## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

# Metodologia de otimização do processo de soldagem P-GMAW em corrente alternada por análise de sinais tensão-corrente

Leonardo Alves de Carvalho

Itajubá, Junho de 2015

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Leonardo Alves de Carvalho

# Metodologia de otimização do processo de soldagem P-GMAW em corrente alternada por análise de sinais tensão-corrente

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de Concentração: Modelagem, Otimização e ControleOrientador: Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.Co-orientador: Prof. Rafael Coradi Leme, Dr.

Itajubá, Junho de 2015

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Leonardo Alves de Carvalho

# Metodologia de otimização do processo de soldagem P-GMAW em corrente alternada por análise de sinais tensão-corrente

Dissertação aprovada por banca examinadora em 15 de junho de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

#### Banca Examinadora:

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (Orientador)Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (UNIFEI)Prof. Dr. Carlos Alberto Ynoguti (INATEL)Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Campos (ASMEC)

### Itajubá, Junho de 2015

## DEDICATÓRIA

Dedico essa obra a meus pais por todo seu apoio ao longo de minha trajetória acadêmica.

### AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Carlos Henrique Pereira Mello e Pedro Paulo Balestrassi pelo incentivo ao meu ingresso no programa de mestrado da UNIFEI.

Aos professores Anderson Paulo de Paiva, Rafael Coradi Leme e Sebastião Carlos da Costa pela orientação, auxílio e suporte ao longo do desenvolvimento de minha dissertação.

Aos amigos de mestrado e doutorado Luiz Célio Souza Rocha, Paulo Rotela Junior, Julian Ignacio Lopez Arcos e Jhon Jairo Josa Largo pelo especial incentivo e apoio em meu período de pós-graduação na UNIFEI.

A minha família, por seu suporte constante.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

E a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

## **EPÍGRAFE**

"Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes." (Isaac Newton)

### **RESUMO**

Para manutenção e garantia da qualidade durante a execução de processos de fabricação, faz-se necessária a utilização de criteriosos procedimentos experimentais a fim de garantir a satisfação dos clientes e elevados padrões competitivos no mercado. No intuito de testar novas condições, realizar melhorias e averiguar possíveis interações entre variáveis do processo, a realização de experimentos, ou ensaios, torna-se um questão importante. Este trabalho tem por objetivo de propor uma metodologia de otimização do processo MIG/MAG CA, baseada na caracterização numérica de sinais elétricos de corrente e tensão por meio do processamento dos sinais digitais obtidos. A caracterização numérica foi realizada por meio do cálculo das áreas abaixo da curva dos sinais elétricos, que posteriormente foram utilizadas para estimar o indicador de Diferenca Relativa Percentual (DRP) dos sinais do projeto experimental em relação a um experimento tomado como referência. Foram calculadas as médias e variâncias das distribuições de DRPs dos sinais elétricos de corrente e tensão, cujos valores apresentaram correlação significativa com as respostas geométricas dos cordões de solda e a nota dos gráficos de dispersão U\*I dada aos sinais dos experimentos. Por meio dos modelos de média e variância das DRPs realizaram-se otimizações multiobjetivo utilizando diferentes experimentos referência, no intuito de obter os parâmetros de processo que produzissem os melhores sinais elétricos de acordo com o gráfico de dispersão U\*I. Dentre os principais resultados alcançados, constatou-se que a metodologia proposta apresentou melhores resultados (notas de classificação dos gráficos de dispersão U\*I) para sinais compostos por todas suas frequências de onda originais, em detrimento da análise realizada com sinais reconstruídos a partir de suas três frequências de maior amplitudes de onda. Os resultados das otimizações também apresentaram uma menor variabilidade entre si. Em complemento às análises de otimização, avaliou-se a eficácia da carta de controle T<sup>2</sup> de Hotteling como ferramenta para controle e monitoramento estatístico do processo estudado através das DRPs dos sinais elétricos, devido à sua aplicação em processos multivariados que apresentem autocorrelação.

Palavras-chave: MIG/MAG CA, Processamento Digital de Sinais, Projeto de Experimentos, Otimização Multibjetivo, cartas de controle T<sup>2</sup> de Hotteling.

### ABSTRACT

For maintenance and quality assurance during the execution of manufacturing processes, it is necessary to use careful experimental procedures to ensure customer satisfaction and high competitive standards in the market. In order to test new conditions, make improvements and investigate possible interactions between process variables, conducting experiments, or tests, becomes an important issue. This work aims to propose an optimization methodology of the P-GMAW AC process, based on the numerical characterization of electrical signals of current and voltage by processing the obtained digital signals. The numerical characterization was performed by calculating the area under the curve of the electrical signals, which were then used to estimate the indicator Difference Relative Percentage (DRP) of the signs of the experimental design for an experiment taken as a reference. The means and variances of DRPs's distributions of the electrical signals of current and voltage were calculated, the values were significantly correlated with the geometrical response of the weld beads and the note of scatter plots U\*I gave the signs of the experiments. Through the medium of models and variance of DRPs were held multi-objective optimization using different experiments reference in order to get the process parameters that produce the best electrical signals according to the U\*I scatter plot. Among the main results obtained, it was found that the proposed method showed better results (classification scores of scatter plots U\*I) for signs composed of all its original wave frequencies at the expense of analysis performed on signals reconstructed from its three largest original wave frequencies. The results of the optimizations also showed more variability among themselves. In addition to the optimization analysis, the efficacy was evaluated in T<sup>2</sup> Hotelling control chart as a tool for control and statistical process monitoring studied through the DRPs of electrical signals due to its application in multivariate processes that have autocorrelation.

Keywords: P-GMAW AC, Digital Signal Processing, Design of Experiments, Multibjective optimization, Hotteling's T<sup>2</sup> control charts.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Comportamento do arco em CC+ e (b) em CC07
Figura 2.2 – Formatos de onda (a) tipo A, (b) tipo B, (c) tipo C e (d) tipo D08
Figura 2.3 – Esquema do formato de onda tipo C para MIG/MAG Pulsado – CA09
Figura 2.4 – Escalada do arco voltaico para formato de onda tipo C em P-GMAW AC 10
Figura 2.5 – Interação (U*I) com apenas um ciclo e critério de medição para avaliação 11
Figura 2.6 – Gráfico de dispersão U*I. Ensaio 01 com boa estabilidade e Ensaio 16 com baixa
estabilidade11
Figura 2.7 - Método da Intersecção Normal à Fronteira (NBI)
Figura 3.1 - Aparato Experimental
Figura 3.2 - Perfil de corpo de prova e características geométricas mensuradas
Figura 3.3 - Gráficos dos sinais de corrente e tensão do experimentos 01
Figura 3.4 - Gráfico de dispersão U*I do experimentos 01
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia proposta40
Figura 4.2 - Exemplo de área abaixo da curva de um sinal de corrente
Figura 4.3 - Gráfico da Distribuição amostral das DRPs de corrente dos experimentos 01, 09 e
14 (exp. ref. 1)
Figura 4.4 - Esquema representativo da obtenção dos parâmetros de resposta da Distribuição
amostral das DRPs dos experimentos 01, 09 e 14 e 33 (exp. ref. 1)
Figura 5.1 - Distribuição amostral das DRPs de corrente dos experimentos 01, 09 e 14 (exp.
ref. 14)
Figura 5.2 - Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a variância
das DRPs de corrente (exp. ref. 14) e $\alpha = 0,05$
Figura 5.3 - Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a média das
DRPs de corrente (exp. ref. 14) e $\alpha = 0.05$
Figura 5.4 - Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a variância
das DRPs de tensão (exp. ref. 14) e $\alpha = 0,05$
Figura 5.5 - Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a média das
DRPs de tensão (exp. ref. 14) e $\alpha = 0.05$
Figura 5.6 - Efeitos principais dos parâmetros de processo sobre as respostas dos sinais
elétricos de corrente e tensão, para o experimento referência 1457
Figura 5.7 - Gráfico de Contorno da Variância das DRPs de Corrente versus Ib e En58

Figura 5.8 - Gráfico de Contorno da Média das DRPs de Corrente versus Ib e En58
Figura 5.9 - Gráfico de Contorno da Variância das DRPs de Tensão versus Ib e En59
Figura 5.10 - Gráfico de Contorno da Média das DRPs de Corrente versus Ib e En59
Figura 5.11 - Gráfico de Contorno da nota do gráfico U*I versus Ib e En60
Figura 5.12 - Gráfico de Contorno Geral
Figura 5.13 - Gráfico de dispersão U*I e Perfil de cordão de solda resultantes
Figura 5.14 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do sinal 01
Figura 5.15 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do sinal 14
Figura 5.16 - Função Autocorrelação para as DRPs dos sinais de corrente e tensão do sinal
14
Figura 5.17 - Função Autocorrelação para as DRPs dos sinais de corrente e tensão do sinal
03
Figura 5.18 - Gráfico de dispersão das DRPs de corrente e tensão do Sinal 1 (exp. ref. 1)73
Figura 5.19 - Carta de controle T <sup>2</sup> de Hotteling para as DRPs de corrente e tensão do Sinal 1
(exp. ref. 1)
Figura 5.20 - Gráfico de dispersão das DRPs de corrente e tensão do Sinal 14 (exp. ref. 1)74
Figura 5.21 - Carta de controle $T^2$ de Hotteling para as DRPs de corrente e tensão do Sinal 14
(exp. ref. 1)
Figura 5.22 - Gráfico de dispersão das DRPs de corrente e tensão do Sinal 03 (exp. ref. 1)75
Figura 5.23 - Carta de controle $T^2$ de Hotteling para as DRPs de corrente e tensão do Sinal 03
(exp. ref. 1)
Figura C.1 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do
experimento 3
Figura C.2 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do
experimento 18
Figura C.3 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do
experimento 26
Figura C.4 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do
experimento 31
Figura C.5 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do
experimento 37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características resultantes da polaridade do eletrodo07
Tabela 2.2 – Modelo de classificação de gráficos U*I12
Tabela 3.1 – Composição química do material de deposição e metal base $3\epsilon$
Tabela 3.2 – Parâmetros variáveis e níveis de trabalho
Tabela 3.3 – Parâmetros fixos, tipos e níveis de trabalho
Tabela 3.4 – Projeto experimental completo e parâmetros variáveis do processo
Tabela 4.1 – Modelo de classificação de gráficos U*I46
Tabela 5.1 – Valores de ajustes do modelo referente às notas do gráfico U*I48
Tabela 5.2 – Amostra de valores das áreas dos sinais de tensão e corrente
Tabela 5.3 – Amostra de valores das DRPs relativas ao experimento referência 14 dos sinais
de tensão e corrente
Tabela 5.4 – Correlação entre as DRPs, respostas mecânicas e notas dos gráficos de dispersão
U*I dado o experimento 14 como referência50
Tabela 5.5 – Valores de Média e Variância das DRPs de corrente e tensão do experimento 14
Tabela 5.6 – Coeficientes dos modelos de média e variância dos sinais para o experimento
referência 14
Tabela 5.7 - Valores de ajuste e capacidade de previsão dos modelos referentes à corrente e
tensão dos sinais
Tabela 5.8 – Matriz Payoff do problema multiobjetivo referente ao experimento 1460
Tabela 5.9 – Tabela de soluções do problema multiobjetivo61
Tabela 5.10 - Matriz Payoff Escalonada do problema multiobjetivo do experimento 1461
Tabela 5.11 – Modelo matemático do Erro Percentual Global do experimento referência 14
Tabela 5.12 – Valores de ajustes dos modelos referentes ao Erro Percentual Global62
Tabela 5.13 – Respostas de peso encontradas para otimização do EPG63
Tabela 5.14 – Tabela de peso e valores relativos à resolução do NBI de pesos ótimos63
Tabela 5.15 – Coeficientes do modelo matemático do gráfico U*I64
Tabela 5.16 – Valores de ajustes do modelo referente as notas do gráfico U*I64
Tabela 5.17 – Tabela de funções e respostas finais da otimização multiobjetivo do
experimento referência 14
Tabela 5.18 – Valores ótimos codificados e seus respectivos valores decodificados

Tabela 5.19 – Valores de média e desvio padrão para análise do primeiro grupo de dados6	58
Tabela 5.20 – Valores de média e desvio padrão para análise do segundo grupo de dados 6	58
Tabela 5.21– Valores de média e desvio padrão para análise do terceiro grupo de dados.	
	58
Tabela 5.22 – Parâmetros dos experimentos otimizados e seus respectivos experimentos	
correspondentes	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

NBI	Normal Boundary Intersection (intersecção normal à fronteira)
PDS	Processamento Digital de Sinais
DOE	Design of Experiments (Projeto de Experimentos)
DFT	Discrete Fourier Transform (transformada discreta de Fourier)
DRP	Diferença Relativa Percentual
FFT	Fast Fourier Transform (transformada rápida de Fourier)
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier Inversa)

## SUMÁRIO

1.	IN	TRODUÇÃO	1	
1.1	Ot	ojetivos	2	
1.2	Li	mitações	3	
1.3	M	Método de Pesquisa		
1.4	Es	trutura do trabalho	4	
2.	FU	JNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6	
2.1	Pre	ocesso P-GMAW AC	6	
2.2	Pro	ocessamento Digital de Sinais	12	
2	2.2.1	Transformada de Fourier	14	
2	2.2.2	Transformada Discreta de Fourier Direta e Inversa	15	
2.3	Pro	ojeto de Experimentos	17	
2	2.3.1	Experimentos Fatoriais	19	
2	2.3.2	Projeto de Experimentos de Mistura	20	
2.4	Ot	imização Multiobjetivo de Média e Variância	22	
2.5	Gr	adiente Reduzido Generalizado	24	
2.6	Int	Intersecção Normal à Fronteira26		
2.7	Ca	artas de Controle T <sup>2</sup> de Hotteling	30	
3.	MI	ETODOLOGIA EXPERIMENTAL	34	
4.	MI	ETODOLOGIA PROPOSTA	40	
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES		47	
5.1	Ex	Exemplo de Aplicação da Metodologia47		
5.2	Re	esultado das análises para 16 experimentos referência aleatórios extraídos do projet	to	
exp	erime	ntal	67	
5.3	Co	ontrole estatístico do processo por meio de carta de controle T <sup>2</sup> de Hotteling	71	
6.	CC	DNCLUSÕES	77	
6.1	Co	onclusões gerais	77	
6.2	Su	gestões para trabalhos futuros	78	
REFE	RÊNC	CIAS BIBLIOGRÁFICAS	79	
APÊN	DICE	2	85	
	AI	PÊNDICE A	85	
	AI	PÊNDICE B	87	
	AI	PÊNDICE C	88	
ANEX	KOS		91	
	A	NEXO A	91	

### 1. INTRODUÇÃO

No intuito de incrementar a produtividade e a eficiência dos processos de fabricação, novas abordagens têm sido desenvolvidas para atender às demandas do mercado. Dentre essas novas abordagens, o processo P-GMAW AC, apesar de um método relativamente novo, tem se destacado nos últimos anos devido a sua capacidade de conciliar as vantagens da utilização do arama-eletrodo em polaridades positiva e negativa (AGUIAR, 2014).

No entanto, em ambientes industriais, a melhoria de processos também requer o estabelecimento de um conjunto de parâmetros de processo ideal, que possibilite o aproveitamento ótimo dos recursos disponibilizados. No intuito de estabelecer esses parâmetros, é necessária uma abordagem experimental que implique na diminuição nos custos de qualidade e, de preferência, diminua as perdas durante a realização dos ensaios. Dessa forma, novas alternativas para o método convencional de experimentação de processos de soldagem, que requer a destruição dos corpos de prova, são almejadas. Este trabalho, por meio de sua metodologia proposta, utiliza os sinais de corrente e tensão aquisitados durante a realização do projeto experimental para estudar uma alternativa ao método de ensaios destrutivo convencional para otimização de processos.

Para isso, realizou-se o processamento digital de sinais (PDS) a fim de extrair as informações contindas nos conjuntos de sinais elétricos distintos. Foram utilizadas a Transformada Rápida de Fourier e a Transformada de Fourier Inversa, de modo a decompor os sinais em suas respectivas frequências e, para determinadas análises realizadas neste trabalho, reconstruí-los a partir das 3 frequências de maior amplitude.

Na medida em que ensaios aleatórios não são suficientes para que as respostas necessárias para uma melhor compreensão das variáveis e suas interações em um processo sejam obtidas, utilizou-se o método denominado Projeto de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE). Essa técnica utiliza abordagens empíricas fundamentadas em conceitos estatísticos no intuito de produzir dados confiáveis e estatisticamente significantes para resolução de problemas (MONTGOMERY, 2012). No caso deste trabalho, os parâmetros variáveis de entrada tiveram seus respectivos níveis alterados de modo a produzir cordões de solda de características geométricas distintas. Cada conjunto de parâmetros também produz um sinal elétrico distinto, aquisitado pelo aparato experimental. Esses sinais elétricos serão

quantificados pelo indicador desenvolvido neste trabalho, denominado Diferença Relativa Percentual (DRP). Uma vez que, como demonstrado no presente trabalho, os sinais elétricos estão diretamente correlacionados com as características geométricas dos cordões de solda produzidos, busca-se otimizar as características geométricas através da otimização dos sinais elétricos utilizando as DRPs calculadas. Esses indicadores foram estimados por meio do cálculo das áreas abaixo das curvas dos sinais elétricos de corrente e tensão, através de integração numérica por estimação trapezoidal, estratégia utilizada para quantificar o erro e a variação dos sinais em relação a um padrão dentre os sinais.

O estudo retratado neste trabalho, a otimização multiobjetivo de um processo de soldagem no modo P-GMAW AC (MIG/MAG Pulsado em corrente alternada), requer a utilização de algoritmos eficientes para lidar com problemas que não apresentem uma única solução. Dessa forma, utilizou-se o Gradiente Reduzido Generalizado em conjunto com a Intersecção Normal à Fronteira (*Normal Boundary Intersection – NBI*) para construção da fronteira eficiente de Pareto do NBI. Os diferentes pontos da fronteira foram definidos por meio de um projeto experimental de Arranjo de Misturas, que caracterizou diferentes combinações de peso, e portanto, importância das funções das DRPs de média e variância de corrente e tensão dos sinais elétricos.

As combinações de peso, quando utilizadas para resolução do problema por meio do NBI, produziram um conjunto de Erros Percentuais Globais, que foram modelados e utilizados para encontrar o conjunto de pesos ótimos para o problema principal.

Em complemento ao estudo de otimização do processo P-GMAW AC utilizando sinais elétricos, devido à sua característica multivariada e da autocorrelação entre as DRPs, realizouse um estudo para a aplicação da carta de controle  $T^2$  de Hotteling para o monitoramento do processo estudado.

#### 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia de otimização do processo de soldagem P-GMAW AC, baseada na caracterização numérica dos sinais elétricos de corrente e tensão de um projeto experimental por meio das Diferenças Relativas Percentuais. Como objetivos secundários, podem ser citados:

- Demonstrar o processamento de sinais elétricos de corrente e tensão para modelagem e análise estatística;
- Analisar as respostas obtidas de acordo com um classificador compatível com a necessidade do tomador de decisão.

#### 1.2 Limitações

Este trabalho apresenta as seguintes limitações:

- Tomada de um processo de fabricação específico (soldagem) para desenvolvimento da metodologia;
- Os modelos de caracterização dos sinais elétricos apresentam imprecisões devido aos erros provenientes do método de cálculo de áreas por meio da integração trapezoidal;
- Os modelos de caracterização dos sinais elétricos foram construídos pela modelagem da média e variância das áreas. No entanto, deve-se questionar se outros parâmetros mais robustos não poderiam ter sido utilizados.
- Utilizou-se um fatorial completo como projeto experimental e não uma superfície de resposta, o que diminuiu a capacidade de obtenção de dados estatísticos.

#### 1.3 Método de Pesquisa

O método de pesquisa empregado foi a Modelagem, aplicando-se a pesquisa empírico normativa. Foram utilizadas informações extraídas da análise de um projeto experimental de soldagem para modelagem matemática e otimização. Segundo Bertrand e Fransoo (2002), o desenvolvimento de uma pesquisa baseada na modelagem quantitativa dos dados assume que o comportamento original do processo real pode ser reproduzido por meio de um modelo ou ser simulado através de modelos de tomada de decisão.

Segundo Kothari (2004), a pesquisa empiríca pode ser definida como a pesquisa que é baseada em dados, buscando-se provas sobre o efeito de uma variável sobre as demais e fornecendo conclusões que podem ser constatadas por meio de observações ou experimentos somente, frequentemente sem consideração para o sistema e a teoria. De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), a pesquisa científica empírica testa e desafia a validade, usabilidade e performance dos problemas teóricos com relação aos processos operacionais da vida real, estando primariamente interessada em desenvolver políticas, estratégias e ações para melhoria da situação ou processo atuais.

Com relação à pesquisa normativa, pode-se afirmar que ela é utilizada primariamente quando se esta interessado, segundo Bertrand e Fransoo (2002), no desenvolvimento de políticas, estratégias e, como realizado neste trabalho, no desenvolvimento de ações para melhoria dos resultados disponíveis na literatura existente, encontrando-se possíveis soluções ótimas para um problema recém-definido ou comparando as várias estratégias no intuito de utilizá-las em um problema específico. Dessa forma, segundo os autores, pesquisa empírica normativa pode ser conduzida por meio de um ciclo de conceitualização, modelagem, solução do modelo e implementação da solução.

#### 1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado de acordo com o s seguintes capítulos:

#### Capítulo 1 - Introdução

Na introdução deste trabalho, foram descritos os fatores que levaram o pesquisador a conduzir o desenvolvimento da metodologia apresentada. Foram descritos a importância do tema, os objetivos da pesquisa, as suas limitações e como o trabalho está estruturado.

#### Capítulo 2 - Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica introduziu os conceitos relevantes para uma melhor compreensão deste trabalho. Foram abordados os fundamentos envolvidos no processo de soldagem P-GMAW AC, no processamento digital de sinais para a análise da tensão e corrente dos processos de soldagem, na quantificação dos sinais elétricos por meio de integração numérica, na realização de projetos experimentais, na utilização de algoritmos numéricos para realização da otimização do processo e no desenvolvimento de cartas de controle  $T^2$  de Hotteling.

#### Capítulo 3 – Metodologia Experimental

Neste capítulo, foram apresentadas as ações para a definição e execução do projeto experimental. Isso incluiu a definição dos equipamentos, variáveis e parâmetros de processo necessários para execução dos ensaios laboratoriais realizados por Aguiar (2014).

#### Capítulo 4 - Metodologia Proposta

No intuito de facilitar a compreensão deste trabalho e possibilitar sua replicação futura por outros pesquisadores, expôs-se neste capítulo um passo-a-passo detalhado da metodologia composta de 12 etapas para execução detalhada do processo de otimização.

#### Capítulo 5 – Resultados e Discussões

Para ilustrar a aplicação da metodologia apresentada no capítulo anterior, executaram-se todas as 12 etapas de otimização no objeto de estudo abordado no capítulo 4. Com isso, realizou-se uma discussão sobre os resultados de cada etapa.

#### Capítulo 6 – Conclusões

As conclusões obtidas pela execução da metodologia para diferentes experimentos referência foram apresentadas neste capítulo. Apresentam-se também ideias e sugestões para trabalhos futuros, tendo como base as limitações deste trabalho.

#### Referências Bibliográficas

Este capítulo contém todas as referências bibliográficas citadas no trabalho, estruturadas de acordo com a NBR-6023/2002.

#### Apêndice

Neste capítulo, foram inseridas uma introdução teórica ao processo de cálculo de áreas abaixo da curva de funções, um código para cálculo das DRPs dos sinais elétricos e gráficos de autocorrelação complementares ao capítulo 5.

#### Anexos

Este capítulo contém o código necessário para realização das transformadas rápidas de Fourier direta e inversa.

### 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalhou utilizou o projeto experimental de Aguiar (2014), desenvolvido para um processo P-GMAW AC. No intuito de facilitar a compreensão do tema, desenvolveu-se um texto introdutório ao tema.

#### 2.1 Processo P-GMAW AC

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), ou em sua tradução MIG/MAG, de acordo com Cirino (2009) e Gohr (2002), pode ser descrito como um processo de soldagem a arco voltaico, estabelecido entre eletrodo consumível contínuo (arame-eletrodo) e uma peça de trabalho. Protege-se a região do arco voltaico por meio de um gás inerte (argônio ou hélio, mais comum na soldagem do alumínio e suas ligas), um gás ativo (como por exemplo o  $CO_2$ ) ou por misturas entre diversas combinações de gases, fornecidos através de uma fonte externa que cria o ambiente em que se forma o arco e protege da oxidação a poça de fusão e as gotas metálicas durante a transferência.

Segundo Gohr (2002), o método GMAW convencional foi inicialmente desenvolvido para a soldagem de peças em alumínio. No entanto, logo o processo converteu-se em um método de manufatura eficiente para união de componentes em aço. O autor afirma que o arco voltaico possui suas propriedades em estreita dependência com as características da fonte de energia e com as características do gás de proteção. A tocha de soldagem e os cabos de alimentação no equipamento possuem três funções básicas: conduzir o gás até a região do arco, guiar o arame-eletrodo até o bico de contato e conduzir a corrente de soldagem da fonte até o bico de contato e a peça.

De acordo Cirino (2009), o uso do processo MIG/MAG Convencional em corrente contínua por meio do eletrodo ligado ao polo negativo (CC-) produz resultados que diferem de forma significativa em relação à sua utilização em corrente contínua por meio doeletrodo ligado ao pólo positivo (CC+). Por meio da comparação do autor, desenvolveu-se a Tabela 2.1 foi desenvolvida no intuito de resumir suas constatações:

Características do processo	Eletrodo ligado ao polo negativo (CC-)	Eletrodo ligado ao polo positivo (CC+)
Profundidade de Penetração	Menor, pois há menor energia de soldagem imposta a peça.	Maior, pois há maior energia de soldagem imposta a peça.
Taxa de Fusão a uma dada condição (corrente, gás de proteção, distância bico de contato-peça)Maior (no caso de arames- eletrodos comuns e não com arames-eletrodos aditivados), pois o calor concentra-se no eletrodo.		Menor, pois o calor concentra- se na extremidade do eletrodo.
Estabilidade na transferência metálica	Instável, usualmente limitada à condição globular, com a presença de respingos grosseiros em grande quantidade.	Estável
Penetração e área fundida	Menor	Maior

Tabela 2.1 - Características resultantes da polaridade do eletrodo.

Durante a execução do processo de soldagem na condição CC+, Cirino (2009) explica que o arco voltaico ancora-se na gota metálica, destacando-a em um estado superaquecido e transferindo por meio desse sistema calor para a poça de fusão. A condição CC- possibilita o ancoramento do arco voltaico na extensão sólida do eletrodo, permitindo um maior aproveitamento do calor gerado e dispersando-o sob uma região maior.

A Figura 2.1 apresenta o comportamento do arco voltaico de acordo com sua polaridade:



Figura 2.1 – (a) Comportamento do arco em CC+ e (b) em CC-. Fonte: Cirino (2009)

No intuito de combinar as vantagens da soldagem GMAW convencional, por meio da atuação do eletrodo na polaridade positiva CC+ e na polaridade Negativa (CC-), Scotti e Monteiro (2012) citam como alternativa ao processo convencional o processo de soldagem GMAW em corrente alternada (AC GMAW).

Segundo Scotti e Monteiro (2012), no processo AC GMAW ocorre uma transição periódica de polaridade, com a estabilidade da transferência estando condicionada ao destacamento da gota durante o tempo de pulso (termo denominado Uma Gota por Pulso - UGPP). Os autores enfatizam que se deve manter o comprimento do arco constante em ambas as polaridades, no intuito de cordões regulares em dimensão e forma serem obtidos.

Talkington (1986) afirma que no intuito de superar os problemas de reignição do arco voltaico quando as correntes passavam pelo zero durante as mudanças de polaridade em correntes alternadas, aplicavam-se altos picos de tensão em pontos de corrente zero para manter a ionização na coluna do arco, favorecendo a reignição. No entanto, esses problemas de reignição foram facilmente eliminados pelo uso de formas de onda retangular, que reduziram a quantidade de tempo que a corrente aproximava-se do valor zero. Com isso, a necessidade de altas voltagens durante a execução do processo foi eliminada.

De acordo com Aguiar (2014), os princípios de operação dos modos em desenvolvimento do processo GMAW partem dos modos de soldagem MIG Pulsado, em adição aos formatos de onda de corrente que assemelham-se aos utilizados no modo pulsado, acrescentando a característica de polaridade alternada. Portanto, Aguiar (2014) utilizou como referência o termo utilizado no projeto experimental deste trabalho, P-GMAW AC (*Pulsed Gas Metal Arc Welding in Alternating Current*).

Dentre os diferentes tipos de formato de onda possíveis para o processo P-GMAW AC, Nascimento e Vilarinho (2007) apresentam 4 tipos comumente utilizados na Figura 2.2:



Neste trabalho, utilizou-se o perfil de onda tipo C para as análises, devido à restrição operacional do equipamento de soldagem. Desta forma, a Figura 2.3 detalha esse formato de onda específico e seus respectivos componentes:



Figura 2.3 – Esquema do formato de onda tipo C para MIG/MAG Pulsado – CA Fonte: Aguiar (2014) adaptado de Gohr (2002)

Aguiar (2014) detalha os parâmetros mostrados na Figura 2.3:

- I+, corrente de soldagem na polaridade positiva [A];
- I-, corrente de soldagem na polaridade negativa [A];
- T, período [Hz];
- In, nível da corrente em polaridade negativa [A];
- tn, tempo da corrente em polaridade negativa [ms];
- Ib, nível da corrente em polaridade positiva de base [A];
- tb, tempo da corrente em polaridade positiva de base [ms];
- Ip, nível da corrente em polaridade positiva de pico [A];
- tp, tempo da corrente em polaridade positiva de pico [ms].

No intuito de caracterizar o processo de transferência de gotas no modo pulsado, desenvolveu-se a Figura 2.4. De acordo com Cirino (2009) e Harwig *et al.* (2006), o processo P-GMAW AC em (a) encontra-se na fase de pulso de alta corrente, onde ocorre a compressão da gotícula na ponta do eletrodo e sua transferência por meio do arco voltaico. Na fase (b), ocorre a transferência da fase de pulso para a fase de corrente negativa. Na fase (c), pode-se observar a diminuição da intensidade luminosa do processo e o arco voltaico ancorado na extensão do eletrodo. Na fase (d), o processo está em plena fase negativa, com a energia

dispersa em toda extensão do eletrodo permitindo a formação de grandes gotículas no em sua extremidade.



Figura 2.4 – Escalada do arco voltaico para formato de onda tipo C em P-GMAW AC Fonte: Adaptado de Cirino (2009) e Santos (2008)

Harwig *et al.* (2006) afirmam que a potência de derretimento das formas de onda GMAW dependente fortemente da concentração do arco voltaico na ponta do eletrodo, do tamanho da gota e de seu processo de crescimento. Eletrodos metálicos novos consumidos de forma acelerada quando se permite ao arco voltaico ancorar e concentrar-se na extensão do futuro.

A corrente pulsada para controle da transferência metálica antecipa os picos de corrente para transferência de gotas antes que estas curto-circuitem na peça, evitando salpicagens e mantendo pressão relativamente homogênea sobre a poça metálica fundida (IMC, 2011).

Aguiar (2014) afirma que no intuito de avaliar a estabilidade do arco, dentre as diversas técnicas utilizadas, como por exemplo, sinais de ruído emitidos e calorimetria, a análise do comportamento dinâmico da tensão (U) versus corrente (I) por meio de gráficos de dispersão é a mais utilizada. Os sucessivos ciclos de soldagem formam laços sobrepostos, que ao apresentarem maior uniformidade e menor dispersão entre si, refletem um melhor comportamento e estabilidade do processo e, consequentemente, um melhor cordão de solda.

A Figura 2.5 apresenta os critérios para avaliação dos laços sobrepostos, elaborados por Aguiar (2014):



Figura 2.5 – Interação (U\*I) com apenas um ciclo e critério de medição para avaliação. Fonte: Aguiar (2014)

Segundo Aguiar (2014), quanto maior a distância entre os pontos "A" e "B" e entre os pontos "E" e "F" menor a nota atribuída. Adicionalmente, quanto menor as dispersões das linhas sobrepostas em relação aos pontos "C" e "D", maior a nota do gráfico de dispersão. Deve-se observar também que os pontos "A" e "B" correspondem, na Figura 2.4, ao parâmetro "tn", os pontos "C" e "D" correspondem a "tb" e os pontos "E" e "F" correspondem a "tp".

Desta forma, Aguiar (2014) exemplifica seus critérios de avaliação para gráficos de dispersão U\*I por meio por meio da classificação dos ensaios 1 e 16 de seu projeto experimental, apresentados na Figura 2.6:



Figura 2.6 – Gráfico de dispersão U\*I. Ensaio 01 com boa estabilidade e Ensaio 16 com baixa estabilidade.

Fonte: Aguiar (2014)

No intuito de quantificar sua análise, Aguiar (2014) atribuiu notas aos gráficos de dispersão, desta forma elucidando as condições de regulagem dos parâmetros que poderiam resultar em um melhor comportamento para o processo.

Nota	Descrição das características do Sinal
10	Laços mais uniformes e com mínimo de dispersões.
05	Laços uniformes, porém não seguem no mesmo ciclo.
01	Laços não uniformes e sem orientação de um ciclo.
Entre 01 e 05	Laços com tendência de serem uniformes.
Entre 05 e 10	Laços uniformes, porém com determinado nível de dispersões entre elas.

Tabela 2.2 – Modelo de classificação de gráficos U\*I.

#### Fonte: Aguiar (2014)

De acordo com Kah, Suoranta e Martikainen (2013), os principais objetivos do desenvolvimento de novas técnicas e aplicações para processos de soldagem a arco tem sido reduzir a entrada de calor, suprimir o fenômeno danoso de respingos e aumentar a flexibilidade do processo de soldagem. Dentre as alternativas para realização desses objetivos, encontra-se a definição correta dos níveis das variáveis do processo que, segundo Aguiar (2014), constituem uma das principais limitações para a viabilidade do uso do processo P-GMAW AC.

Desta forma, este trabalho baseou-se na definição de uma metodologia de otimização dos níveis das variáveis do processo P-GMAW AC, por meio da utilização de sinais elétricos de corrente e tensão como respostas para um determinado conjunto de parâmetros de processo, aquisitados por Aguiar (2014). Os sinais elétricos de corrente e tensão, após serem aquisitados, foram processados a fim de produzirem as informações necessárias para a condução das análises deste trabalho. Deste modo, para melhor compreensão do tema introduz-se na próxima seção uma breve explanação sobre processamento digital de sinais.

#### 2.2 Processamento Digital de Sinais

Segundo Kuo, Lee e Tian (2006), sinais podem ser divididos em três categorias: sinais de tempo contínuo (analógicos), sinais de tempo discreto e sinais digitais.

Os autores definem os sinais analógicos como contínuos no tempo, possuindo um intervalo de amplitude infinito e destacam sua capacidade de serem processados utilizando-se eletrônica analógica contendo circuitos de elementos passivos e ativos.

Orfanidis (1996) afirma que os sinais de tempo discreto são compostos por conjuntos de instâncias de tempo particulares, devido a isso podendo ser representados por uma sequência de números com alcance contínuo de valores. O autor cita que dentre as vantagens do processamento de sinais em detrimento dos dispositivos analógicos tradicionais podem-se citar a flexibilidade de suas funções, a reprodutibilidade das informações de seu sistema, a confiabilidade das informações após anos de armazenamento e finalmente a complexidade das operações realizadas por meio desses sistemas.

Kuo, Lee e Tian (2006) definem o sinal digital como uma sequência de números finitos x(n),  $-\infty < n < \infty$ , onde *n* é o índice tempo, correspondente a uma forma de onda senoidal expressa nas equações:

Onde T é o período de amostragem em segundos, é a frequência digital em radianos por amostra e é a frequência digital normalizada em ciclos por amostra.

Cain *et al.* (1984) explica que, para sinais harmônicos, o componente senoidal de menor frequência é denominado fundamental e todos os outros componentes senoidais maiores como harmônicos. Os componentes fundamentais possuem taxas de repetição iguais as dos sinais periódicos sob análise, enquanto os harmônicos possuem frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental.

Segundo Orfanidis (1996), as aplicações do PSD em tempo real e não-real são definidas da seguinte forma: a análise de sinais digitais em tempo não real envolve o processamento de sinais em tempo consideravelmente posterior a sua coleta na forma digital. Em relação ao processamento em tempo real, esse limita sua análise a um período de tempo que depende basicamente da estrutura de hardware e software responsáveis pela execução das análises.

O processamento digital de sinais possibilitou a utilização de ferramentas para análise e controle dos sinais elétricos utilizados nesse trabalho. De modo a identificar os componentes senoidais dos sinais elétricos produzidos pelos diferentes parâmetros e níveis de processo, utilizou-se a Transformada de Fourier, descrita no próximo item.

#### 2.2.1 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier pode ser utilizada para caracterização de sistemas lineares e identificação de componentes de frequência que constituem uma onda contínua (BERGLAND, 1969).

Cain *et al.* (1984) afirmam que a transformada de Fourier é única, na medida em que para cada sinal representado no domínio do tempo existe apenas um domínio da frequência, sendo o oposto também válido. Bergland (1969) demonstra essa afirmação dispondo as equações 2.3 e 2.4, onde representa a função domínio da frequência e o representa a função domínio-tempo:

#### Para , , e

Cain *et al.* (1984) também afirmam que se deve realizar a suposição de que o sinal contido em uma janela amostral seja uma função periódica durante a execução de uma análise de Fourier. Em caso de ausência dos pontos finais e iniciais do sinal amostrado no zero potencial, introduz-se entre o fim de um ciclo e o início do próximo uma discontinuidade acentuada.

Kuo, Lee e Tian (2006) explanam a relação entre um sinal periódico e a transformada de Fourier. Seja um sinal periódico x(t), com período  $T_{0}$ , a soma de um número infinito de senóides relacionadas com as harmônicas e exponenciais complexas. Este sinal pode ser definido por meio da equação 2.5: Em que denomina-se como coeficiente das séries de Fourier,

é a frequência fundamental, é a frequência da harmônica e t é o valor do tempo analisado.

De acordo com os autores, o coeficiente de Fourier pode ser expresso como:

- (2.6)

Como dito por Bergland (1969), a transformada de Fourier pode ser utilizada para caracterização de sistemas lineares e identificação de componentes de frequência que constituem uma onda contínua. No entanto, em caso de amostragem ou análise em processadores digitais, deve-se utilizar uma abordagem capaz de captar sinais discretos no período do tempo, de acordo com a frequência de amostragem das distribuições não contínuas. Neste caso, trata-se da Transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* – DFT).

#### 2.2.2 Transformada Discreta de Fourier Direta e Inversa

Bergland (1969) define o par de transformadas discretas de Fourier periódicas análogas que se aplicam às versões de amostra dessas funções:

\_ \_

Onde representa a função domínio da frequência e representa a função domínio do tempo discreto para n=0,1,...,N-1; k=0,1,...N-1 (ou seja, N pontos do sinal). A séries e de modo geral são complexas.

Bergland (1969) afirma também que apesar do fato da maioria das propriedades das transformadas de Fourier contínuas serem retidas, diferenças provenientes de diversos fatores resultam na necessidade das restrições das DFTs operarem formas de ondas que necessitam ser amostradas em intervalos finitos.

Segundo Kuo, Lee e Tian (2006), a desvantagem na utilização do DFT para aplicações práticas é a sua demanda computacional, pois o número de operações aritméticas para computar N pontos de DFT é proporcional a 4\* operações. Devido à essa elevada demanda computacional, pesquisadores recorrem ao algoritmo da transformada rápida de Fourier.

Bergland (1969) define a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) resumidamente como um método mais eficiente para se computar uma transformada discreta de Fourier. Pode-se utilizar a FFT no lugar da transformada de Fourier para sinais contínuos na mesma extensão que a transformada de Fourier discreta, no entanto, com uma redução subtancial no tempo de cálculo dispendido.

Cain *et al.* (1984) definem a FFT como um algoritmo matemático operado com auxílio de computação no qual as amplitudes de vários componentes harmônicos incluídos em uma forma de onda periódica complexa são determinados.

Bergland (1969) resume algumas operações usuais nas quais a FFT é comumente utilizada, devido aos ganhos computacionais significantes em relação à outras técnicas:

- Construção de espectrogramas;
- Convolução de duas séries temporais a fim de realizar filtragem digital;
- Correlação de duas séries temporais.

Orfanidis (1996) define a FFT como uma implementação rápida da DFT, baseada em uma abordagem na qual os problemas da DFT são dividos em problemas reduzidos e mais simples para computação e posterior reconstrução utilizando-se apenas as DFTs mais simples.

Com relação ao seu algoritmo, o termo FFT engloba uma ampla gama de algoritmos, cada um com suas peculiaridades em termos de código, uso de memória, requerimentos computacioanis e outras vantagens e desvantagens (KUO, LEE E TIAN, 2006).

Concluído o procedimento para decomposição do sinal e análise das frequências, neste trabalho, após a seleção da quantidade de senoidais a serem utilizadas, reconstruiram-se os sinais por meio do algoritmo da transformada rápida de Fourier inversa.

Kuo, Lee e Tian (2006) explicam que no intuito de reconstruir os sinais por meio de suas harmônicas, pode-se modificar os algoritmos de FFT para que uma operação inversa de

recomposição do sinal seja realizada. Para isso, executa-se a transformada rápida de Fourier inversa (*Inverse Fast Fourier Transform* – IFFT), de modo a beneficiar-se da agilidade desse tipo de algoritmo frente aos demais. O algoritmo é representado na equação 2.9, onde:

- (2.9)Em que n = 0, 1, ..., N-1 e

Os autores indicam que nessa equação pode-se computar o IFFT por meio do algoritmo da FFT. Para isso, os coeficientes X(k) da DFT são conjugados para obtenção de . Computa-se a DFT de usando um algoritmo de FFT e os valores são escalonados por (1/N) para se obter . O complexo conjugado desse último valor gera , ou seja, o sinal reconstruído.

No intuito de quantificar os sinais de corrente e tensão aquisitados ou gerados durante a execução e análise do projeto experimental, calcularam-se as respectivas áreas abaixo da curva dos sinais digitais de corrente e tensão, cujo processo de cálculo é apresentado no Apêndice A.

Em posse dos valores das áreas dos sinais de corrente e tensão, pode-se iniciar o processamento estatístico dos dados. O conjunto de valores das Diferenças Relativas Percentuais, correlacionadas com as características geométricas dos cordões de solda, deve ser modelado em conjunto com as notas dadas por Aguiar (2014) no intuito de, por meio dos algoritmos e metodologias apropriadas, encontrar o conjunto de parâmetros ótimos para o processo. Devido a isso, foi utilizada como base para execução dos ensaios experimentais a abordagem do Projeto de Experimentos.

#### 2.3 Projeto de Experimentos

Montgomery (2012) define o projeto de experimentos como um processo no qual um conjunto de dados é coletado e analisado por meio de métodos estatísticos. Essas análises resultam em informações válidas, objetivas na presença de erros experimentais e que permitam a obtenção de conclusões compreensíveis dos dados. O autor denomina a abordagem genérica de planejamento e condução de experimentos como estratégia de experimentação.

Kumar, Bhalla e Rathore (2014) afirmam que o DOE envolve um exame sistemático e eficiente de múltiplas variáveis objetivando a diminuição da variância relativa na estimação dos parâmetros do modelo empírico desenvolvido. Por meio de análises estatísticas, correlacionam-se as respostas do processo para vários fatores e filtram-se os valores de erro do sistema.

Segundo Montgomery (2000), o processo de planejamento experimental pode ser dividido de acordo com as seguintes fases:

1. Reconhecimento e declaração do problema;

- 2. Escolha dos fatores, níveis e intervalos;
- 3. Seleção da variável de resposta;
- 4. Escolha do projeto experimental;
- 5. Realização do experimento;
- 6. Análise estatística dos dados;
- 7. Conclusões e recomendações.

O autor afirma que as etapas 1 e 2 são consideradas parte do planejamento préexperimental e que os passos 2 e 3 são usualmente realizados simultaneamente ou em ordem reversa.

Para execução do projeto experimental, Montgomery (2012) descreve a necessidade de executar testes ou uma série de rodadas, com mudanças nas variáveis de entrada do processo para que seja possível analisar as razões para as ocorrências de mudanças envolvidas em cada teste na resposta obtida. O autor relata que o processo de experimentação é uma parte vital do método científico uma vez que o objetivo em muitos casos, principalmente na engenharia, é desenvolver um processo robusto, isto é, um processo afetado minimamente por fontes externas de variabilidade. Montgomery (2012) define a aleatorização, a replicação e a blocagem, os três princípios básicos do projeto experimental, da seguinte forma:

• A replicação como um processo de repetição do experimento básico que independe da combinação de fatores de cada teste. Esse príncipio permite a obtenção de uma estimativa do erro experimental e da média amostral, caso esta seja utilizada para estimar uma resposta média real em algum dos níveis fatoriais do experimento. Reflete fontes de variabilidade entre testes realizados e variabilidade no decorrer desses testes.

• A randomização (ou aleatorização) pode ser entendida como a aleatorização da disposição dos materiais do experimento e da ordem em que os mesmos são executados. A randomização usualmente torna verdadeira a suposição de que os testes ou erros sejam independentemente distribuídos.

• A blocagem é uma técnica onde conjuntos de condições experimentais de certa forma homogêneas são caracterizados, de modo a distribuir as observações do projeto experimental dentro dos chamados "blocos". Por meio da utilização desse princípio, pode-se incrementar a precisão de comparação entre fatores e reduzir ou eliminar as fontes de variabilidade dos fatores.

Montgomery (2012) completa que metódos estatísticos não são capazes de provar que um fator (ou fatores) possuem determinados efeitos particulares, mas permitem a estimação do erro provável em uma conclusão ou declarar um nível de confiança em uma declaração.

No intuito de estimar esses erros prováveis e o nível de confiança das declarações realizadas ao longo da resolução do problema, variam-se os fatores de modo a explorar de maneira ampla as combinações possíveis do espaço experimental. Desta forma, pode-se afirmar que foram realizados experimentos do tipo fatorial.

#### **2.3.1** Experimentos Fatoriais

Segundo Montgomery e Runger (2009), durante a realização de um projeto de experimentos fatorial, investigam-se todas as possíveis combinações de níveis dos fatores em cada rodada ou réplica.

Kumar, Bhalla e Rathore (2014) afirmam que projetos de experimentos fatoriais são utilizados com frequência para avaliar a ocorrência de efeitos principais e interações entre os fatores de um problema. Modelos de regressão linear podem ser utilizados para representar os fatores quantitativos nesse caso. Os autores exemplificam a representação matemática de um problema com dois fatores da seguinte forma:

(2.11)

No qual, segundo Montgomery (2012), y representa a resposta numérica, representa os parâmetros que devem ser estimados na realização dos experimentos, representa os fatores do problema e o símbolo representa o erro experimanetal aleatório do processo. Ainda segundo o autor, o modelo de primeira-ordem, ou modelo dos efeitos principais, é utilizado frequentemente em experimentos de caracterização do processo.

Montgomery (2000) explica que para proteger os resultados de efeitos de segunda ordem e obter uma estimativa independente dos erros, existe uma pressuposto para replicar determinados pontos, denominados "center points", em um fatorial  $2^k$ . Adicionam-se essas *n* réplicas dos experimentos rodados no ponto , de modo que a estimativa do efeitos usual no projeto  $2^k$  não seja afetada.

Podem ser inseridas ainda, segundo Montgomery (2012), termos representando a interação entre dois fatores , onde i<j, relativamente comuns:

Finalmente, caso existam mais de 4 fatores, torna-se desnecessário a execução de todas as combinações possíveis geradas pelo planejamento experimental. Pode-se executar um fatorial fracionado, uma variação do fatorial que permite que apenas um subconjunto de experimentos seja executado (MONTGOMERY, 2012).

Em adição aos experimentos fatoriais, houve a necessidade de realizar um projeto de experimentos de mistura, no intuito de desenvolver um modelo para os erros percentuais globais, obtidos por meio da solução do método de Intersecção Normal à Fronteira para cada conjunto de pesos gerados no arranjo de mistura. Os erros percentuais são estimados por meio da relação entre os valores das funções dos modelos de DRP obtidos para cada combinação de pesos do arranjo de mistura e os seus respectivos valores utópicos, provenientes das otimizações individuais (minimizações) dos modelos de DRPs.

#### 2.3.2 Projeto de Experimentos de Mistura

No projeto de experimentos de misturas, a resposta final depende apenas da proporção relativa dos componentes presentes em uma mistura e os fatores são os componentes ou ingredientes dessa mistura, tendo como consequência sua não independência (CORNELL, 2011 e MONTGOMERY, 2012).

Montgomery (2012) descreve as formulações para um projeto de experimentos de misturas genérico. Considere que denota as proporções dos componentes de uma mistura, de modo que:

e

De modo que para dois fatores a figura geométrica formada trata-se de um segmento de reta, para três a figura trata-se de triângulo com vértices correspondendo às misturas puras (misturas contendo 100% de um único componente) e assim por diante. As misturas de um único componente, segundo Cornell (2011), são usadas como benckmark ou padrão durante a comparação com misturas com mais de um componente.

No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado especificamente o projeto de experimentos de mistura *Simplex Lattice*. Cornell (2011) explica que nesse tipo de projeto experimental os pontos estão dispersos igualmente no espaço fatorial do projeto *simplex*. O autor define o termo "*lattice*" como um arranjo ordenado de uma distribuição uniformemente espaçada de pontos em um *simplex*. Nesse caso, considera-se um ponto do projeto *simplex lattice* { }, onde é o número de componentes e corresponde ao grau do polinômio que será utilizado para construção do modelo que represente a superfície de resposta sobre o triângulo. As proporções de cada componenten assumem (m+1) valores igualmente espaçados de 0 a 1, isto é:

$$--$$
 (2.15)

Montgomery (2012) apresenta a formulação que fornece o número de pontos { } em um projeto *simplex lattice*:

De modo geral, o autor conclui que a principal diferença entre os modelos de mistura e superfície de resposta está no fato dos modelos de mistura incluírem a restrição . A principal critíca aos modelos de mistura, segundo Montgomery (2012), reside no fato da maioria dos experimentos ocorrer na região de fronteira, incluindo consequentemente ( ) pontos.

Finalizada a explanação dos tópicos relacionados ao projeto de experimentos, deve-se salientar que para execução das análises estatísticas neste trabalho, foi necessário quantificar os sinais de corrente e tensão por meio das DRPs e processá-los por meio das médias e variâncias dessas DRPs. Após sua quantificação, parâmetros foram modelados, resultando em 4 modelos distintos de média e variância para os sinais de corrente e tensão. Portanto, para encontrar uma solução ótima, considerando-se às diferentes importâncias dos modelos de DRPs no problema, deve-se executar um otimização multiobjetivo de média e variância, utilizando-se para isso os métodos de cálculo apropriados descritos no próximo item.

Destaca-se o fato dos problemas de otimização deste trabalho objetivarem a minimização das diferenças relativas percentuais, tendo por objetivo aproximar o valor quantificado médio dos sinais em relação ao experimento referência e diminuir sua variância.

#### 2.4 Otimização Multiobjetivo de Média e Variância

A otimização da média e variância tem como base a abordagem de projeto de parâmetros. Segundo Nair (1992), essa abordagem é utilizada para redução de custos e variabilidade em produtos e processos, levando a média dos valores obtidos das respostas para os seus respectivos alvos.

Paiva *et al.* (2009) afirmam que para melhoria dos rendimentos dos processos de manufatura, deve-se alcançar a distância do alvo e a sua respectiva variância demandada. O autor sugere, portanto, a utilização de uma superfície de resposta dual (*dual response surface* – DRS) para atingir os objetivos propostos em cada característica de qualidade. Essa superfície de resposta composta por funções de média e variância (ou desvio-padrão) pode ser escrita por meio de modelos de segunda ordem. No entanto, para se adaptar a metodologia proposta neste trabalho, será utilizado apenas o modelo de primeira ordem e suas interações, como mostrado pelas equações 2.17 e 2.18:

(2.17)

Segundo Kazemzadeh et al. (2007), o processo de otimização simultânea da média e desvio-padrão (ou variância) de um parâmetro ou característica é denominado problema de
otimização de resposta dual, caso particular em que o objetivo é otimizar tanto a média e o desvio-padrão de características de qualidade múltipla. Basicamente, segundo Tang e Xu (2002), nessa abordagem dois modelos empíricos, um para média e outro para desvio-padrão das respostas do parâmetro, são determinados e ajustados de modo que a otimização dentro dos limites de interesse possa ser executada.

No entanto, Paiva *et al.* (2009) afirmam que a análise individual das respostas obtidas por meio dos modelos de média e variância pode levar a um ótimo conflitante, uma vez que um conjunto de parâmetros que otimize uma função pode degradar as respostas de outra. Kazemzadeh *et al.* (2007) citam uma abordagem de otimização de respostas duais que consiste em agregar os modelos de média e desvio-padrão (ou variância) em uma única função objetivo. Entretanto, pode-se encontrar por meio de otimização multiobjetivo o melhor conjunto solução para o problema, que pode envolver mais de par de respostas de médiae variância dos parâmetros de resposta.

Nesse caso, tem-se uma otimização multiobjetivo, definida por Gambier (2009) como um conjunto de técnicas para encontrar vetores de decisão que satisfaçam as restrições propostas para o problema e otimizem as funções objetivo representadas. Tais funções usualmente definem as especificações do projeto (ou problema) por meio de descrições matemáticas, que em determinados casos podem ser conflitantes.

De acordo Motta, Afonso e Lyra (2012), a otimização multiobjetivo possibilita o modelamento do problema específico considerando a satisfação de vários critérios, tornando-a mais realista perante outras técnicas.

Ganesana, Vasantb e Elamvazuthic (2013) afirmam que a otimização multiobjetivo pode ser dividida dentre dois conjuntos de técnicas. O primeiro conjunto de técnicas utiliza o conceito de otimalidade de Pareto para traçar a curva de solução de um problema. Segundo Jia e Ierapetritou (2007), de modo geral uma solução é Pareto ótima quando a otimalidade dessa função for atingida em detrimento dos valores de outras funções presentes durante a resolução do mesmo problema. O segundo conjunto de técnicas envolve a agregação das funções objetivo de um problema em uma única função objetivo, resolvida para vários valores escalares (pesos). Por meio dessas técnicas, pode-se registrar os efeitos dos *trade-off* no conjunto de soluções do problema. Os métodos da Soma Ponderada, Programação por Objetivo e a Intersecção Normal à Fronteira podem ser citados como exemplo.

Paiva *et al.* (2009) destacam o grau de importância de cada função objetivo e o algoritmo utilizado para resolução do problema como aspectos importantes para otimização multiobjetivo. Tang e Xu (2002) complementam que nesse tipo de otimização, os pesos refletem a preferência do experimentador por determinados parâmetros que serão utilizados para obter os valores de média e variância no intuito de atingir os valores alvo.

Karpat e Özel (2007) apresentam uma formulação geral para solução de problemas multiobjetivo:

$$\begin{cases}
Max ou Min \ f(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x) \dots, f_k(x)\} \\
S.t: \ g_j(x) \le b_j para \ j = 1, 2, \dots, m \\
h_j(x) = b_j para \ j = m+1, \dots, m+p
\end{cases}$$
(2.19)

Em que a função é apresentada como a *i-ésima* função objetivo, e são as restrições de inequalidade e equalidade e a variável de decisão (interpretada neste trabalho como os parâmetros da máquinas de solda) são mostradas com o vetor ,

Segundo Karpat e Özel (2007), o objetivo final da otimização multiobjetivo é maximizar ou minimizar as funções objetivo do problema, mesmo que essas apresentem conflitos resultando em soluções alternativas. Essa solução depende fortemente de pesos numéricos ou funções utilidade que, segundo os autores, podem ser arbitrárias ou difíceis de selecionar.

No intuito de solucionar os problemas de otimização não-lineares deste trabalho, optouse por utilizar o método do Gradiente Reduzido Generalizado, abordado no próximo item.

### 2.5 Gradiente Reduzido Generalizado

Segundo Sadagopan e Ravindran (1986), o método do Gradiente Reduzido Generalizado foi criado por Abadie e Carpentier (1969) para lidar com extensões não lineares, complementando o método de Wolfe (1967), que resolve linearmente programas não lineares restritos por meio de um "gradiente reduzido". Köksoy (2008) afirma que o método do gradiente reduzido generalizado trata-se de uma escolha popular para resolução de problemas devido ao fator de ser aplicável em muitos problemas com restrições de igualdade não lineares e estar disponível em pacotes de softwares comerciais.

Segundo Köksoy (2008), o método GRG pode ser definido como um método primal, isto é, a busca da solução ótima ocorre pelo funcionamento (ou busca) do método na região viável por meio de substituição direta. Os pontos obtidos no processamento satisfazem as restrições, sendo portanto viáveis, e o valor da função objetivo diminui em cada iteração.

O autor apresenta a formuação geral para solução de problemas não lineares, ou programação não linear (*non-linear program* – NLP), na equação 2.20:

$$\begin{cases} \underset{\mathbf{k}, f(x) \\ \mathbf{k}, f(x) \\$$

Considerando-se um vetor de variáveis de decisão ( , como a função objetivo e são as funções restrição. Os valores e são os limites mínimo e máximo das variáveis satisfazendo e uma vez que, segundo o autor, na maioria dos casos, acarreta em problema de não viabilidade ou problema com apenas uma única solução.

Esse problema é não linear se uma ou mais funções e forem não-lineares.

Köksoy (2008) apresenta o problema reduzido por meio do método de substituição direta pela formulação:

$$\begin{cases} \underset{(F(x^N))}{Min} F(x^N) = f(x^B(x^N), (x^N)) \\ S.t: l_N \le x^N \le u_N \end{cases}$$
(2.21)

No qual o vetor de vetor de variáveis é partido em dois subvetores . As variáveis e são respectivamente o vetor de variáveis básicas (dependentes) e vetor

de variáveis não-básicas (independentes). Portanto, na formulação o é expresso como uma função de , ou seja, , considerando o problema de otimização apenas em termos de e os vetores limites de são e .

A direção de movimento do algortimo do GRG é definido por Köksoy (2008) por meio da formulação do gradiente reduzido:

(2	2.	2	2	2)	)
----	----	---	---	----	---

Essa formulação tem por objetivo encontrar uma direção de movimento, com relação às variáveis não básicas, que possa melhorar os resultados da função objetivo, dado um ponto viável . O negativo do gradiente reduzido fornece a direção de descida mais ingreme para problemas de minimização.

No entanto, a ocorrência de objetivos de otimização distintos neste trabalho com múltiplas possibilidades de solução, devido às importâncias distintas das funções de média e variância das DRPs de tensão e corrente, implica na demanda por um método de solução de problemas que permita a análise das soluções de modo amplo e robusto. Devido a essa necessidade, utilizou-se o método da Intersecção Normal à Fronteira.

### 2.6 Intersecção Normal à Fronteira

Das e Dennis (1998) definem a intersecção normal à fronteira como uma técnica que tem por objetivo encontrar um conjunto de vetores objetivos viáveis F em sua fronteira que contenha os pontos ótimos de Pareto. O NBI pode ser utilizado para problemas com mais de 2 objetivos, diferentemente de métodos tradicionais para traçar curvas de soluções ótimas de Pareto. Trata-se então, segundo os autores, de uma técnica para encontrar o conjunto de pontos de Pareto ótimos de problemas multiobjetivos que sejam restritos (talvez apenas por consideração de custo de cálculo) e suavizados com qualquer número de objetivos.

De acordo com Ganesana, Vasantb e Elamvazuthic (2013), o NBI é uma abordagem inspirada geometricamente que utiliza ponderação para resolver sistema de otimização multiobjetivo, encontrando uma distribuição semi-uniforme de soluções ótimas de Pareto na fronteira. Isso torna o NBI uma opção atrativa para solução de problemas não-convexos. Entretanto, apesar de sua eficiência, Jia e Ierapetritou (2007) afirmam que na presença de objetivos com importância desigual, algumas das soluções ótimas de Pareto obtidas não apresentarão resultados desejáveis.

Motta, Afonso e Lyra (2012) afirmam que o NBI é apontado na literatura com uma estratégia de sucesso para obtenção de curvas de Pareto de soluções ótimas para problemas biobjetivos. Destacam-se suas propriedades de produzir pontos igualmente espalhados e obter, em consequência disso, soluções *trade-off* entre objetivos conflitantes. Em casos onde o problema apresenta mais de dois objetivos, segundo Das e Dennis (1998), a equação diferencial é, na verdade, um conjunto de equações parciais não-lineares que apresentam condições de fronteria não disponíveis no momento inicial, ao contrário da otimização bi-objetivo.

No entanto, Das e Dennis (1998) afirmam que para cada objetivo do problema, exista uma solução minimizadora ou maximizadora. A partir disso, define-se como ponto de utopia a solução em que um único valor de *x* atinge os objetivos de minimização ou maximização das funções objetivo simultaneamente. An, Green e Johrendt (2010), no entanto, ponderam que o ponto de utopia muitas vezes não é permitido em problemas reais, sendo o objetivo da otimização multiobjetivo encontrar um conjunto de soluções ótimas de Pareto que apresente uma grande diversidade dentre seus resultados e que estejam uniformente distribuídas ao longo da fronteira projetada. Portanto, segundo Das e Dennis (1998), resultados mais próximos possíveis do ponto de utopia são esperados, de modo a assegurar a existência de um *trade-off* concordante entre os múltiplos objetivos.

Das e Dennis (1998) afirmam que o primeiro passo do NBI é a construção da matriz payoff . Essa matriz é fundamentada no cálculo dos mínimos individuais das funções objetivo do problema. Em notação matricial, Brito *et al.* (2014) representam a matriz payoff da seguinte forma:

A solução mínima ou máxima (dependendo do objetivo) é proveninte da inserção do ótimo individual na *i-ésima* função objetivo . Segundo An, Green e Johrendt (2010), é importante salientar que será considerado uma solução ótima de Pareto caso não exista de modo que para todo para pelo com . An, Green e Johrendt (2010) afirmam que todas as soluções de Pareto menos um são ótimas de modo que não é possível otimizar uma função que represente um objetivo específico sem comprometer os resultados de outras funções, e portanto outros objetivos.

De acordo com Brito et al. (2014), o passo seguinte é utilizar os valores mínimos e máximos das i-ésimas funções objetivo obtidas para sua normalização, por meio da fórmula:

$$----, \text{ com } i=1,..., \text{ m.}$$
 (2.24)

Onde é a representação matricial do ponto de Utupia, o vetor que contém os mínimos ou máximos globais inviduais (ótimos) do problema e o vetor representa o Ponto de Nadir, no qual as funções atingem seus piores valores em relação aos seus respectivos objetivos. Por meio desse procedimento, obtém-se a matriz payoff escalonada .

Na Figura 2.7, ilustra-se a Fronteria de Pareto e seus respectivos componentes:



Figura 2.7 – Método da Intersecção Normal à Fronteira (NBI). Fonte: Oliveira (2013) adaptado de Vahidinasab e Jadid (2010)

Jia e Ierapetritou (2007) em seu trabalho explicam que os pontos de ancoragem são obtidos quando um *i-ésimo* objetivo específico é minimizado de modo independente em relação aos demais. Na Figura 2.7, o ponto representa representa o ponto de Utopia, o ponto de Nadir e os pontos representam os mínimos e máximos individuais de uma determinada função objetivo.

O segmento de reta resultante da união dos segmentos c e d na mesma figura denominase envoltoria convexa de minimos individuais (Convex Hull of Individual Minima – CHIM). Jia e Ierapetritou (2007) define o CHIM da seguinte forma: deixe ser o minimizador respectivo de . onde para Deixe para e ser a matriz cuja i-ésima coluna é . O conjunto de pontos em representando as combinações convexas de , isto é,

, com e , é chamado de CHIM. O conjunto de vetores objetivo possíveis é denotado por , logo é mapeado em por . Denomina-se o espaço que contém como espaço objetivo. A fronteira de é denotada por .

Das e Dennis (1998) resumem a ideia algébrica do NBI: a intersecção entre a fronteira de eficiência e a reta normal que aponta na direção da origem dos eixos e emana de qualquer ponto no CHIM trata-se de um ponto de eficiência. Por meio do NBI obtém-se pelo menos os pontos de fronteira (ótimos locais) dominados por seja quais forem seus . Caso componentes, considerando-se um atingível, isto é, , Das e Dennis (1998) afirmam que possuirá uma coluna composta de zeros e/ou algum ponto de fronteira que domina estará presente, com isso possibilitando que o seja refinado e o NBI reiniciado.

A formulação matemática para resolução do NBI é representada na equação 2.25:

$$\begin{cases}
\begin{aligned}
& \underset{\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{x} \in \mathbf{x} \in \mathbf{x} \in \mathbf{x} \\
& \mathbf{x} \in C \\
& g_i(x) \leq 0 \\
& h_i(x) = 0
\end{aligned}$$
(2.25)

Segundo Motta, Afonso e Lyra (2012), a representação do vetor normalizado das funções objetivo é dada por:

(2.26)

Segundo Jia e Ierapetritou (2007), representa um ponto no CHIM dada uma ponderação convexa .

Na formulação denota uma unidade normal para o CHIM em direção à origem e , onde representa o conjunto de pontos naquela normal.

Das e Dennis (1998) afirmam que a restrição do vetor tem por objetivo assegurar que um ponto seja mapeado em para que seja um ponto na normal, considerando as restrições que tem por objetivo assegurar a viabilidade de em relação ao problema. Realizado o processo de otimização, deve-se atentar para a manutenção desses resultados durante a execução dos experimentos futuros, que tenham como base os parâmetros encontrados na otimização. A ocorrência de causas especiais durante a execução dos processos deve ser considerada, no intuito de evitar a contaminação dos sinais elétricos por ruídos durante a definição dos experimentos referência ou análise do projeto experimental. Portanto, deve-se estudar um modo efetivo de controle estatístico *online* para monitoramento deste processo, considerando-se a autocorrelação entre os valores das DRPs de corrente e tensão para cada sinal do projeto experimental. Desta forma, por suas características, a seguir explicadas, utilizou-se a carta de controle  $T^2$  Hotteling.

# 2.7 Cartas de Controles T<sup>2</sup> Hotteling

Segundo Montgomery e Runger (2009), as cartas de controle estão dentre um conjunto de ferramentas para resolução de problemas, no intuito de alcançar uma maior estabilidade e melhorar a capabilidade de processos produtivos por meio da redução de sua variabilidade. Os autores definem resumidamente a carta de controle como uma ferramenta para apresentação gráfica de uma característica da qualidade, na qual sua amostra dessa característica é mensurada ou computada e analizada de acordo com sua distribuição ao longo do tempo ou da numeração da amostra.

Lowry e Montgomery (1995) distinguem o uso das cartas de controle em duas fases distintas. A Fase I consiste em usar as cartas de controle para avaliar se o processo estava sob controle quando os dados dos subgrupos amostrais foram coletados. Por meio das amostras, coletam-se conjuntos de dados que indicam que o processo está sob controle e estabelecem-se limites de controle para que o processo seja futuramente monitorado. A Fase II consiste em utilizar os limites de controle desenvolvidos na fase anterior para avaliar se os novos resultados dos processos avaliados estão sofrendo desvios dos valores de média e variância considerados padrão.

Segundo Reynolds Jr. e Lu (1997), cartas de controle podem ser usadas para detectar mudanças resultantes de causas especiais ocorridas em um espaço de tempo desconhecido ao longo da execução do processo produtivo. Montgomery e Runger (2009) afirmam que a grande importância da carta de controle está em seu uso para a melhoria de processos, de

modo que pela detecção de padrões não aleatórios pode-se detectar a ocorrência de mudanças para que investigações e melhorias ocorram.

Dentre os principais benefícios existentes para a implantação das cartas de controle no controle estatístico de processos, Montgomery e Runger (2009) citam a efetiva prevenção de defeitos por meio de monitoramento online de processos, a prevenção de ajustes desnecessários, as informações de diagnóstico e sobre a capabilidade do processo coletadas.

De acordo com Reynolds Jr. e Lu (1997), apesar da suposição padrão de independência das observações na carta de controle tradicional, diversos processos de interesse apresentam autocorrelação. Ao aplicar-se a metodologia de carta de controle tradicional em observações autocorrelacionadas, os resultados podem conter estimativas tendenciosas dos parâmetros do processo, taxas de alarmes em falso elevadas e apresentar uma demora na detecção de mudanças no processo. Thaga (2008) salienta que ações corretivas executadas após a detecção de falsos alarmes podem acarretar na introdução de variabilidade no processo e tornar a aplicação da carta de controle menos efetiva e mais dispendiosa financeiramente para a empresa.

Com relação à autocorrelação, de acordo com Thaga (2008) tendências negativas consideráveis podem ser geradas nos estimadores do desvio padrão na presença de autocorrelação positiva nas variáveis de um processo. Na presença de autocorrelação negativa, os limites de controle podem se tornar mais amplos, gerando insensibilidade parcial a mudanças nas médias analisadas dos parâmetros de processo. Por esses motivos, o autor reforça que a avaliação da autocorreçalação entre as variáveis do processo torna-se uma atividade importante durante o projeto de um esquema de monitoramento de processos.

Segundo Reynolds Jr. e Lu (1997), deve-se averiguar ao constatar a autocorrelação entre as observações, dentro de cada variável, se esse comportamento trata-se de uma causa especial ou variabilidade de causa comum. Causas especiais podem produzir mudanças no processo, afetando sua média, variância ou ambas. Portanto, nesse caso deve-se tentar eliminar a autocorrelação.

No entanto, Reynolds Jr. e Lu (1997) afirmam que caso a autocorrelação seja inerente à variabilidade da causa comum do processo, não podendo, portanto, ser eliminada, pode-se considerar a autocorrelação em cartas de controle por meio de duas abordagens gerais.

De acordo com Thaga (2008), a primeira abordagem ajusta os limites de controle e métodos de estimativa dos parâmetros para contabilizar a autocorrelação das variáveis nas cartas de controle dos subgrupos computados. Tal abordagem usualmente é aplicável em processos com baixa autocorrelação. A segunda abordagem, de acordo com Reynolds Jr. e Lu (1997) e Thaga (2008), tem como base o ajuste de séries temporais para os dados autocorrelacionados, de modo a comparar os valores prévios com os valores gerados a partir do modelo de previsão, computando por meio disso os resíduos. A partir disso, cartas de controle padrão são geradas, computando esses resíduos como variáveis independentes e aleatórias normalmente distribuídas, segundo os autores. Thaga (2008) afirma que essa abordagem é particularmente efetiva quando a autocorrelação entre as variáveis é elevada.

No presente trabalho, a primeira abordagem será utilizada para avaliar um projeto experimental multivariado. Portanto, será utilizada uma carta de controle de Hotelling, que segundo Aparisi e Haro (2001) é um tipo de carta de controle amplamente utilizado para controlar mudanças em vetores de média das características de qualidade correlacionadas avaliadas no projeto experimental. Segundo Chenouri, Variyath e Steiner (2009), a carta de controle de Hotelling utiliza a média e a matriz de covariância amostral no intuito de estimar o vetor média e a matriz de covariância populacional. Deve-se atentar ao fato do vetor de média amostral e dos estimadores da matriz de covariância apresentarem considerável sensibilidade aos *outliers* presentes na Fase I.

Chou, Mason e Young (2001) afirmam que carta de controle de Hotelling é frequentemente empregada na remoção de outliers durante a execução de processos nas cartas de controle da Fase I e na detecção de sinais nas operações das cartas de controle da Fase II, no caso de processos multivariados com observações individuais.

Segundo Chou, Mason e Young (2001), no caso de parâmetros de processo desconhecidos com distribuição normal multivariada, a carta de controle de Hotelling apresentará uma distribuição *beta* na Fase I e *F* na Fase II, com o limite superior de controle (LSC) mantido como exato apenas se essa suposição se mantiver. Os autores recomendam que o LSC seja pré-ajustado antes que novas observações sejam tomadas, sempre mantendo a proporcionalidade aos percentis *beta* ou *F*. O LSC não deve ser usado quando a distribuição não for normal multivariada e os custos dos alarmes em falso foram elevados.

Aparisi e Haro (2001) descrevem em seu trabalho os princípios matemáticos de controle da carta de Hotelling. Dada uma distribuição de probabilidade, de p características da qualidade correlacionadas, seja a variável normal p, com um vetor média e matriz de covariância em um processo sob controle. Têm-se o valor como a média da *j-ésima* característica de qualidade e n observações para cada característica de qualidade quando a *i-ésima* amostra de tamanho n é tomada. A partir disso, torna-se possível o cálculo do vetor , representando o *i-ésimo* vetor de média amostral para p características.

De acordo com Aparisi e Haro (2001), utiliza-se a estatística

quando os valores de média e a a matriz de covariância são conhecidos, sendo o valor de distríbuido como um qui-quadradro onde quando o processo está sob controle.

Nesse caso, Aparisi e Haro (2001) complementam que no processo sob controle, onde , uma probabilidade α existe, usualmente entre os valores de 3 por mil ou 5 por mil, de modo que exceda o valor critíco . Quando o processo não se encontra sob controle, de modo que , distribui-se o como uma variável qui-quadrado não-central com *p* graus de liberdade. Utiliza-se adicionalmente um parâmetro de não centralidade

, com um parâmetro para mensurar mudanças no vetor de média do processo denominado distância de Mahalanobis, representado pela formulação . O vetor médio das caractéristicas de qualidade *p* é representado por . Em relação ao tempo de amostragem, os autores ressaltam que considerando um tempo de amostragem em uma carta com intervalos de amostragem fixo, para cartas com intervalos de amostragem variáveis, têm-se os períodos de tempo ou , com e .

# 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O projeto experimental e os sinais elétricos resultantes do processo de soldagem utilizados neste trabalho foram retirados de Aguiar (2014), que utilizou a fonte IMC-INVERSAL® 300 para a soldagem no modo MIG/MAG Pulsado – CA, um cabeçote alimentador IMC-STA-20® e um dispositivo deslocador semi-automático (carro tartaruga) para a tocha no banco de testes. Esses dispositivos permitiram que a velocidade de soldagem, a posição de 90° da tocha em relação ao metal base e a distância do bico de contato com a peça fossem mantidas constantes. Definiram-se como padrões a distância de 15 mm do bico de contato com a peça e o recuo de 3 mm do bico em relação ao bocal de proteção nos experimentos realizados.

Os sinais de corrente e tensão dos processos de soldagem foram aquisitados por 1 segundo por meio de um software denominado Oscilos4®, operado através do computador do laboratório de soldagem. A aquisição foi realizada a uma taxa de 4000 Hz (limitação do equipamento). O aparato experimental é mostrado na Figura 3.1:





Figura 3.1 – Aparato Experimental.

A numeração dos objetos mostrados na Figura 3.1 indica os seguintes objetos:

- 1. Corpo de Prova
- 2. Cabeçote alimentador IMC-STA-20®
- 3. Dispositivo para condução da Tocha
- 4. Fonte IMC-INVERSAL® 300
- 5. Alimentador Aristo Feed 30-4W MA6

- 6. Cilindro de gás de proteção
- 7. Medidor de vazão do gás de proteção
- 8. Computador para processamento de dados

Além dos componentes descritos, Aguiar (2014) utilizou também uma balança de precisão da marca Coleman® modelo BNV6-12-1200 para pesagem dos corpos de prova e cálculo do percentual de deposição do metal de adição sobre o metal base.

Após a realização dos experimentos e pesagem dos corpos de prova, utilizou-se uma Serra fita SACORA® modelo SF-18. Desprezou-se o início do cordão devido a irregularidades iniciais e o final do cordão devido ao término da solda e possíveis formações de cratera.

As amostras cortadas foram lixadas, polidas e posteriormente atacadas com uma solução de nital 4%, a fim de que os cristais e o perfil metalográfico fossem observados.

Para observar os perfis obtidos, utilizou-se um estereoscópio da marca Olympus®, modelo Z61 com zoom de 6,7x – 45x acoplado a um computador com os softwares Analysis Doc® e Analysis FIVE digital imaging solutions Olympus. Os perfis foram ampliados a uma taxa de 10x para medição da geometria dos cordões. Foram medidos o reforço (R), largura (W) e a penetração (P) de cada perfil de solda. A taxa de deposição, estimada por Aguiar (2014) através do cálculo da diferença entre a massas inicial e final dos corpos de prova, dividida pelo tempo de soldagem do experimento, foi também considerada como uma resposta para este trabalho. Um exemplo de perfil de cordão de solda é mostrado na Figura 3.2 em conjunto com as características geométricas a serem mensuradas:



Figura 3.2 – Perfil de corpo de prova e características geométricas mensuradas. Fonte: Aguiar (2014).

Como material base foram utilizadas chapas de aço carbono ABNT 1020 nas dimensões 110mm x 50mm x 4,7mm. Utilizou-se ainda arames AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2mm, protegidos durante o processo de soldagem por um gás de proteção de 98%Ar+2%O<sub>2</sub>. A Tabela 3.1 apresenta a composição química dos materiais de deposição e metais base utilizados nos experimentos:

Tabela 3.1 – Composição química do material de deposição e metal base.

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
ER 70S-6	0,06-0,15	0,80 - 1,15	1,40 - 1,85	0,025	0,035	0,5
ABNT 1020	0,18-0,23	_	0,30 - 0,60	0,04	0,05	-

Fonte: Aguiar (2014) adaptado de ESAB (2012)

Em conseqüência de restrição operacional do equipamento de soldagem, aplicou-se o formato de onda tipo "C" na realização dos experimentos, conforme classificação apresentada por Nascimento e Vilarinho (2007). Deste modo, aquisitaram-se os sinais de corrente e tensão conforme apresentado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Gráficos dos sinais de corrente e tensão do experimento 01.

Aguiar (2014) definiu como resposta o aspecto do gráfico de dispersão Corrente versus Tensão, classificando-os em uma escala de 0 a 10. A Figura 3.4 mostra o gráfico resultante para o experimento 1, tendo recebido a nota máxima 10 dentre os 39 experimentos:



Figura 3.4 – Gráfico de dispersão U\*I do experimento 01.

Foram escolhidos para análise a corrente de base (Ib) e o seu tempo de permanência do eletrodo na corrente de base (tb). Justificou-se a escolha desses parâmetros como consequência da alta dinâmica do processo pela alternância das polaridades positiva e negativa. A velocidade de alimentação do arame (Va) foi escolhida para análise devido a sua interação com outras variáveis do processo. Finalmente, variou-se no estudo o percentual de tempo em que o eletrodo opera em polaridade negativa (EN).

Aguiar (2014) optou por uma soldagem que permitisse uma gota por pulso, ou UGPP, na polaridade positiva, no qual a gota se destacaria ao término da corrente positiva de pico. Para isso, o autor ajustou a corrente positiva de pico para 350A com um tempo de permanência de 4ms nos experimentos. Segundo o autor, isso promoveu maior estabilidade e uma transferência metálica que se adequasse ao formato da onda com a base positiva antes do pulso. A Tabela 3.2 mostra os parâmetros utilizados para execução dos experimentos:

Donêmotroc	Unidada	Notação	Níveis de	trabalho				
Parametros	Unidade	Notação —	-1	1				
Velocidade de alimentação	m/min	Va	3	3,5				
Corrente de base	А	Ib	50	90				
Tempo de base	ms	tb	5	10				
Percentual de tempo negativo	%	EN	30	60				
Fonte: Aguiar (2014).								

Tabela 3.2 – Parâmetros variáveis e níveis de trabalho.

Com referência aos parâmetros fixos, resumiu-se na Tabela 3.3 os valores de trabalho, tipo de material, gás utilizado e a respectiva unidade do parâmetro fixo:

Parâmetros	Valores de trabalho / Tipo	Unidade
Vs	30	cm/min
Ір	350	А
tp	4	ms
In	-60	А
tn*	3,9; 6; 13,5 e 21	ms
DBCP	15	mm
Recuo do bico da tocha	3	mm
Tipo de mistura gasosa	98%Ar+2%O <sub>2</sub>	%
Vazão do gás de proteção	15	l/min
Posição de soldagem	Plana (deposição simples)	_
Ângulo da tocha	90	graus
Arame-eletrodo	ER 70S-6	—
Diâmetro do arame-eletrodo	1,2	mm
Material do metal base	Aço carbono ABNT 1020	_
Espessura do metal de base	4,7	mm
Velocidade de alimentação	3	m/min

Tabela 3.3 – Parâmetros fixos, tipos e níveis de trabalho.

#### Fonte: Aguiar (2014).

Desse modo, Aguiar (2014) realizou um arranjo experimental fatorial completo de dois níveis, com réplica e 2 pontos centrais, sem aleatorização e sem blocagem, totalizando 34 experimentos. No entanto, para execução deste trabalho, foram incrementados mais 5 experimentos referentes aos pontos centrais no projeto experimental de Aguiar (2014), no intuito de aprimorar os ajustes do modelo. A Tabela 3.4, na próxima página, mostra o projeto experimental, com seus conjuntos de variáveis, suas respectivas respostas mecânicas e as notas dadas aos gráficos de dispersão U\*I por Aguiar (2014) para os experimentos:

Ensaio	Ib (A)	tb (ms)	EN (%)	Va (m/min)	tn (ms)	Largura W (mm)	Penetração P (mm)	Reforço R (mm)	TD (Kg/h)	Nota (U*I)
1	50,000	5,000	30,000	3,000	3,900	6,877	1,243	2,055	1,457	10,000
2	90,000	5,000	30,000	3,000	3,900	6,831	1,188	2,187	1,286	9,000
3	50,000	10,000	30,000	3,000	6,000	6,318	1,091	2,375	1,388	8,000
4	90,000	10,000	30,000	3,000	6,000	6,481	1,441	2,324	1,459	8,500
5	50,000	5,000	60,000	3,000	13,500	6,227	1,254	2,197	1,333	8,000
6	90,000	5,000	60,000	3,000	13,500	6,486	1,380	2,294	1,481	7,800
7	50,000	10,000	60,000	3,000	21,000	6,953	0,929	2,345	1,374	4,500
8	90,000	10,000	60,000	3,000	21,000	7,161	0,842	2,426	1,345	5,000
9	50,000	5,000	30,000	3,500	3,900	7,770	1,568	2,304	1,651	5,500
10	90,000	5,000	30,000	3,500	3,900	8,277	1,766	2,086	1,672	6,000
11	50,000	10,000	30,000	3,500	6,000	7,734	1,401	2,187	1,428	4,500
12	90,000	10,000	30,000	3,500	6,000	8,034	1,416	2,335	1,724	6,000
13	50,000	5,000	60,000	3,500	13,500	8,120	1,061	2,456	1,449	4,000
14	90,000	5,000	60,000	3,500	13,500	8,303	1,035	2,446	1,622	1,500
15	50,000	10,000	60,000	3,500	21,000	7,181	0,680	2,964	1,719	3,000
16	90,000	10,000	60,000	3,500	21,000	8,095	1,005	2,619	1,648	2,500
17	50,000	5,000	30,000	3,000	3,900	7,080	1,325	2,314	1,308	9,500
18	90,000	5,000	30,000	3,000	3,900	6,242	1,005	2,258	1,321	8,500
19	50,000	10,000	30,000	3,000	6,000	5,577	0,837	2,050	1,141	7,500
20	90,000	10,000	30,000	3,000	6,000	7,009	1,426	2,086	1,436	7,500
21	50,000	5,000	60,000	3,000	13,500	7,105	1,360	2,294	1,410	5,000
22	90,000	5,000	60,000	3,000	13,500	6,912	1,436	2,507	1,457	7,000
23	50,000	10,000	60,000	3,000	21,000	7,318	0,903	2,319	1,342	4,500
24	90,000	10,000	60,000	3,000	21,000	7,130	0,776	2,248	1,383	5,000
25	50,000	5,000	30,000	3,500	3,900	7,866	1,675	2,238	1,644	5,500
26	90,000	5,000	30,000	3,500	3,900	8,150	1,710	2,340	1,673	7,500
27	50,000	10,000	30,000	3,500	6,000	7,871	1,294	2,472	1,597	5,000
28	90,000	10,000	30,000	3,500	6,000	8,257	1,365	2,375	1,688	6,000
29	50,000	5,000	60,000	3,500	13,500	7,912	0,868	2,619	1,618	4,000
30	90,000	5,000	60,000	3,500	13,500	7,222	0,797	2,406	1,565	2,000
31	50,000	10,000	60,000	3,500	21,000	7,841	0,690	2,761	1,702	3,000
32	90,000	10,000	60,000	3,500	21,000	7,450	0,487	2,553	1,699	2,000
33	70,000	7,500	45,000	3,250	9,400	7,602	1,254	2,101	1,418	6,500
34	70,000	7,500	45,000	3,250	9,400	7,973	1,188	2,086	1,468	6,500
35	70,000	7,500	45,000	3,250	9,400	7,308	1,340	2,152	1,520	6,000
36	70,000	7,500	45,000	3,250	9,400	7,643	1,360	2,030	1,398	6,000
37	70,000	7,500	45,000	3,250	9,400	7,196	1,482	1,959	1,406	5,500
38	70,000	7,500	45,000	3,250	9,400	7,927	1,411	2,101	1,424	5,500
39	70,000	7,500	45,000	3,250	9,400	7,673	1,441	2,253	1,427	5,500

Tabela 3.4 – Projeto experimental completo e parâmetros variáveis do processo.

Fonte: Adaptado de Aguiar (2014).

### 4. METODOLOGIA PROPOSTA

De modo a apresentar a metodologia proposta neste trabalho, é mostrado na Figura 4.1 o fluxograma da metodologia para otimização de processos de soldagem por meio da análise de sinais de corrente e tensão:



Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta.

As etapas descritas no fluxograma são detalhadas abaixo:

Etapa 1 – Desenvolver o projeto experimental: Os experimentos são executados de acordo com o DOE desenvolvido, a fim de que os resultados possam fornercer informações estatisticamente sobre o objeto de estudo para continuidade das análises.

Etapa 2 – Aquisitar os sinais de corrente e tensão do projeto experimental: Durante a realização dos experimentos, deve-se ajustar o maquinário do processo a fim de que os sinais elétricos emitidos, resultantes da execução do experimento de acordo com um conjunto de parâmetros do processo, possam ser captados e arquivados para análise posterior.

Etapa 3 – Escolha do experimento referência que será utilizado para análise de todo o projeto experimental: O estudo da metodologia proposta baseia-se na análise da variação de todos os experimentos em relação a um experimento tomado como referência e escolhido

aleatoriamente do próprio projeto experimental. No entanto, recomenda-se que seja escolhido como experimento referência aquele que produzir o melhor resultado baseado no critério a ser determinado. No caso deste trabalho, o critério adotado foi o aspecto dos sinais dos gráficos de U\*I. Esses aspectos que podem ser desconhecidos para um leigo no processo foram traduzidos por Aguiar (2014) por meio de uma escala numérica de 1 a 10. Quanto maior a nota obtida, melhor o aspecto do sinal do gráfico U\*I.

Etapa 4 – Determinar a quantidade de frequências no sinal para análise: Como parte do estudo, analisam-se sinais de corrente e tensão compostos por diversas frequências de onda. No entanto, a fim de analisar uma possível diminuição da capacidade de otimização da metodologia para sinais elétricos recontruídos com um número reduzido de frequências, neste trabalho a metodologia foi executada adicionalmente para os sinais de corrente e tensão contendo apenas 3 frequências com as maiores amplitude dentre as outras que compõe o sinal. Essas frequências foram obtidas e selecionadas por meio de Transformadas Rápidas de Fourier de cada um dos sinais de corrente e tensão. As transformadas rápidas e inversas de Fourier foram executadas por meio do código desenvolvido de Ben-Ezra (2009), apresentado no Anexo A, para análises no software Matlab.

Etapa 5 – Obtenção do período de onda aproximado do sinal de referência: Para investigar e mensurar como os sinais de corrente ou tensão variam entre si, é necessário definir primeiramente as partes do sinal que serão analisadas. Para isso, decidiu-se por separar o sinal em partes iguais para que fossem comparados entre si, executando uma divisão em partes iguais baseada no período de onda do sinal de um experimento tomado como referência. O período de onda do sinal é encontrado por meio do cálculo do inverso da frequência do sinal de referência, determinado após a realização da Transformada de Fourier.

Etapa 6 – Divisão de todos os sinais de corrente e tensão em janelas de tamanhos iguais: Em posse do valor do período de onda, utiliza-se a equação 4.1 para determinar o número de janelas que serão utilizadas na execução da metodologia, considerando um tempo de aquisição de dados igual a 1 segundo:

\_\_\_\_\_ (4.1)

Etapa 7 – Cálculo da área abaixo da curva dos sinais de corrente e tensão para todos os experimentos e suas janelas: Para que a variação entre os sinais elétricos do conjunto

experimental seja quantificada, calcula-se a área abaixo da curva dos sinais de corrente e tensão de cada janela dos sinais do projeto experimental. Neste trabalho, o cálculo das áreas abaixo da curva foi realizado por meio de integração numérica por aproximação trapezoidal. Para execução da integração numérica pelo método trapezoidal, bem como execução das etapas 8 e 9, o autor deste trabalho desenvolveu o código apresentado no Apêndice B.



Figura 4.2 – Exemplo de área abaixo da curva de um sinal de corrente.

Etapa 8 – Obtenção das Diferenças Relativas Percentuais (DRPs) do projeto experimental em relação ao sinal referência: Com a quantificação matemática por meio do cálculo das áreas abaixo das curvas dos sinais de corrente e tensão, torna-se possível mensurar a diferença relativa percentual das áreas de um sinal qualquer em relação a um sinal escolhido como referência. Para o cálculo desse indicador, deve-se obter a média das áreas abaixo da curva de todas as janelas dos sinais de corrente e tensão do experimento referência utilizando-se a equação 4.2:

Em posse do valor da média das áreas do sinal de referência, aplica-se a equação 4.3 para determinação da DRP de cada janela do conjunto experimental:

Em posse dos valores de DRP dos sinais de corrrente e tensão do projeto experimental, constatou-se a existência de correlação significativa entre as DRPs, as respostas geométricas

dos cordões de solda e a nota dada ao aspecto do gráfico U\*I. Essas correlações serão mostradas e discutidas no próximo capítulo. Na Figura 4.3, foram selecionadas 200 amostras de valores de DRP, correspondentes ao mesmo período de tempo para os experimentos 01, 09 e 14 respectivamente. Observe que um experimento excelente (ensaio 1) apresenta média e variância menor entre seus valores quando comparado a um experimento ruim (ensaio 14). O ensaio 9 apresenta uma nota regular, com DRPs mostrando um comportamento intermediário entre as distribuições de valores dos ensaios 1 e 14.



Figura 4.3 – Gráfico da Distribuição amostral das DRPs de corrente dos experimentos 01, 09 e 14 (experimento referência 1).

Etapa 9 – Obtenção dos modelos matemáticos de média e variância das DRPs de corrente e tensão dos sinais elétricos: Em posse das distribuições de média e variância das DRPs de corrente e tensão do projeto experimental em relação ao experimento referência *i*, realiza-se uma regressão desses valores para encontrar os modelos matemáticos que serão utilizados para resolução do problema.

Primeiramente, calcula-se a média e variância das DRPs referentes ao experimento *i* por meio das seguintes formulações:

A Figura 4.4 é a representação gráfica das principais etapas deste trabalho, indicando a etapa mecânica, o cálculo das áreas abaixo da curva e modelagem por meio dos valores de média e variância das DRPs de corrente e tensão:





Em posse dos valores de média e variâncias das DRPs de todos os sinais dos experimentos, realiza-se uma análise de regressão dos valores resultantes.

Os modelos resultantes da análise de regressão das DRPs de corrente e tensão devem ser avaliados com relação aos seus ajustes e sua capacidade de previsão no intuito de facilitar a compreensão das etapas seguintes.

Etapa 10 – Execução do NBI a partir do arranjo de mistura de média e variâncias das DRPs dos sinais de corrente e tensão para o problema multiobjetivo: Inicia-se o procedimento por meio do cálculo do ponto de utopia do problema por meio da minimização dos modelos de regressão de média e variância das DRPs.

Após a obtenção do ponto de utopia, obtém-se a matriz *pay-off* escalonada . No entanto, para avançar na solução da metodologia, múltiplos subproblemas devem ser

resolvidos. O conjunto de soluções do NBI é encontrado por meio de um projeto de experimento de misturas, onde cada combinação de peso (e, portanto importância das funções objetivos do problema original) que constituem a matriz definirá a solução do . Para cada solução encontrada, deve-se calcular o valor do erro absoluto do valor encontrado em relação ao seu respectivo alvo. O denominado Erro Percentual Global é apresentado por Gomes (2013) por meio da equação 4.6:

— (4.6)

#### Onde:

- valores das respostas Pareto-ótimas;
- Alvos definidos;
- Números de objetivos.

Etapa 11 – Otimizar o modelo do Erro Percentual Global a partir das soluções do NBI: Realiza-se uma regressão para obtenção do modelo matemático que descreva os EPGs obtidos por meio das soluções do subproblema de NBI. Utilizando-se o modelo construído, é possível avaliar seu ajuste e capacidade de predição.

Os valores de peso determinados e que diminuem o valor do EPG para seu valor mínimo são inseridos na matriz  $\beta$  e executa-se uma rodada de otimização por meio do NBI. Os valores codificados dos parâmetros de processo encontrados são os valores que solucionam o problema.

Etapa 12 – Prever o classificador do modelo por meio dos novos parâmetros de processo: Para avaliar o novo conjunto de parâmetros de processo obtidos por meio do NBI, deve-se utilizar um instrumento de classificação. No caso deste trabalho, será obtida uma estimativa da nota do gráfico U\*I gerado pela regressão do modelo proposto por Aguiar (2014), mostrado previamente na Tabela 2.2.

Os parâmetros de resposta do NBI serão inseridos no modelo de classificação e uma estimativa do gráfico de U\*I que seria gerado caso uma solda fosse realizada com esses parâmetros será obtida.

Por último, pode-se realizar a decodificação dos parâmetros ótimos x1, x2, x3 e x4 por meio da equação 4.7, obtidos após a execução do NBI com os pesos obtidos pela otimização (minimização) do EPG. Os valores fatoriais ótimos codificados são inseridos na expressão de decodificação.

\_\_\_\_\_ (4.7)

No qual se interpreta Ma. V. como o maior valor do nível analisado decodificado e Me. V. como o menor valor do nível analisado decodificado.

Apesar da obtenção dos valores decodificados, os valores codificados ainda serão utilizados no último passo para a previsão da nota do gráfico de U\*I da solução ótima.

# 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, no intuito de ilustrar a aplicação da metodologia proposta e a execução das análises realizadas ao longo de cada etapa, será demonstrada no item 5.1 como a metodologia foi aplicada utilizando-se o experimento 14 como referência. O item 5.2 condensa as informações encontradas nas análises de 16 experimentos referência aleatoriamente selecionados do projeto experimental, distinguindo os resultados dentre as informações resultantes das análises dos sinais compostos por todas suas frequências originais e os sinais reconstruídos e analisados utilizando suas 3 frequências de maior amplitude. Ao término desse item, uma tabela resumo com todos os resultados alcançados será apresentada. Finalmente, no item 5.3 aborda-se a possibilidade de realizar o controle estatístico do processo estudado por meio da aplicação de cartas de controle  $T^2$  Hotteling.

### 5.1 Exemplo de aplicação da metodologia

Etapas 1 e 2 – Desenvolver o projeto experimental e aquisitar os sinais de corrente e tensão do projeto experimental: Como descrito anteriormente, Aguiar (2014) projetou um experimento fatorial completo em dois níveis com réplica e 2 pontos centrais, sem aleatorização e sem blocagem, totalizando 34 experimentos. No intuito de aprimorar a análise estatística dos dados gerados, foram adicionados mais 5 pontos centrais ao projeto experimental. Os sinais de corrente e tensão dos experimentos foram aquisitados por 1 segundo durante a realização das soldas por meio do software Oscilos4®, a uma taxa de 4000 Hz. Os 39 conjuntos de dados referentes aos sinais foram transferidos para um documento do software Microsoft Excel®.

Etapa 3 – Escolha do experimento referência que será utilizado para análise de todo o projeto experimental: A metodologia proposta baseia-se na análise da variação dos experimentos em relação a um experimento tomado do próprio conjunto experimental. A fim de ilustrar a execução da metodologia proposta, escolheu-se o experimento 14 como referência. Devido às dispersões conjuntas dos ciclos de soldagem do gráfico U\*I desse experimento apresentarem pouca uniformidade, Aguiar (2014) classificou o experimento com uma nota igual a 1,5. Dentre os 39 experimentos realizados, essa é a menor nota obtida por um gráfico de U\*I.

Etapa 4 – Determinar a quantidade de frequências no sinal para análise: Para exemplificação da metodologia, nesse capítulo serão utilizados os sinais de corrente e tensão completos dos 39 experimentos, isto é, sinais compostos por todas suas frequências de onda.

Etapa 5 – Obtenção do período de onda aproximado do sinal de referência: Para investigar e mensurar como os sinais de corrente ou tensão variam entre si, é necessário definir primeiramente o intervalo de análise do sinal. Para isso, decidiu-se por separar o sinal em partes iguais, executando-se a divisão dos sinais em partes iguais baseada no período de onda do sinal do experimento referência. A transformada rápida de Fourier foi executada nos sinais de corrente e tensão do experimento 14 e o período de onda aproximado do sinal de referência foi determinado.

Etapa 6 – Divisão de todos os sinais de corrente e tensão em janelas de tamanhos iguais: No caso do experimento referência 14, o período de onda é igual a 0,06. O valor da taxa de amostragem, 4000 Hz, é igual para todos os experimentos. Utilizando-se a equação 4.1, obtiveram-se os números de janelas do experimento referência em questão. A informações com relação à frequência, período de onda e número de janelas utilizados na análise de cada processo de otimização foram resumidas na Tabela 5.1:

Experimento referência	Frequência da onda (Hz)	Período da onda (s)	Nº Janelas
1	60,547	0,02	66
3	48,828	0,02	82
7	28,320	0,04	141
9	76,172	0,01	53
11	47,852	0,02	84
14	17,578	0,06	227
16	28,320	0,04	141
18	57,617	0,02	69
21	43,945	0,02	91
25	78,125	0,01	51
26	76,172	0,01	53
29	43,945	0,02	91
31	28,320	0,04	141
34	46,875	0,02	85
37	46,875	0,02	85
39	46,875	0,02	85

Tabela 5.1 - Valores de ajustes do modelo referente às notas do gráfico U\*I.

Etapa 7 – Cálculo da área abaixo da curva dos sinais de corrente e tensão para todos os experimentos e suas janelas: Executou-se o cálculo das áreas por meio de integração numérica por aproximação trapezoidal. Uma amostra dos resultados é mostrada a seguir:

Tensão								
Euronimonto			Janela					
Experimento	1	2	3		228			
1	0,0039	0,0402	0,0465		0,0409			
2	-0,0039	0,0266	0,0405		0,0463			
	l l	l l	1	1	1			
39	-0,0368	-0,0307	0,0419		0,0194			
		Corrente						
Exporimonto			Janela					
Experimento	1	2	3		228			
1	-0,0358	0,1721	0,4091		1,024185			
2	0,3074	0,0905	0,1712		1,07833			
I	I	l l	E	ł	ł			
39	-0,1147	-0,1122	0,2425		0,1315			

Tabela 5.2 – Amostra de valores das áreas dos sinais de tensão e corrente.

Etapa 8 – Obtenção das Diferenças Relativas Percentuais (DRPs) do projeto experimental em relação ao sinal referência: Por meio das formulações 4.2 e 4.3, calcularamse os valores das DRPs referentes ao experimento 14. A Tabela 5.3 apresenta uma amostra dos valores obtidos:

Tabela 5.3 – Amostra de valores das DRPs relativas ao experimento referência 14 dos sinais de tensão e corrente.

Experimente		Janelas	s - Tensão	
Experimento	1	2	3	 228
1	85,1736	54,4182	78,6852	 57,1519
	i i	1	i i	i i
39	241,6001	217,9288	61,1732	 25,4261
Experimente		Janelas	- Corrente	
Experimento	1	2	3	 228
1	107,2351	65,2181	17,3011	 107,0297
	i i			1
39	123,1891	122,6875	50,9735	 73,4276

Em posse dos valores das DRPs de corrente e tensão do projeto experimental referente ao experimento referência 14, realizou-se uma análise de correlação entre as DRPs, as respostas geométricas dos cordões de solda e as notas referentes às dispersões dos sinas U\*I fornececidas por Aguiar (2014).

A Tabela 5.4 apresenta dois valores para cada interação entre dois parâmetros da tabela. O primeiro correponde ao valor da correlação entre dois parâmetros, variando de -1 a 1. O segundo valor corresponde ao P-Value, que deve ser inferior a 0,05 para que exista correlação estatisticamente significante. Os valores em negrito destacam algumas interações importantes para composição das análises do trabalho.

	Variância das DRPs de Corrente	Média das DRPs de Corrente	Variância das DRPs de Tensão	Média das DRPs de Tensão	W (mm)	P (mm)	R (mm)	TD (kg/h)
Média das	0,092							
DRPS de Corrente	0,579							
Variância	0,317	0,746						
das DRPS de Tensão	0,049	0,000						
Média das	0,318	0,861	0,856					
DRPS de Tensão	0,049	0,000	0,000					
W (mm)	0,408	-0,247	-0,118	-0,119				
vv (IIIIII)	0,010	0,130	0,475	0,471				
P(mm)	-0,162	-0,429	-0,601	-0,398	0,225			
I (IIIII)	0,325	0,006	0,000	0,012	0,169			
$\mathbf{R}$ (mm)	0,128	0,328	0,373	0,312	0,197	-0,535		
K (IIIII)	0,439	0,042	0,019	0,053	0,230	0,000		
TD(Ka/h)	0,230	-0,083	-0,073	-0,103	0,693	0,070	0,536	
ID(Kg/II)	0,158	0,615	0,657	0,535	0,000	0,674	0,000	
Notae II*I	-0,572	-0,267	-0,515	-0,368	-0,529	0,483	-0,551	-0,510
notas U <sup>**</sup> I	0.000	0.100	0.001	0.021	0.001	0,002	0.000	0.001

Tabela 5.4 – Correlação entre as DRPs, respostas mecânicas e notas dos gráficos de dispersão U\*I dado o experimento 14 como referência.

Identificam-se, por meio da análise da Tabela 5.4, correlações estatisticamente significantes entre os parâmetros de análise de sinais Variância das DRPS de Corrente, Variância das DRPS de Tensão, Média das DRPS de Tensão e notas dos gráficos de dispersão U\*I. As notas atribuídas aos gráficos de dispersão U\*I também apresentaram correlação significante com as respostas geométricas e taxa de deposição. Constatando-se que as notas dos gráficos de dispersão U\*I possuem correlação com os parâmetros W (mm), P (mm), R

(mm) e TD (Kg/h), pode-se concluir que é possível otimizar os parâmetros geométricos dos cordões de solda por meio da análise das DRPs dos sinais elétricos, elevando-se assim a nota geral do modelo do gráfico de dispersão U\*I.

Destaca-se que as correlações podem variar de acordo com o sinal referência escolhido, devido à influência das médias das áreas dos experimentos referência na estimativa das DRPs do conjunto experimental. A Figura 5.1 exemplifica a distribuição das DRPs no tempo relativas ao experimento 14 de acordo com os experimentos 01, 09 e 14:



Figura 5.1 – Distribuição amostral das DRPs de corrente dos experimentos 01, 09 e 14 (experimento referência 14).

Desta forma, pode-se constatar o impacto que o experimento referência possui ao longo das análises e como a inserção da média e variância de suas DRPs de corrente e tensão afetam as estruturas de correlação do problema.

Etapa 9 – Obtenção dos modelos matemáticos de média e variância das DRPs de corrente e tensão dos sinais: Utilizando as formulações matemáticas 4.4 e 4.5, obtiveram-se os valores de média e variância do conjunto de DRPs que representam os 39 experimentos. A Tabela 5.5 mostra o resultado obtido com as formulações no intuito de exemplificar o resultado para o experimento referência 14.

Por meio dos valores encontrados, foi realizada uma regressão dos valores do conjunto de médias e variâncias das DRPS dos sinais em função dos parâmetros (de entrada) do processo de soldagem. Os coeficientes encontrados, mostrados na Tabela 5.7, serão utilizados para construção dos modelos de Variância e Médias das DRPs de Corrente e Tensão dos experimentos, que serão utilizados no próximo passo para a realização da otimização por meio do NBI. As Tabelas 5.5 e 5.6 são mostradas nas páginas seguintes:

	Corrente		Tensão			
Ensaio	Variância	Média	Variância	Média		
1	1494,907	82,009	3401,188	94,836		
2	1473,581	80,695	3779,682	96,098		
3	2259,545	74,144	4617,172	100,615		
4	2403,458	71,476	4621,606	99,607		
5	2303,624	106,876	6905,186	156,034		
6	2632,634	105,283	6539,413	151,358		
7	3485,361	98,443	7022,865	147,268		
8	3266,986	100,627	7032,465	146,345		
9	2511,761	75,469	2815,943	86,841		
10	2819,885	74,892	2615,156	92,697		
11	3073,917	65,121	4306,383	95,990		
12	3174,595	63,614	4445,969	101,821		
13	2789,892	103,082	6588,578	143,625		
14	3265,604	59,487	4392,922	94,849		
15	3081,676	100,397	7202,452	134,081		
16	2757,221	103,218	7193,894	143,316		
17	1529,652	83,424	4227,409	103,048		
18	1509,124	81,317	3815,069	97,499		
19	1588,815	87,175	6195,768	104,836		
20	1645,399	85,030	6453,985	106,685		
21	2620,816	105,183	6216,903	136,405		
22	2422,039	106,366	6869,569	159,630		
23	3396,822	99,104	7188,833	148,602		
24	3356,702	99,744	6706,240	152,586		
25	1994,920	101,464	4864,813	125,588		
26	1808,278	84,437	4279,498	107,472		
27	2799,383	67,740	4567,321	91,038		
28	3307,036	62,291	4289,112	96,535		
29	2727,867	101,503	7023,899	134,795		
30	2689,438	107,288	8544,052	140,156		
31	2859,179	97,298	7136,605	132,798		
32	2785,725	110,347	8198,299	140,553		
33	2895,130	78,297	6042,577	115,075		
34	2826,692	75,067	5672,474	113,046		
35	2469,401	80,200	4600,543	118,753		
36	2794,776	75,713	5006,959	112,613		
37	3926,522	89,771	6105,265	126,135		
38	4559,539	94,880	7006,043	134,847		
39	1506,725	75,643	7106,168	135,700		

Tabela 5.5 – Valores de Média e Variância das DRPs de corrente e tensão do experimento 14.

		Co	rrente			Ten	são	
	Variân	cia	Méd	ia	Variâ	ncia	Médi	a
Termo	Coeficiente	P- Value	Coeficiente	P-Value	Coeficiente	P-Value	Coeficiente	P- Value
Constante	2557,400	0,000	88,892	0,000	5626,800	0,000	120,738	0,000
Ib	25,000	0,809	-1,635	0,355	-15,800	0,929	-0,287	0,888
tb	270,200	0,015	-2,281	0,201	446,900	0,018	0,680	0,740
EN	345,200	0,003	11,373	0,000	1295,800	0,000	20,662	0,000
Va	220,500	0,042	-2,789	0,122	-97,800	0,583	-4,353	0,042
Ib*tb	-15,500	0,881	2,068	0,245	59,800	0,736	2,301	0,267
Ib*EN	-30,500	0,768	0,415	0,813	27,700	0,876	-0,014	0,995
Ib*Va	23,100	0,823	-1,271	0,471	-18,400	0,917	-1,423	0,488
tb*EN	-49,100	0,636	3,163	0,081	-159,300	0,373	1,114	0,587
tb*Va	-68,300	0,511	-0,068	0,969	-58,400	0,742	-0,048	0,981
EN*Va	-253,600	0,021	0,351	0,841	210,200	0,243	-4,025	0,059
Ib*tb*EN	-61,000	0,557	1,489	0,399	0,800	0,997	0,506	0,804
Ib*tb*Va	-6,300	0,951	1,953	0,272	88,700	0,618	2,949	0,158
Ib*EN*Va	-12,600	0,903	-0,251	0,886	53,700	0,762	-1,580	0,442
tb*EN*Va	-151,400	0,153	4,174	0,025	168,600	0,347	2,920	0,162
Ib*tb*EN*Va	-21,600	0,835	1,200	0,495	66,800	0,707	1,795	0,383

Tabela 5.6 – Coeficientes dos modelos de média e variância dos sinais para o experimento referência 14.

Os coeficientes resultam nos seguintes modelos matemáticos:

Variância das DRPs de Corrente = 2557,400 + 25,000*Ib* + 270,200*tb* + 345,200*EN* + 220,500*Va* - 15,500*Ibtb* - 30,500*IbEN* + 23,100*IbVa* - 49,100*tbEN* - 68,300*tbVa* - 253,600*ENVa* - 61,000*IbTbEN* - 6,300*IbTbVa* - 12,600*IbENVa* - 151,400*tbENVa* - 21,600*IbtbENVa*.

Média das DRPs de Corrente = 88,892 - 1,635*Ib* - 2,281*tb* + 11,373*EN* - 2,789*Va* + 2,068*Ibtb* + 0,415*IbEN* - 1,271*IbVa* + 3,163*tbEN* - 0,068*tbVa* + 0,351*ENVa* + 1,489*IbTbEN* + 1,953*IbTbVa* - 0,251*IbENVa* + 4,174*tbENVa* + 1,200*IbtbENVa*.

Variância das DRPs de Tensão = 5626,800 - 15,800*Ib* + 446,900*tb* + 1295,800*EN* - 97,800*Va* + 59,800*Ibtb* + 27,700*IbEN* - 18,400*IbVa* - 159,300*tbEN* - 58,400*tbVa* + 210,200*ENVa* + 0,800*IbTbEN* + 88,700*IbTbVa* + 53,700*IbENVa* + 168,600*tbENVa* + 66,800*IbtbENVa*.

Média das DRPs de Tensão = 120,738 - 0,287*Ib* + 0,680*tb* + 20,662*EN* - 4,353*Va* + 2,301 *Ib tb* - 0,014*IbEN* - 1,423*IbVa* + 1,114*tbEN* - 0,048*tbVa* - 4,025*ENVa* + 0,506*IbTbEN* + 2,949*IbTbVa* - 1,580*IbENVa* + 2,920*tbENVa* + 1,795*IbtbENVa*. Apesar de alguns coeficientes determinados não apresentarem significância estatística para os modelos, deve-se enfatizar que neste trabalho não houve alteração dos modelos para elevar seus valores de ajuste. O autor optou por esse procedimento no intuito de avaliar a eficiência da metodologia em casos onde não houvesse ajuste dos modelos por meio da utilização de softwares estatísticos especializados para realização automática (ou manual) desses ajustes. No entanto, deve-se salientar que esses modelos referem-se apenas as médias e variâncias das DRPs relativas ao experimento referência 14.

Os modelos matemáticos construídos por meio de regressão apresentaram para a tensão, como mostrado na Tabela 5.7, um ajuste razoável, enquanto os modelos referentes à corrente apresentaram resultados baixo. Com relação à capacidade de previsão dos modelos, ambos apresentaram baixos ajustes. Esse resultado pode ser proveniente dos erros acumulados durante o cálculo das áreas abaixo da curva por meio das integrais realizadas por meio do método trapezoidal, dado o experimento 14 como referência. Devido ao fato desse experimento ter apresentado a pior nota para o gráfico de dispersão U\*I, era esperado que seus modelos não apresentassem um ajuste elevado para explicar o projeto experimental.

Tabela 5.7 - Valores de ajuste e capacidade de previsão dos modelos referentes à corrente e tensão dos sinais.

	Corre	nte	Tens	ão
	Variância	Média	Variância	Média
R-Quadr.	62,07%	74,85%	74,98%	84,67%
R-Quadr.(pred.)	29,81%	7,26%	16,98%	47,92%
R-Quadr.(ajust.)	34,48%	56,56%	56,78%	73,51%

No intuito de representar as interações e os níveis de significância, mostrados na Tabela 5.7, entre os parâmetros de acordo com as respostas Variância das DRPs de corrente, Média das DRPs de corrente, Variância das DRPs de tensão e Média das DRPs de tensão, construíram-se os gráficos de Pareto representados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5. Fatores que possuírem significância estatística terão valores de efeito padronizado superiores ao valor da margem de erro indicado pela linha vermelha. No entanto, deve-se atentar para o princípio da Hierarquia, mantendo-se os fatores de ordem baixa (A, B,C e D) no modelo caso os fatores de ordem alta (suas combinações) serem significantes.



Figura 5.2 – Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a variância das DRPs de corrente (Exp. Ref. 14) e  $\alpha = 0.05$ .



Figura 5.3 – Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a média das DRPs de corrente (Exp. Ref. 14) e  $\alpha = 0,05$ .



Figura 5.4 – Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a variância das DRPs de tensão (Exp. Ref. 14) e  $\alpha = 0.05$ .



Figura 5.5 – Carta de Pareto para os Efeitos Padronizados, tendo como resposta a média das DRPs de tensão (Exp. Ref. 14) e  $\alpha = 0.05$ .

Por meio dos gráficos, constata-se a relevância dos parâmetros e interações C (EN), B ( tb), C\*D (EN\*Va), D (Va) e B\*C\*D (tb\*EN\*Va) nas respostas dos sinais elétricos, cujos efeitos nos parâmetros geométricos foram anteriormente discutidos por Aguiar (2014). Os



efeitos principais em cada uma das respostas correspondentes aos sinais elétricos são mostrados na Figura 5.6:

Figura 5.6 – Efeitos principais dos parâmetros de processo sobre as respostas dos sinais elétricos de corrente e tensão, para o experimento referência 14.

Deve-se enfatizar que apenas a Variância das DRPs de Corrente e Média das DRPs de Tensão apresentaram correlação com a nota do gráfico de dispersão U\*I. Portanto, tendo como objetivo a minimização da variância e média das DRPs, pode-se afirmar, segundo a Figura 5.6, que é recomendável que os parâmetros tb e EN sejam mantidos em seus valores mínimos. O parâmetro Ib não afeta de modo impactante os dois modelos citados, como pode ser observado na figura citada, pois não ocorre variação dos valores dos modelos quando o valor do parâmetro é alterado. A variação do parâmetro Va afeta de modo inverso os modelos das DRPs correlacionadas com o gráfico de dispersão U\*I.

Para construção dos gráficos de contorno das respostas elétricas e realização das análises, mantiveram-se os parâmetros tb e Va em seus valores codificados, principalmente para que fosse observado o impacto da variação do parâmetro EN nos resultados.

Constata-se por meio dos gráficos de contorno mostrados nas Figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 que os valores mínimos das respostas dos sinais elétricos usualmente atingem seus menores valores quando os parâmetros de processo estão próximos do valor mínimos codificado de EN e tb, isto é, EN=-1 e tb=-1. No entanto, constata-se que por meio da análise de contorno para o modelo gerado através da regressão das notas de Aguiar (2014) através da

Figura 5.11, que o conjunto de parâmetros que produzirão os melhores gráficos de dispersão U\*I encontra-se na área onde EN e tb estão próximos de seus valores codificados mínimos.



Figura 5.7 – Gráfico de Contorno da Variância das DRPs de Corrente versus tb e EN.



Figura 5.8 – Gráfico de Contorno da Média das DRPs de Corrente versus tb e EN.


Figura 5.9 - Gráfico de Contorno da Variância das DRPs de Tensão versus tb e EN.



Figura 5.10 – Gráfico de Contorno da Média das DRPs de Tensão versus Ib e EN.



Figura 5.11 – Gráfico de Contorno da nota do gráfico U\*I versus Ib e EN.

Etapa 10 – Execução do NBI a partir do arranjo de mistura de média se variâncias das DRPs dos sinais de corrente e tensão para o problema multiobjetivo: Para o cálculo do NBI, primeiramente executaram-se as otimizações individuais dos modelos descritos na etapa anterior por meio do suplemento Solver® do Microsoft Excel®. Como respostas, foram considerados os 4 parâmetros variáveis do processo: nível da corrente de base (Ib), tempo da corrente de base (tb), percentual de tempo em polaridade negativa do arame eletrodo (EN) e velocidade de alimentação (Va).

Utilizou-se o algoritmo GRG a fim de obter as soluções mínimas dos modelos. A matriz resultante das otimizações individuais com seus valores em destaque é mostrada na Tabela 5.8:

Média - DRP da Corrente	Média - DRP da Tensão	Variância - DRP da Corrente	Varîancia - DRP da Tensão
62,95	99,18	3240,82	4367,54
66,43	93,51	2936,65	4436,85
81,01	96,80	1491,35	3797,38
79,66	100,08	2314,08	3447,33

Tabela 5.8 – Matriz Payoff do problema multiobjetivo referente ao experimento 14.

Posteriormente, os valores utópicos e os de Nadir (respectivamente os melhores e piores valores na Tabela 5.8 de cada função) foram alocados em uma tabela para facilitar os cálculos posteriores:

Tino da Valor	С	bjetivo da resoluçã	ío do problema GR	G
	Minimizar	Minimizar	Minimizar	Minimizar
Resposta utópica	62,95	93,51	1491,35	3447,33
Resposta de Nadir	81,01	100,08	3240,82	4436,85
Diferença	18,05	6,57	1749,46	989,52

Tabela 5.9 – Tabela de soluções do problema multiobjetivo.

Com os valores do problema tabelados, partiu-se para determinação da matriz Payoff escalonada:

Tabela 5.10 - Matriz Payoff Escalonada do problema multiobjetivo do experimento 14.

Média - DRP da Corrente	Média - DRP da Tensão	Varîancia - DRP da Corrente	Varîancia - DRP da Tensão
0,00	0,29	0,96	0,86
0,42	0,00	1,00	1,00
1,00	1,00	0,00	0,00
1,00	1,00	0,00	0,00

Após o cálculo da matriz payoff escalonada, gerou-se um arranjo de misturas Simplex Lattice, no intuito de variar quatro componentes de peso em uma combinação, sendo cada peso a representação da importância dos modelos de Média e Variância das DRPs de corrente e tensão. Criou-se um arranjo de mixturas de grau 10 e adicionaram-se pontos centrais e axiais combinação de experimentos. Com isso, produziu-se um arranjo com 291 experimentos. Cada combinação de pesos produz um conjunto de parâmetros de processo, que são inseridos nas equações dos modelos de Média e Variância das DRPs produzindo suas soluções. Essas soluções são inseridas na equação do Erro Percentual Global, no intuito de avaliar o erro das respostas em relação aos valores utópicos (alvos) de cada modelo de DRPs.

Etapa 11 – Otimização do Erro Percentual Global por meio de seu modelo matemático a partir das soluções do NBI: Realizou-se a regressão do conjunto de 291 valores de EPGs das DRPs. Analisaram-se apenas as proporções do modelo pelo método de regressão Eliminação para Trás (*Backward Elimination*), que segundo Howell (2012) elimina as variáveis que contribuem menos para o modelo, de forma cíclica, até que todas as variáveis remanescentes

sejam significativas ou uma situação próxima desse ponto seja alcançada. Dessa forma, obteve-se o modelo apresentado na Tabela 5.11:

Pesos	EPG	P-Value	VIF
p1	1,4499	*	3,794
p2	1,2156	*	3,794
p3	0,5698	*	3,794
p4	0,8066	*	3,794
p1*p2	*	*	*
p1*p3	0,1405	0	3,338
p1*p4	0,0659	0,075	3,338
p2*p3	-0,2663	0	3,338
p2*p4	-0,2153	0	3,338
p3*p4	*	*	*

Tabela 5.11 – Modelo matemático do Erro Percentual Global do experimento referência 14.

O ajuste e a capacidade de predição do modelo do EPG para o conjunto de soluções pode ser analisado na Tabela 5.12. Por meio dos valores encontrados, pode-se verificar que o modelo possui um elevado ajuste e capacidade de previsão dos resultados.

Tabela 5.12 – Valores de ajustes dos modelos referentes ao Erro Percentual Global.

Ajuste do Modelo - EPG			
R-Quadr.	98,32%		
R-Quadr.(prev.)	98,17%		
R-Quadr.(ajust.)	98,28%		

Os valores referentes aos fatores de Inflação da Variância (VIFs) dos coeficientes do modelo de EPG, por estarem contidos no intervalo de 1 a 5, indicam que a multicolinearidade, ou correlação entre as variáveis preditoras, existe de uma forma moderada e satisfatória.

De acordo com Montgomery e Runger (2009), o VIF é utilizado para detectar multicolinearidade (variáveis preditoras correlacionadas), mensurando quanto da variância de um coeficiente do modelo de regressão aumenta caso seus preditores sejam correlacionados. Calcula-se o VIF regredindo cada preditor nos preditores remanescentes e anotando o valor R<sup>2</sup>, coeficiente de determinação múltipla resultante da regressão de pelas variáveis regressoras. O valor de VIF é calculado por meio da equação 5.1:

- para (5.1)

Utilizando-se os valores de peso como respostas, realizou-se a otimização do modelo de EPG buscando sua minimização por meio do algoritmo GRG. O menor valor de EPG encontrado foi 0,5809, como mostra a Tabela 5.13:

Pesos	EPG	Z(x)
p1	1,4499	0,0072
p2	1,2156	0,0064
р3	0,5698	0,9805
p4	0,8066	0,0059
p1*p2	*	0,0000
p1*p3	0,1405	0,0070
p1*p4	0,0659	0,0000
p2*p3	-0,2663	0,0062
p2*p4	-0,2153	0,0000
p3*p4	*	0,0058
Result	ado Final:	0,5809

Tabela 5.13 – Respostas de peso encontradas para otimização do EPG.

Etapa 12 – Previsão do classificador do modelo por meio dos novos parâmetros de processo obtidos: Tabulou-se a inserção dos valores de peso ótimos da matriz  $\beta$  e o resultado da execução das operações de multiplicação de matrizes escalonadas na Tabela 5.14:

β	e=-t	Φβ	tn=tΦe	F(x)
0,0072	0,0000	0,992	0,000	0,992
0,0064	0,0000	0,817	0,000	0,817
0,9805	0,0000	0,012	0,000	0,121
0,0059	0,0000	0,474	0,000	0,474

Tabela 5.14 – Tabela de peso e valores relativos à resolução do NBI de pesos ótimos.

Calcularam-se ainda as restrições de desigualdade para os pesos ótimos do NBI para o problema multiobjetivo. Após a execução da otimização do NBI, obtiveram-se os valores de parâmetros ótimos para o problema multiobjetivo com relação ao experimento 14.

No entanto, para obtenção de uma estimativa da nota do gráfico U\*I gerado pelos parâmetros ótimos, e, portanto, da qualidade do cordão de solda que será gerada pela nova combinação, realizou-se uma regressão das classificações por notas realizadas por Aguiar (2014).

A Tabela 5.15 mostra os coeficientes do modelo de classificação dos gráficos de U\*I e suas respectivas significâncias estatísticas:

Termo	Coeficiente	P-Value
Constante	5,728	0,000
Ib	0,009	0,932
tb	-0,572	0,000
EN	-1,428	0,000
Va	-1,478	0,000
Ib*tb	0,147	0,193
Ib*EN	-0,209	0,068
Ib*Va	-0,072	0,518
tb*EN	-0,041	0,714
tb*Va	0,322	0,007
EN*Va	-0,072	0,518
Ib*tb*EN	-0,009	0,932
Ib*tb*Va	0,041	0,714
Ib*EN*Va	-0,478	0,000
tb*EN*Va	0,166	0,144
Ib*tb*EN*Va	0,197	0,085

Tabela 5.15 - Coeficientes do modelo matemático do gráfico U\*I.

O modelo do gráfico U\*I, portanto, é estruturado da seguinte forma:

Nota do gráfico U\*I estimada = 5,728 + 0,009*Ib* - 0,572*tb* - 1,428*EN* - 1,478*Va* + 0,147*Ibtb* - 0,209*IbEN* - 0,072*IbVa* - 0,041*tbEN* + 0,322*tbVa* - 0,072*ENVa* - 0,009*IbtbEN* + 0,041*IbtbVa* - 0,478*IbENVa* - 0,166*tbENVa* + 0,197*IbtbENVa*.

A Tabela 5.16 demonstra claramente um resultado satisfatório para capacidade do modelo de prever as notas do gráfico U\*I:

Tabela 5.16 - Valores de ajustes do modelo referente as notas do gráfico U\*I.

Item	Percentual
R-Quadr.	95,04%
R-Quadr.(prev.)	82,09%
R-Quadr.(ajust.)	91,43%

Dessa forma, inserindo-se os parâmetros obtidos com a solução do NBI para os modelos de sinais elétricos no modelo de estimativa das notas do gráfico de dispersão U\*I, encontra-se o resultado mostrado na Tabela 5.17:

Parâmetro	Função Parâmetro de Processo Codificado resultante	Função Nota do Sinal U*I estimada
Constante	*	5,728
Ib	1,000	0,009
tb	-0,987	-0,572
EN	-0,928	-1,428
Va	-1,000	-1,478
Ib*tb	-0,987	0,147
Ib*EN	-0,928	-0,209
Ib*Va	-1,000	-0,072
tb*EN	0,916	-0,041
tb*Va	0,987	0,322
EN*Va	0,928	-0,072
Ib*tb*EN	0,916	-0,009
Ib*tb*Va	0,987	0,041
Ib*EN*Va	0,928	-0,478
tb*EN*Va	-0,916	0,166
Ib*tb*EN*Va	-0,916	0,197
	Respostas Finais:	8,700

Tabela 5.17 – Tabela de funções e respostas finais da otimização multiobjetivo do experimento referência 14.

Finalmente, realiza-se a decodificação dos parâmetros ótimos x1, x2, x3 e x4, obtidos após a execução do NBI com os pesos ótimos. Os valores fatoriais ótimos codificados são inseridos na expressão de decodificação, representada pela fórmula 4.7 mostrada anteriormente. A Tabela 5.18 resume o processo de decodificação:

Tabela 5.18 – Valores ótimos codificados e seus respectivos valores decodificados.

	x1	x2	x3	x4	
Termo Codificado	1,00	-0,987	-0,928	-1,000	
Maior valor do parâmetro	90,00	10,00	60,00	3,50	
Menor valor do parâmetro	50,00	5,00	30,00	3,00	
Termo Decodificado	90,00	5,03	31,08	3,00	

O valor obtido previsto para esse conjunto de parâmetros de processo foi igual a 8,70. Em posse da resposta do modelo, desenvolveu-se um gráfico de contorno com as respostas geométricas e DRPs dos sinais elétricos, no intuito de encontrar o ponto cuja nota estivesse contida nos limites do gráfico de acordo com os parâmetros de processo dos equipamentos utilizados. O resultado é mostrado na Figura 5.12:



Figura 5.12 – Gráfico de Contorno Geral.

Dessa forma, os resultados encontrados são considerados positivos, visto que o cordão 14 possui originalmente uma nota igual a 1,50 fornecida pelo especialista do processo e o conjunto de parâmetros da resposta final indica uma nota de 8,70. Com isso, pode-se afirmar nesse caso que os parâmetros fornecidos pela resolução da metodologia produzirão um cordão de solda com características de qualidade superiores ao experimento referência.

No intuito de exemplificar a transição do gráfico de dispersão U\*I e do aspecto do perfil do cordão de solda do experimeto 14 para a resposta final, produziu-se a Figura 5.13:



Figura 5.13 - Gráfico de dispersão U\*I e Perfil de cordão de solda resultantes

Deve-se enfatizar que o conjunto de parâmetros produzidos pela otimização é praticamente o mesmo que o conjunto de parâmetros do experimento 02. Por isso, optou-se por utilizar seu gráfico de dispersão U\*I e imagem do perfil de cordão de solda como representação do ótimo para o experimento referência 14.

# 5.2 Resultado das análises para 16 experimentos referência aleatórios extraídos do projeto experimental

Foram executadas 16 análises utilizando-se a metodologia proposta. Como experimentos referência para execução da análise, foram selecionados aleatoriamente dentro do projeto experimental pontos fatoriais, réplicas e pontos centrais. A metodologia analisou os sinais de corrente e tensão compostos por todas suas frequências e, portanto, completos, e os compostos apenas pelas 3 frequências de maior amplitude. As notas dos 16 experimentos foram divididas de acordo com os seguintes grupos: Notas dos gráficos de U\*I segundo Aguiar (2014), notas dos gráficos de U\*I previstas para os sinais completos e notas dos gráficos de U\*I previstas para os sinais completos e notas dos gráficos de U\*I previstas para os sinais compostos por três frequências. No intuito de avaliar os resultados obtidos, realizou-se um teste t pareado de modo que todos os agrupamentos fossem comparados. Por meio da primeira análise, resumida na Tabela 5.19, conclui-se que as notas contidas nos dois grupos apresentaram diferença estatisticamente significante (p-value

igual a 0,010). De fato, pode-se constatar na tabela a diferença entre a média e desvio padrão dos grupos, no qual o conjunto de notas previstas por meio das análises dos sinais compostos por todas as harmônicas apresentou um resultado melhor.

Tabela 5.19 – Valores de média e desvio padrão para análise do primeiro grupo de dados.

Grupo de dados	Média	Desvio Padrão
Notas segundo Aguiar (2014)	5,469	2,193
Notas Previstas - Sinal Completo	7,255	1,434
Diferença	-1,786	2,416

A Tabela 5.20 apresenta a análise referente às notas dadas por Aguiar (2014) e as notas previstas por meio das análises dos sinais compostos por 3 harmônicas. Não se pode afirmar que os dois grupos apresentaram desempenho estatisticamente diferente, pois o p-value da análise corresponde a 0,084.

Tabela 5.20 – Valores de média e desvio padrão para análise do segundo grupo de dados.

Conjunto de dados	Média	Desvio Padrão
Notas segundo Aguiar (2014)	5,469	2,193
Notas Previstas – 3 harmônicas	6,708	1,473
Diferença	-1,239	2,677

Por último, a análise dos grupos de notas referentes aos sinais completos e aos sinais compostos por apenas 3 harmônicas, apresentada na Tabela 5.21, indica que também não é possível afirmar que os dois conjuntos em questão tenham apresentado desempenhos estatisticamente diferentes, pois o valor do p-value da análise é igual a 0,067.

Tabela 5.21 – Valores de média e desvio padrão para análise do terceiro grupo de dados.

Conjunto de dados	Média	Desvio Padrão
Notas Previstas - Sinal Completo	7,255	1,434
Notas Previstas – 3 harmônicas	6,708	1,473
Diferença	0,548	1,11

A Tabela 5.22 apresenta todos os resultados provenientes da análise dos 16 experimentos referência utilizados para o estudo dessa metodologia. No entanto, a seguir serão apresentadas observações no intuito de facilitar a interpretação desta tabela:

 Os experimentos 03, 18, 34, 37, 39 apresentaram como solução os parâmetros referentes ao experimento 10 e sua réplica 26 (apresentado na tabela). No entanto, as notas dadas por Aguiar (2014) para os experimentos 03 e 18 são maiores que a média das notas dos experimentos 10 e 26 (igual a 7,00). Com isso, observou-se nesse caso uma diminuição das notas após o uso da metodologia. Com relação aos experimentos 34, 37 e 39, foi observado um ligeiro aumento das notas previstas do gráfico de U\*I.

- Os experimentos 11 e 29 apresentaram como solução parâmetros referentes aos experimentos 09 e sua réplica 25 (ambos mostrados na tabela). Nesses casos, ocorreu um ligeiro aumento das notas, segundo os valores previstos.
- Os experimentos 09, 14, 21, e 26 apresentaram como solução parâmetros referentes aos experimentos 02 e sua réplica 18 (mostrado na tabela). Nesse caso, destaca-se o considerável aumento segundo a previsão do modelo das notas dos gráficos de U\*I, chegando a 7,20 pontos de aumento da nota prevista segundo os novos parâmetros do experimento referência 14.
- Aguiar (2014) encontrou como resposta para seu problema de otimização do processo de soldagem o conjunto de parâmetros do experimento 1. As análises realizadas neste trabalho estão de acordo com o trabalho de Aguiar (2014), pois quando o experimento 1 foi tomado como referência, consequentemente um conjunto de sinais de corrente e tensão mais estável foi adotado também como referência, produzindo um resultado melhor quando comparado aos outros resultados.

Terminada a análise da metodologia com o intuito de otimizar o processo, devido as características próprias dessa abordagem, iniciou-se um estudo para avaliar como seria realizado o controle estatístico desse processo por meio de cartas de controle que trabalhassem com observações autocorrelacionadas, como discutido no tópico 5.3.

A Tabela 5.22 é mostrada na próxima página:

	es.
	ij
-	g
	g
	ğ
	ě
	Ö
	õ
	SO
1	nt
	ne
•	Ξ
	ğ
	X
	e S
	õ
•	Ξ
	S
	ğ
	ĕ
	S
	eu
	š
	e S
	õ
	ad
•	
	E
	б
	S
	E
	ē
	Ξ
	G
	Xp
	ð
	os
-	ð
	SO
	Ä
	ц
<	Ľ9
,	, a
F	1
•	$\overline{2}$
Ò	Ņ
ι	0
-	2 La
	ž

Parâmetros dos ensaios Noté Agui Ib th EN Va	Isaios Noté Agui	Not: Agui	a segundo iar (2014)	Parâ Si Ib	metros nais Cc tb	impleto EN	s Va	Nota Prevista	Parâr Sinais freqi Ib	netros i compo lências amplii tb	resultan stos pel de maio ude EN	tes as 3 or Va	Nota Prevista
50,0 5,0 30,0 3,0 10	0 3,0 10	1(	00,0	50,0	5,0	30,0	3,0	9,75	50,0	5,0	30,0	3,0	9,75
50,0 10,0 30,0 3,0 8	3,0 8	~	3,00	90,0	5,0	30,0	3,5	6,75	50,0	5,0	30,0	3,5	5,50
50,0 10,0 60,0 3,0 4	0 3,0 4	4	,50	53,7	10,0	60,0	3,0	4,55	50,4	5,0	30,0	3,1	9,26
50,0 5,0 30,0 3,5 5	3,5 5.	5	,50	90,0	5,1	30,0	3,0	8,74	90,06	10,0	30,0	3,0	8,00
50,0 10,0 30,0 3,5 4	) 3,5 4	4	,50	50,0	5,0	30,0	3,5	5,50	50,0	5,0	30,0	3,5	5,50
90,0 5,0 60,0 3,5 1	) 3,5 1	1	,50	90,0	5,03	31,1	3,0	8,70	83,9	5,0	30,3	3,1	8,41
90,0 10,0 60,0 3,5 2	3,5 2	( I	2,50	90,0	10,0	37,7	3,0	7,23	50,0	5,8	30,0	3,0	9,41
90,0 5,0 30,0 3,0	) 3,0		8,50	90,0	5,0	30,0	3,5	6,75	90,06	5,0	30,0	3,5	6,75
50,0 5,0 60,0 3,0	3,0		5,00	90,0	5,0	30,0	3,1	8,32	50,0	5,0	30,0	3,5	5,50
50,0 5,0 30,0 3,5	3,5		5,50	90,0	10,0	30,0	3,5	6,00	90,06	10,0	30,0	3,4	6,55
90,0 5,0 30,0 3,5	3,5		7,50	90,0	5,0	30,0	3,0	8,75	90,0	10,0	30,0	3,4	6,00
50,0 5,0 60,0 3,5	3,5		4,00	50,0	5,0	30,0	3,5	5,82	50,0	5,0	30,0	3,5	5,50
50,0 10,0 60,0 3,5	3,5		3,00	90,0	10,0	38,3	3,2	6,22	58,6	5,0	30,0	3,5	5,77
70,0 7,5 45,0 3,3	3,3		6,50	85,1	5,0	30,1	3,5	6,58	50,0	5,0	30,0	3,5	5,50
70,0 7,5 45,0 3,3 5	3,3	47	5,50	90,0	5,0	30,0	3,5	6,75	50,0	5,0	30,0	3,5	5,50
70,0 7,5 45,0 3,3			5 50	0.00	5 0	30.0	3 5	6.75	50.0	5 0	30.0	35	5.50

## 5.3 Controle estatatístico por meio de carta de controle $T^2$ de Hotteling

Finalizada a otimização, analisou-se a estrutura de autocorrelação das áreas obtidas pela metodologia de cálculo de áreas abaixo da curva por meio da regra trapezoidal. Foram verificadas as estruturas de autocorrelação das áreas dos sinais de corrente e tensão dos experimentos 01, 03, 14, 18, 26, 31 e 37, selecionados aleatoriamente do projeto experimental. Constatou-se que a maioria dos gráficos indicou a presença de autocorrelação entre as áreas dos sinais. A seguir, exemplos de gráficos dos sinais dos experimentos 01 e 14.



Figura 5.14 – Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do sinal 1.



Figura 5.15 – Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do sinal 14.

No Anexo C, são apresentados os gráficos de função de autocorrelação para as áreas de corrente e tensão dos sinais 03, 18, 26, 31 e 37. Na medida em que o sinal 1 apresentou o melhor resultado com relação ao aspecto do cordão de solda obtido, e portanto o melhor conjunto de parâmetros de entrada do processo, para análise da Autocorrelação das DRPs dos sinais de tensão e corrente dos experimentos, utilizou-se esse experimento como referência para a análise. As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam as funções de autocorrelação para as DRPs dos sinais de corrente e tensão dos sinais 01, 03 e 14:



Figura 5.16 – Função Autocorrelação para as DRPs dos sinais de corrente e tensão do sinal 01.



Figura 5.17 – Função Autocorrelação para as DRPs dos sinais de corrente e tensão do sinal 03.



Figura 5.18 – Função Autocorrelação para as DRPs dos sinais de corrente e tensão do sinal 14.

De acordo com a análise das figuras, constatou-se que a tendência de autocorrelação nos sinais de corrente e tensão dos experimentos realizados se manteve. Portanto, devido à autocorrelação do processo e sua característica multivariada, torna-se possível utilizar da carta de controle T<sup>2</sup> de Hotteling para controle *online* do processo de fabricação em questão.

A partir dessas informaçãoes, realizou-se uma análise do gráfico de dispersão das DRPs de corrente e tensão do sinal 1, tendo como experimento referência esse próprio sinal. Na Figura 5.18, observa-se que a distribuição apresenta diversos pontos fora dos limites superiores e inferiores de controle, referentes aos valores médios das DRPs:



Figura 5.18 – Gráfico de dispersão das DRPs de corrente e tensão do Sinal 1 (Exp. Ref. 1).

No entanto, a carta de controle  $T^2$  de Hotteling desse mesmo conjunto amostral indica apenas dois pontos fora de seu limite de controle superior, como mostrado na Figura 5.19:



Figura 5.19 – Carta de controle T<sup>2</sup> de Hotteling para as DRPs de corrente e tensão do Sinal 1 (Exp. Ref. 1).

Com isso, constata-se que a autocorrelação entre os pontos da distribuição de DRPs no gráfico de dispersão, como discutido no referencial teórico, implicou na identificação de falsos alarmes pelo gráfico de dispersão da Figura 5.18 pelos pontos fora dos limites de controle.

Realizaram-se outros dois testes, representados nas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 para averiguação da eficiência da carta de controle  $T^2$  de Hotteling na eliminação de alarmes em falso, que apresentaram resultaram semelhantes ao primeiro teste:



Figura 5.20 – Gráfico de dispersão das DRPs de corrente e tensão do Sinal 14 (Exp. Ref. 1).



Figura 5.21 – Carta de controle T<sup>2</sup> de Hotteling para as DRPs de corrente e tensão do Sinal 14 (Exp. Ref. 1).



Figura 5.22 – Gráfico de dispersão das DRPs de corrente e tensão do Sinal 03 (Exp. Ref. 1).



Figura 5.23 – Carta de controle  $T^2$  de Hotteling para as DRPs de corrente e tensão do Sinal 03 (Exp. Ref. 1).

Desta forma, a aplicação da carta de controle  $T^2$  de Hotteling eficientemente eliminou as distorções estatísticas que ocasionavem a identificação por parte das cartas de controle dos falsos alarmes durante as análises realizadas. Portanto, ela torna-se uma alternativa confiável para controle estatístico do processo de soldagem através das DRPs de corrente e tensão dos sinais elétricos.

### CONCLUSÕES

#### 6.1 Conclusões gerais

O presente trabalho utilizou os sinais de corrente e tensão de um processo de soldagem P-GMAW para otimizar os níveis de trabalho dos parâmetros de soldagem. Para isso, analisou-se o projeto experimental aprimorado de Aguiar (2014), composto por um experimento fatorial completo em dois níveis com réplica e 5 pontos centrais, sem aleatórização e blocagem. Por meio dos resultados alcançados, pode-se concluir que:

- Houve correlação significativa entre as DRPs de média e variância dos sinais de corrente e tensão com a largura, penetração, reforço, taxa de deposição e as notas de classificação dos gráficos U\*I atribuídas por Aguiar (2014) aos experimentos;
- Os resultados produzidos por meio do modelo de classificação por notas dos gráficos de U\*I dos sinais completos, em comparação com os resultados do modelo de Aguiar (2014), apresentaram um desempenho melhor e com significância estatística;
- Entretanto, a diferença entre as notas de classificação dos gráficos de U\*I, produzidas pelos modelos provenientes das análises dos sinais completos e de 3 frequências, não apresentaram diferença estatisticamente significante;
- Os resultados produzidos por meio do modelo de classificação por notas dos gráficos de U\*I dos sinais de 3 frequências e por meio do modelo de Aguiar (2014) não apresentaram diferença estatisticamente significante;
- Por meio das análises realizadas neste trabalho, comprova-se que é possível realizar a otimização de um processo de soldagem P-GMAW por meio dos sinais elétricos de corrente e tensão, isto é, por meio de um projeto de experimentos realizado através de abordagens não destrutivas;
- Adicionalmente comprovou-se que é possível controlar o processo abordado neste trabalho por meio da carta de controle T<sup>2</sup> de Hotteling. A carta é capaz de identificar valores anormais durante a análise das DRPs dos sinais e a variabilidade dos valores na carta esta diretamente relacionada à nota do gráfico de dispersão U\*I. Verificou-se também que a utilização desta carta de controle diminui os riscos da identificação de falsos alarmes durante a análise dos sinais.

#### 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

No intuito de melhorar a metodologia empregada neste trabalho, sugerem-se algumas modificações para aprimoramento dos resultados:

- Estimar as áreas das curvas de corrente e tensão por meio de técnicas mais eficientes para o cálculo das DRPs. Caso seja utilizada integração numérica, utilizar algoritmos mais eficientes como o método de Lagrange por exemplo.
- Avaliar a existência de parâmetros mais robustos que a média e a variância para a modelagem das DRPs dos sinais de corrente e tensão.
- Realizar trabalhos utilizando outras abordagens estatísticas, como a metodologia de superfície de repostas ou o projeto robusto pelo método de Taguchi.
- Realizar a metodologia proposta para processos de soldagem em corrente direta para comparação desse método com a soldagem em corrente alternada utilizada neste trabalho.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABADIE, J.; CARPENTIER, J.. Generalization of the Wolfe Reduced Gradient Method to the Case of Nonlinear Constraints, **Optimization**, Ed. R. Fletcher, Academic Press, New York, p. 37, 1969.

AGUIAR, T.C.S.. Uma contribuição ao estudo da influência de variáveis na soldagem mig/mag pulsado em corrente alternada. 2014. 111 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2014.

AN, H.; GREEN, D.E.; JOHRENDT, J.. Multi-objective optimization and sensitivity analysis of tube hydroforming. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1-4, p. 67-84, 2010.

APARISI, F.; HARO, C. L.. Hotelling's T2 control chart with variable sampling intervals. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 14, p. 3127-3140, 2001.

BEN-EZRA, S.. FFT filter - clean your signals and display results! Disponível em: <a href="http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25017-fft-filter-clean-your-signals-and-display-results-">http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25017-fft-filter-clean-your-signals-and-display-results-</a>. Acesso em: 9 junho de 2014.

BERGLAND, G. D. A guided tour of the fast Fourier transform. **Spectrum**, **IEEE**, v. 6, n. 7, p. 41-52, 1969.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C.. Operations management research methodologies using quantitative modeling. International Journal of Operations & Production Management, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BRITO, T.G.; PAIVA, A.P.; FERREIRA, J.R.; GOMES, J.H.F.; BALESTRASSI, P.P.. A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays. **Precision Engineering**, v. 38, n. 3, p. 628-638, 2014.

CAIN, M. E.; AMBOS, H. D.; WITKOWSKI, F. X.; SOBEL, B. E.. Fast-Fourier transform analysis of signal-averaged electrocardiograms for identification of patients prone to sustained ventricular tachycardia. **Circulation**, v. 69, n. 4, p. 711-720, 1984.

CHOU, Y. M.; MASON, R. L.; YOUNG, J. C.. The control chart for individual observations from a multivariate non-normal distribution. **Communications in Statistics-Theory and Methods**, vol. 30, n. (8-9), p. 1937-1949, 2001.

CIRINO, L. M.. Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG. 2009. 112 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

CORNELL, J. A.. Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data. John Wiley & Sons, 2011.

COX, M. G.. The area under a curve specified by measured values. **Metrologia**, v. 44, n. 5, p. 365, 2007.

DAS, I.; DENNIS, J. E.. Normal-boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. **SIAM Journal on Optimization**, v. 8, n. 3, p. 631-657, 1998.

ESAB. Catálogo de soldagem MIG/MAG. Disponível em <http:// www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/arames\_solidos/upload/1901670-rev-7\_CatalogoSoldagemMIGMAG\_ArameSolidos\_pt.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2015.

GAMBIER, A.. Optimal PID controller design using multiobjective Normal Boundary Intersection technique. In: Asian Control Conference, 2009. ASCC 2009. 7th. IEEE, 2009. p. 1369-1374.

GANESANA, T.; VASANTB, P.; ELAMVAZUTHIC, I.. Normal-boundary intersection based parametric multi-objective optimization of green sand mould system. Journal of Manufacturing Systems, v. 32, n. 1, p. 197-205, 2013.

GOHR JR., R.. Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG. 2002. 168 p.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

GOMES, J. H. F.. Método dos polinômios canônicos de misturas para otimização multiobjetivo. 2013. 162 p.. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2013.

HARWIG, D. D.; DIERKSHEIDE, J. E.; YAPP, D.; BLACKMAN, S.. Arc behavior and melting rate in the VP-GMAW process. **Welding journal**, v.85, n°3, p.52s-62s, 2006.

HOWELL, D.. Statistical methods for psychology. Cengage Learning, 8 ed., 796p.. 2012.

IMC SOLDAGEM. Manual de instruções INVERSAL 300 DIGIPlus A7. 2ª Edição, Florianópolis, 75 p, 2011.

JIA, Z.; IERAPETRITOU, M.G.. Generate Pareto optimal solutions of scheduling problems using normal boundary intersection technique. **Computers & chemical engineering**, v. 31, n. 4, p. 268-280, 2007.

KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 1-4, p. 655-674, 2013.

KARPAT, Y.; ÖZEL, T.. Multi-objective optimization for turning processes using neural network modeling and dynamic-neighborhood particle swarm optimization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 35, n. 3-4, p. 234-247, 2007.

KAZEMZADEH, R.B.; BASHIRI, M.; ATKINSON, A.C.; NOOROSSANA, R. A general framework for multiresponse optimization problems based on goal programming. **European Journal of Operational Research**, 189(2), 421-429, 2007.

KÖKSOY, O.. A nonlinear programming solution to robust multi-response quality problem. **Applied mathematics and computation**, v. 196, n. 2, p. 603-612, 2008.

KOTHARI, C. R. Research methodology: methods and techniques. New Age International, Second Revised Edition, 418 p., 2004.

KUMAR, V.; BHALLA, A.; RATHORE, A. S.. Design of experiments applications in bioprocessing: Concepts and approach. **Biotechnology progress**, v. 30, n. 1, p. 86-99, 2014.

KUO, S.M.; LEE, B.H.; TIAN, W. Real-Time Digital Signal Processing: Fundamentals, Implementations and Applications. John Wiley & Sons, Second Edition, 651p., 2006.

LOWRY, C. A.; MONTGOMERY, D. C.. A review of multivariate control charts. **IIE transactions**, vol. 27, n.6, p. 800-810, 1995.

MONTGOMERY, D. C.. Design and Analysis of Experiments. John Wiley, 5 ed., 696 p. New York, 2000.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, George C. Applied statistics and probability for engineers. John Wiley, 5 ed., 792p. 2009.

MONTGOMERY, D. C.. Design and Analysis of Experiments. John Wiley, 8 ed., 752 p., New York, 2012.

MOTTA, Renato de S.; AFONSO, S.M.B.; LYRA, P.R.M.. A modified NBI and NC method for the solution of N-multiobjective optimization problems. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 46, n. 2, p. 239-259, 2012.

NAIR, V.. Taguchi's parameter design: A panel discussion. **Technometrics**, vol.34, n.2, p.127–161, 1992.

NASCIMENTO, A. S.; VILARINHO, L. O.. Uso da taxa de fusão na determinação de parâmetros para soldagem MIG com polaridade variável. In: *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - POSMEC*, Uberlândia. Anais FEMEC. Uberlândia, p. 1-10, 2007.

OLIVEIRA, C.H.. Método da interseção normal à fronteira para a otimização multiobjetivo de superfícies de resposta duais correlacionadas. 2013. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2013.

ORFANIDIS, S. J.. Introduction to signal processing. Prentice Hall, Second Edition, 795 p., 1996.

PAIVA, A. P.; PAIVA, E. J.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P.; COSTA, S. C.. A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, n. 7-8, p. 631-643, 2009.

POLLARD, J. H. A handbook of numerical and statistical techniques: with examples mainly from the life sciences. CUP Archive, 1979.

REYNOLDS JR, M.R.; LU, C. W.. Control charts for monitoring processes with autocorrelated data. Nonlinear Analysis: Theory. **Methods & Applications**, vol. 30, n.7, p. 4059-4067, 1997.

SADAGOPAN, S.; RAVINDRAN, A.. Interactive algorithms for multiple criteria nonlinear programming problems. **European Journal of Operational Research**, v. 25, n. 2, p. 247-257, 1986.

SANTOS, T. F. Soldagem MIG com corrente alternada MIG CA. 2008. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2008.

SCOTTI, A.; MONTEIRO, L. S.. Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, v.17, nº3, p.271-277, 2012.

TANG, L. C.; XU, K. A unified approach for dual response surface optimization. **Journal of quality technology**, v. 34, n. 4, p. 437-447, 2002.

TALKINGTON, J. E.. Variable polarity gas metal arc welding. 1998. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – The Ohio State University. 1998.

THAGA, K.. Control chart for autocorrelated processes with heavy tailed distributions. **Economic Quality Control**, 23(2), 197-206, 2008.

VAHIDINASAB, V., JADID, S. Normal boundary intersection method for suppliers 'strategic bidding in electricity markets: An environmental/economic approach. **Energy Conversion and Management**, v.51, p. 1111-1119, 2010.

WOLFE, R.G.. Weathering of Woodstock Granite Near Baltimore, Maryland. American Journal of Science, v. 265, pp. 106-117, 1967.

YEH, K. C.; KWAN, K. C.. A comparison of numerical integrating algorithms by trapezoidal, Lagrange, and spline approximation. **Journal of pharmacokinetics and biopharmaceutics**, v. 6, n. 1, p. 79-98, 1978.

## APÊNDICE

APÊNDICE A – Cálculo de Áreas por Integração Numérica.

Para melhor compreensão dos conceitos envolvidos nos cálculos das áreas abaixo da curva de sinais, Cox (2007) define a integração de uma variável como:

Dada a função e valores finitos e com < , Cox (2007) relata que esse problema equivale a determinar a área abaixo da curva dado pelo gráfico da função para .

Segundo Pollard (1979), a integral de uma função fornece a área entre a curva da função e o eixo horizontal, sendo que funções positivas possibilitam a obtenção de valores positivos de área e as funções negativas possibilitam a obtenção de áreas negativas. O autor enfatiza que o cálculo da área sob a curva trata-se na verdade da avaliação da área abaixo de uma série de arcos de polinômios aproximados e que esses arcos oscilam acima e abaixo da curva real. Apesar disso, o autor pondera que a estimativa das áreas é acurada, pois a integração pode ser considerada um processo de suavização.

Neste trabalho, optou-se pela metodologia de cálculo de áreas abaixo da curva por meio da regra trapezoidal, devido a sua simplicidade conceitual e matemática dentre as demais técnicas existentes. Yeh e Kwan (1978) definem esse método de modo que o valor funcional y entre dois pontos adjacentes ( , ) e , ) é aproximado por uma linha reta:

Onde:

- ;
- ;
- .

Continuando com a análise, Yeh e Kwan (1978) integram a equação de a , obtendo nesse intervalo:

(A. 3)

(A.2)

Para obtenção da área cumulativa abaixo da curva sob o intervalo [ ], onde corresponde ao número de dados do problema, executa-se o procedimento de cálculo de áreas para cada . Com isso, de acordo com Yeh e Kwan (1978), obtém-se o valor referente ao somatório total das áreas abaixo da curva de acordo com o método trapezoidal:

Yeh e Kwan (1978) afirmam que no método trapezoidal, a interpolação linear entre os pontos de dados tendem a superestimar ou subestimar a área, dependendo da concavidade da curva. De modo geral, os autores ponderam que a interpolação linear entre os pontos tendem a subestimar as áreas quando a função apresenta uma curva de valores convexa e superestimar quando a função produz uma curva côncava.

Pollard (1979) afirma que a regra trapezoidal produzirá valores acurados por meio do cálculo da integral de uma função se a diferença entre as ordenadas, ou valores , for pequena.

#### $AP \hat{E} NDICE B$ – Código para o cálculo das Diferenças Relativas Percentuais no Matlab

```
7.8.0 (R2009a).
```

```
clc
clear all
fs=4000; % Vetor frequência de amostragem. No caso, frequência de
amostragem é igual a 4000Hz.
T=1/fs; % Vetor período de amostragem.
c=[];
 for z=1:39;
    jz=xlsread('I:\Leonardo - Mestrado Producao\Mestrado Final F\Codigos
para Transformada\dados experimentos.xlsx',z); % Salva a planilha z do
arquivo selecionado no vetor jz .
    u(:,z)=jz(:,c); % Insere a coluna jz(:,c) no vetor u(:,z), onde `c' é
o número da coluna desejada. No caso deste trabalho, c=1 representa os
dados de Corrente e c=2 representa os dados de Tensão.
    t = 1: length(u(:, z));
    t = t' * T;
    [X, f, y, y2] = fftf(t,u(:,z),[],3);
    b=X;
    c=[c;b];
 end
c=c';
janelas = jan; % Substituir o parâmetro 'jan' pelo número de divisões
almejadas do sinal de acordo com o experimento referência.
m = size(c,e); % Vetor contagem. Nesse caso, o parâmetro 'c' é a matriz que
será analisada. Caso 'e' seja substituído por 1, conta-se o número de
linhas. Caso 'e' seja substituído por 2, conta-se o número de colunas.
jj = floor(length(c)/janelas);% A função `floor' arredonda a divisão para o
menor valor inteiro encontrado.
area = zeros(m, janelas); % Isso limpará a matriz 'area' e a recarregará para
o próximo looping.
for i=1:m %passando por cada sinal (Sinal 1 e 2 nesse caso).
    for k=1:janelas %passando por cada janela.
        kk = (k-1)*jj+1; %A sequência seria igual a 1,101,201,301,...,
3900+1.
        area(i,k) = trapz(t(kk:kk+jj-1),c(kk:kk+jj-1,i));% integral do
tempo t com respeito a u.
        %trapz(t(kk:kk+jj-1) = 1:1+100-1,101:101+100-1,201:201+100-
1,...,3901:3901+100-1.
    end
end
benchmark = mean(area(39,:)); % Insere no vetor benchmark o valor da média
do sinal escolhido como referência.
diff=area - benchmark; % Insere na matriz 'diff' o valor de cada área
substraído o valor da média do sinal referência.
w=abs(diff/benchmark); % Insere no vetor 'w' o valor das diferenças
relativas de um sinal em relação ao sinal referência.
```

```
percent=w*100; % Obtém-se com o cálculo da matriz `percent' o valor das
diferenças relativas percentuais em relação ao sinal referência.
```

## APÊNDICE C – Gráficos de Autocorrelação.



Figura C.1 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do experimento 3.



Figura C.2 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do experimento 18.



Figura C.3 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do experimento 26.



Figura C.4 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do experimento 31.



Figura C.5 - Função Autocorrelação para as áreas dos sinais de corrente e tensão do experimento 37.

#### ANEXOS

Fourier e transformada de Fourier Inversa.

Copyright (c) 2009, Shmuel Ben-Ezra All rights reserved.

Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

\* Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.

\* Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the ocumentation and/or other materials provided with the distribution

THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT OWNER OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

```
function [X, f, y, y2] = fftf(t, x, varargin)
% fftf - fft filter;
    [X, f, y, y2] = fftf(t, x); with t the time vector and x the signal,
2
    displays the original signal, the Fourier transform (absolute values)
8
    and the reconstructed signal generated by the inverse transform ifft
8
   with a selected subset of the frequencies.
%
   By default, the frequencies in the filtered signal are cut at 1/8 the
%
   sampling frequency.
%
   The function returns X - reconstructed signal, f - vector of
8
frequencies, y -
    full vector of amplitudes, y2 - the filtered vector of amplitudes.
0
2
    [X, f, y, y2] = fftf(t, x, cutoff); the user may set the cutoff
2
    frequency in units of Hertz.
2
   [X, f, y, y^2] = fftf(t, x, cutoff, my_N); the user may select my_N
8
   amplitudes with highest abolute value to participate in the
8
   reconstruction.
8
   Examples
   (suppose you have t and x defined already, both 1-dimensional vectors
2
of the same length.)
   fftf(t, x, 1e6); - reconstruct the signal with frequencies lower or
2
00
   equal to cutoff value of 1MHz.
2
   fftf(t, x, [], 20); - use only 20 biggest amplitudes for
2
   reconstruction.
   fftf(t, x, 1e6, 20); - select 20 biggest amplitudes within cutoff.
0
% Shmuel Ben-Ezra, Ultrashape ltd. August 2009
%% Verifying input
if ~any(size(t)==1),
```

```
disp('Unexpected vector size! - should be 1D vectors.')
   return
end
if ~any(size(x)==1),
   disp('Unexpected vector size! - should be 1D vectors.')
   return
end
if length(t) ~=length(x),
   disp('Unexpected vector size! - should be same length.')
   return
end
%% Definitions
Fs=1/(t(2)-t(1)); %sampling freq
N=length(x);
Nfft=2^nextpow2(N);
f=Fs/2*linspace(0,1,1+Nfft/2); % create freqs vector
cutoff freq=Fs/8;
my freqs=[];
if nargin>2,
    cutoff freq=varargin{1};
end
if nargin>3,
    my freqs=varargin{2};
end
%% main
y=fft(x,Nfft)/N; % perform fft transform
y2=filterfft(f, y, cutoff freq, my freqs); % filter amplitudes
%X=ifft(y2,'symmetric'); % the inverse transform. 'symmetric' is not
recognized in older versions of matlab
X=ifft(y2); % inverse transform
X=X(1:N) / max(X);
ind1 = find(y2(1:1+Nfft/2)); % get the nonzero elements in y2
nf1 = length(ind1); % count nonzero elements
%% display
figname = 'fftf - FFT at work';
ifig = findobj('type', 'figure', 'name', figname);
if isempty(ifig),
    ifig = figure('name', figname); % on my machine: ..., 'position', [360
120
      600
          8001);
end
figure(ifig);
% first plot
subplot(3,1,1)
plot(t*1e6, x)
xlabel('uSec')
axis tight
title('Sinal Original')
%second plot
subplot(3,1,2)
yplot=abs(y(1:1+Nfft/2));
yplot=yplot/max(yplot);
semilogy(f*le-6, yplot, f(ind1)*le-6, yplot(ind1), '.r');
xlabel('MHz')
title('Amplitudes')
legend('Espectro completo', 'Frequências selecionadas')
% third plot
subplot(3,1,3)
plot(t*1e6,X)
xlabel('uSec')
if isempty(cutoff freq),
    scutoff='Sem frequência de corte.';
```

```
else
    scutoff=sprintf('Frequência de corte = %g [Mhz]', cutoff freq/1e6);
end
stitle3=sprintf('Sinal reconstruído com %d frequências selecionadas; %s',
nf1, scutoff);
title(stitle3)
axis tight
return
function y2=filterfft(f, y, cutoff, wins)
nf=length(f);
ny=length(y);
if \sim (ny/2+1 == nf),
    disp('unexpected dimensions of input vectors!')
    v2=-1;
    return
end
% cutoff filter
y2=zeros(1,ny);
if ~isempty(cutoff)
    ind1=find(f<=cutoff);</pre>
    y2(ind1) = y(ind1); % insert required elements
else
    y2=y;
end
% dominant freqs filter
if ~isempty(wins),
    temp=abs(y2(1:nf));
    y^2 = zeros(1, ny);
                    % number of freqs that I want
    for k=1:wins,
        [tmax, tmaxi]=max(temp);
        y2(tmaxi) = y(tmaxi); % insert required element
        temp(tmaxi)=0; % eliminate candidate from list
    end
end
% create a conjugate symmetric vector of amplitudes
for k=nf+1:ny,
    y^{2}(k) = conj(y^{2}(mod(ny-k+1,ny)+1)); % formula from the help of ifft
end
return
```