

**MONITORIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDAGEM TIG ATRAVÉS DO
SENSORIAMENTO INFRAVERMELHO**

FERNAND DÍAZ FRANCO

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

**MONITORIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA
SOLDAGEM TIG ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO
INFRAVERMELHO**

FERNAND DÍAZ FRANCO

ORIENTADOR: SADEK CRISÓSTOMO ABSI ALFARO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM – 026A/08

BRASÍLIA/DF: OUTUBRO - 2008

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

**MONITORIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA
SOLDAGEM TIG ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO
INFRAVERMELHO**

FERNAND DÍAZ FRANCO

**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, Ph. D. (ENM- UnB)
(Orientador)**

**Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero, Dr. (ENM- UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Paulo José Modenesi, Ph. D. (UFMG)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 3 DE OUTUBRO DE 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

FRANCO, FERNAND DÍAZ

Monitorização e Localização de Defeitos na Soldagem TIG através do Sensoriamento Infravermelho. [Distrito Federal] 2008.

xvi, 125p, 210 x 297mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2008).

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

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. TIG

2. Monitoramento

3. Infravermelho

4. Detecção de Defeitos

I. ENM/FT/UnB

II. Título (Serie)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FRANCO, F. D. (2008). Monitorização e Localização de Defeitos na Soldagem TIG através do Sensoriamento Infravermelho [Distrito Federal] 2008. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-026A/08, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fernand Díaz Franco

TÍTULO: Monitorização e Localização de Defeitos na Soldagem TIG através do Sensoriamento Infravermelho

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.

Fernand Díaz Franco

SCLN 407 Bloco C Apt. 221

70.855 – 530 Brasília – DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer inicialmente a Deus por ter colocado no meu caminho pessoas maravilhosas que fizeram isto possível. A minha mãe, pai e irmã pelo seu sacrifício e apoio para que eu conseguisse vir a estudar no Brasil.

Ao professor Sadek Absi Alfaro, pelo apoio durante a pesquisa.

Aos meus colegas e amigos do GRACO, especialmente ao Daniel Bebiano, Eber, Luciano Franco, Luiz, Jones, Daniel Muñoz, Jimmy pela ajuda, conselhos e também pelas alegrias compartilhadas e pela companhia nos momentos difíceis.

Aos meus professores do mestrado, prof. Carlos, prof. Guilherme, prof. Britto pela formação acadêmica. Ao Marrocos pela sua total disposição para resolver as minhas muitas interrogantes em soldagem.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Finalmente gostaria de agradecer especialmente à Isabel C.J.R. pela companhia e seu amor que foi eterno enquanto durou. À senhora Evelyne e toda a família Carvalho Junqueira Ribeiro que foram a minha família no Brasil.

RESUMO

MONITORIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS NA SOLDAGEM TIG ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO INFRAVERMELHO

Autor: Fernand Díaz Franco

Programa de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, Outubro de 2008.

Este trabalho apresenta, de forma exploratória, o uso das emissões infravermelhas do arco voltaico como parâmetro para a monitoração do processo TIG, detecção e localização de defeitos e ou descontinuidades. Para isso, usou-se um sensor infravermelho de ponto que focalizou parte do arco e a poça de fusão e transformou a intensidade da radiação infravermelha apresentada na vizinhança do ponto focal em um sinal de corrente entre 4 a 20 mA. Análises qualitativas foram feitas para avaliar as informações obtidas durante várias experiências, descrevendo as vantagens obtidas pelo monitoramento infravermelho da poça-arco, e as flutuações e o comportamento deste sinal ajudaram a entender as informações coletadas pelo sensor. Uma vez compreendido o tipo de informação dado pelo sensor, avaliou-se se este era capaz de detectar perturbações a partir da inserção de defeitos durante a solda. A metodologia empregada teve como objetivo observar a capacidade do sensor em detectar flutuações na região poça-arco. A partir das emissões infravermelhas, comprovou-se o uso efetivo do sinal para a localização de defeitos na solda. Através da inserção de defeitos durante o processo de soldagem, diversas técnicas de estimação de parâmetros e detecção de mudança do sinal infravermelho foram avaliadas. Conseguiu-se ajustar os algoritmos de detecção visando a monitoração e controle *on-line*. Foi simulado um algoritmo *on-line* que utiliza o filtro Kalman para a estimação de parâmetro do sinal infravermelho e a detecção da sua mudança através do teste estatístico por Somas Cumulativas (*CUSUM*), mostrando assim sua viabilidade para a implementação em arquiteturas reconfiguráveis.

ABSTRACT

MONITORING AND LOCALIZATION OF TIG WELDING DEFECTS THROUGH INFRARED SENSING

Author: Fernand Díaz Franco

Master degree in Mechatronics Systems

Brasília, 2008, October.

This work presents, in an exploratory form, the use of infrared emissions of the TIG arc as a parameter for process monitoring, detection and localization of defects or discontinuity during welding. A infrared sensor was used for focalizing part of the arc and weld pool and transformed the intensity of infrared radiation presented in the surrounding regions of the focal point in a current signal between 4 and 20 mA. Qualitative analyses were carried out to evaluate the information obtained during various experiments, describing the advantages obtained through the infrared monitoring of the both arc-pool. The signal behavior and its fluctuations helped to understand the information collected by the sensor. Once the information given by the sensor was understood, the capability of the sensor to detect perturbations through the triggering of defects in welding was evaluated. The objective of this methodology was to observe the capability of detecting alterations in the arc-pool region. Through the infrared emissions, the use of the signal for detection of defects in welding was showed feasible. Various techniques for the estimation of parameters and change detection on infrared signal were evaluated for the detection of the induced defects during the welding. It was possible to adjust the algorithms of detection expecting on-line monitoring and control. Finally, an on-line algorithm was simulated that uses the Kalman filter for the estimation of parameters and detection of alterations through Cumulative Sum (CUSUM), showing the viability for the implementation in reconfigurable architectures.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	2
	OBJETIVOS	2
	Objetivo Geral	2
	Objetivos Específicos	2
	JUSTIFICATIVA	3
	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	4
	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	6
2.1	SOLDAGEM.....	6
2.1.1	Solda a Arco Elétrico.....	8
2.1.2	Processo de Soldagem TIG (GTAW).....	9
2.1.2.1	Variáveis de Influência na Soldagem.....	12
2.2	O CALOR NA SOLDAGEM	15
2.2.1	O Aporte de Calor na Soldagem.....	16
2.3	MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO	17
2.3.1	Espectro Eletromagnético.....	18
2.3.2	O Infravermelho	20
2.3.2.1	Detectores de Radiação: Térmicos e de Fótons	22
2.3.2.2	Termômetro de Radiação	23
2.4	PROCESSOS ESTOCÁSTICOS E DETECÇÃO DE MUDANÇA	24
2.4.1	Conceitos básicos	25
2.4.1.1	Variável aleatória	25
2.4.1.2	Função e Distribuição de Probabilidade.....	26
2.4.1.3	Processos estocásticos	27
2.4.2	Detecção de mudança	28
2.4.2.1	Fluxograma de detecção.....	29
2.4.2.2	Medição da distância.....	32
2.4.2.3	Regras de Parada ou Alarme	33
2.4.2.4	Exemplos de algoritmos de detecção	34
2.4.2.5	Algoritmos Baseados em Janela Móvel	36
2.5	MONITORAÇÃO EM PROCESSOS DE SOLDAGEM	38
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	39
3.1	SENSOR INFRAVERMELHO.....	40

3.2	MONTAGEM DA MESA LINEAR	42
3.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO DA TENSÃO DO ARCO DE SOLDAGEM.....	44
3.4	MEDIÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM	46
3.5	PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	46
3.6	PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE	47
3.7	METODOLOGIA.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	CURVA ESTÁTICA DO ARCO	54
4.2	CARACTERÍSTICAS DO SINAL INFRAVERMELHO.....	61
4.3	DETECÇÃO DE MUDANÇAS NO SINAL INFRAVERMELHO	66
4.3.1	Avaliação Visual do Sinal Infravermelho	67
4.3.2	Localização de Defeitos utilizando Algoritmos de Detecção de Mudança ...	68
4.3.2.1	Algoritmos <i>CUSUM-LS</i> , <i>RLS</i> , Kalman e Mahalanobis	70
4.3.2.2	Detecção de Mudança Baseada em Janela Móvel e de dois Modelos ...	79
4.4	MONITORAMENTO E ANÁLISE ON-LINE.....	86
5	CONCLUSÕES	90
6	TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
	APÊNDICES.....	99
	APÊNDICE A – PROGRAMA DO MICROCONTROLADOR QUE CONTROLA O MOTOR	100
	APÊNDICE B – PROTOCOLO DE CONTROLE DO MOTOR DE PASSO DA MESA LINEAR.....	105
	APÊNDICE C – FIGURAS DAS EXPERIÊNCIAS	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação de processos de soldagem por tipo de fonte (Modenesi, 2003).....	8
Tabela 3.1 Configurações da placa de aquisição utilizada.	39
Tabela 3.2 Dados técnicos do sensor infravermelho (Calex, 2006).	40
Tabela 3.3 Condições de soldagem.	46
Tabela 4.1. Imagens infravermelhas do arco TIG para dois comprimentos do arco diferentes.	59
Tabela 4.2 Relação entre o sinal infravermelho e a penetração da solda para diferentes correntes.....	64
Tabela 4.3 Teste de normalidade do sinal infravermelho.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação dos processos de soldagem (Modificado J. Norrish, 1992).	7
Figura 2.2 Fluxo de calor no ambiente da solda (Modenesi, 2007).	8
Figura 2.3 Região do arco no processo TIG (Modenesi, Marques, 2000).	10
Figura 2.4 Característica estática do arco (Parmar, 1997).	10
Figura 2.5 Relação entre tensão e comprimento do arco (Modenesi, 2007).	11
Figura 2.6 Equipamentos básicos para soldagem TIG (Miller, 2006).	11
Figura 2.7 Relação entre a tensão dor arco e a largura do cordão de solda (Modenesi, 2007).	14
Figura 2.8 Espectro eletromagnético (amperesautomation, 2008).	18
Figura 2.9 Radiação de Corpo Negro (Wikipedia, 2008).	21
Figura 2.10 Intensidade em função da temperatura para dois comprimentos de onda.	22
Figura 2.11 Esquema de um termômetro de radiação (Modificado Infratemp, 2008).	23
Figura 2.12 – Esquema de formação de uma variável aleatória para o exemplo mostrado. 25	
Figura 2.13 - Exemplos de distribuição normal	27
Figura 2.14 Exemplos de processos estocásticos segundo diferentes distribuições (modificado Manolakis <i>et al</i> , 2005).	28
Figura 2.15 – Fluxograma da detecção de mudança (modificado Gustafsson, 2000).	30
Figura 2.16 – Detalhe da regra de parada(modificado Gustafsson, 2000).	30
Figura 2.17 – Proposta de diferentes modelos para a janela móvel (Gustafsson, 2000).	36
Figura 3.1 Foco para o sistema ótico IS (Calex, 2006).	40
Figura 3.2 Diagrama esquemático do conversor de corrente/tensão (ABB, 2007).	41
Figura 3.3 Diagrama montagem da mesa linear.	42
Figura 3.4 Placa de condicionamento de sinal de tensão do arco de soldagem.	44
Figura 3.5 Esquemático da placa de condicionamento de sinal de tensão da soldagem.	45
Figura 3.6 Diagrama de Experimento Básico.	47
Figura 3.7 Janelas de ajuste dos parâmetros de soldagem. A) Janela de Corrente e tempo de soldagem. B) Janela de ajuste dos parâmetros do motor.	48
Figura 3.8 Janela de leitura de dados.	49
Figura 3.9 Diagrama para os algoritmos de 1 modelo. Literatura	51
Figura 3.10 Diagrama para algoritmo de 2 modelos com janela móvel. Literatura	52
Figura 3.11 Diagrama para os algoritmos de 1 modelo. Propostos	52

Figura 3.12 Diagrama para os algoritmos de 2 modelos. Propostos	53
Figura 4.1 Esquemático da experiência da curva característica estática do arco medindo a temperatura.	55
Figura 4.2 Curva estática do arco.	55
Figura 4.3. Gráfico da radiação infravermelha em função da corrente para um comprimento do arco de 5 mm.	56
Figura 4.4. Curva de intensidade infravermelha versus corrente para diversos comprimentos do arco.	57
Figura 4.5. Imagem infravermelha do Arco TIG.	58
Figura 4.6. Histograma das porções do arco captadas pelo sensor infravermelho para correntes de 160 A. a) Porção a 3 mm. b) Porção a 7 mm.	60
Figura 4.7. Dados a corrente constante.....	62
Figura 4.8 Experiência feita com corrente constante.	63
Figura 4.9 Comportamento da temperatura com variações na corrente.	64
Figura 4.10 Gráfico comparativo entre a penetração e o sinal infravermelho lido.	65
Figura 4.11 Experiência com presença de graxa.	67
Figura 4.12 Experiência com inclusões metálicas.....	68
Figura 4.13 Resultado do algoritmo <i>CUSUM-LS</i> , experiência 1.	71
Figura 4.14 Resultado do algoritmo <i>CUSUM-LS</i> , experiência 2.	71
Figura 4.15 Resultado do algoritmo <i>CUSUM-RLS</i> , experiência 1.....	72
Figura 4.16 Resultado do algoritmo <i>CUSUM-RLS</i> , experiência 2.....	73
Figura 4.17 Filtro Kalman com teste estatístico <i>CUSUM</i> , experiência 1.....	74
Figura 4.18 Filtro Kalman com teste estatístico <i>CUSUM</i> , experiência 2.....	74
Figura 4.19 Comparação dos estimadores na experiência 1.....	75
Figura 4.20 Detecção de defeitos com algoritmos <i>CUSUM-LS</i> , <i>RLS</i> e Kalman para o sinal de tensão na experiência 1.....	76
Figura 4.21 Detecção de defeitos com algoritmos <i>CUSUM-LS</i> , <i>RLS</i> e Kalman para o sinal de tensão na experiência 2.....	76
Figura 4.22 Filtro Kalman com distância de Mahalanobis, experiência 1.	78
Figura 4.23 Filtro Kalman com distância de Mahalanobis, experiência 2.	78
Figura 4.24 Algoritmo Brandt's GLR, experiência 1.....	79
Figura 4.25 Algoritmo Brandt's GLR, experiência 2.....	80
Figura 4.26 Filtros Kalman e teste GLR, experiência 1.	81
Figura 4.27 Filtros Kalman e teste GLR, experiência 2.	82

Figura 4.28 Algoritmo com 2 modelos Kalman e distância de Mahalanobis, Experiência 1.	83
Figura 4.29 Algoritmo com 2 modelos Kalman e distância de Mahalanobis, Experiência 2.	83
Figura 4.30 Controle de qualidade em tempo real.....	87
Figura 4.31 Janela do programa de simulação <i>on-line</i>	88
Figura 4.32 Teste estatístico dos resíduos para a análise <i>on-line</i>	88

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

Soldagem:

GTAW	- Gas Tungsten Arc Welding (Solda a eletro de tungstênio com proteção a gás)
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 Gás</i> (Solda a eletrodo de Tungstênio)
v_e	- Velocidade de soldagem (mm/s)
n	-Eficiência térmica do processo.
V	- Tensão no Arco (V)
ZTA	- Zona Termicamente Afetada

Infravermelho:

f	-Frequência da radiação eletromagnética (Hz)
c	- Velocidade da Luz (m/s)
λ_c	-Comprimento de onda(m)
h_c	-Constante de Planck ($m^2 \text{ kg s}^{-1}$)
E	-Energia da radiação (Watt)
T	-Temperatura Absoluta (K)
k	-Constante de Boltzmann ($m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

Detecção de mudança:

<i>CUSUM</i>	- <i>CUmulative SUM</i> (Somas Cumulativas)
$f(x)$	- Função de x
$F(x)$	- Função de distribuição de x

F_{t-1}	- Matriz de transição
f_{dp}	- 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
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

O avanço da tecnologia caminha no sentido da aprimoração de produtos, redução de custos, exigência de qualidade e desempenho. Projetos cada vez mais sofisticados exigem processos de fabricação que cumpram requisitos com características de repetibilidade, precisão e eficiência, sendo a soldagem um dos processos mais usados. Diferentes pesquisas buscam a otimização nas aplicações dos diferentes processos de soldagem, no controle e modelagem, na escolha do tipo de processo visando preferencialmente a redução de custos.

A utilização de testes não destrutivos e a reparação de defeitos são processos demorados, sendo que, a identificação e eliminação de defeitos relacionados à soldagem representam 10% dos custos totais. A implementação de técnicas de monitoramento e controle aos processos de soldagem pode favorecer a detecção e redução de muitos defeitos antes da solidificação do metal fundido, reduzindo o tempo de fabricação e os custos de produção.

O presente trabalho faz parte de um projeto sendo desenvolvido no *Grupo de Automação e Controle* (GRACO) da Universidade de Brasília. Este projeto propõe a integração de diferentes tipos de sensores que permitam monitorar e controlar algumas variáveis de interesse durante a soldagem. Os sensores usados nas pesquisas atualmente são:

- *Corrente e Tensão*: Monitoramento convencional dos diferentes processos de soldagem.
- *Visão*: Usa uma câmera CCD de alta velocidade para monitorar o processo GMAW.
- *Som*: Usa um decibelímetro para monitorar o processo GMAW.
- *Espectrometria*: Utiliza um espectrômetro para monitorar o processo GTAW.
- *Infravermelho*: Pesquisa estudada na presente dissertação.

Ainda que diversas pesquisas tenham estudado diferentes características para distintos processos de soldagem usando radiação infravermelha, novas possibilidades surgem com o avanço na tecnologia, assim como das novas técnicas de análise de informação.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

São muitos os fatores que podem afetar o formato final da solda, porém, o monitoramento das variações de diversas variáveis ajuda no entendimento da formação do cordão de solda nos diferentes processos de soldagem. O monitoramento da temperatura no processo de soldagem GTAW é uma variável importante de estudo, pois a soldagem por arco elétrico é um processo de natureza térmica. Os Métodos para a medição de temperatura podem-se classificar em dois grupos: métodos de contato e não-contato. Os métodos de contato podem ser usados para a medição da temperatura da chapa, usando-a entre outras aplicações na simulação numérica da distribuição de temperatura em 3D, mas o monitoramento direto da temperatura da poça de soldagem não pode ser utilizado devido às altas temperaturas. Já os métodos de não-contato utilizando câmeras infravermelhas são relatados em diversas pesquisas. Os sensores infravermelhos de ponto, que na realidade medem a radiação de uma pequena área, são mais compactos, fáceis de usar e o tratamento do sinal precisa de menos recursos computacionais.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é projetar e desenvolver um sistema de monitoramento infravermelho da poça-arco no processo GTAW, com a finalidade da detecção e localização de defeitos apresentados durante o processo de soldagem.

Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Estudar, projetar e construir um sistema de aquisição de sinais para a corrente, tensão e a radiação infravermelha.
- Desenvolver um software para a aquisição dos sinais que permita gravar os dados para uma posterior análise.
- Estudar, projetar e desenvolver um software para a análise de dados visando à detecção e localização de mudanças no sinal infravermelho usando tratamento estocástico.

- Comparar os resultados obtidos a partir do monitoramento infravermelho com as informações dadas pelo monitoramento da corrente e a tensão.
- Descrever a viabilidade da técnica desenvolvida para a implementação da aquisição, análise e detecção de mudança *on-line*.

JUSTIFICATIVA

Existem duas linhas de pesquisa que podem ser desenvolvidas a partir deste trabalho. A primeira está relacionada com o controle da máquina de solda usando sensoriamento infravermelho da poça-arco. A segunda está relacionada com a inspeção de discontinuidades a partir do monitoramento infravermelho.

Como foi mencionado anteriormente, o presente trabalho faz parte de um projeto que almeja criar uma metodologia que permita a fusão sensorial para monitorar e controlar distintos processos de soldagem. Diversos sensores estão medindo partes diferentes do ambiente, ou diferentes aspectos do fenômeno em questão. Isto permite uma visão mais completa do fenômeno que está sendo investigado. A informação obtida com esse tipo de fusão pode abranger uma área de cobertura maior do que a coletada com um único sensor ou agregar vários aspectos do mesmo fenômeno que são então usados para uma captação mais completa do fenômeno investigado.

Sendo a soldagem por arco elétrico um processo em que se transfere calor, se espera que o monitoramento das variações na radiação infravermelha da poça-arco atinja, em parte, a descrição da qualidade do processo.

Outra justificativa do presente trabalho encontra-se na área de inspeção de discontinuidades. A possibilidade de se implantar um sistema não-destrutivo de monitoração de defeitos de soldagem *on-line* com a localização das regiões com maior probabilidade de apresentar defeitos após o processo é uma idéia que pode diminuir os custos nos processos de fabricação que usam a soldagem. Novos sensores infravermelhos podem ser mais sensíveis a variações no comportamento do arco elétrico, que poderiam comprometer a junta no momento da sua aplicação final.

CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho realizou uma contribuição ao projeto desenvolvido na Universidade de Brasília especificamente no GRACO. Utilizaram-se algoritmos para a detecção e localização de descontinuidades no sinal infravermelho. Esses métodos de pesquisa são usados em outras áreas e no monitoramento de variáveis críticas em processos industriais. Visando a detecção de defeitos, observou-se que o sensoriamento infravermelho utilizado ofereceu informações que permitiram uma detecção mais apurada com relação à obtida com o monitoramento convencional, sendo uma boa escolha para o monitoramento da soldagem GTAW. Utilizando a metodologia de detecção de anomalias, foram propostos novos algoritmos para a detecção e localização de defeitos a partir dos encontrados na literatura. Um dos algoritmos propostos conseguiu detectar com maior eficiência os defeitos em comparação aos encontrados na literatura. A partir dos algoritmos desenvolvidos no presente trabalho, o monitoramento da soldagem e a detecção de defeitos *on-line* serão possíveis de serem implementados em *hardware* devido ao seu baixo custo computacional para o processamento da informação.

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta a fundamentação necessária para o desenvolvimento deste trabalho abordando três temas principais. O primeiro tema trata-se da soldagem, especialmente da soldagem GTAW e algumas considerações das variáveis envolvidas, assim como o equipamento a ser utilizado. O segundo trata da radiação infravermelha e enfoca-se a medição da temperatura por radiação mostrando as diferentes técnicas para medi-la. O último tema mostra como o processo de soldagem pode ser encarado como um processo estocástico e, apresenta os modelos matemáticos de detecção de mudança para a análise dos dados.

O capítulo 3 apresenta a metodologia usada para a elaboração do presente trabalho e descreve as diferentes partes implementadas para a aquisição dos dados.

O capítulo 4 mostra os resultados e as discussões obtidas no trabalho. Primeiro se examinam os dados obtidos a partir do monitoramento infravermelho, destacando a informação que não são oferecidos no monitoramento convencional. Finalmente são usadas as técnicas de detecção de mudança.

Por último apresentam-se as conclusões obtidas a partir do trabalho, e também são apresentados os trabalhos futuros para a continuidade da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica dos temas envolvidos no presente trabalho. Inicialmente é introduzido um breve histórico da soldagem, enfatizando na soldagem TIG, algumas das variáveis de influência na soldagem como a corrente, velocidade de soldagem. Também são apresentados brevemente o comportamento térmico na soldagem e o relacionamento entre as variáveis de influência com a temperatura da soldagem.

Mostra-se que a medição da temperatura oferece valiosa informação da qualidade do cordão de solda. Isso é descrito na seguinte subsecção onde se apresentam os princípios do sensoriamento da temperatura por radiação, enfocando o estudo na radiação infravermelha e o relacionamento da mesma com a temperatura dos corpos. Finalmente é apresentada a revisão dos algoritmos para a análise dos dados junto ao modelo de identificação de defeitos usando filtragem estocástica.

2.1 SOLDAGEM

A soldagem é um processo de união de materiais utilizado 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 (Welding Handbook, 8th edition, 1991).

De acordo com os conceitos de Norrish (1992) e Villani *et al* (2005), os processos de soldagem se classificam em processos por pressão e por fusão (Figura 2.1). O primeiro grupo consiste na aplicação de pressões elevadas que deformam a superfície dos metais, permitindo que a distância média entre as superfícies a serem unidas seja reduzida conseguindo com que as forças interatômicas pudessem agir, formando ligações permanentes. (Marques, 1991). O aquecimento das peças a serem unidas pode ser usado para facilitar a deformação dos metais.

O segundo modo consiste na fusão localizada das peças, na região de união e do metal de adição, se for usado, produzindo a ligação destas na solidificação do metal fundido com o seu resfriamento (Marques, 1991).

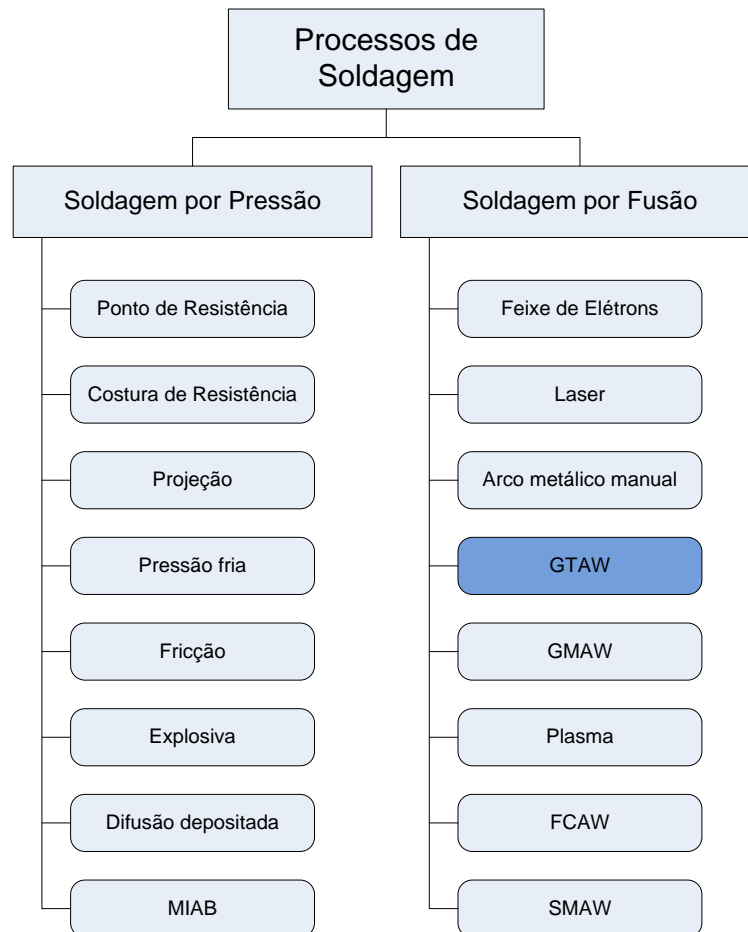


Figura 2.1 Classificação dos processos de soldagem (Modificado J. Norrish, 1992).

Dentre os processos de soldagem por pressão se incluem os processos de soldagem por fricção, por ultra-som e por resistência elétrica. Entretanto, todos estes processos são de aplicação mais ou menos restrita e usados em condições particulares.

A soldagem por fusão inclui a maioria dos processos mais versáteis empregados atualmente, e são usadas subclassificações para facilitar o estudo destes processos.

Outra classificação agrupa os processos de soldagem pelo tipo de fonte de energia usada para produzir a fusão e união das peças. A tabela 2.1 mostra essa classificação dos processos de soldagem.

Por esse critério, a soldagem TIG faz parte daqueles que utilizam o arco elétrico como fonte de energia. O tópico seguinte aborda com maior profundidade as características da solda com arco elétrico.

Tabela 2.1 Classificação de processos de soldagem por tipo de fonte (Modenesi, 2003).

Tipo de Fonte		
Arco – elet. não consumível	Arco – elet. consumível	Resistência
Soldagem a gás com eletrodo de tungstênio (GTAW ou TIG)	Soldagem a gás com eletrodo metálico (GMAW ou MIG/MAG)	Soldagem a ponto (RSW)
Soldagem a plasma (PAW)	Soldagem com eletrodos revestidos (SMAW)	Soldagem de costura (RSEW)
Soldagem com eletrodo de carvão (CAW)	Soldagem com arame tubular (FCAW)	Soldagem de projeção (RPW)
Soldagem de prisioneiros (SW)	Soldagem ao arco submerso (SAW)	Soldagem por centelhamento (FW)
Soldagem com hidrogênio atômico (AHW)	Soldagem eletro-gás (EGW)	Soldagem de topo (UW)
Soldagem com arco magneticamente impelido (MIAB)		Soldagem por percussão (PEW)
		Soldagem/Brasagem por indução (HFRW/IB)
		Soldagem por eletroescória (ESW)

2.1.1 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 de essas 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, 2007). Uma representação genérica da solda a arco se apresenta na Figura 2.2.

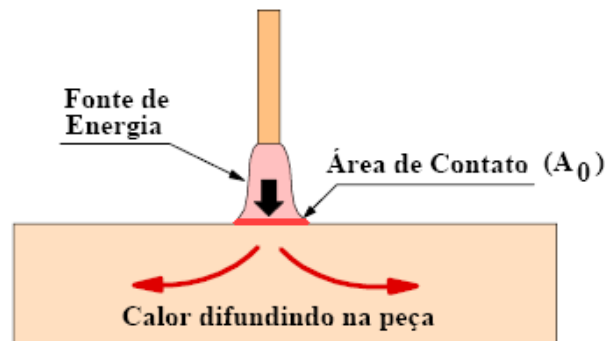


Figura 2.2 Fluxo de calor no ambiente da solda (Modenesi, 2007).

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 cordão da solda, menor o calor recebido. À região vizinha do ponto de solda dá-se o nome de ZTA (Zona Termicamente Afetada). Ela é de suma importância, pois sofre vários ciclos térmicos e se em alguns casos não for tratada termicamente pode comprometer estruturalmente a peça quando em serviço.

A fusão localizada pode ser prejudicada pelo alto processo de transferência de calor na peça, caso o metal base seja de alta condutividade térmica. Isso faz com que se exija maior energia na soldagem. Metais como o cobre apresentam essa característica. O fornecimento de energia tem de ser tal a garantir a fusão localizada.

2.1.2 Processo de Soldagem TIG (GTAW)

A soldagem a arco com eletrodo não consumível de tungstênio e proteção gasosa (Gas Tungsten Arc Welding) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão dessas, através de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir. A proteção da poça de fusão e do arco contra a contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás ou mistura de gases inertes que geralmente são Argônio e/ou Hélio (Marques, 1991).

A adição de metal de enchimento pode ou não ser feita. A Figura 2.3 ilustra o processo, que também é conhecido pela sigla em inglês, TIG (Tungsten Inert Gas):

Existe uma relação tensão-corrente (curva característica) para o arco TIG (eletrodo negativo) Figura 2.4. A curva característica apresenta uma queda de tensão com a corrente até um valor mínimo entre 50 e 200 A, acima a qual a tensão cresce com a corrente. A posição e formato da curva dependem do tamanho, geometria, material e temperatura do cátodo e ânodo; da composição e pressão do gás de proteção e do comprimento do arco (Modenesi, 2007).

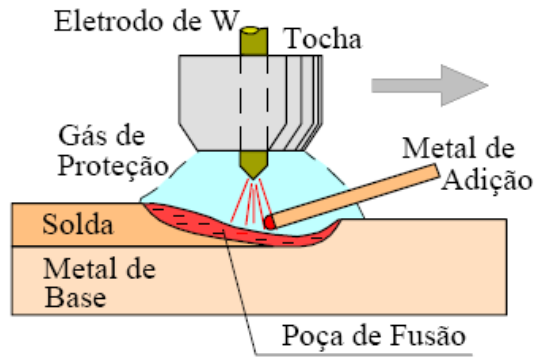


Figura 2.3 Região do arco no processo TIG (Modenesi, Marques, 2000).

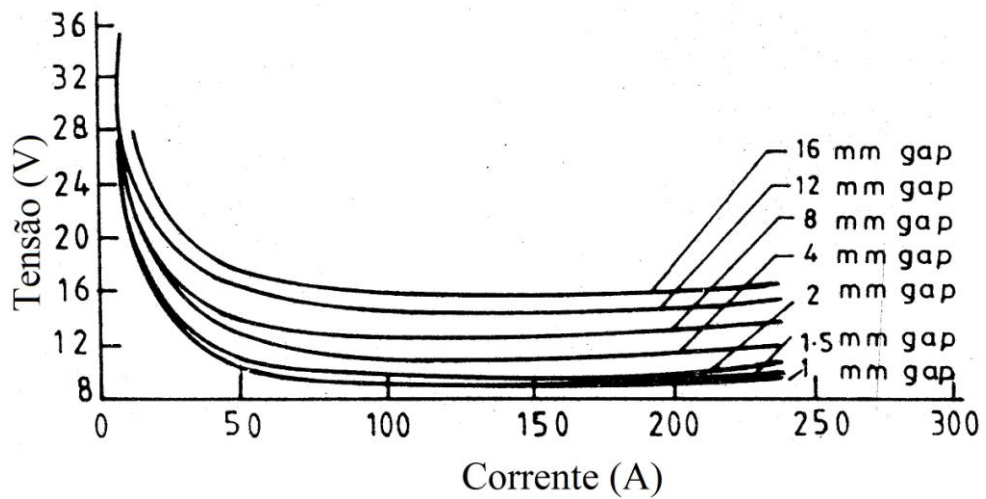


Figura 2.4 Característica estática do arco (Parmar, 1997).

Um aumento no comprimento do arco tende a aumentar a tensão para qualquer valor de corrente. Nestas condições, a relação entre o comprimento do arco e a tensão, para uma dada corrente, é aproximadamente linear (Figura 2.5).

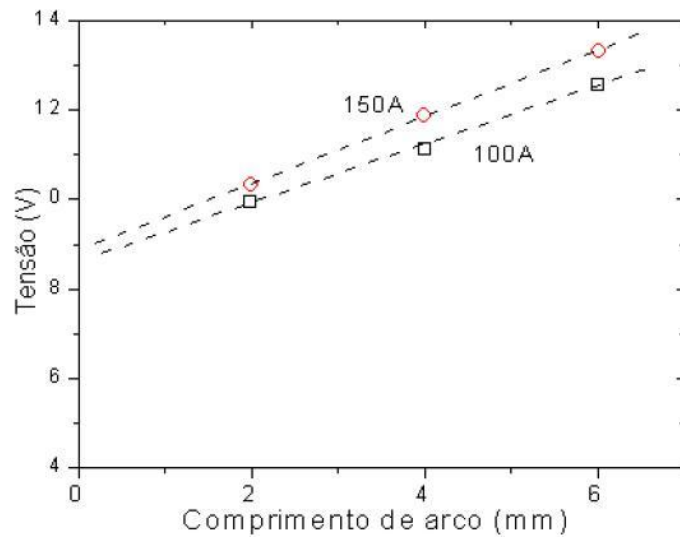


Figura 2.5 Relação entre tensão e comprimento do arco (Modenesi, 2007).

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

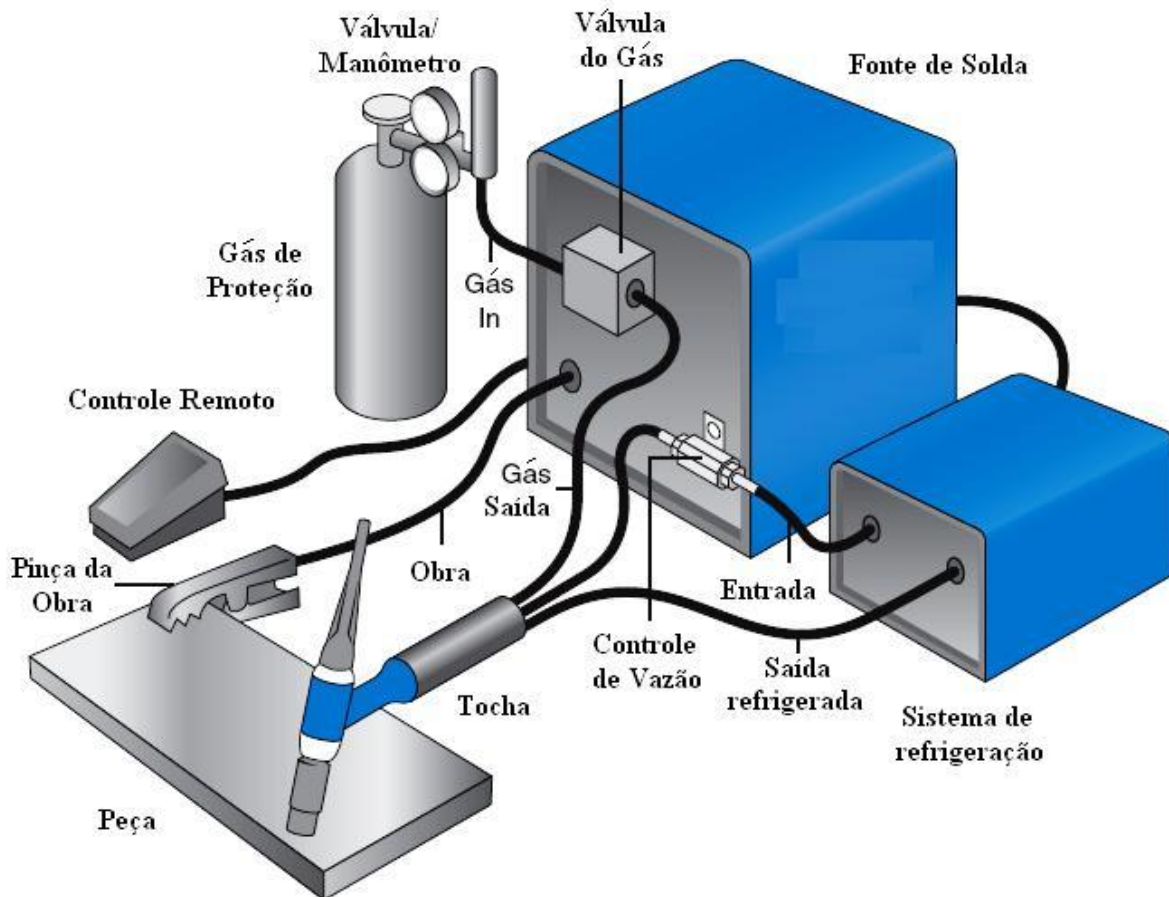


Figura 2.6 Equipamentos básicos para soldagem TIG (Miller, 2006).

Consiste numa fonte de energia que pode ser de corrente alternada ou contínua. O uso do tipo de corrente depende do tipo de material a soldar-se. Também há uma tocha que contém o eletrodo não consumível (Tungstênio), fonte de gás de proteção junto com uma válvula reguladora de vazão, um sistema de refrigeração que pode ser a água ou gás. A maioria das fontes de soldagem incorpora um sistema de ignição de alta frequência junto com um pedal que aciona ou desliga o fornecimento de energia e do gás de proteção.

A grande vantagem do processo GTAW é a variedade de materiais que se podem soldar comparadas com outros processos de soldagem. Pode-se soldar a maioria dos aços, ligas de níquel como o Monel[®] e o Inconel[®], Titânio, Alumínio, Magnésio, Cobre, Latão, Bronze e, inclusive, ouro. Esse processo pode também soldar materiais diferentes como cobre e latão (Welding Handbook, 8th edition, 1991).

2.1.2.1 Variáveis de Influência na Soldagem

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

Muitos são os fatores que afetam o formato final do cordão, as condições gerais de operação e características da solda. Algumas variáveis mostram uma inter-relação e devem ser tratadas de maneira conjunta. Um exemplo do relacionamento é dado pela velocidade de soldagem e a corrente, ambas determinam a penetração do cordão. Se for escolhida uma velocidade muito alta, pode-se não atingir a penetração requerida, sendo necessário o aumento da corrente. E se temos uma velocidade baixa e trabalhamos com chapas finas, o processo de soldagem pode se converter em corte. Uma adequada escolha nos parâmetros da soldagem pode alcançar as características desejáveis e uma maior produtividade no processo de soldagem.

Segundo Modenesi, 2007, algumas das principais variáveis da soldagem são:

- Nível de corrente

- Tipo de corrente (corrente contínua com o eletrodo positivo, CC+, corrente contínua com o eletrodo negativo, CC-, e corrente alternada, CA)
- Tensão de operação (ou de soldagem)
- Comprimento do arco
- Velocidade de deslocamento
- Diâmetro do eletrodo
- Ângulo da tocha, ou eletrodo, em relação à peça
- Tipo de gás de proteção

A seleção das variáveis de soldagem para uma dada aplicação depende de inúmeros fatores, entre eles:

- ✓ Disponibilidade de equipamentos e materiais
- ✓ Considerações geométricas (espessura do componente, desenho da junta, posição de soldagem, etc)
- ✓ Metalúrgicas (tipo de material de base e sua sensibilidade ao ciclo térmico e às deformações associadas ao processo de soldagem)
- ✓ Econômicas (produtividade)
- ✓ Reduzir a chance de formação de descontinuidades (mordeduras, inclusões de escória, falta de fusão, etc) no cordão de solda

Assim, devido ao elevado número de variáveis envolvidas e à inter-relação entre elas, o estabelecimento das condições ótimas de soldagem para uma dada aplicação não é, em geral, fácil, podendo existir diferentes soluções. Frequentemente, as condições de soldagem são selecionadas de uma forma empírica, com base em experiência prática, e, às vezes, auxiliada com testes prévios.

Quando se observa o processo de soldagem, este parece de simples execução. Mas esconde a quantidade de variáveis que influenciam a solda. Nos parágrafos seguintes se detalhara os parâmetros mais importantes e como eles contribuem para o resultado final da solda.

a) *Corrente e Tensão*

Na solda TIG a variável que talvez tenha maior influência é a corrente. Há uma forte interação entre corrente e tensão. Para determinados valores de corrente existe uma relação

proporcional com a tensão. A corrente está mais ligada à penetração da solda (Modenesi, 2001). Para um comprimento do arco fixo, 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, Datta, 2002). A corrente pode ser alternada ou contínua. A corrente contínua é mais utilizada na polarização direta. Nesta condição, 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.

A tensão apresenta uma fraca relação com a penetração, pois variações desta causam maiores efeitos na coluna do arco cujo calor gerado é transmitido principalmente na direção radial. Porém a tensão apresenta uma forte relação com a distância entre eletrodo e a peça (*stand-off*). 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 o *stand-off*, mais largo o cordão será, pois maior será a área do arco projetada na peça a ser soldada. A Figura 2.7 demonstra essa relação:

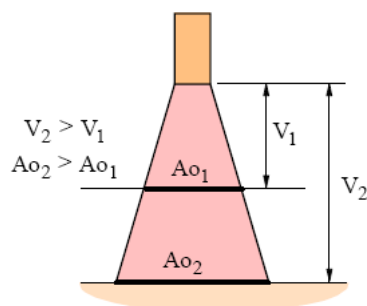


Figura 2.7 Relação entre a tensão dor arco e a largura do cordão de solda (Modenesi, 2007).

b) Gás de proteção

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).

c) *Eletrodo*

Os eletrodos de tungstênio usados no GTAW são usualmente dopados com uma pequena quantidade de tório ou cério de forma a melhorar a ignição do arco pela redução da função trabalho do tungstênio e pela melhora de suas características emissoras.

O ângulo de apontamento do eletrodo também influencia no perfil da solda. Mais informações podem ser encontradas no Handbook de TIG do fabricante Miller (2006).

2.2 O CALOR NA SOLDAGEM

Independentemente da sua origem, a energia utilizada para a soldagem provoca alterações nos metais base e na solda. Um fluxo térmico é estabelecido para fundir e também no resfriamento da peça e, sob a ótica desta tecnologia, o mesmo exerce profunda influência sobre pelo menos os seguintes aspectos da junta soldada (Machado, 2000):

- Macroestrutura de solidificação do metal de solda.
- Transformações microestruturais.
- Propriedades mecânico/metalúrgicas.
- Descontinuidades.
- Tensões residuais.
- Deformações.

O transiente térmico estabelecido pelo gradiente de temperatura elevado causa uma expansão não uniforme, o que desenvolve esforços capazes de gerar falhas na peça soldada. As dimensões da zona termicamente afetada – ZTA - podem ser reduzidas se o calor gerado pelo arco de soldagem for aplicado de forma muito rápida, diminuindo a possibilidade prejuízo das propriedades mecânicas do metal de base (Welding Handbook, 3th edition, 1951).

Durante um processo de soldagem, as elevadas temperaturas produzidas pelo arco e as propriedades termodinâmicas, como a difusividade térmica, causam enormes gradientes de temperatura que acontecem na vizinhança da poça de fusão. Convecções na poça de fusão,

a forma da poça e a transferência de calor no metal sólido e líquido determinam a distribuição de temperatura na chapa e na superfície. Para uma solda ideal com condições estáveis, essas temperaturas superficiais poderiam apresentar padrões repetíveis e regulares. As perturbações na penetração da solda poderiam ser claramente identificáveis nas variações da distribuição da temperatura superficial (Nagarajan e Chin, 1989).

2.2.1 O Aporte de Calor na Soldagem

A transferência do calor para o metal de base através do contorno da poça de fusão é um elemento importante, determinando a distribuição da temperatura resultante. Durante a soldagem, são produzidas modificações metalúrgicas no metal fundido e no metal de base que contorna a poça de fusão. Isso provoca mudanças significativas em várias propriedades físicas, tais como capacidade térmica, coeficiente de condução de calor, temperatura e calor de fusão, além de um aumento volumétrico na região da solda. As modificações nas propriedades do material e na geometria do metal de base com a introdução da solda devem ser compensadas através do controle da quantidade de calor fornecida durante a soldagem (Welding Handbook, 3th edition, 1951).

O fluxo de calor na soldagem pode ser dividido, de maneira simplificada, em duas etapas básicas: fornecimento de calor à junta e dissipação deste calor pela peça.

Na primeira etapa, para a soldagem a arco, pode-se considerar o arco como a única fonte de calor, definido por sua energia de soldagem, isto é:

$$E = \frac{n.V.i}{ve} \quad (2.1)$$

Onde:

E : Energia de soldagem (J/mm).

n : Eficiência térmica do processo.

V : Tensão no Arco (V).

i : Corrente de soldagem (A).

ve : Velocidade de soldagem (mm/s).

Na segunda etapa, a dissipação do calor ocorre principalmente por condução na peça das regiões aquecidas para o restante do material. A evolução de temperatura em diferentes

pontos, devido à soldagem, pode ser estimada teórica ou experimentalmente (Parmar, 1997).

Sendo a soldagem um processo em que se transfere calor, é intuitivo que a medição da temperatura atinja, em parte, a descrição da qualidade do processo. Para conseguir medir a temperatura na soldagem é necessário um sensor que não gere interferência durante processo de solda, além de suportar as elevadas temperaturas que se apresentam. Para isto, a melhor escolha é um sensor que não precise do contato direto com o material a se medir. De acordo com o exposto, descreve-se em seguida uma técnica para a medição de temperatura.

2.3 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR RADIAÇÃO

A temperatura é uma medida do nível de calor contido num corpo. O *calor* é a energia cinética dos elementos básicos da qual a matéria é composta, moléculas, átomos e partículas subatômicas. Dessa forma, pode-se definir a temperatura como o nível de agitação dessas partículas. Quanto maior a agitação, maior energia contida, maior calor e conseqüentemente a temperatura (Vanzetti, 1972).

A maioria dos métodos para a medição de temperatura requer que o “termômetro” esteja em contato físico com o corpo no qual se quer medir a temperatura. Os sensores de temperatura normalmente estão projetados para assumir a mesma temperatura do corpo a ser medido. Isso significa que o termômetro deve ser capaz de resistir à temperatura, que no caso de corpos de elevada temperatura representa problemas, uma vez que poderia induzir a destruição do sensor (Doebelin, 2004).

Para se medir temperatura quando o contato físico com o meio é impossível ou impraticável, faz-se uso da pirometria óptica ou de radiação térmica. Para um melhor entendimento da radiação térmica será feita uma breve introdução sobre a física envolvida.

2.3.1 Espectro Eletromagnético

A Figura 2.8 exibe a distribuição do espectro eletromagnético. Pode-se ver uma pequena região entre as microondas e a luz visível, que é chamada de *Infravermelho*. Também são mostradas na mesma figura duas escalas que são a chave para a classificação da radiação eletromagnética, a *Frequência* e o *Comprimento de Onda*. A energia da radiação eletromagnética está relacionada com a frequência da radiação ou o comprimento de onda. Essas relações são mostradas na equação 2.2:

$$f = \frac{c}{\lambda_c} \quad (2.2)$$
$$E = h_c f$$

Onde f é a frequência, c a velocidade da luz, λ_c o comprimento de onda, E a energia, h_c a constante de Planck.

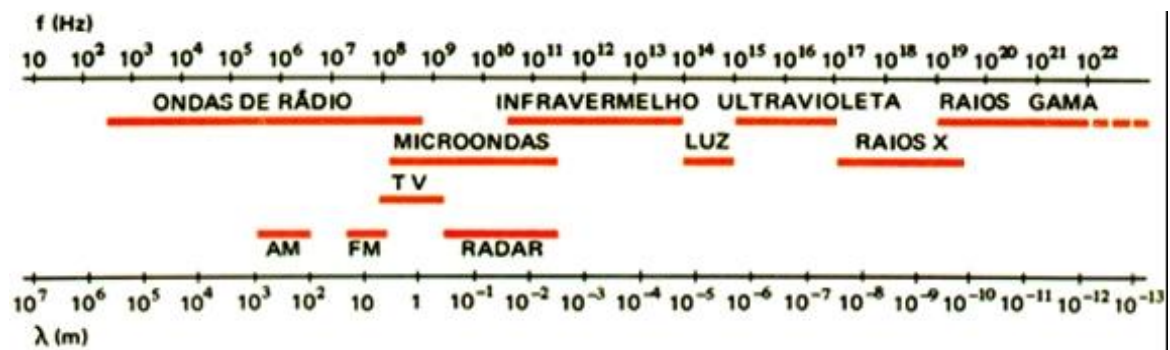


Figura 2.8 Espectro eletromagnético (ampresautomation, 2008).

Todas as radiações são diferentes na forma de como são geradas, como por exemplo, devido a geradores eletrônicos (ondas de radio, AM, FM, entre outras), e também pelas diversas formas de transição nuclear e decaimentos de partículas subatômicas que se apresentam a elevadas frequências. A radiação infravermelha é produzida por movimentos rotacionais e vibracionais das partículas atômicas e subatômicas do qual o material se compõe (Vanzetti, 1972).

Os sensores de temperatura por radiação operam com radiações eletromagnéticas entre o visível e parte do espectro infravermelho. O comprimento de onda do espectro visível é bastante estreito: 0,3 a 0,72 μm .

O pirômetro óptico utiliza a faixa do espectro visível para a medição da temperatura. É um dispositivo reconhecido internacionalmente para medir temperaturas acima de 1064,43 °C. É usado para estabelecer a Escala Internacional Prática de Temperatura acima de 1064,43 °C (Doebelin, 2004).

O pirômetro óptico mede a intensidade de energia radiante emitida numa faixa estreita do comprimento de onda do espectro visível. A intensidade da luz no espectro visível emitida por um objeto quente varia rapidamente com sua temperatura. Assim, com uma pequena variação da temperatura há uma variação muito maior na luminosidade, o que fornece um meio natural para a determinação de temperaturas com boa precisão (Doebelin, 2004).

O pirômetro óptico é um instrumento com o qual a luminosidade desconhecida de um objeto é medida comparando-a com a luminosidade conhecida de uma fonte padrão. Os pirômetros utilizam dois métodos para comparação:

- Variando a intensidade da luz emitida por uma lâmpada padrão (corrente que passa através do filamento) até atingir o mesmo brilho da fonte.
- Variando a luminosidade aparente do corpo quente através de dispositivos ópticos enquanto uma corrente constante atravessa o filamento da lâmpada padrão que permanece com brilho constante.

A comparação do brilho entre a fonte a ser medida e o filamento da lâmpada é feita por um observador, o que faz com que essa medida dependa, portanto, da sensibilidade do olho humano às diferenças no brilho entre duas fontes da mesma cor.

Ao considerar-se uma aplicação com pirômetros ópticos deve-se levar em conta o seguinte:

- Os limites normais de utilização estão entre 750 °C e 2850 °C. Com filtros de absorção especiais, pode-se estender sua calibração até 5500 °C.
- As medidas efetuadas com pirômetros ópticos são independentes da distância entre a fonte e o aparelho, além de que são providos de um conjunto de lentes que aproxima o objeto a ser medido.
- Em uso industrial, consegue-se uma precisão de até $\pm 2\%$.

- Devido à medida de temperatura ser baseada na emissividade da luz (brilho), erros significativos podem ser criados devido à reflexão de luz ambiente pela fonte a ser medida.
- O meio entre o objeto a se medir e o sensor pode apresentar partículas em suspensão, causando assim uma diminuição da intensidade da luz proveniente da fonte, diminuindo a precisão da medição.

Descreveu-se um método para a medição da temperatura utilizando pirometria óptica. A seguir, será detalhada a radiação infravermelha e seu uso na medição da temperatura.

2.3.2 O Infravermelho

Sempre que as partículas atômicas e subatômicas estiverem em movimento, a radiação infravermelha será emitida pela matéria (Vanzetti, 1972).

O espectro infravermelho geralmente é definido na faixa de 0,72 a 1000 μm . Os tipos de sensores que usam a radiação eletromagnética para medir a temperatura utilizam unicamente a parcela entre 0,3 e 40 μm .

Todo corpo que estiver acima do zero absoluto emite radiação dependendo da sua temperatura. O emissor térmico ideal é chamado de *corpo negro*. O gráfico da intensidade de radiação emitida em função do comprimento de onda para diferentes temperaturas para um corpo negro se apresenta na Figura 2.9 e corresponde à lei de Planck (Equação (2.3)). Nota-se que a intensidade de radiação diminui com o decremento da temperatura para todos os comprimentos de onda.

$$E(\lambda_c, T) = \frac{8\pi h_c c}{\lambda_c^5} \left(\frac{1}{e^{h_c c / \lambda_c k T} - 1} \right) \quad (2.3)$$

Em que:

E : Energia radiante W/m^2

h : Constante de Planck $6,626 \text{ E}(-34) \text{ J/s}$

T : Temperatura absoluta (K)

c : Velocidade da luz

k : Constante de Boltzmann

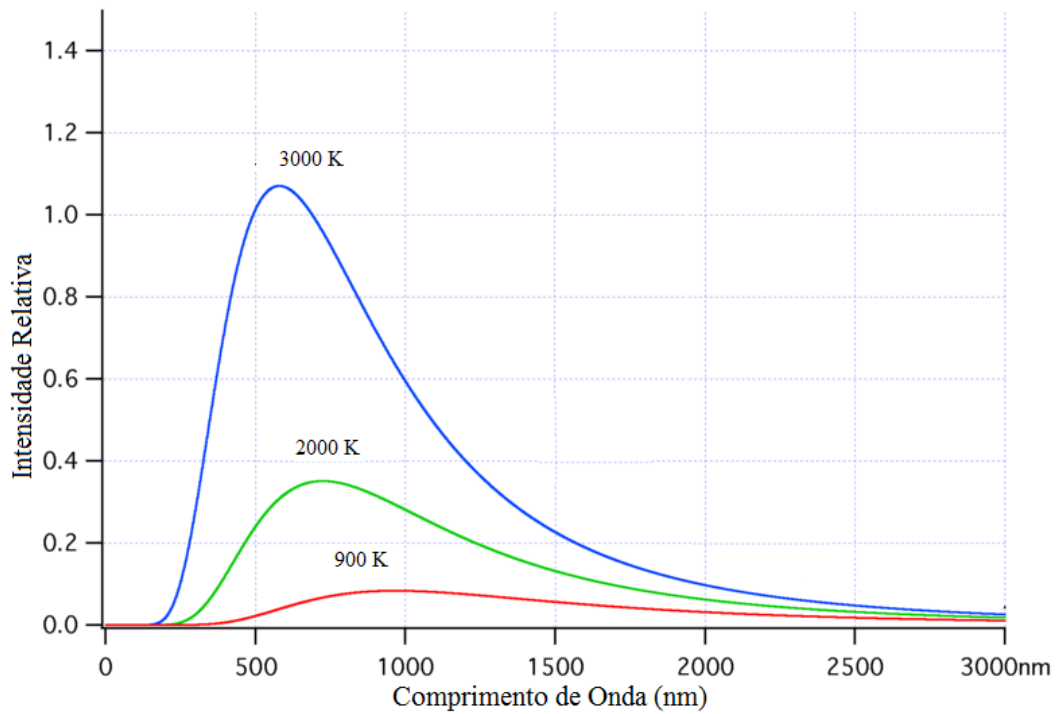


Figura 2.9 Radiação de Corpo Negro (Wikipedia, 2008).

Observa-se também nas curvas de 3000 e 2000 K que a diferença das intensidades relativas é maior para comprimentos de onda pequenos, como 1 μm , do que em comprimentos maiores, como 3 μm . Isso significa que numa dada temperatura, a radiação varia muito mais para pequenos comprimentos de onda; fazendo mais sensíveis aqueles instrumentos que possam operar em tais faixas de comprimento de onda.

Na Figura 2.10 é apresentada uma curva da intensidade relativa em função da temperatura calculada a partir da Equação (2.3) utilizando dois comprimentos de onda. Nessa figura observa-se que à medida que a temperatura aumenta, a intensidade do comprimento da onda de 1,1 μm aumenta em maior proporção ao da 0,8 μm . Essa diferença nos comprimentos leva a diversas aplicações para a medição de temperatura a partir do sinal infravermelho.

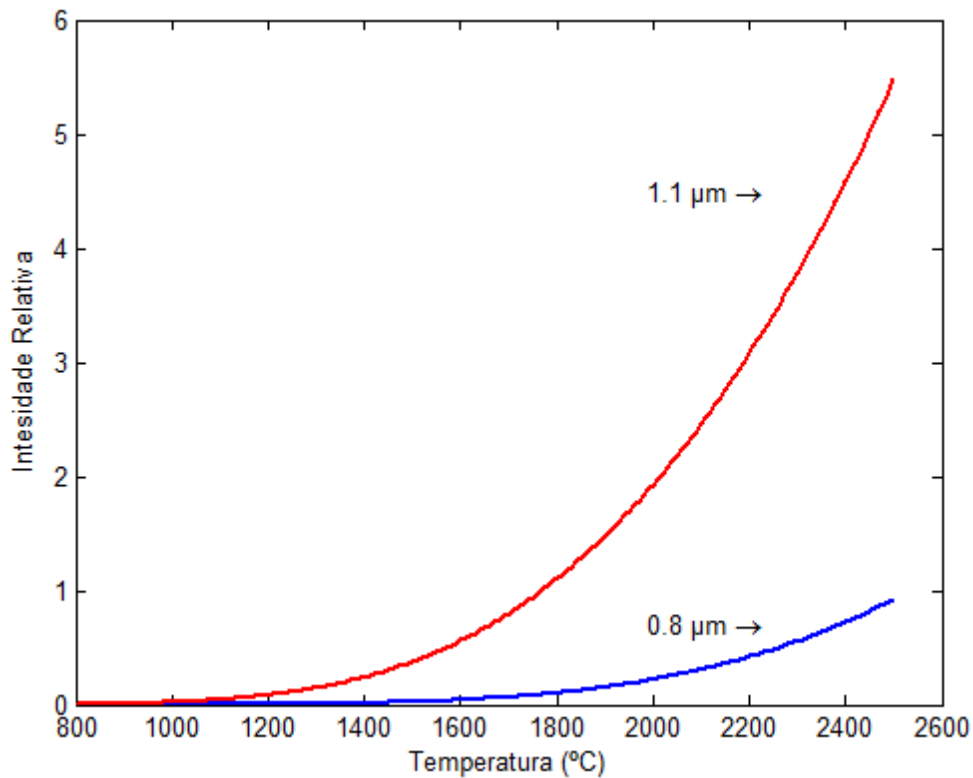


Figura 2.10 Intensidade em função da temperatura para dois comprimentos de onda.

2.3.2.1 Detectores de Radiação: Térmicos e de Fótons

Em todos os pirômetros de radiação, a radiação proveniente do corpo a ser medido é focaliza em algum tipo de detector de radiação o qual produz um sinal elétrico em resposta ao fluxo de radiação entrante. Os detectores podem ser feitos de elementos simples ou em matrizes. Um elemento simples pode ser usado para medir a temperatura puntual (na verdade é na média de uma pequena área) ou com uma componente de um instrumento de varredura de imagens.

Uma classe de detector térmico com muitas propriedades diferentes é o piroelétrico, útil na faixa espectral entre 0,001 a 1000 μm. Mesmo que não sejam amplamente empregados para a medição da temperatura, eles têm aplicações em sensores de fogo, sensores de presença, análise de gás e diagnóstico de lasers. Mais detalhes pode ser vistos em Doebelin, (2004), assim como o circuito elétrico para a medição da temperatura a partir de um piroelétrico.

Os detectores de fótons (também chamados de detectores quânticos) são geralmente baseados em materiais semicondutores. Esses materiais apresentam um *gap* de energia. Alguns elétrons encontram-se na camada de valência e outros na camada de condução, mas nenhum se encontra entre as duas camadas. Para gerar um sinal elétrico, alguns elétrons devem estar na camada de condução. Quando o material é exposto a um fluxo de fótons (energia radiante), alguns deles podem ter a energia suficiente para que elétrons da camada de valência “pulem” para a camada de condução, criando um sinal elétrico. Os fótons levam uma energia E (elétron-volt, eV), que está relacionada com o comprimento de onda λ (μm) pela fórmula $E=1,24/\lambda$. Dessa forma, um fóton com comprimento de onda de $5,6 \mu\text{m}$ tem uma energia de $0,22 \text{ eV}$. Fótons de comprimento de onda maiores têm menos energia. Para que um elétron passe da camada de valência à camada de condução, o fóton deve ter uma energia maior do que o *gap* de energia do material.

O Antimoneto de Índio (InSb) tem um *gap* de energia de $0,22 \text{ eV}$. Assim, o material não é sensível a comprimentos de onda maiores que $5,6 \mu\text{m}$, seu *comprimento de onda de corte*. Fótons com maiores comprimentos de onda passam sem ser detectados.

2.3.2.2 Termômetro de Radiação

O esquema de um termômetro de radiação é apresentado na Figura 2.11.

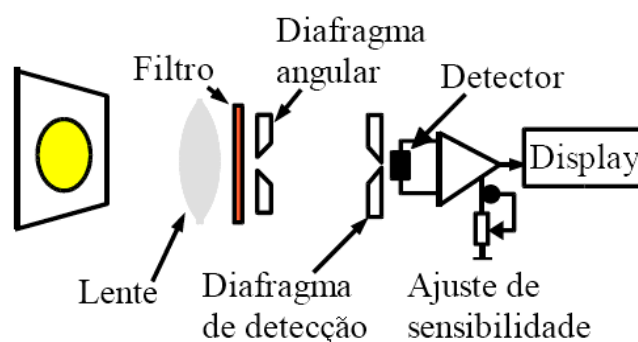


Figura 2.11 Esquema de um termômetro de radiação (Modificado Infratemp, 2008).

A princípio, a radiação que provem do objeto de interesse é filtrada para seleccionar o comprimento da onda de interesse para depois ser medida por meio de um detector conectado ao sistema de processamento de sinais. O diafragma angular define o campo de inspeção e de detecção o ângulo de medição.

O arranjo óptico permite que a energia irradiada pelo objeto seja focada no detector. As lentes são similares às empregadas na fotografia. O objeto deve ocupar o campo de visão minimizando a entrada de radiação lateral de fundo. Finalmente, como foi mencionado na sessão anterior, o detector converte a radiação infravermelha num sinal elétrico, proporcional à temperatura.

Os radiômetros são em geral portáteis, mas podem ser empregados também no controle de processos a partir de montagens mecânicas fixas ou móveis.

Graças à utilização de microprocessadores, os resultados das medições podem ser armazenados para o cálculo de temperaturas e seleção de valores.

Os termômetros de radiação são usados industrialmente em situações nas quais:

- As temperaturas estão acima da faixa de operação prática dos termopares.
- A atmosfera do processo for prejudicial aos pares termoelétricos, causando medidas falsas ou pouca durabilidade do termopar.
- No interior de fornalhas a vácuo ou pressão, onde os sensores de temperatura danificam o produto.
- O objeto cuja temperatura se vai medir está em movimento.
- Em locais onde os termopares não podem ser instalados, por causa de vibrações, choques mecânicos ou impossibilidade de montagem.

2.4 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS E DETECÇÃO DE MUDANÇA

A complexidade e a dificuldade de descrever fielmente os fenômenos físicos levam os engenheiros e físicos a estabelecerem modelos matemáticos que descrevam tais fenômenos, com uma fidelidade que depende do resultado a que se deseja chegar. Esses modelos podem ser inseridos em duas classes, os modelos determinísticos e os modelos estocásticos. No modelo determinístico é considerado que não existem incertezas, ou se existirem, elas afetam em pequena escala o comportamento do sistema, fazendo-as desprezíveis durante o modelamento matemático ou simplesmente considerando aproximações que algumas vezes são grosseiras. Existem, no entanto, casos em que a

utilização do modelo determinístico é inadequada, porque o fenômeno físico de interesse envolve muitos fatores desconhecidos. Nesses casos, pode-se utilizar um modelo estocástico para descrever tal fenômeno, onde o foco está na probabilidade da ocorrência de determinados valores.

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

2.4.1 Conceitos básicos

A base dos processos estocásticos se encontra nos conceitos de probabilidade e variável aleatória, ou de maneira abreviada v.a.

2.4.1.1 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 o resultado cara será denominado por “C” e coroa por “K”. Um exemplo de função seria quantas vezes aparece o resultado cara. Desse modo, obtém-se o seguinte esquema (Figura 2.12):

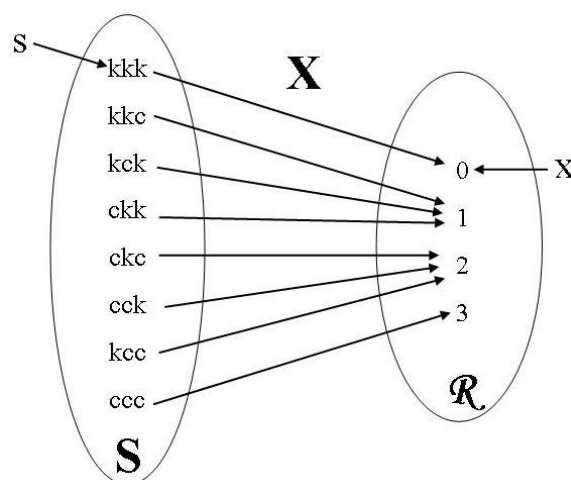


Figura 2.12 – Esquema de formação de uma variável aleatória para o exemplo mostrado.

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.

2.4.1.2 Função e Distribuição de Probabilidade

Para o caso discreto, a função densidade de probabilidade, f_{dp} , 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 f_{dp} 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 dada por uma tabela, um diagrama ou fórmulas matemáticas. A função de distribuição normalmente é grafada por $F(x)$. 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).

A 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 2.13 ilustra alguns exemplos de curvas com a variação desses parâmetros.

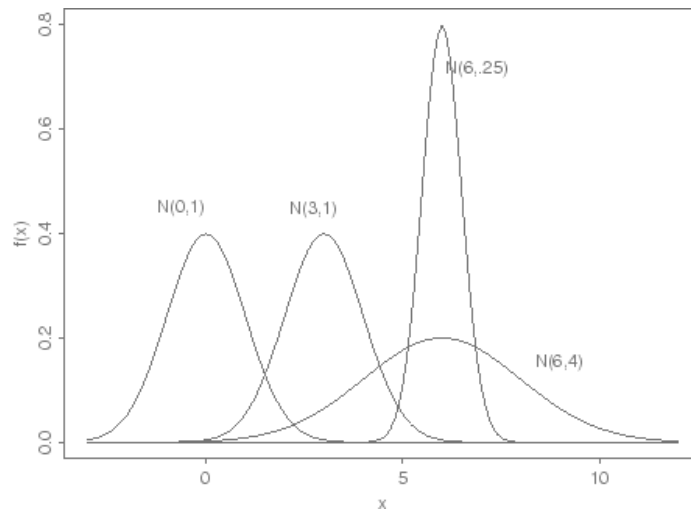


Figura 2.13 - Exemplos de distribuição normal

Essa curva é dada pela fórmula:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.4)$$

A vantagem dessa distribuição é a facilidade tanto para a sua definição quanto para operações matemáticas entre distribuições.

Vários 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.

2.4.1.3 Processos estocásticos

Finalmente 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. A Figura 2.14 mostra possíveis distribuições de uma v.a.

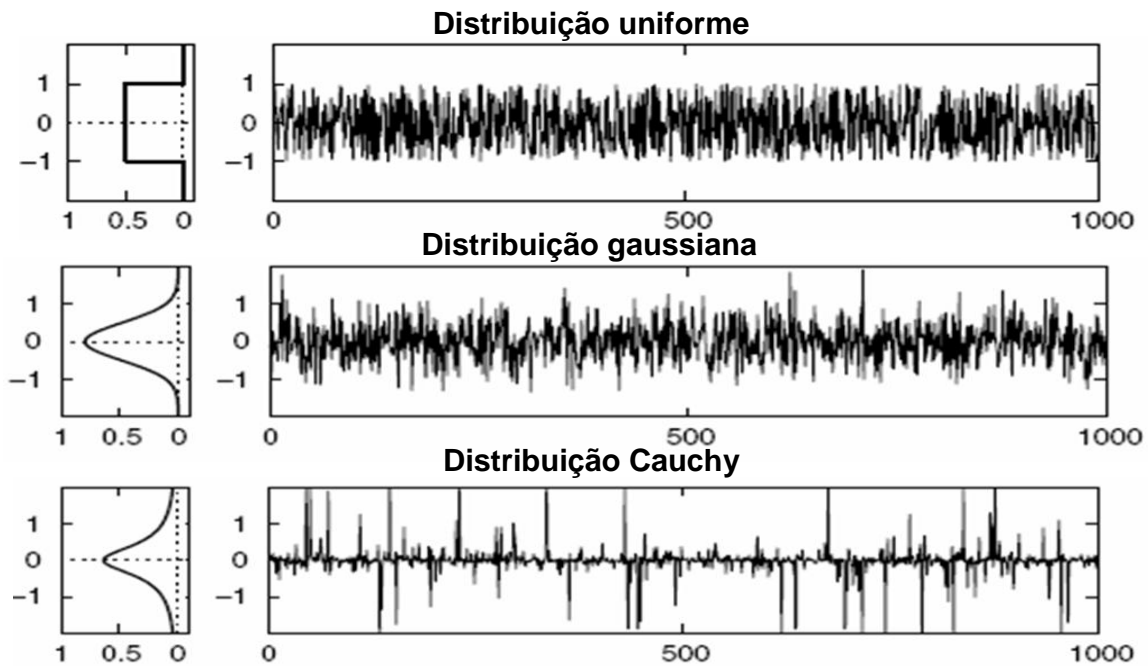


Figura 2.14 Exemplos de processos estocásticos segundo diferentes distribuições (modificado Manolakis *et al*, 2005).

2.4.2 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 para a detecção de mudanças (Basseville & Benveniste, 1983; Appel & Brandt, 1983; Benveniste *et al*, 1987; Basseville & Nikiforov, 1993; Gustafsson, 2000; Tartakovsky & Kim, 2006). Também podem ser encontradas algumas aplicações dos algoritmos de detecção de mudança (Paxson, 1999; Melo *et al*, 2006; Tartakovsky *et al*, 2006).

Inicialmente, é necessário considerar um modelo para a aplicação das técnicas de detecção de mudança. 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 (modificado Jazwinski, 1970):

$$\theta_{t+1} = F_{t+1}\theta_t + w_t \quad (2.5)$$

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:

$$E\{w_n w_t^T\} = \begin{cases} Q_t & \text{para } n = t \\ 0 & \text{para } n \neq t \end{cases} \quad (2.6)$$

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

A equação de medição tem o seguinte modelo:

$$y_t = H_t \theta_t + v_t \quad (2.7)$$

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:

$$E\{v_n v_t^T\} = \begin{cases} R_t & \text{para } n = t \\ 0 & \text{para } n \neq t \end{cases} \quad (2.8)$$

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

É 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.

2.4.2.1 Fluxograma de detecção

O algoritmo de detecção de mudança é dividido em etapas. O fluxo dos dados e operações podem ser visualizados no seguinte fluxograma:

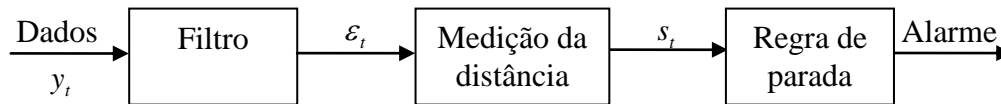


Figura 2.15 – Fluxograma da detecção de mudança (modificado Gustafsson, 2000).

Sendo que o processo da regra de parada consiste em:

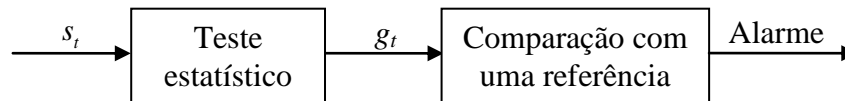


Figura 2.16 – Detalhe da regra de parada(modificado Gustafsson, 2000).

Os dados lidos (y) passarão por um filtro. Esse contém o modelo proposto para estimar θ . 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 uma possível mudança. Cada etapa desse processo será explicada a seguir.

Há uma propriedade dos filtros que serve de base para a detecção de mudança, a geração de resíduos. Sob certas condições do modelo, os filtros fazem a estimação do sinal e os transformam numa 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 modelo 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 maiores. O ponto central é estabelecer qual maior é esse valor para se assumir que houve uma mudança.

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

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

Ele é dividido em duas etapas: predição e correção (Melo *et al*, 2006).

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

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

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

E na correção são calculados os demais fatores:

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

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

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

- Mínimos Quadrados Recursivo (Recursive Least Squares – RLS)

É um caso particular do Filtro de Kalman. O cálculo dos fatores é dado abaixo (Gustafsson, 2000):

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t &= \lambda \hat{\theta}_{t-1} + (1 - \lambda) \cdot y_t \\ \hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + (1 - \lambda) \cdot \varepsilon_t \\ \text{onde } \varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \end{aligned} \tag{2.9}$$

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

- Mínima Média Quadrática

Também caso particular do KF. É o mesmo que o Mínimos Quadrados, apenas um fator muda de nome. A estimação é dada por (Gustafsson, 2000):

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + \mu \cdot \varepsilon_t \\ \text{onde } \varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \end{aligned} \tag{2.10}$$

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 em vez de analisá-los individualmente. Há um algoritmo de Mínimos Quadrados com essa ferramenta (Gustafsson, 2000). Essa janela funciona como fator de esquecimento.

$$\hat{\theta}_t = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=t-L+1}^t y_i = \hat{\theta}_{t-1} + \frac{y_t - y_{t-L}}{L} \quad (2.11)$$

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 foi 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.

2.4.2.2 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 à do casamento probabilístico de padrões, da teoria de reconhecimento de padrões (Duda *et al*, 2004). A partir do modelo conhecem-se certas características da mostra que possuem distribuição gaussiana. 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, resultando uma mostra que cumpre com as características do modelo.

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:

$$s_t = \varepsilon_t = y_t - \hat{\theta}_{t-1} \quad (2.12)$$

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:

$$s_t = \varepsilon_t^2 \quad (2.13)$$

Outra possibilidade é a distância de Mahalanobis, dada por:

$$s_t = \frac{\varepsilon_t^2}{\sigma^2} \quad (2.14)$$

2.4.2.3 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.

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 no sinal infravermelho quando 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 as seguintes (Gustafsson, 2000):

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

$$\text{se } g_t > h: g_t = 0 \text{ e } t = ta \quad (2.15)$$

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. Para evitar que o teste acuse alarmes falsos quando vários testes estatísticos consecutivos apresentam um valor positivo, o termo ν subtrai ao teste para cada iteração. Para sinais negativos, que poderiam 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 seguinte forma (Gustafsson, 2000):

$$g_t = (1 - \lambda) \cdot g_{t-1} + \lambda \cdot s_t$$

$$\text{se } g_t > h: t = ta \quad (2.16)$$

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

2.4.2.4 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*. 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:

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_t &= \frac{1}{t-t_0} \cdot \sum_{k=t_0+1}^t y_k \\
\varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \\
s_t^{(1)} &= \varepsilon_t \\
s_t^{(2)} &= -\varepsilon_t \\
g_t^{(1)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(1)} + s_t^{(1)} - v, 0) \\
g_t^{(2)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(2)} + s_t^{(2)} - v, 0)
\end{aligned}
\quad \text{se } g_t^{(1)} > h \text{ ou } g_t^{(2)} > h \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme: } t = t_a \\ g_t^{(1)} = g_t^{(2)} = 0 \\ t_0 = t \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Há a versão recursiva contemplada pelo fator de esquecimento, é o *CUSUM RLS Filter*. Tem-se a seguinte configuração:

$$\begin{aligned}
\hat{\theta}_t &= \lambda \cdot \hat{\theta}_{t-1} + (1-\lambda)y_t \\
\varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \\
s_t^{(1)} &= \varepsilon_t \\
s_t^{(2)} &= -\varepsilon_t \\
g_t^{(1)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(1)} + s_t^{(1)} - v, 0) \\
g_t^{(2)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(2)} + s_t^{(2)} - v, 0)
\end{aligned}
\quad \text{se } g_t^{(1)} > h \text{ ou } g_t^{(2)} > h \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme: } t = t_a \\ g_t^{(1)} = g_t^{(2)} = 0 \\ \hat{\theta}_t = y_t \end{array} \right. \quad (2.18)$$

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 esquecida toda informação passada.

Podem-se criar novos algoritmos usando os diferentes estimadores ou regras de paradas. Pode-se por exemplo utilizar o Filtro de Kalman e detecção de mudança por Somas Cumulativas, como proposto a seguir:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_t &= y_t - \hat{\theta}_{t-1} \\
K_t &= \frac{P_{t-1}}{P_{t-1} + R} \\
\hat{\theta}_t &= \hat{\theta}_{t-1} + K_t \cdot \varepsilon_t \\
P_t &= (1 - K_t) \cdot P_{t-1} + Q
\end{aligned}
\quad \begin{aligned}
s_t^{(1)} &= \varepsilon_t \\
s_t^{(2)} &= -\varepsilon_t \\
g_t^{(1)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(1)} + s_t^{(1)} - v, 0) \\
g_t^{(2)} &= \text{máximo}(g_{t-1}^{(2)} + s_t^{(2)} - v, 0)
\end{aligned}
\quad \text{se } g_t^{(1)} > h \text{ ou } g_t^{(2)} > h \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme: } t = t_a \\ g_t^{(1)} = g_t^{(2)} = 0 \end{array} \right. \quad (2.19)$$

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

2.4.2.5 Algoritmos Baseados em Janela Móvel

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

Os modelos utilizados são um lento e um rápido. A Figura 2.17 mostra duas propostas para modelos de janela móvel.

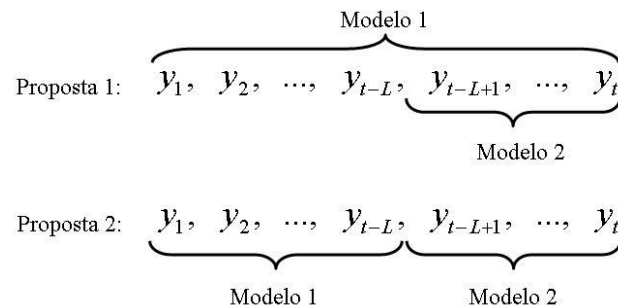


Figura 2.17 – Proposta de diferentes modelos para a janela móvel (Gustafsson, 2000).

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 *on-line*. 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 abaixo (Melo *et al*, 2006):

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t^{(1)} &= \frac{1}{t-L} \cdot \sum_{k=1}^{t-L} y_k & \hat{\theta}_t^{(2)} &= \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=t-L+1}^t y_k & s_t &= \frac{|\hat{\theta}_t^{(1)} - \hat{\theta}_t^{(2)}|}{\sqrt{P_t^{(1)} + P_t^{(2)}}} \\ P_t^{(1)} &= \frac{R}{t-L} & P_t^{(2)} &= \frac{R}{L} & \text{se } s_t &> h, \text{ alarme: } t = t_a \end{aligned} \quad (2.20)$$

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 em 1983. É denominado *Brandt's GLR*, o que seria a Razão de Similhança Generalizada de Brandt (*Brandt's Generalized Likelihood Ratio*).

Seu cálculo é visualizado abaixo (Appel, Brandt, 1983):

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_t^{(1)} &= \frac{1}{t-t_0} \cdot \sum_{k=t_0+1}^t y_k & \hat{R}_t^{(1)} &= \frac{1}{t-t_0} \cdot \sum_{k=t_0+1}^t (y_k - \hat{\theta}_t^{(1)})^2 \\ \hat{\theta}_t^{(2)} &= \frac{1}{t-L} \cdot \sum_{k=L+1}^t y_k & \hat{R}_t^{(2)} &= \frac{1}{t-L} \cdot \sum_{k=L+1}^t (y_k - \hat{\theta}_t^{(2)})^2 \\ \varepsilon_t^{(1)} &= y_t - \hat{\theta}_{t-1}^{(1)} & s_t &= \log \left(\frac{\hat{R}_t^{(1)}}{\hat{R}_t^{(2)}} \right) + \frac{(\varepsilon_t^{(1)})^2}{\hat{R}_t^{(1)}} - \frac{(\varepsilon_t^{(2)})^2}{\hat{R}_t^{(2)}} \\ \varepsilon_t^{(2)} &= y_t - \hat{\theta}_{t-1}^{(2)} & & \\ g_t &= g_{t-1} + s_t & \text{se } g_t &> h \left\{ \begin{array}{l} \text{alarme: } t = t_a \\ g_t = 0 \\ t_0 = t \end{array} \right. \end{aligned} \quad (2.21)$$

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 da distância de Mahalanobis.

2.5 MONITORAÇÃO EM 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). 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).

Há alguns trabalhos envolvendo o espectrômetro como sensor (Vilarinho *et al.*, 2002; Alfaro *et al.*, 2005; Mirapeix *et al.*, 2007; Mendonça *et al.*, 2007) inclusive com algumas aplicações de algoritmos para detecção de defeitos (Ancona *et al.*, 2004, Bebiano *et al.*, 2007). Há trabalhos variados envolvendo mais de um sensor (Bonss *et al.*, 2004; Alfaro & Drews, 2006).

Ainda que diversas pesquisas tenham estudado diferentes características para distintos processos de soldagem usando radiação infravermelha (Nagarajan *et al.*, 1989, Nagarajan *et al.*, 1992, Govardhan *et al.*, 1995, Sanders *et al.*, 1998, Fan *et al.*, 2003, Venkatraman *et al.*, 2006), novas possibilidades surgem com o avanço na tecnologia, assim como das novas técnicas de análise de informação (Franco *et al.*, 2008 A,B).

Seguindo a proposta de alguns desses autores, foram feitas algumas montagens e experimentos para atender diferentes objetos de estudos que compõem este trabalho, como estudo do sinal obtido pelo infravermelho, 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, no seguinte capítulo serão descritos os materiais e ferramentas utilizados para a realização deste trabalho.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

Várias das ferramentas que foram utilizadas na metodologia para o levantamento das experiências foram desenvolvidas durante o mestrado. Como será detalhada a continuação, algumas das técnicas para a medição de certas variáveis físicas foram melhoradas a partir de trabalhos anteriores desenvolvidos no GRACO. Enquanto outras, que fazem parte dos objetivos, foram totalmente projetadas e desenvolvidas para o presente trabalho, como o caso da medição da radiação infravermelha.

A fonte de soldagem usada foi a INVERSAL 450. A máquina suporta diversos processos de soldagem como MIG convencional, pulsado com comando de corrente, TIG e plasma, e eletrodo revestido. A placa empregada para fazer aquisição é do modelo PCI703S-16/A. Algumas das características da placa são descritas na Tabela 3.1 (Eagle Technology, 2006).

Tabela 3.1 Configurações da placa de aquisição utilizada.

Característica	
Número de Canais Analógicos de entrada	16
Número de Canais Analógicos de Saída	2
Resolução A/D (bits) 400 kHz	14
Resolução D/A (bits) 100 kHz	14
Capacidade de gerar ondas D/A	Sim
Número de linhas I/O digitais (TTL)	8

Foram usadas as bibliotecas para aproveitar as funções que a placa de aquisição proporciona (Eagle Technology, 2006). Muitas das bibliotecas foram utilizadas para desenvolver o programa de aquisição e controle da fonte de solda.

O software de aquisição e controle foi desenvolvido no ambiente de programação LabVIEW[®], da National Instruments (National Instruments, 2006). O LabVIEW[®] proporciona uma linguagem de programação gráfica e apresenta ferramentas potentes para o uso de placas de aquisição e de análise de dados.

Nas seções seguintes serão descritas cada uma das partes que formam o sistema junto com a etapa de aquisição e partes do processo que se precisa controlar.

3.1 SENSOR INFRAVERMELHO

O sensor infravermelho usado é o TL-S-25 da Calex. Os dados técnicos se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Dados técnicos do sensor infravermelho (Calex, 2006).

Característica	Valor
Faixa de Temperatura:	800 a 2500 °C.
Faixa Espectral:	0,8 a 1,1 μm .
Tempo de Resposta:	20 ms.
Acurácia:	0,5 % do valor medido em °C + 1K.
Emissividade:	Ajustável de 5 a 100%.
Sinal de Saída:	4 a 20 mA.
Carga Máxima:	700 Ω (24 V); 400 Ω (18 V); 1000 Ω (30 V)
Fonte de Alimentação:	24 V dc \pm 25%

Os pirômetros de radiação têm um arranjo de componentes ópticos que proporcionam uma localização diferente do foco segundo a classe de lente usada. No sensor utilizado, o sistema óptico é de referência IS. Este sistema proporciona uma distância focal de 600 mm, e um diâmetro de 4 mm, como se mostra na Figura 3.1.

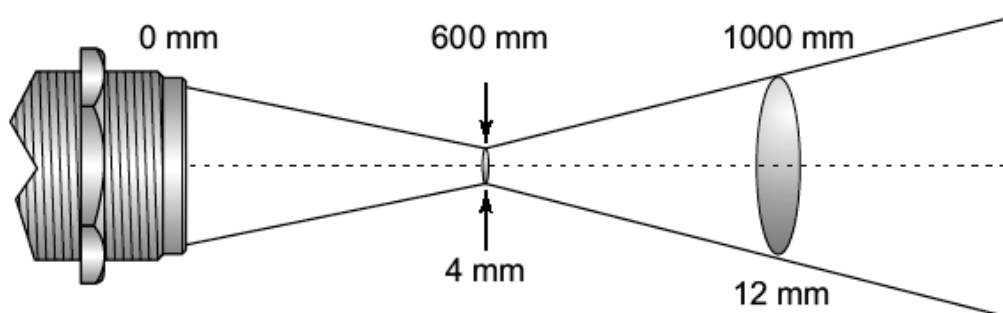


Figura 3.1 Foco para o sistema óptico IS (Calex, 2006).

Como mostrado na Tabela 3.2, o sensor fornece um sinal analógico de corrente que é proporcional à temperatura registrada. Dado que a placa usada para a aquisição do sinal não lê sinais de corrente, foi usado um conversor de sinais, de referência CC-E/STD da ABB. Ele converte o sinal de corrente em tensão. O diagrama esquemático do conversor é apresentado na Figura 3.2.

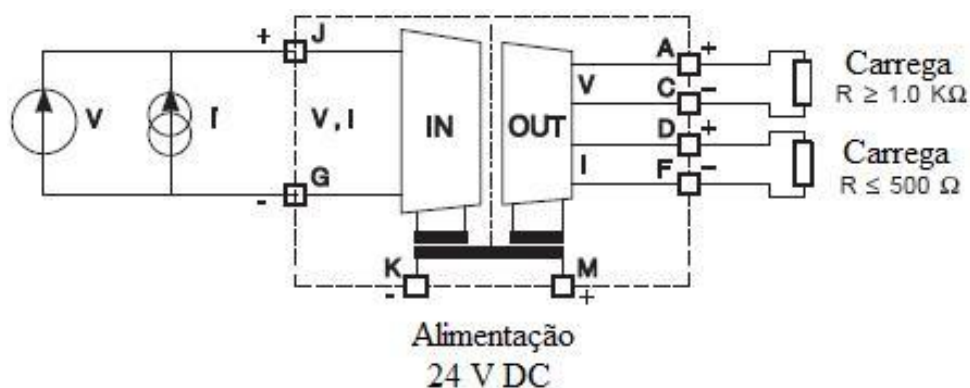


Figura 3.2 Diagrama esquemático do conversor de corrente/tensão (ABB, 2007).

O sensor infravermelho quando alimentado gera na saída uma corrente entre 4 e 20 mA proporcional à temperatura lida. Essa corrente é transformada com o uso do conversor numa tensão entre 0 a 5 V, que finalmente pode ser lida pela placa de aquisição.

Durante algumas experiências se observou que para correntes acima de 160 A, o sensor saturava, ou seja, a radiação infravermelha resultante para correntes acima de 160 A era superior à capacidade do sensor. Dado que algumas experiências a serem realizadas precisavam de correntes maiores, decidiu-se usar um filtro óptico entre o arco e o sensor. O filtro infravermelho atenua os sinais provenientes da poça-arco possibilitando maiores correntes de soldagem.

O emprego do filtro muda a função de transferência do sensor que relaciona a radiação infravermelha adquirida pelo sensor com a corrente de saída (temperatura). Dado que um dos objetivos do presente trabalho era o uso das emissões infravermelhas como parâmetro para a detecção de defeitos durante a soldagem TIG, não era de interesse o conhecimento da temperatura absoluta.

Ainda que seja mencionada erroneamente como “temperatura” o sinal proveniente do sensor infravermelho nas seguintes seções, o termo se referirá às *emissões infravermelhas* obtidas pelo sensor durante as experiências. Uma maior discussão será apresentada no capítulo de análise de dados.

3.2 MONTAGEM DA MESA LINEAR

Dado que o sensor deve estar localizado numa única posição para a aquisição da radiação infravermelha, decidiu-se fixar a tocha e movimentar a peça durante as experiências. Dessa forma, consegue-se que a posição do arco não mude durante o processo e assim são minimizadas as variáveis de influência durante a mediação.

Foi montada uma mesa linear que apresenta um movimento em uma dimensão. O eixo é acoplado a um motor de passo. A mesa utilizada em conjunto ao motor é exibida na Figura 3.3.

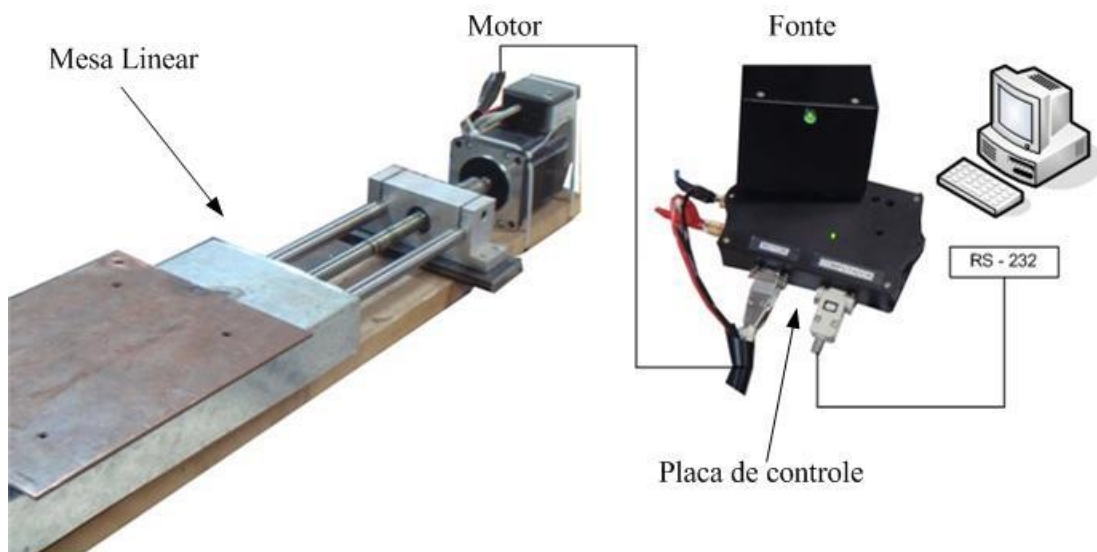


Figura 3.3 Diagrama montagem da mesa linear.

Para evitar danos à mesa linear, seja por fuga de corrente ou por aquecimento excessivo durante o processo de soldagem, foi instalada sob a placa de aço uma placa de 5 mm de Baquelite. Assim, possibilita-se o isolamento elétrico e térmico.

A mesa suporta, com segurança, uma carga de até 15 kg. O motor de passo usado na mesa é do fabricante BERGER LAHR, modelo ICIA IDS91. Para seu controle, são necessários apenas dois sinais. Um sinal quadrado, cuja frequência regula a velocidade do motor, e outro que controla a direção do motor (giro para esquerda ou direita).

Para controlar a velocidade, sentido do giro do motor e tempo do processo, foi usado um microcontrolador (PIC16C63A). Primeiro foram definidas as velocidades máximas e mínimas presentes nos tipos de soldagem trabalhados no laboratório. O sistema permite a utilização da velocidade em uma faixa de 1 a 20 mm/s, que atende as velocidades requeridas no processo TIG. A mesa linear é capaz de deslocar-se em dois sentidos. O programa implementado no microcontrolador para o controle do motor encontra-se no apêndice A.

Para controlar o motor de passo, foi desenvolvida uma placa que possui:

- ✓ Um microcontrolador trabalhando numa frequência de 4 MHz.
- ✓ Alimentação tanto do Motor como do sistema de controle.
- ✓ Dois botões para posicionar manualmente a mesa linear.
- ✓ Um botão de *reset* como parada de emergência.

A placa de controle da mesa linear foi desenvolvida para ser utilizada em conjunto com um computador, recebendo do computador comandos como sentido, velocidade de soldagem e tempo de execução ou distância (comprimento do cordão a realizar-se). A comunicação é feita via porta serial a uma taxa de 4800 bps. O microcontrolador responde confirmando a recepção dos comandos e aguarda a ordem de execução.

Mais detalhes do protocolo implementado para o controle da mesa linear estão descritos no apêndice B.

A vantagem de se utilizar a porta serial é a possibilidade de usar programas desenvolvidos em C, C++, MATLAB[®], LabVIEW[®], entre outros, ou mesmo outro microcontrolador para controlar a mesa com uma precisão adequada ao processo de soldagem TIG.

3.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DA TENSÃO DO ARCO DE SOLDAGEM

Para medir a tensão do processo de soldagem GTAW foi proposto utilizar um conjunto de placas de aquisição desenvolvido no GRACO em duas etapas: por (Granja, 2001) e (Takashi, 2003).

A primeira placa é composta por um redutor de tensão na escala 10 para 1 e um filtro passa-baixa ativo de segunda ordem para reduzir a alta frequência produzida por algumas máquinas de soldagem para manter o arco em corrente alternada. A segunda parte da placa de aquisição de tensão, Figura 3.4, possui um sistema de isolamento com o objetivo de desacoplar o circuito de soldagem do sistema de aquisição utilizando uma série de amplificadores operacionais e um amplificador isolador (ISO122).

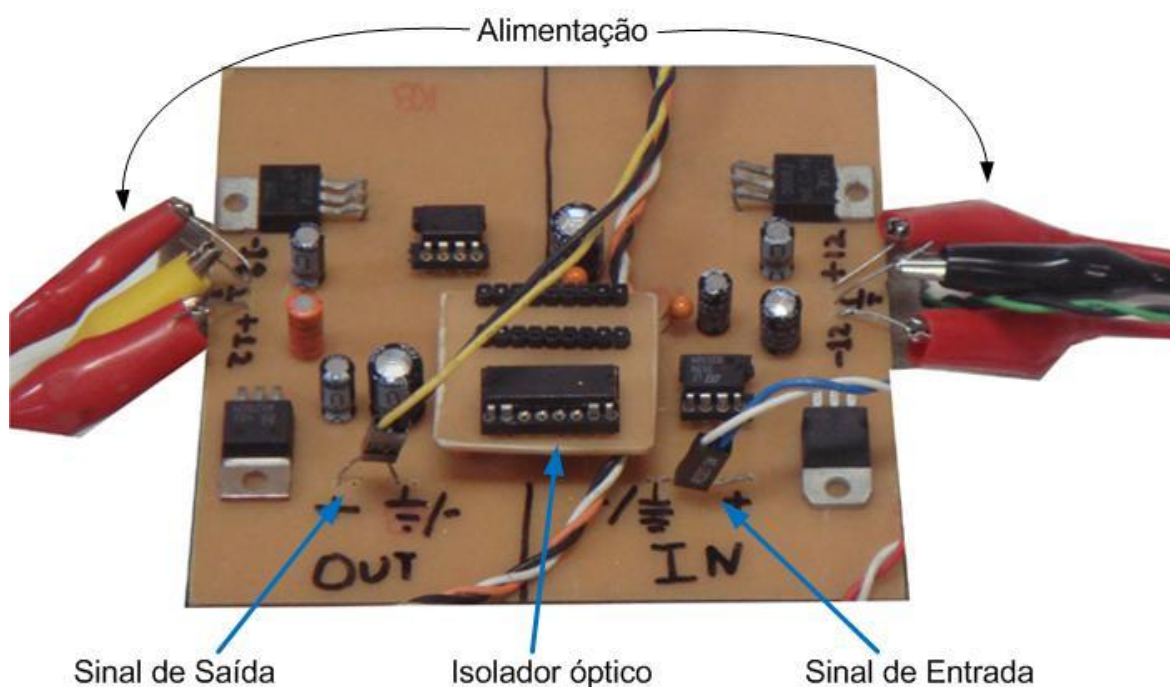


Figura 3.4 Placa de condicionamento de sinal de tensão do arco de soldagem.

O esquemático da placa de isolamento está na Figura 3.5, em que a tensão de entrada situa-se à esquerda superior e a tensão de saída à direita inferior. Note que existem somente reguladores de tensão modelo LM7808 e o simétrico LM7908 para limitar a tensão de saída do sistema a ± 8 V. Isso significa que utilizando o sistema de redução 10 V para 1 V (presente no sistema de medição original) a tensão máxima de soldagem medida pelo sistema é de ± 80 V.

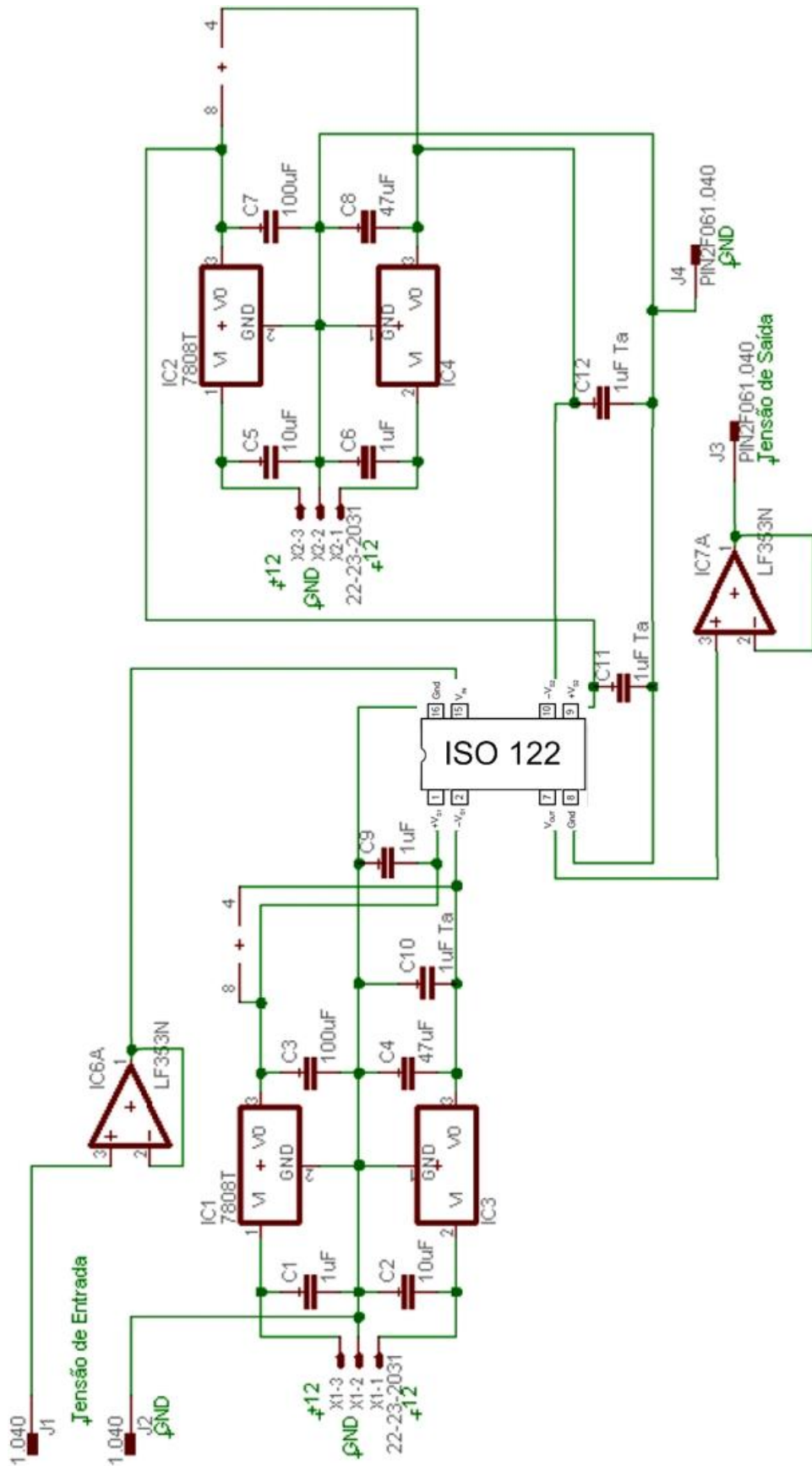


Figura 3.5 Esquemático da placa de condicionamento de sinal de tensão da soldagem.

3.4 MEDIÇÃO DA CORRENTE DE SOLDAGEM

Para adquirir a corrente durante o processo de soldagem utilizou-se um grampo de corrente de referência *i1010* (FLUKE, 2008). Este dispositivo mede a corrente que circula por um cabo por meio de um sensor de efeito Hall. A saída do sensor apresenta uma sensibilidade de 1mV/A. Este sinal é ligado diretamente na placa de aquisição.

3.5 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Todas as soldas foram realizadas sobre uma chapa plana (bead-on-plate). As chapas usadas foram SAE 1020 de 6,35 mm de espessura, e 300 mm x 200 mm. As soldas realizadas foram em posição plana. Em algumas experiências se variou a corrente durante o processo, enquanto em outras foram mantidas a corrente constante. Outros parâmetros importantes para as experiências são mostrados na Tabela 3.3. O diagrama de experimento básico se encontra na Figura 3.6.

Tabela 3.3 Condições de soldagem.

<i>Velocidade de soldagem (Mesa de posicionamento)</i>	2,5 mm/s
<i>Vazão de gás</i>	Argônio 10 L/min
<i>Eletrodo</i>	Negativo EWTh-2; 1,6mm
<i>Stand-Off</i>	3, 5, 7 mm

As soldas foram realizadas com a fonte IMC Inversal 450. A fonte foi programada para operar no modo remoto.

O cabo que comunica a placa de aquisição de sinais com a máquina de solda possui seis fios, como mostrado de maneira ampliada na Figura 3.6. Os dois primeiros fios do cabo são sinais de saída da máquina que transportam os sinais de tensão e corrente apresentados durante uma experiência. Os quatro seguintes controlam parâmetros como a *corrente*, *velocidade do arame* ou *tensão*, a *ignição* e a *abertura do gás* (A velocidade do arame é usada nos processos MIG/MAG). Cabe salientar que unicamente os sinais de *ignição* e de *gás* são digitais.

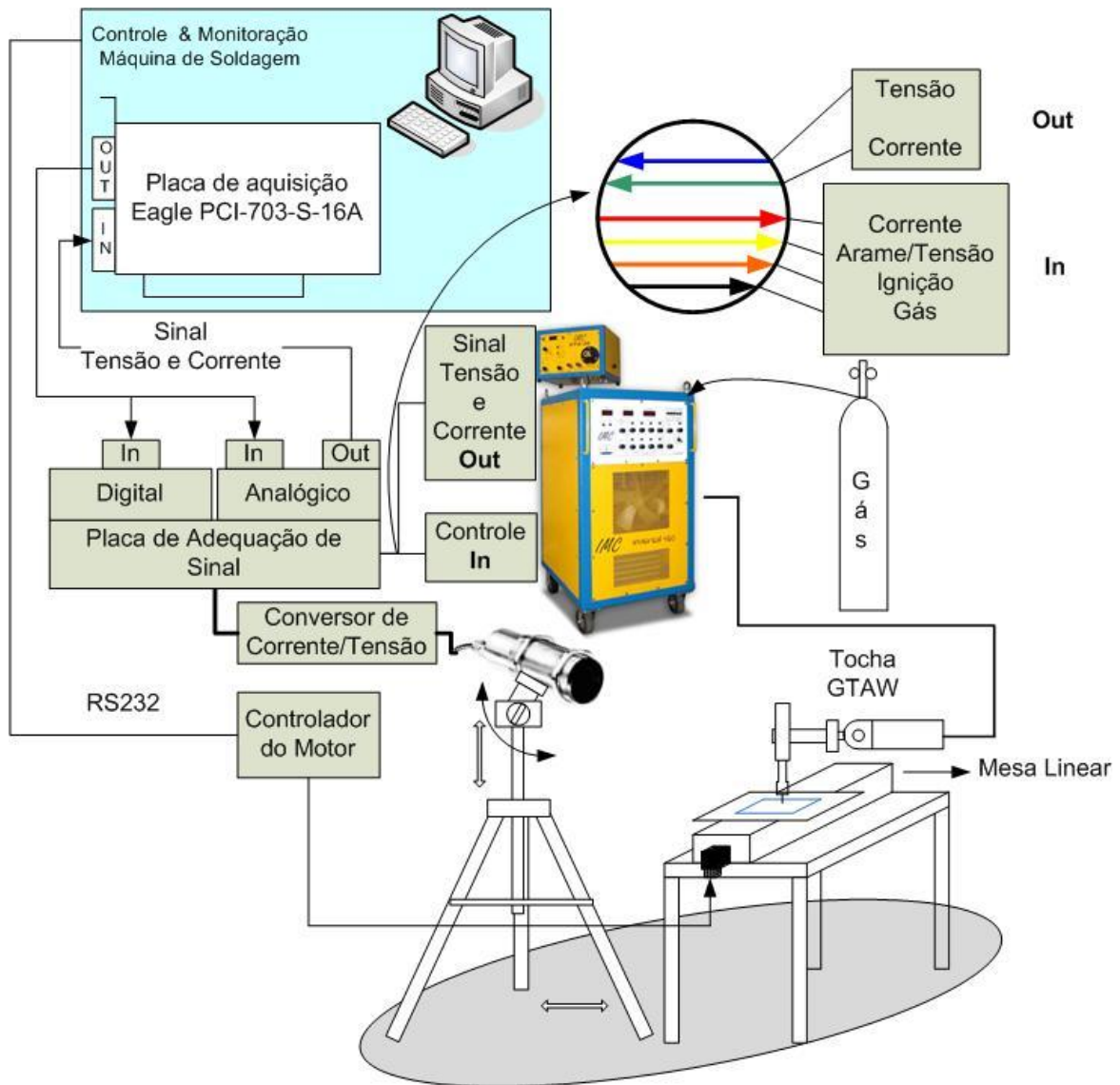


Figura 3.6 Diagrama de Experimento Básico.

3.6 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

Para a aquisição e o controle durante o processo de soldagem foi desenvolvido um programa em LabVIEW[®]. O programa pode se dividir em duas partes principais:

- Ajuste dos parâmetros
- Aquisição dos dados

Ajuste dos parâmetros: Esta etapa consiste na configuração dos parâmetros de soldagem. Para o processo TIG precisa-se colocar os valores de corrente e o tempo do processo.

Também permite-se ajustar parâmetros do motor que controla a velocidade e o sentido do processo de soldagem. Na Figura 3.7 exibem-se as duas janelas de ajuste de parâmetros.

Na janela do programa observam-se campos para o ajuste da velocidade, tempo de aquisição, distância. O tempo de aquisição é ajustado na janela A, sendo então um dado de entrada no programa do motor. Um gráfico na janela do motor permite ao usuário ajustar o sentido do giro do motor a partir das setas encontradas embaixo dela. Existem duas janelas, “Mensagem a enviar” e “Verificação”. Nelas, durante a execução do programa, se apresentam os parâmetros a serem enviados para o controlador do motor e a resposta do microcontrolador. O usuário fica responsável pela verificação dos dados. Um indicador na parte inferior direita da janela ficará aceso se algum erro acontecer durante a execução do subprograma motor.

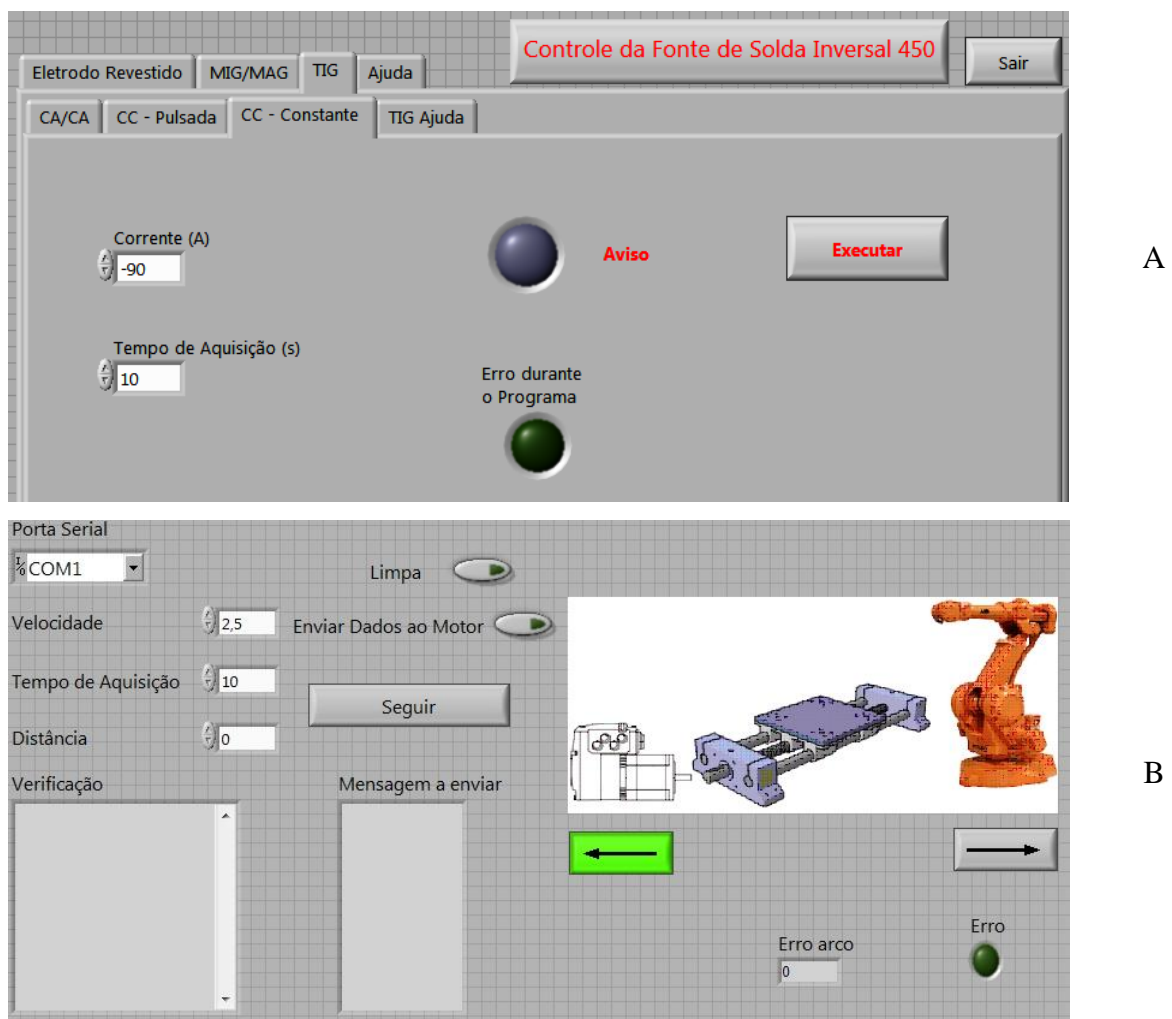


Figura 3.7 Janelas de ajuste dos parâmetros de soldagem. A) Janela de Corrente e tempo de soldagem. B) Janela de ajuste dos parâmetros do motor.

É preciso notar que o controle da corrente durante a soldagem é um controle aberto, ou seja, as informações adquiridas durante o processo (corrente, tensão, temperatura) não são usadas para manter as características finais dentro dos valores desejados.

Aquisição dos dados: Para a aquisição dos dados, utilizou-se uma placa de aquisição para capturar os sinais de corrente, tensão e temperatura. Depois de serem ajustados os parâmetros de soldagem inicia-se o processo de aquisição. Uma janela, como a da Figura 3.8, mostra os sinais lidos ao fim do processo. Para uma melhor compreensão dos dados, os gráficos são apresentados em função do comprimento do cordão de solda. Esse programa permite ao usuário salvar os dados para uma posterior análise da informação.

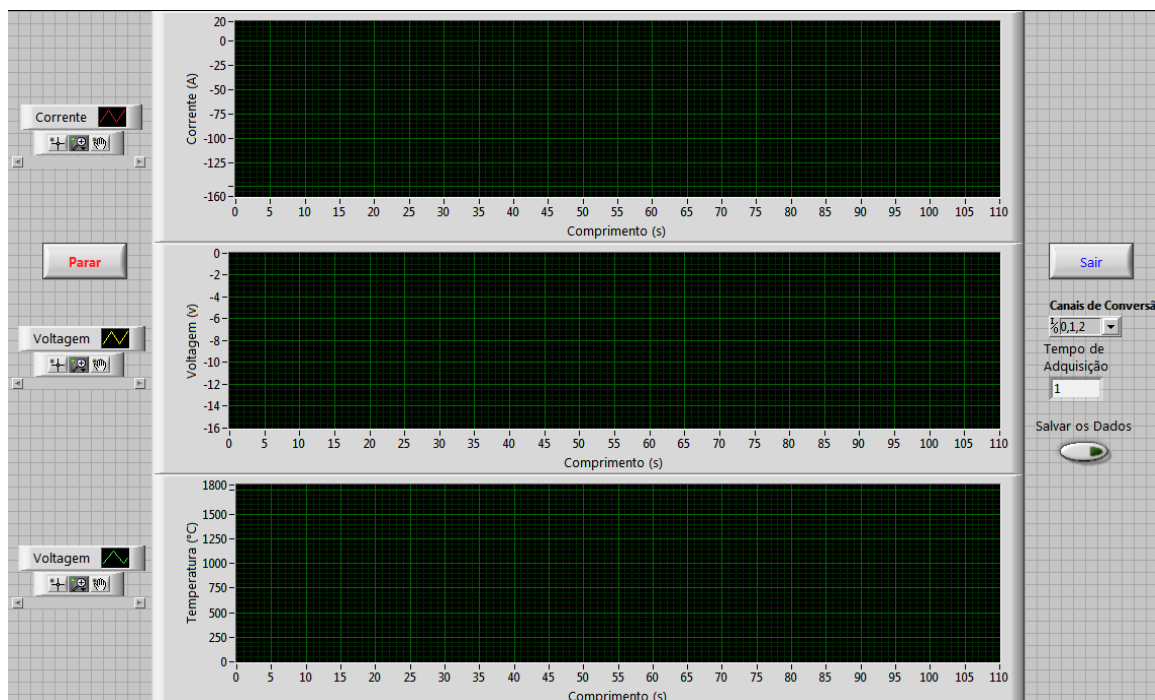


Figura 3.8 Janela de leitura de dados.

3.7 METODOLOGIA

O propósito do trabalho é avaliar o uso das emissões infravermelhas da região poça-arco como um parâmetro de monitoração durante o processo de soldagem. Perturbações no arco ou na poça de fusão podem gerar uma falta de homogeneidade nas características físicas, mecânicas ou metalúrgicas da junta soldada. Essas discontinuidades ou possíveis defeitos,

se não cumprirem as exigências do projeto poderiam levar a uma falha estrutural em serviço.

De acordo com o exposto, propôs-se uma série de experiências que consistiram em mostrar a viabilidade do monitoramento pelo infravermelho. Foi observado o comportamento das emissões infravermelhas durante a caracterização da curva estática do arco. Foram planejadas e executadas experiências com corrente constante e variável com a finalidade de avaliar uma relação entre o sinal infravermelho e a penetração, para o qual foram feitos ensaios metalográficos e usou-se um projetor de perfil para medir a penetração da solda. Finalmente, procurou-se observar se o sensor era capaz de detectar perturbações no arco com a adição de materiais externos. Foram trabalhadas inclusões metálicas, graxa, grãos de areia e água em borrifos para gerar as perturbações durante o processo.

No caso das inclusões metálicas foram usados pequenos arames de aço carbono usado para solda MIG, de 0,8 mm de diâmetro e comprimento entre 1 e 2 mm. Estes foram localizadas de forma que o fluxo do gás não os movimentasse durante a soldagem. Numa outra experiência foi utilizado 500 mg de graxa para rolamento que foi aplicado numa área de 2 mm², mas o seu efeito se propagou numa área maior a aplicada devida ao calor. Da mesma forma os grãos de areia foram localizados para que não se deslocasse durante a soldagem. Finalmente, o borrifo de água foi aplicado diretamente durante o processo.

Foi provado que processos de soldagem a arco produzem sinais que podem ser considerados como variáveis estocásticas. Devido aos vários fenômenos físicos presentes na soldagem a arco, é difícil estabelecer modelos matemáticos completos que levem em consideração todos os aspectos relacionados ao arco de plasma e seu efeito na transferência de metal, na base do metal fundido e nas transformações metalúrgicas (Alfaro *et al.*, 2006).

O sinal infravermelho, como será mostrado no próximo capítulo, apresenta informações da penetração e características superficiais do cordão de solda para as condições experimentais trabalhadas durante o trabalho. Variações no sinal infravermelho podem indicar perturbações apresentadas durante a soldagem.

Usou-se o diagrama apresentado na Figura 2.15 para a detecção de defeitos durante o processo de soldagem. Os dados coletados foram filtrados. O filtro continha o modelo

proposto para separar o sinal do ruído inerente à medição. Depois foi calculado o resíduo entre o valor estimado (filtrado) e o sinal lido. Posteriormente, usou-se um teste estatístico que avaliou se a diferença entre o modelo estabelecido pelo filtro e os dados lidos se encontrava num nível aceitável em relação a um valor pré-definido (ajuste do algoritmo de detecção). A partir dos algoritmos encontrados na literatura e do entendimento da metodologia de detecção propuseram-se variações nos algoritmos originais de detecção de mudança.

Para melhor apresentação das técnicas utilizadas para a detecção de mudanças no sinal infravermelho, pode-se apresentar uma estrutura que mostra como as ferramentas utilizadas foram implementadas. As Figuras 3.9, 3.10, 3.11, e 3.12 mostram os algoritmos implementados, entre eles, os encontrados na literatura e os algoritmos propostos.

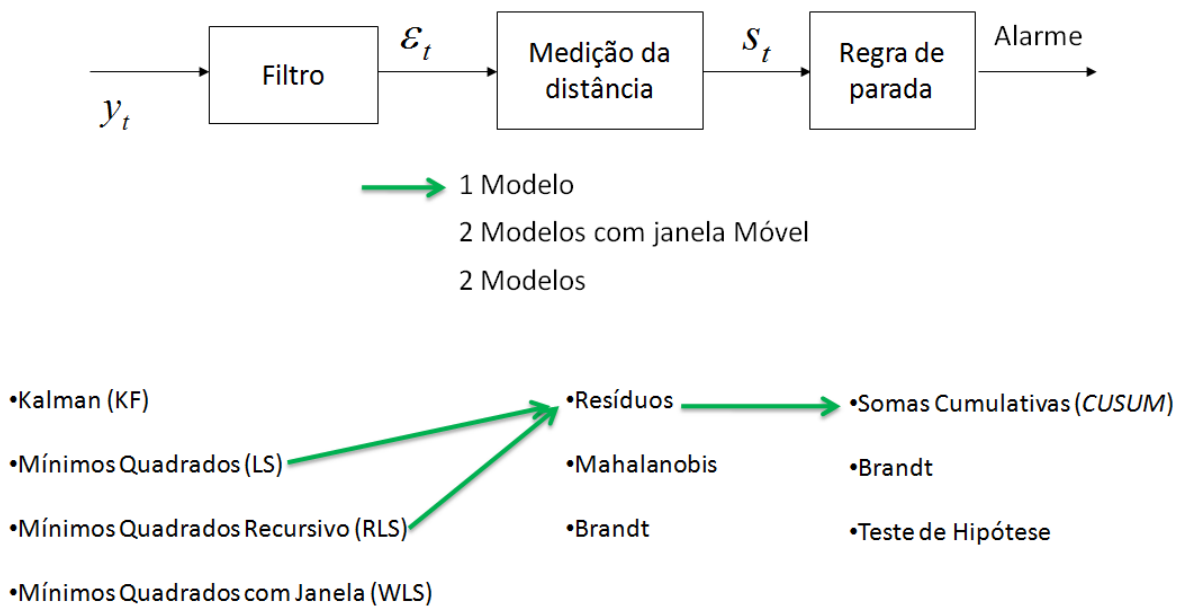
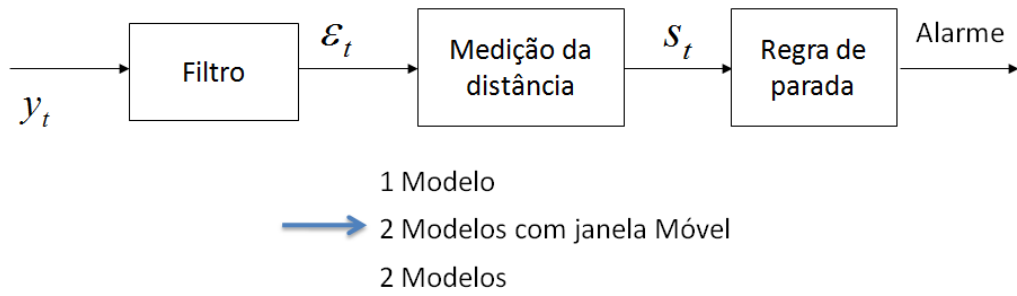


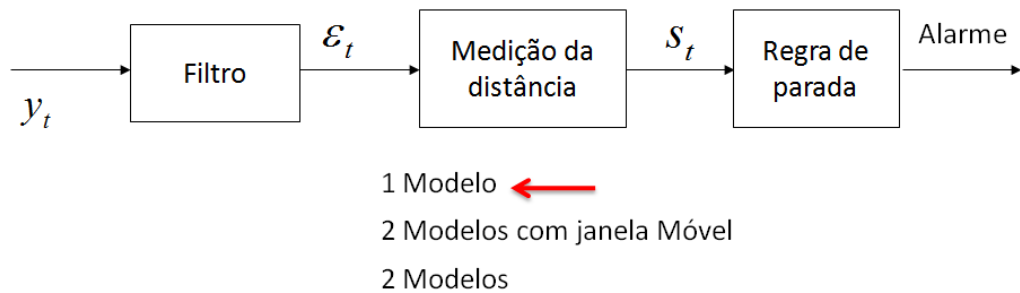
Figura 3.9 Diagrama para os algoritmos de 1 modelo. Literatura



- Kalman (KF)
- Mínimos Quadrados (LS)
- Mínimos Quadrados Recursivo (RLS)
- Mínimos Quadrados com Janela (WLS)
- Resíduos
- Mahalanobis
- Brandt
- Sommas Cumulativas (CUSUM)
- Brandt
- Teste de Hipótese

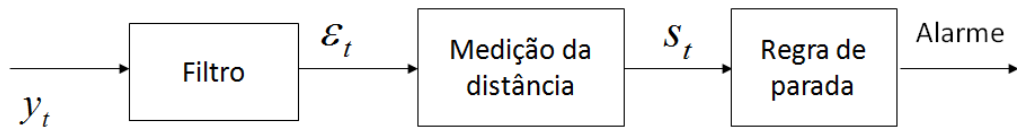
Figura 3.10 Diagrama para algoritmo de 2 modelos com janela móvel. Literatura

Seguem os diagramas dos algoritmos propostos.



- Kalman (KF)
- Mínimos Quadrados (LS)
- Mínimos Quadrados Recursivo (RLS)
- Mínimos Quadrados com Janela (WLS)
- Resíduos
- Mahalanobis
- Brandt
- Sommas Cumulativas (CUSUM)
- Brandt
- Teste de Hipótese

Figura 3.11 Diagrama para os algoritmos de 1 modelo. Propostos



1 Modelo

2 Modelos com janela Móvel

→ 2 Modelos

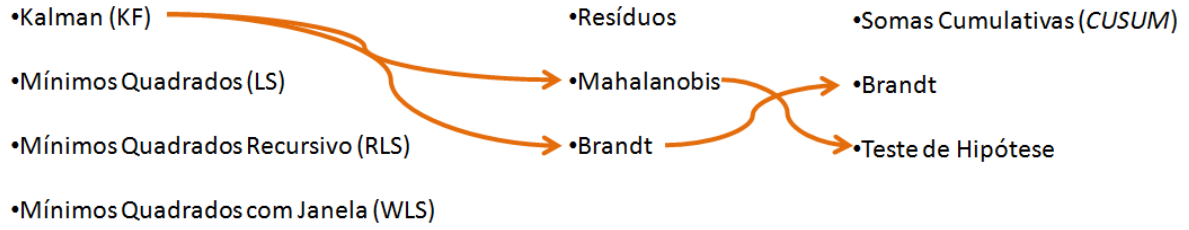


Figura 3.12 Diagrama para os algoritmos de 2 modelos. Propostos

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo aborda a descrição dos dados obtidos a partir de diversas experiências realizadas com soldagem TIG, visando determinar que tipo de informação pode-se obter a partir da análise das emissões infravermelhas usando um sensor de ponto.

As diversas experiências foram projetadas de tal forma que pudessem avaliar o uso da radiação infravermelha do arco-poça para obter informações referentes a:

- Penetração da solda.
- Detecção de perturbações durante a soldagem

Com as informações obtidas, foram utilizados diversos algoritmos para a detecção de mudanças na temperatura e comparou-se com as informações conseguidas a partir da leitura da corrente e tensão do processo.

Por fim, analisa-se a possibilidade de usar os algoritmos para a detecção de mudanças *on-line*.

4.1 CURVA ESTÁTICA DO ARCO

A relação tensão-corrente para a soldagem TIG é muito importante, dado que informa os valores nos quais o processo de soldagem é estável. Para observar o comportamento da radiação infravermelha durante o levantamento da curva característica do arco, foi desenvolvida a seguinte experiência:

A Figura 4.1 mostra o esquemático para o levantamento da curva característica estática do arco utilizando uma base refrigerada. O sensor foi localizado de forma que o foco estivesse focalizando a região da poça de fusão, mas, é preciso frisar que com a base refrigerada, não é possível a formação da poça de fusão. Esta experiência foi projetada dessa forma para avaliar o comportamento da radiação infravermelha produzida pelo arco sem a poça de fusão.

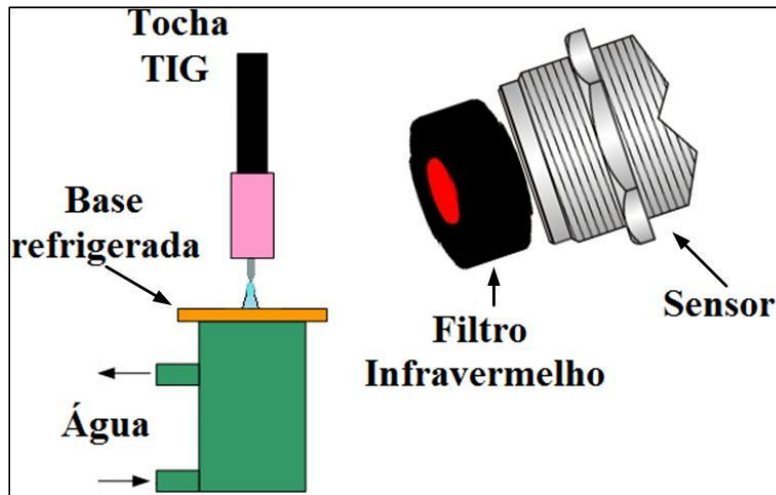


Figura 4.1 Esquemático da experiência da curva característica estática do arco medindo a temperatura.

Foi desenvolvido um programa de controle da corrente e aquisição da corrente, tensão e radiação infravermelha para o levantamento automático da curva característica do arco. A faixa de corrente avaliada foi entre 30 e 200 A. O programa incrementava a corrente em 5 A e esperava que o arco estivesse estável (5 s), nesse momento fazia-se a medição das variáveis de interesse e, após, o processo continuava incrementando até chegar ao valor máximo de corrente.

A Figura 4.2 Curva estática do arco mostra a curva característica obtida. Mostra-se a região na que o processo é estável entre as correntes de 50 e 200 A.

Calibração Estática do Arco

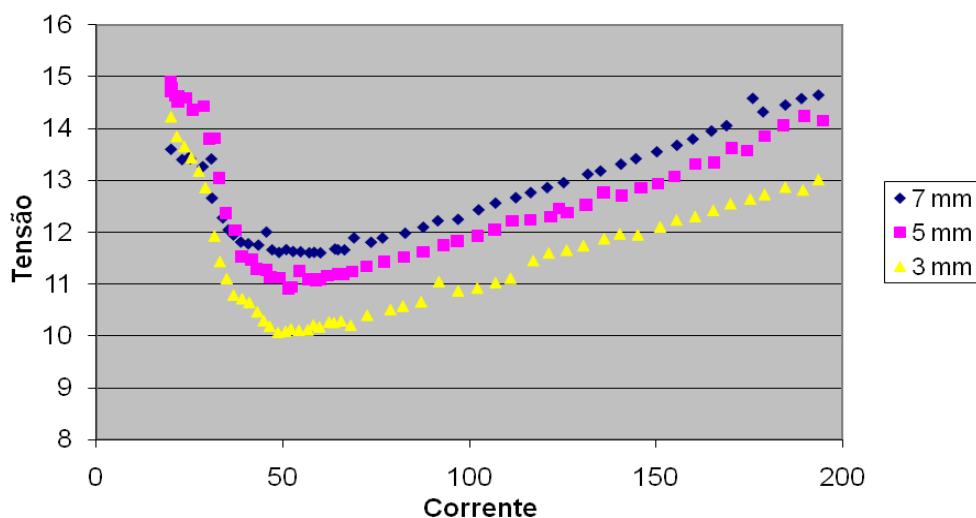


Figura 4.2 Curva estática do arco.

Durante a obtenção das curvas, observou-se um comportamento anômalo relacionado com a óptica do sensor e a forma do arco nos diferentes comprimentos. Ainda que o comportamento a ser descrito não seja um fator principal no desenvolvimento do trabalho, é importante que seja considerado para aplicações futuras do uso do sensor infravermelho em processos de soldagem. A Figura 4.3 apresenta o comportamento da radiação infravermelha para um comprimento de 5 mm.

A partir desta experiência comprovou-se que mesmo que o sensor focalize a região que estaria a poça de fusão, a maior parte da radiação obtida pelo sensor é do arco. Na experiência da curva característica não existe poça de fusão, já que o calor é dissipado rapidamente pela base refrigerada. O sinal infravermelho lido neste caso (Figura 4.3) é causado pelo arco.

Observa-se um comportamento esperado para a radiação infravermelha, segundo o qual, ela aumenta com o aumento da corrente (potência durante a soldagem). Diferentemente da curva característica do arco que apresenta um ponto mínimo, o infravermelho não apresenta tal comportamento, inclusive em valores próximos a 50 A onde se apresenta o dito comportamento na Figura 4.2. Pode-se também observar que a curva apresenta duas inclinações, a primeira para correntes menores que 80 A, onde a razão do aumento das radiações infravermelhas é maior; e uma segunda (acima de 80 A) onde esta taxa é menor.

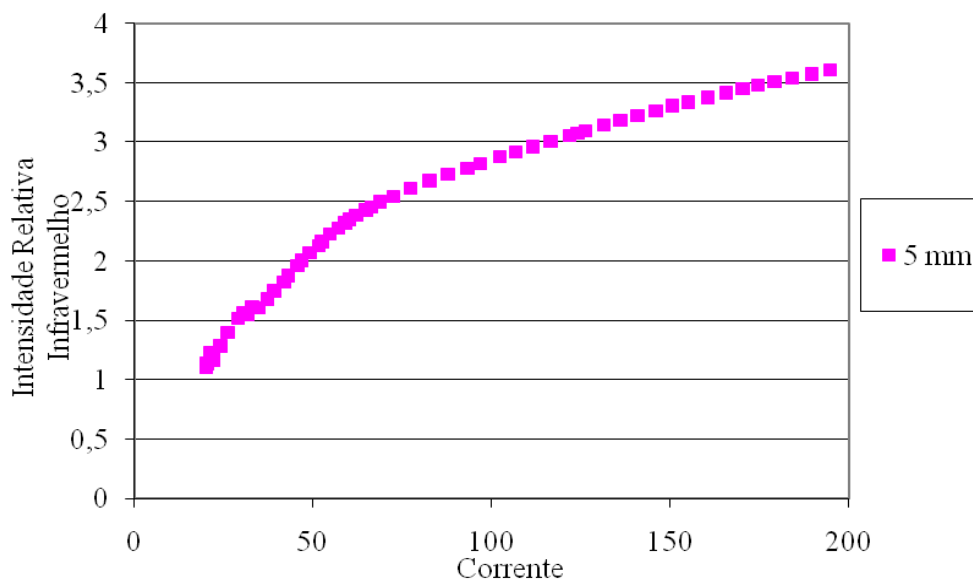


Figura 4.3. Gráfico da radiação infravermelha em função da corrente para um comprimento do arco de 5 mm.

O comportamento anômalo é perceptível ao comparar-se as curvas para os diferentes comprimentos de arco. A Figura 4.4 exibe os dados da experiência.

Para correntes menores de 80 A observa-se que o sinal lido nos comprimentos dos arcos mais curtos são maiores do que para os comprimentos de maior distância. Na faixa de 80 a 130 A o comportamento muda. O sinal lido pelos comprimentos dos arcos mais curtos aumenta em menor proporção do que os comprimentos maiores, chegando a um ponto no qual as curvas se cruzam.

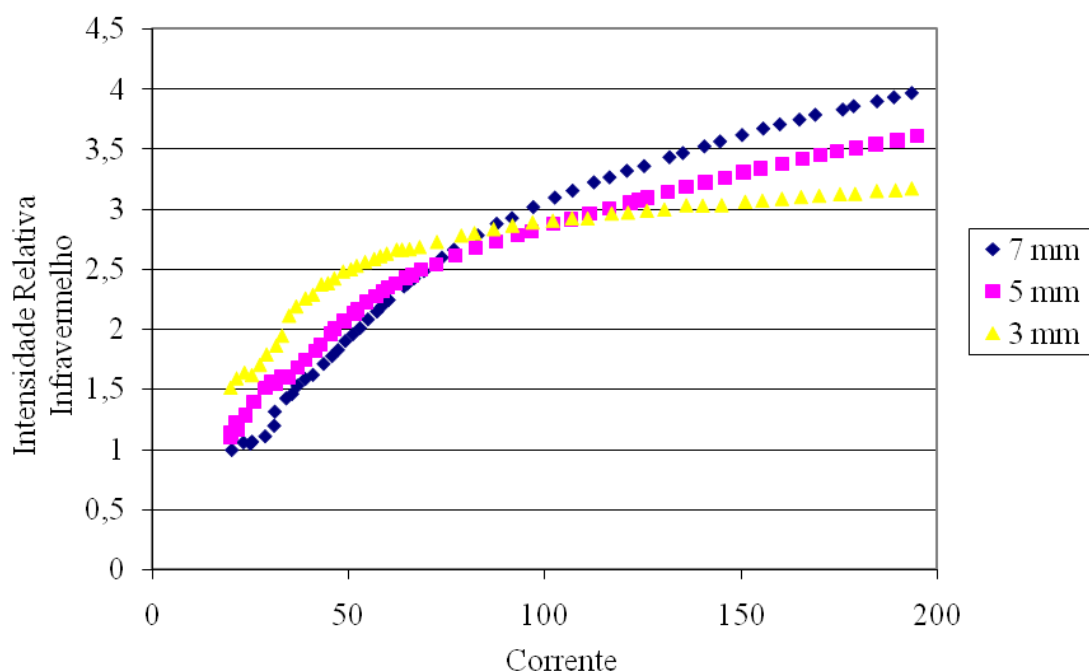


Figura 4.4. Curva de intensidade infravermelha versus corrente para diversos comprimentos do arco.

A maneira como o sensor focaliza o sinal infravermelho e a mudança na forma do arco quando é variado o comprimento do arco junto com a corrente de soldagem podem ser a explicação dessa anomalia. Far-se-á uma explicação qualitativa da irregularidade apresentada.

A localização do objeto a se medir, apresentada na Figura 3.1, mostra que o objeto deve estar distante de 600 mm. Em certas aplicações, o sensor é capaz de medir com grande precisão a temperatura da área de interesse, mas, em objetos gasosos (como o arco de soldagem) o sensor recebe radiações infravermelhas não só do foco, mas também das áreas próximas. Para comprimentos de arco pequenos, a quantidade do arco que é captada pelo

sensor é menor do que para comprimentos maiores. Por isso se observa na Figura 4.4 que para correntes de 150 A, o sinal infravermelho é maior para 7 mm. Para comprimentos de arco menores, a intensidade do sinal infravermelho é maior. Para baixas correntes (menores a 80 A) o sensor consegue captar sinais infravermelhos concentrados em uma pequena área em maior proporção do que para comprimentos de arco maiores.

Para corroborar essa explicação, planejou-se uma experiência na qual se pudesse capturar a imagem infravermelha do arco para diferentes comprimentos do arco e corrente. Para capturar a imagem usou-se uma câmera Sony HandyCam, modelo DCR-SR65. O mesmo filtro infravermelho utilizado nas experiências com o sensor infravermelho foi empregado para capturar as imagens do arco. Configurou-se o tempo de exposição da imagem (recurso da câmera) para evitar a saturação em altas correntes. A Figura 4.5 mostra a imagem infravermelha do arco TIG.

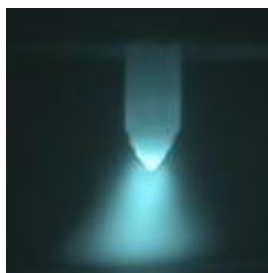


Figura 4.5. Imagem infravermelha do Arco TIG.

A Tabela 4.1 mostra as imagens infravermelhas para dois comprimentos do arco a duas correntes diferentes obtidas a partir da experiência descrita.

Para efeitos de análise, todas as imagens foram tomadas com o mesmo tempo de exposição, o que explica que no caso de 7 mm a 40 A não se observa uma imagem infravermelha clara. Como era de se esperar, as imagens para correntes maiores apresentam uma maior temperatura, e as isothermas diminuem à medida que se aproxima das vizinhanças do arco (Modenesi, 2007, Lancaster, 1986).

Observa-se nas imagens com baixa corrente o motivo pelo qual o sensor infravermelho capta um sinal maior para comprimentos de 3 mm do que para 7 mm. Deve-se lembrar que o sensor é localizado de forma que o foco fique na região onde estaria a poça de fusão.

Desta forma, para o comprimento de 3 mm tem-se uma maior presença de radiação infravermelha perto da poça do que para 7 mm.

Para o caso da corrente de 160 A poderia ser feita uma aproximação da porção do arco que o sensor infravermelho captura, lembrando que esse tratamento é feito em duas dimensões e os resultados obtidos serão aplicados para o sistema real de 3 dimensões. Conhecendo o arranjo óptico da lente utilizada pelo sensor e o ângulo de inclinação, pode-se estimar a região do arco que o sensor capturaria para as imagens a 160 A. A Figura 4.6 mostra histogramas das imagens para as porções do arco captadas pelo sensor infravermelho (vermelho) a uma corrente de 160 A. Na escala de cinza, os valores mais próximos ao preto (0) representam valores de maior temperatura. E quanto mais claro, menor temperatura (255).

Tabela 4.1. Imagens infravermelhas do arco TIG para dois comprimentos do arco diferentes.

	Corrente 40 A.	Corrente 160 A.
3 mm		
7 mm		

Observa-se para o comprimento de 3 mm que alguns valores do histograma ficaram perto de 100, isso representa que o sensor capta uma parte de maior temperatura em comparação ao comprimento do arco de 7 mm. Ainda que a região de 7 mm atinja uma menor temperatura (110), a quantidade de radiação infravermelha que possui é muito maior em comparação aos 3 mm. A área (quantidade de radiação infravermelha) para o comprimento do arco de 3 mm é de **1069** em comparação aos **1787** para 7 mm. Isso representa 70% mais de radiação infravermelha captada pelo sensor para o comprimento de arco de 7 mm para a corrente de 160 A.

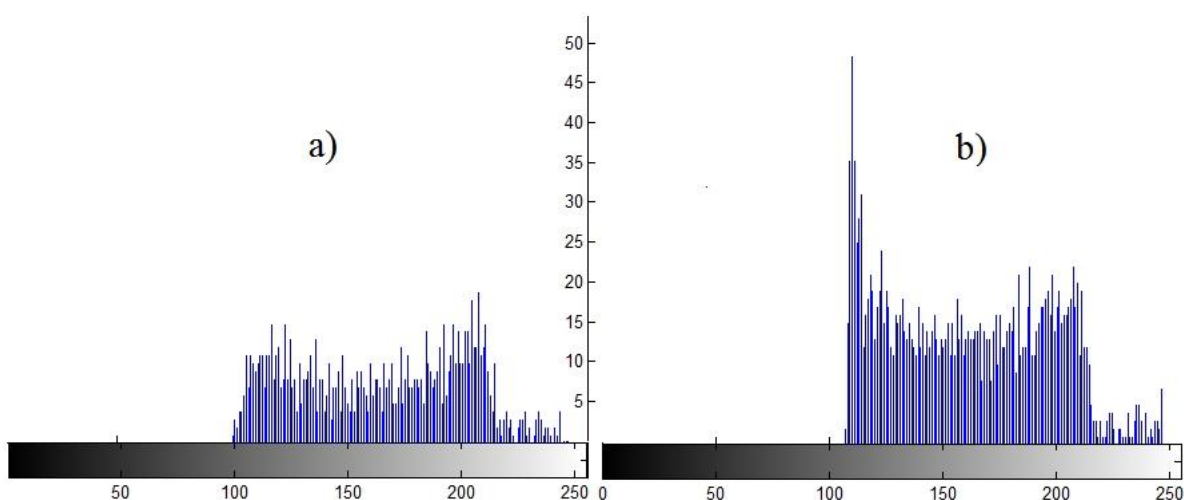


Figura 4.6. Histograma das porções do arco captadas pelo sensor infravermelho para correntes de 160 A. a) Porção a 3 mm. b) Porção a 7 mm.

A análise feita permite colocar as seguintes conclusões em relação ao sensor infravermelho e o sinal lido por ele:

- Focalizando-se a poça de fusão com o sensor, ele apresentará informações da radiação infravermelha não só da poça, como também do arco.
- Não se pode fazer a medição da temperatura absoluta da poça de fusão nem é de interesse devido à razão citada anteriormente e também pela utilização do filtro óptico.
- Para dois comprimentos de arco diferentes, poderia existir o mesmo valor de radiação infravermelha produzida por duas correntes diferentes.
- Dado que as experiências de soldagem descritas nesta dissertação foram mecanizadas, não existiram variações no comprimento efetivo do arco. Dessa forma, variações nas emissões infravermelhas foram produzidas por fatores como a

falta de limpeza da superfície, mudanças na corrente, mudanças no arco (deslocamento), entre outras.

É importante frisar que as conclusões apresentadas são válidas nas condições experimentais descritas. Mudanças no arranjo óptico do sensor (tamanho do foco), deslocamento ou variações no arco, ângulo de inclinação do sensor em relação à peça, gerariam novas condições para as quais as conclusões apresentadas anteriormente não necessariamente serão válidas, devendo-se, preferivelmente, refazer a experiência.

Uma vez entendida a forma como o sensor se comporta no monitoramento infravermelho da poça e do arco, pode-se continuar descrevendo as experiências do uso do sensoriamento infravermelho para a detecção de perturbações durante a soldagem TIG.

4.2 CARACTERÍSTICAS DO SINAL INFRAVERMELHO

A presente seção compara os dados de corrente, tensão e temperatura obtidos de diversas experiências, mostrando as vantagens oferecidas pela monitoração infravermelha da poça-arco.

A soldagem é um processo que gera alta interferência nos componentes eletrônicos motivo pelo qual as placas e software de aquisição devem ser projetados para suportar e minimizar as interferências. A fim de fazer uma comparação do ruído apresentado em cada um dos sinais de interesse (corrente, tensão e temperatura), foi desenvolvida uma experiência a corrente constante de 140 A. A Figura 4.7 mostra em volts alguns dados coletados e seus histogramas para os sinais de interesse. Deve-se ressaltar que os sinais mostrados não possuem filtros digitais, salvo o filtro implementado em *hardware* para medir a tensão.

Os sinais de corrente e tensão apresentam uma grande variação com respeito ao seu valor médio. Inclusive, no histograma da tensão, observam-se que não apresenta um comportamento gaussiano parecido para os sinais de corrente e tensão. O sinal de temperatura apresenta mostras que não variam suavemente (pacotes), isso se deve ao tempo de resposta apresentado pelo sensor que é relacionado com a inércia do sensor para acompanhar as variações da radiação infravermelha. Os sinais de corrente e temperatura

apresentam um melhor comportamento, devido, entre outros fatores, os quais são utilizados métodos indiretos para a medição da variável física. No caso da corrente é o efeito Hall.

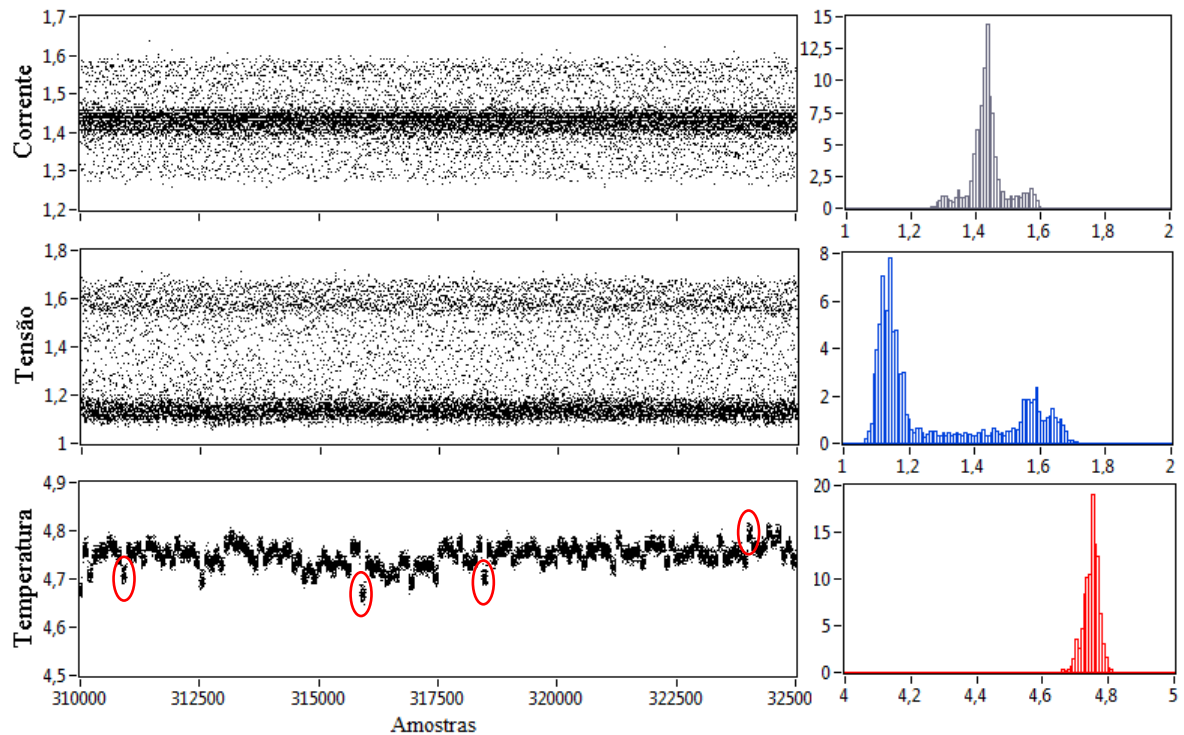


Figura 4.7. Dados a corrente constante.

A Figura 4.8 mostra os valores em volts para cada um dos sinais de interesse numa experiência com 100 A constante em função do comprimento do cordão de solda. Nela observa-se de cor vermelha o filtro Kalman implementado. O filtro consegue atenuar as altas frequências apresentadas nos três sinais. Uma das características favoráveis do filtro Kalman é que pode ser ajustado variando um único parâmetro do seu algoritmo, que indica o grau de incerteza do sinal lido, ao contrário de outros filtros digitais que precisam do conhecimento da frequência de amostragem do sinal e a frequência de corte para um filtro passa-baixa.

Observa-se na imagem da experiência um aumento da largura do cordão entre os comprimentos 35 e 55 mm. Essa mudança na largura foi involuntária. Observando-se os valores registrados nesse comprimento, o sinal do sensor infravermelho apresenta uma maior variação que da tensão. O sinal de corrente não apresenta uma variação apreciável nesse comprimento.

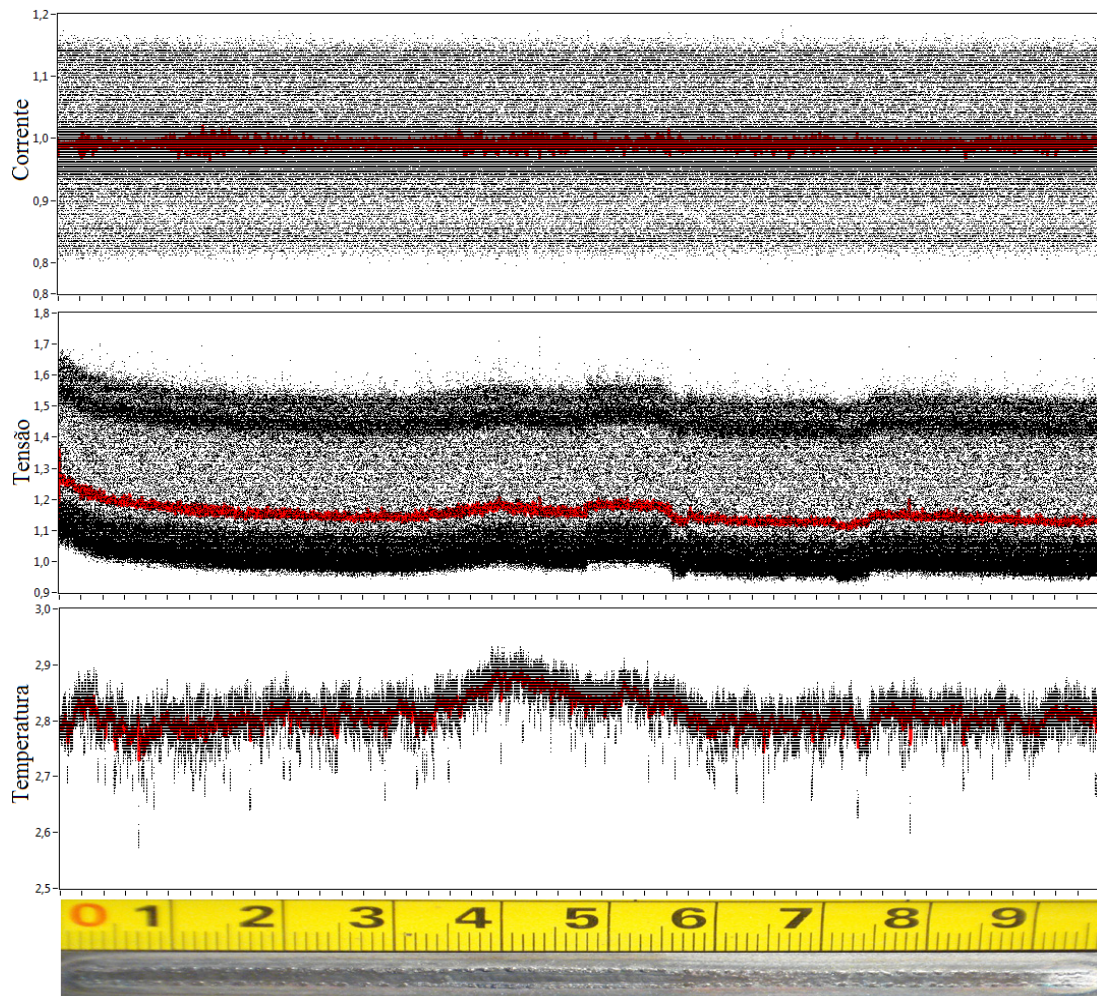


Figura 4.8 Experiência feita com corrente constante.

Esta experiência mostra que variações no sinal infravermelho procedente da poça e do arco podem indicar variações nos parâmetros da solda, neste caso, da largura. Desta forma, o sensor oferece informações que não podem ser extraídas com confiança da monitoração da corrente e a tensão.

Outra experiência foi proposta para determinar se o sinal do sensor infravermelho poderia indicar o grau de penetração da solda e determinar em quais condições se aplica. A Figura 4.9 mostra uma experiência na qual a corrente foi variada ao longo do processo. Essas variações têm como objetivo provocar variações na penetração da solda e posteriormente avaliar a existência de uma relação direta entre o sinal infravermelho captado pelo sensor e a penetração. Na figura se observa que um aumento na corrente corresponde um aumento proporcional ao valor gerado pelo sensor. Como esperado, um comportamento similar apresenta-se quando a corrente é diminuída.

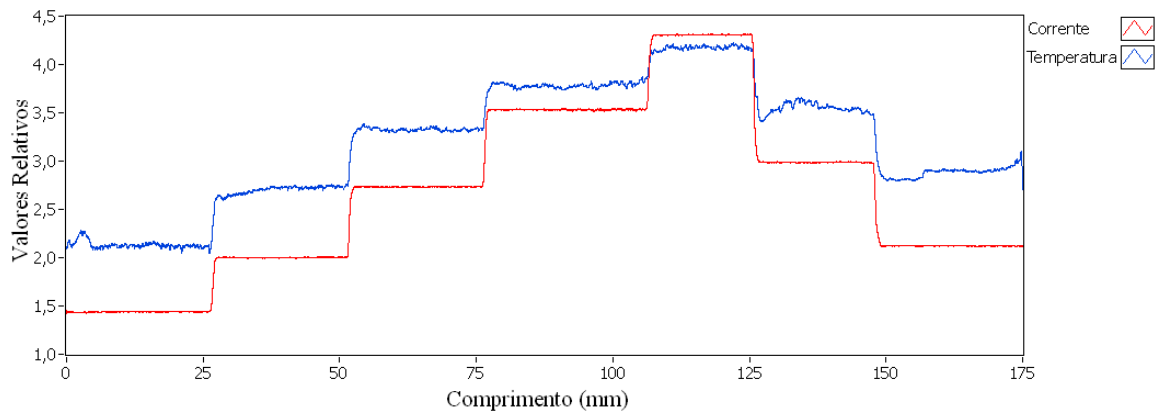


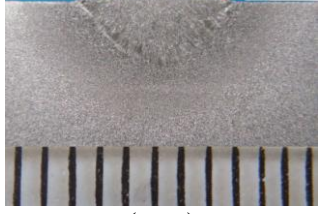



Figura 4.9 Comportamento da temperatura com variações na corrente.

A Tabela 4.2 compara a penetração da solda com o sinal infravermelho obtido para diferentes correntes. Observa-se que para cada incremento na corrente corresponde um aumento no sinal infravermelho e um aumento visual na penetração da solda.

Tabela 4.2 Relação entre o sinal infravermelho e a penetração da solda para diferentes correntes.

Corrente (A)	Sinal Infravermelho (V)	Imagem
90	3,31	 (mm)
130	3,68	 (mm)
155	4,01	 (mm)
180	4,27	 (mm)

A Figura 4.10 apresenta a relação entre o sinal infravermelho e a corrente-penetração.

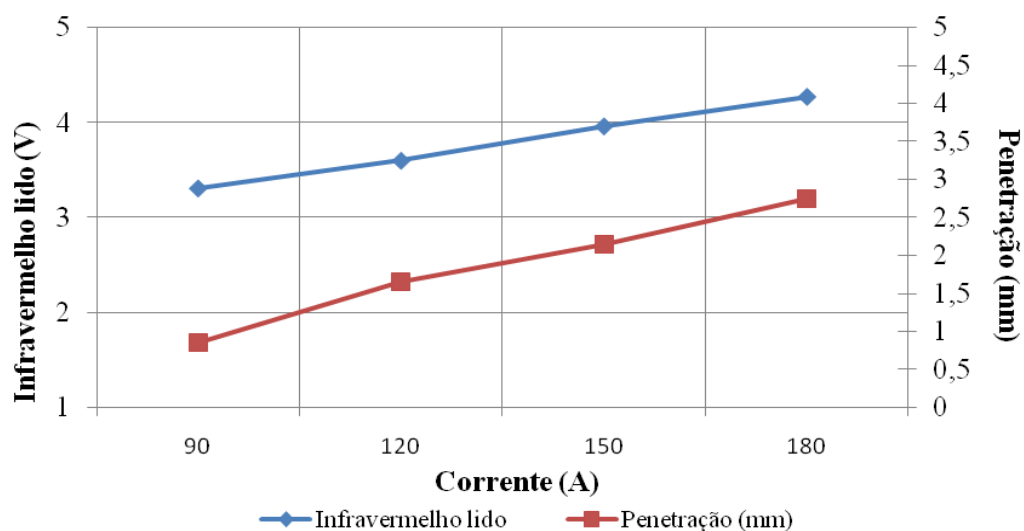


Figura 4.10 Gráfico comparativo entre a penetração e o sinal infravermelho lido.

Mostra-se uma relação proporcional entre o sinal infravermelho lido e a corrente de soldagem, e esta, com a penetração. Mostra-se então que por meio da medição das radiações infravermelhas é possível obter uma estimativa do grau de variação da penetração da solda. Esse é um fator importante, dado que afeta a qualidade da solda, pois está intimamente relacionado à integridade estrutural da solda (Farson *et al*, 2002).

A partir da Figura 4.10 se observa que existe uma relação indireta entre a radiação infravermelha captada pelo sensor e a penetração. Entretanto, esta relação indireta é aplicável para as condições da experiência. Sabe-se que a corrente de soldagem e a velocidade do avanço apresentam uma inter-relação com a penetração da solda. No caso da experiência descrita anteriormente, trabalhou-se com uma velocidade de avanço constante de 2,5 mm/s. Para experiências com velocidades diferente e corrente constante, varia a penetração, e nesse caso, o sinal captado pelo sensor infravermelho poderia não apresentar uma relação indireta com a penetração. Existem também outras configurações que podem afetar a penetração e que não foram avaliadas no presente trabalho, como o caso do afiamento do eletrodo de tungstênio, mudanças na configuração da junta, entre outras.

Pode-se concluir então que para as condições experimentais descritas o sinal infravermelho permite obter informações claras e adicionais aos do monitoramento convencional da

corrente e tensão. Como se mostrou na Tabela 4.2 e na Figura 4.10, o valor registrado pelo sensor indica o grau de penetração da solda. O valor médio no sinal infravermelho ou nível DC está relacionado com a penetração.

4.3 DETECÇÃO DE MUDANÇAS NO SINAL INFRAVERMELHO

Na presente seção se apresentarão diversas experiências que avaliaram o uso do sensor escolhido para a detecção de “defeitos” na solda, fazendo avaliação visual do sinal infravermelho como ponto de partida para a análise dos dados como também usando algoritmos matemáticos para a detecção de mudança automática.

A fim de não usar erroneamente o termo “defeito” na solda, precisa-se descrever o que é uma descontinuidade e quando pode-se considerá-la um defeito:

Designa-se como descontinuidade qualquer interrupção da estrutura típica (ou esperada) de uma junta soldada. Neste sentido, pode-se considerar como descontinuidade a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda. A existência de descontinuidade em uma junta não significa necessariamente que ela seja defeituosa. Essa condição depende da aplicação a que se destina o componente, e é, em geral, caracterizada pela comparação das descontinuidades observadas ou propriedades medidas com níveis estabelecidos em um código, projeto ou contrato pertinente. Assim, considera-se que uma junta soldada contém defeitos quando essa apresenta descontinuidades ou propriedades (neste caso, defeitos) que não atendam ao exigido, por exemplo, para um dado código (Modenesi, 2001).

Durante as experiências relatadas neste trabalho, procurou-se observar se o sensor era capaz de detectar perturbações feitas no arco com a adição de materiais externos. Dessa forma buscou-se comparar o sinal infravermelho na ausência de descontinuidades provocadas com a presença de materiais ou substâncias que alteraram o comportamento estável do sinal infravermelho. Dessa forma, o conceito de “defeito” será abordado como a presença ou ausência dos fatores externos inseridos que mudaram o sinal infravermelho no seu comportamento esperado.

4.3.1 Avaliação Visual do Sinal Infravermelho

Primeiro foi feita uma avaliação visual dos sinais lidos de algumas experiências que apresentaram defeitos provocados. Na seguinte seção será abordada a detecção de defeitos por meio de algoritmos para a detecção de mudança do sinal infravermelho.

A Figura 4.11 mostra a imagem e os sinais capturados de uma experiência com corrente constante e com presença de graxa e inclusão metálica como defeitos induzidos. Os dados de tensão e temperatura estão normalizados para a sua melhor observação. A graxa foi colocada no início da experiência, mas com o calor produzido pela solda, seu efeito se propagou em quase 50% da experiência. A inclusão metálica se localiza a 52 mm do início.

Ainda que o arco apresentasse um comportamento anômalo enquanto passava na zona afetada pela graxa, a fonte de soldagem manteve o valor estável da corrente. Unicamente foram observadas mudanças no sinal de temperatura e tensão. As variações nos dois sinais estão na mesma região (55 mm aproximadamente), mas o grau de variação no infravermelho é maior. Ele apresenta um valor perto de 4 no ponto de maior mudança, enquanto a tensão tem 3.

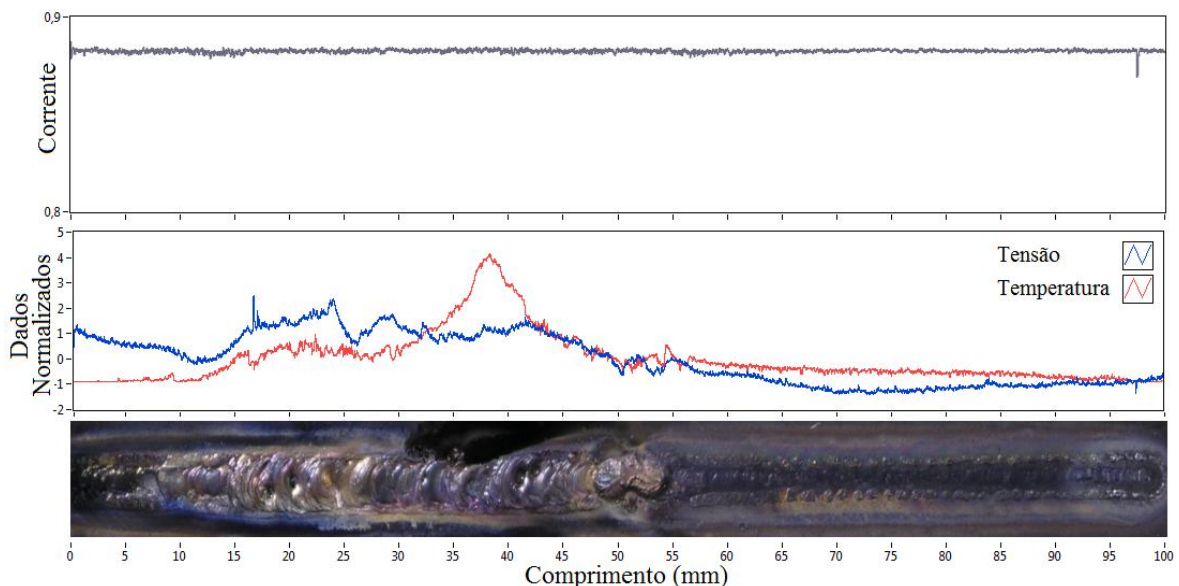


Figura 4.11 Experiência com presença de graxa.

A Figura 4.12 apresenta uma experiência a corrente constante com inclusões metálicas nos comprimentos 10, 60, 100, 150 mm. Mostra-se que a corrente (cinza) não apresenta variações durante a experiência, enquanto a tensão e a temperatura apresentam variações

nos lugares em que se apresentam as inclusões metálicas. Como foi explicitado anteriormente, o sinal de temperatura (vermelho) apresenta maiores variações quando detecta os defeitos, enquanto o sinal de tensão (azul) apresenta leves mudanças. Existe variação na largura no comprimento 124 mm. Isso é notoriamente visível no sinal de temperatura, ao contrário da tensão que apresenta uma leve variação.

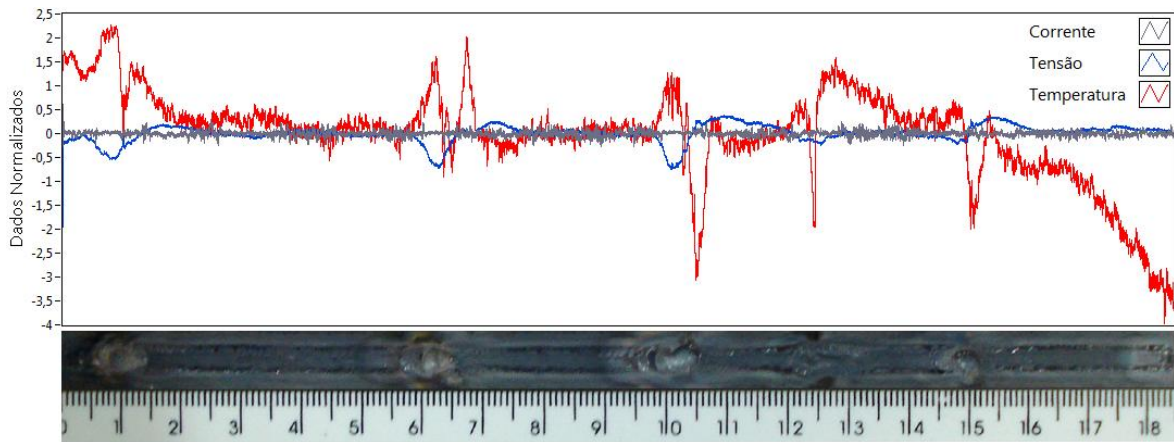


Figura 4.12 Experiência com inclusões metálicas.

Mostraram-se duas experiências com presença de defeitos como inclusões metálicas e graxa. Compararam-se a partir de uma avaliação visual as vantagens do monitoramento infravermelho da poça-arco. Mostraram-se as vantagens desse monitoramento em comparação com a tensão e corrente, já que oferece maiores variações na presença de defeitos, e, inclusive, sendo o único sinal monitorado que apresenta uma variação para uma mudança do formato do cordão de solda.

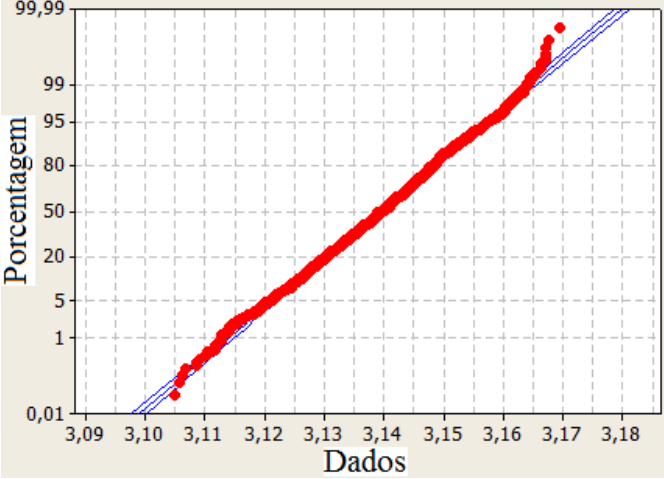
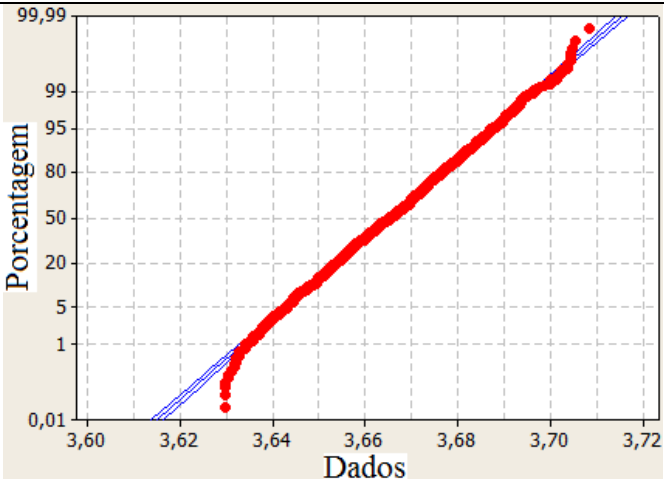
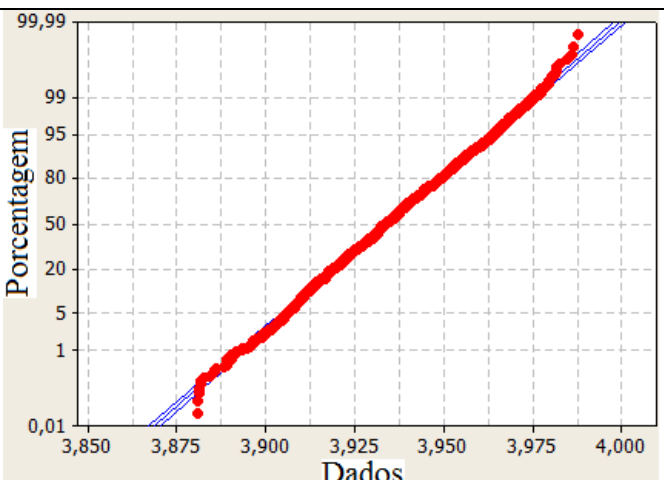
4.3.2 Localização de Defeitos utilizando Algoritmos de Detecção de Mudança

Para realizar a detecção de defeitos de forma automática, sugeriu-se um modelo no qual o sinal lido estivesse afetado por um ruído de média zero e variância definida. Deve-se mostrar que o sinal infravermelho segue uma distribuição normal.

A Tabela 4.3 mostra a distribuição para o sinal infravermelho em três diferentes correntes de soldagem. Os dados terão uma distribuição normal quanto forem mais próximos à reta desenhada. Em um gráfico de probabilidade normal, para um valor P maior do que 0,005

pode-se afirmar que os dados levantados seguem uma distribuição normal. Os gráficos apresentados na Tabela 4.3 foram avaliados com 95% de confiança.

Tabela 4.3 Teste de normalidade do sinal infravermelho.

 <p>Normality test plot for 80 A. The y-axis is labeled 'Porcentagem' and ranges from 0,01 to 99,99 on a probability scale. The x-axis is labeled 'Dados' and ranges from 3,09 to 3,18. Red data points are plotted along a diagonal line, showing a strong linear trend.</p>	<p>80 A Valor P = 0,012</p>
 <p>Normality test plot for 120 A. The y-axis is labeled 'Porcentagem' and ranges from 0,01 to 99,99 on a probability scale. The x-axis is labeled 'Dados' and ranges from 3,60 to 3,72. Red data points are plotted along a diagonal line, showing a strong linear trend.</p>	<p>120 A Valor P = 0,023</p>
 <p>Normality test plot for 140 A. The y-axis is labeled 'Porcentagem' and ranges from 0,01 to 99,99 on a probability scale. The x-axis is labeled 'Dados' and ranges from 3,850 to 4,000. Red data points are plotted along a diagonal line, showing a strong linear trend.</p>	<p>140 A Valor P = 0,015</p>

Observa-se que os dados obtidos do sensor infravermelho correspondem com alta probabilidade a uma distribuição normal. Dessa forma, o modelo adotado é válido (Equação 2.7). Considera-se que a medição está acrescida de um ruído que segue uma distribuição Gaussiana com média zero e variância definida.

Em seguida serão apresentados os resultados da detecção de mudança utilizando diferentes tipos de algoritmo descritos na seção 2.4.2. Usaram-se duas experiências para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos. Também descreve-se o método de ajuste da detecção das falhas nos diferentes algoritmos e mostra-se as vantagens deles.

4.3.2.1 Algoritmos *CUSUM-LS*, *RLS*, Kalman e Mahalanobis

Como se mostrou na seção 2.4.2, a técnica de detecção baseia-se em medir a diferença (erro) entre o sinal lido e os valores estimados a partir do filtro, para depois serem avaliados por um teste estatístico que, junto com um valor de referência mostrará se apresenta ou não uma mudança.

Inicia-se com o algoritmo *CUSUM* em suas duas versões. Para ajustar esse algoritmo, deve-se iniciar com um valor grande de referência h . Depois, deve-se escolher v de forma que tenha a metade de uma mudança esperada. Depois se ajusta a referência h para que não acuse falsos alarmes ou o espaço de tempo para a detecção não seja muito grande.

Levando-se em conta as considerações anteriores mostra-se na Figura 4.13 e na Figura 4.14 os resultados para duas experiências com valores de $h=5$ e $v=1,25$.

Observa-se nos dois casos que o valor estimado não acompanha muito bem o comportamento do sinal infravermelho. Porém, nas regiões em que o sinal muda (presença de defeito), o valor estimado acompanha claramente o comportamento. Nos gráficos de detecção de mudança se observam dois testes estatísticos, um de cor verde e outro azul, que correspondem aos testes para aumento ou diminuição (Equação 2.17). As detecções de cores azuis e verdes correspondem aos testes de subida e descida respectivamente.

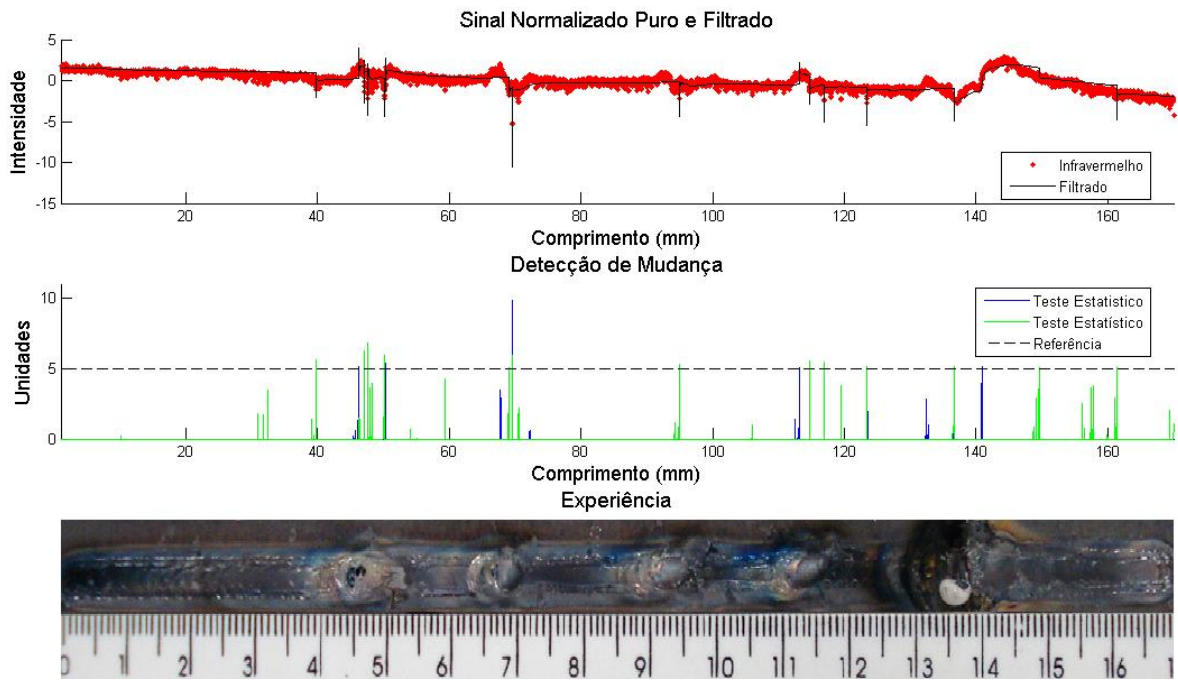


Figura 4.13 Resultado do algoritmo *CUSUM-LS*, experiência 1.

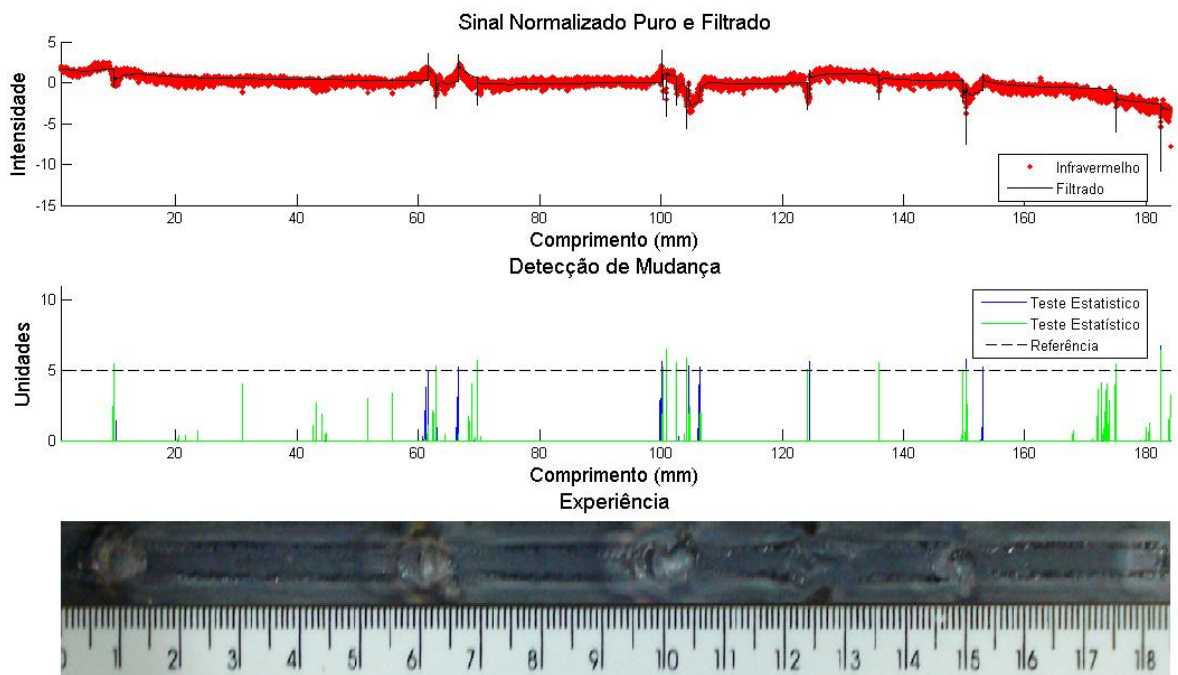


Figura 4.14 Resultado do algoritmo *CUSUM-LS*, experiência 2.

Observa-se nos dois casos que o algoritmo foi capaz de detectar a presença do defeito, como também foram detectadas outras flutuações no sinal entre os comprimentos 150 e 170 mm para a experiência 1, como também entre 170 e 184 mm para a experiência 2.

Também se observa que a escolha da referência foi acertada, não só porque com o nível de $h=5$ consegue-se evitar alarmes indesejadas, como também a defasagem é imperceptível.

O algoritmo *CUSUM-RLS* (Equação 2.18) apresenta um fator de esquecimento λ na estimação dos mínimos quadrados. É uma influência dos valores antigos, já calculados, naqueles que estão sendo calculados.

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram a detecção dada pelo algoritmo *CUSUM-RLS* para as duas experiências. Os parâmetros do algoritmo são: $\lambda=0,999$, $h=5$ e $v=1,25$.

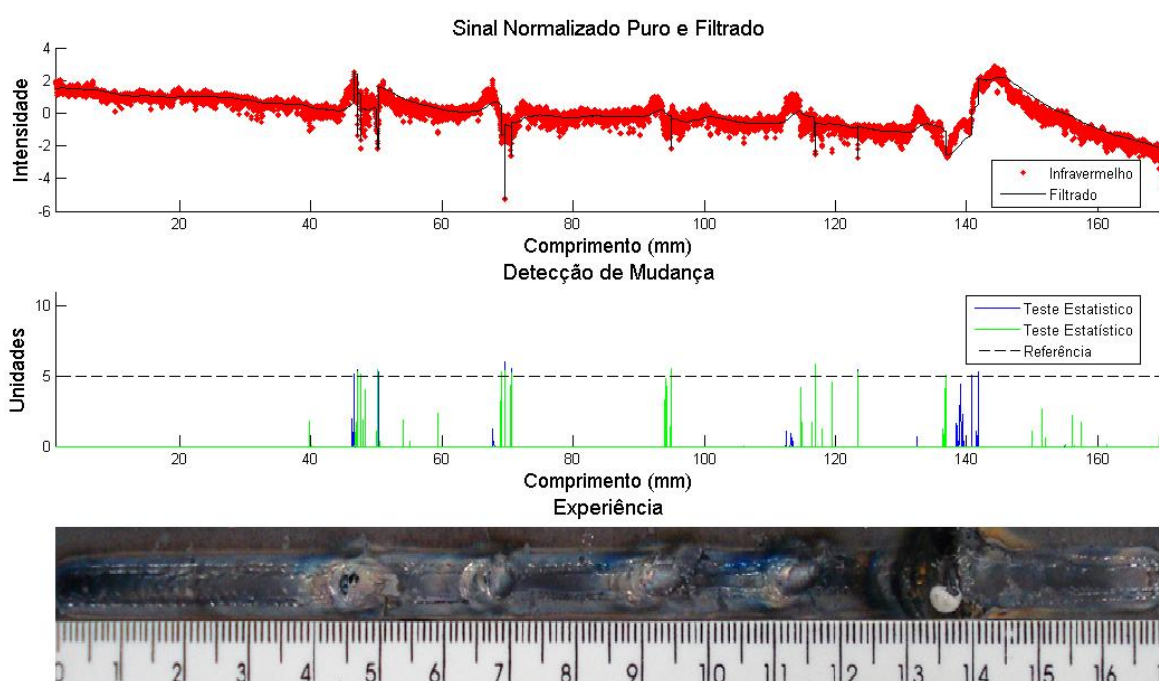


Figura 4.15 Resultado do algoritmo *CUSUM-RLS*, experiência 1.

Comparando com a Figura 4.13, observa-se que o valor estimado é mais bem comportado no filtro *RLS* que no *LS*. Isso significa que o filtro *RLS* é um melhor estimador. Detectaram-se os 5 defeitos induzidos e no final da experiência (150 a 170 mm), não se observam as detecções equivocadas. O algoritmo *LS* detecta no comprimento 40 mm uma mudança, enquanto o algoritmo *RLS* não consegue acompanhar de forma significativa a variação no sinal infravermelho, fazendo que a detecção nesse comprimento não supere o valor de referência que indica a presença de defeitos. Também é observado que para o defeito localizado no comprimento de 114 mm a detecção apresenta uma defasagem de quase 2 mm. No mesmo lugar, o algoritmo *LS* conseguiu detectar no teste de subida a

presença do defeito nesse comprimento, enquanto o *RLS* apresentou a detecção, mas não conseguiu atingir o valor h .

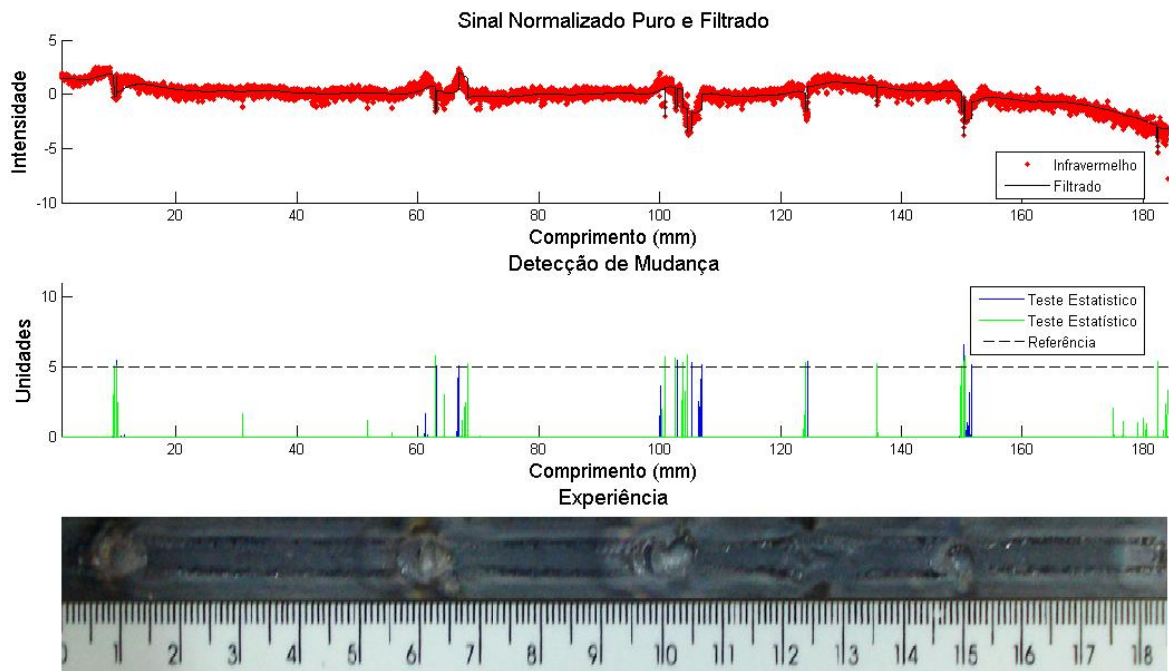


Figura 4.16 Resultado do algoritmo *CUSUM-RLS*, experiência 2.

A Figura 4.16 mostra a experiência 2 com o algoritmo *RLS*. Observa-se igualmente que o filtro é um bom estimador e também consegue detectar os defeitos induzidos. A curva de detecção é bem mais limpa que a obtida pelo filtro *LS*.

Pode-se empregar o filtro Kalman para a estimação e usar o teste estatístico por somas cumulativas para a detecção do defeito. A Figura 4.17 e Figura 4.18 mostram a detecção de mudança utilizando o filtro Kalman e teste *CUSUM*.

Existem duas variáveis que precisam se ajustar para que o filtro Kalman seja um bom estimador, elas são Q e R , como foi mostrado na equação 2.19. O fator Q é a variância da variável aleatória do processo e R é o ruído apresentado pela medição. O ajuste do filtro Kalman foi feito com baixos valores de Q e altos de R , o que se poderia ver como se a “incerteza” da medição estivesse relacionada unicamente com o ruído da medição.

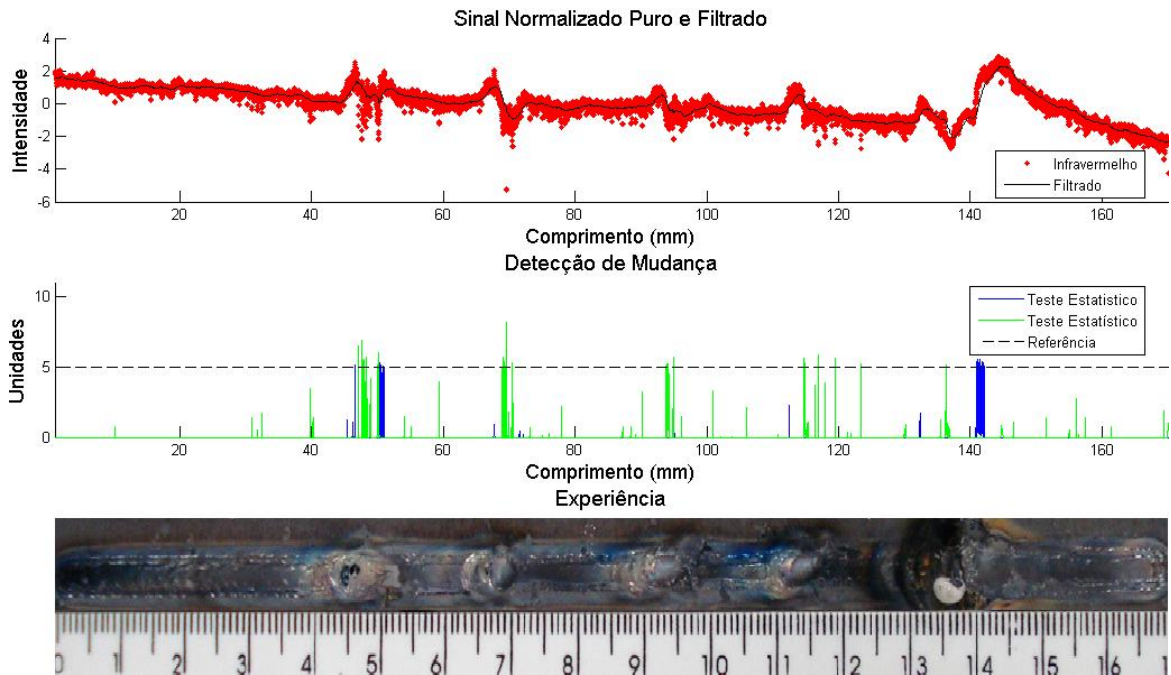


Figura 4.17 Filtro Kalman com teste estatístico *CUSUM*, experiência 1.

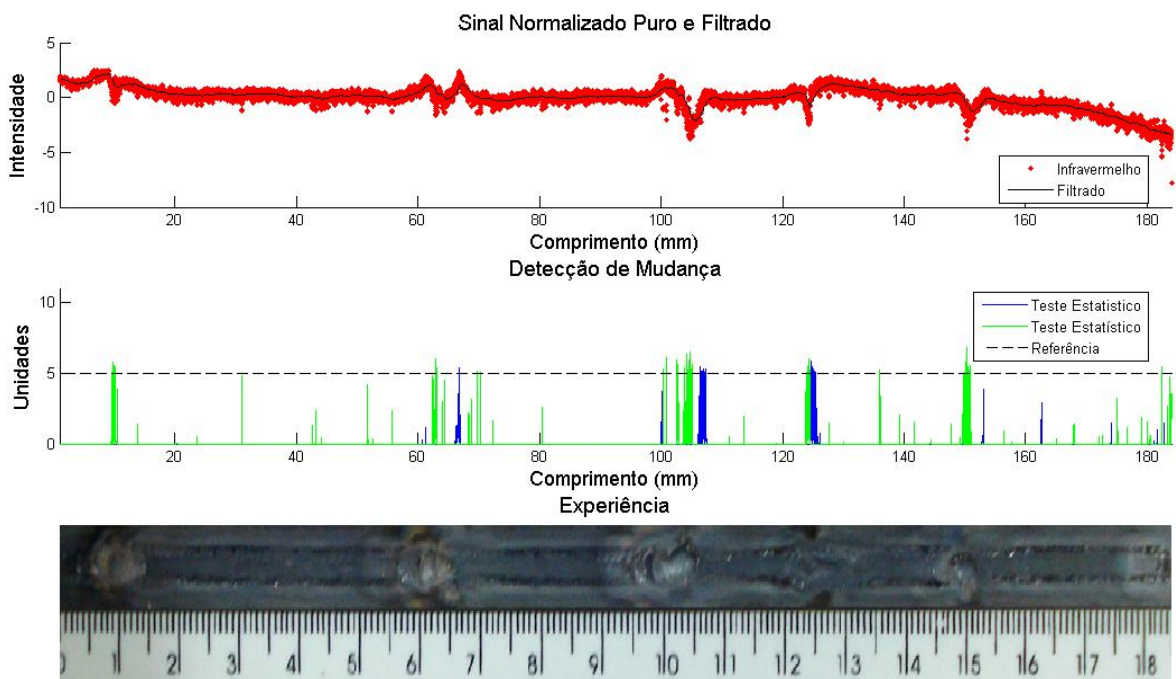


Figura 4.18 Filtro Kalman com teste estatístico *CUSUM*, experiência 2.

Os parâmetros para o filtro Kalman e teste estatístico foram os seguintes:

$$Q=0,00001, R=1, H=5, v=0,9.$$

Para os dois gráficos, se observa que o filtro Kalman é um bom estimador, acompanha suavemente o comportamento dos dados adquiridos pelo sensor infravermelho. Já no

cálculo do teste estatístico, observou-se que a estimativa permitiu a detecção de todos os defeitos nas duas experiências.

A Figura 4.19 apresenta uma comparação dos estimadores com os valores citados anteriormente na experiência 1.

Como mencionado anteriormente, o estimador mais bem comportado é dado pelo filtro Kalman. Deve-se notar que o estimador dado por RLS pode melhorar (acompanhar melhor o sinal) ajustando o fator de esquecimento λ , mas, a mudança desta variável comprometerá a detecção de mudança.

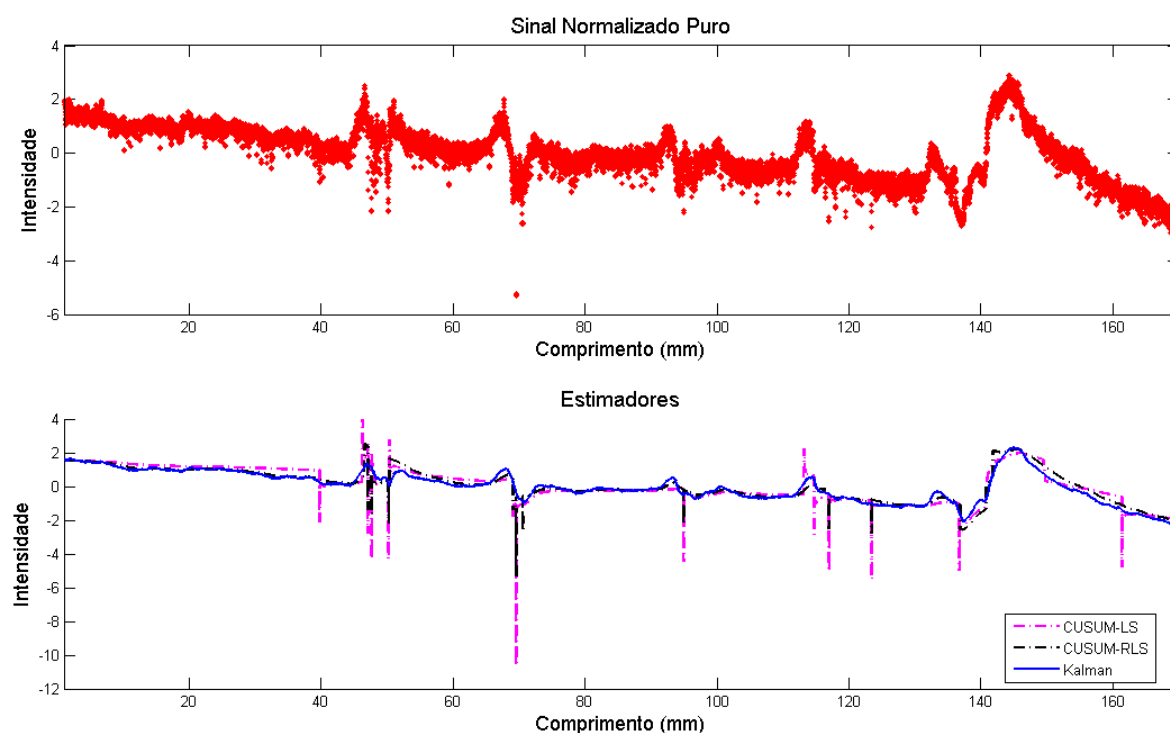


Figura 4.19 Comparação dos estimadores na experiência 1.

Os algoritmos apresentados conseguiram detectar os defeitos presentes nas duas experiências a partir do sinal infravermelho. Falta avaliar esses algoritmos no sinal de tensão. Não foi testado no sinal de corrente, dado que, como foi mencionado anteriormente, ele não varia durante a experiência. Assim prevê-se que não servirá para a detecção de defeitos.

A Figura 4.20 e Figura 4.21 mostram a detecção de mudanças usando o sinal de tensão para as duas experiências. Cada um dos algoritmos foi ajustado visando o melhor desempenho na detecção dos defeitos.

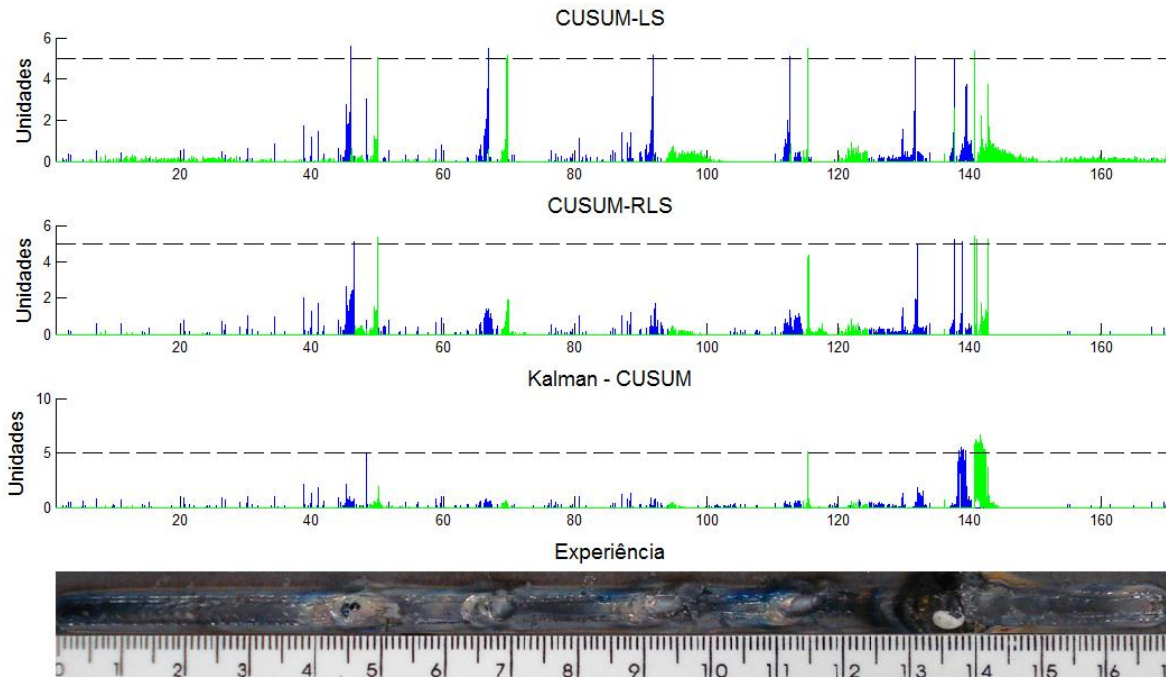


Figura 4.20 Detecção de defeitos com algoritmos *CUSUM-LS*, *RLS* e Kalman para o sinal de tensão na experiência 1.

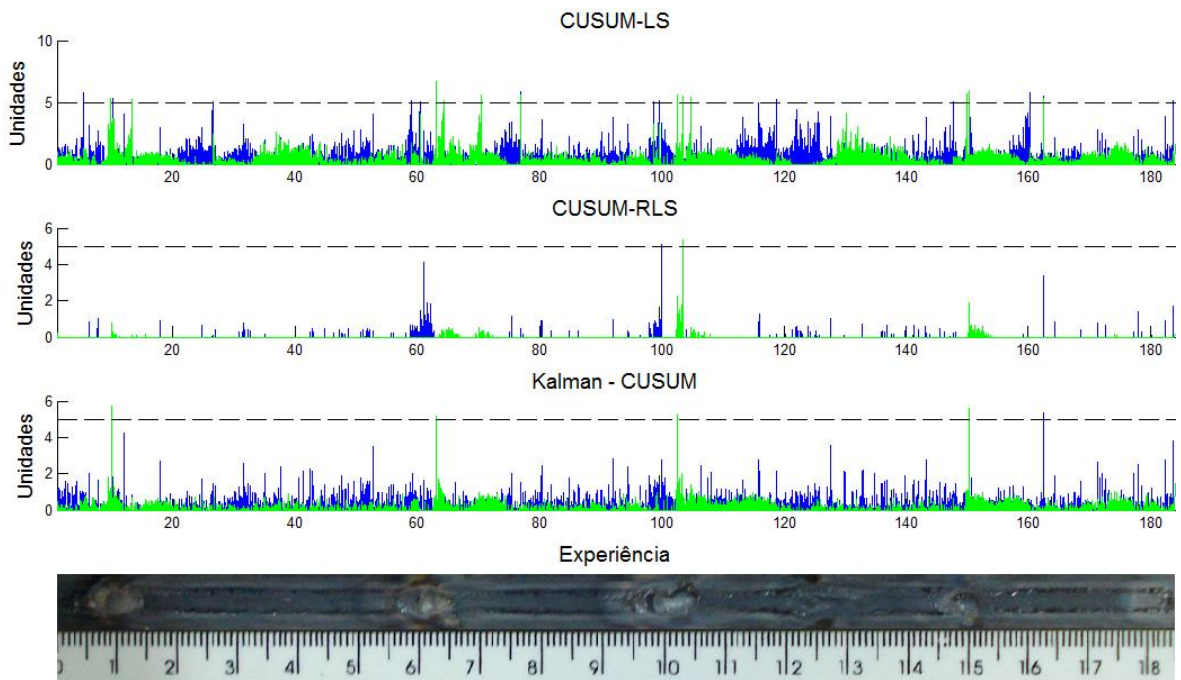


Figura 4.21 Detecção de defeitos com algoritmos *CUSUM-LS*, *RLS* e Kalman para o sinal de tensão na experiência 2.

Unicamente o algoritmo *LS* foi capaz de detectar todos os defeitos, mas, na Figura 4.21 também conseguiu detectar nos comprimentos 25, 70, 78 e 160 mm.

Comparando os resultados obtidos dos sinais de infravermelho e de tensão, pode-se concluir que devido às maiores variações no sinal infravermelho, os diferentes algoritmos utilizados podem detectar com maior facilidade a presença de defeitos. O ajuste dos algoritmos para o sinal de tensão não conseguiu se igualar aos resultados dos apresentados com o sinal infravermelho, além deste ser mais confiável (menos detecções erradas).

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 . Para todos os testes será admitido 95% de confiança, assim, o valor de referência será de 1,96.

Para a detecção do sinal usou-se o filtro Kalman para a estimação do sinal e a distância de Mahalanobis (Equação 2.14) com o teste de confiança do 95% para indicar o alarme. As figuras 4.22 e 4.23 mostram a detecção para as duas experiências.

Pode-se observar que com os ajustes do filtro Kalman foi possível detectar todos os defeitos. Deve-se notar que, nesse caso, o filtro Kalman deve ter uma resposta lenta, dado que se apresentar uma estimação mais comportada, o cálculo da distância atingiria o nível de confiança, que nesse caso foi de 95%. Para corrigir isso, dever-se-ia considerar um nível de confiança maior para atingir a detecção dos defeitos.

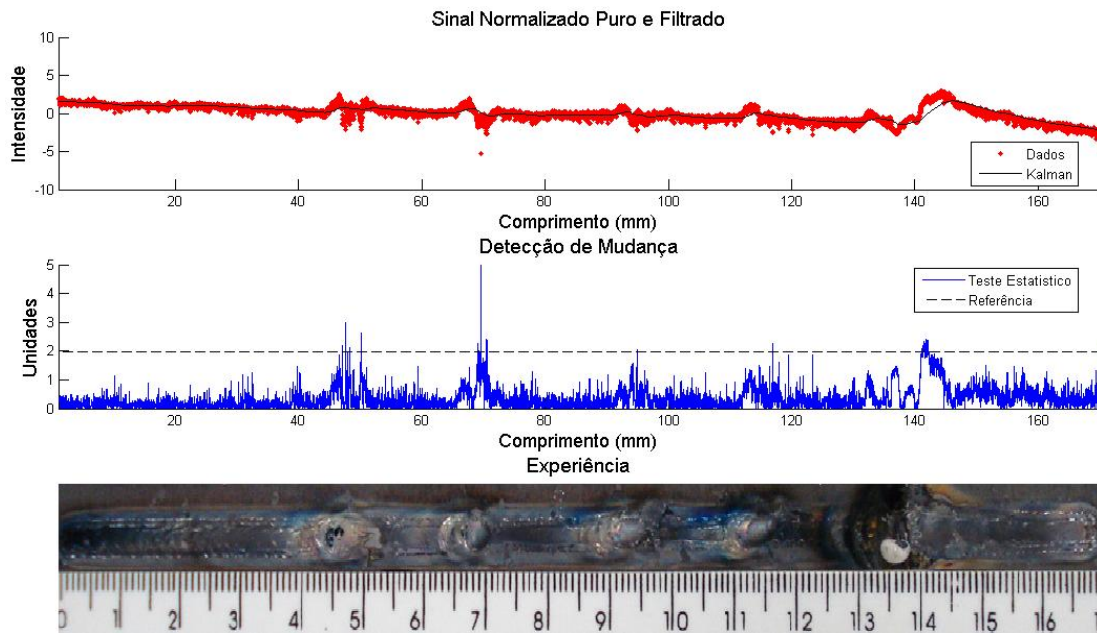


Figura 4.22 Filtro Kalman com distância de Mahalanobis, experiência 1.

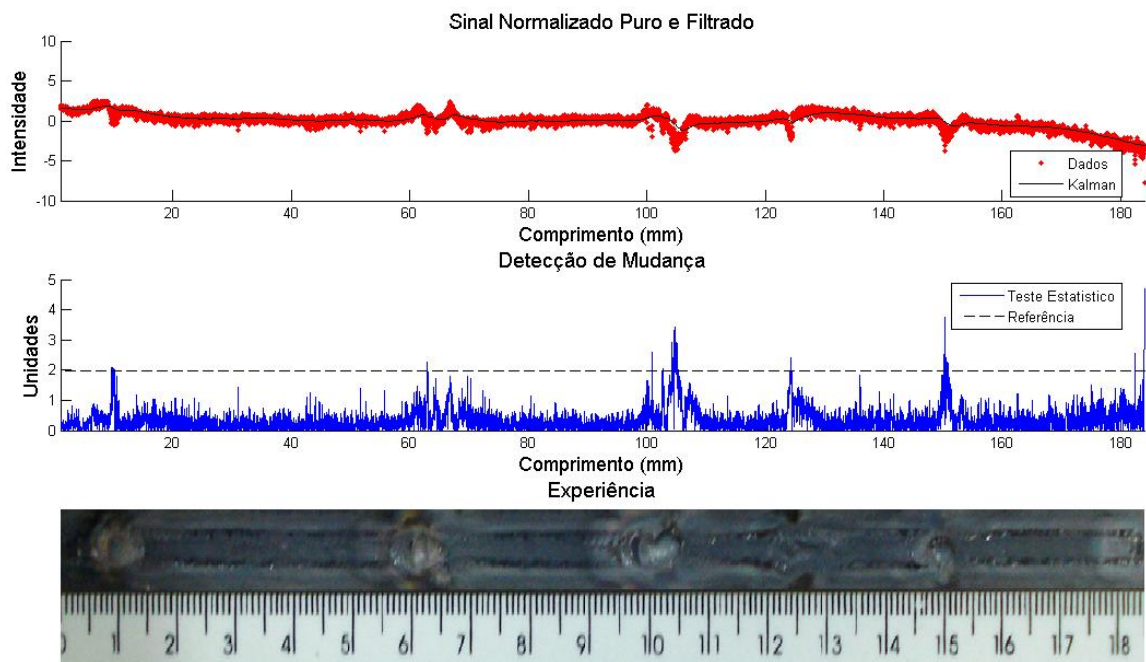


Figura 4.23 Filtro Kalman com distância de Mahalanobis, experiência 2.

Os parâmetros do filtro Kalman das duas figuras anteriores foram $R=1$, $Q=0.000001$

Semelhantemente ao caso da experiência 1, na experiência 2 o algoritmo conseguiu detectar todos os defeitos apresentados. Apenas no final da experiência para os dois casos, o algoritmo detectou um falso defeito, podendo-se concluir então que o teste estatístico

pela distância de Mahalanobis conseguiu detectar as flutuações apresentadas usando o filtro Kalman como estimador.

4.3.2.2 Detecção de Mudança Baseada em Janela Móvel e de dois Modelos

Como se mencionou na seção 2.4.2.5, os algoritmos baseados em janela móvel abordam dois modelos, um rápido (que acompanha o comportamento do sinal) e um lento. A diferença entre os modelos pode ser avaliada por diversos testes estatísticos, e, junto com um valor de referência, determinarão a ausência ou presença de defeitos.

A Figura 4.24 mostra a detecção de defeitos usando o algoritmo Brandt's GLR (Equação 2.21). São observadas as duas estimativas, uma rápida (Filtro 1) e uma lenta, de cor verde (Filtro 2). Observa-se que a estimativa rápida tenta acompanhar o comportamento do sinal, mas não é suave como o filtro Kalman. Pode-se dizer que o filtro 2 acompanha um valor médio do sinal ao longo do tempo.

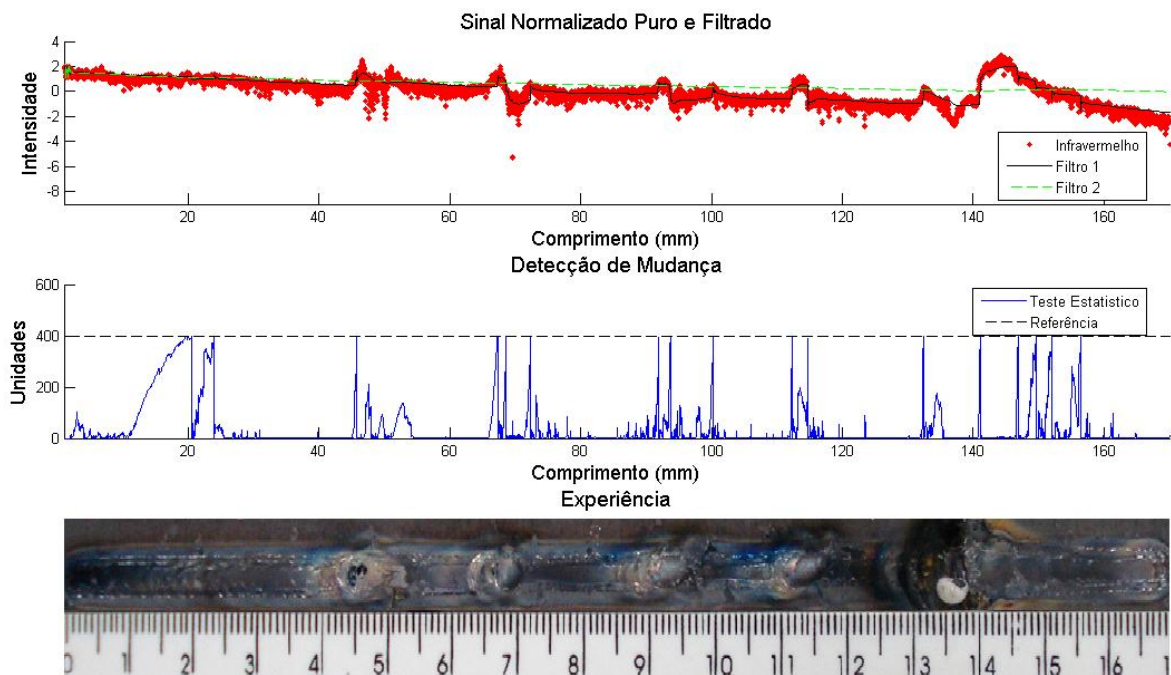


Figura 4.24 Algoritmo Brandt's GLR, experiência 1.

O filtro tem como parâmetros de ajuste a referência h e o tamanho de janela L . Esses parâmetros não foram simples de acertar e várias tentativas foram feitas para obter as figuras 4.24 e 4.25.

O algoritmo Brandt's GLR permitiu detectar satisfatoriamente os defeitos presentes na experiência 1. Unicamente detectou dois alarmes falsos (comprimentos 20 e 24 mm) e perto do final da experiência onde o sinal de temperatura diminui progressivamente.

Os valores de ajuste para o algoritmo da Figura 4.24 foram $h=400$ e $L=700$.

Valores de ajuste no algoritmo da Figura 4.25, $h=360$ e $L=600$.

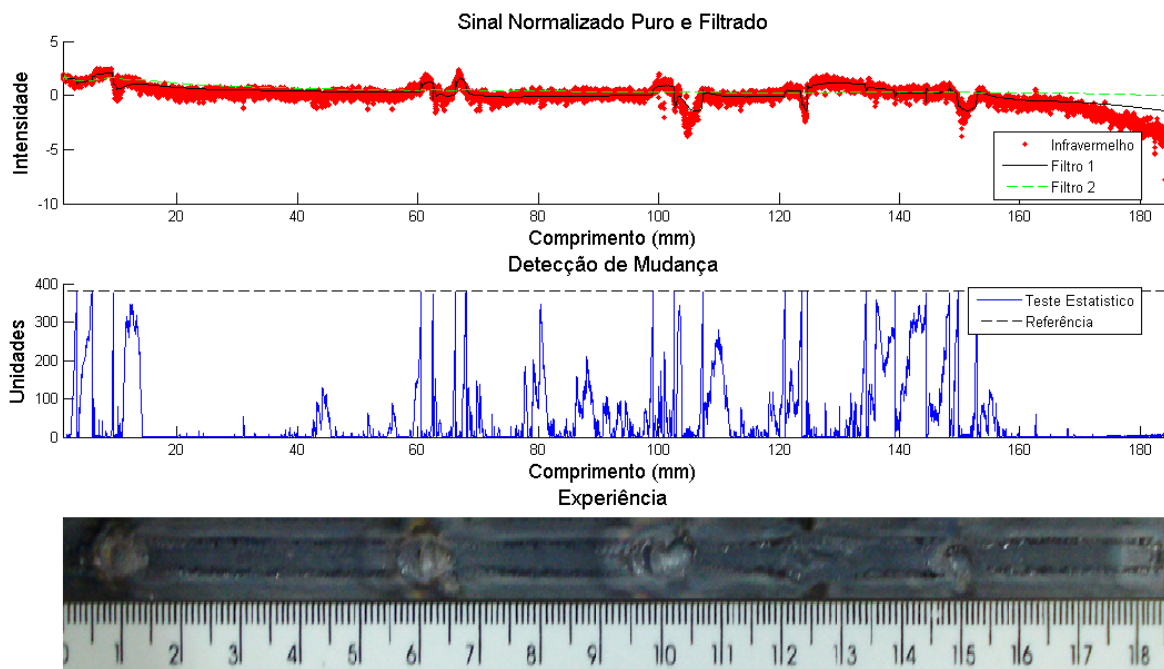


Figura 4.25 Algoritmo Brandt's GLR, experiência 2.

A Figura 4.25 mostra o algoritmo Brandt's na experiência 2. Observa-se que no final da experiência, o filtro 1 não acompanha o comportamento do sinal. A detecção, ainda que consiga acusar os defeitos, apresenta alarmes falsos (134 e 140 mm).

Uma das limitações desse tipo de algoritmo é que um dos modelos contempla toda ou parte da informação disponível, ou seja, a análise só poderia iniciar se L dados tiverem sido adquiridos. Se L for muito grande (como foi na realidade), precisaria de um recurso de memória suficiente para armazenar os dados. Ainda que os algoritmos de janela móvel

permitam detectar mudanças no sinal, computacionalmente são muito pesados, fazendo com que a detecção de defeitos *on-line* seja mais onerosa.

Para se ter uma idéia do peso do algoritmo, um computador demorou aproximadamente 120 s para obter as figuras 4.24 e 4.25, enquanto que outros algoritmos demoram 5,3 s. Utilizou-se um computador de núcleo duplo de 1,8 GHz e 2 GB de memória RAM.

Pode-se usar o algoritmo de Brant's GLR com uma modificação. Em vez de calcular as estimativas dos modelos lento e rápido com o algoritmo de janela, propõe-se o uso do filtro Kalman para calcular as estimativas dos modelos lento e rápido. O teste estatístico é o mesmo que o usado no modelo *GLR*.

Os parâmetros Q e R para as duas estimativas foram ajustados para que o filtro rápido acompanhasse o sinal e o filtro lento variasse de modo mais suave.

As figuras 4.26 e 4.27 mostram a detecção utilizando os filtros Kalman com teste GLR para as duas experiências. Os parâmetros de ajuste são: $h=6,5$; $r1=0,8$; $r2=1$; $Q1=0,00001$ e $Q2=0,0000001$.

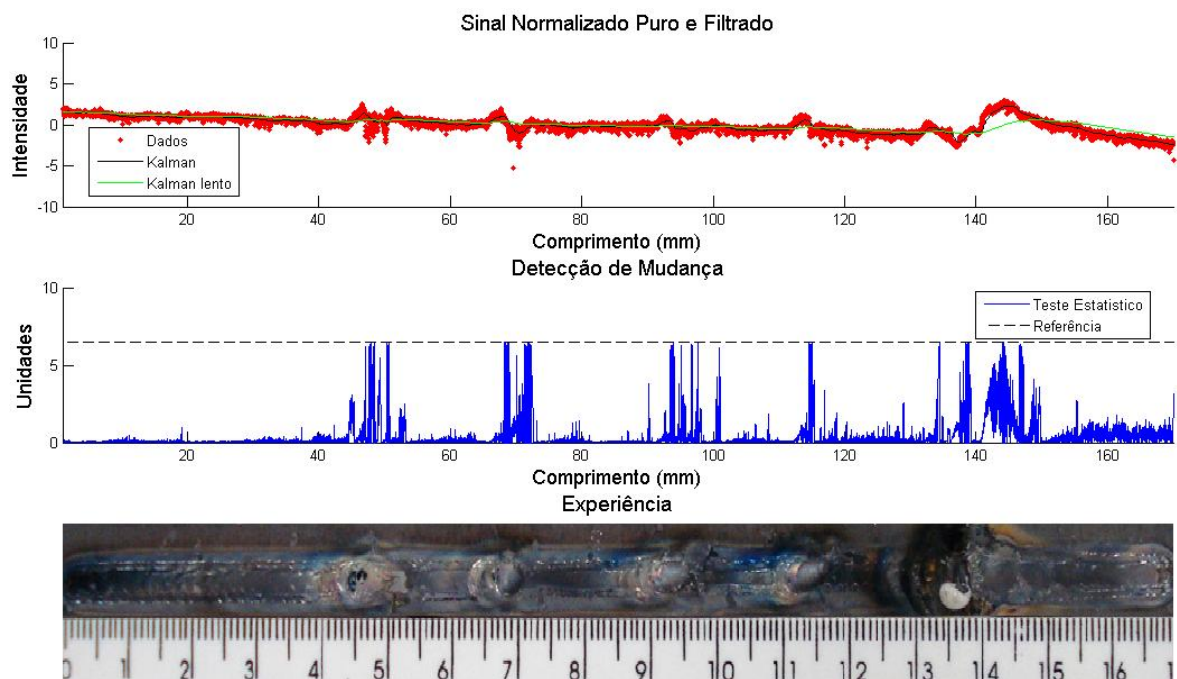


Figura 4.26 Filtros Kalman e teste GLR, experiência 1.

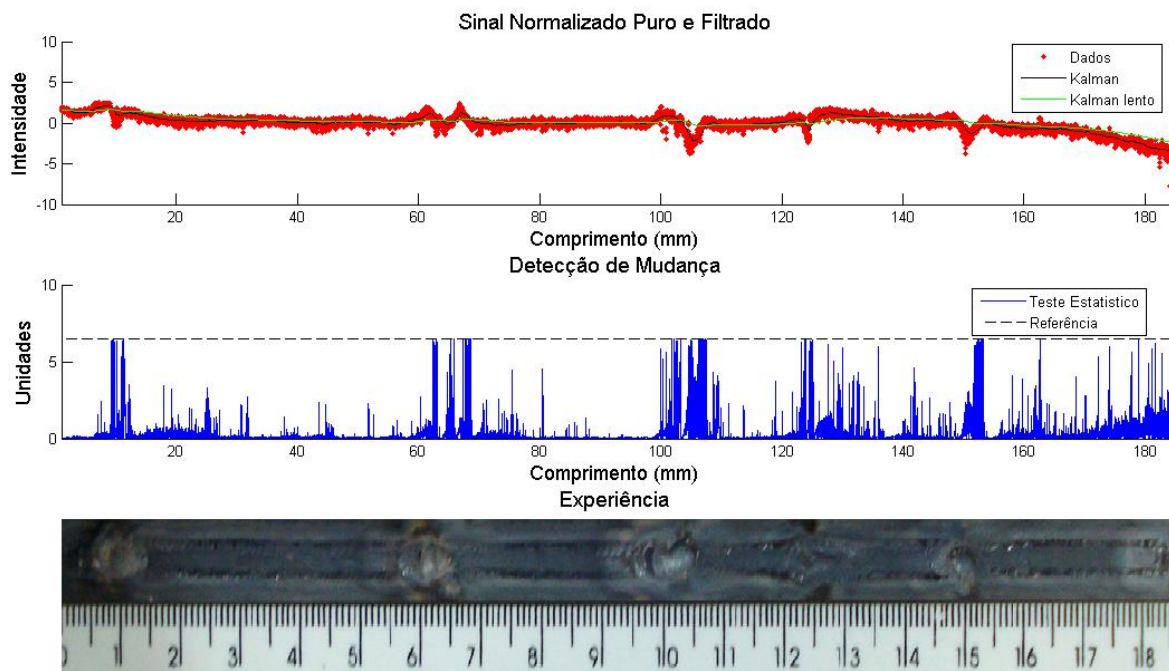


Figura 4.27 Filtros Kalman e teste GLR, experiência 2.

O filtro lento (Kalman lento) acompanha melhor a média do sinal do que o mesmo filtro das figuras 4.26 e 4.27. Nos valores em que não se apresentam mudanças, os filtros adotam quase o mesmo valor, fazendo com que as diferenças entre eles sejam quase nulas e o teste estatístico seja aceito. O teste estatístico usado mostrou um bom comportamento e as regiões de detecção falsas foram mínimas.

Essa mudança na forma de cálculo da estimativa permite que o algoritmo não precise de memória para guardar L dados em comparação com o algoritmo original. Assim, sua aplicação na detecção de mudança *on-line* não necessita de recursos adicionais de *Hardware*.

A Figura 4.28 e a Figura 4.29 mostram os resultados obtidos a partir do uso de dois filtros Kalman com parâmetros diferentes e teste estatístico por distância de Mahalanobis. Para que o teste de confiança acuse o erro, os sinais estimados pelos filtros deverão ter uma variação maior nas regiões onde o sinal infravermelho acusar a detecção de uma flutuação.

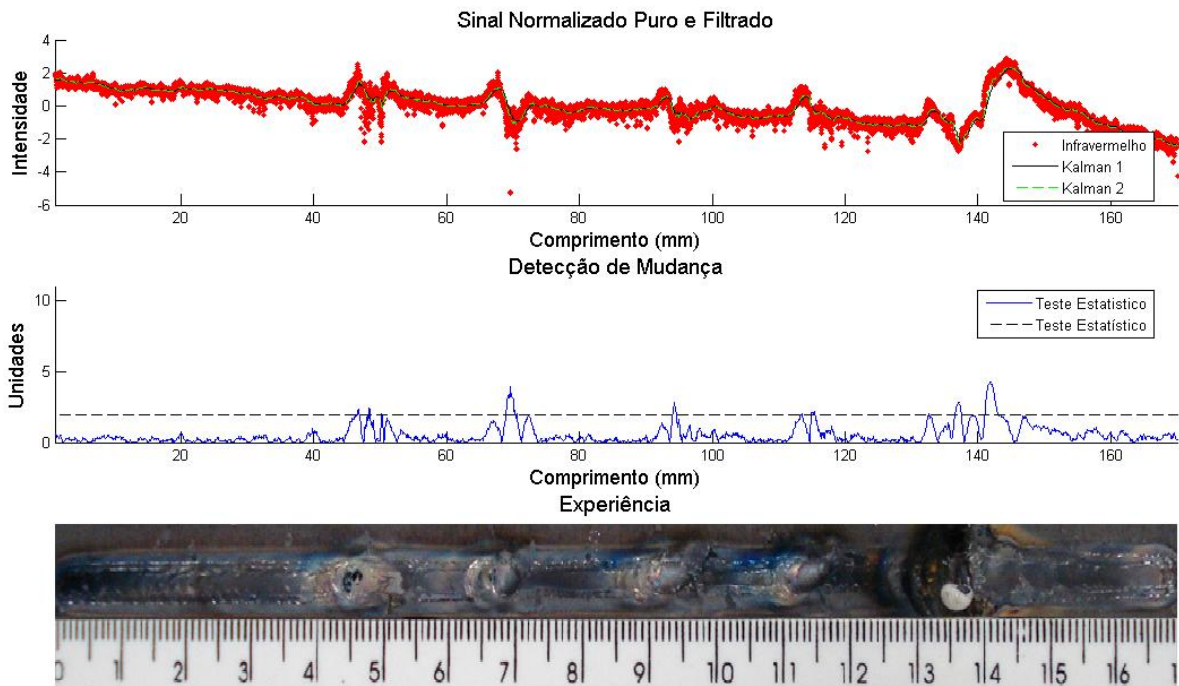


Figura 4.28 Algoritmo com 2 modelos Kalman e distância de Mahalanobis, Experiência 1.

O algoritmo conseguiu detectar todos os defeitos apresentados na experiência 1. Na região de 140 mm, onde aumentou rapidamente as radiações infravermelhas, o teste acusou uma distância maior entre os modelos. Os demais defeitos conseguiram atingir o valor de referência.

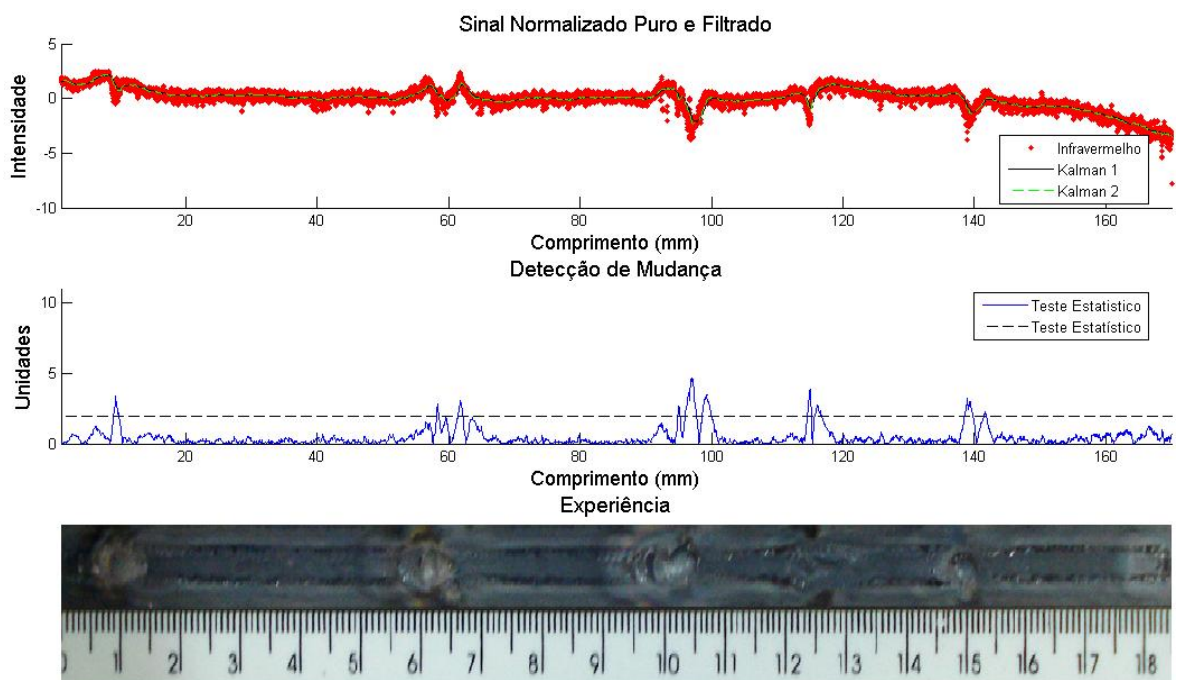


Figura 4.29 Algoritmo com 2 modelos Kalman e distância de Mahalanobis, Experiência 2.

Os parâmetros Q para os estimadores das figuras 4.28 e 4.29 foram $Q_1= 0.00001$ e $Q_2=0.0000085$

De forma similar ao acontecido com a experiência 1, a distância de Mahalanobis mostrou um bom desempenho na detecção dos defeitos. Nesse caso, mesmo que o primeiro defeito (comprimento 10 mm) apresentasse pouca variação no sinal, as mudanças proporcionadas nos estimadores Kalman permitiram que nessa região o teste de confiança falhasse.

Pode-se fazer um resumo das diversas ferramentas para a análise dos dados, visando a detecção e localização dos defeitos a partir do estudo do sinal infravermelho. Usaram-se duas experiências para testar os algoritmos e mostrar as suas vantagens e desvantagens. Durante as experiências o arco foi perturbado com alguns materiais visando não gerar um defeito, mas sim, avaliar se o sensor era capaz de detectar essa mudança, para posteriormente o sensor poder ser avaliado com maior confiança na detecção de defeitos (não superficiais) apresentados durante a soldagem.

O algoritmo *CUSUM-LS* mostrou uma detecção dos defeitos no sinal, embora a estimação do parâmetro tenha apresentado uma resposta lenta. A vantagem do algoritmo se apresenta nos requerimentos computacionais devido a sua simplicidade. A desvantagem não se encontra na detecção, mas sim na estimação do parâmetro cuja resposta é lenta no percurso do processo, fazendo que o valor filtrado não tenha uma boa estimativa da medição feita.

O algoritmo *CUSUM-RLS* conseguiu a detecção dos defeitos nas duas experiências. A sua vantagem em comparação com o anterior apresentou-se no cálculo da estimativa, já que teve um melhor comportamento do sinal infravermelho.

Fez uma mudança no cálculo da estimativa de mínimos quadrados por filtro Kalman. Esse filtro com o teste estatístico *CUSUM* permitiu a detecção dos defeitos, além de apresentar a melhor estimativa dos filtros usados. Pese a modificações feitas na configuração do novo algoritmo, detectou-se vários defeitos “falsos”. A importância principal desse algoritmo é a sua capacidade de apresentar a melhor estimativa do sinal lido visando o posterior controle da temperatura *on-line*.

Usou-se o sinal de tensão para detectar os defeitos utilizando os algoritmos que deram melhores resultados (Figuras 4.20 e 4.21). Numa experiência observou-se que o algoritmo CUSUM-LS conseguiu detectar todos os defeitos, mas na outra, com outros parâmetros, não conseguiu atingir a mesma expectativa, em vez disso, observou-se uma série de alarmes “falsas” no resultado final. O algoritmo Kalman-CUSUM não conseguiu atingir a mesma expectativa apresentada com o sinal infravermelho. Pode-se concluir que mesmo que alguns algoritmos utilizem o sinal de tensão para a detecção de defeitos, sua repetibilidade é baixa, sendo inclusive necessárias as mudanças dos parâmetros de ajuste dos algoritmos de detecção.

Foi avaliado o filtro Kalman com teste de hipótese a partir do cálculo da distância de Mahalanobis. Esse algoritmo permitiu também a detecção dos defeitos. Importante mostrar que a estimativa deve ter um comportamento lento, porque se acompanhar mais rapidamente o sinal (resultando em pequenos valores de resíduos), o valor da distância poderia estar no nível de confiança, ou seja, não detectar o defeito.

Foram avaliados algoritmos de detecção baseados em Janela Móvel e de dois modelos. O algoritmo Brandt's apresenta uma forma diferente de detecção de defeitos a partir do uso de uma “memória” dos eventos passados. Mostrou várias detecções falsas. Mesmo com o ajuste do algoritmo não foi possível minimizar esse comportamento. Além da detecção “falsa” de defeitos, outra das suas desvantagens é que esse algoritmo precisa de recursos computacionais.

Conhecendo a metodologia de detecção a partir de dois modelos, foram implementados dois algoritmos que usam duas estimativas (lenta e rápida) a partir do filtro Kalman. Usou-se o teste GLR (a partir do algoritmo Brandt's *GLR*) e também a distância de Mahalanobis. Ambos detectaram os defeitos. O teste de Razão de Semelhança Generalizada (*GLR*), precisa que os dois modelos sejam diferente um do outro para que o teste acuse o defeito (Figura 4.26 e Figura 4.27). Já o cálculo a partir da distância de Mahalanobis requer que os dois modelos sejam diferentes em menor proporção que no caso do *GLR*.

Todos os algoritmos conseguiram localizar os defeitos nas zonas afetadas, inclusive, a variação da posição do defeito acusado pelo algoritmo de detecção foi muito baixa (menos de 2 mm para o pior caso), mostrando assim que a partir dos mesmos algoritmos de

detecção é possível também acusar com relativa precisão a posição de um defeito durante a experiência.

4.4 MONITORAMENTO E ANÁLISE *ON-LINE*

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 *on-line* para esses casos.

As análises apresentadas anteriormente foram testadas *off-line*, até porque vários dos algoritmos apresentados prescindiam que fosse assim, já que precisaram normalizar os dados. Nesta última seção se observará a possibilidade da implementação de um algoritmo de detecção de mudança *on-line*.

No trabalho realizado por Grad e colaboradores (Grad *et al.*, 2004), se menciona que há três níveis de controle de qualidade em tempo real estabelecidos pela indústria (Figura 4.30). 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; e o terceiro consiste na capacidade de corrigir os parâmetros de soldagem durante o processo para assegurar uma qualidade apropriada para a solda.

Como mencionado no parágrafo anterior, no primeiro nível pretende-se detectar automaticamente um defeito durante a solda. Já foram mostrados algoritmos que permitiram detectar automaticamente defeitos *off-line*. Em seguida, será mostrada uma simulação feita a partir de dados adquiridos de uma experiência real, na qual os algoritmos de detecção foram projetados para funcionar *on-line*.

Como se mostrou na seção 4.3.2, existem vários algoritmos que cumpriram com o objetivo de detectar automaticamente os defeitos para duas experiências diferentes. Dos algoritmos apresentados neste trabalho, o mais simples e que apresentou bons resultados foi o Kalman com teste estatístico *CUSUM* (Figura 4.17 e Figura 4.18).

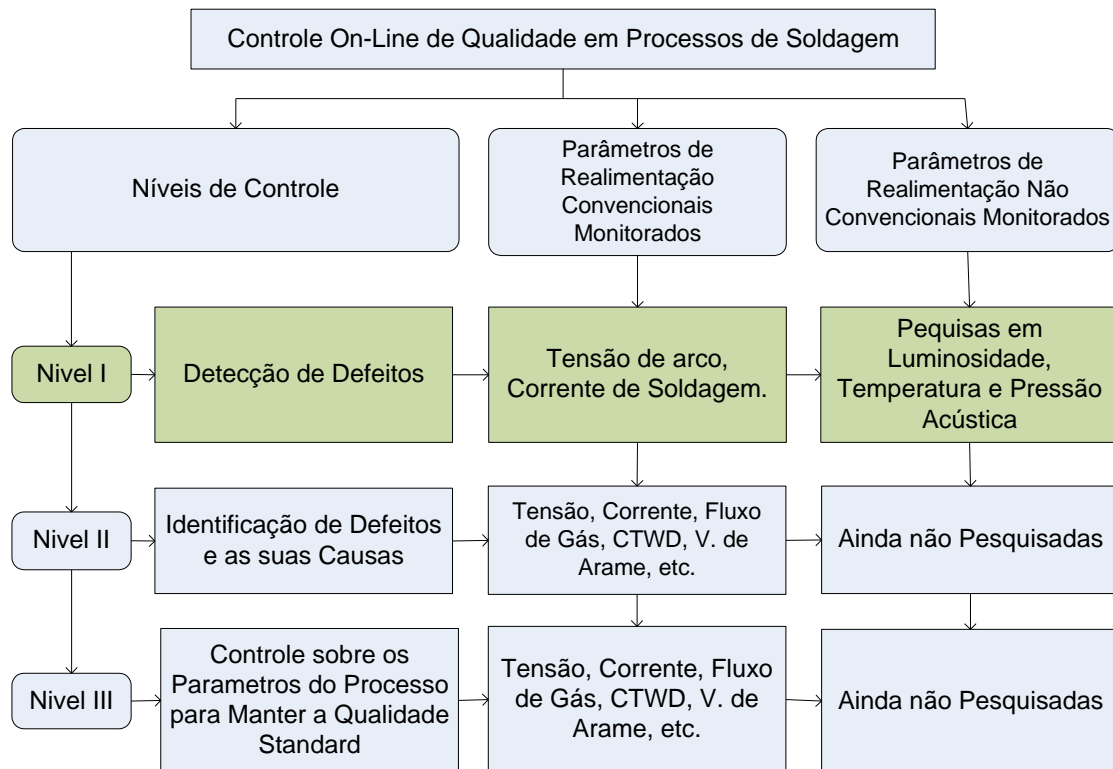


Figura 4.30 Controle de qualidade em tempo real.

Foi desenvolvida uma simulação em LabVIEW[®] para a detecção de defeitos *on-line* a partir do sinal infravermelho. O programa lê dados do sensor infravermelho obtidos a partir de uma experiência. Depois ele simula a aquisição do sinal infravermelho e estima o valor da tensão presente no sensor infravermelho, que depois avaliará os resíduos pelo teste estatístico *CUSUM*. A Figura 4.31 mostra a janela do programa de simulação da detecção de defeitos. Nesse gráfico se observa uma janela que mostra os dados de uma experiência. Ao lado se apresenta o cálculo em *on-line* da estimativa (linha de cor vermelho) a partir da simulação da aquisição dos dados. Uma terceira janela vem acompanhada de um LED, serve para acusar a detecção de uma falha. Para uma melhor apresentação dos dados, observa-se numa quarta janela o resultado da detecção de defeitos em função do comprimento.

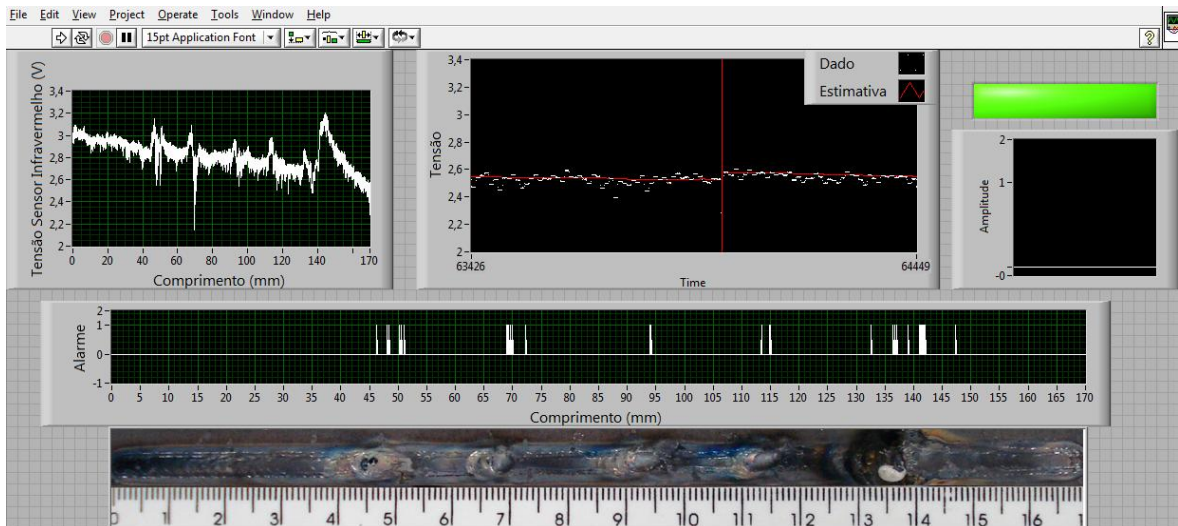


Figura 4.31 Janela do programa de simulação *on-line*.

Na simulação desenvolvida não se apresenta a evolução do teste estatístico *CUSUM* dos resíduos, porém é apresentado o lugar no qual o teste acusou defeito. Os parâmetros de ajuste H e ν do algoritmo *on-line* são diferentes dos apresentados para as Figura 4.17 e Figura 4.18, pois essas análises foram realizadas com dados normalizados. A seguir se apresenta o teste estatístico da análise *on-line* para a experiência 1. Os valores de configuração do filtro foram: $Q=0,00001$, $R=1$, $H=7$, $\nu=0,05$.

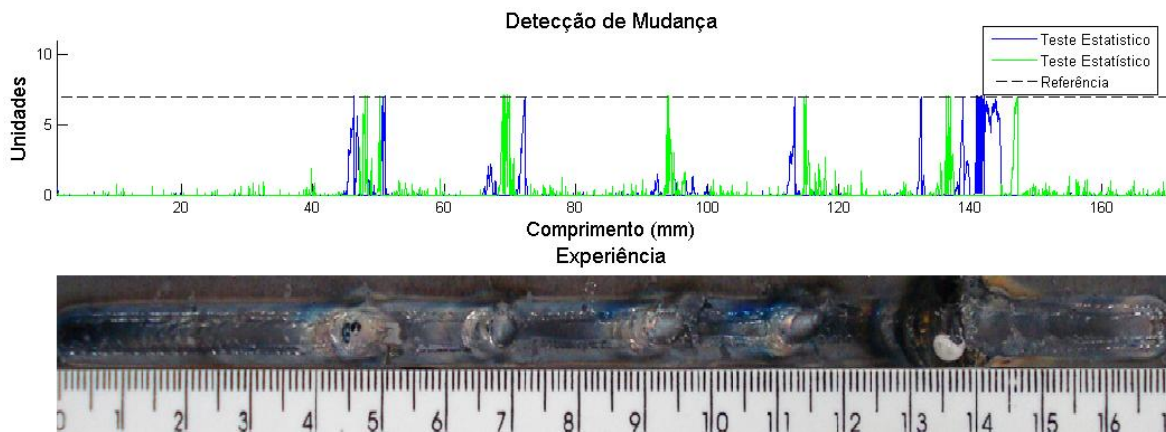


Figura 4.32 Teste estatístico dos resíduos para a análise *on-line*.

A simulação feita permite mostrar que devido aos baixos recursos computacionais apresentado pelo algoritmo Kalman-*CUSUM* é possível a sua implementação em *hardware* que permita monitorar e detectar os defeitos *on-line*.

Mostrou-se que mesmo sem os dados estarem normalizados é possível a detecção dos defeitos com um simples ajustes dos parâmetros do algoritmo. Estes mesmos ajustes foram os utilizados para os gráficos apresentados no apêndice C.

5 CONCLUSÕES

Mostrou-se que o sistema projetado e desenvolvido para a monitoração da radiação infravermelha emitida pela região da poça-arco no processo GTAW proporcionou informações adicionais às obtidas pelo monitoramento convencional de corrente e tensão. Essas informações puderam ser avaliadas de forma qualitativa e quantitativa. Utilizando-se algoritmos de detecção de flutuações no sinal de temperatura, obtiveram-se estimativas da localização da falha para posterior correção.

- O sistema de aquisição implementado permitiu a leitura dos sinais de interesse. Junto com o software de aquisição desenvolvido em LabVIEW[®], conseguiu-se capturar os sinais para a posterior análise.
- Para as condições experimentais detalhadas no documento, mostrou que o valor médio no sinal infravermelho ou nível DC está relacionado com a corrente de maneira direta e de forma indireta com a penetração.
- Mostrou-se que o filtro Kalman estima com melhor desempenho os sinais lidos em comparação com outros filtros estudados neste trabalho.
- Usando os algoritmos de detecção com o sinal de temperatura é possível conseguir informações mais confiáveis que as obtidas utilizando o sinal de tensão.
- Devido às simplicidades dos algoritmos de estimação de parâmetros e detecção de mudança é viável o uso deles em sistemas *on-line* para a monitoração e controle da soldagem.
- Dado que o sinal de temperatura registra novas informações durante a soldagem, demonstrou-se a viabilidade do sensoriamento da radiação infravermelha de ponto.
- O presente trabalho mostrou de forma exploratória a viabilidade da monitoração infravermelha de ponto, assim como as diferentes técnicas de detecção de mudança no sinal. Dificilmente pode-se definir o tipo de defeito apresentado durante a soldagem, mas pode-se determinar a sua localização.

6 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abre um leque de projetos a serem desenvolvidos no laboratório GRACO. A idéia principal é criar uma metodologia que permita a fusão dos dados obtidos de sensores como infravermelho, espectrômetro, decibelímetro, câmara de alta velocidade e termográfica, visando monitorar o processo e controlar uma fonte de soldagem.

As experiências descritas e análise dos dados foram realizadas a partir de experimentos com soldagem GTAW sobre uma placa plana (*bead-on-plate*). A seqüência dos trabalhos futuros seria experimentar em soldas com chanfro.

Planeja-se a criação de uma base de dados que armazene o comportamento apresentado pelo sensor quando esse detecta uma mudança no estado, caracterizado pela formação de um defeito. Dessa forma, poder-se-ia ajustar os parâmetros da máquina com o intuito de evitar o surgimento do defeito ou a sua propagação, evitando gastos na recuperação da peça, ou ainda a falha da peça em serviço.

Também se pode experimentar a viabilidade do uso da técnica em outros processos de soldagem também estudados no laboratório GRACO, por exemplo, o processo GMAW. Atualmente esse processo é monitorado por uma câmara de alta velocidade ou acusticamente por um decibelímetro.

Como foi descrito neste documento, é de suma importância a monitoração *on-line* dos parâmetros da soldagem. A simplicidade dos algoritmos descritos neste documento possibilita a sua implementação em arquiteturas reconfiguráveis (*FPGA*), ou sistemas modernos ARM que suportam plataformas Linux e Microsoft Windows CE 5.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB (acessado em 02,2007)

Disponível em:

www.abb-control.com/electronicscat/AC02017.5.7-8.pdf

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.; da Cunha, F. R., (2006). “*A statistical approach for monitoring stochastic welding processes*”, In: *Materials Processing Technology*. 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.

AMPERES Automation (acessado em 04,2008)

Disponível em:

<http://www.amperesautomation.hpg.ig.com.br/temp.html>

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.

Araujo, C. F. B., (2004). “*Estudo da Monitoração por Infravermelho como Indicador de Penetração em Soldas obtidas no Processo TIG.*” In: *Dissertação (Mestrado)*, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

American Welding Society. (1951). “*Welding Handbook*”. 3. ed. New York, AWS.

American Welding Society. (1976). “*Welding Handbook*”. 7. ed. New York, USA.

American Welding Society. (1991). “*Welding Handbook*”. 8 ed., Miami, AWS.

- 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 Applications*”, In: Prentice-Hall, Inc.
- Bebiano, D. F. V., Franco, F. D., Alfaro, S. C. A., (2007) “*Real-Time Welding Defects Monitoriment by Spectrometry*” In: 19th International Congress of Mechanical Engineering.
- Bonacorso, N. G., Dutra, J. C., (2007). “*Adequação do Processo Plasma com Alimentação Automática de Arame para Recuperação de Superfícies por Soldagem Robotizada*” In: Soldagem & Inspeção, Vol 12, N° 4.
- 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.
- Brown, R.G., Hwang, P.Y.C., (1997). “*Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*”, 3rd ed, In: John Wiley & Sons.
- Calex Electronics Limited (acessado em 07, 2006).
Disponível em:
www.calex.co.uk
- Cao, X., Jahazi, M., Immarigeon, J.P., Wallace, W., (2006). “*A review of laser welding techniques for magnesium alloys*”, In: Journal of materials Processing Technology
- Correia, D. S., Ferraresi, V. A., (2007). “*Welding process selection through a double criteria: Operational costs and non-quality costs*” In: Journal of materials Processing Technology
- Doebelin, E. O., (2004), “*Measurement Systems Application and Design*”. 5 ed. In: Mc Graw Hill.
- Duda, R. O., Hart, P. E., Stork, D. G. (2004). “*Pattern Classification 2nd Edition*”. In: Wiley Interscience, John Wiley & Sons Inc.
- Eagle Technology (acessado em 08, 2006).
Disponível em:
http://www.eagledaq.com/display_cat.php?cat=1&parent=103&sub=110

- Faceli, K., (2001), “Combinação de Métodos de Inteligência Artificial para Fusão de Sensores”, In: Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Fan, H., Ravala, R. K., Wikle III, H. C., Chin, B. A., (2003), “*Low-cost infrared sensing system for monitoring the welding process in the presence of plate inclination angle*”, In: Journal of materials Processing Technology
- Farson, D., Richardson, R., Li, X., (2002). “*Infrared Measurement of Base Metal Temperature in Gas Tungsten Arc Welding*”, In: American Welding Society.
- Feynman, R. P., Leighton, R.B., Sands, M. L., (1964). “*Lectures on physics*” Vol 1. In: Addison-Wesley.
- FLUKE (acessado em 04/2008)
- Disponível em:
[http://us.fluke.com/usen/products/AccessoryDetail.htm?cs_id=9323\(FlukeProducts\)&catalog_name=FlukeUnitedStates](http://us.fluke.com/usen/products/AccessoryDetail.htm?cs_id=9323(FlukeProducts)&catalog_name=FlukeUnitedStates)
- Franco, F. D., Bebiano, D. F. V., Alfaro, S. C. A., (2008 A), “Detecção de defeitos em soldagem TIG utilizando sensor infravermelho”, In: 63° Congresso Anual da ABM.
- 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.
- Govardhan, S.M., Wikle III, H.C., Nagarajan, S., Chin, B.A., (1995), “*Real-time welding process control using infrared sensing*”, In: American Control Conference.
- Grad, L., Grum, J., Polajnar, I., Slabe, J. M., (2004) “*Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding*”, In: International Journal of Machine Tools & Manufacture design, Research and Application.
- Granja. T.V., (2001). “Desenvolvimento de estratégias de condicionamento de sinais provenientes de processo de soldagem” In: Technical report, Universidade de Brasília.
- Gustafsson, F. (2000). “*Adaptive Filtering and Change Detection*”. In: John Wiley & Sons.
- Infratemp (acessado em 04/2008)
- Disponível em:
www.ucs.br/ccet/demc/vjbrusam/inst/aula_07.pdf
- Jazwinski, A. H., (1970). “*Stochastic Processes and Filtering Theory*”, 1st ed, Academic Press, INC.

- 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.
- Lancaster, J. F. (1986). “*The Physics of Welding*”, 2nd Edition, Pergamon Press.
- 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.
- Machado, I. G. (2000). “*Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações*”. In: Porto Alegre – Imprensa Livre.
- Manolakis, D. G., Ingle, V. K., Kogon, S. M. (2005) “*Statistical and Adaptive Signal Processing*”. In: Artech House Inc.
- Marques, P.V. (1991). “*Tecnologia da Soldagem.*” Escola de Engenharia, Universidade de Minas Gerais, ESAB, Belo Horizonte.
- MathWorks Inc. (acessado em 01/2008)
Disponível em:
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/stats/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/stats/normplot.html>
- 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.
- 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.
- Miller – Welding Equipment. (acessado em 07/2006)
Disponível em:
<http://www.millerwelds.com/education/TIGhandbook/>
- Mehra, R. K., (1970). “*On the Identification of Variances and Adaptive Kalman Filtering*”, In: IEEE Transactions on Automatic Control.
- 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.
- Modenesi, P. J. (2001). "Soldagem I. Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas", Belo Horizonte.
- Modenesi, P. J. (2003). "Classificação e Utilização de Processos de Soldagem". In: Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Modenesi, P. J. (2007). "Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais.", Belo Horizonte.
- Nagarajan, S., Chen, W. H, Chin, B. A. (1989). "*Infrared Sensing for Adaptive Arc Welding*", Journal of American Welding Society.
- Nagarajan, S., Banerjee, P., Chen, W. H, Chin, B. A. (1992). "*Control of the Welding Process Using Infrared Sensors*", In: IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- 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.
- Noriega, G., Pasupathy, S., (1992). "*Application of Kalman Filtering to Real-Time Preprocessing of Geophysical Data*", In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- Norrish J., (1992), "*Advanced Welding Processes*", 1.ed. US, editorial IOP Publishing Inc. National Instruments (acessado em 05/2006)
- Disponível em:
<http://www.ni.com/labview/>
- Parmar, R. S., (1997), "*Welding Processes and Technology*", 2 ed, In: Khanna Publishers.
- Paxson, V. (1999): "*Bro: A System for detecting network intruders in real-time*". In: Computer Networks, Vol. 31, pp 2435-2463.
- Pollock, D.S.G., (1999). "*A Handbook of Time Series Analysis, Signal Processing and Dynamics*", Vol. 1. In: Signal Processing and its Applications, 1st edn, Academic Press.
- 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.

- Sanders, P. G., Leong, K. H., Keske, J. S., Kornecki, G., (1998), “*Real-time monitoring of laser beam welding using infrared weld emissions*”, In: Journal of Lasser Applications.
- 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.
- 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.
- Takashi, E.T., (2003). “Sistema de monitoração de sinais para processos de soldagem robotizada.” In: Technical report, Universidade de Brasília.
- 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.
- Tsai, C. H., Hou, K. H., Chuang, H. T., (2006). “*Fuzzy control of pulsed GTA welds by using real-time root bead image feedback*” In: Journal of materials Processing Technology
- Vanzetti, R., (1972). “*Practical Applications of Infrared Techniques*” In: John Wiley & Sons, INC.
- Venkatraman, B., Menaka, M., Vasudevam, M., Raj, B., (2006), “*Thermography for Online Detection of Incomplete Penetration and Penetration Depth Estimation*”, In: 12th A-PCNDT – Asia-Pacific Conference, Auckland, New Zealand.
- 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.
- Villani, P., Modenesi, P. e Bracarense, A., (2005), *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*, 1.ed. Belo Horizonte - Brasil, Editora UFMG 362 p.
- 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.
- Wikipedia (acessado em 04/2008)
- Disponível em:
- <http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Blackbody-pt.png>

- 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.
- Xavier, C. R., de Castro, J. A., Ribas, P. R., da Silva, A. J., (2008), "A utilização da Simulação Numérica na Comparação da Soldabilidade entre os Aços AISI-1045 e AISI-4340" In: 63º Congresso Anual da ABM, Santos, SP.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PROGRAMA DO MICROCONTROLADOR QUE CONTROLA O MOTOR

```

#include<16C63A.h> // Biblioteca do microcontrolador
#use delay(clock=3869042) // Seto o clock interno para 4000000
#use RS232(BAUD=4800,RCV=pin_C7,xmit=PIN_C6,BITS=8,PARITY=N,ERRORS)//seta a taxa de transmissão em 2400 bps
#fuses XT,NOWDT,noPROTECT,PUT,NOBROWNOUT,NOLVP,NOCPD,NOWRT //Seta parâmetros de inicialização
#define TEMPO_RAMPA_1 50 //constante de aceleração da rampa 25ms por passo
#include <stdlib.h>
//variáveis para o timer
boolean var0=0,var1=0; //pisca porta
float cont_timer=0; //contador de incremento aumenta d cada 50ms

//variáveis para recepção serial
int temp_caractere; //caractere de armazenamento do byte recebido
int vetor_recebe[20]; //buffer para armazenar burst de transmissão serial
int fim_temp_vetor=0; //armazena o fim do burst armazenado no vetor_recebe
int cont_vetor=0; //grava o número de caracteres armazenados no vetor
int posVirgula=0;
int pronto_TX=0; //indica que uma transmissão serial completa foi recebida e //armazenada em vetor_recebe
int numero_enter=0; //indica a chegada do 1 enter do burst
int pos_ponto_ponto=0; //indica a posicao onde foi encontrada a virgula para serpara //campos

//variáveis para controle motor
float Velocidade=0; //velocidade em mm/s
int tempo_aquisicao=0; //tempo de deslocamento em segundos
int distancia=0; // em mm
int fim_curso_1=0; //indica direcao de deslocamento
int fim_curso_2=0; //indica direcao de deslocamento
int pronto_executa=0; //indica a chagada do comando exe

//variáveis motor
int16 aux=0,aux2=0; //seta a velocidade do timer do motor

////////////////////////////////////
// Serviço de interrupção //
////////////////////////////////////
#int_timer1
void int_tim_1 (void)
{
    #asm
    btfsc PORTC,0
    goto ass11
    bsf PORTC,0
    goto ass22
ass11:
    bcf PORTC,0
ass22:
    #endasm
    aux=get_timer1(); //Paso a aux o numero de vezes que o Timer1 conto no //servicio de interrupções
    set_timer1(aux2+aux); //Actualizo o Timer1 para
}

////////////////////////////////////
// Inicializa a o timer 1//
////////////////////////////////////
void configura_tmr1 (void)
{
    output_high(pin_b0);
    delay_ms(1000);
    output_low(pin_b0);

    output_low(PIN_C0); //
    output_low(pin_c1);
    setup_timer_1 (T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_1);
    aux2=65535.0-3974042.0/(320.0); //Esta é a equação que relaciona a velocidade com o //numero de vezes que tem que contar
}

////////////////////////////////////
// Roda a mesa se for recebido como parametro velocidade e tempo de deslocamento//
// // //
// speed velociade da mesa em mm/s // //

```

```

// tempo tempo de funcionamento da mesa //
// Roda a mesa se for recebido como parametro velocidade e distancia para deslocamento//
void roda_com_velocidade_tempo(float speed, int tempo)
{
float temp;
temp = ((tempo*1000.0) / 50); //50ms é o tempo definido no timer
cont_timer=0;
aux2=(int) 65535.0-3974042.0/(320.0*speed);
enable_interrupts (int_timer0);
enable_interrupts (int_timer1);
while (cont_timer < temp); //roda enquanto o tempo nao for menor que o definido
disable_interrupts (int_timer0);
disable_interrupts (int_timer1);
cont_timer=0;
}

// Roda a mesa se for recebido como parametro velocidade e distancia para deslocamento//
// speed velocidade da mesa em mm/s //
// dist distancia a se deslocar //
void roda_com_velocidade_distancia(float speed, int dist)
{
float temp=0;
temp = (((dist*1.0)/speed)*1000 / 50); //supõe que a velocidade seja constante o que nao é
cont_timer=0;
aux2=(int) 65535.0-3974042.0/(320.0*speed);
enable_interrupts (int_timer0);
enable_interrupts (int_timer1);
while (cont_timer < temp); //roda enquanto o tempo nao for menor que o definido
disable_interrupts (int_timer0);
disable_interrupts (int_timer1);
cont_timer=0;
}

#INT_TIMER0 //interrupção que é ativada toda vez que estora o registrador do
void interrupcao_timer() //timer 0 estora a cada 50 ms.
{
set_timer0(15536); //ajusta o timer para estourar novamente em 50 ms
// cont_timer = cont_timer +1;
if (var0==0)
{
output_high(pin_b2);
var0=1;
}
else
{
output_low(pin_b2);
var0=0;
}
}

#int_timer3 //interrupção que é ativada toda vez que estora o registrador do
void timer_3() //timer 1 estora a cada 1 ms.
{
set_timer3(15536); //ajusta o timer para estourar novamente em 1 ms
if (var1==0)
{
OUTPUT_B(0x01);
var1=1;
}
else
{
OUTPUT_B(0x00);
var1=0;
}
}

#INT_RDA
void Le_serial() //trata a recepção serial
{
temp_caractere=getc(); //recebe dado da porta serial
if(temp_caractere==13)

```

```

{
if(numero_enter==0) //detecta o primeiro "Enter"
{
numero_enter=1; //muda o estado indicando a recepcao do primeiro "Enter"
return;
}
else
{
numero_enter=0; //muda o estado indicando a recepcao do segundo "Enter"
fim_temp_vetor=cont_vetor-1; //grava o número de caracteres armazenados no vetor
cont_vetor=0; //zera contador de vetor
pronto_TX=1; //indica que está pronto para transmitir dados //armazenados no Vetor
}
}
if(numero_enter==1) //armazena caracteres no vetor caso haja recebido o caractere //"Enter"
{
if(temp_caractere=='.')
{
pos_ponto_ponto=cont_vetor;
}
if(temp_caractere==',')
{
posVirgula=1;
}
vetor_recebe[cont_vetor]=temp_caractere; //recebe o caractere transmitido
cont_vetor++; //conta quantos caracteres foram gravados no vetor
}
//Detecta o primeiro e segundo caractere "Enter"
}

void imprime_estado_variaveis()
{
putc(13);
printf("VEL:");
printf("%1.1f", Velocidade);
putc(13);
putc(13);
printf("TEM:");
printf("%i", tempo_aquisicao);
putc(13);
putc(13);
printf("DIS:");
printf("%i", distancia);
//envia_int_to_string(distancia);
putc(13);

putc(13);
printf("FI1:");
printf("%i", fim_curso_1);
//envia_int_to_string(fim_curso_1);
putc(13);
putc(13);
printf("FI2:");
printf("%i", fim_curso_2);
//envia_int_to_string(fim_curso_2);
putc(13);
}
float string_to_int(int inicio, int fim)
{
float temp_campo=0;
if(posVirgula==1)
{
if ((fim-inicio)==3)
{
temp_campo=(vetor_recebe[inicio+1]-48)+((vetor_recebe[inicio+3]-48)*0.1);
}
if ((fim-inicio)==4)
{
temp_campo=(10*(vetor_recebe[inicio+1]-48))+((vetor_recebe[inicio+2]-48)+((vetor_recebe[inicio+4]-48)*0.1);
}
if ((fim-inicio)==5)
{
temp_campo=(10*(vetor_recebe[inicio+1]-48))+((10*(vetor_recebe[inicio+2]-48))+((vetor_recebe[inicio+3]-48)+((vetor_recebe[inicio+5]-48)*0.1);
}
}
}

```

```

else
{
if ((fim-inicio)==1)
{
temp_campo=(vetor_recebe[inicio+1]-48);
}
if ((fim_temp_vetor-inicio)==2)
{
temp_campo=(10*(vetor_recebe[inicio+1]-48)+(vetor_recebe[inicio+2]-48);
}
if ((fim_temp_vetor-inicio)==3)
{
temp_campo=(100*(vetor_recebe[inicio+1]-48)+(10*(vetor_recebe[inicio+2]-48)+(vetor_recebe[inicio+3]-48);
}
}
posVirgula=0;
return temp_campo;
}

void analisa_comandos_recebidos()
{
if (vetor_recebe[0]=='E'&&vetor_recebe[1]=='X'&&vetor_recebe[2]=='E')
{
pronto_executa=1;
output_high(pin_b2);
}
if (vetor_recebe[0]=='C'&&vetor_recebe[1]=='L'&&vetor_recebe[2]=='R')
{
output_high(pin_b1);
Velocidade=0;
tempo_aquisicao=0;
distancia=0;
fim_curso_2=0;
fim_curso_2=0;
imprime_estado_variaveis();
}
if (vetor_recebe[0]=='V'&&vetor_recebe[1]=='E'&&vetor_recebe[2]=='L')
{
Velocidade = string_to_int(pos_ponto_ponto,fim_temp_vetor);
output_high(pin_b7);
}
if (vetor_recebe[0]=='T'&&vetor_recebe[1]=='E'&&vetor_recebe[2]=='M')
{
tempo_aquisicao=(int) string_to_int(pos_ponto_ponto,fim_temp_vetor);
output_high(pin_b6);
}
if (vetor_recebe[0]=='D'&&vetor_recebe[1]=='T'&&vetor_recebe[2]=='S')
{
distancia=(int) string_to_int(pos_ponto_ponto,fim_temp_vetor);
output_high(pin_b5);
}
if (vetor_recebe[0]=='F'&&vetor_recebe[1]=='T'&&vetor_recebe[2]=='1')
{
fim_curso_1=vetor_recebe[pos_ponto_ponto+1]-48;
output_high(pin_b4);
}
if (vetor_recebe[0]=='F'&&vetor_recebe[1]=='T'&&vetor_recebe[2]=='2')
{
fim_curso_2=vetor_recebe[pos_ponto_ponto+1]-48;
output_high(pin_b3);
imprime_estado_variaveis();
}
pronto_TX=0;
pos_ponto_ponto=0;
}

void main()
{
int i=1;
//temporário por flata de botoes
set_tris_b(0x00);
set_tris_c(0x84); //seta a porta serial c7 entrada c6 saída e c2 entrada o resto saída
OUTPUT_B(0x00);
setup_timer_0 (RTCC_DIV_1);
setup_timer_3 (T3_INTERNAL);
set_timer0(15536); //65536 - (1e-3/(4/4e6)) habilita a interrupção do timer 0 a cada 50ms

```

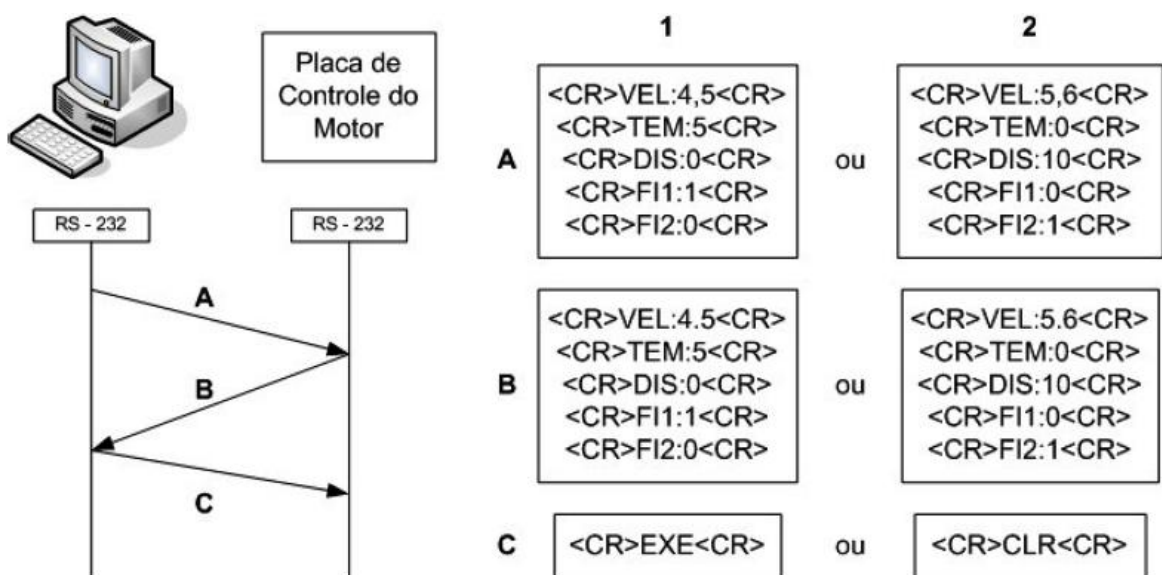
```

set_timer3(15536); //65536 - (10e-3/(4/4e6)) habilita a interrupção do timer 3 a cada 50ms
configura_tmr1(); //habilita timer 1
//enable_interrupts(int_timer0); //habilita interrupção do Timer 2
enable_interrupts(int_timer3);
enable_interrupts(int_rda); //habilita interrupcao serial
enable_interrupts(global); // habilita interrupções
while(1)
{
  if(pronto_TX==1)
  {
    analisa_comandos_recebidos();
  } //fim pronto TX==1
  if(pronto_executa==1)
  {
    if (Velocidade!=0 && tempo_aquisicao!=0 && distancia==0) //&& fim_curso_1==0 && fim_curso_2==0)
    {
      if((fim_curso_1 ==1) && (fim_curso_2 ==0))
        output_low(pin_c1); //define giro do motor
      else
        output_high(pin_c1); //define giro do motor
      roda_com_velocidade_tempo(Velocidade,tempo_aquisicao);
    }
    if (Velocidade!=0 && tempo_aquisicao==0 && distancia!=0) // && fim_curso_1==0 && fim_curso_2==0)
    {
      if((fim_curso_1 ==1) && (fim_curso_2 ==0))
        output_low(pin_c1); //define giro do motor
      else
        output_high(pin_c1); //define giro do motor
      roda_com_velocidade_distancia(Velocidade, distancia);
    }
    Velocidade=0;
    tempo_aquisicao=0;
    distancia=0;
    fim_curso_2=0;
    fim_curso_2=0;
    pronto_executa=0;
  } //fim pronto executa==1
  if(input(PIN_c2)==1)
  {
    disable_interrupts (int_timer1);
    disable_interrupts (int_timer3);
    while(1)
    {
      OUTPUT_B(0xFF);
      delay_ms(30);
      OUTPUT_B(0x00);
      delay_ms(30);
    }
  }
  //botões
  //Roda para direita
  if(!input(PIN_A2))
  {
    output_high(pin_c1);
    aux2=65535.0-3974042.0/(320.0*5);
    enable_interrupts(int_timer1);
    delay_ms(100);
    disable_interrupts(int_timer1);
  }
  //Roda para esquerda
  if(!input(PIN_A1))
  {
    output_low(pin_c1);
    aux2=65535.0-3974042.0/(320.0*5);
    enable_interrupts(int_timer1);
    delay_ms(100);
    disable_interrupts(int_timer1);
  }
} //fim while1
}

```

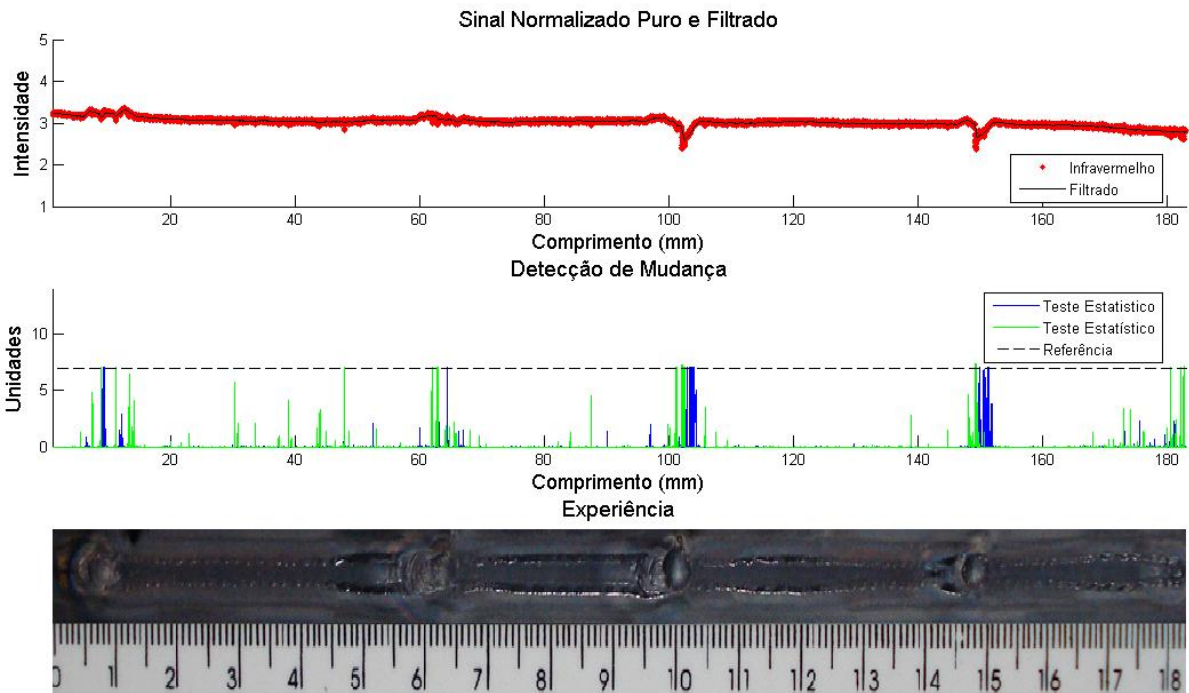

APÊNDICE B – PROTOCOLO DE CONTROLE DO MOTOR DE PASSO DA MESA LINEAR

A seguinte figura esboça o protocolo de comunicação entre a placa de controle e um computador em que deseja-se realizar dois tipos de controle. Um consiste em deslocar a mesa a uma velocidade de 4,5 mm/s por 5 segundos em um determinado sentido (1). O outro em deslocar a mesa a uma velocidade de 5,6 mm/s por uma distância de 10 mm no sentido oposto ao comando anterior (2). O computador envia os dados em (A) e recebe uma confirmação desses dados enviados pelo microcontrolador em (B), e finalmente em (C), o computador envia a ordem de executar (EXE) ou para cancelar o experimento (CLR). Note que o símbolo < CR > é a representação do valor caractere *Enter* (representado na tabela ASCII por 13).

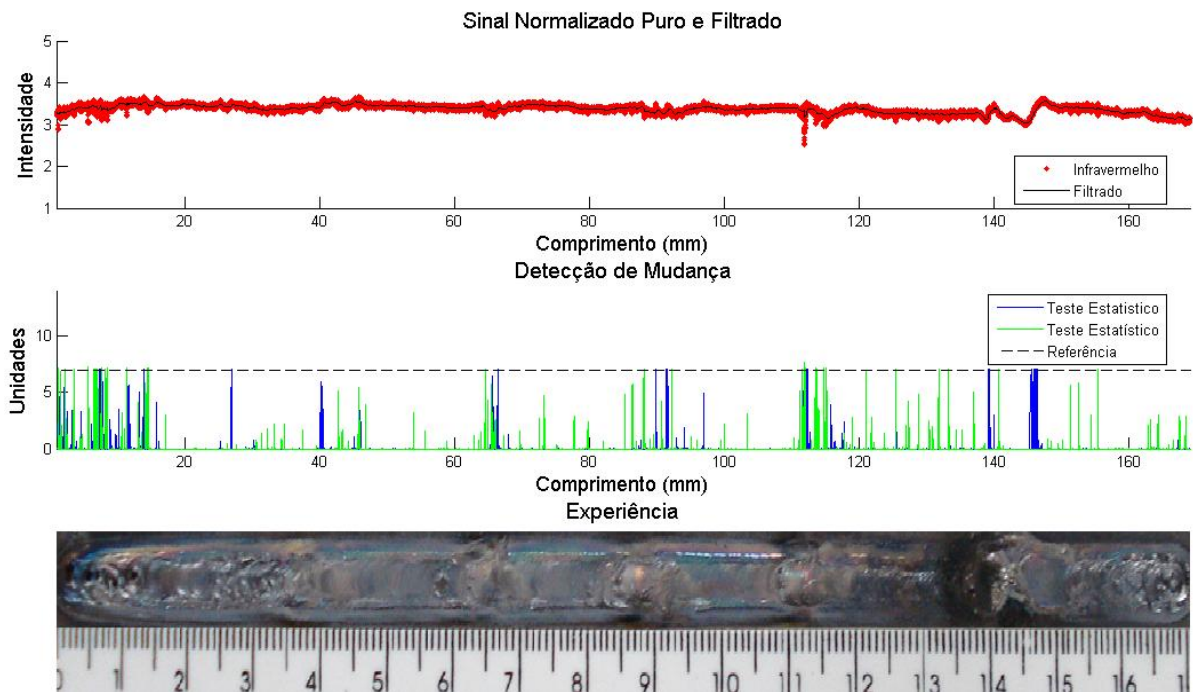


Exemplo do funcionamento do protocolo de controle do motor de passo.

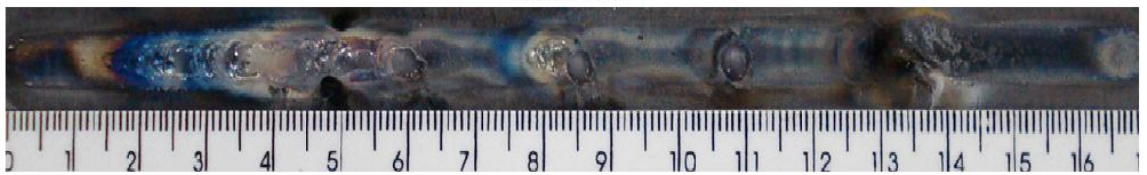
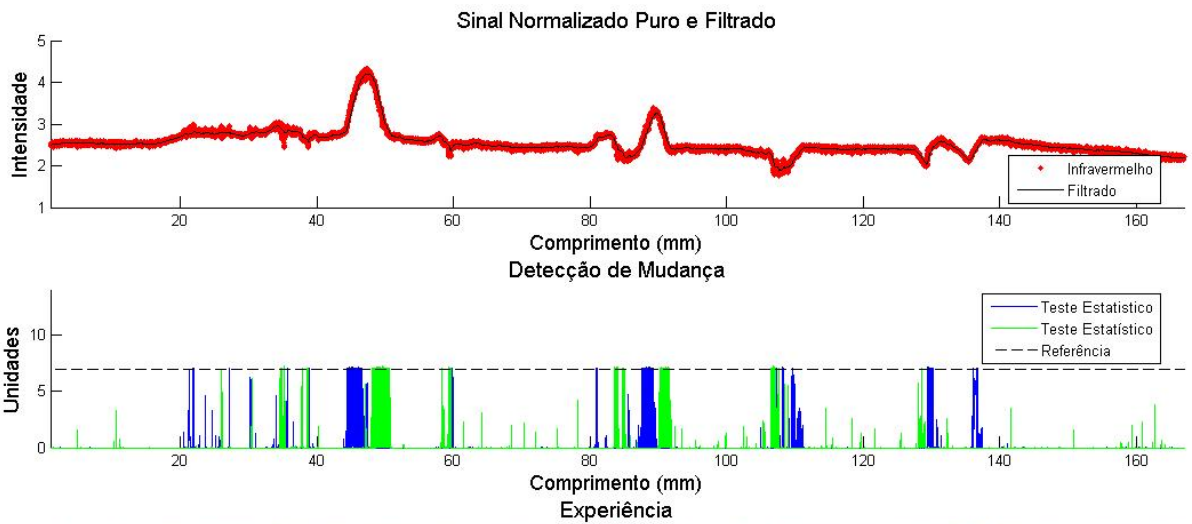
APÊNDICE C – FIGURAS DAS EXPERIÊNCIAS



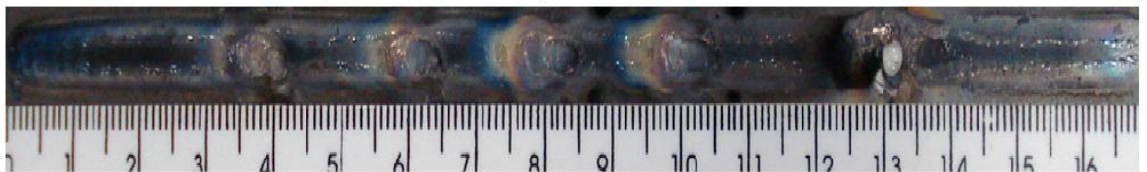
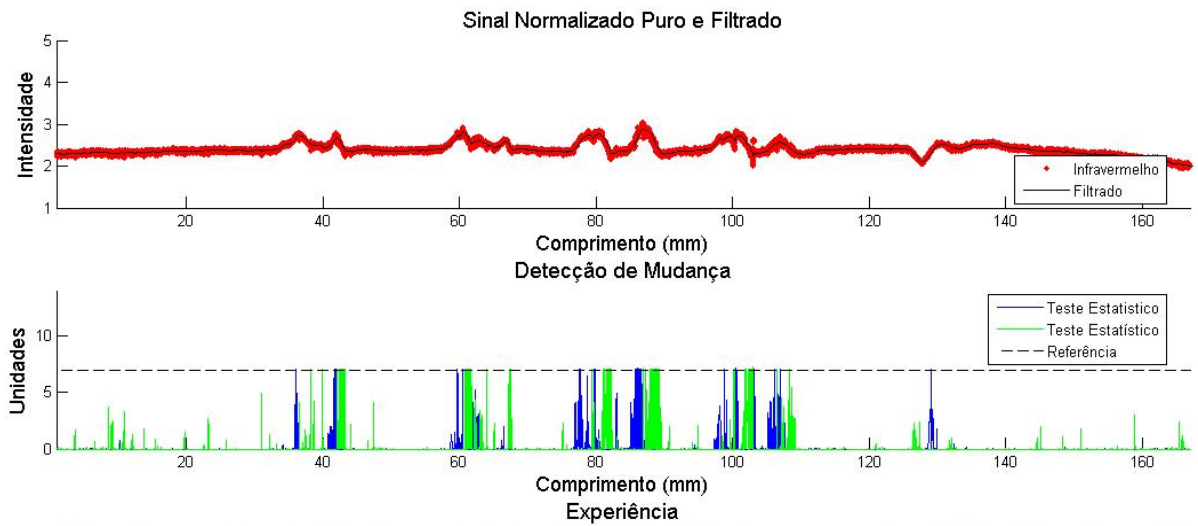
Experiência 3



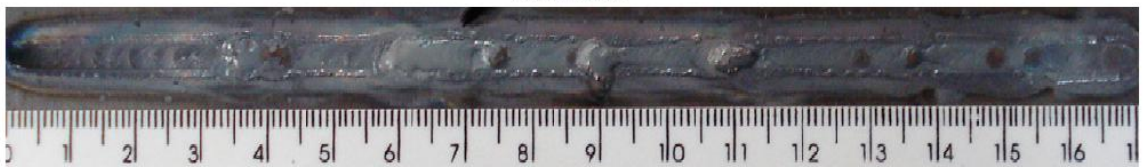
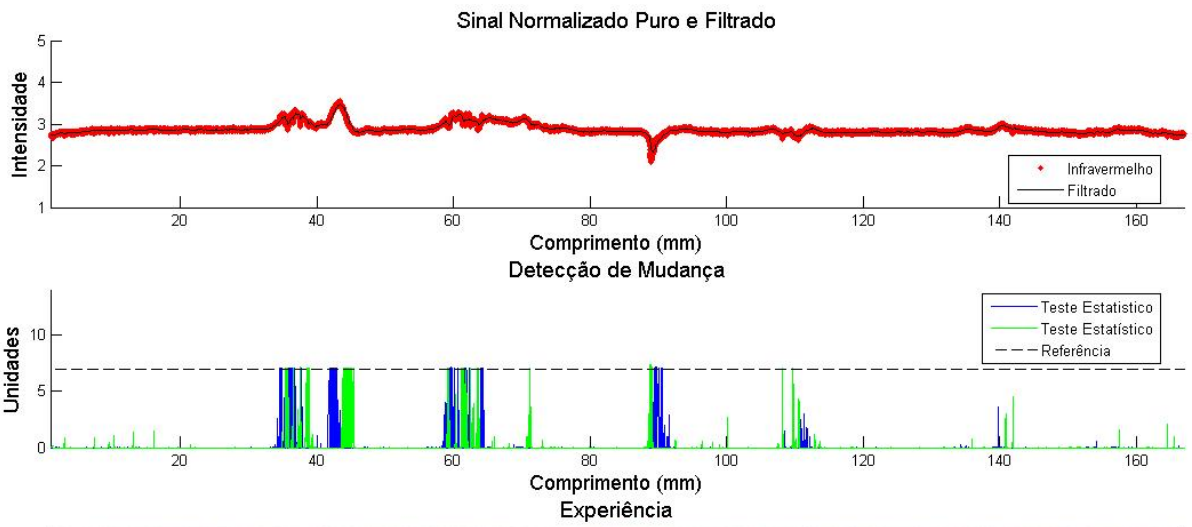
Experiência 4



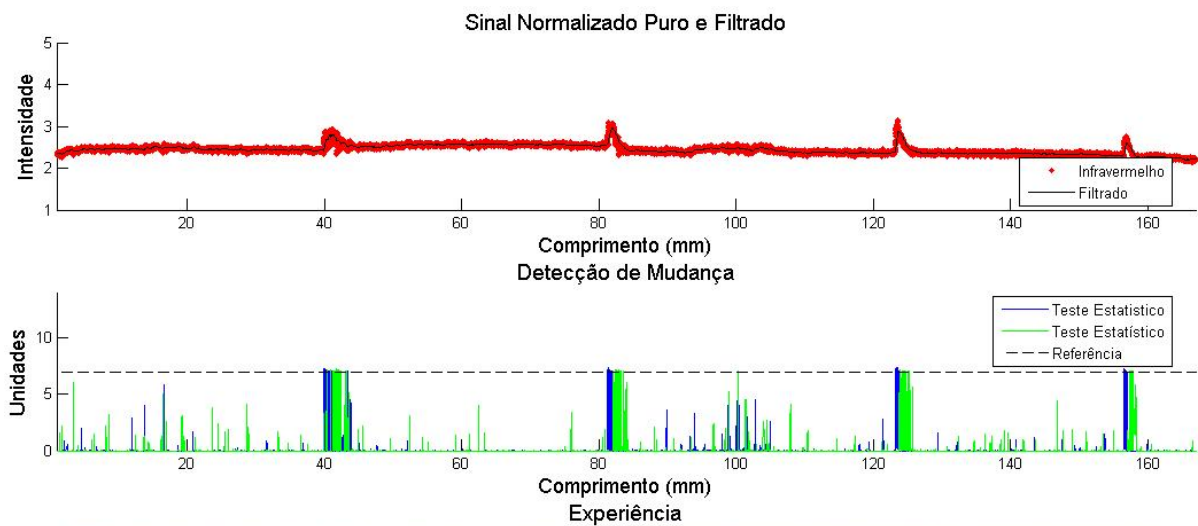
Experiência 5



Experiência 6



Experiência 7



Experiência 8