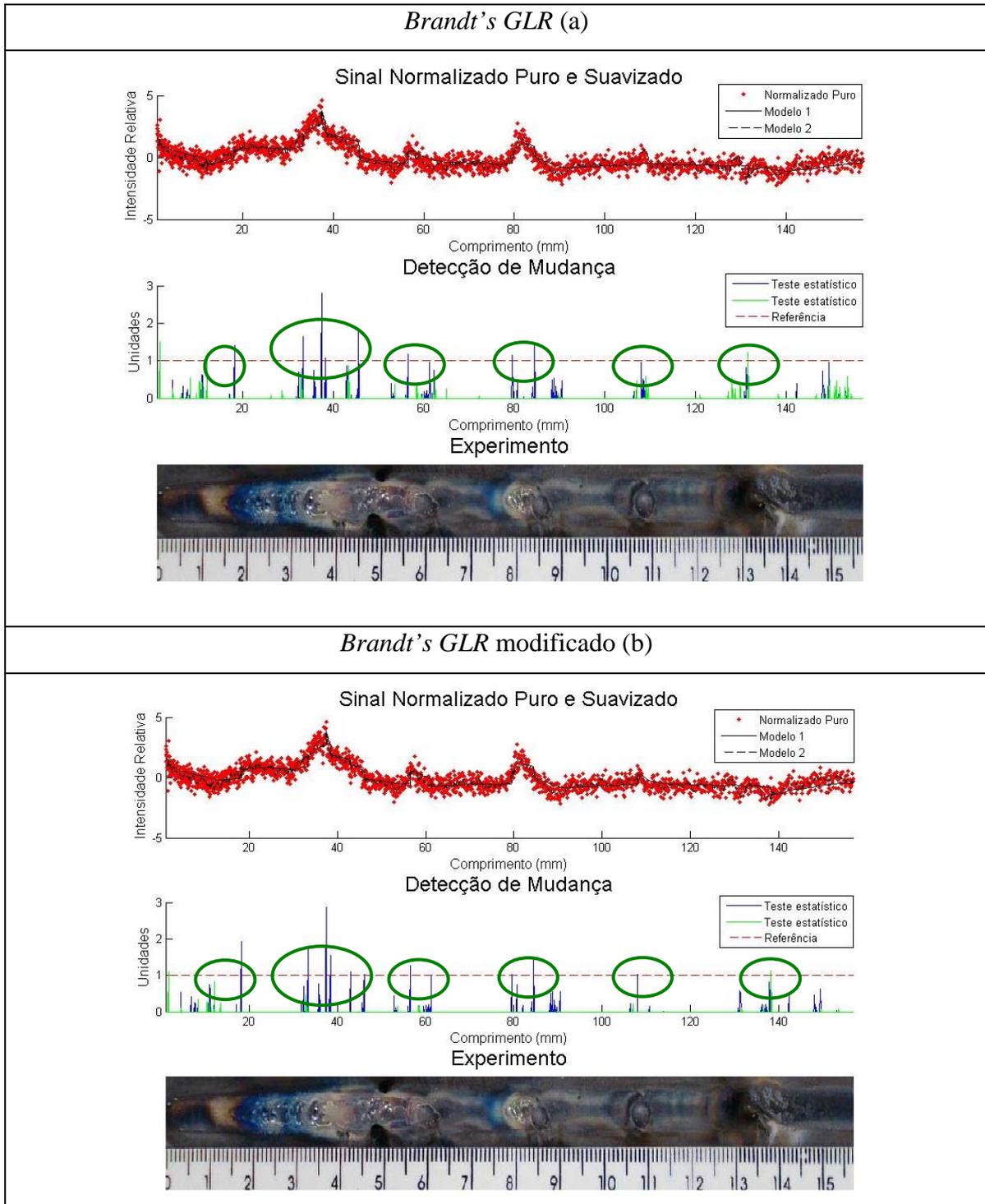


Figura 4.9 – Desempenho do *KF* com janela móvel para o experimento 14.

Pode ser visualizada a atuação dos filtros rápido e lento dada pelos Modelos 1 e 2 respectivamente. A ação dos filtros apresentados no caso atual é divergente daquela efetuada pelo algoritmo *Brandt's GLR*. No caso presente, o filtro lento não é capaz de acompanhar o sinal, mas o rápido sim. Para o Filtro de Kalman, o resultado do filtro é dado pelo Modelo 2, o lento. Já o filtro rápido consegue acompanhar a perturbação causada pela variável aleatória.

No começo e no final do experimento há perturbações e foram facilmente captadas, mas são desconsideradas. Mesmo assim, demonstra-se que houve a detecção da perturbação. Todos os outros defeitos também foram detectados. Podem-se ajustar os parâmetros para que o algoritmo seja menos sensível às variações, mas demonstrou-se que ele é capaz de detectá-las.

Será efetuado um comparativo entre os algoritmos de medição de distância e teste estatístico. Será mantido o Filtro de Kalman com os parâmetros do exemplo anterior. Com vista a comparar o cálculo da distância, será mantido o teste estatístico *CUSUM*, também mantiveram-se os parâmetros: $v = 0,8$; $h = 1$. O resultado é observado na Figura 4.10, dividida em quatro partes. A leitura falsa foi identificada por meio de um círculo vermelho tracejado e a leitura verdadeira por um círculo verde contínuo.



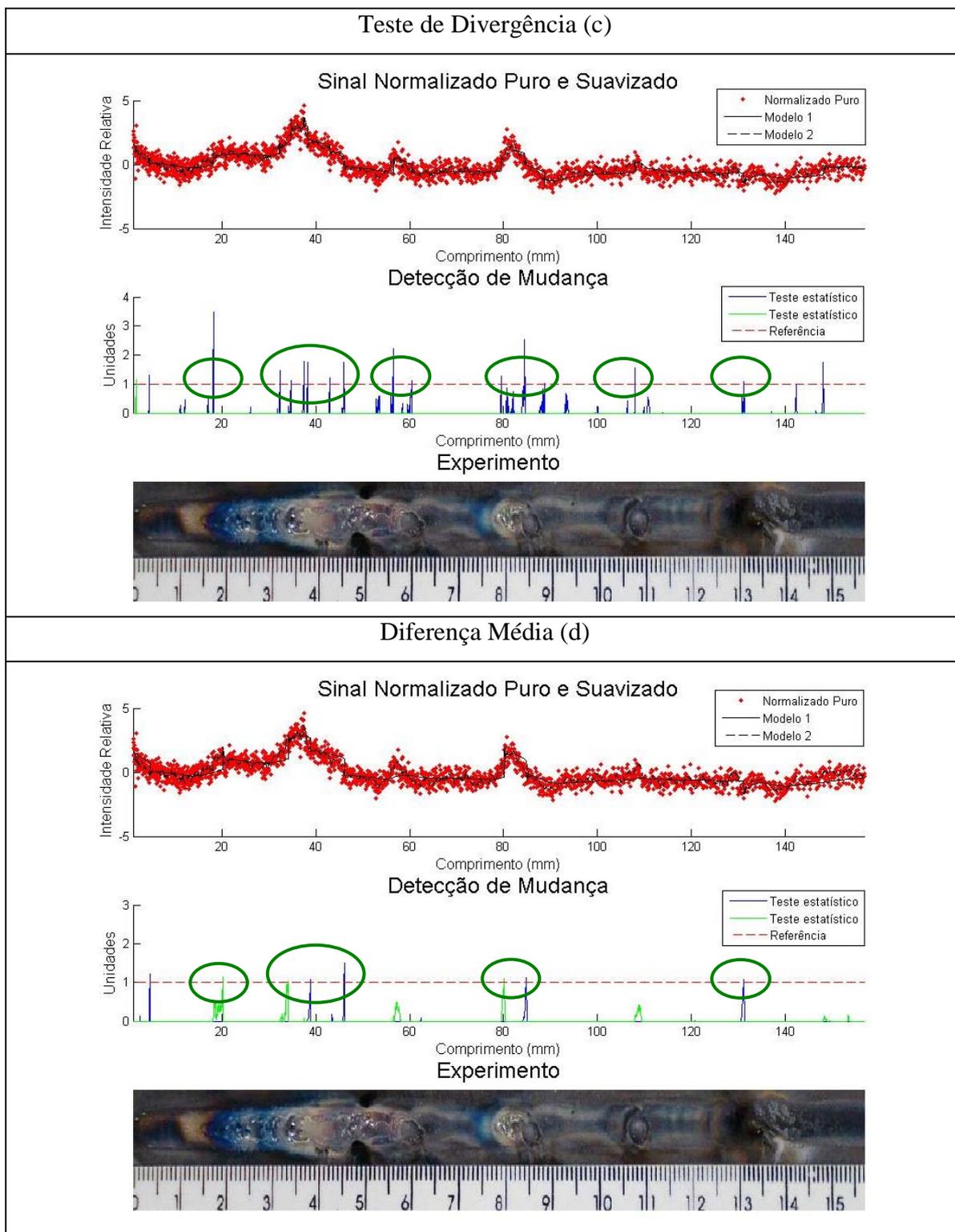


Figura 4.10 – Comparativo de algoritmos de medição da distância, experimento 14.

O primeiro algoritmo apresentou boa performance, houve detecções corretas. O segundo e o terceiro apresentaram um resultado similar ao do anterior, também foram capazes de acusar as perturbações percebidas pelo sinal. Na média, o Teste de Divergência foi o que

apresentou os maiores valores para os testes estatísticos. O quarto, pelo contrário, prestou os menores valores para o teste estatístico, além disso, dois defeitos não foram detectados.

Com isso tem-se uma idéia do comportamento dos algoritmos. Pode ser observada a diferença dos valores de teste estatístico entre eles. As correções para a melhoria do desempenho pode ser feita pela escolha de outros parâmetros de h e v . Portanto, a diferença entre eles não foi tão apreciável a ponto de haver algum descarte. Pelo contrário, qualquer um pode ser utilizado para detecção de mudança por meio da escolha de melhores parâmetros.

Como prova disso, segue o cálculo da distância por Diferenças Médias com os parâmetros $h = 1$ e $v = 0,3$ na Figura 4.11.

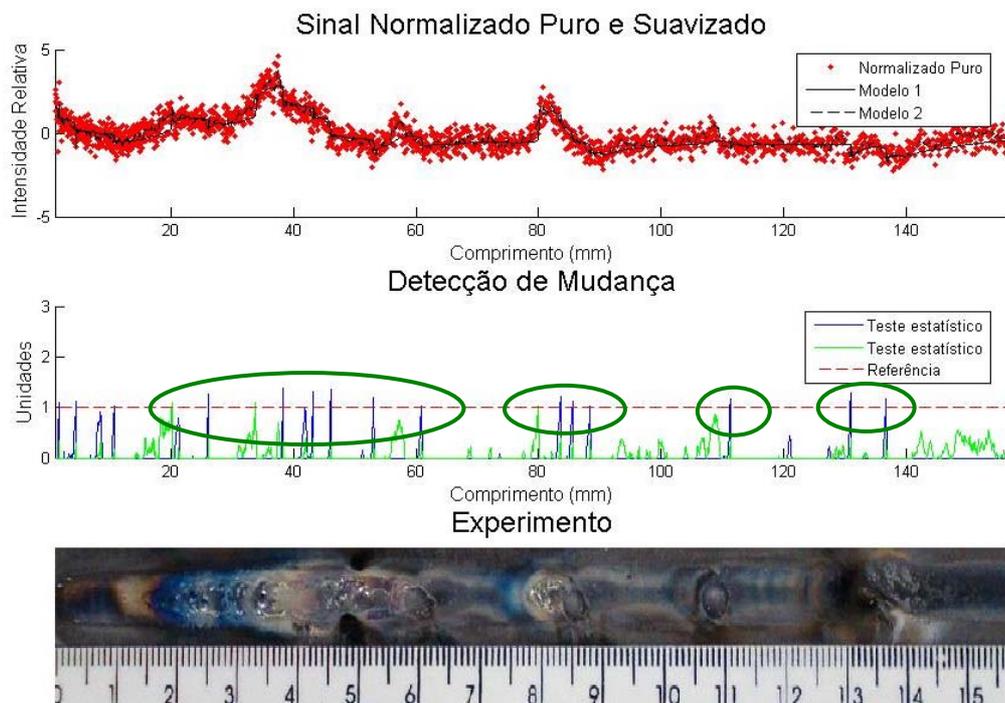
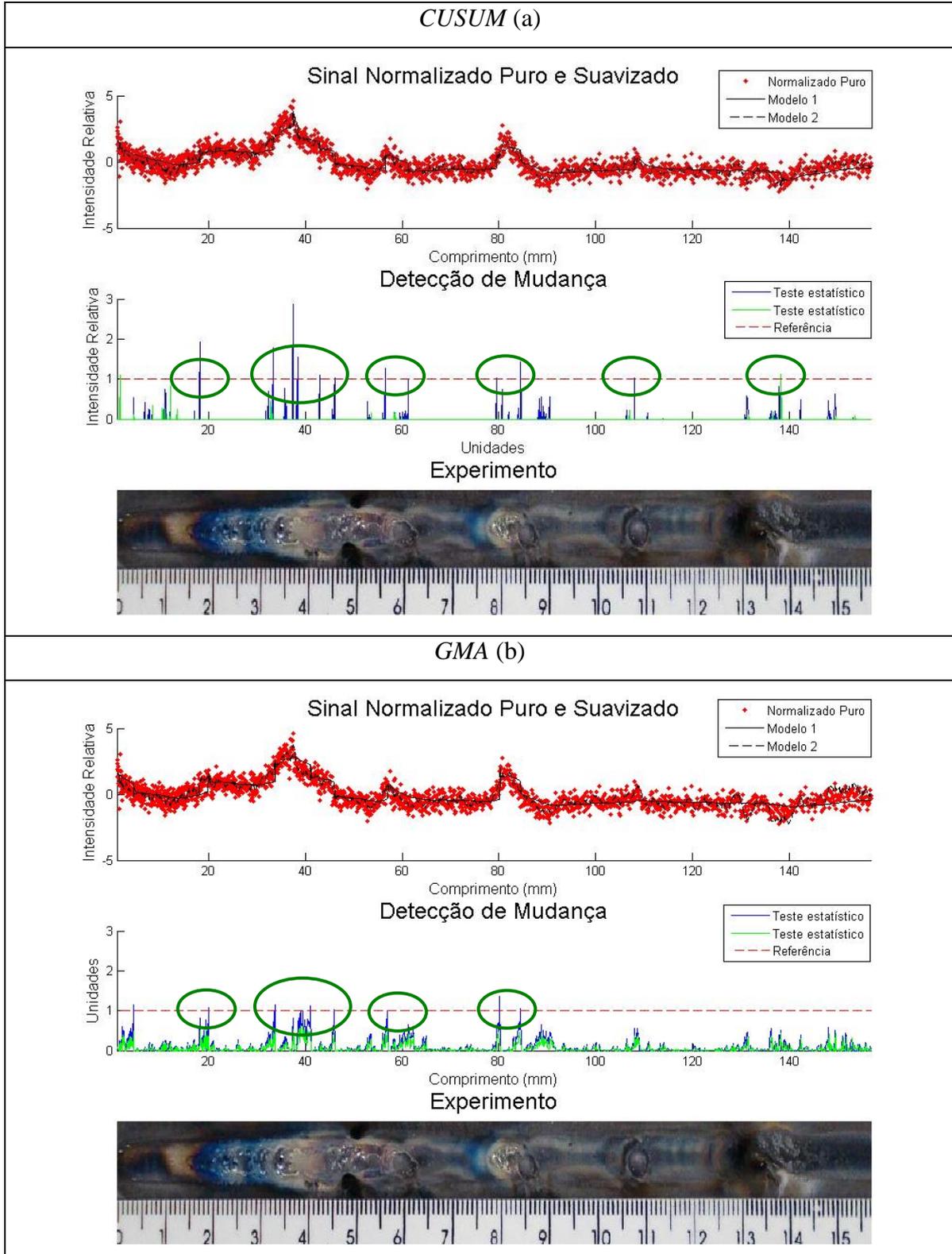


Figura 4.11 – Novos parâmetros do algoritmo de Diferenças Médias, experimento 14.

A perturbação inicial permaneceu, mas desconsidera-se. Porém aqueles dois defeitos anteriormente despercebidos foram detectados.

A fim de comparar as diferentes regras de parada, a análise será feita em dois blocos. Ambos terão o Filtro de Kalman, com $Q_0 = Q_1 = 0,0001$ e $R = 1$. O primeiro terá a medição

da distância calculada pelo algoritmo *Brandt GLR* modificado e o segundo pelo *Teste de Divergência*. Também são comuns os valores de : $\nu = 0,8$; $h = 1$. Para o primeiro bloco, a comparação pode ser observada pela Figura 4.12, dividida em três partes.



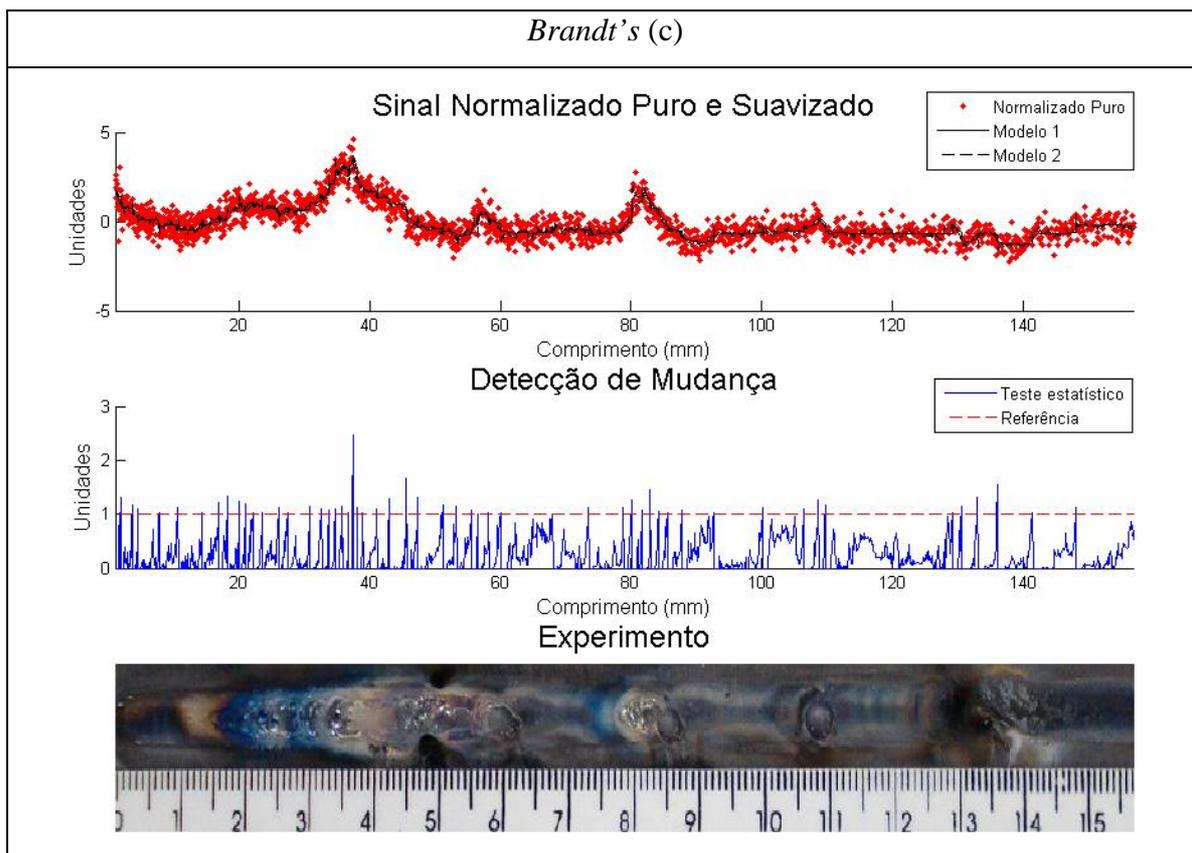


Figura 4.12 – Comparativo de algoritmos de medição da distância, experimento 14.

Percebe-se uma notável diferença entre os três algoritmos. O primeiro detectou todos os defeitos e a perturbação inicial do arco. O segundo apresentou menores valores para o teste estatístico. Desse modo, os dois últimos defeitos ficaram imperceptíveis. O último apresentou o pior desempenho entre os três. O teste estatístico revelou uma certa uniformidade. Isso não quer dizer que os dois últimos algoritmos não possam ser utilizados, mas que os parâmetros para a detecção de mudança devem ser revistos.

Como exemplo, foram revistos os parâmetros para a regra de parada com o algoritmo Brandt. A modificação teve como novos valores $h = 4$ e $v = 2$. O resultado ficou na forma apresentada pela Figura 4.13.

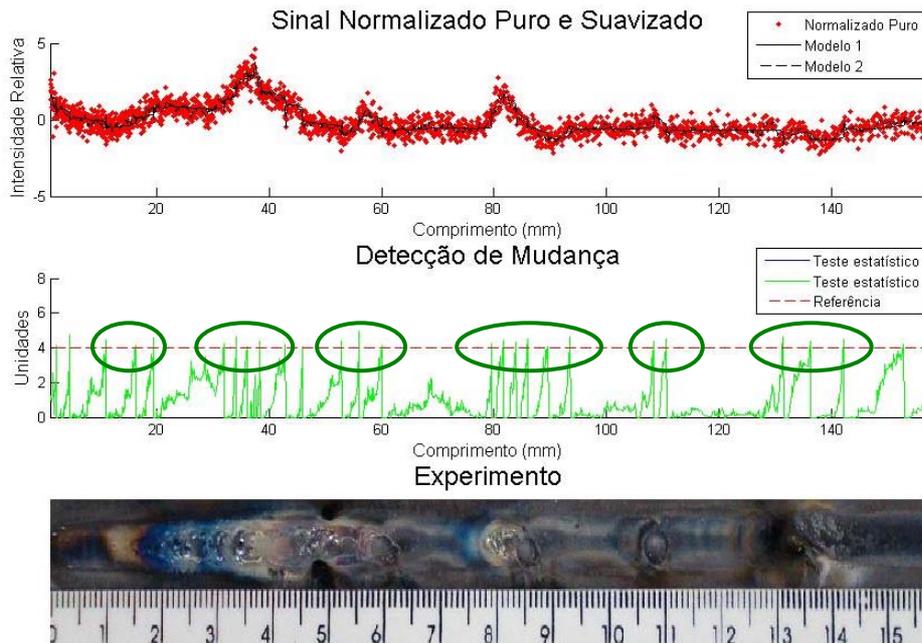
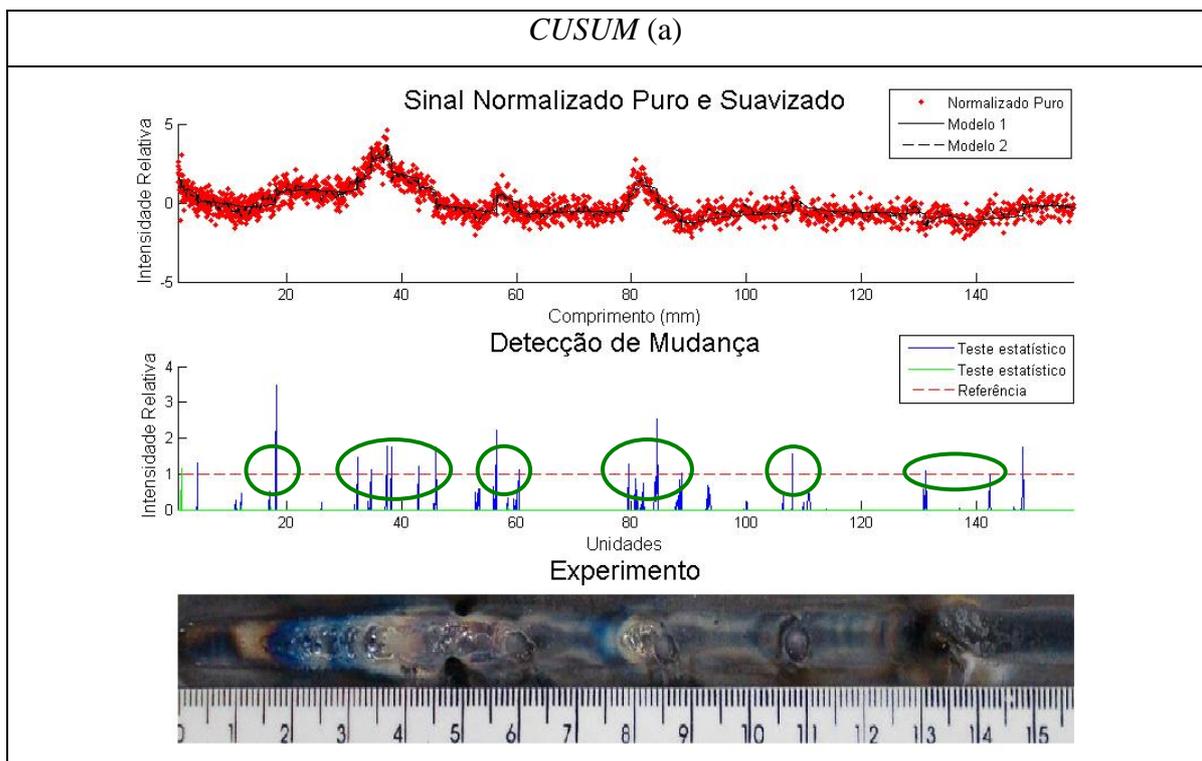


Figura 4.13 - Novos parâmetros para o algoritmo Brandt para o experimento 14.

Por meio dos novos parâmetros, o teste estatístico deixou de apresentar a homogeneidade e efetuou a detecção dos defeitos.

E no segundo bloco, há o resultado apresentado pela Figura 4.14.



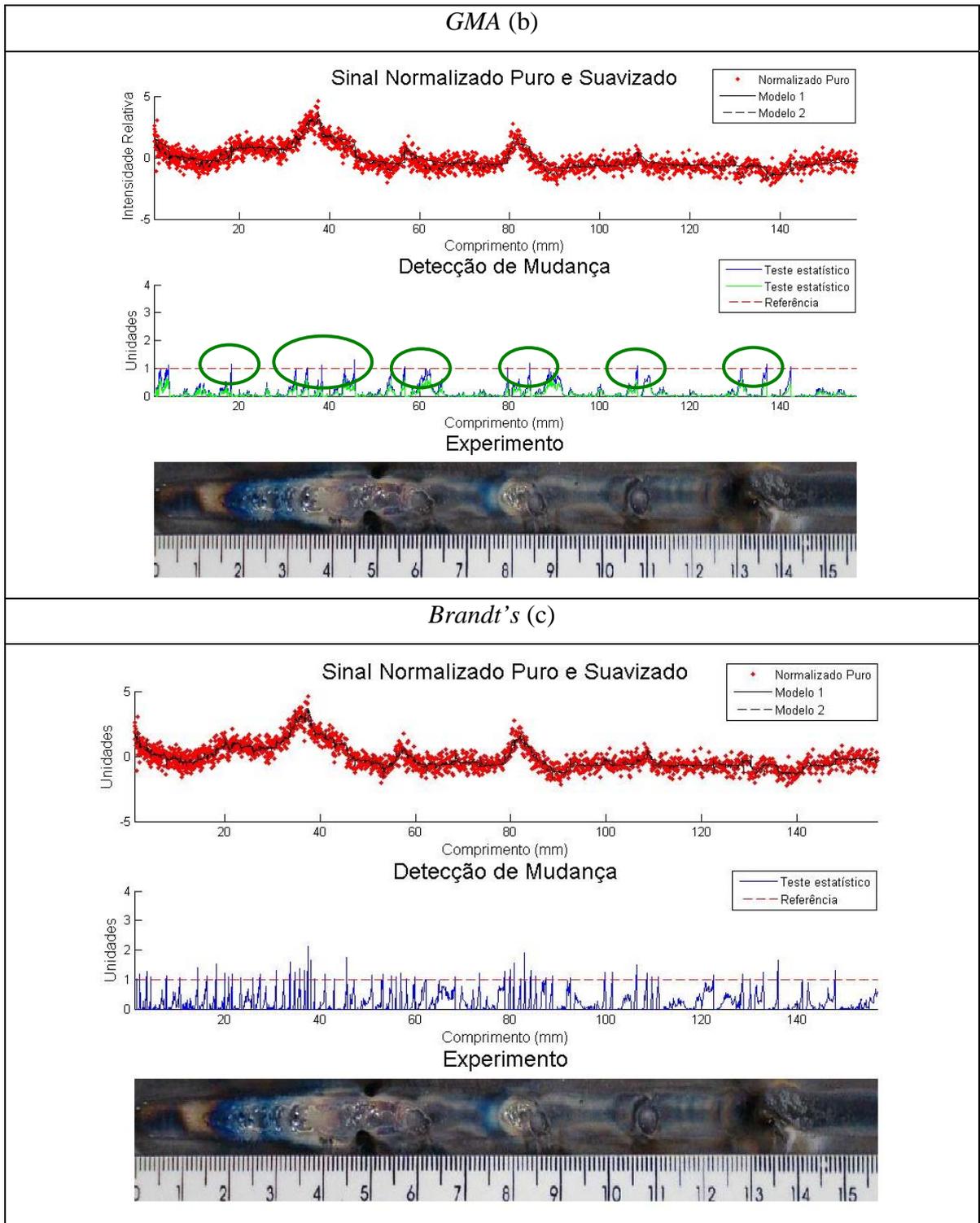


Figura 4.14 – Comparativo de algoritmos de medição da distância, experimento 14.

A comparação é similar a anterior. Grande diferença é percebida entre os cálculos de teste estatístico. O primeiro detectou todos os defeitos e a perturbação inicial do arco. O segundo apresentou menores valores para o teste estatístico, uma uniformidade das

distâncias, mas conseguiu detectar todos os defeitos. Novamente o último apresentou o pior desempenho entre os três. Também foi percebida a uniformidade do teste estatístico. É importante frisar que os algoritmos podem se apresentar de uma melhor forma pela escolha de novos parâmetros.

Mediante esses testes, sugere-se a utilização do algoritmo proposto neste trabalho. Ele consiste na utilização de dois Filtros Kalman, cálculo da distância por *Brandt* e teste estatístico por Somas Cumulativas. Pode-se perceber a sua eficácia por meio da observação do desempenho para outros experimentos. Isso pode ser verificado nos anexos.

Foram demonstradas algumas combinações de algoritmos com diferentes parâmetros para efetuar a detecção de mudança. Dificilmente haverá um só algoritmo capaz de detectar todos os defeitos utilizando-se os mesmos parâmetros para as diversas condições de soldagem. Testes foram feitos alterando-se a corrente e a distância entre o eletrodo e a peça. A corrente apresentou maior influência. Manteve-se o valor de referência h constante e a compensação foi feita pela modificação do valor v . Ainda haveria a vazão de gás e a velocidade de soldagem para analisar. Essas duas últimas influenciam mais no perfil da solda e seu acabamento. Nos anexos podem ser observados os diferentes valores de v escolhidos para as diferentes correntes.

4.3 DETECÇÃO BASEADA EM TESTE DE HIPÓTESES NA CURVA NORMAL

Uma forma um pouco mais simples, mas também que pode detectar mudanças no comportamento de um sinal é efetuar um teste de hipótese a partir do cálculo da distância. Na verdade, substitui-se um teste estatístico por outro. Nos casos anteriores havia um cálculo que envolvia de alguma forma a medição da distância e conseqüente comparação com um valor pré-estabelecido. Já no caso presente, efetua-se um simples teste de hipóteses com um nível de confiança escolhido.

Essa técnica só pode ser utilizada em algoritmos que tenham a estimação da variância do sinal medido, aqui tratada por P , e da variância da variável aleatória v , chamada R . No filtro *RLS* fator λ pode ser encarado como R . Há também a proposta dada pela Equação 2.42 que só utiliza os valores $P1$ e $P2$.

A comparação será feita entre as propostas apresentadas no subcapítulo 2.3. Para todos os testes será admitido 95% de confiança, assim, o valor de referência será de 1,96. Primeiramente apresentam-se aquelas que contemplam apenas um modelo, caso das Somas Cumulativas e do Filtro de Kalman. Mais uma vez, as leituras falsas serão marcadas por um círculo vermelho tracejado e as leituras corretas serão identificadas por um círculo verde contínuo.

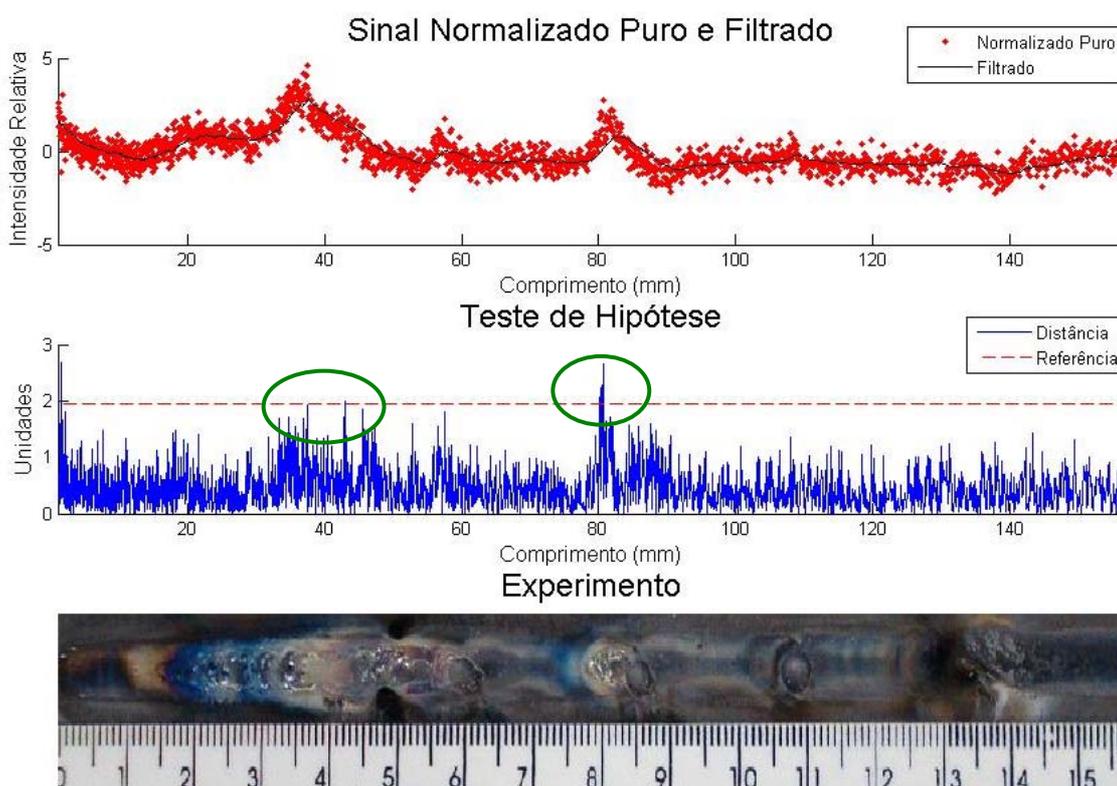


Figura 4.15 – RLS com distância de Mahalanobis para o experimento 14.

O resultado do Mínimos Quadrados Recursivo - com um fator de esquecimento igual a 0,97 - foi uma detecção já nos primeiros pontos causada pela perturbação inicial do arco elétrico. Isso pode ser visto na Figura 4.15. Dois defeitos foram detectados (o primeiro e o terceiro), mas o valor da distância dos demais não foi suficiente para ultrapassar o valor de referência. Não foi um desempenho satisfatório. O filtro não foi capaz de apresentar grandes perturbações para os dois últimos defeitos.

O comportamento do Mínimos Quadrados com janela de 25 pontos, dado pela Figura 4.16, foi parecido com o do anterior. Também houve uma detecção já nos primeiros pontos causada pela perturbação inicial do arco elétrico. O primeiro e terceiro defeitos também foram detectados, os restantes igualmente não foram percebidos.

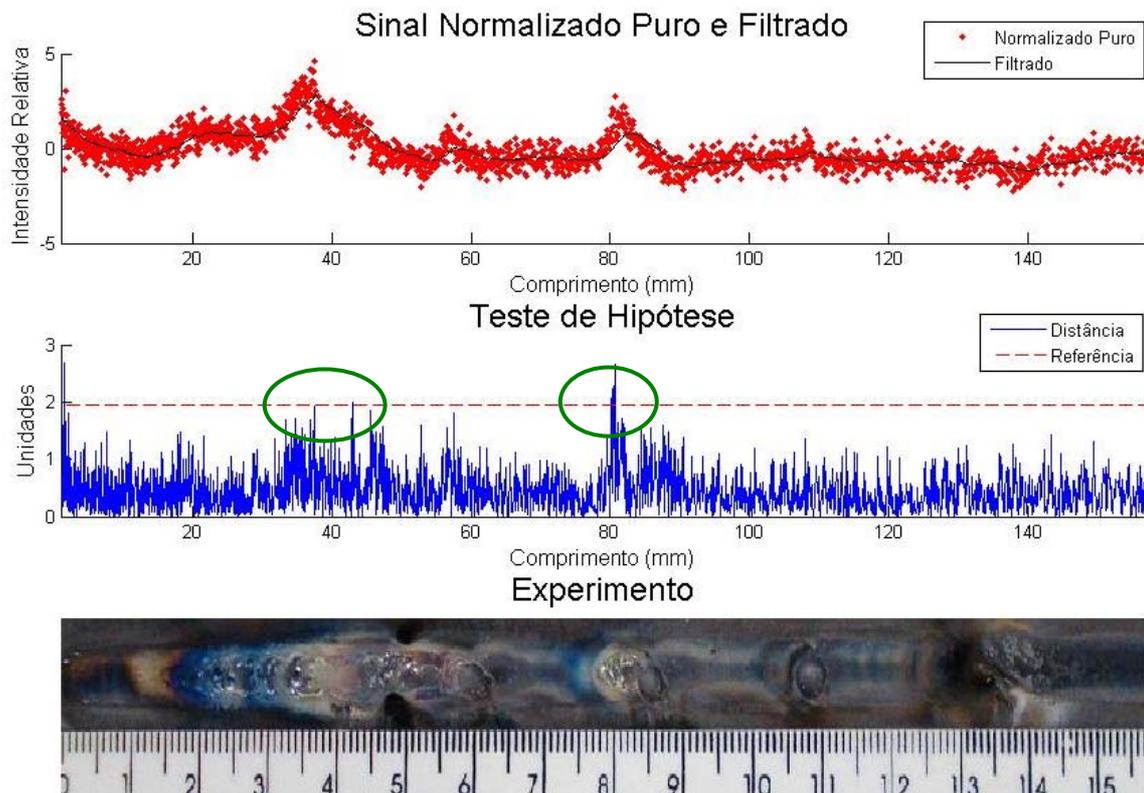


Figura 4.16 - WLS com distância de Mahalanobis para o experimento 14.

Foi testado também o *KF*. Foram utilizados os seguintes parâmetros: $Q = 0,001$ e $R = 1$. Chegou-se ao resultado dado pela Figura 4.17. E ainda foi observado o mesmo comportamento que os dois algoritmos anteriores.

Os algoritmos que utilizam apenas um modelo para o teste de hipótese sobre a curva normal não apresentaram bom desempenho. A estimação do sinal não apresenta variações abruptas e significativas nas regiões com defeito a ponto da distância não ser apreciável

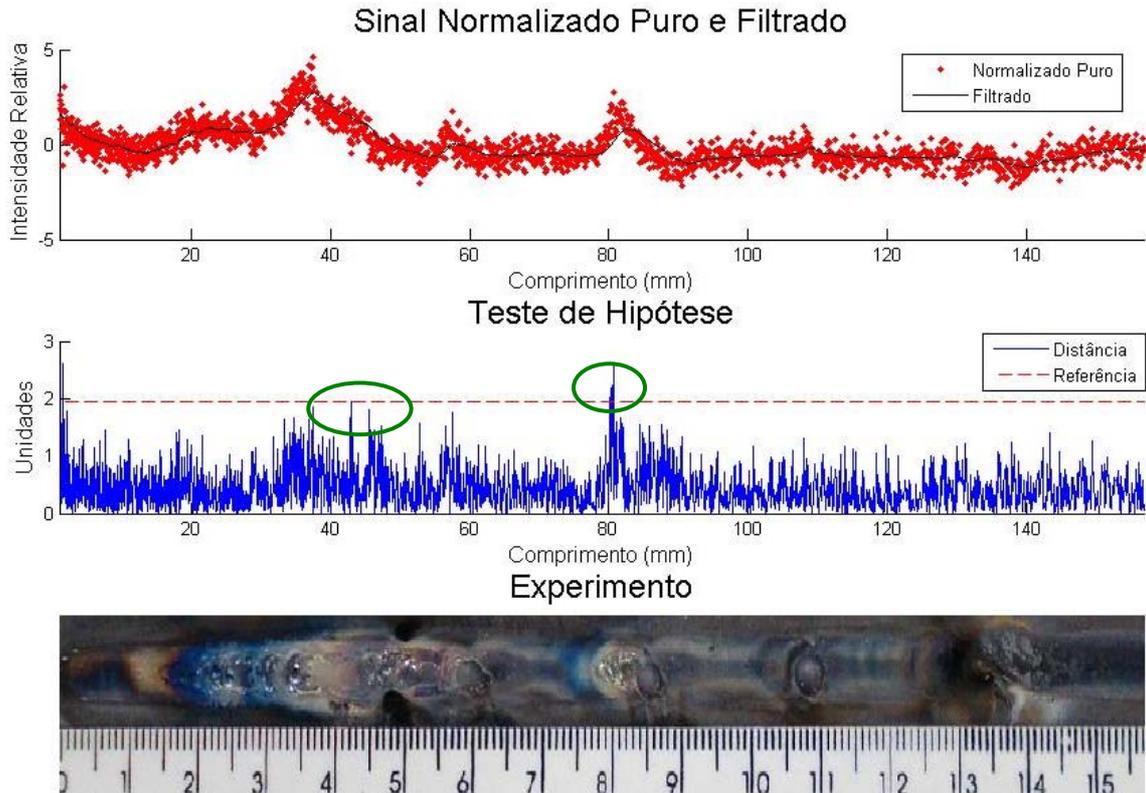


Figura 4.17 - *KF* com distância de Mahalanobis para o experimento 14.

E para os algoritmos que apresentam a comparação entre dois modelos por meio da janela móvel, há aquele mais simples, dado pela Equação 2.42, e o *KF*. Serão apresentados em seqüência.

Para o primeiro, o algoritmo mais simples, contou com uma janela de 15 dados e $R = 1$. O resultado é dado pela Figura 4.18. Pode ser observada a atuação dos dois filtros. Realmente a medição da distância foi condizente com a diferença entre os dois modelos. Na maior parte dos dados, a distância foi superior ao limite. Mesmo aumentando-se esse valor, ainda poderiam ocasionar falsas leituras e alguns defeitos não seriam percebidos. A correção seria a melhor estimação por parte do filtro lento. Se esse pudesse acompanhar melhor a linha imaginária cujo nível não apresenta defeitos, o desempenho do algoritmo seria melhor. Diversos parâmetros foram testados, mas nenhum pôde melhorar essa tarefa.

A Figura 4.19 apresenta o *KF* com $Q_1 = Q_2 = 0,001$ e $R = 1$. Observa-se que a diferença entre a distância de um defeito para aquele que não o apresenta foi muito pequena. Se for diminuída a confiança, pode acarretar indicações falsas. Não é uma boa proposta.

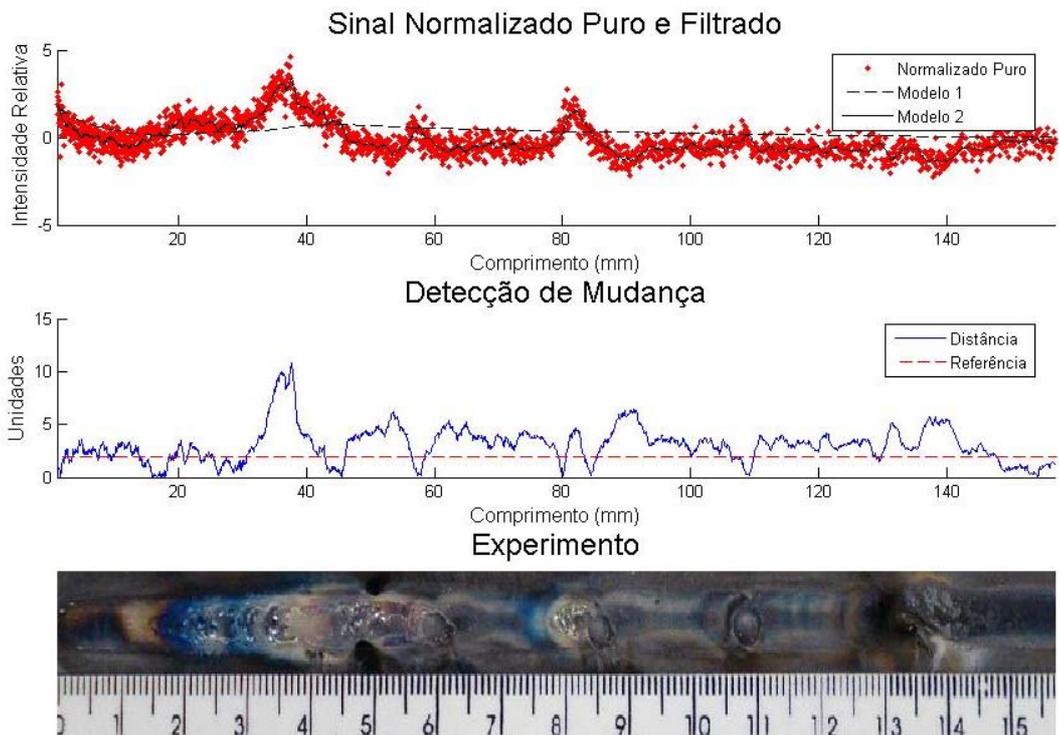


Figura 4.18 – Algoritmo com 2 modelos e distância de Mahalanobis, experimento 14.

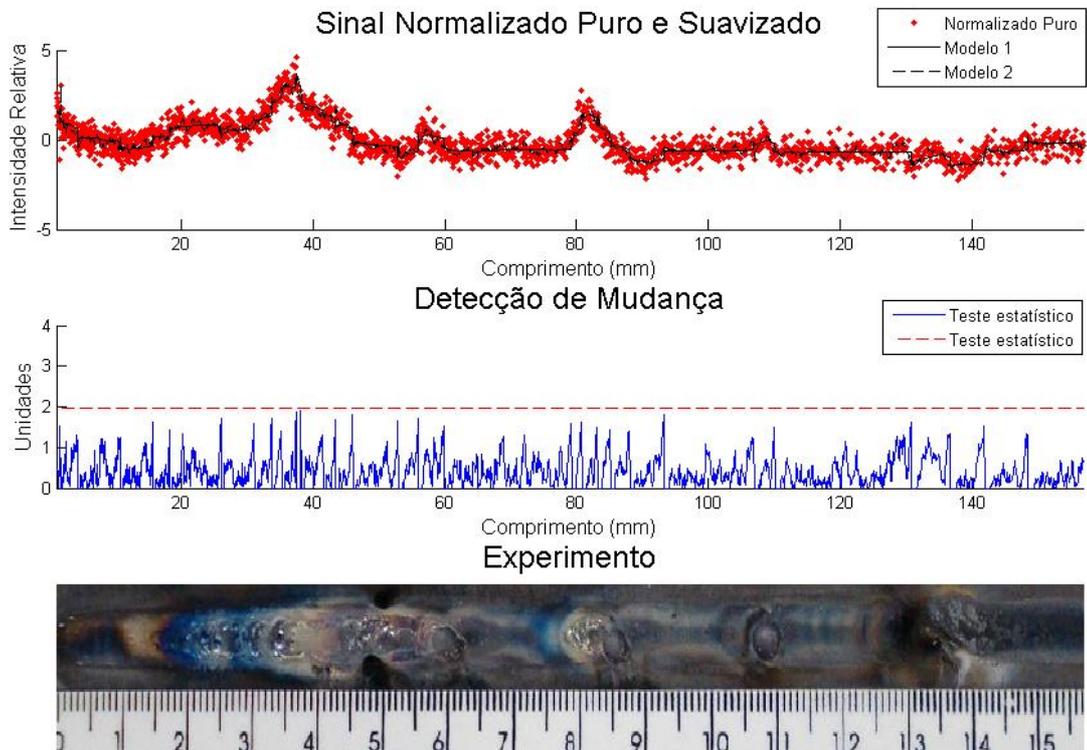


Figura 4.19 – KF com janela móvel e distância de Mahalanobis para o experimento 14.

5 MONITORAMENTO E DETECÇÃO EM TEMPO REAL

No trabalho realizado por (Grad *et al*, 2004), menciona-se que há três níveis de controle de qualidade em tempo real estabelecidos pela indústria. O primeiro nível consiste na detecção automática de defeitos sobre a solda. O segundo, quando é possível identificar o tipo e a causa do defeito. O terceiro nível consiste na capacidade de corrigir os parâmetros de soldagem durante o processo para assegurar uma qualidade apropriada para a solda.

Os defeitos propostos e outros que possam surgir em estudos de caso dificilmente são passíveis de correção durante o processo. Uma vez ocorrido, a solução é recuperar a região prejudicada. Por isso questiona-se a necessidade de efetuar a monitoração e detecção de defeitos em tempo real para esses casos.

É objeto de estudo a execução de uma malha fechada de controle para garantir homogeneidade do cordão de solda. Isso está no escopo daquele grande projeto citado na introdução deste trabalho. Com relação a defeitos que possam ser corrigidos pela mudança de parâmetros de soldagem, tais como falta de penetração, certamente serão monitorados e corrigidos.

Porém, se houver a necessidade de, por exemplo, parar o processo por causa da ocorrência de alguma substância nociva à solda ou se houver porosidade excessiva ou qualquer outro fator, é possível realizar essa decisão em tempo real. Para tanto, é necessário um histórico de processos com o objetivo de corrigir o valor de referência no algoritmo de detecção. Além disso, pode-se incluir algoritmos de aprendizagem para um melhor desempenho dessa adaptação de novos parâmetros.

Para facilitar os cálculos e estabelecer uma padronização de parâmetros de detecção, é feita a normalização dos dados. Daí por que as etapas de detecção e localização são feitas posteriormente. O que irá mudar para essas tarefas serem realizadas em tempo real é a determinação dos parâmetros de detecção sem a normalização dos dados. Há de se estudar e simular os casos desejados e verificar o nível de intensidade relativa das linhas. Com isso observa-se o nível da intensidade que os testes estatísticos irão alcançar, para finalmente determinar o valor de referência. É um procedimento factível e necessita um histórico de dados a fim de estabelecer os novos parâmetros do algoritmo de detecção.

O sistema aplicado ainda poderá ser munido de algoritmos inteligentes capazes de aprender a tomar decisões corretas dadas situações similares à aprendizagem e a situações anteriores bem como aprender com novas ocorrências que estejam ainda previstas no universo das tomadas de decisões.

6 CONCLUSÕES

O espectrômetro como sensor se mostrou capaz de revelar flutuações e perturbações no arco de soldagem. Muitos defeitos de solda TIG não podem ser monitorados por ele. Essas deficiências podem ser cobertas pela inclusão de outros sensores na tarefa da observação do processo.

Foi mostrado que a informação entregue pelo espectrômetro pode ser utilizada por meio do cálculo da Temperatura Eletrônica ou simplesmente pela avaliação da intensidade relativa das linhas escolhidas. A vantagem da dispensa do cálculo é o próprio ganho na execução de operações matemáticas.

A fim de garantir a detecção do maior número de defeitos, é boa norma a utilização de mais de uma linha espectral por elemento desejado. Mostrou-se o comportamento diferenciado de algumas linhas. Foi observado para alguns experimentos que certas linhas espectrais somente captaram perturbações para níveis mais altos de corrente, como é o caso da linha do ferro 403,5 nm. Isso é previsto por Vilarinho (2003).

Dentre os algoritmos para detecção de mudança apresentados, verificou-se que a maioria dos filtros apresentados cumpre bem a estimação do sinal. Mas aquele que desempenhou melhor a tarefa foi o algoritmo de Mínimos Quadrados observado no Somas Cumulativas, o *CUSUM LS*. As regiões que apresentam os defeitos estão bem evidenciadas por picos, enquanto o filtro permanece estável na ausência de defeitos.

Para as propostas baseadas em janela móvel, aquela mais indicada foi a que utilizou o Filtro de Kalman, a medição da distância por Brandt, e teste estatístico por Somas Cumulativas. A diferença das correntes aplicadas bem como da distância eletrodo peça são compensadas por meio da variação do parâmetro v .

Se for analisar individualmente cada etapa apresentada pelo fluxograma da detecção de mudança, o melhor filtro foi o Mínimos Quadrados e o teste estatístico por Somas Cumulativas. A medição da distância não é um fator que influenciou tanto. Praticamente

pode ser aplicado qualquer algoritmo proposto, desde que os parâmetros sejam acertados para apresentarem o melhor desempenho.

Desse modo, demonstrou-se que é possível a utilização de algumas técnicas, mediante o sinal adquirido, para relatar a ocorrência e localização de alguns defeitos de soldagem.

Foram detectadas algumas fontes que contribuem para o erro da localização dos defeitos. Uma delas é o atraso existente no disparo para início da medição do espectro efetuado pelo computador principal para o computador do espectrômetro. Isso faz com que haja uma diferença na referência do início do processo. Outro fator é o próprio algoritmo de detecção, cujo valor de teste estatístico ultrapassa o valor de referência na vizinhança do defeito. Porém, com o tratamento dos dados, foram encontrados discrepâncias menores do que 5 mm em cordões de 160 mm. Portanto, erros menores do que 3%. Há de se adotar alguma norma para avaliar o desempenho e determinar se é satisfatório. Isso deve ser feito pelo dono do processo, pois menores erros acarretam maiores custos.

O critério de defeito deve ser avaliado. Ele é entendido como aquele que pode gerar um incidente ou acidente quando a peça em questão é colocada em serviço. Assim, deve-se observar que um defeito avaliado pelo sistema proposto não necessariamente implica em um defeito no produto. Para o sistema, uma perturbação no ambiente do arco elétrico gera uma deformidade. Na prática, isso deve ser avaliado, uma vez que aquela perturbação pode não significar um comprometimento da peça. Portanto, para cada aplicação prática, ou seja, para cada tipo de peça produzido, deve ser analisado o que pode representar um defeito. A partir desse estudo serão estabelecidos os parâmetros do algoritmo de detecção de mudança.

Duas foram as maiores contribuições realizadas neste trabalho. Uma é a utilização das linhas espectrais ao invés do cálculo da Temperatura Eletrônica, a outra é o uso dos algoritmos de detecção. Houve algumas contribuições para o projeto no qual este trabalho está inserido. Além das apresentadas anteriormente, pode-se citar a formulação de uma estrutura para coleta e processamento de informações. O sistema construído é capaz de capturar os dados de máquinas de soldagem, bem como movimentar a peça a ser soldada pelos equipamentos e programas disponíveis. Tudo isso será aproveitado nos estudos posteriores.

7 RECOMENDAÇÕES

É possível agregar mais confiabilidade na detecção de defeitos mediante a fusão de sensores. Essa técnica aproveita as vantagens dos sensores inclusos no sistema. As diferentes características dos equipamentos de medição, como princípio de funcionamento, faixa de medição, frequência de amostragem, formam uma miscelânea de informações que, devidamente processadas, possibilita ter uma representação real do fenômeno sob observação.

O trabalho pode ser estendido para outros processos, tais como TIG com metal de adição e os processos MIG e MAG. Esses últimos largamente aplicados na indústria.

Além dos sensores estudados pelo GRACO – espectrômetro, infravermelho, decibelímetro, câmera – outros equipamentos podem ser avaliados. Sugere-se uma câmera termográfica e uma câmera de alta velocidade. Por meio do sincronismo das informações desses dois dispositivos com os sensores utilizados pode-se efetuar um estudo da física do arco elétrico e focar mais na qualidade da solda.

Devem-se seguir os estudos para a construção do equipamento capaz de ler os sensores homologados por pesquisas e atuar nas fontes de soldagem com controle em malha fechada. Sugestões para o dispositivo são microcontroladores e circuitos de arquitetura reconfiguráveis (FPGA).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adolfsson, S., Bahrami, A., Bolmsjö, G., Claesson, I. (1998). “*Quality Monitoring in Robotised Spray GMA Welding*”. In: International Journal for the Joining of Materials, no 10(1/2), pp. 3-23.
- Agapakis, J. E., Katz, J. M., Koifman, M., Epstein, G. N., Friedman, J. M., Eyring, D. O., Rutishauser, H. J., (1986). “*Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding Using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry*”. In: Welding Journal, november, pp. 33-41.
- Alfaro, S. C. A., Carvalho, G. C., Cunha, F. R. (2006). “*A statistical approach for monitoring stochastic welding processes*”. In: Journal of Materials Processing Technology, no. 175, pp. 4-14.
- Alfaro, S. C. A., Carvalho, G. C., Matos, M. S. (2005). “*A Spectrometry Based Sensor for Weld Defect Tracking*”. In: Soldagem & Inspeção, Vol 10, no 2, pp. 79-84.
- Alfaro, S. C. A., Drews, P. (2006). “*Intelligent Systems for Welding Process Automation*”. In: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 28, no. 1, pp. 25-29.
- Alfaro, S. C. A., Mendonça, D. S., Matos, M. S. (2006). “*Emission Spectrometry evaluation in arc welding monitoring system*”. In: Journal of Materials Processing Technology, no. 179, pp. 219-234.
- Al-Habaibeh, A., Parkin, R (2003). “*An autonomous low-Cost infrared system for the on-line monitoring of manufacturing processes using novelty detection*”. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, no. 22, pp. 249-258.
- American Welding Society (1991). “*Welding Handbook*” 8th edition. In: AWS, Miami.
- Ancona, A., Lugarà, P. M., Ottonelli, F., Catalano, I. M. (2004). “*A sensing torch for on-line monitoring of the gas tungsten arc welding process of steel pipes*”. In: Measurement Science and Technology, no. 15, pp. 2412-2418.
- Appel, U., Brandt, A. V. (1983). “*Adaptive sequential segmentation of piecewise stationary time series*”. In: Information Sciences, Vol. 29, pp. 27-56.
- Basseville, M., Benveniste, A. (1983) “*Design and comparative study of some sequential jump detection algorithms for digital signals*”. In: IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol 31, issue 3, pp. 521-535.
- Basseville, M., Nikiforov, I. V. (1993) “*Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*”. In: Information and system science series. Prentice Hall Inc.

- Bebiano, D. F. V., Franco, F. D., Alfaro, S. C. A. (2007) “*Real time welding defects monitoriment using spectrometry*”. In: Proceeding of the 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília –DF.
- Benveniste, A., Basseville, M., Moustakides, G. V. (1987) “*The Asymptotic Local Approach to Change Detection and Model Validation*”. In: Information and system science series. Prentice Hall Inc.
- Bicknell, A., Smith, J. S., Lucas, J. (1994). “*Infrared sensor for top face monitoring of weld pools*”. In: Measurement Science and Technology, no. 5, pp. 371-378.
- Bonss, S., Karsunke, U., Beyer, E., Richter, K. (2004). “*Monitoring of high power diode laser sheet metal welding*”. In: Proceedings of the 23rd International Congress on Application of Lasers and Electro-Optics.
- Bracarense, A. Q. (2000). “*Processo de Soldagem TIG-GTAW*”. In: Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Chen, W., Chin, B. A. (1990). “*Monitoring Joint Penetration Using Infrared Sensing Techniques*”. In: Welding Journal, april, pp. 181-185.
- Chian, A. C. L., Reush, M. F. (1979). “*Física do Plasma*”. In: Ed Universidade Federal Fluminense, pp S.68-S.82.
- Duda, R. O., Hart, P. E., Stork, D. G. (2004). “*Pattern Classification 2nd Edition*”. In: Wiley Interscience, John Wiley & Sons Inc.
- Dunn, G. J., Allemand, C. D., Eagar, T. W. (1986). “*Metal Vapors in Gas Tungsten Arcs: Part I Spectroscopy and Monochromatic Photography*”. In: Metallurgical Transactions A, no. 17, pp. 1851-1863.
- Fantz, U (2006). “*Basics of Plasma Spectroscopy*”. In: Plasma Sources Science and Technology, no. 15, pp. S 137-S 147.
- Fan, H., Ravala, N. K., Wikle III, H. C., Chin, B. A. (2003). “*Low-cost infrared sensing system for monitoring the welding*”. In: Journal of Materials Processing Technology, no. 140, pp. 668-675.
- Franco, F. D., Bebiano, D. F. V., Alfaro, S. C. A., (2008 B), “*Estudo das Anomalias apresentadas na soldagem TIG utilizando sensoriamento Infravermelho*”, In: V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- Fujimoto, T. (2004). “*Plasma Spectroscopy*”. In: Oxford Science Publications, Oxford.
- Grad, L., Grum, J., Polajnar, I., Slabe, J. M. (2004). “*Feasibility study of acoustic signal for on-line monitoring in shor circuit gas metal arc welding*”. In: Machine Tools & Manufacture, no. 44, pp. 555-561.

- Griem, H. R. (1997). *“Principles of Plasma Spectroscopy”*. In: Cambridge University Press, Cambridge.
- Gustafsson, F. (2000). *“Adaptative Filtering and Change Detection”*. In: John Wiley & Sons.
- Haykin, S. (2001). *“Kalman Filtering and Neural Networks”*. In: John Wiley & Sons.
- How Stuff Works (acessado em 07/2008): <http://www.howstuffworks.com>
- Jönsson, P. G., Eagar, T. W., Szekely, J., (1995). *“Heat and Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding Using Argon and Helium”*. In: Metallurgical and Materials Transactions B, no. 26 B, pp. 383-395.
- Lacroix, D., Boudot, C., Jeandel, G. (1999). *“Spectroscopy Studies of GTA Welding Plasmas. Temperature Calculation and Dilution Measurement”*. In: Euro Physics Journal, AP 8, pp. 61-69.
- Li, P. J., Zhang, Y. M. (2000). *“Analysis of an Arc Light Mechanism and Its Application in Sensing of the GTAW Process”*. In: Welding Journal 79, no. 9 September, pp. 252-s – 259-s.
- Luo, H., Zeng, H., Hu, L., Hu, X., Zhou, Z. (2005). *“Application of artificial neural network in laser welding defect diagnosis”*. In: Journal of Material Processing Technology, no. 170, pp. 403 – 411.
- Malanokis, D. G., Ingle, V. K., Kogon, S. M. (2005) *“Statistical and Adaptive Signal Processing”*. In: Artech House Inc.
- Marotta, A. (1994). *“Determination of axial thermal plasma temperatures without Abel inversion”*. In: Journal of Physics D. Applied Physics, no. 27, pp. 268-272.
- Marques, P., V. (1991). *“Tecnologia da Soldagem”*. In: Fundação Christiano Ottoni - FCO, Belo Horizonte, MG.
- Melo, F. X., Borges, G. A., Soares, J. E. P. (2006). *“Identificação do tempo de quebra de onda sísmica P usando filtro de Kalman”*. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador, pp. 1-6.
- Mendonça, D. S., Alfaro, S. C. A., Borges, G. A. (2007). *“Utilização da espectroscopia óptica de emissão para monitoração e controle”*. In: Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Vol. 3, no. 3, pp. 1-6.
- Mendonça, D. S., Matos, M. S., Alfaro, S. C. A. (2006). *“Avaliação de uma Técnica de Espectrometria na Monitoração da Coluna do Arco”*. In: Universidade de Brasília, Brasília.

- Miller, M., Mi, B., Kita, A., Ume, C., (2002). “*Development of Automated Real-Time Data Acquisition System for Robotic Weld Quality Monitoring*”. In: *Mechatronics*, no. 12, pp. 1259-1269.
- Mirapeix, J., Cobo, A., Conde, O. M., Jaúregui, C., López-Higuera, J. M. (2006). “*Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis*”. In: *NDT&E Internacional*, no 39, pp. 356-360.
- Mirapeix, J., Cobo, A., González, D. A., López-Higuera, J. M. (2007). “*Plasma spectroscopy analysis technique based on optimization algorithms and spectral synthesis for arc-welding quality assurance*”. In: *Optics Express*, Vol. 5, no. 4, pp. 1884-1889.
- Mirapeix, J., Cobo, A., Jaúregui, C., López-Higuera, J. M. (2006). “*Fast algorithm for spectral processing with application to on-line welding quality assurance*”. In: *Measurement Science and Technology*, no. 17, pp. 2623-2629.
- Mirapeix, J., García-Allende, P. B., Cobo, A., Conde, O. M., López-Higuera, J. M. (2007). “*Real-time arc-welding defect detection and classification with principal component analysis and artificial neural networks*”. In: *NDT&E Internacional*, no 40, pp. 315-323.
- Modenesi, P. J. (2001). “*Introdução à física do arco elétrico*”. In: Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Modenesi, P. J., Marques, P. V. (2000). “*Introdução aos processos de soldagem*”. In: *Artigos Infosolda*, <http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol07.pdf>
- Nagarajan, S., Banerjee P., Chen, W., Chin, B. A. (1992): “*Control of the Process Using Infrared Sensors*”. In: *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 8, no. 1, pp 86-93.
- Nagarajan, S., Chen, W., Chin, B. A. (1989): “*Infrared Sensing for Adaptive Arc Welding*”. In: *Welding Journal*, november, pp. 462s-466s.
- Nagesh, D. S., Datta, G. L. (2002): “*Prediction of Weld Bead Geometry and Penetration in Shielded Metal-Arc Welding Using Neural Networks*”. In: *Journal of Materials Processing Technology*, no. 123, pp. 303-312.
- NIST, National Institute of Standards and Technology (acessado em 07/2008)
http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- Norrish, J., (1992) “*Advanced Welding Process*”. In: IOP Publishing Ltd., London.
- Parmar, R, S. (1995). “*Welding Processes and Technology*”. In: Khanna Publishers, Nova Déli.

- Paxson, V. (1999): “*Bro: A System for detecting network intruders in real-time*”. In: Computer Networks, Vol. 31, pp 2435-2463.
- Quinn, T. P., Smith C., McCowan C. N., Blachowiak E., Madigantitle R. B (1999): “*Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding*”. In: Welding Journal 78, no. 9 September, pp 322s-328s.
- Shimakura, S. E. (2004) <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE001/node27.html>
- Sforza, P., Blasiis, D. (2002). “*On-line optical monitoring system for arc welding*”. In: NDT&E Internacional, no. 35, pp 37-43.
- Soong, T. T. (2004). “*Fundamentals of probability and statistics for engineers*”. In: John Wiley & Sons Inc.
- Song, H. S., Zhang, Y. M. (2008). “*Measurement and Analysis of Three-Dimensional Specular Gas Tungsten Arc Weld Pool Surface*”. In: Welding Journal 87, no. 4, pp. 85-s – 95-s.
- Spectral Products, (acessado em 07/2008) <http://www.spectralproducts.com/>
- Stone, D. A., Smith, J. S., Lucas, J. (1990). “*Sensor for automated weldbead penetration control*”. In: Measurement Science and Technology, no. 1, pp. 1143-1148.
- Stone, D. A., Smith, J. S., Lucas, J. (1991). “*Sensor for automated front face weldbead area control*”. In: Measurement Science and Technology, no. 3, pp. 263-269.
- Stone, D. A., Smith, J. S., Lucas, J. (1994). “*Sensor for automated frontface weldbead area control*”. In: Measurement Science and Technology, no. 5, pp. 93-99.
- Sun, Y., Bai, P., Sun, H., Zhou, P. (2005). “*Real-time automatic detection of weld defects in steel pipe*”. In: NDT&E Internacional, no 38, pp 522-528.
- Szymansky, Z., Kurzyna J., Kalita, W. (1997). “*The spectroscopy of the plasma plume induced during laser welding of stainless steel and titanium*”. In: Journal of Physics D: Applied Physics, no. 30, pp. 3153-3162.
- Tartakovsky, A. G., Kim, H. (2006). “*Performance of Certain Decentralized Distributed Change Detection Procedures*”. In: 6th International Conference on Information Fusion.
- Tartakovsky, A. G., Rozovskii, B., Blazek, R., Kim, H. (2006). “*A novel approach to detection of intrusions in computer networks via adaptive sequential and batch-sequential change-point detection methods*”. In: 6th International Conference on Information Fusion.
- Millerwelds “*TIG Handbook: For GTAW – Gas Tungsten Arc Welding*”. In: <http://www.millerwelds.com/education/TIGhandbook/>

- Vervisch, P., Cheron B., Lhuissier, J. F. (1990). “*Spectroscopic analysis of a TIG arc plasma*”. In: Journal of Physics D. Applied. Physics, no. 23, pp. 1058-1063.
- Vilarinho, L. O. (2003). “*Development of Experimental and Numerical Techniques for TIG Arc Characterisation*”. Tese de doutorado, Universidade de Uberlândia.
- Vilarinho, L. O.; Scotti, A., Dantas, N. O.(2002). “*Enhancement of an Optics Emission Spectroscopic Technique to Measure Welding Arc Temperature*”. In: Ciência & Engenharia, Vol. 11, no. 1, pp. 67-74.
- Wang, Y., Qiang, C., (2002). “*On-line quality monitoring in plasma-arc welding*”. In: Journal of Materials Processing Technology, no. 120, pp. 270-274.
- Wang, Y., Zhao, P., (2001). “*Noncontact Acoustic Analysis Monitoring of Plasma Arc Welding*”. In: International Journal of Pressure Vessels and Piping, no. 78, pp. 43-47.
- Widrow, B., Stearns, S. D. (1985). “*Adaptive Signal Processing*”. In: Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Wikle III, H. C., Kottilingam, S., Zee, R. H., Chin, B. A. (2001). “*Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process*”. In: Journal of Materials Processing Technology, no. 113, pp. 228-233.
- Wikle III, H. C., Zee, R. H., Chin, B. A. (1999). “*A Sensing System for Weld Process Control*”. In: Journal of Materials Processing Technology, no. 89-90, pp. 254-259.
- Zhang, Y. M., Kovacevic, R., Li, L. (1996). “*Characterization and Real-Time Measurement of Geometrical Appearance of the Weld Pool*”. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, no. 36, pp. 799-816.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Figuras das experiências

A seguir serão apresentadas as outras experiências. Para um melhor entendimento, segue uma legenda com as informações necessárias:

	Sinal sem filtrar normalizado
	Sinal estimado (filtrado)
	Teste estatístico
	Teste estatístico
	Referência
	Detecção falsa
	Detecção correta
	Não houve detecção

As figuras e informações foram dispostas de modo que a melhor orientação do papel para a leitura é paisagem, ou seja, com o papel deitado.

Segunda bateria, experimento 11. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=170\text{ A}$
 Filtro: Kalman $Q0=0,001$
 Distância: Brandt $R1=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$
 Linha monitorada: ferro 518,1948 mm

$v_g=10\text{ L/min}$
 $v=2,5\text{ mm/s}$
 $l=5\text{ mm}$
 $Q1=0,001$
 $R=1$
 $L=10$

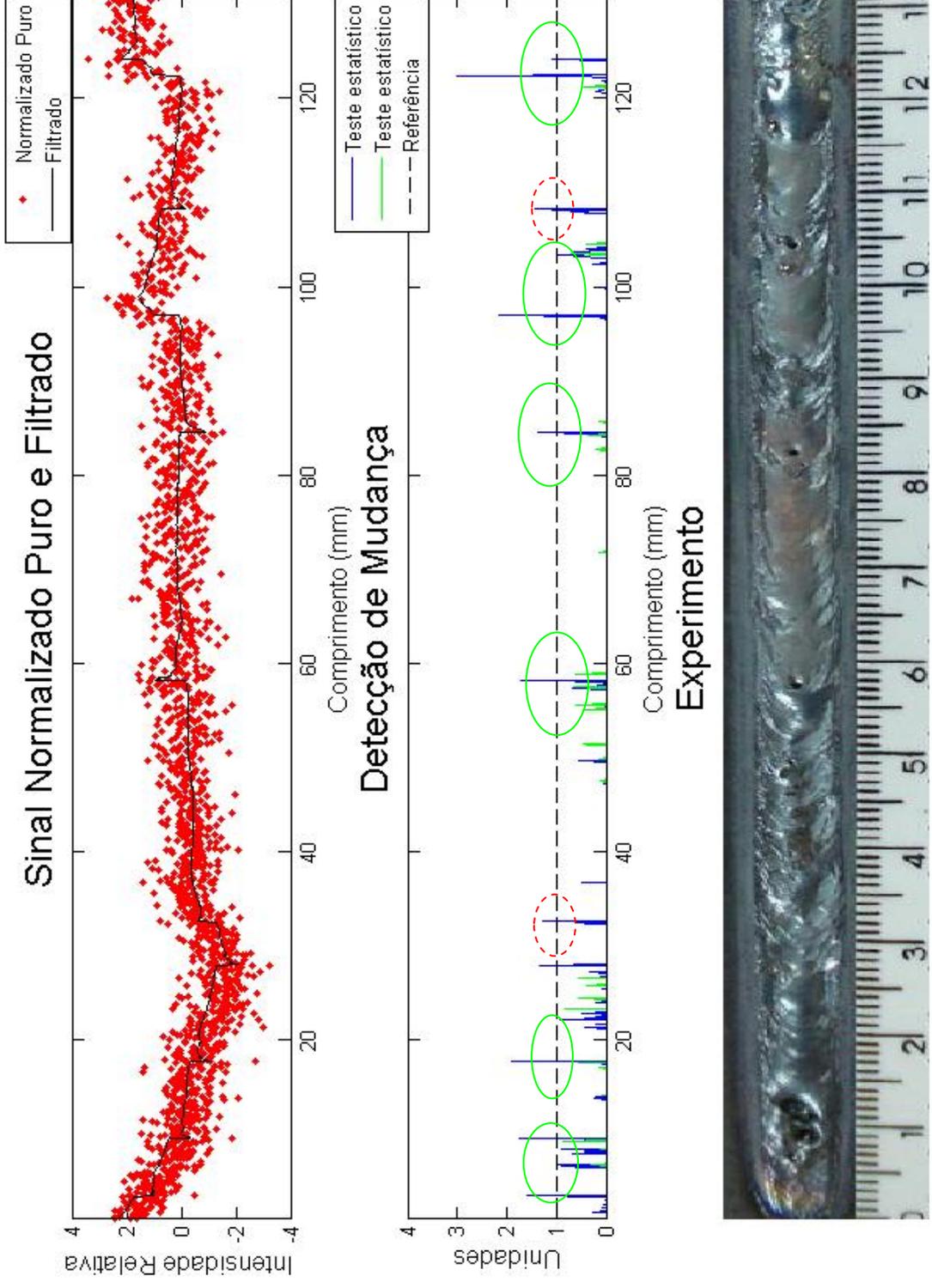


Figura 1 – Segunda bateria, experimento 11 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 12. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=120\text{ A}$
 Filtro: Kalman $Q0=0,001$
 Distância: Brandt $R1=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$
 Linha monitorada: ferro 537,1489 mm

$v=2,5\text{ mm/s}$
 $l=5\text{ mm}$
 $Q1=0,001$
 $R=1$
 $v_g=10\text{ L/min}$
 $L=10$
 $v=1$

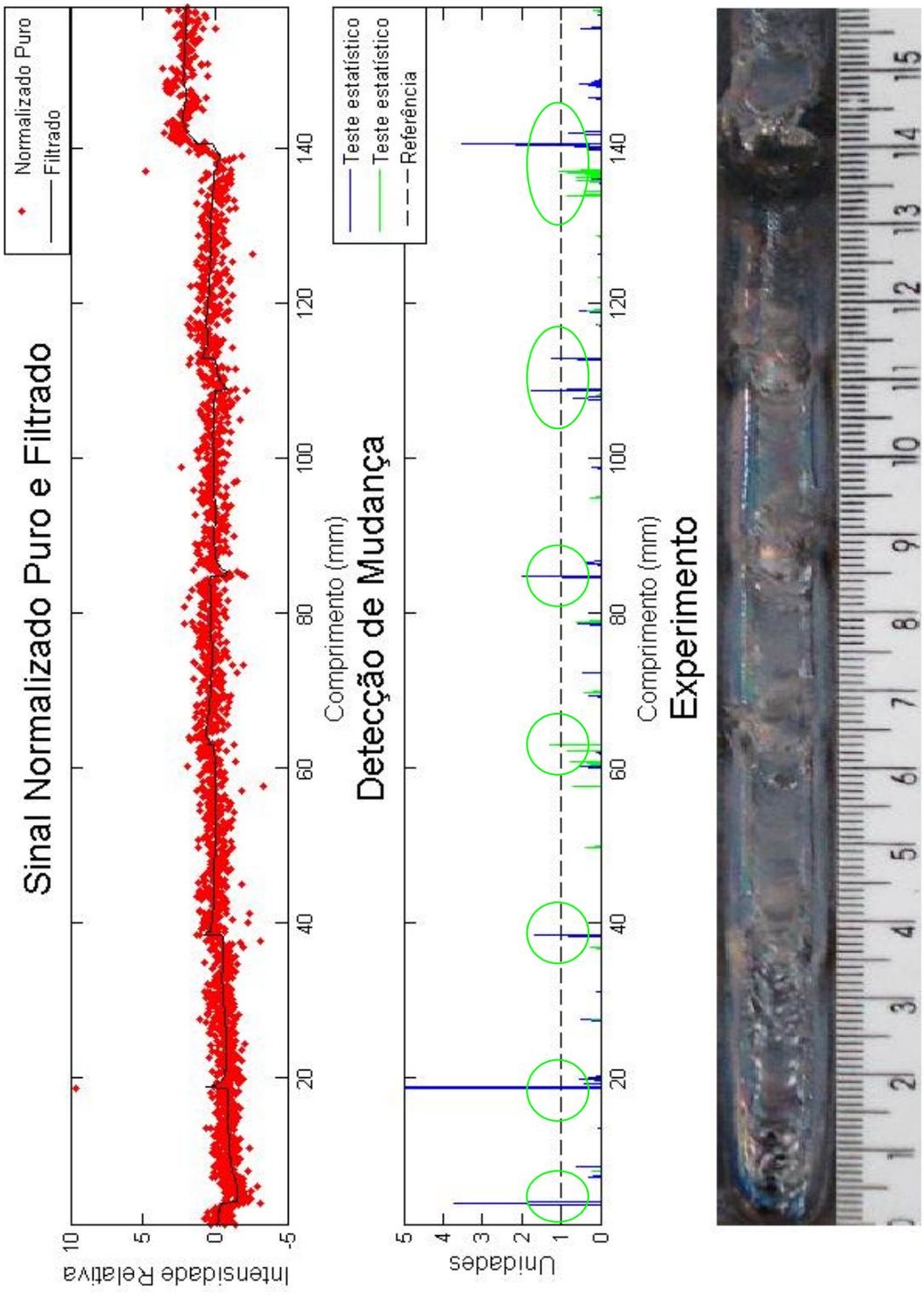


Figura 2 – Segunda bateria, experimento 12 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 13. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=90\text{ A}$
 Filtro: Kalman $Q0=0,001$
 Distância: Brandt $R1=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$
 Linha monitorada: ferro 487,8208 mm

$v=2,5\text{ mm/s}$
 $l=5\text{ mm}$
 $Q1=0,001$
 $R2=1$
 $v=0,8$

$vg=10\text{ L/min}$
 $L=10$
 $R=1$

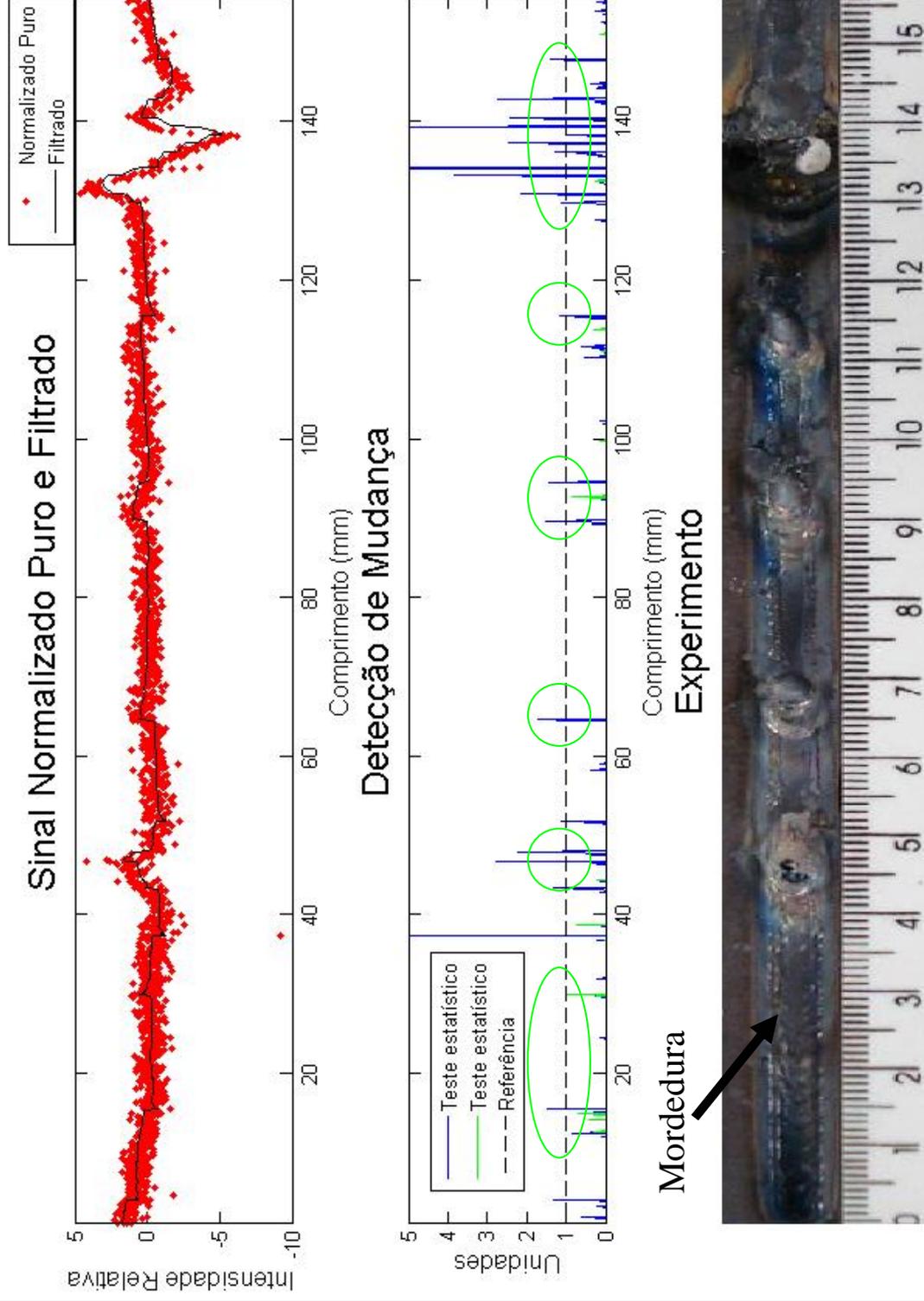


Figura 3 – Segunda bateria, experimento 13 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 15. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=90$ A $l=7$ mm $v=2,5$ mm/s $v_g=10$ L/min
 Filtro: Kalman $Q=0,001$ $R=1$ $L=10$
 Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=1$
 Linha monitorada: ferro 487,8208 mm

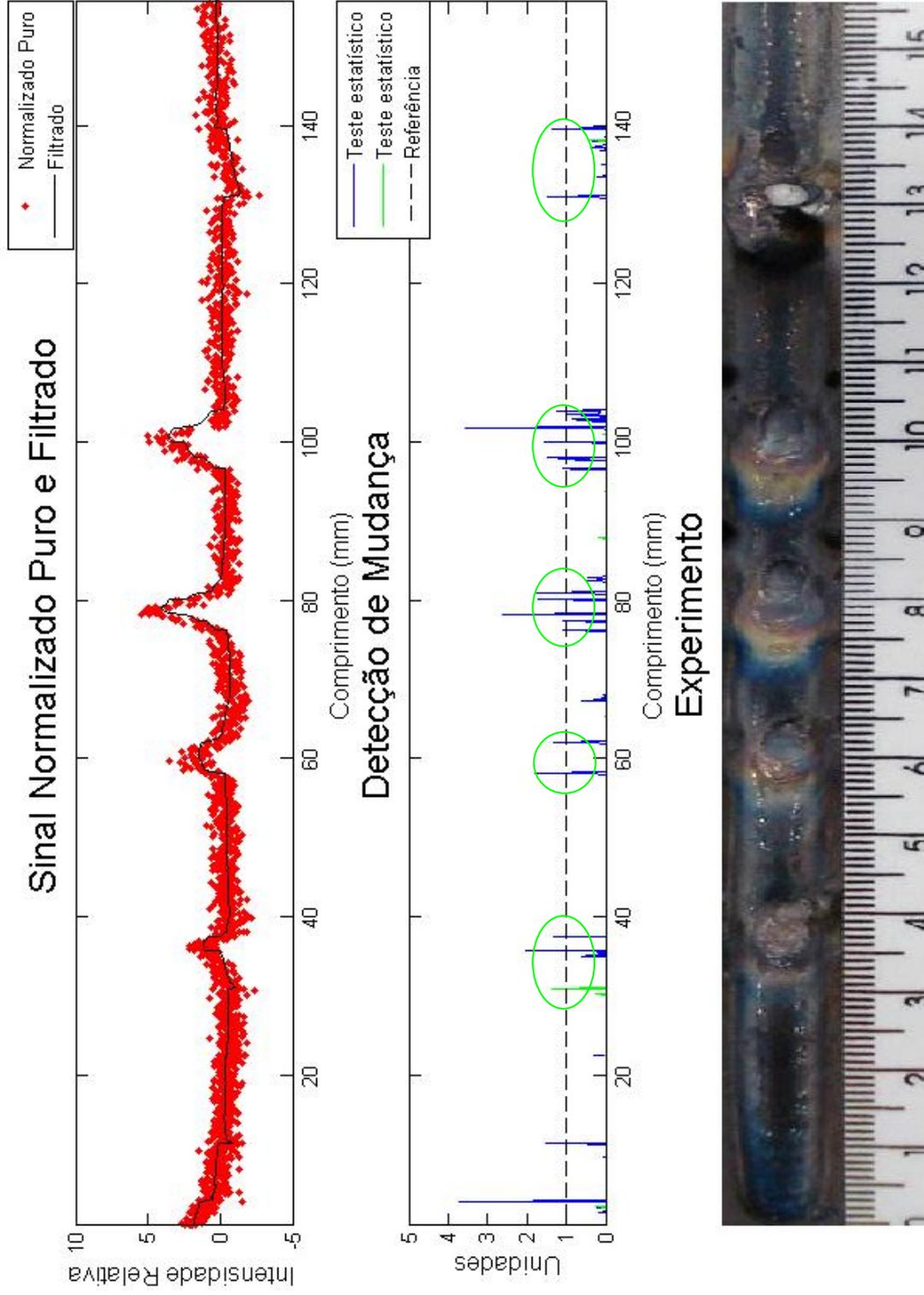
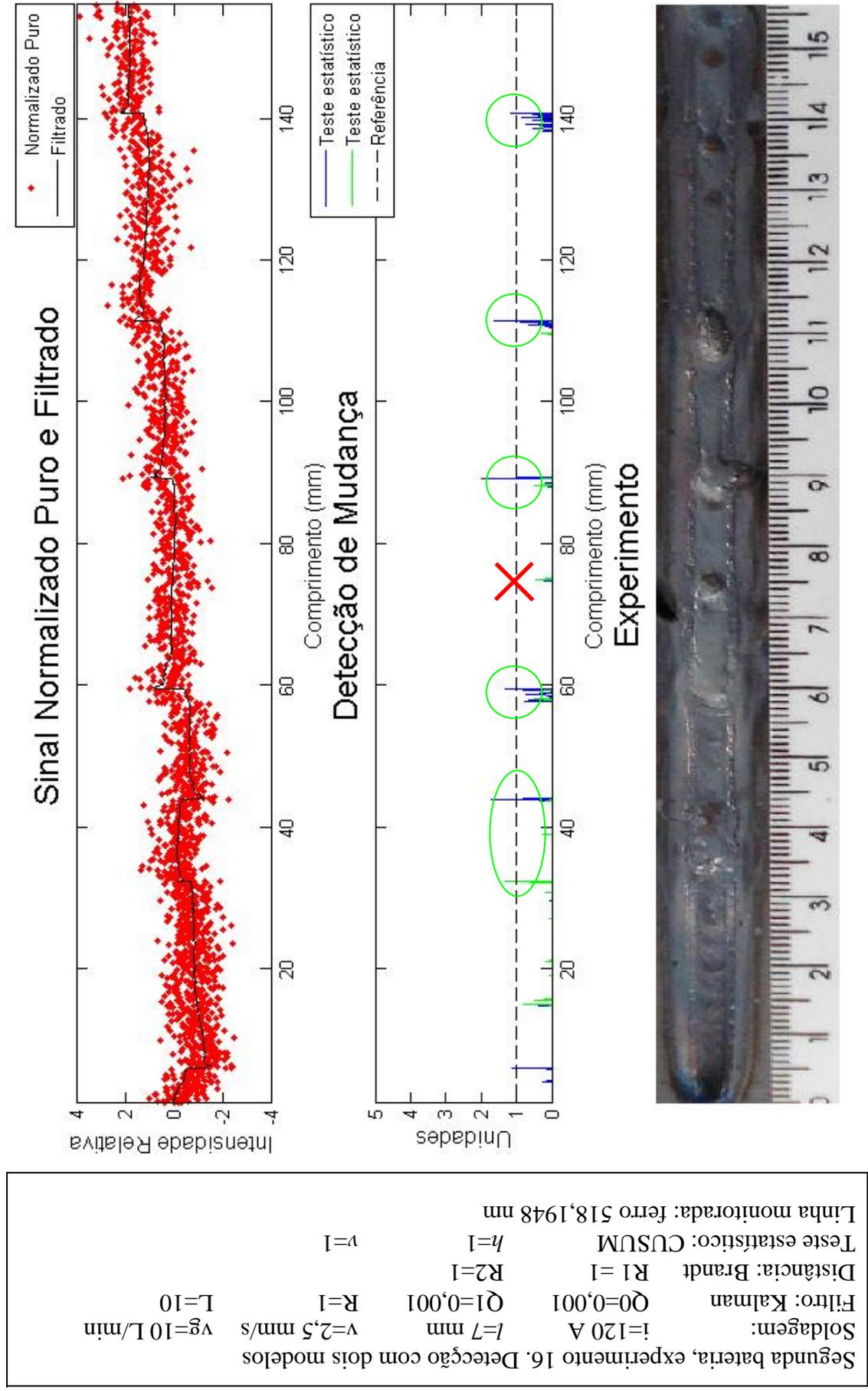


Figura 4 – Segunda bateria, experimento 15 com detecção com dois modelos.



Segunda bateria, experimento 16. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=120\text{ A}$ $l=7\text{ mm}$ $v=2,5\text{ mm/s}$ $vg=10\text{ L/min}$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $R1=1$ $R2=1$ $R=1$ $L=10$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$ $v=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$

Linha monitorada: ferro 518,1948 mm

Figura 5 – Segunda bateria, experimento 16 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 17. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=160\text{ A}$ $l=7\text{ mm}$ $v=2,5\text{ mm/s}$ $v_g=10\text{ L/min}$ $L=10$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,8$

Linha monitorada: ferro 403,5273 mm

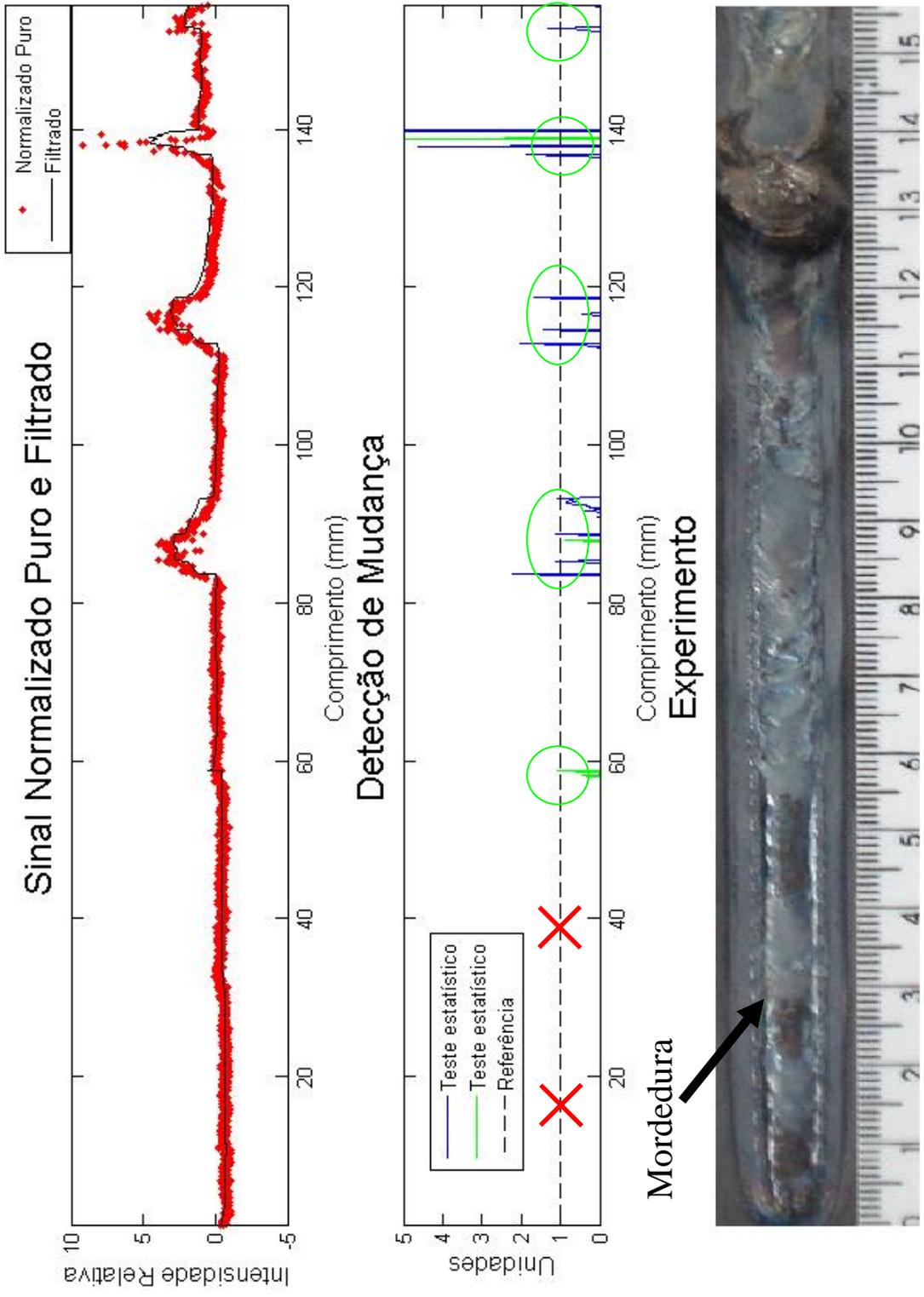


Figura 6 – Segunda bateria, experimento 17 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 18. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=90\text{ A}$
 Filtro: Kalman $Q0=0,001$
 Distância: Brandt $R1=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$
 Linha monitorada: ferro 537,1489 mm

$v_g=10\text{ L/min}$
 $v=2,5\text{ mm/s}$
 $l=3\text{ mm}$
 $Q1=0,001$
 $R=1$
 $v=0,8$

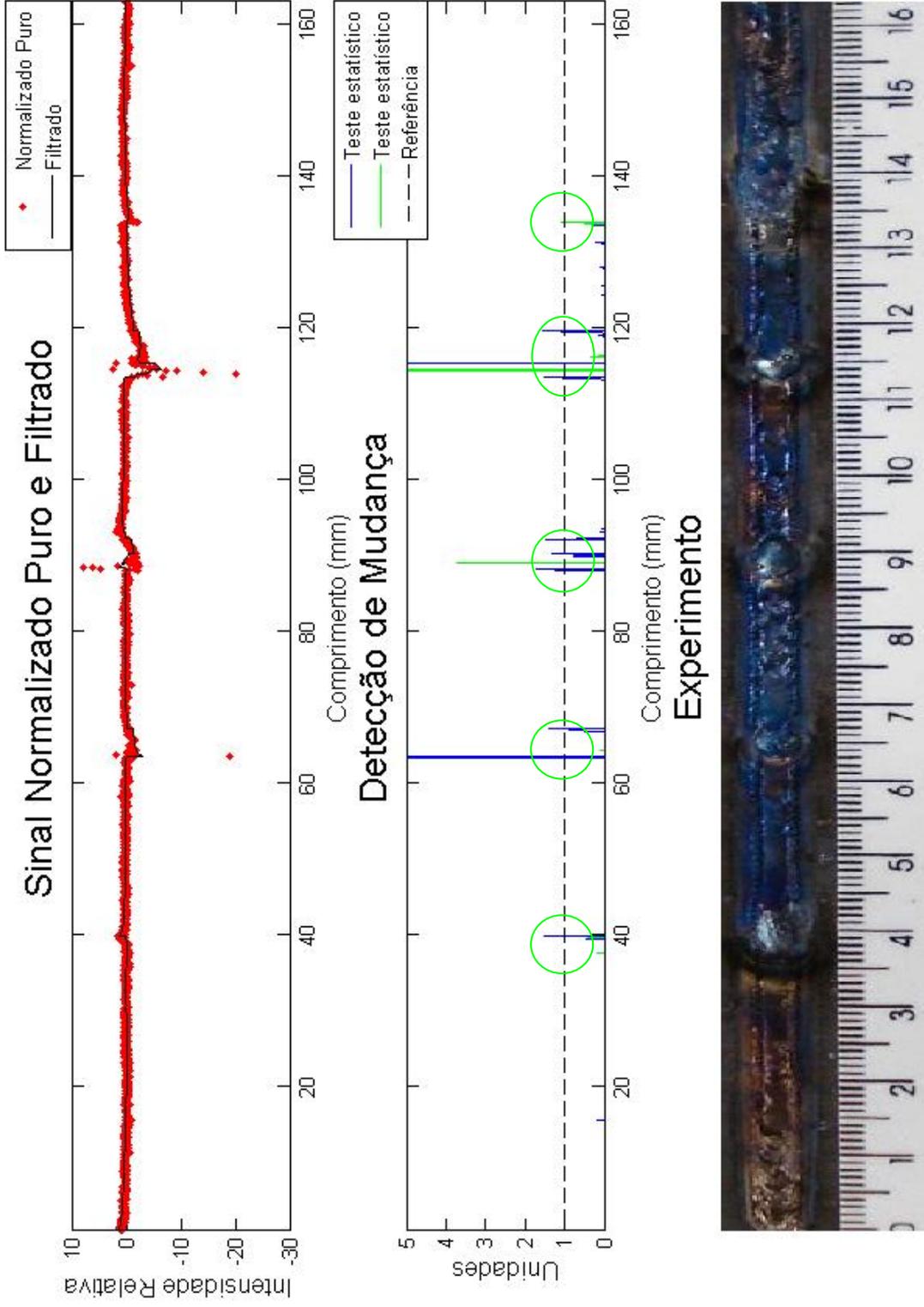


Figura 7 – Segunda bateria, experimento 18 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 19. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=120\text{ A}$ $l=3\text{ mm}$ $v=2,5\text{ mm/s}$ $v_g=10\text{ L/min}$ $L=10$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,8$

Linha monitorada: ferro 518,1948 mm

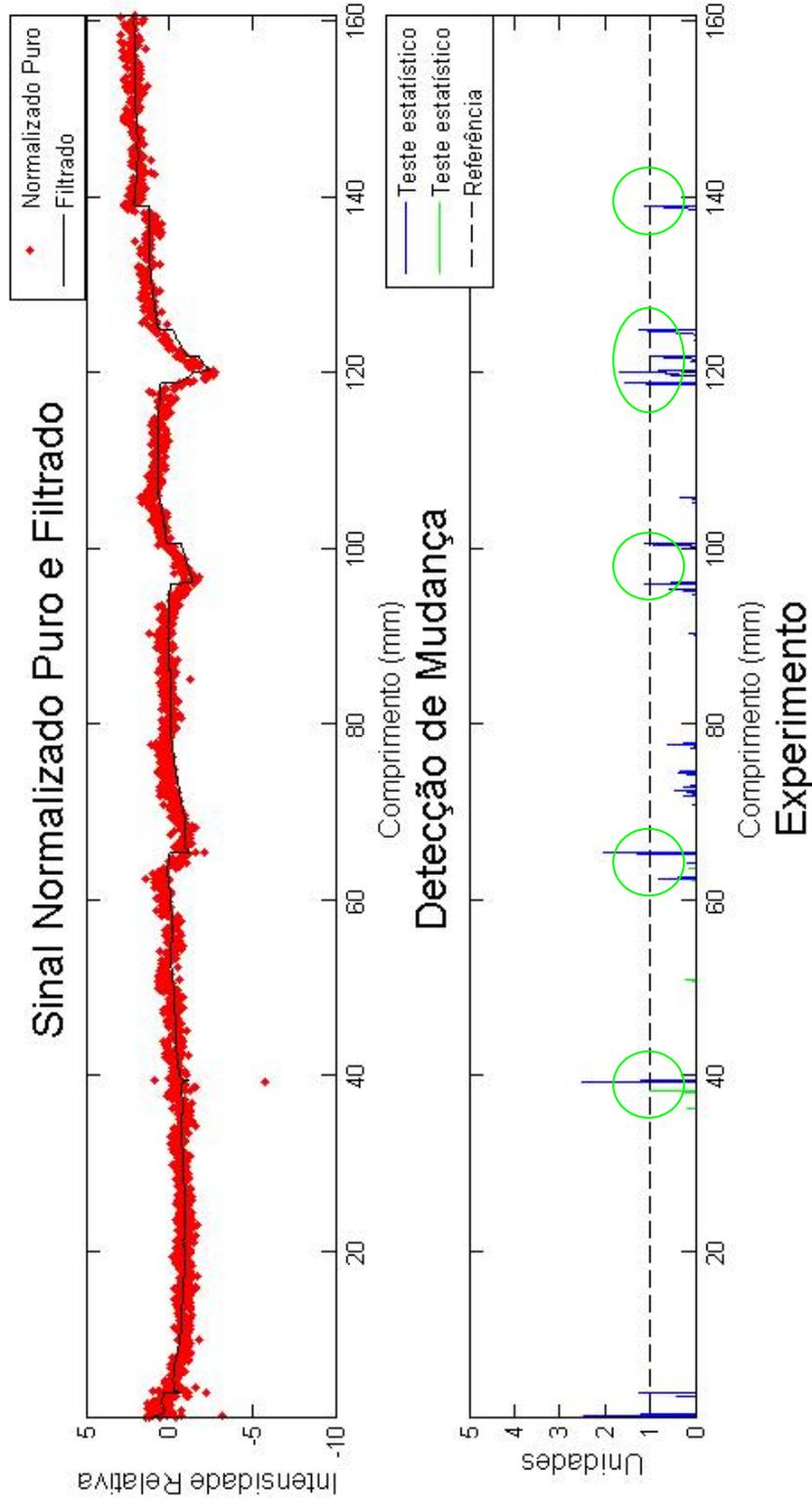


Figura 8 – Segunda bateria, experimento 19 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 20. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=160\text{ A}$ $l=3\text{ mm}$ $v=2,5\text{ mm/s}$ $v_g=10\text{ L/min}$ $L=10$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,8$

Linha monitorada: ferro 518,1948 mm

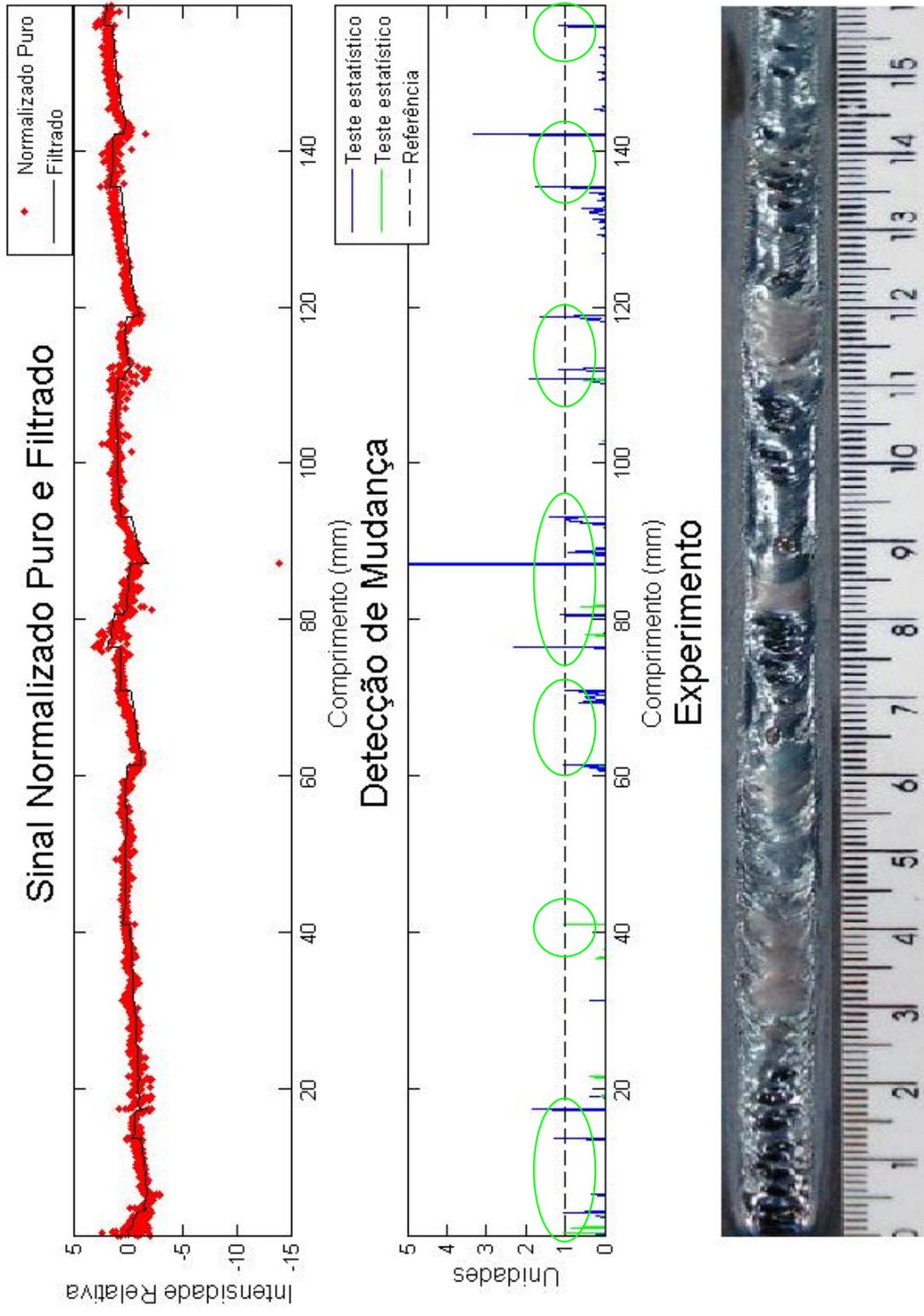


Figura 9 – Segunda bateria, experimento 20 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 25-: jatos de água. Detecção com dois modelos
 Soldagem: $i=90$ A $l=5$ mm $v=2,5$ mm/s $v_g=10$ L/min $L=10$
 Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$
 Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,5$
 Linha monitorada: ferro 487,8208 mm

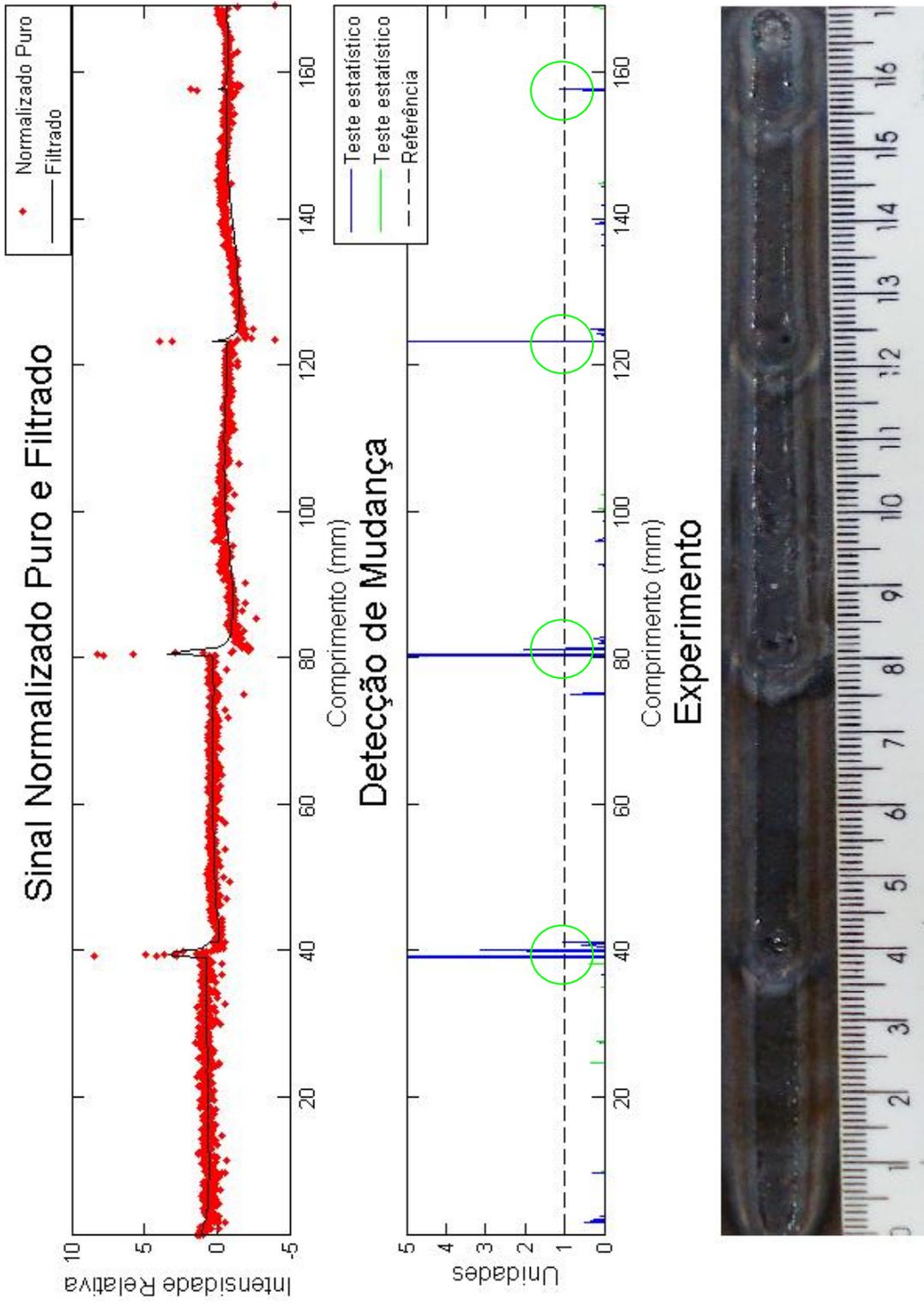


Figura 10 – Segunda bateria, experimento 25 com detecção com dois modelos (ferro).

Segunda bateria, experimento 25: jatos de água. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=90$ A $l=5$ mm $v=2,5$ mm/s $vg=10$ L/min $L=10$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,5$

Linha monitorada: hidrogênio 656,2852 nm

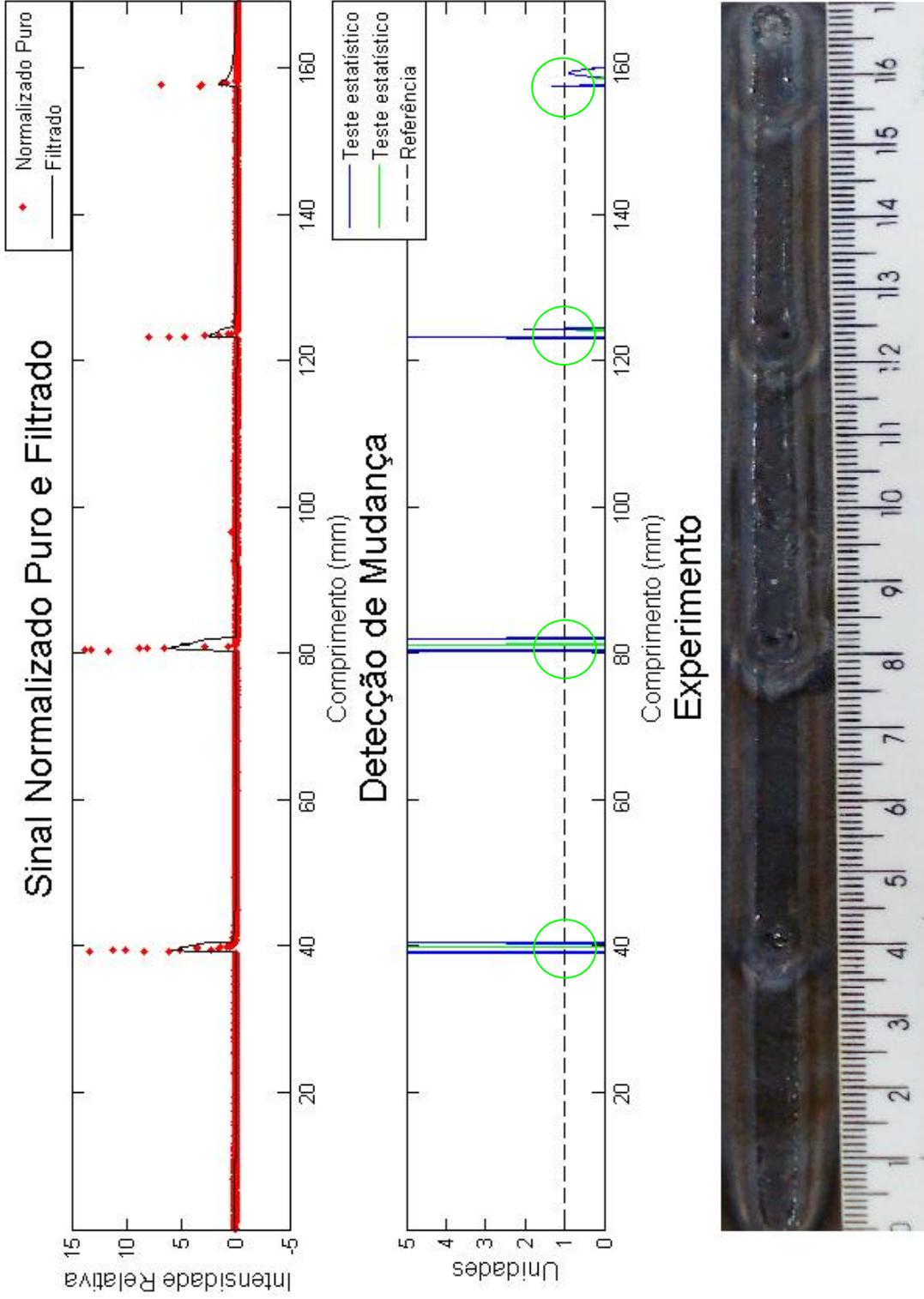


Figura 11 – Segunda bateria, experimento 25 com detecção com dois modelos (hidrogênio).

Segunda bateria, experimento 27: água borrifada. Detecção com dois modelos

Soldagem: $i=160\text{ A}$ $l=5\text{ mm}$ $v=2,5\text{ mm/s}$ $vg=10\text{ L/min}$ $L=10$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,8$

Linha monitorada: hidrogênio 656,2852 nm

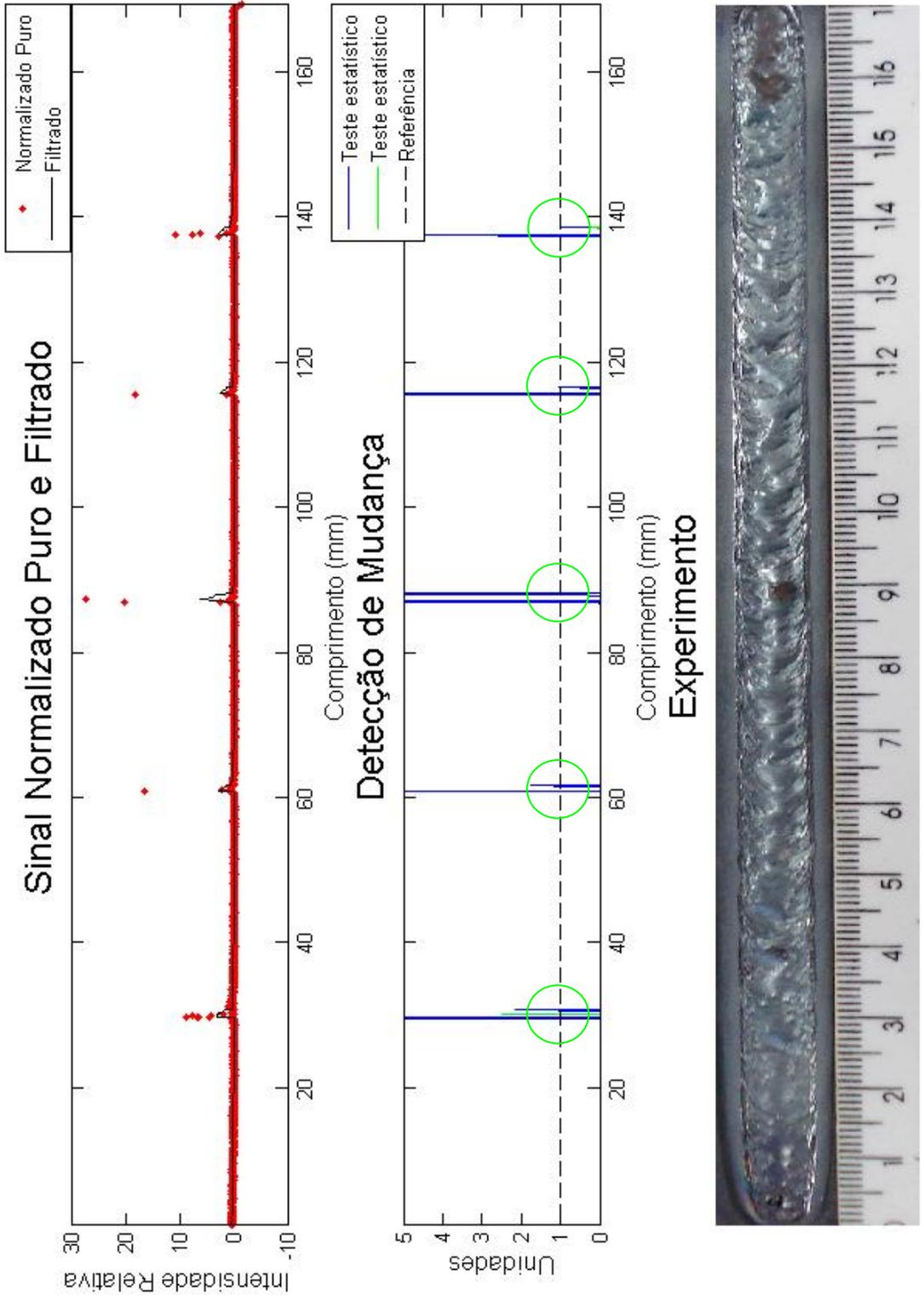


Figura 12 – Segunda bateria, experimento 27 com detecção com dois modelos.

Segunda bateria, experimento 28: variação no fluxo de gás. Detecção c/ 2 modelos

Soldagem: $i=160\text{ A}$
 Filtro: Kalman $Q0=0,001$
 Distância: Brandt $R1=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$
 Linha monitorada: ferro 403,5243 mm

$v=2,5\text{ mm/s}$
 $vg=10\text{ L/min}$
 $L=10$
 $R=1$
 $v=0,5$

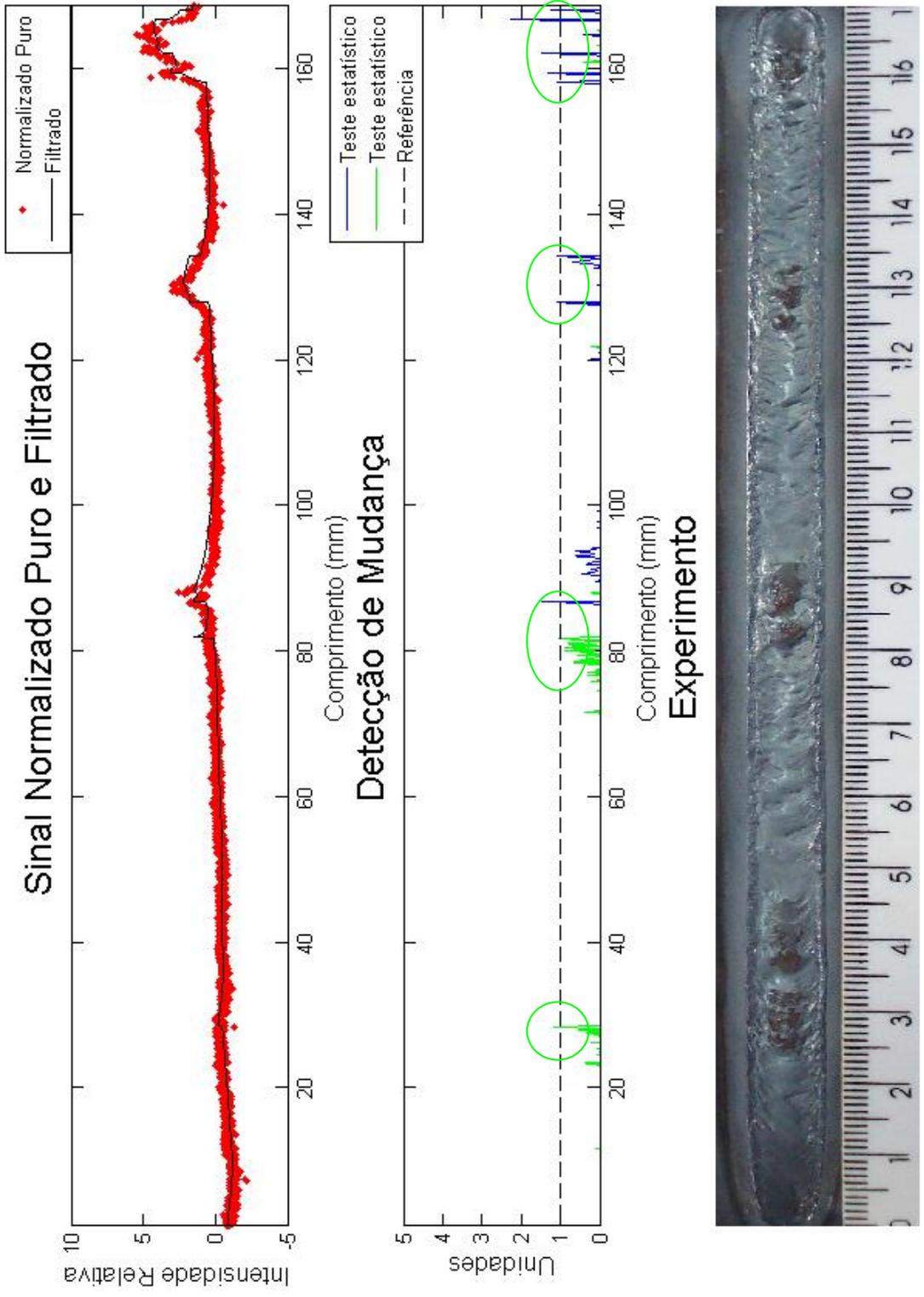


Figura 13 – Segunda bateria, experimento 28 com detecção com dois modelos (ferro).

Segunda bateria, experimento 28: variação no fluxo de gás. Detecção c/ 2 modelos

Soldagem: $i=160\text{ A}$ $l=5\text{ mm}$ $R=1$ $v=2,5\text{ mm/s}$ $v_g=10\text{ L/min}$ $L=10$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,2$

Linha monitorada: argônio 566,2285 nm

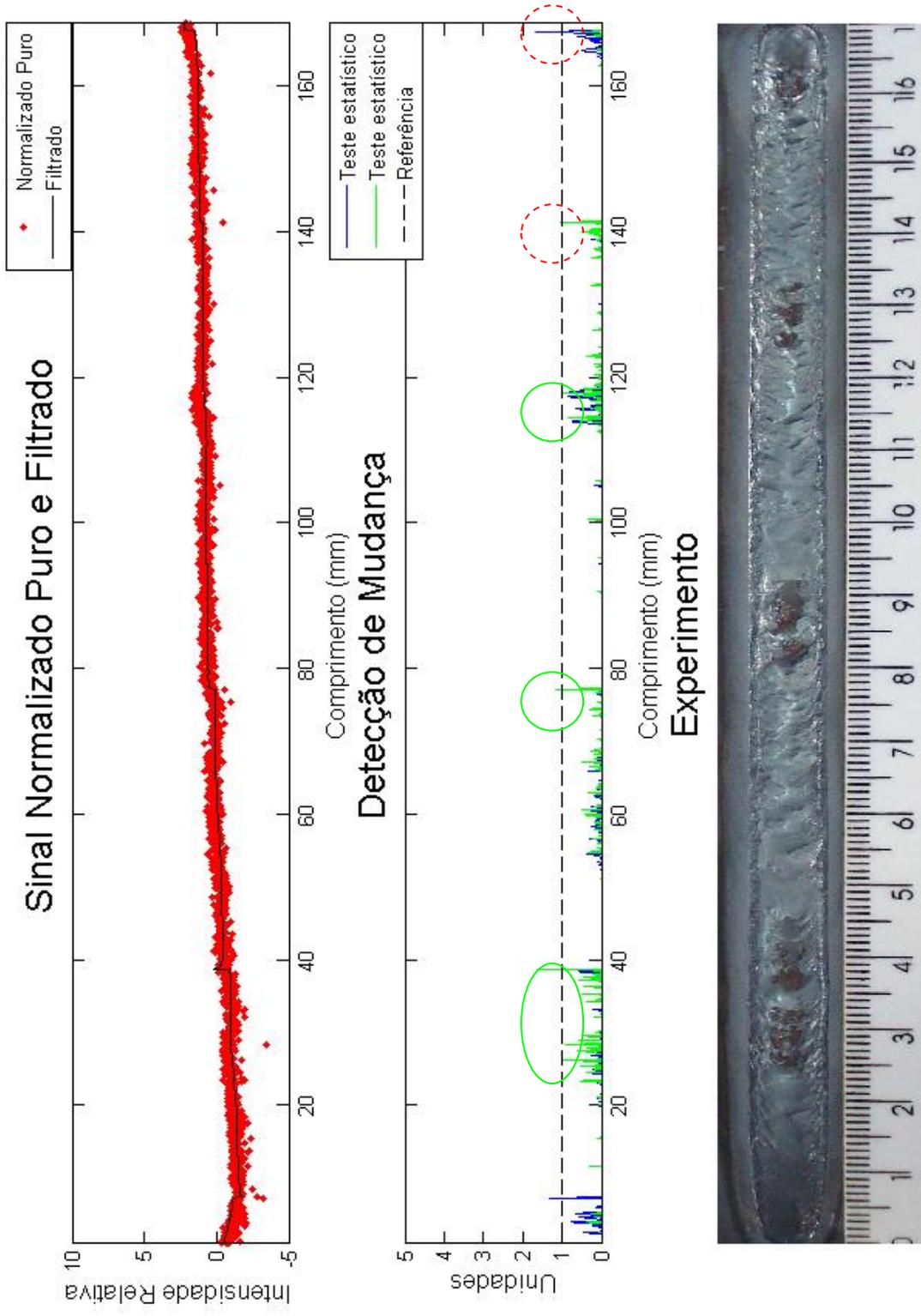


Figura 14 – Segunda bateria, experimento 28 com detecção com dois modelos (argônio)

Primeira bateria, experimento 20: variação no fluxo de gás. Detecção c/ 2 modelos

Soldagem: $i=150\text{ A}$
 Filtro: Kalman $Q0=0,001$
 Distância: Brandt $R1=1$
 Teste estatístico: CUSUM $h=1$
 Linha monitorada: ferro 403,5243 mm $v=0,8$

$l=5\text{ mm}$
 $Q1=0,001$
 $R2=1$
 $R=1$
 $v=2,5\text{ mm/s}$
 $vg=10\text{ L/min}$
 $L=10$

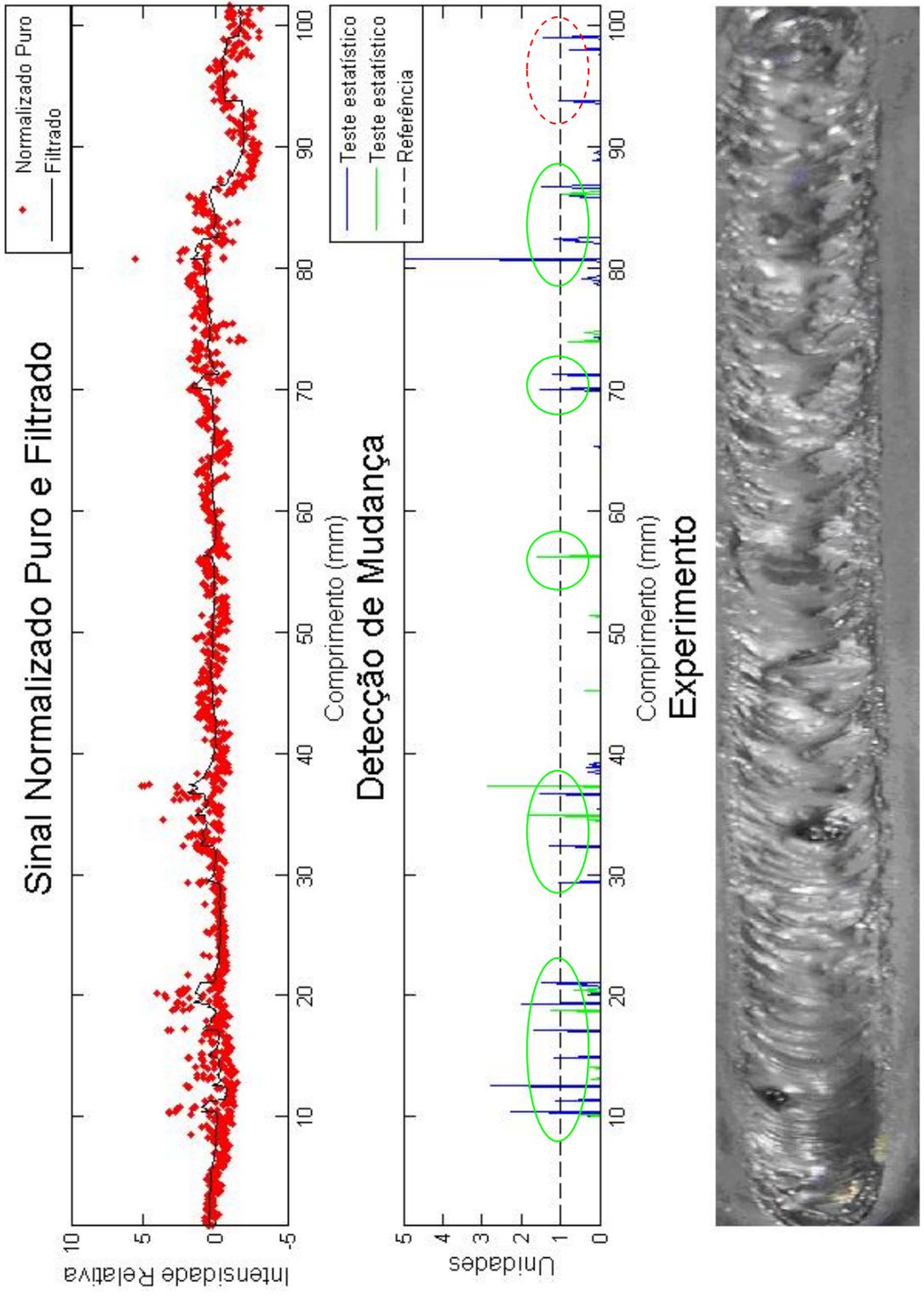


Figura 15 – Primeira bateria, experimento 20 com detecção com dois modelos (ferro).

Primeira bateria, experimento 20: variação no fluxo de gás. Detecção c/ 2 modelos

Soldagem: $i=150\text{ A}$ $l=5\text{ mm}$ $v=2,5\text{ mm/s}$ $v_g=10\text{ L/min}$ $L=10$

Filtro: Kalman $Q0=0,001$ $Q1=0,001$ $R=1$

Distância: Brandt $R1=1$ $R2=1$

Teste estatístico: CUSUM $h=1$ $v=0,8$

Linha monitorada: argônio 486,1375 nm

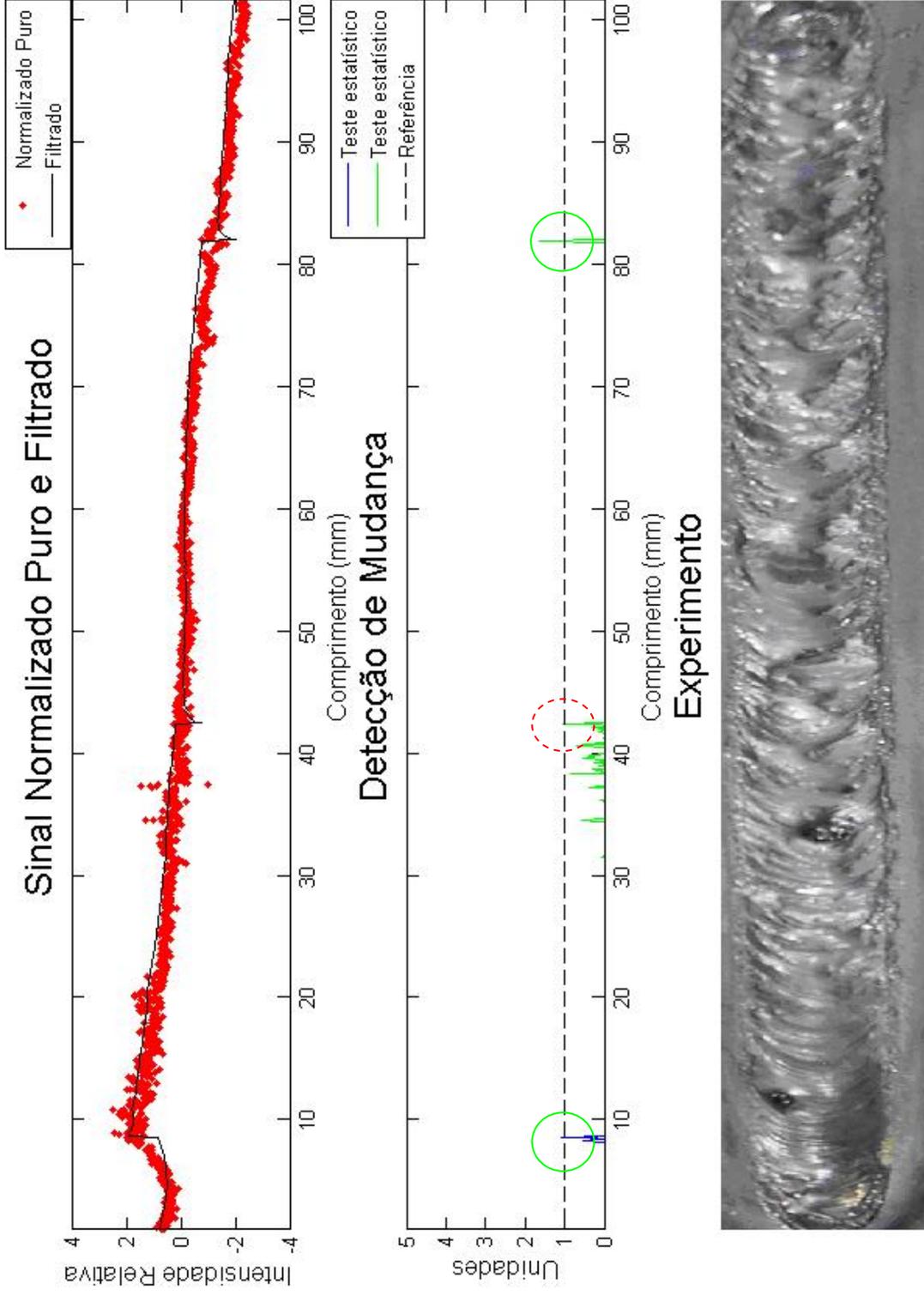


Figura 16 – Primeira bateria, experimento 20 com detecção com dois modelos (argônio).

APÊNDICE B – Tabelas de Desempenho

Com a intenção de apresentar o desempenho dos algoritmos para diferentes experimentos, foi levantada uma tabela comparativa. Seguiram-se os seguintes critérios para a avaliação:

- Para cada algoritmo foram utilizados os mesmos parâmetros nos diferentes experimentos. Porém os parâmetros entre os algoritmos são diferentes;
- Para cada experimento foi escolhida uma linha espectral que foi utilizada pelos diferentes algoritmos.

A fórmula de desempenho leva em conta a quantidade total de defeitos detectados de forma correta menos o número de erros do tipo I dividido pela quantidade total de defeitos simulados.

$$desempenho(\%) = \frac{(certo - erroI)}{defeitos} \times 100$$

Sendo que:

certo	Defeito simulado e detectado.
erro I	Erro do tipo I. Defeito acusado quando não simulado.
erro II	Erro do tipo II. Defeito simulado e não acusado.

As tabelas foram dispostas de modo que a melhor orientação do papel para a leitura é paisagem, ou seja, com o papel deitado.

O índice de desempenho mínimo deve ser uma escolha do responsável pelo processo produtivo no qual serão aplicados esses algoritmos, pois se levam em conta os custos de produção.

Tabela 1 – Desempenho dos algoritmos baseados em um modelo.

Filtro		1 Modelo												
Medição da distância		LS			RLS			WLS			KF			
Teste estatístico		CUSUM			CUSUM			CUSUM			Mahalanobis			
Experimento	no.	Defeitos	certo	erro I	erro II	certo	erro I	erro II	certo	erro I	erro II	certo	erro I	erro II
Primeira Bateria	10	2	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
	20	5	5	1	0	5	1	0	5	1	0	4	0	1
Segunda Bateria	11	5	4	0	1	3	0	2	4	0	1	2	0	3
	12	5	5	0	0	5	0	0	4	0	1	4	0	1
	13	6	6	0	0	5	0	1	5	0	1	5	0	1
	14	5	5	0	0	4	0	1	4	0	1	3	0	2
	15	5	5	0	0	5	0	0	5	1	0	5	0	0
	16	6	4	0	2	4	0	2	4	0	2	2	0	4
	17	6	3	0	3	3	0	3	3	0	3	3	0	3
	18	5	4	0	1	4	0	1	4	0	1	4	0	1
	19	8	7	0	1	6	0	2	4	0	3	6	0	2
	20	8	8	0	0	7	0	1	8	0	0	6	0	2
25	4	4	0	0	4	0	0	4	0	0	4	0	0	
27	5	5	0	0	5	0	0	5	0	0	5	0	0	
28	4	4	1	0	3	0	1	3	0	1	2	0	2	
Total		79	70	2	9	64	1	14	63	2	14	56	0	23
Certos			70			64			63			56		
Erros			11			15			16			23		
Desempenho (%)			86			80			77			71		

Tabela 2 – Desempenho dos algoritmos baseados em dois modelos.

Filtro		2 Modelos																		
Medição da distância		KF		KF		KF		KF		KF		KF		KF		Brandt				
Teste estatístico		Brandt Modificado		Brandt		Teste Divergência		Diferença Média		Teste Divergência		Brandt Modificado		Brandt		Brandt				
Experimento	no.	Defeitos	CUSUM		CUSUM		CUSUM		CUSUM		GMA		GMA		GMA		Brandt			
			certo	erro	certo	erro	certo	erro	certo	erro	certo	erro	certo	erro	certo	erro	certo	erro		
Primeira Bateria	10	2	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	
	20	5	5	0	0	5	0	0	1	5	1	0	5	1	0	4	0	1	0	
	11	5	5	1	0	5	0	0	0	5	1	0	5	1	0	5	1	0	0	
	12	5	5	0	0	5	1	0	0	5	1	0	5	1	0	5	1	0	0	
	13	6	6	0	0	6	1	0	1	6	1	0	6	0	0	5	0	1	0	
	14	5	5	0	0	5	0	0	0	4	0	1	5	0	0	4	0	0	1	
Segunda Bateria	15	5	5	0	0	5	0	0	0	5	0	0	5	0	0	4	0	1	0	
	16	6	6	0	0	5	0	1	4	0	2	5	0	1	4	0	4	0	2	
	17	6	4	0	2	4	0	2	3	0	3	3	0	3	0	3	0	3	0	
	18	5	5	0	0	5	0	0	5	0	0	4	0	1	4	0	1	4	0	
	19	8	6	0	2	6	0	2	6	0	2	6	0	2	6	0	2	7	0	
	20	8	8	0	0	8	0	0	7	0	1	7	0	1	7	0	1	7	0	
	25	4	4	0	0	4	0	0	4	0	0	4	0	0	4	0	4	0	0	
	27	5	5	0	0	5	0	0	5	0	0	5	0	0	5	0	5	0	0	
	28	4	4	0	0	4	0	0	3	0	1	4	1	0	3	1	1	2	0	
	74	1	5	73	1	6	73	2	6	66	0	13	70	5	9	69	4	10	64	0
Total			74	73	73	73	73	73	66	0	13	70	5	9	69	4	10	64	0	15
Certos			66																	64
Erros			13																	15
Desempenho (%)			92	91	90	82	84	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	82	81