

**GABRIEL MALATESTA MOTOMURA**

**Emprego de Técnicas de Inteligência Artificial na Modelagem e  
Controle do Processo Solda a Ponto por Resistência**

**São Paulo  
2007**

**GABRIEL MALATESTA MOTOMURA**

**Emprego de Técnicas de Inteligência Artificial na Modelagem e  
Controle do Processo Solda a Ponto por Resistência**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
a obtenção do título de Engenheiro Mecânico  
com ênfase em Automação e Sistemas.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica  
com ênfase em Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

**São Paulo  
2007**

## **Ficha Catalográfica**

**Motomura, Gabriel Malatesta**  
**Emprego de técnicas de inteligência artificial na modelagem**  
**e controle do processo de solda a ponto por resistência / G.M.**  
**Motomura. -- São Paulo, 2007.**

**130 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade**  
**de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de**  
**Sistemas Mecânicos.**

**1.Soldagem 2.Soldagem por ponto 3.Redes neurais 4.Inteli-**  
**gência artificial 5.Fuzzy I.Universidade de São Paulo. Escola**  
**Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de**  
**Sistemas Mecânicos II.t.**

## **Dedicatória**

Ao meu pai pela educação lacônica, mas repleta de exemplos. Pelo exemplo de superação na luta por uma vida mais digna, justa, honrosa e trabalhadora. Por ter aberto mão de seus desejos pessoais para proporcionar a mim e aos meus irmãos todas as oportunidades para nos tornarmos pessoas melhores.

A minha mãe pelo amor incondicional. Pela compreensão, carinho, afeto e conselhos. E pelo orgulho que sinto ao vê-la exercendo com tanto amor e dedicação sua profissão, ajudando as pessoas quando elas mais precisam de uma palavra de afeto.

Aos meus irmãos Henrique e Cláisse pelo companheirismo. Pelos momentos memoráveis da nossa infância que não esquecerei jamais.

A minha tia Junko pelo carinho e suporte durante toda a faculdade. Sempre pronta a ajudar no que for necessário.

A minha família, pois todos vocês foram fundamentais nessa caminhada. A família é a coisa mais importante na vida de uma pessoa.

Amo todos vocês!

## **Agradecimentos**

Ao orientador Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha pelo ensinamento e apoio no desenvolvimento deste trabalho. Pela ajuda através da indicação de valiosos artigos. Pela disponibilidade e disposição em ajudar sempre que necessário.

Aos amigos Marcelo Spinardi, Vitor Carrara e Igor Cunha pela cumplicidade e amizade durante todo o período de faculdade. Pelas longas noites estudando para as provas ou fazendo projetos que na companhia deles tornavam-se divertidas.

À Valdir Furlanetto pela orientação e disponibilidade de compartilhar seu conhecimento. A Mercedes Benz do Brasil – Unidade de SBC, em especial a Danilo Stocco, pela oportunidade de realizar uma visita muito instrutiva. E a General Motors do Brasil – Unidade São Caetano, em especial a Leonardo Sanches Jr., pela visita e compreensão do grande desafio que é a produção de automóveis.

Enfim, a todos que vivenciaram comigo este árduo caminho rumo a vida profissional.

## Resumo

A soldagem a ponto por resistência é amplamente utilizada na indústria automobilística por sua simplicidade e menor investimento associados à possibilidade de obtenção de um produto de qualidade e resistência satisfatórias. O processo de solda a ponto por resistência é caracterizado pelo acoplamento de fenômenos térmicos, elétricos, mecânicos e metalúrgico. Por este motivo as tentativas de modelagem do sistema utilizando métodos computacionais consagrados como o método das diferenças finitas, método dos elementos finitos e o método dos volumes finitos, embora tenham propiciado uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, falham por assumir hipóteses simplificativas que desvinculam o modelo obtido da realidade. Além disso, um modelo acurado que leva em consideração todas as dinâmicas inerentes ao processo poderia ser computacionalmente proibitivo principalmente ao tentar integrá-lo a um sistema de controle. Um fenômeno de grande relevância deixado de lado na grande maioria dos modelos apresentados até agora é o desgaste do eletrodo. É importante ressaltar que se trata de uma dinâmica fundamental para o sistema de controle dado a sua influência no processo de geração e distribuição de calor. Uma alternativa para capturar as dinâmicas envolvidas sem precisar recorrer a um modelo matemático explicitamente descritivo consiste na utilização de redes neurais. Neste trabalho realiza-se um estudo da aplicação de redes neurais artificiais e lógica nebulosa para a modelagem e controle do processo de solda a ponto por resistência. Estuda-se o emprego de redes neurais na previsão da qualidade do ponto de solda através do monitoramento da resistência dinâmica e de exames de ultrassonografia. A lógica nebulosa é empregada no controle da quantidade de energia fornecida ao ponto de solda.

**Palavras chaves:** solda a ponto, soldagem, redes neurais e sistemas nebulosos.

## Abstract

The resistance spot weld is widely used in the automotive industry because of its simplicity and lower investments associated with the possibility of getting a good quality product. The resistance spot welding process is governed by coupled thermal, electrical, mechanical and metallurgical phenomena. For this reason the attempts of modeling the system using well established techniques as finite differences method, finite element method and finite volume method, although they resulted in a better understanding of the phenomena involved, failed in assuming simplifying hypothesis that disconnected the model from the reality. Besides, an accurate model should take into account all the dynamics inherent from the process may fail as a result of its high computational cost mainly when trying to integrate it with a control system. A very important phenomenon that is not taking into account in most of the models present until now is the electrode wear. It's important to put in evidence that this is a fundamental dynamic for the control system project because of its influence in heat generation and distribution. An alternative for capture the dynamics involved without the necessity of make a descriptive mathematical model is to use artificial neural networks. In this work is set out the application of artificial neural networks (ANN) and fuzzy logic in modeling and control of the resistance spot welding process. The ANN can be used to monitor the quality of the weld by analyzing the dynamic resistance curve as well as ultrasonic tests. The fuzzy logic is used to control the amount of energy transmitted to the spot weld.

Key words: spot welding, weld, artificial neural network, and fuzzy systems.

## **Lista de tabelas**

Tabela 7-1: Estratégia de controle 1 .....	99
Tabela 7-2: Estratégia de controle 2 .....	99
Tabela 7-3: Estratégia de controle 3 .....	100
Tabela 7-4: Estratégia de controle 4 .....	100
Tabela 7-5: Estratégia de controle 5 .....	100
Tabela 7-6: Estratégia de controle 6 .....	100
Tabela 7-7: Regras que relacionam energia, operação .....	101

## Lista de ilustrações

Figura 1.1: Linha de solda robotizada utilizada na indústria automobilística .....	1
Figura 2.1: Funções de pertinência .....	8
Figura 2.2: Sistema nebuloso “puro” .....	10
Figura 2.3: Sistema nebuloso do tipo Takagi e Sugeno. ....	11
Figura 2.4: Sistema nebuloso MAMDANI. ....	12
Figura 2.5: Sistema nebuloso recorrente de primeira ordem.....	13
Figura 2.6: Sistema nebuloso recorrente com variáveis internas. ....	14
Figura 3.1: Estrutura do neurônio biológico.....	17
Figura 3.2: Neurônio binário proposto por McCulloch e Pitts. ....	18
Figura 3.3: Funções de ativação. ....	20
Figura 3.4: Rede MLP com uma camada intermediária. ....	22
Figura 3.5: Rede com função de ativação de base radial.....	24
Figura 3.6: Rede de Hopfield, totalmente recorrente.....	25
Figura 3.7: Rede de Elman, parcialmente recorrente.....	26
Figura 3.8: Rede neural com recorrência interna local. ....	27
Figura 3.9: Rede neural com recorrência interna global.....	27
Figura 3.10: Rede neural com recorrência na saída. ....	28
Figura 3.11: Treinamento supervisionado. ....	30
Figura 3.12: Neurônios de uma rede MLP para $L=3$ : do lado esquerdo, neurônio de uma camada intermédia; do lado direito, neurônio da camada de saída para $q = 1, \dots, M_3$ .....	34
Figura 3.13: Treinamento não supervisionado. ....	36
Figura 3.14: Modelo básico de treinamento por reforço. ....	37
Figura 4.1: Típico crescimento de solda para tempos de solda constante. b) Típico lóbulo de soldabilidade para força nos eletrodos constantes. ....	43
Figura 4.2: Representação tridimensional usada para estudar o efeito da espessura da chapa na soldabilidade de chapas revestidas de zinco utilizando força constante de 2.2kN .....	44
Figura 4.3: Típica curva de resistência dinâmica .....	48
Figura 4.4: Contribuição das diversas resistências de contato na resistência dinâmica entre os eletrodos de solda. ....	50
Figura 4.5: Efeito do diâmetro da ponta do eletrodo na forma da curva de resistência dinâmica para botões de solda de 5mm. ....	52

Figura 4.6: Influência do diâmetro da extremidade do eletrodo na corrente de solda necessária para produzir um ponto de solda de qualidade pré-determinada .....	52
Figura 4.7: Distribuição da temperatura obtida pelo MEF .....	56
Figura 4.8: Representação esquemática da distribuição de corrente nos eletrodos e nas chapas durante o ciclo de solda .....	57
Figura 4.9: Densidade de corrente obtida pelo MEF .....	58
Figura 5.1: Máquina de solda ponto a ponto estática.....	62
Figura 5.2: Máquina de solda a ponto a pinça.....	63
Figura 5.3: Representação elétrica da máquina monofásica CA.....	64
Figura 5.4: Componentes da resistência dinâmica .....	65
Figura 5.5: Carga no circuito secundário do transformador.....	66
Figura 5.6: Formas de onda características no conversor CA.....	66
Figura 5.7: Perdas no transformador ideal. ....	68
Figura 5.8: Modelo da dinâmica elétrica de uma máquina de solda monofásica CA.68	68
Figura 5.9: Circuito equivalente refletido para o primário .....	69
Figura 5.10: Modelo elétrico da máquina de solda implementado em Simulink / Matlab.....	71
Figura 5.11: Modelo do transformador de solda realizado em PSIM.....	72
Figura 5.12: Campo de atuação dos componentes semicondutores.....	74
Figura 5.13: SCR: Símbologia, camadas e junções. ....	76
Figura 5.14: SCR com encapsulamentos tipo rosca e tipo disco para altas potências. ....	76
Figura 5.15: Características do SCR.....	77
Figura 5.16: Símbolo e característica de operação do GTO .....	78
Figura 6.1: Possíveis condições anormais no processo de soldagem a ponto .....	79
Figura 6.2: (a) Máquina de solda estática tradicional. (b) Sensores acoplados a máquina.....	81
Figura 6.3: Sensor piezoelétrico .....	83
Figura 6.4: Identificação das características dos pontos de solda por exame de ultrasom (a) lentilha em ordem (b) ponto colado (c) ponto queimado ....	84
Figura 6.5: Montagem de sensores de deslocamento e força.....	85
Figura 6.6: Parâmetros extraídos do teste de ultrasonografia (esquerda) e vetor contendo os dados necessários para alimentar a rede neural. ....	86
Figura 6.7: Índices que podem ser extraídos da curva de resistência dinâmica. ....	89
Figura 7.1: Comportamento característico do tensão e corrente no circuito primário do transformador de solda.....	91

Figura 7.2: Andamento da tensão e corrente de primário para ângulos de disparo de 60 (a), 80 (b) e 120 (c) graus. Para estes ângulos obtem-se uma corrente eficaz no secundário da ordem de 23.06kA, 12.75kA e 3.26kA respectivamente.....	93
Figura 7.3: Representação do controle a lógica nebulosa implementado .....	94
Figura 7.4: Função de pertinência da variável de entrada ângulo de disparo. As funções de pertinência das variáveis zeroCorrente e proximoAngulo são identicas a esta. ....	95
Figura 7.5: Função de pertinência da variável de entrada energia.....	96
Figura 7.6: Função de pertinência da variável de saída operação.....	97
Figura 7.7: Exemplo da convergência das regras de controle.....	98
Figura 7.8: Exemplo onde as regras de controle são cíclicas. ....	99
Figura 7.9: Superfícies de controle que relacionam as variáveis de entrada zeroCorrente e anguloDisparo com a variável de saída proximoAngulo. ....	102
Figura 7.10: Superfícies de controle que relacionam as variáveis proximoAngulo e energia (a) e energia e operação (b). ....	103
Figura 9.1: Sistema de controle adaptativo a ser implementado .....	105

## **Lista de abreviaturas e siglas**

SPR	Solda a ponto por resistência
RNA	Redes neurais artificiais
CA	Corrente Alternada
RCS	Retificadores controlados de silício
GTO	Gate Turn-off Thyristor
IA	Inteligência artificial
ADALINE	Adaptive linear combiner element
MADALINE	Many adaline
MLP	Rede multicamadas com função de ativação sigmoidal
RBF	Rede neural com funções de ativação de base radial
ZTA	Zona termicamente afetada
MEF	Método dos elementos finitos
MDF	Método das diferenças finitas

## Lista de símbolos

$z_j^l$	Saída do j-ésimo neurônio na camada l	
$w_{ji}^l$	Peso entre o neurônio i da camada l – 1 e o neurônio j da camada l	
$x_p$	p-ésimo padrão de entrada	
$z_i^0$	i-ésimo componente do vetor de entrada	
$y_j$	j-ésima saída desejada	
$M_l$	Número de neurônios da l-ésima camada	
$N$	Número de padrões de treinamento	
$L$	Número de camadas da rede neural	
$f_l(\cdot)$	Função de ativação dos neurônios na camada l	
$Q$	Energia elétrica no ponto de solda	[J]
$d$	Diâmetro do ponto de solda	[mm]
$t$	Espessura da chapa	[mm]
$R_{solda}$	Resistência de contato entre as peças a serem soldadas	[ $\Omega$ ]
$I_{solda}$	Corrente de solda	[A]
$t_s$	Tempo de solda	[s]
$v_p$	Tensão no primário do transformador	[V]
$i_p$	Corrente no primário do transformador	[A]
$\alpha$	Ângulo de disparo dos tiristores	[rad]
$v_s$	Tensão no secundário do transformador	[V]
$i_s$	Corrente no secundário do transformador	[A]
$N_p$	Número de espiras no primário do transformador	
$N_s$	Número de espiras no secundário do transformador	
$\phi_p$	Fluxo primário	[Wb]
$\phi_s$	Fluxo secundário	[Wb]
$\phi_m$	Fluxo de magnetização	[Wb]
$N$	Relação de transformação	
$R_{eq}$	Resistência de perdas equivalentes aos enrolamentos	[ $\Omega$ ]

$R_p$	Resistência de perdas do enrolamento primário	$[\Omega]$
$R_s$	Resistência de perdas do enrolamento secundário	$[\Omega]$
$L_{eq}$	Indutância de dispersão equivalente dos enrolamentos	$[H]$
$L_p$	Indutância de dispersão do enrolamento primário	$[H]$
$L_s$	Indutância de dispersão do enrolamento secundário	$[H]$
$R_c$	Resistência de carga do transformador	$[\Omega]$
$X_{L_{eq}}$	Reatância de dispersão equivalente dos enrolamentos	
$\omega$	Freqüência angular da rede de alimentação	$[rad/s]$
$X_{L_p}$	Reatância de dispersão no enrolamento primário	
$X_{L_s}$	Reatância de dispersão no enrolamento secundário	
$R_m$	Resistência das perdas no núcleo	$[\Omega]$
$L_m$	Indutância de magnetização do núcleo	$[H]$
$i_L$	Corrente em indutor genérico	$[A]$
$L$	Indutor genérico	$[H]$
$v_L$	Tensão em indutor genérico	$[V]$
$PU$	Valor por unidade	
$Z_m$	Impedância complexa de $R_m$ e $L_m$	
$Z_{eq}$	Impedância complexa de $R_{eq}$ e $L_{eq}$	
$i_c$	Corrente na carga	$[A]$
$V_T$	Tensão de junção em tiristor genérico	$[V]$
$V_{T_{min}}$	Tensão mínima de junção em tiristor genérico	$[V]$
$R_T$	Resistência equivalente da junção em tiristor genérico	$[\Omega]$
$I_T$	Corrente em tiristor genérico	$[A]$
$FP$	Fator de potência na carga	

## Sumário

Dedicatória	I
Agradecimentos	II
Resumo	III
Abstract	IV
Lista de tabelas	V
Lista de ilustrações	VI
Lista de abreviaturas e siglas	IX
Lista de símbolos	X
Sumário	XII
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2 LÓGICA NEBULOSA</b>	5
2.1 Teoria de conjuntos nebulosos.....	5
2.1.1 Universo de discurso .....	6
2.1.2 Funções de pertinência .....	6
2.1.3 Normas triangulares .....	7
2.2 Classificação de sistemas nebulosos.....	9
2.2.1 Sistemas nebulosos puros.....	9
2.2.2 Sistemas nebulosos funcionais (Takagi e Sugeno) .....	10
2.2.3 Sistemas nebulosos com fuzzificador e defuzzificador (MANDANI) .....	11
2.2.4 Sistemas nebulosos estáticos.....	12
2.2.5 Sistemas nebulosos recorrentes.....	13
<b>3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)</b>	15
3.1 Introdução .....	15
3.2 Um Breve Histórico .....	15
3.3 O neurônio artificial clássico.....	17

3.4	Funções de ativação .....	19
3.5	Classificação de redes neurais.....	20
3.5.1	Redes neurais estáticas .....	21
3.5.2	Redes multicamadas (MLP).....	21
3.5.3	Redes neurais com funções de ativação de base radial (RBF) .....	23
3.5.4	Redes neurais recorrentes.....	25
3.6	Arquiteturas básicas .....	25
3.7	Métodos de treinamento.....	29
3.7.1	Treinamento supervisionado.....	29
3.7.2	Treinamento não supervisionado.....	35
3.7.3	Treinamento por reforço .....	36
3.8	Algumas considerações sobre o treinamento.....	38
3.8.1	Taxa de Aprendizado.....	38
3.8.2	Modos de treinamento .....	38
3.8.3	Critérios de Parada.....	39
3.8.4	Inicialização dos Pesos .....	40
<b>4</b>	<b>O PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA</b>	<b>41</b>
4.1	Definição dos Parâmetros de Solda .....	41
4.2	Mapas de solda.....	42
4.2.1	Mapas de solda bidimensionais.....	42
4.2.2	Mapas de solda tridimensionais.....	43
4.3	Definição de qualidade da solda .....	44
4.4	Considerações sobre a modelagem do processo de solda a ponto .....	45
4.5	Resistência dinâmica .....	46
4.5.1	Relação entre resistência dinâmica e tamanho da solda.....	51
4.5.2	Contribuição da resistência dinâmica para a formação da solda .....	53
4.6	Simulação do processo de formação da solda.....	54

4.6.1	Estado atual da modelagem termoelétrica.....	55
4.6.2	Estado atual da modelagem termomecânica.....	59
4.7	Aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA) .....	60
4.7.1	Integração com as técnicas de inteligência artificial .....	60
<b>5</b>	<b>A MÁQUINA DE SOLDA MONOFÁSICA CA</b>	<b>61</b>
5.1	Introdução .....	61
5.2	Aspectos m��canicos .....	62
5.3	Aspectos elétricos .....	64
5.4	Modelamento elétrico da máquina de solda .....	67
5.5	Modelo estático .....	68
5.6	Modelo Dinâmico.....	70
5.6.1	Identifica��o dos parâmetros do modelo .....	72
5.7	Eletrônica de potência.....	73
5.7.1	Componentes semicondutores .....	74
5.7.2	Tiristores .....	75
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DA QUALIDADE DO PONTO DE SOLDA UTILIZANDO RNA</b>	<b>79</b>
6.1	Introdu��o .....	79
6.2	Sensores .....	81
6.2.1	Amperímetro .....	81
6.2.2	Voltímetro .....	82
6.2.3	Resistência dinâmica .....	82
6.2.4	Sensor de infravermelho.....	83
6.2.5	Sensor de ultrasom.....	83
6.2.6	Sensores de deslocamento e força .....	84
6.3	Controle da qualidade da solda através de exame de ultrasonografia utilizando redes neurais .....	85
6.3.1	Variáveis de entrada da rede neural.....	85

6.3.2	Caracterização do ponto de solda por exames de ultrasonografia .....	86
6.3.3	Classificação do ponto de solda .....	87
6.4	Controle de qualidade do ponto de solda utilizando o monitoramento da resistência dinâmica.....	88
6.4.1	Variáveis de entrada da rede neural .....	88
<b>7</b>	<b>CONTROLADOR A LÓGICA NEBULOSA</b>	<b>90</b>
7.1	Análise do sistema .....	91
7.2	Construção do controlador .....	92
7.2.1	Estrutura do controlador .....	92
7.2.2	Funções de pertinência .....	95
7.2.3	Regras .....	97
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>104</b>
<b>9</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>105</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem a ponto por resistência (SPR) é o principal processo utilizado para junção de chapas metálicas na indústria automobilística (Figura 1.1). A principal vantagem do processo de solda a ponto é a facilidade com que este pode ser automatizado e robotizado o que permite a obtenção de um elevado ritmo produtivo. No entanto, o processo de solda por resistência pode ser difícil de controlar, particularmente em complexas células de solda, pela interação entre os vários parâmetros de controle.



Figura 1.1: Linha de solda robotizada utilizada na indústria automobilística (Fonte: <http://www.philpem.me.uk/elec/welder/>; acesso em 31/07/07)

Tipicamente uma linha de produção automotiva americana realiza aproximadamente 7 milhões de pontos de solda por dia. Um bom controle de qualidade assegura que 99.7% desses pontos respeitem os requisitos mínimos especificados pelos padrões internacionais. Pelo alto volume de produção um nível de aceitação de 100% é o objetivo a ser perseguido dado que mesmo um índice de rejeição da ordem de 0.1% representaria um grande volume de peças rejeitadas ou sujeitas a re-usinagem.

Para garantir a integridade estrutural do componente sob uma ampla gama de condições de operação, por exemplo, no caso de uma colisão, mesmo a remota possibilidade de produzir uma ou duas soldas defeituosas em um componente crítico deve ser eliminada. Esta exigência, juntamente com a incerteza relativa à qualidade

da solda pela dificuldade em realizar ensaios não destrutivos dos pontos de solda, são responsáveis pela necessidade de fazer mais pontos de soldas do que seriam necessários para a manutenção da integridade estrutural dos componentes. Carros modernos contêm entre 4.000 e 6.000 pontos de solda (Williams; Parker, 2004)<sup>65</sup>, dependendo do modelo. Estima-se que o número de soldas redundantes pode representar até 30% deste total. O custo não desprezível desses pontos de soldas desnecessários é um dos motivos principais pelos quais se busca a otimização desse processo.

O processo de SPR envolve uma complexa interação entre as propriedades físicas e metalúrgicas do material a ser soldado e os fenômenos eletromecânicos envolvidos no processo. É essencial que se realize uma otimização do processo do ponto de vista da produção e do controle de qualidade. A otimização desejada pode ser obtida através de algoritmos de controle capazes de assegurar um nível de qualidade do ponto de solda reduzindo assim o número de soldas necessárias para satisfazer os requisitos de projeto do componente fabricado.

As estratégias de controle utilizadas industrialmente são baseadas em critérios empíricos. Embora empregadas de maneira satisfatória por muitos anos, uma compreensão mais profunda dos parâmetros que governam a formação e o crescimento da lentilha de solda proporcionaria o desenvolvimento de algoritmos mais eficientes de controle do processo de SPR. Para a otimização da produção em termos custo e qualidade da solda é necessário um entendimento detalhado da relação entre as variáveis associadas ao processo, incluindo a degradação do eletrodo.

A vida útil do eletrodo é um fator limitante na produção. O desgaste do eletrodo em consequência das elevadas pressão e densidades de corrente que agem em sua face é diretamente proporcional ao número de pontos de solda realizados. Os ciclos térmicos e mecânicos envolvidos no processo causam a deformação do eletrodo a qual se manifesta através do aumento do diâmetro da ponta do mesmo. Este fenômeno é conhecido pelo termo em inglês “mushuring”. Também ocorrem micro-fissuras na superfície e, quando se solda aços revestidos, a formação de ligas metálicas na superfície como consequência da retirada do revestimento por aderência. Estes fenômenos aumentam a taxa de crescimento da ponta do eletrodo. Além disso, a extensão do fenômeno de cavitação aumenta consideravelmente como consequência dessas ligas. A combinação dos efeitos

citados acarreta uma redução brusca da vida do eletrodo a qual depende também de outros fatores como a configuração do eletrodo, os parâmetros de solda e as características eletromecânicas da máquina de solda. Essa redução da vida útil do eletrodo resulta numa qualidade irregular das soldas realizadas e, consequentemente, num maior custo de manutenção.

Portanto os objetivos relacionados ao processo de solda a ponto são:

- Realizar um ponto de solda do tamanho especificado e desenvolver uma estratégia de controle do processo;
- A capacidade de continuar realizando pontos de solda que respeitem um padrão de qualidade ao longo de grandes campanhas de produção a custo mínimo.

A solução ótima, aquela que facilita a formação da solda, pode não ser necessariamente a melhor em termos de garantia da vida útil desejada ao eletrodo sob condições de operação. Portanto, o ótimo em termos de eficiência do processo de manufatura é obtido obtendo um compromisso entre a necessidade de formação do ponto solda e a duração da vida do eletrodo.

No capítulo 2 é realizada uma revisão dos conceitos de sistemas nebulosos. É apresentada a fundamentação teórica que suporta a lógica nebulosa assim como a classificação dos tipos possíveis de sistemas a lógica nebulosa.

As redes neurais artificiais (RNA) são apresentadas no capítulo 3. Após um breve histórico da evolução das redes neurais, apresenta-se o neurônio artificial clássico. Também são discutidos: a classificação das RNAs, as arquiteturas básicas e os métodos de treinamentos.

O capítulo 4 apresenta um estudo do processo de SPR, os parâmetros de solda são identificados, define-se o conceito de qualidade da solda e são apresentados os mapas de solda, os principais paradigmas na modelagem do processo assim como a dificuldade em realizar-se um modelo matemático explícito do processo de SPR. Finalmente são apresentadas as perspectivas de emprego de técnicas de inteligência artificial na modelagem e no controle do processo de SPR.

Um estudo da máquina de solda monofásica CA é realizado no capítulo 5. A análise é decomposta em aspectos mecânicos e elétricos. Um aprofundamento das propriedades elétricas é realizado. Desenvolve-se um modelo elétrico estático e outro dinâmico da máquina de solda monofásica CA. Indicam-se os procedimentos

necessários para a identificação dos parâmetros do modelo. Para desenvolver um sistema de controle a lógica nebulosa capaz de regular a quantidade de energia fornecida ao ponto de solda é necessária a compreensão dos componentes semicondutores responsáveis pela transmissão de potência. Uma apresentação destes componentes também é realizada. Justifica-se o emprego de RCSs e GTOs e é realizada uma análise das características de funcionamento destes componentes.

No capítulo 6, analisa-se a utilidade das redes neurais na predição da qualidade do ponto de solda e no controle do processo de SPR. Esta parte do trabalho tem como principal objetivo servir de guia para a utilização de redes neurais no monitoramento e controle do processo de soldagem.

Finalmente, após uma compreensão do processo de SPR, do funcionamento da máquina de solda e dos componentes semicondutores utilizados construiu-se um controlador a lógica nebulosa com o objetivo de controlar a quantidade de energia gerada durante o processo de soldagem, no capítulo 7. O controlador será integralmente desenvolvido neste trabalho e seis estratégias de controle serão propostas.

## 2 LÓGICA NEBULOSA

Nesta seção serão apresentados alguns dos principais conceitos relativos à lógica nebulosa. Inicialmente, realiza-se uma revisão dos fundamentos teóricos que suportam a lógica nebulosa e o funcionamento dos sistemas nebulosos. Em seguida, é apresentada a classificação dos sistemas a lógica nebulosa. Um entendimento desses conceitos é de fundamental importância para a compreensão das etapas de desenvolvimento do controlador a lógica nebulosa desenvolvido posteriormente neste trabalho. Este controlador será o responsável pelo disparo dos tiristores presentes no controle de solda possibilitando a regulagem da quantidade de energia fornecida ao ponto de solda.

### 2.1 Teoria de conjuntos nebulosos

Existem duas fontes principais de informações consideradas na engenharia: os sensores que oferecem medidas numéricas das variáveis de interesse, e os especialistas que fornecem instruções de ordem lingüística e descrições qualitativas do sistema. O primeiro tipo de informação é denominado informação numérica e o segundo informação lingüística. A informação numérica é representada por números como 35, -0,98, etc.; enquanto a informação lingüística é representada por conceitos como grande, bom, baixo, etc.

Em geral, o conhecimento sobre os diversos sistemas ou modelos não é exata e a representação do conhecimento utilizando modelos clássicos resulta em uma representação complexa e pouco eficiente.

O conceito de conjuntos nebulosos foi inicialmente proposto por L. Zadeh<sup>1, 2,3</sup> como uma generalização da teoria de conjuntos clássica. Um subconjunto nebuloso pode ser considerado como uma função que atribui a elementos de um universo valores de pertinência no intervalo  $I = [0, 1]$  ao contrário da teoria de conjuntos da lógica clássica onde os valores de pertinência são 0 ou 1.

A teoria de conjuntos nebulosos e a lógica subjacente é uma “ponte” para aproximar a lógica executada pela máquina ao raciocínio humano. Um sistema

nebuloso é capaz de capturar informações vagas descritas em uma linguagem natural (variáveis lingüísticas) e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelo computador, possuindo assim, habilidades no manuseio de informações qualitativas e imprecisas, o que resulta em um desempenho estável e robusto.

### 2.1.1 Universo de discurso

Um universo de discurso é um conjunto clássico que contém todos os objetos de um domínio de interesse representados por  $x = [x_1, \dots, x_n]$ . Seja  $U \in \mathbb{R}^n$  um universo de discurso. Um subconjunto nebuloso A em U é caracterizado pela sua função de pertinência  $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$  com  $\mu_A(x)$  representando o grau de pertinência de  $x \in U$  em A.

### 2.1.2 Funções de pertinência

As funções de pertinência mais utilizadas são triangular, trapezoidal e gaussiana. Outras funções de pertinência comumente utilizadas na literatura podem ser encontradas em (Pedrycz; Gomide, 1998)<sup>4</sup> e (Yager; Filev, 1994)<sup>5</sup>. As três funções principais encontram-se ilustradas na Figura 2.1. Estas funções de pertinência são definidas a seguir:

#### 2.1.2.1 Função Triangular

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & x \in [m, b] \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (2.1)$$

onde m é o valor modal, e a e b são os limites superior e inferior, respectivamente.

### 2.1.2.2 Função Trapezoidal:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & x \in [a, m] \\ 1, & x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & x \in [n, b] \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (2.2)$$

### 2.1.2.3 Função Gaussiana:

$$\mu_A(x) = e^{-\beta(x-m)^2} \quad (2.3)$$

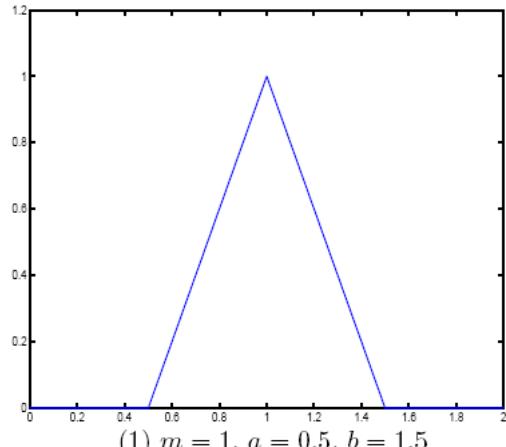
onde  $\beta > 0$ .

### 2.1.3 Normas triangulares

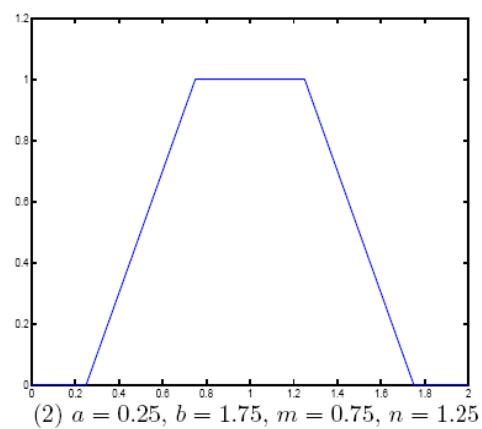
As normas triangulares são modelos genéricos das operações de união e intersecção da teoria de conjuntos nebulosos e da conjunção e disjunção na lógica correspondente, devendo apresentar as propriedades de comutatividade, associatividade, monotonicidade e satisfazer as condições de contorno (Pedrycz; Gomide, 1998)<sup>4</sup>. As normas triangulares são chamadas de t-normas e s-normas, podendo ser formalmente definidas como:

**Definição 3.1.** Uma t-norma é uma função binária  $t : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  tal que:

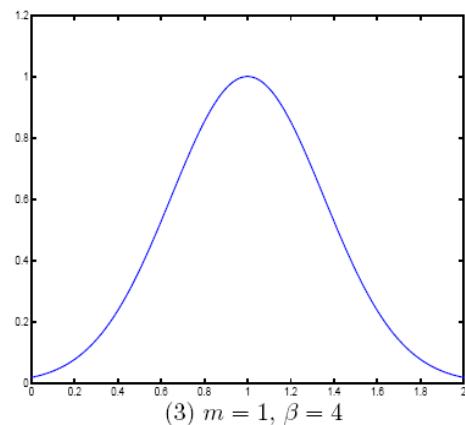
1. Comutatividade:  $x \, t \, y = y \, t \, x$
2. Associatividade:  $x \, t \, (y \, t \, z) = (x \, t \, y) \, t \, z$
3. Monotonicidade: Se  $x \leq y$  e  $w \leq z$  então  $x \, t \, w \leq y \, t \, z$
4. Condições de contorno:  $0 \, t \, x = 0$ ,  $1 \, t \, x = 1$



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1: Funções de pertinência. (1) Função triangular, (2) Função Trapezoidal, (3) Função Gaussiana.

**Definição 3.2.** Uma s-norma, também conhecida como co-norma triangular, é uma função binária  $s: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ , tal que:

1. Comutatividade:  $x \, s \, y = y \, s \, x$
2. Associatividade:  $x \, s \, (y \, s \, z) = (x \, s \, y) \, s \, z$
3. Monotonicidade: Se  $x \leq y$  e  $w \leq z$  então  $x \, s \, w \leq y \, s \, z$
4. Condições de contorno:  $0 \, s \, x = x$ ,  $1 \, s \, x = 1$

Pode-se observar claramente que t-normas incluem a operação min (intersecção padrão) e s-normas a operação max (união padrão). Ao longo deste trabalho e sem perda de generalidade, as normas triangulares a serem utilizadas são as operações de mínimo e máximo, definidas para a t-norma e a s-norma respectivamente. Outros tipos de normas triangulares encontram-se definidas em (Pedrycz; Gomide, 1998)<sup>4</sup>.

## 2.2 Classificação de sistemas nebulosos

Os sistemas nebulosos podem ser classificados em três tipos básicos (Wang, 1994)<sup>6</sup>. Além disso, podem ser posteriormente classificados em recorrentes ou estáticos dependendo da existência ou não de realimentação do sistema.

### 2.2.1 Sistemas nebulosos puros

Um sistema nebuloso puro é formado por uma base de regras do tipo SE [antecedente] ENTÃO [consequente], e um mecanismo de inferência nebuloso como mostra a Figura 2.2. O mecanismo de inferência nebuloso determina um mapeamento dos conjuntos nebulosos do universo de discurso da entrada em U com os conjuntos nebulosos da saída pertencente ao universo de discurso V. A base de regras nebulosas adota a seguinte forma:

$$R^{(l)}: SE [x_1 \text{ É } A_1^l] \text{ E } \dots [x_n \text{ É } A_n^l] \text{ ENTÃO } [y \text{ É } B^l] \quad (2.4)$$

onde  $A_1^l$  e  $B^l$  são os subconjuntos nebulosos em  $U$  e  $V$ ;  $x = [x_1, \dots, x_n] \in U$  e  $y \in V$  as variáveis de base das variáveis lingüísticas respectivamente, para  $l = 1, \dots, M$ , sendo  $M$  o número de regras que formam a base de regras do sistema nebuloso.

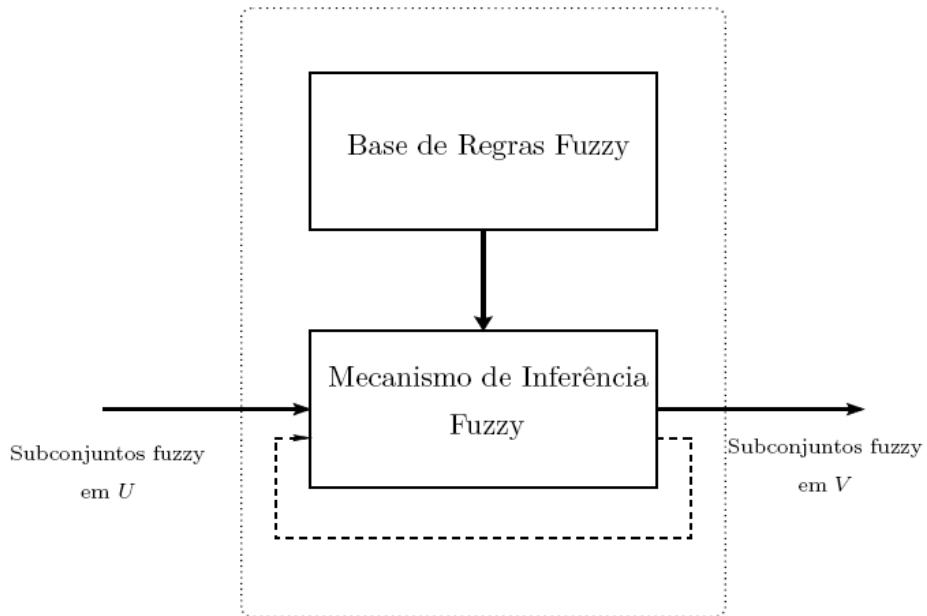


Figura 2.2: Sistema nebuloso “puro”

### 2.2.2 Sistemas nebulosos funcionais (Takagi e Sugeno)

Estes sistemas têm como principal diferença do sistema nebuloso puro, o cálculo da saída  $y$ , a qual é computada como uma função da entrada como, por exemplo, uma combinação linear de  $x$  (Takagi; Sugeno, 1985)<sup>8</sup>, sendo neste caso as regras nebulosas definidas como:

$$R^{(l)}: SE [x_1 \text{ É } A_1^l] \text{ E } \dots [x_n \text{ É } A_n^l] \text{ ENTÃO } [y^l = a_0^l + a_1^l x_1 + \dots + a_n^l x_n] \quad (2.5)$$

onde  $a_i^l$  são coeficientes reais e  $y^l$  é a saída real da regra  $l$ ,  $l = 1, \dots, M$ . Enquanto os antecedentes das regras continuam sendo nebulosas, o consequente não. Ou

seja, dada uma entrada  $x$ , a saída  $y = f(x)$  do sistema é calculada como uma média ponderada das saídas  $y^l$  de cada regra:

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^M w^l y^l}{\sum_{l=1}^M w^l} \quad (2.6)$$

onde  $w^l$  é o grau de ativação da regra  $R^{(l)}$  sendo calculado como:

$$w^l = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \quad (2.7)$$

A Figura 2.3 representa este sistema.

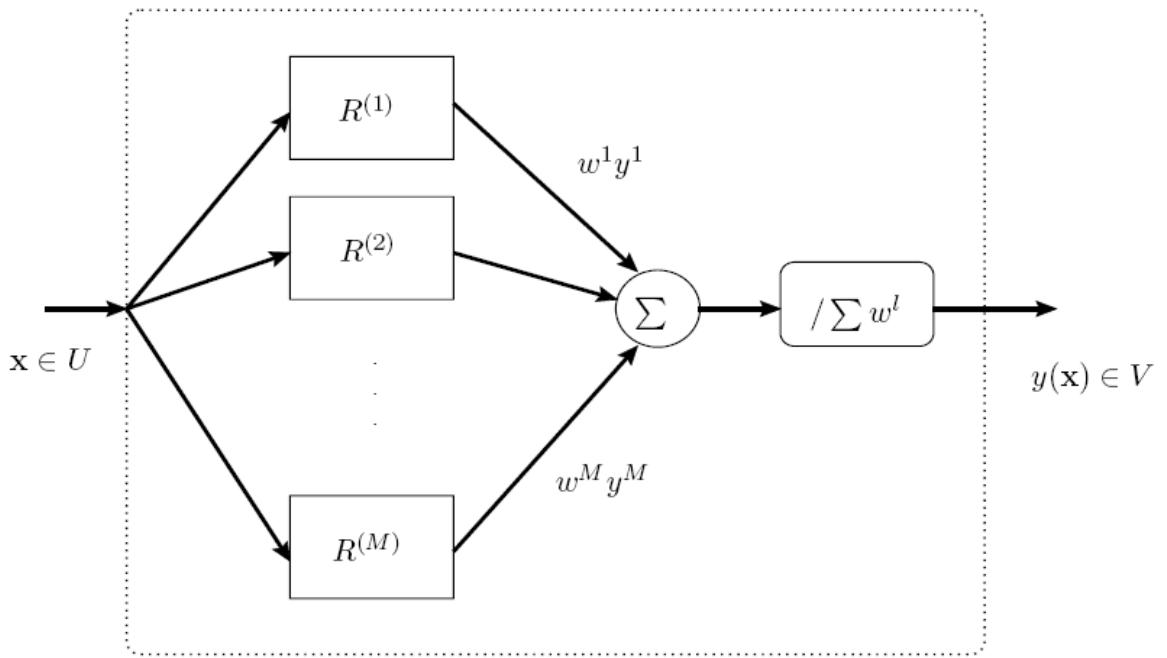


Figura 2.3: Sistema nebuloso do tipo Takagi e Sugeno.

### 2.2.3 Sistemas nebulosos com nebulizador e denebulizador (MANDANI)

A configuração básica de um sistema nebuloso com nebulizador e denebulizador é mostrada na Figura 2.4. Este sistema foi inicialmente proposto por

Mamdani (Mamdani 1974)<sup>7</sup> e, por este motivo, também é conhecido como sistema Mandani.

O mecanismo de nebulizador mapeia valores reais de  $x$  em  $U$  a subconjuntos nebulosos em  $U$  e o processo de denebulizador mapeia subconjuntos nebulosos em  $V$  a valores reais de  $y$  em  $V$ .

Além da classificação apresentada previamente também podemos caracterizar os sistemas nebulosos quanto a sua estaticidade ou recorrência.

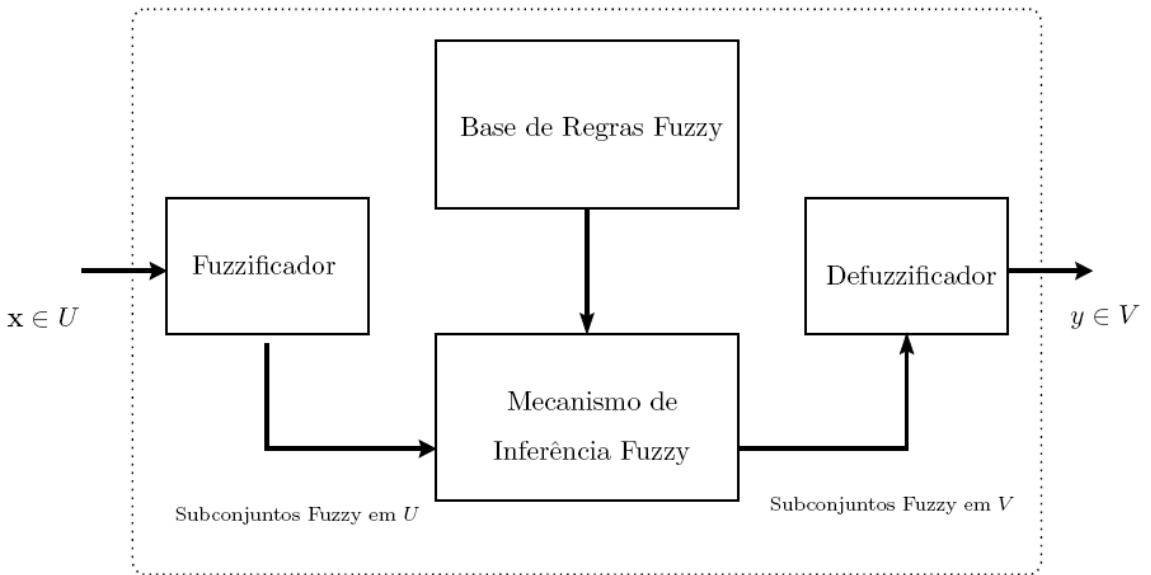


Figura 2.4: Sistema nebuloso MAMDANI.

#### 2.2.4 Sistemas nebulosos estáticos

Os sistemas nebulosos estáticos são definidos como modelos nebulosos com processamento direto das informações, ou seja, sem realimentação.

Um sistema nebuloso adaptativo é definido como um sistema nebuloso junto com um algoritmo de aprendizagem. Um exemplo de sistema adaptativo é aquele construído a partir de um conjunto de regras SE-ENTÃO utilizando o princípio dos sistemas nebulosos, sendo os parâmetros da base de regras ou do sistema de inferência ajustados via algum método de otimização, tendo como referência informações numéricas. Maiores detalhes de sistemas nebulosos adaptativos podem ser encontrados em (Bersini; Gorrini, 1993)<sup>9</sup>, (Gorrini; Bersini, 1994)<sup>10</sup> e (Yager &

Filev, 1994)<sup>5</sup>. Em (Wang 1994)<sup>6</sup>, um sistema nebuloso adaptativo é utilizado para modelagem de sistemas não lineares e posteriormente para controle off-line, ajustando o número de regras durante o treinamento do sistema.

### 2.2.5 Sistemas nebulosos recorrentes

Um sistema nebuloso recorrente é um sistema com memória, ou seja, é capaz de representar um comportamento dinâmico. Em um sistema nebuloso recorrente de primeira ordem, uma ou mais variáveis aparecem tanto no antecedente como no consequente da seguinte forma (Figura 2.5):

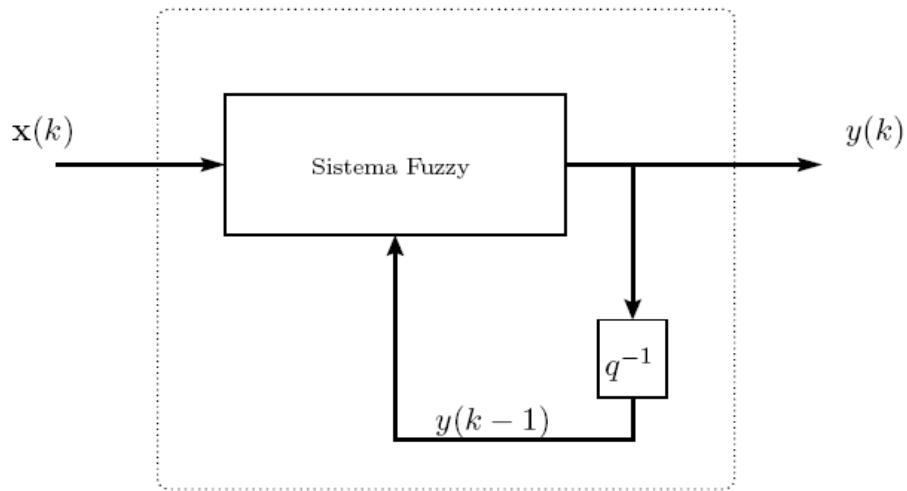


Figura 2.5: Sistema nebuloso recorrente de primeira ordem.

$$SE [y(k-1) \text{ É } A_i^l] \text{ E } [x(k) \text{ É } A_j^l] \text{ ENTÃO } [y(k) \text{ É } B^l] \quad (2.8)$$

Um sistema nebuloso de primeira ordem pode ser utilizado para aproximar sistemas clássicos de primeira ordem; assim, é necessária a inclusão de variáveis internas e, desta forma, enriquecer a estrutura para que utilizando ainda um sistema nebuloso de primeira ordem seja possível obter um bom desempenho na aproximação de sistemas de ordem superior.

Um modelo de sistema nebuloso recorrente com variáveis internas é mostrado na Figura 2.6. Neste caso, o sistema contém uma única variável interna  $\Phi(k)$  e a dinâmica do sistema nebuloso pode ser dividido em dois subsistemas onde:

$$R_1^{(l)} : SE [x(k) \text{ É } A_i^l] \rightarrow [y(k-1) \text{ É } A_j^l] \text{ ENTÃO } [\Phi(k) \text{ É } \gamma^l] \quad (2.9)$$

representa a dinâmica relacionada a variável interna (Subsistema nebuloso 1). Logo, a saída do sistema estará definida como:

$$R_2^{(l)} : SE [x(k) \text{ É } A_i^l] \rightarrow [\Phi(k) \text{ É } \gamma^l] \rightarrow [y(k-1) \text{ É } A_j^l] \text{ ENTÃO } [y(k) \text{ É } B^l] \quad (2.10)$$

a qual representa a dinâmica do Subsistema nebuloso 2.

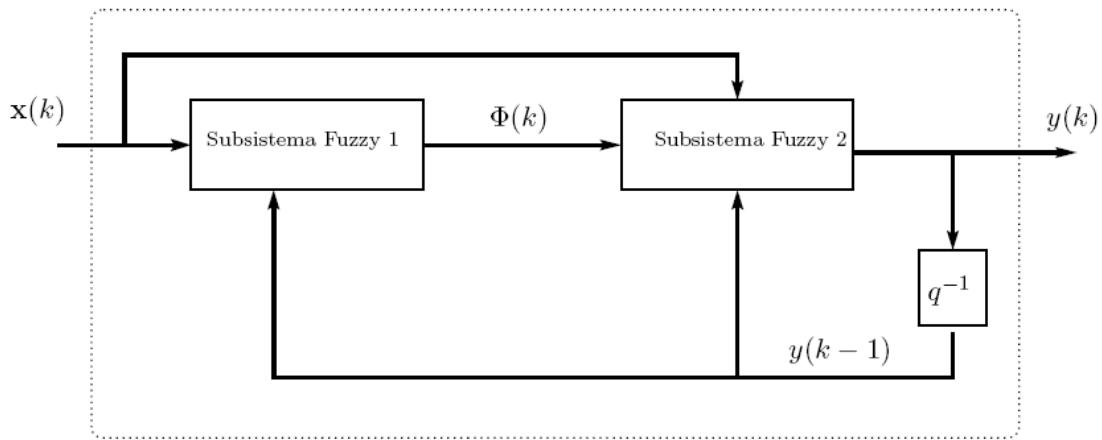


Figura 2.6: Sistema nebuloso recorrente com variáveis internas.

### 3 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)

Nesta seção serão abordados conceitos relativos às RNAs. A compreensão destes conceitos possibilitará o entendimento das características intrínsecas as redes neurais artificiais que as tornam úteis para a modelagem do processo de SPR.

#### 3.1 Introdução

As RNAs, também denominadas como sistemas conexionistas ou de processamento distribuído paralelo, são paradigmas computacionais de processamento de informação inspirados no sistema nervoso biológico.

Embora exista uma grande quantidade de arquiteturas de redes neurais, sem dúvida a estrutura multicamada é a mais conhecida e utilizada, devido à propriedade de aproximação universal e de generalização para uma ampla classe de problemas, utilizando um mesmo algoritmo de aprendizado.

Dadas as propriedades de aprendizado e classificação intrínsecas das redes neurais propõe-se o emprego de redes neurais para a caracterização de pontos de solda por resistência. Primeiramente, serão introduzidos os conceitos básicos, as possíveis arquiteturas de rede e os métodos de treinamento. Num segundo momento, serão considerados os parâmetros que devem ser utilizados na classificação dos pontos de solda assim como os sensores empregados para a obtenção destes dados.

#### 3.2 Um Breve Histórico

O interesse nos estudos de mecanismos e estruturas baseados no cérebro humano tem permitido nestes últimos anos, um grande desenvolvimento de modelos computacionais no plano biológico. A evolução das redes neurais artificiais passou por um processo iniciado por um período de grande atividade, seguido por anos de estagnação nas pesquisas para, logo a seguir, permitir um processo de

ressurgimento do interesse científico como consequência do desenvolvimento de novas tecnologias e fundamentos teóricos.

A primeira tentativa de construir um modelo conexionista foi na década de 40 por (McCulloch; Pitts, 1943)<sup>11</sup>, cujo trabalho fazia uma analogia entre células vivas e o processamento eletrônico, simulando o comportamento do neurônio natural, onde o neurônio possuía apenas uma saída, dada por uma função (threshold) da soma ponderada das suas diversas entradas.

Poucos avanços foram feitos até 1949, quando Donald Hebb publicou o livro intitulado “The Organization of Behavior”<sup>12</sup>, o qual propõe, pela primeira vez, uma lei de aprendizagem específica para as sinapses dos neurônios.

Anos depois, Frank Rosenblatt (Rosenblatt, 1958)<sup>13</sup>, tendo como base os estudos de (McCulloch; Pitts, 1943)<sup>11</sup>, mostrou em seu livro “Principles of Neurodynamics”<sup>14</sup> o modelo dos perceptrons. Neste modelo, os neurônios eram organizados em camadas de entrada e saída, onde os pesos das conexões eram adaptados a fim de se atingir a eficiência sináptica. Em 1960, (Widrow; Hoff, 1960)<sup>15</sup>, propuseram o modelo Adaline (ADaptive LINear combiner Element), baseando-se também na proposta de McCulloch.

Em 1969, (Minsky; Papert, 1969)<sup>16</sup> realizaram um estudo mais rigoroso do modelo do perceptron proposto por Rosenblatt, enfatizando as suas limitações e provocando uma paralisação de atividades na área.

Na década de 70 e início de 80, surgiram estudos voltados para modelos com memória associativa. (Von der Malsburg, 1973)<sup>17</sup> e (Grossberg, 1976)<sup>18</sup> desenvolveram idéias de aprendizado competitivo, enquanto (Kohonen, 1982)<sup>19</sup> propunha os mapas auto-organizáveis.

O interesse em redes neurais foi renovado quando John Hopfield (Hopfield, 1982)<sup>20</sup> publica um importante estudo baseado no princípio físico sobre o armazenamento de informação em configurações dinamicamente estáveis. Ele considerou para estas configurações, um conjunto de neurônios binários, dispostos de forma que suas saídas fossem realimentadas para as entradas, sendo este um dos primeiros modelos a introduzir dinâmica em redes neurais.

Em 1987, Rumelhart e McClelland publicam o livro “Parallel Distributed Processing”<sup>21</sup>, divulgando um método para ajuste dos parâmetros de redes estáticas multicamadas denominado algoritmo de retropropagação, sendo este inicialmente proposto por Werbos (Werbos, 1974)<sup>22,23</sup>. Este fato originou uma grande expansão

na área, fazendo com que pesquisadores de diversos campos passassem a visualizar interessantes aplicações para as redes neurais artificiais.

Em 1987, ocorreu em São Francisco a primeira conferência de redes neurais em tempos modernos, “IEEE International Conference on Neural Networks”, sendo formada a “International Neural Networks Society” (INNS). A partir destes acontecimentos decorreu a publicação do periódico “Neural Networks” da INNS em 1989, seguido do “Neural Computation” e do “IEEE Transactions on Neural Networks”, em 1990.

### 3.3 O neurônio artificial clássico

O neurônio artificial clássico é baseado no neurônio biológico (Figura 3.1), o qual é formado por um corpo celular que contém o núcleo da célula; diversos dendritos, através dos quais impulsos elétricos são recebidos (receptor), e um axônio, pelo qual impulsos elétricos são enviados (transmissor). O neurônio recebe os sinais de entrada através dos dendritos, processa-os no corpo celular, e transmite o resultado do processamento através do axônio e ramificações. As conexões entre neurônios são efetuadas pelas sinapses, as quais são pontos de contato entre dendritos e axônios controlados por impulsos elétricos e reações químicas.

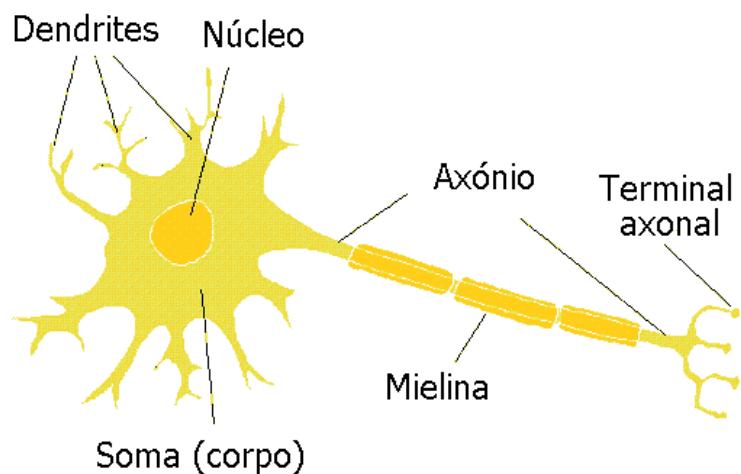


Figura 3.1: Estrutura do neurônio biológico.

O neurônio artificial proposto por McCulloch e Pitts<sup>11</sup> tinha grandes limitações. Entre elas destaca-se a forma binária. O funcionamento deste modelo pode ser descrito intuitivamente da seguinte maneira: se a soma ponderada dos sinais de entrada de um neurônio ultrapassar um determinado limiar  $a$ , então a saída  $y = f(u)$  recebe valor  $u$ ; se não, recebe valor zero. As entradas  $x_j$  do neurônio também são binárias. A Figura 3.2 ilustra o modelo deste neurônio.

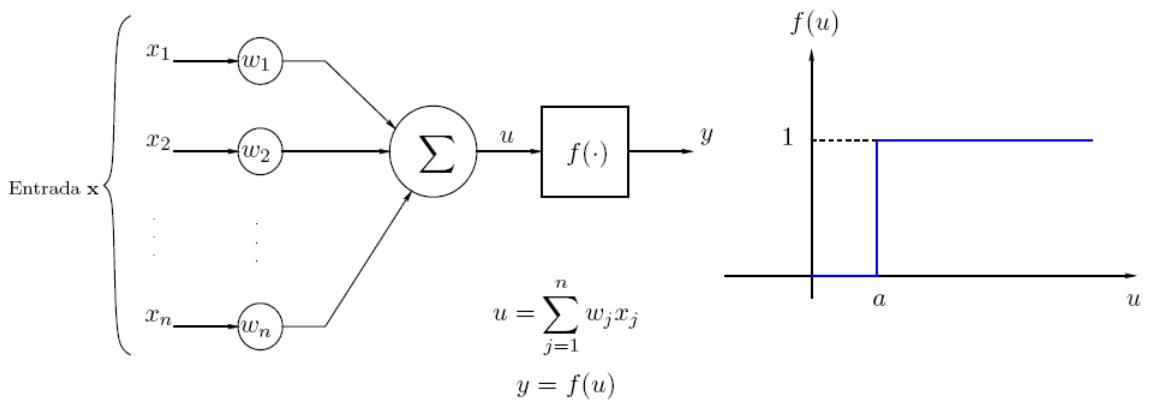


Figura 3.2: Neurônio binário proposto por McCulloch e Pitts<sup>11</sup>.

O modelo atual do neurônio artificial considera um vetor de entrada  $x$   $n$ -dimensional não necessariamente binário, um operador de agregação genérico, uma saída  $y$ , pesos sinápticos  $w_i$  e uma função de ativação  $f(\cdot)$ , podendo esta última adotar diversas formas.

Cada componente  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) do vetor de entrada está ligado ao neurônio através de conexões que fazem o papel dos dendritos, cujas intensidades são representadas pelos pesos sinápticos  $w_i$ . Usualmente o neurônio efetua uma soma ponderada entre os componentes do vetor de entrada e o vetor peso, obtendo assim a agregação das entradas e a correspondente saída  $y$ .

Uma entrada fixa denominada de polarização pode ser introduzida de modo que a ativação e a correspondente saída do neurônio seja representada por:

$$y = f(\sum_{i=1}^n w_i x_i + x_0 w_0) \quad (3.1)$$

onde  $f(\cdot)$  é a função de ativação,  $w_0$  é o peso sináptico correspondente à entrada de polarização  $x_0$ . Tipicamente faze-se  $x_0 = +1$  ou  $x_0 = -1$ .

### 3.4 Funções de ativação

A função de ativação  $f(\cdot)$  determina a saída do neurônio em termos do valor  $u$  da agregação das entradas. Segundo (Haykin, 1994)<sup>24</sup>, podem ser definidos quatro tipos principais de funções de ativação:

1. **Função Sinal**: utilizada no modelo original de Rosenblatt (Rosenblatt 1958)<sup>13</sup> e ilustrada na Figura 3.3.(a), é definida da seguinte maneira:

$$f(u) = \begin{cases} 1, & u > 0 \\ 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

2. **Função rampa**: define-se como:

$$f(u) = \begin{cases} 0, & u \leq \alpha \\ \frac{u-\alpha}{\beta-\alpha}, & \alpha < u \leq \beta \\ 1, & u > \beta \end{cases} \quad (3.3)$$

e é ilustrada na Figura 3.3.(b) para  $\alpha = -0.5$  e  $\beta = 0.5$ .

3. **Função sigmoidal**: esta função é também denominada função logística:

$$f(u) = \frac{1}{1+e^{-\xi u}} \quad (3.4)$$

onde,  $\xi$  é o parâmetro que determina o ponto de inflexão da função sigmoidal. A Figura 3.3.(c) ilustra um caso particular para  $\xi = 2$ .

4. **Função tangente hiperbólica**: é utilizada quando se quer de valores tanto positivos como negativos da saída do neurônio:

$$f(u) = \tanh(\xi u) = \frac{e^{\xi u} - e^{-\xi u}}{e^{\xi u} + e^{-\xi u}} \quad (3.5)$$

A Figura 3.3.(d) ilustra a função tangente hiperbólica para  $\xi = 1$ , onde  $\xi$  é o parâmetro que determina o ponto de inflexão da função.

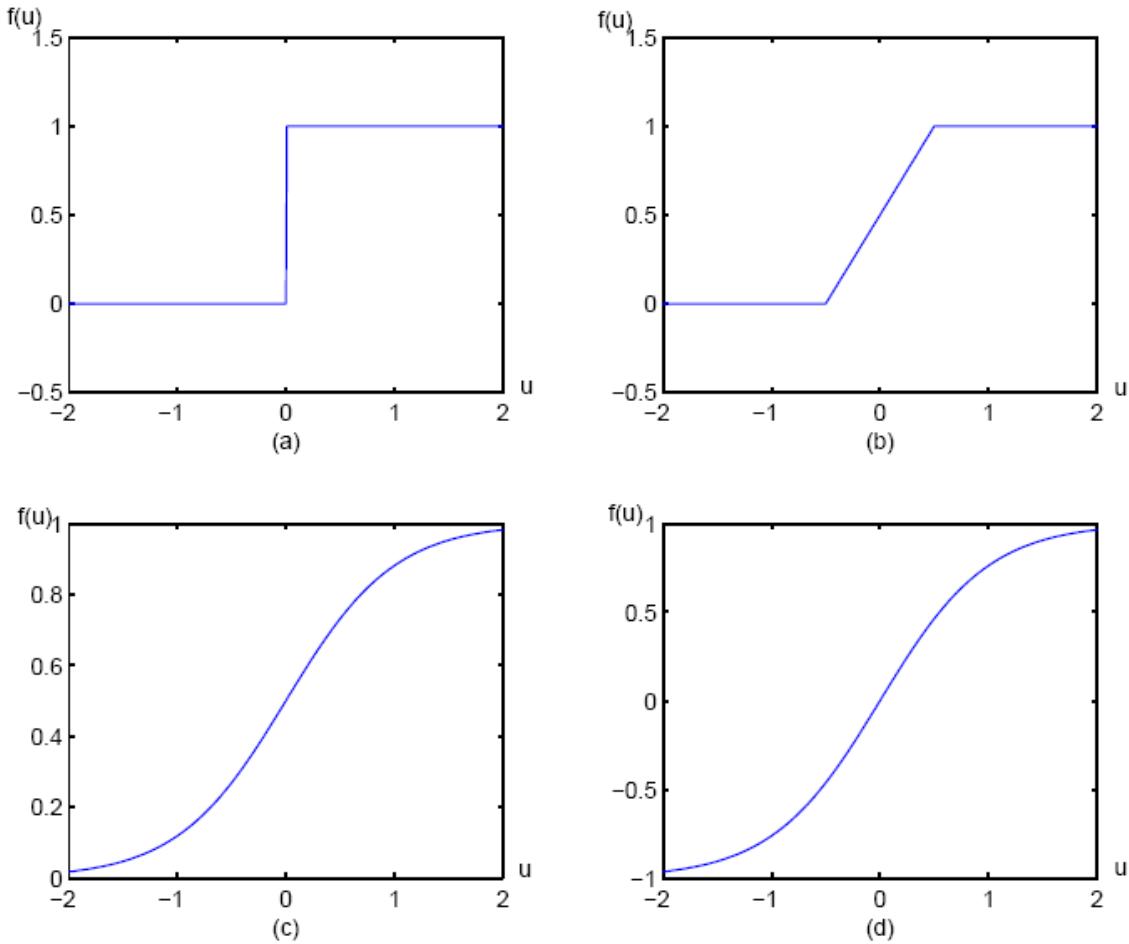


Figura 3.3: Funções de ativação. (a): função sinal, (b): função rampa, (c): função sigmoidal, (d): função tangente hiperbólica.

### 3.5 Classificação de redes neurais

Do ponto de vista funcional, uma rede neural é homogênea se todos os modelos dos neurônios que a compõe são idênticos, caso contrário, são heterogêneas. As redes neurais artificiais são normalmente homogêneas, diferentemente das redes neurais biológicas que são bastante heterogêneas.

Por outro lado, do ponto de vista estrutural, as redes neurais artificiais podem ser classificadas dentro de dois grandes grupos: redes neurais estáticas ou não recorrentes, e redes neurais dinâmicas ou recorrentes.

### 3.5.1 Redes neurais estáticas

As redes neurais estáticas são aquelas cujas saídas dependem somente do valor atual das entradas e não de valores passados. A estrutura estática mais utilizada na literatura é, sem dúvida, a Rede Multicamadas com função de ativação sigmoidal (MLP), isto devido a sua capacidade de aproximação universal e processamento paralelo. Outro modelo estático importante é denominado Rede Neural com Funções de Ativação de Base Radial (RBF). Estas duas arquiteturas serão detalhadas a seguir.

### 3.5.2 Redes multicamadas (MLP)

Esta arquitetura consta de uma camada de entrada, uma ou várias camadas intermediárias e uma camada de saída. Os neurônios da camada de entrada, são os responsáveis pela transmissão do sinal de entrada para a camada intermediária e, geralmente, possuem uma função de ativação linear. As camadas intermediárias transmitem informações entre a camada de entrada e a camada de saída, sendo que as funções de ativação dos neurônios pertencentes a esta camada são tipicamente funções de ativação não decrescentes e diferenciáveis, em geral sigmóides. As saídas dos neurônios intermediários são processadas pelos neurônios da camada de saída, fornecendo sinais de saída correspondentes.

A Figura 3.4 mostra a arquitetura de uma rede MLP com uma camada intermediária e entradas de polarização, onde  $\mathbf{x} = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_n]$ ;  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_p]$ ;  $w_{ji}$  e  $v_{kj}$  são os pesos da camada intermediária e de saída, respectivamente, para  $i = 0, \dots, n$ ;  $j = 0, \dots, M$ ;  $k = 1, \dots, p$ ; sendo  $M$  o número de neurônios da camada intermediária.

De forma análoga aos neurônios biológicos, as conexões entre os neurônios das distintas camadas da rede, são denominadas de sinapses. Cada sinapse está

associada a um peso que representa a intensidade da conexão. O fluxo de informação está sempre direcionado em um sentido entrada-saída (feedforward), ou seja, não existe realimentação.

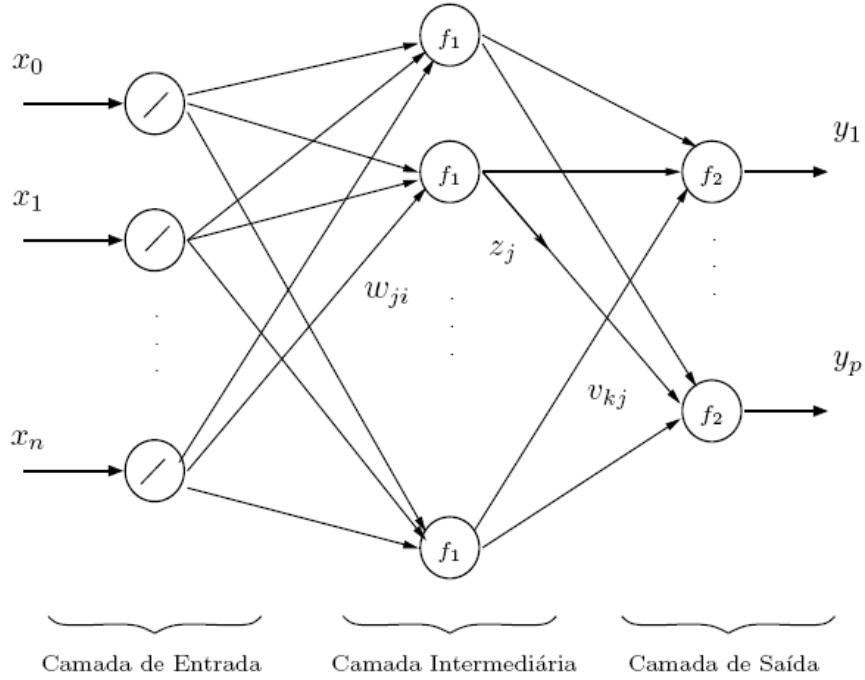


Figura 3.4: Rede MLP com uma camada intermediária.

Considerando entrada de polarização na rede MLP e funções de ativação lineares na camada de entrada, define-se a saída  $z_j$  do  $j$ -ésimo neurônio da camada intermediária como:

$$z_j = f_1 \left( \sum_{i=0}^n w_{ij} x_i \right) \quad (3.6)$$

onde  $x_0 = +1$  e  $f_1$  é a função de ativação na camada intermediária. A  $k$ -ésima saída da rede  $y_k$  é calculada como:

$$y_k = f_2 \left( \sum_{j=0}^M v_{kj} z_j \right) \quad (3.7)$$

sendo  $z_0 = +1$  e  $f_2$  a função de ativação dos neurônios da camada de saída da rede.

Assim, existem três elementos a considerar para definir uma rede MLP:

1. O número de camadas intermediárias e de neurônios em cada camada;
2. As funções de ativação;
3. Os tipos de conexões determinadas pelas sinapses.

### 3.5.3 Redes neurais com funções de ativação de base radial (RBF)

As redes neurais com funções de ativação de base radial (RBF) são modelos com uma camada intermediária, cujos neurônios na camada de saída formam uma combinação linear das funções de base computadas pelos neurônios da camada intermediária. As funções de ativação dos neurônios da camada intermediária são as funções de base, sendo a mais difundida e utilizada a função gaussiana.

Deste modo, utilizando funções de base gaussianas, cada neurônio da camada intermediária produz uma saída idêntica para entradas que se encontram a uma mesma distância do centro da função base correspondente ao neurônio. É por este motivo, que estas funções são denominadas de base radial. A Figura 3.5 mostra uma rede RBF. Assim, a saída  $z_j$  do neurônio  $j$  da camada intermediária com funções de base Gaussianas, é definida como:

$$z_j = \exp \left( -\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - w_{ji})^2}{2\sigma_j^2} \right) \quad (3.8)$$

para  $j = 1, \dots, M$ , sendo  $M$  o número de neurônios da camada intermediária,  $n$  o número de entradas da rede,  $w_{ji}$  os pesos da camada de entrada que, ao mesmo tempo, fazem o papel de centros das funções de ativação gaussianas na camada intermediária, e  $\sigma_j$  são os parâmetros de dispersão.

Finalmente, a saída  $y_k$  desta rede é dada por:

$$y_k = \sum_{j=1}^M v_{kj} v_j \quad (3.9)$$

onde  $v_{kj}$  são os pesos da camada de saída, com  $k = 1, \dots, p$ , sendo  $p$  o número de saídas da rede. Assim, a rede RBF executa um mapeamento não linear  $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$  através de uma combinação linear de funções de base não lineares.

As redes MLP utilizam a função base sigmoidal (equação (3.4)) como funções de ativação. A principal diferença entre uma rede MLP com funções de ativação sigmoidais e uma rede RBF com funções de ativação Gaussianas é a natureza das próprias funções de ativação.

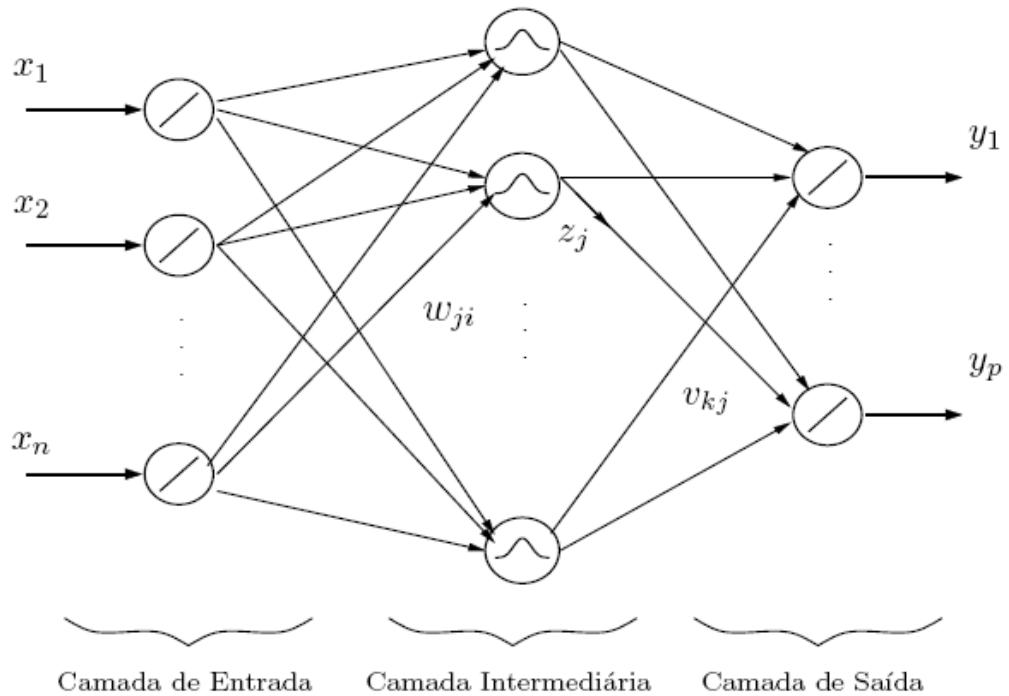


Figura 3.5: Rede com função de ativação de base radial.

Enquanto os neurônios intermediários de uma rede MLP com funções de ativação sigmoidais cobrem uma ampla região do espaço de entrada, os neurônios intermediários da rede RBF cobrem pequenas regiões específicas. Desta forma, as redes MLP são mais eficientes que as redes RBF para certas aplicações, como é o caso no problema de aproximação de funções. Já para a resolução de problemas de classificação de padrões, as redes RBF resultam ser mais eficientes que as redes MLP (Hush & Horne 1993)<sup>25</sup>.

### 3.5.4 Redes neurais recorrentes

As redes neurais recorrentes são estruturas de processamento capazes de representar uma grande variedade de comportamentos dinâmicos. A presença de realimentação de informação permite a criação de representações internas e dispositivos de memória capazes de processar e armazenar informações temporais e sinais seqüenciais (Lima, 2000)<sup>26</sup>.

## 3.6 Arquiteturas básicas

A primeira tentativa de incorporar recorrência em redes neurais foi proposta por Hopfield (Hopfield 1982)<sup>20</sup>. As redes de Hopfield utilizam como unidades processadoras o modelo do neurônio baseado na proposta de McCulloch e Pitts, ou seja, neurônios com dois únicos estados “on” (1) e “off” (-1 ou 0).

Estes tipos de estruturas de redes neurais são mais apropriados para aplicações nas quais uma representação binária dos padrões é possível, como é o caso do tratamento de imagens em branco e preto. A Figura 3.6 ilustra a estrutura desta rede.

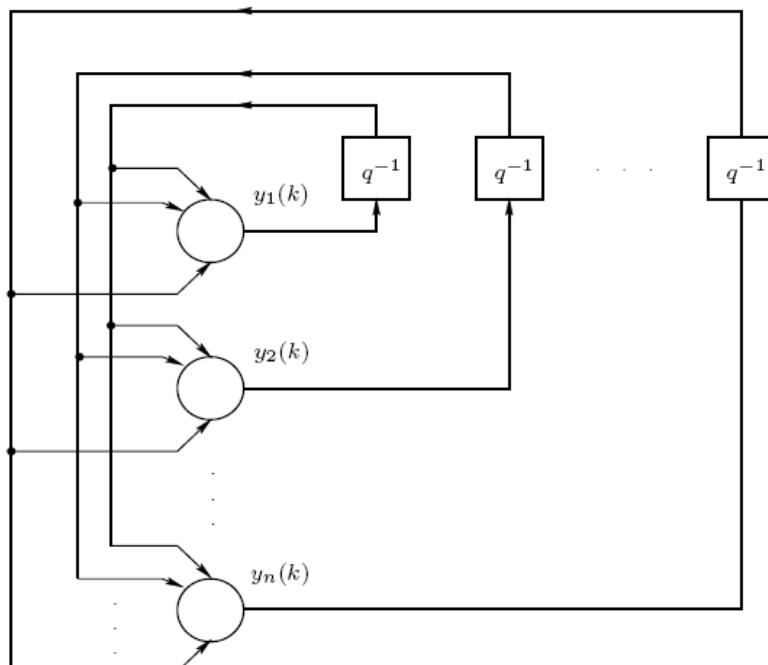


Figura 3.6: Rede de Hopfield, totalmente recorrente.

A rede de Hopfield pode ser vista como uma memória associativa não linear, cuja principal função é recuperar um padrão como resposta da apresentação de uma versão incompleta ou ruidosa do próprio padrão. Cada padrão memorizado está associado a um atrator, pois a saída será igual ao estado correspondente ao atrator mais próximo ao padrão de entrada fornecido (Haykin, 1994)<sup>24</sup>. Devido a este fato, estes tipos de estruturas são menos aplicados para a resolução de problemas em tempo contínuo, pois a informação contínua da representação do problema deve ser transformada em binário para efetuar o armazenamento.

As redes neurais recorrentes podem ser classificadas como parcialmente recorrentes ou totalmente recorrentes, dependendo do tipo de recorrência. Redes totalmente recorrentes possuem todas as conexões recorrentes e ajustáveis. Quando apenas uma parte das possíveis conexões recorrentes é admitida ou, então, quando as conexões recorrentes não são ajustáveis, resultam em redes parcialmente recorrentes. Um exemplo de rede totalmente recorrente é a rede de Hopfield (Figura 3.6) e um exemplo de rede parcialmente recorrente é a rede de Elman (Elman 1990)<sup>27</sup>, ilustrada na Figura 3.7.

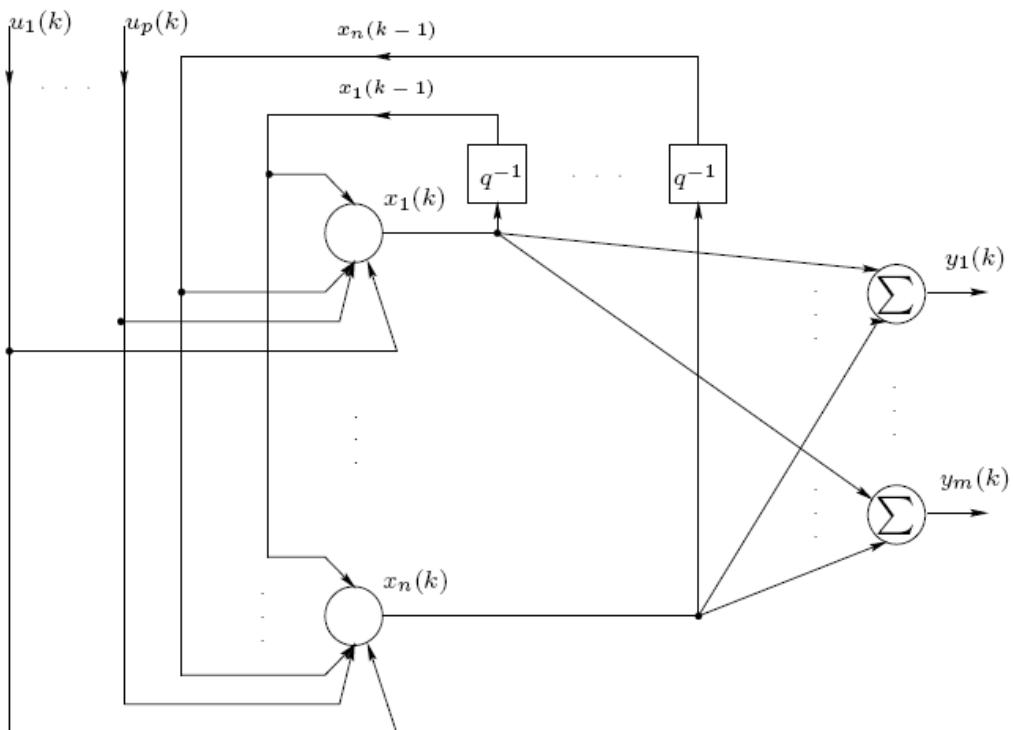


Figura 3.7: Rede de Elman, parcialmente recorrente.

Dentro da classificação das redes parcialmente recorrentes, têm-se também as redes com recorrência interna local (Figura 3.8) e as redes com recorrência interna global, ilustrada na Figura 3.9.

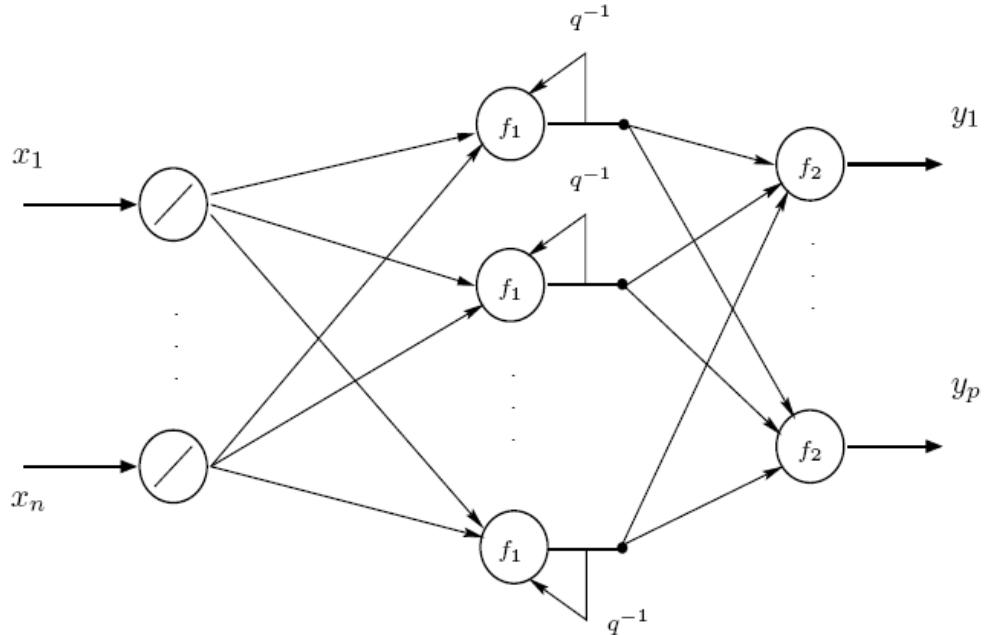


Figura 3.8: Rede neural com recorrência interna local.

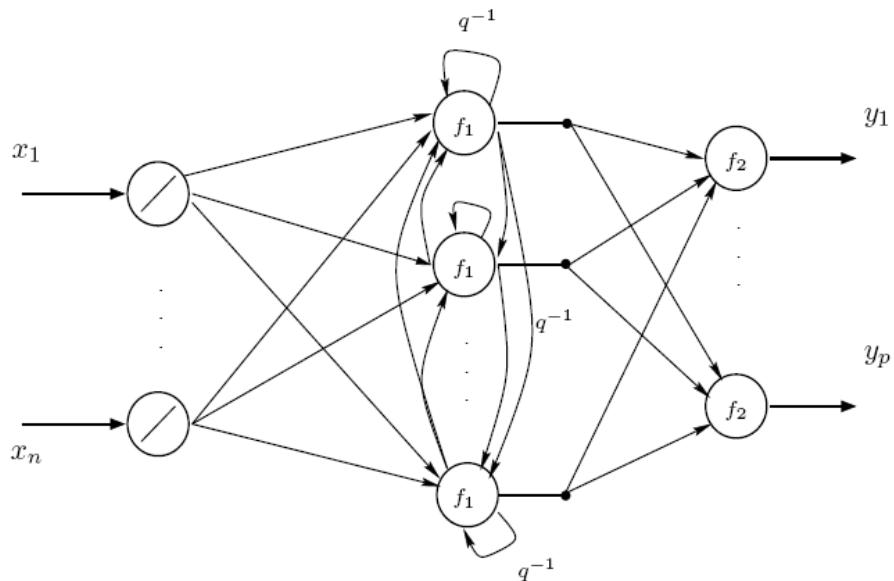


Figura 3.9: Rede neural com recorrência interna global.

Uma forma simples de incorporar recorrência em uma rede estática é gerar um laço de realimentação da saída, utilizando operadores atraso  $q^{-1}$  (Figura 3.10). Esta arquitetura particular foi proposta por M. Jordan<sup>28</sup> e por K. S. Narendra em (Narendra & Parthasarathy 1990)<sup>29</sup>, em aplicações de modelagem e controle de sistemas dinâmicos.

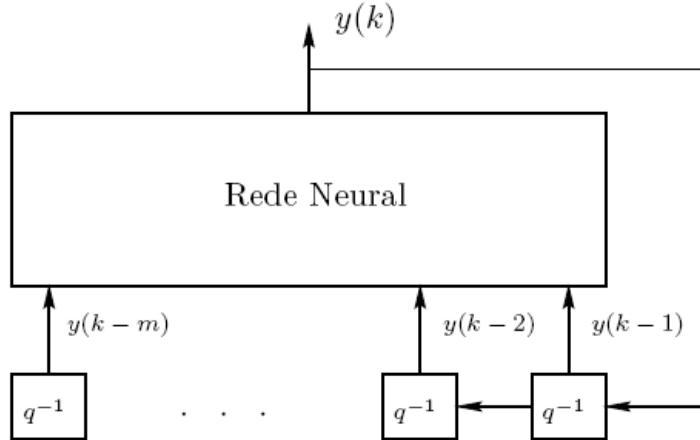


Figura 3.10: Rede neural com recorrência na saída.

Em (Nerrand et al., 1993)<sup>30</sup>, é demonstrado que toda rede recorrente pode ser representada em uma forma canônica utilizando uma rede equivalente estática com as seguintes características:

- As saídas são as saídas dos neurônios contendo as saídas desejadas, e os valores das variáveis de estado;
- As entradas são as entradas da rede e valores anteriores das variáveis de estado.

A forma canônica de uma rede neural é, deste modo, expressa da seguinte maneira:

$$\begin{cases} z(k) = \varphi_1[y(k-1), u(k-1)]; \\ y(k) = \varphi_2[z(k-1), u(k-1)] \end{cases} \quad (3.10)$$

onde  $\mathbf{z}(k)$  é o vetor de estados de tamanho  $M$ , sendo  $M$  a ordem da rede,  $\mathbf{y}(k)$  o vetor de saída da rede, e  $\mathbf{u}(k)$  o vetor que contém as entradas que não pertencem à

realimentação. Este conceito pode ser utilizado com qualquer tipo de neurônio em tempo discreto.

Utilizando a forma canônica das redes neurais, pode-se estabelecer uma comparação entre redes neurais e filtros adaptativos. As redes estáticas são utilizadas para representar filtros transversais e as redes recorrentes são utilizadas para representar filtros recursivos. Em (Nerrand et al., 1993)<sup>30</sup> é também demonstrado que diversos métodos aplicados na teoria clássica de filtragem adaptativa, assim como alguns dos métodos de treinamento de redes neurais propostos na literatura, são casos especiais de uma classificação geral de métodos de treinamento para redes neurais estáticas.

### 3.7 Métodos de treinamento

Define-se aprendizado ou treinamento de redes neurais como o processo pelo qual os parâmetros livres ou adaptáveis da rede são ajustados via um processo contínuo de simulação do ambiente no qual a rede é inserida (Haykin, 1994)<sup>24</sup>. Este processo pode ser classificado dentro de três grandes grupos:

1. Treinamento supervisionado;
2. Treinamento não supervisionado;
3. Treinamento por reforço.

#### 3.7.1 Treinamento supervisionado

O treinamento supervisionado caracteriza-se pela disponibilidade de conhecimento ou informação sobre um sistema na forma de padrões entrada-saída (Haykin, 1994)<sup>30</sup>. Estes padrões formam o conjunto de treinamento; para uma dada entrada a saída da rede neural é comparada com a saída correspondente do conjunto de treinamento. Os parâmetros da rede são ajustados tendo como base o sinal de erro e os padrões de treinamento. O sinal de erro é definido com a diferença para uma mesma entrada entre a saída da rede e a saída desejada do conjunto de treinamento. Estes ajustes são feitos de forma iterativa que prossegue até que o erro

seja pequeno o suficiente. O mecanismo de treinamento supervisionado é ilustrado na Figura 3.11.

Aplicando um algoritmo de treinamento supervisionado, uma rede neural adquire conhecimento ou informação relevante sobre um problema a ser resolvido de forma análoga àquela utilizada pelo ser humano e outros animais, ou seja, a partir de exemplos.

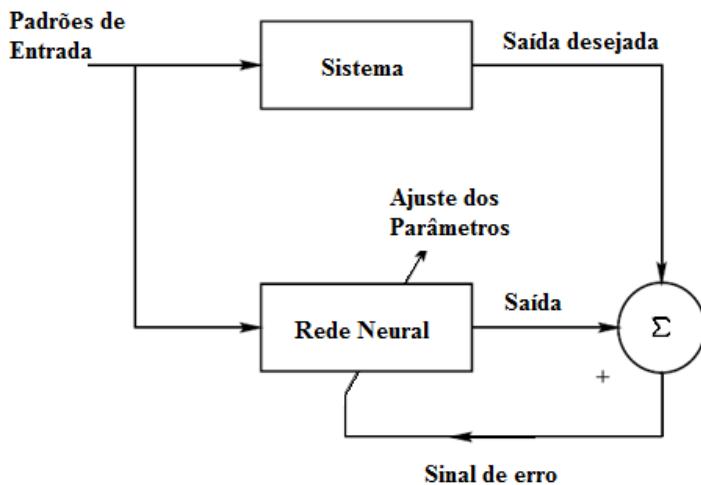


Figura 3.11: Treinamento supervisionado.

Uma desvantagem deste tipo de treinamento consiste no fato de que a rede neural não pode aprender novas estratégias para situações particulares que não foram consideradas na escolha do conjunto de treinamento.

Em (Nerrand et al., 1994)<sup>30</sup> treinamento não adaptativo é definido como sendo o processo pelo qual a rede neural é treinada, inicialmente, utilizando um conjunto finito de padrões entrada-saída, e logo utilizada mantendo os parâmetros fixos. O treinamento adaptativo refere-se ao processo de treinamento pelo qual a rede é treinada de forma permanente enquanto está sendo utilizada (conjunto infinito de padrões de treinamento).

Denomina-se como treinamento off-line o treinamento supervisionado não adaptativo e treinamento supervisionado adaptativo o treinamento on-line.

Um algoritmo de treinamento supervisionado altamente popular é baseado o método do gradiente, comumente denominado algoritmo de retropropagação, proposto pela primeira vez por P. J. Werbos<sup>22, 23</sup> e redescoberto e popularizado por Rumelhart e McClelland<sup>21</sup>. O nome de retropropagação deve-se ao fato do sinal de

erro ser retropropagado camada por camada através da rede. O método supervisionado de retropropagação é um dos mais utilizados na literatura. Este algoritmo é detalhado a seguir.

O algoritmo de retropropagação consiste basicamente de duas etapas: durante a primeira etapa (forward), as entradas são apresentadas e propagadas camada por camada mantendo os pesos fixos; a saída é comparada com a saída desejada, calculando assim, o sinal de erro. Na segunda etapa, o erro é retropropagado (backward), sendo os pesos atualizados via o Método do Gradiente Descendente (Haykin, 1994)<sup>24</sup>. Sejam:

- $z_j^l$  a saída do  $j$ -ésimo neurônio na camada  $l$ ;
- $w_{ji}^l$  o peso entre o neurônio  $i$  da camada  $l-1$  e o neurônio  $j$  da camada  $l$ ;
- $x_p$  o  $p$ -ésimo padrão de entrada;
- $z_i^0$  o  $i$ -ésimo componente do vetor de entrada;
- $y_j$  a  $j$ -ésima saída desejada;
- $M_l$  o número de neurônios da  $l$ -ésima camada;
- $N$  o número de padrões de treinamento;
- $L$  o número de camadas da rede neural;
- $f_l(\cdot)$  a função de ativação dos neurônios na camada  $l$ .

sendo  $z_j^0 = x_j$ ,  $z_0^l = 1$  (polarização) e  $w_{j0}^l$  os pesos correspondentes às polarizações.

A saída do  $j$ -ésimo neurônio da camada  $l$  é dada por:

$$z_j^l = f_l \left[ \sum_{i=0}^{M_{l-1}} w_{ji}^l z_i^{l-1} \right] \quad (3.11)$$

O objetivo é minimizar uma função objetivo definida como o Erro Quadrático Médio, isto é:

$$J(w) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N J_p(w) \quad (3.12)$$

onde  $J_p(w)$  é o erro quadrático total para o  $p$ -ésimo padrão, definido por:

$$J_p(w) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^M \epsilon_q^2 \quad (3.13)$$

com

$$\epsilon_q = (z_q^L - y_p) \quad (3.14)$$

Para minimizar a função objetivo (3.12) via o método do gradiente descendente, é necessário calcular a derivada parcial de  $J_p$  em relação a cada peso da rede e para cada padrão. Assim, as regras para efetuar o ajuste dos pesos podem ser escritos da seguinte maneira:

$$w_{ji}^l(k+1) = w_{ji}^l(k) - \alpha \frac{\partial J_p(w)}{\partial w_{ji}^l} \Big|_{w(k)} \quad (3.15)$$

fazendo  $J = J_p$  para  $N = 1$ , tem-se:

$$w_{ji}^l(k+1) = w_{ji}^l(k) - \alpha \sum_{p=1}^{M_L} \frac{\partial J_p(w)}{\partial w_{ji}^l} \Big|_{w(k)} \quad (3.16)$$

sendo  $\alpha$  a taxa de aprendizado. Utilizando a regra da cadeia têm-se:

$$\frac{\partial J_p(w)}{\partial w_{ji}^l} = \frac{\partial J_p(w)}{\partial z_j^l} \frac{\partial z_j^l}{\partial w_{ji}^l} \quad (3.17)$$

onde,

$$\frac{\partial z_j^l}{\partial w_{ji}^l} = \frac{\partial}{\partial w_{ji}^l} [f_l(\sum_{m=0}^{M_{l-1}} w_{jm}^l z_m^{l-1})] \quad (3.18)$$

Seguindo a regra da cadeia,

$$\frac{\partial z_j^l}{\partial w_{ji}^l} = f'_l \left( \sum_{m=0}^{M_{l-1}} w_{ji}^l z_m^{l-1} \right) \frac{\partial}{\partial w_{ji}^l} \left[ \sum_{m=0}^{M_{l-1}} w_{jm}^l z_m^{l-1} \right] \quad (3.19)$$

para logo obter,

$$\frac{\partial z_j^l}{\partial w_{ji}^l} = f'_l \left( \sum_{m=0}^{M_{l-1}} w_{jm}^l z_m^{l-1} \right) z_i^{l-1} \quad (3.20)$$

Assim,

$$\frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial w_{ji}^l} = \frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial z_j^l} f'_l \left( \sum_{m=0}^{M_{l-1}} w_{jm}^l z_m^{l-1} \right) z_i^{l-1} \quad (3.21)$$

Onde o termo  $\partial J_p(\mathbf{w}) / \partial z_j^l$  representa a sensibilidade de  $J_p(\mathbf{w})$  com relação à saída  $z_{lj}$ . Seja  $\delta_j^l$  o gradiente local definido por:

$$\delta_j^l = \frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial z_j^l} f'_l \left( \sum_{m=0}^{M_{l-1}} w_{jm}^l z_m^{l-1} \right) \quad (3.22)$$

A equação (3.21) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial w_{ji}^l} = \delta_j^l z_i^{l-1} \quad (3.23)$$

Assumindo uma rede MLP com uma camada intermediária ( $L = 3$ ) (Figura 3.12), a modo de exemplo, o erro  $\epsilon_q$  é calculado como:

$$\epsilon_q(k) = z_q^3(k) - y_q(k) \quad (3.24)$$

para  $q = 1, \dots, M_3$ . Considerando primeiro, o caso em que o neurônio pertence a camada de saída (ver Figura 3.11) e utilizando a equação (3.12), tem-se que o gradiente local é dado por:

$$\delta_q^3(k) = \epsilon_q(k) f'_3 \left( \sum_{m=0}^{M_2} w_{qm}^3 z_m^2 \right) \quad (3.25)$$

Deste modo, a atualização dos pesos da camada de saída pode ser escrito como:

$$\Delta w_{qi}^3(k) = \frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial w_{qi}^3(k)} \Big|_{\mathbf{w}(k)} = \epsilon_q(k) f'_3 \left( \sum_{m=0}^{M_2} w_{qm}^3 z_m^2 \right) z_i^2 \quad (3.26)$$

para  $i = 0, \dots, M_2$  e  $q = 1, \dots, M_3$ . Considerando agora os neurônios da camada intermediária,  $\delta_j^2$  é calculado como:

$$\delta_j^2(k) = \frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial z_j^3(k)} \frac{\partial z_j^3}{\partial z_j^2} f'_2 \left( \sum_{m=0}^{M_1} w_{jm}^2 z_m^1 \right) \quad (3.27)$$

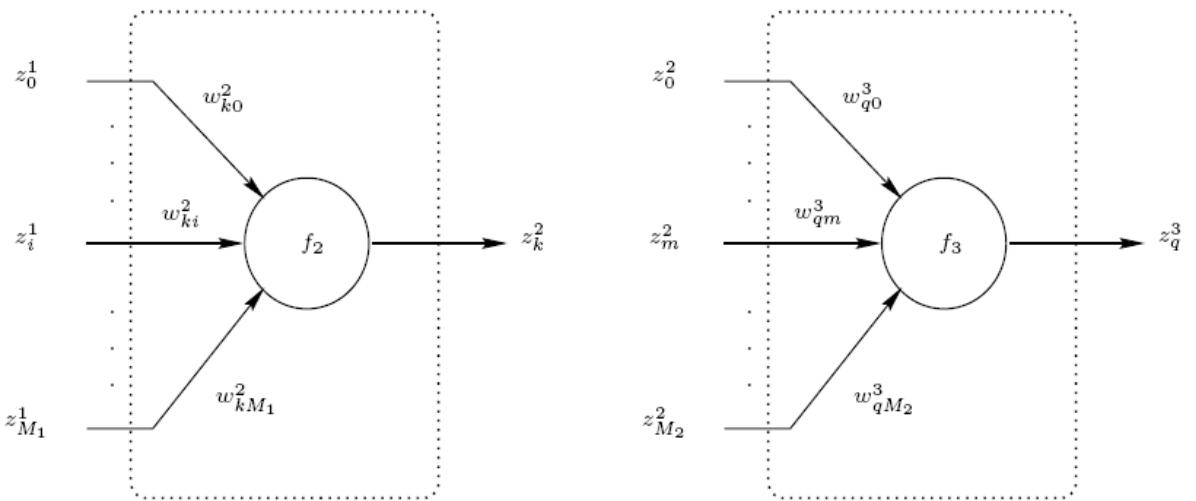


Figura 3.12: Neurônios de uma rede MLP para  $L=3$ : do lado esquerdo, neurônio de uma camada intermédia; do lado direito, neurônio da camada de saída para  $q = 1, \dots, M_3$ .

Calculando as derivadas,

$$\frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial z_q^3(k)} = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{M_3} \frac{\partial \epsilon_q^2(k)}{\partial z_q^3} = \sum_{q=1}^{M_3} \epsilon_q(k) \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial z_q^3}{\partial z_j^2} = \frac{\partial}{\partial z_j^2} \left[ f_3 \left( \sum_{j=0}^{M_2} w_{qj}^3 z_j^2 \right) \right] = f'_3 \left( \sum_{j=0}^{M_2} w_{qj}^3 z_j^2 \right) w_{qj}^3 \quad (3.29)$$

Substituindo as equações (3.28) e (3.29) na equação (3.27), tem-se:

$$\delta_j^2(k) = \sum_{q=1}^{M_3} \epsilon_q(k) f'_3(\sum_{j=0}^{M_2} w_{qj}^3 z_j^2) w_{qj}^3 f'_2(\sum_{m=0}^{M_1} w_{jm}^2 z_m^1) \quad (3.30)$$

Finalmente, substituindo a equação (3.25) na equação (3.30), obtém-se:

$$\delta_j^2(k) = [\sum_{q=1}^{M_3} \delta_q^3(k) w_{qj}^3] f'_2(\sum_{m=0}^{M_1} w_{jm}^2 z_m^1) \quad (3.31)$$

Desta forma, a atualização dos pesos da camada intermediária utilizando as equações (3.31) e (3.21) é da seguinte forma:

$$\Delta w_{ji}^2(k) = \left. \frac{\partial J_p(\mathbf{w})}{\partial w_{ji}^2(k)} \right|_{\mathbf{w}(k)} = [\sum_{q=1}^{M_3} \delta_q^3(k) w_{qj}^3] f'_2(\sum_{m=0}^{M_1} w_{jm}^2 z_m^1) z_i^1 \quad (3.32)$$

para  $i = 0, \dots, M_1$  e  $j = 0, \dots, M_2$ , sendo, neste caso,  $z_i^1 = z_i^0 = x_i$ .

Diversas modificações deste algoritmo de treinamento podem ser encontradas na literatura. No caso das redes recorrentes, o algoritmo de retropropagação pode ser utilizado, feitas certas considerações. Em (Von Zuben, 1993) detalha-se o método do gradiente para redes neurais recorrentes.

### 3.7.2 Treinamento não supervisionado

No treinamento não supervisionado ou auto-organizado, não existe um elemento externo que inspecione o processo, ou seja, não existe um conjunto específico de padrões a serem aprendidos pela rede neural, mas sim, uma medida da qualidade de representação que a rede requer para o aprendizado (Figura 3.13). Os parâmetros da rede neural são ajustados em função desta medida. Uma vez que a rede consegue extrair algumas características dos dados de entrada, esta será capaz de gerar representações internas para classificar as características. Métodos de treinamento não supervisionados e aplicações são propostos em (Kohonen et al., 2000)<sup>31</sup> e (Kohonen, 1982)<sup>31</sup>.

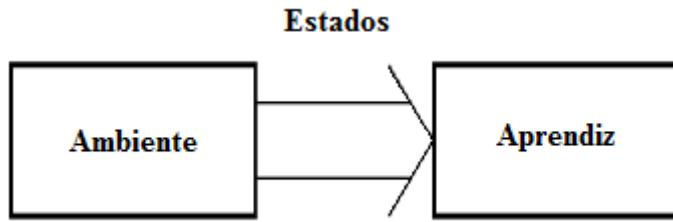


Figura 3.13: Treinamento não supervisionado.

Os métodos não supervisionados são também utilizados numa primeira etapa de treinamento das redes RBF. Como outro exemplo de métodos de treinamento não supervisionado tem-se os distintos métodos de clusterização, que neste caso, são utilizados para definir os centros das funções de ativação sigmoidais dos neurônios da camada intermediária de uma rede RBF. Diversos algoritmos de clusterização encontram-se detalhados em (Lin; Lee, 1996)<sup>33</sup>.

### 3.7.3 Treinamento por reforço

O treinamento por reforço é um problema discreto e dinâmico no qual um sistema de aprendizagem ou agente deve aprender um comportamento desejado através de tentativas, admitindo-se acertos e erros durante a interação com um determinado ambiente.

O treinamento por reforço é um método de treinamento do tipo “avaliador” e não do tipo “instrutor”, como no caso dos métodos supervisionados. No treinamento por reforço, a informação disponível para o treinamento geralmente é pobre e grossa, o sinal de validação é um escalar e no caso extremo, existe uma única informação para indicar se a saída da rede está certa ou errada.

Segundo (Haykin, 1994)<sup>24</sup>, o aprendizado por reforço pode ser não associativo ou associativo. No treinamento por reforço não associativo, o sistema de aprendizagem escolhe uma determinada ação ao invés de associar diferentes ações com diferentes estímulos, ou seja, o sinal de reforço é a única entrada que o sistema recebe do ambiente.

No treinamento por reforço associativo, um mapeamento ou associação ações-estímulos é produzido, de forma a maximizar um valor que caracterize o desempenho do sistema de aprendizagem ou o sinal de reforço. Dado que o

aprendiz não sabe a priori a ação que deve ser tomada, este deve descobrir quais são as ações que produzem uma maior recompensa.

No modelo básico de aprendizado ou treinamento por reforço associativo, o sistema de aprendizagem comunica-se com o ambiente via ações (saídas do sistema) e percepções (entradas ao sistema e o sinal de reforço), como mostra a Figura 3.14.

Em cada iteração, o sistema de aprendizagem recebe como entrada algum sinal indicando o estado atual do ambiente. A seguir, o sistema escolhe a ação a ser tomada, gerando assim a saída a ser avaliada. Esta ação gera uma mudança no estado do ambiente e a transição de estado é comunicada ao aprendiz via um sinal de reforço  $r$ . Através de um processo iterativo de recompensa e punição, o sistema escolhe a ação que acrescente o valor do sinal de reforço com o passar do tempo.

Existem várias diferenças entre o treinamento supervisionado e o treinamento por reforço, sendo que a mais importante é a ausência de padrões de treinamento.

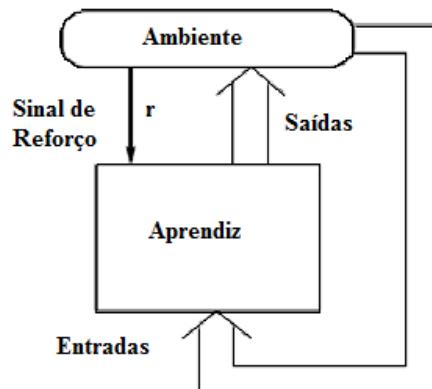


Figura 3.14: Modelo básico de treinamento por reforço.

Assim que o aprendiz escolhe a ação a ser tomada, este é informado do sinal de reforço (recompensa ou punição) e do estado atual do ambiente e não é informado em momento algum sobre a ação ótima para os respectivos interesses; é necessário para o aprendiz reunir experiência sobre o ambiente, estados, ações ou punições para, a partir de certo momento, tomar a decisão correta.

## 3.8 Algumas considerações sobre o treinamento

### 3.8.1 Taxa de Aprendizado

O algoritmo de retropropagação fornece uma aproximação da trajetória no espaço dos pesos em direção ao mínimo da função objetivo (equação (3.12)) computada via o método do gradiente descendente.

A taxa de aprendizagem  $\alpha$  determina o passo na variação dos pesos sinápticos. Assim, quanto menor é  $\alpha$ , menor será a variação dos pesos de uma iteração para a próxima e, no caso do algoritmo de retropropagação, a trajetória no espaço dos pesos será mais suave. Por outro lado, se  $\alpha$  toma valores muito grandes, embora a velocidade de convergência aumente a variação dos pesos entre iterações será também maior podendo afetar a convergência do algoritmo.

Utilizando o treinamento por reforço, dependendo das regras adotadas para atualizar os pesos, é necessário utilizar taxas de aprendizado que regulem a variação dos pesos por iteração e as considerações mencionadas acima para o caso do algoritmo de retropropagação são válidas também para este caso.

### 3.8.2 Modos de treinamento

Quando todo o conjunto de treinamento é apresentado a uma rede neural, obtém-se o que se denomina de época. O processo de treinamento continua até que seja alcançado um número máximo de épocas ou o erro quadrático médio atinge um valor suficientemente pequeno. Para um determinado conjunto de treinamento, o algoritmo de retropropagação pode ser aplicado de dois modos diferentes:

#### 3.8.2.1 Padrão a padrão

No aprendizado por retropropagação padrão a padrão, os pesos da rede são atualizados a cada padrão entrada-saída apresentado, ou seja, penas o gradiente do correspondente padrão é calculado; este é utilizado imediatamente para atualizar os pesos (equação (3.16)), considerando assim, um único padrão por

vez para o treinamento. Deste modo, por cada época, os pesos são ajustados  $N$  vezes, sendo cada ajuste baseado unicamente no gradiente do erro de um único padrão por vez.

### 3.8.2.2 Em lote ou batelada

Neste modo de treinamento, um único ajuste dos pesos é feito por cada época. Todos os padrões de treinamento são propagados pela rede, e os correspondentes erros são calculados, sendo que o gradiente utilizado para ajustar os pesos será a soma dos gradientes para cada padrão apresentado na época.

É recomendável apresentar os padrões durante o treinamento em ordem aleatória para cada época. Isto faz que a busca no espaço dos pesos seja estocástica, garantindo que a ordem dos padrões de treinamento não represente informação significativa alguma e, assim, condicione o ajuste dos pesos.

### 3.8.3 Critérios de Parada

Não existe critério de parada para o algoritmo de retropropagação que garanta a obtenção de uma solução. Contudo, existem alguns critérios que podem ser utilizados para dar término ao processo de treinamento. Segundo (Haykin 1994), dois critérios de parada são comumente utilizados:

1. Considerando as propriedades dos mínimos locais ou globais da superfície de erro. Sendo  $\mathbf{w} = \mathbf{w}^*$  um mínimo local ou global, o vetor gradiente calculado para este mínimo será aproximadamente nulo. Assim, considera-se que a convergência tenha sido alcançada quando a norma Euclidiana do vetor gradiente seja menor que um valor especificado suficientemente pequeno;
2. Um segundo critério de parada é quando os valores do erro quadrático médio ou da função objetivo tornam-se estacionários.

Um outro critério a considerar consiste na unificação da capacidade de generalização da rede. Uma rede neural com capacidade de generalização deve ser capaz de, uma vez fornecidos diferentes padrões de treinamento e teste, o

mapeamento entre os dados entrada-saída estimado pela rede já treinada é satisfatório. Uma forma de garantir esta característica é aplicar o mecanismo de validação cruzada.

O mecanismo de validação cruzada se inicia gerando um conjunto de padrões de treinamento e um conjunto de padrões de teste, este último para avaliar a eficiência da rede neural. Durante o processo de treinamento, após cada ajuste de pesos, é necessário avaliar a rede tanto com o conjunto de treinamento como com o conjunto de teste. Quando o erro de teste começar a ter uma tendência crescente, o processo de treinamento se dá por concluído.

Durante o treinamento do modelo de rede neural proposto neste trabalho e dos modelos de redes neurais utilizados para comparação, será utilizado o segundo critério de parada e o número máximo de épocas.

### **3.8.4 Inicialização dos Pesos**

A qualidade e a eficiência do aprendizado supervisionado em redes multicamadas depende não só da estrutura da rede, funções de ativação e regras de aprendizagem mas também dos valores iniciais dos parâmetros ajustáveis. Em geral, não é possível ter um conhecimento prévio de valores ótimos para estes parâmetros, pois isto depende tanto do conjunto de treinamento como da natureza da solução. O conjunto inicial de pesos a ser utilizado influí diretamente na velocidade de aprendizagem e na qualidade da solução final. Uma escolha inicial pouco adequada pode gerar problemas de mínimos locais pobres ou de saturação prematura. Quando existe alguma informação a priori sobre os dados, esta informação pode ser utilizada para inicializar os pesos. Quando esta informação não é utilizada, recomenda-se que a inicialização dos parâmetros seja feita aleatoriamente, com distribuição uniforme e magnitude pequena.

## 4 O PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA

### 4.1 Definição dos Parâmetros de Solda

O objetivo principal do processo de solda a ponto é gerar calor rapidamente no local do ponto de contato entre as chapas e minimizar a quantidade de calor dissipada por condução tanto das chapas para os eletrodos quanto para a região na periferia da área termicamente afetada (ZTA). O princípio físico que rege o fenômeno de geração de calor é a Lei de Joule, que pode ser expressa pela equação:

$$Q = I^2 \times R \times t_s \quad (4.1)$$

onde  $Q$  é a energia em joules,  $I$  é a corrente em ampéres,  $R$  é a resistência em ohms e  $t_s$  é o tempo de solda em segundos.

A escolha da corrente de solda e do tempo de solda é relativamente flexível para qualquer processo de solda, porém este último é geralmente limitado pelo ritmo produtivo ou pelo tempo necessário para o transporte dos subcomponentes a serem unidos nas estações automatizadas.

A resistência no circuito secundário vai depender do tipo de máquina e da ferramenta empregada, do tipo e dimensão dos eletrodos, da força aplicada pelos eletrodos e do material a ser soldado. Essa resistência é composta de uma série de resistências em série, sendo elas: eletrodo superior, contato eletrodo/chapa superior, chapa superior, contato chapa/chapa, chapa inferior, contato eletrodo/chapa inferior e eletrodo inferior. De acordo com a teoria atualmente aceita, para a realização de uma solda satisfatória em condições normais, a resistência na interface chapa/chapa tem que ser a maior para facilitar a formação da lenticilha de solda. O calor gerado na interface eletrodo/chapa será parcialmente removido pelo sistema de resfriamento por líquido presente nos eletrodos ou por condução para o restante a chapa. Todos esses fatores devem ser levados em consideração e o tamanho final da lenticilha de solda resultará do balanço entre os efeitos de aquecimento e resfriamento presentes no processo.

## 4.2 Mapas de solda

Os principais parâmetros que podem ser controlados em uma máquina de solda por resistência são a corrente de solda, o tempo de solda e a força aplicada pelo eletrodo. A capacidade de realizar uma solda sob condições de operação baseada nesses parâmetros são definidos em termos de um mapa de solda. Esse mapeamento define as tolerâncias aceitáveis na escolha de uma combinação dos parâmetros de solda comumente controláveis para produzir um ponto de solda enquadrado num determinado padrão de qualidade. Desta maneira é possível determinar os parâmetros de solda que proporcionarão uma qualidade de solda aceitável definida por características como tamanho da lentilha ou propriedades estéticas da junta.

Existem dois tipos principais de mapas de solda, podendo ser bidimensionais ou tridimensionais dependendo do número de parâmetros levados em consideração.

### 4.2.1 Mapas de solda bidimensionais

Mapas de solda bidimensionais (Figura 4.1) são amplamente empregados em para determinar as condições de solda para uma particular célula de solda. Embora o conceito de mapeamento venha sendo utilizado por mais de 20 anos a padronização dos procedimentos para a construção dos mapas de solda bidimensionais só ocorreu recentemente. Ficou padronizado que os mapas deveriam ser plotados como:

- Corrente de solda em relação ao tempo de solda assumindo a força do eletrodo como constante;
- Corrente de solda em relação à força do eletrodo assumindo o tempo de solda como constante.

É importante notar que na maioria das células de solda altamente robotizadas o tempo de solda é fixado. Por isso, nessas condições é mais vantajoso definir o mapeamento que relaciona a corrente de solda e a força do eletrodo em um tempo de solda constante.

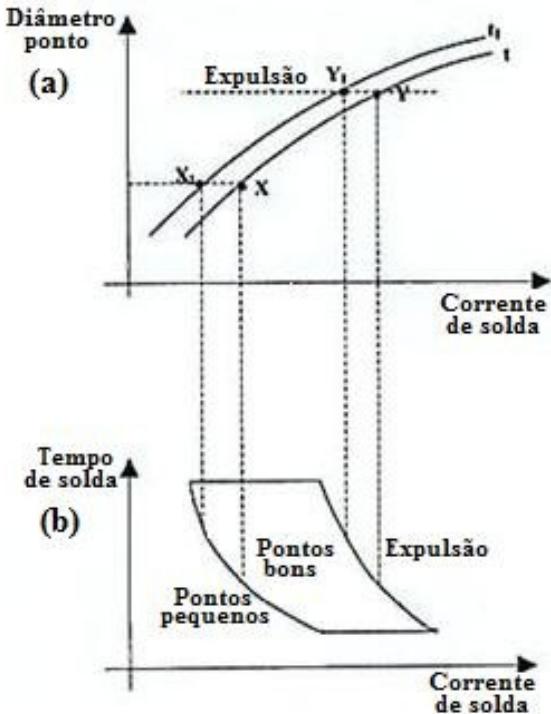


Figura 4.1: Típico crescimento de solda para tempos de solda constantes. b) Típico lóbulo de soldabilidade para força nos eletrodos constantes. (Williams, N. T.)<sup>34</sup>

Muitos trabalhos vêm sendo realizados para descobrir a relação entre corrente de solda, tempo de solda e força do eletrodo. Estes trabalhos mostram que os principais fatores que influenciam a forma e a posição do mapa de solda são: força do eletrodo, espessura das chapas, propriedades do material base e revestimento da superfície (Williams, 1972)<sup>34</sup>.

#### 4.2.2 Mapas de solda tridimensionais

Os dados disponíveis nos mapas bidimensionais, mesmo sendo úteis, são limitados em sua aplicação. Pouca informação é fornecida a respeito da soldabilidade de diferentes materiais. Uma estratégia alternativa, baseada em mapas tridimensionais, foi desenvolvida por (Schumacher, 1992)<sup>36</sup> que percebeu que muitas das informações obtidas para fazer um mapa bidimensional eram perdidas ou não indicadas nos mapas bidimensionais, particularmente se a força e o diâmetro do eletrodo fossem alterados. Schumacher propôs que um terceiro eixo representando o diâmetro da lentilha deveria ser incorporado. Além disso, como pelo menos três

soldas são feitas em cada configuração, incluindo cada medida de diâmetro da lente no mapa daria uma imediata indicação estatística da variância esperada. Conseqüentemente a configuração dos parâmetros de solda poderiam ser otimizados para diminuir os descartes.

Uma segunda alternativa seria realizar um mapeamento tridimensional onde se considera a força do eletrodo constante e plota-se no terceiro eixo a espessura das chapas. (Figura 4.2)

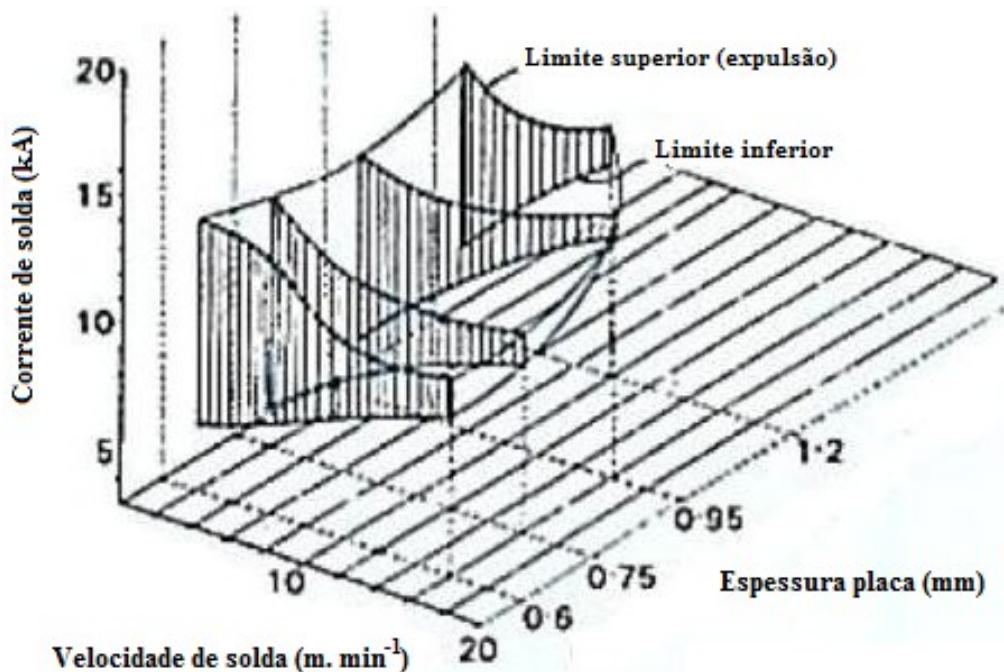


Figura 4.2: Representação tridimensional usada para estudar o efeito da espessura da chapa na soldabilidade de chapas revestidas de zinco utilizando força constante de 2.2kN (Waldell; Williams, 1989)

### 4.3 Definição de qualidade da solda

Os procedimentos padrões para otimizar os parâmetros do processo de SPR baseiam-se na avaliação de algumas características físicas da solda como, por exemplo, formação de fraturas, resistência da solda ou, mais comumente, o diâmetro do ponto de solda. (CEN Standard pr-EN/ISO, 2002)<sup>37</sup>.

Para aços baixo carbono, as variáveis de processo são escolhidas baseadas na espessura do material e não na sua composição. Na maioria dos casos, o diâmetro de solda desejado pode ser obtido pela equação:

$$d = 5\sqrt{t} \quad (4.2)$$

onde  $d$  é o diâmetro do ponto de solda (mm) e  $t$  é a espessura da chapa menos espessa (mm). Esta equação é baseada na premissa que o diâmetro ótimo deve ser igual ao diâmetro do eletrodo.

Esta filosofia funciona bem no processo de solda de aços baixo carbono revestidos ou não pois a resistência de cisalhamento é proporcional ao tamanho do ponto de solda. Nesses casos, assume-se que fazendo uma lentilha de diâmetro apropriado a resistência de cisalhamento da solda automaticamente se enquadaria nos limites requisitados.

(Williams; Jones, 1985)<sup>38</sup> e (Dupuy; Clad, Bienvenu, 1999)<sup>39</sup> mostram que a aplicação dos mesmos conceitos para aços HSLA ou aços re-fosforizados pode resultar em soldas que não respeitam as propriedades desejadas. A análise da qualidade da solda em relação à resistência desses materiais mais complexos sugere a incorporação de alguma forma de medida da resistência na avaliação da soldabilidade.

#### 4.4 Considerações sobre a modelagem do processo de solda a ponto

O desenvolvimento de um modelo satisfatório é essencial para entender as relações entre a formação da solda e as variáveis/parâmetros de solda. O êxito na obtenção deste modelo permitiria o desenvolvimento de uma estratégia de controle capaz de assegurar que 100% das soldas realizadas respeitam os critérios de qualidade e, além disso, reduzir o desgaste do eletrodo.

No desenvolvimento do modelo os seguintes fatores devem ser considerados:

- Mudanças contínuas nas áreas de contato entre eletrodo/chapa e chapa/chapa durante o ciclo de solda devido à deformação dos eletrodos

como consequência da força aplicada e do desgaste do eletrodo. Esses efeitos mudam a densidade média de corrente que atravessa as interfaces de contato, influenciando a taxa de geração de calor;

- A resistência de contato diminui como efeito do aumento da pressão de contato entre os componentes. A resistência de contato através da área de contato depende do formato do eletrodo e da distribuição de temperatura entre os eletrodos.

Portanto, a resistência de contato não é uniforme na área de contato e sua distribuição varia durante o ciclo de solda, causando geração de calor não uniforme na interface chapa/chapa.

O entendimento da mecanismo de crescimento da lentilha e o conhecimento da distribuição de temperatura na ZTA são fundamentais para o desenvolvimento de equações preditivas que possibilitem um controle efetivo do processo de solda a ponto. No entanto, a acurácia da predição de qualquer modelo é fortemente dependente dos dados de entrada.

## 4.5 Resistência dinâmica

A resistência de contato estática é composta pelas resistências das interfaces existentes antes do início da passagem de corrente elétrica e tem um papel fundamental no desencadeamento de dois fenômenos. O primeiro se refere à possibilidade ou não de passagem da corrente entre os eletrodos e o segundo à determinação do valor de corrente necessário para formação e crescimento do ponto de solda. Se a resistência de contato é muito alta, a interface age como um isolamento elétrico e o escoamento de corrente é inibido.

Para entender completamente qualquer processo de solda por resistência é necessário compreender o papel de cada uma das resistências existentes entre os eletrodos e como essas resistências influenciam na geração de calor nas várias interfaces. Por depender da temperatura, a resistividade elétrica do material é uma grandeza tempo-variante durante a formação da solda. Por ser tempo-variante a resistência de contato leva o nome de resistência dinâmica. Pela íntima relação entre a resistência dinâmica e o processo de crescimento do ponto de solda foi

estabelecido que a resistência dinâmica é um dos fatores chave para o desenvolvimento de um sistema de controle realimentado para o processo de solda por resistência.

A área de contato desenvolvida entre duas superfícies quando uma força é aplicada vem sendo submetida a inúmeras investigações pela sua influência no controle de aplicações como atrito estático, contatos elétricos e soldas por resistência. É amplamente aceito que quando duas superfícies são comprimidas uma contra a outra, o contato local ocorrerá primeiramente onde as rugosidades superficiais encontrarem-se. Essa localização das áreas de contato causa uma resistência à passagem de corrente elétrica entre as chapas. A resistência adicional criada é conhecida como resistência de contato.

No processo de SPR, a resistência de contato inicial tem uma grande influência sobre na magnitude da corrente de solda requerida. No entanto, a resistência dinâmica é mais importante na determinação dos fenômenos que acontecem durante o processo de soldagem.

A relação entre a formação da solda e o formato da curva de resistência dinâmica é bem documentada para aços não revestidos. Em geral, a resistência total entre os eletrodos decresce rapidamente até atingir um mínimo, correspondente à quebra das rugosidades superficiais (Figura 4.3). A partir deste ponto, a resistência cresce até atingir um pico que, até certo ponto, reflete a dependência da resistividade com a temperatura. Após o pico a resistência decresce como resultado da fusão do material e da penetração do eletrodo na chapa. Altas correntes de solda resultam num pico bem definido, e o máximo, denominado resistência de pico, é deslocado em direção a tempos mais curtos. Uma solda queimada é caracterizada por uma queda repentina no valor da resistência. Mesmo que essas características sejam amplamente aceitáveis, ainda restam dúvidas sobre quando ocorre o início da fusão. Os primeiros trabalhos sugeriam que o ponto de fusão coincidia com o ponto de máxima resistência, no entanto, atualmente acredita-se que a fusão inicial acontece em algum ponto da parte ascendente da curva de resistência dinâmica.

Investigações detalhadas conduzidas por (Ortz, 1967)<sup>41</sup> e (Kaiser; Dunn; Eager, 1982)<sup>42</sup> indicam que a curva de resistência dinâmica pode ser subdividida em cinco estágios (Figura 4.3), sendo eles:

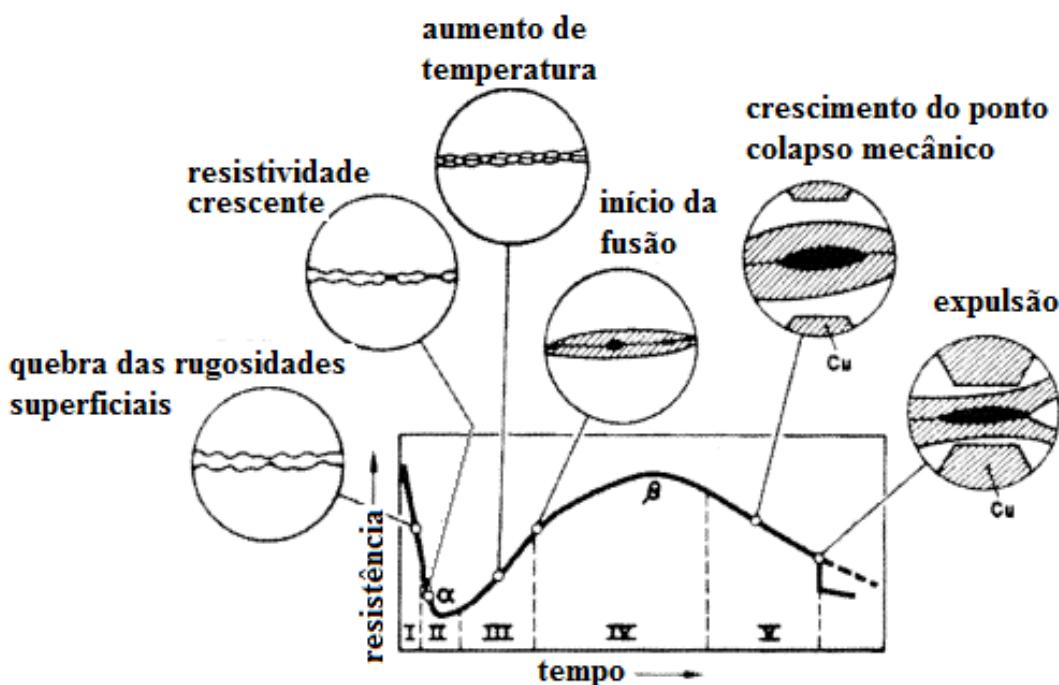


Figura 4.3: Típica curva de resistência dinâmica (J.D. Cullen et al., Multisensor fusion for on line monitoring of the quality, Measurement (2007), doi:10.1016/j.measurement.2007.01.006

- Estágio 1: colapso das rugosidades superficiais provocando uma rápida queda da resistência até atingir um mínimo;
- Estágio 2: a fase final de colapso das rugosidades juntamente ao aquecimento do material devido à crescente resistividade do metal base quando o fenômeno provocado pela alta resistividade supera o colapso das rugosidades e a resistência total entre os eletrodos aumenta;
- Estágio 3: resistência crescente – o aquecimento do metal base predomina até que o valor de pico da resistência (pico  $\beta$ ) seja alcançado;
- Estágio 4: o aquecimento do metal base resulta na fusão do mesmo na interface chapa/chapa, a zona de fusão cresce rapidamente, a taxa de crescimento apresentando um compromisso entre a crescente resistência devido ao aquecimento do material e a decrescente resistência devido ao aumento da zona de fusão;
- Estágio 5: uma redução da resistência devido a uma queda da corrente ocasionada pela endentação da chapa.

Todos os cinco estágios têm um papel importante no processo de formação e crescimento da lentilha de solda. Porém, os estágios 3 e 4 são dominantes no desenvolvimento de soldas satisfatórias. Experiências conduzidas por (Hutching; Waddell; Williams, 1980)<sup>10</sup> concluíram que o aquecimento gerado no interior da chapa é tão importante quanto o calor gerado na interface eletrodo/chapa. Essas investigações mostraram que a transmissão de calor por condução do contato eletrodo/chapa se orientada verso o interior da chapa, em direção ao contato chapa/chapa, é um fator determinante no aumento da resistividade do material, em particular quando se trata de chapas de espessura superior a 1.5 mm. Foi sugerido que a fusão seria difícil sem esta seqüência de eventos.

Em (Schumacher; Cooper; Dilay, 1985)<sup>54</sup> considera-se que a inclinação característica da curva de resistência dinâmica, na parte final do estágio 3 e durante todo o estágio 4, é o parâmetro de controle que determina o tamanho final da lentilha. Baseado nesta suposição foi desenvolvida uma estratégia de controle retroativo para garantir a qualidade da solda sob uma ampla gama de condições de operação. (Gedeon, 1984)<sup>55</sup> encontrou tendências similares ao analisar vários tipos de solda em aços revestidos com Zn/Fe-Zn, exceto o fato que os estados adicionais de formação da solda são evidentes em alguns casos.

Os estudos citados acima foram baseados na medição da resistência total entre os eletrodos de solda. Na realidade, é necessário que se considere o comportamento de cada uma das resistências individualmente. (Sheppard, 1994)<sup>59</sup> desenvolveu um modelo termoelétrico para estudar o efeito da resistência de contato no processo de formação da solda. Esse autor determinou as resistências presentes nos contatos eletrodo/chapa e chapa/chapa para várias combinações de material e descobriu que o valor da resistência chapa/chapa era, em geralmente, superior. Concluiu- se que a resistência chapa/chapa tem um papel fundamental na formação da solda e que o tamanho da lentilha poderia ser precisamente estimado para aços de alta resistência e baixa liga revestidos de zinco. (Williams, 1990)<sup>40</sup> mostrou que, na solda de aços revestidos de zinco, a resistência chapa/chapa varia muito discretamente, enquanto as variações na resistência eletrodo/chapa reflete as tendências medidas pela resistência eletrodo/eletrodo, embora com valores de resistência menores,(Figura 4.4). Estes resultados indicam que, no caso de aços revestidos de zinco e aços baixo carbono não revestidos, a resistência chapa/chapa

corresponde a 15-20% da resistência total entre os eletrodos. Além disso, o valor da resistência chapa/chapa não supera  $20\mu\Omega$  em nenhum dos casos.

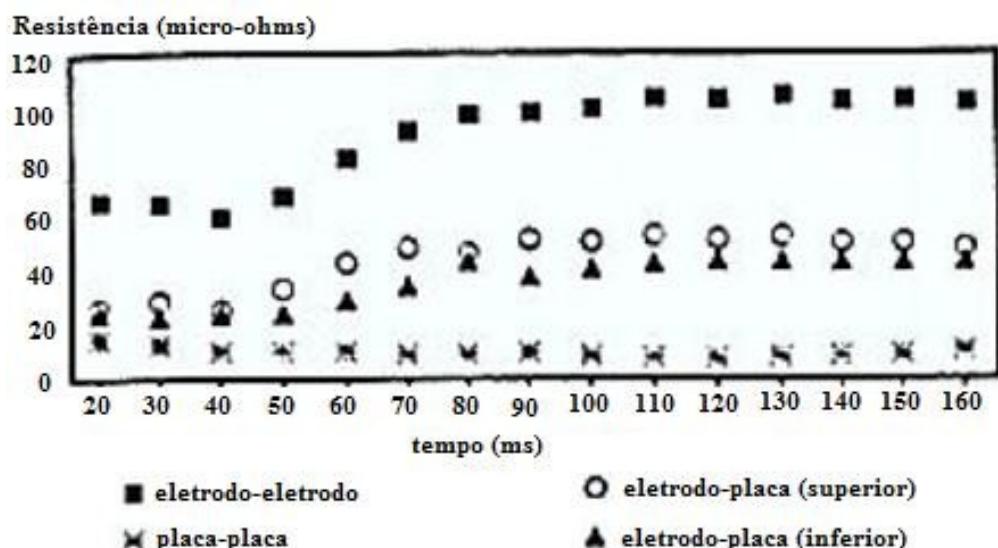


Figura 4.4: Contribuição das diversas resistências de contato na resistência dinâmica entre os eletrodos de solda. (Williams, D.)<sup>40</sup>

É difícil conciliar essas constatações com a premissa que a resistência chapa/chapa deve ser a de maior valor para garantir que a lentilha seja formada nesta interface. Baseado nas constatações apresentadas e em pesquisas desenvolvidas posteriormente (Gould; Peterson, 1988)<sup>44</sup> concluíram que, para esses tipos de aços revestidos, a variação da resistência dinâmica com o tempo não possui informações a respeito da formação da lentilha. Essa conclusão está aberta a questionamentos, pois é de conhecimento geral que sistemas de monitoramento e controle baseados nas características da curva de resistência dinâmica apresentam bons resultados em laboratório, mas só falham por sua deficiência em considerar a mudança da resistência decorrentes do fenômeno de desgaste do eletrodo.

A curva de resistência dinâmica vem sendo utilizada como base da maioria dos modelos analíticos e numéricos do processo de solda por resistência. Talvez este seja o fator limitante que explica porque modelos da formação e crescimento da lentilha 100% satisfatórios ainda não foram obtidos.

#### 4.5.1 Relação entre a resistência dinâmica e o tamanho da solda

Como tratado anteriormente, a curva de resistência dinâmica vem sendo utilizada como a base para o sistema de controle retroativo em um grande número de sistemas comercialmente disponíveis. No entanto, estes sistemas dificilmente garantem resultados satisfatórios durante toda a campanha de produção. Em particular, a relação da curva resistência-tempo com o diâmetro da solda não é claramente definido. Sabe-se que o formato da curva de resistência-tempo é influenciado pela interação entre os efeitos dos parâmetros de solda e a dimensão do eletrodo.

O efeito do diâmetro do eletrodo na formação e crescimento do ponto de solda deve ser levado em consideração qualquer que seja o modelo. Os fenômenos de revestimento e achatamento do eletrodo alteram a espessura da ponta dos mesmos durante a campanha de produção resultando numa diminuição da densidade de corrente fornecida ao ponto de solda. Portanto, a estratégia de controle deve levar este fato em consideração ao determinar os parâmetros ótimos de solda.

O alargamento da extremidade do eletrodo resulta na alteração da forma da curva resistência-tempo. Com o aumento do número de soldas produzidas por um par de eletrodos o valor do pico de resistência diminui e se exposta verso um tempo maior de solda provocando o achatamento da curva resistência-tempo. Portanto, a taxa de crescimento dos pontos de solda varia de acordo com o número de soldas feitas por um eletrodo como resultado do aumento do diâmetro da ponta do mesmo. Resultados obtidos por (Abelwhite, 2000)<sup>4</sup> (Figura 4.5) mostram esse efeito. A taxa menor de crescimento da resistência para os eletrodos maiores pode ser parcialmente atribuída à redução da densidade de corrente com o aumento do diâmetro do eletrodo. Por outro lado, espera-se um aumento das resistências de contato como consequência da menor pressão realizada por parte dos eletrodos. A taxa de crescimento da solda sofreria uma diminuição pela maior área para a dissipação do calor por condução através dos eletrodos. A contribuição relativa de todos estes fatores para o crescimento da solda deve ser avaliada no que diz respeito ao crescimento do ponto de solda caso se queira construir um modelo de simulação satisfatório.

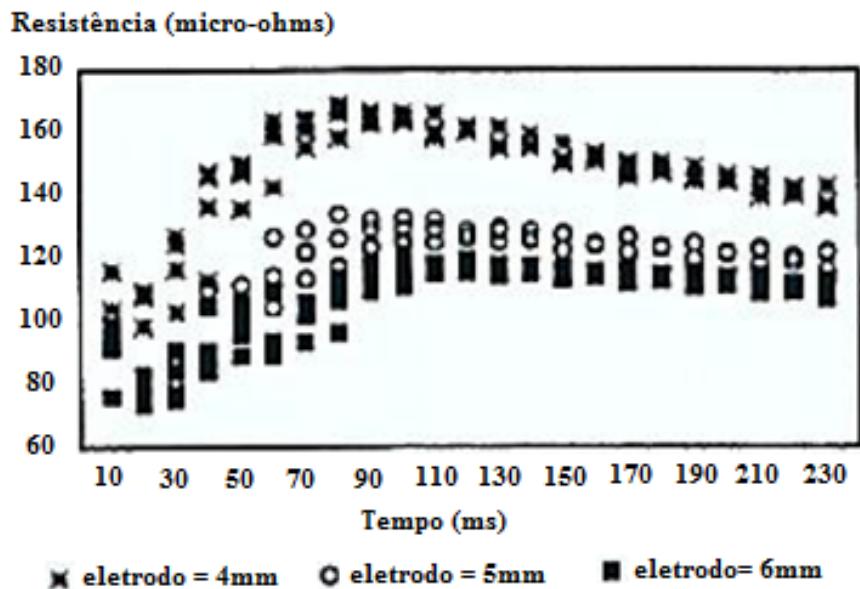


Figura 4.5: Efeito do diâmetro da ponta do eletrodo na forma da curva de resistência dinâmica para botões de solda de 5mm. (Abelwhite, J. D.)<sup>45</sup>

Em (Waddell; Williams, 1997)<sup>46</sup> foi constado que mantendo a corrente ou a pressão constante o aumento do diâmetro da ponta do eletrodo resulta em pontos de solda de tamanhos diferentes (Figura 4.6).

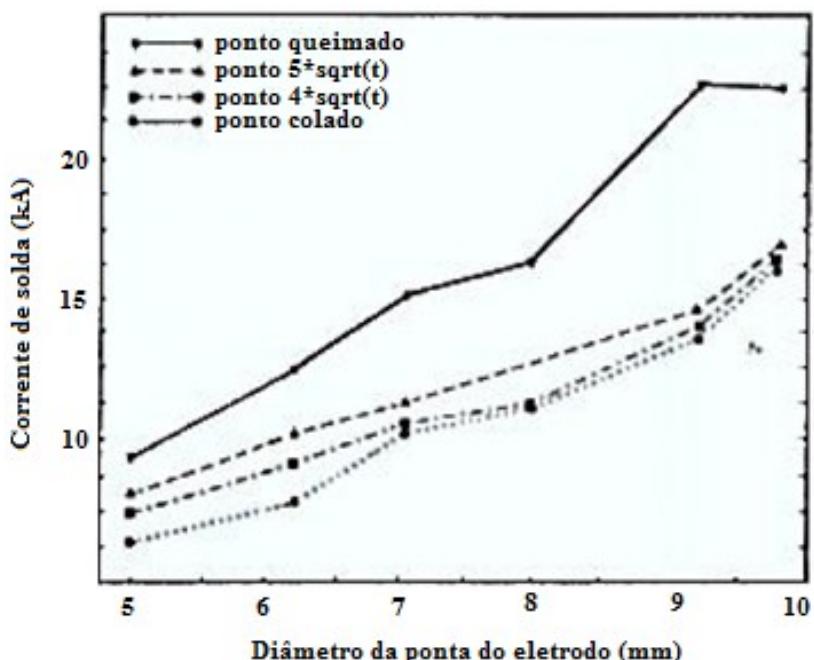


Figura 4.6: Influência do diâmetro da extremidade do eletrodo na corrente de solda necessária para produzir um ponto de solda de qualidade pré-determinada. (Wadell, W. e Williams, N. T)<sup>46</sup>

#### 4.5.2 Contribuição da resistência dinâmica para a formação da solda

O reconhecimento da importância da resistência de contato na formação e desenvolvimento do ponto de solda é consenso. Muitos trabalhos publicados<sup>41,47,50</sup>, sugerem que os efeitos da pressão e da temperatura nesse parâmetro são cruciais para o desenvolvimento de um modelo que descreva precisamente a formação e crescimento da lenticula. No entanto, muitos dos modelos propostos falham ao tentar explicar os dados experimentais.

Este fato foi reconhecido por (Babu, 2001)<sup>51</sup> que desenvolveu um modelo empírico para descrever a relação entre pressão e resistência de contato. O fator chave nesta abordagem é que a resistência de contato depende da resistividade e do limite de escoamento do material a ser soldado e de sua rugosidade superficial. A rugosidade superficial depende da pressão imposta ao contato, do seu limite de escoamento e do número de asperezas de contato. Foi desenvolvido um modelo para quantificar estes efeitos. Observou-se uma boa correlação dos dados sob condições de baixa pressão. Em condições de alta pressão aplicada os dados gerados diferem da realidade, essa discrepância foi atribuída ao fato de o modelo não considerar o efeito de deformação da superfície.

O modelo proposto previu que quando se eleva a temperatura a partir de uma situação de baixa temperatura a resistência de contato aumenta. No entanto, sob médias temperaturas a resistência atinge um pico devido a competição entre a resistência do corpo, o limite de escoamento do aço sendo soldado e a densidade de asperezas. A baixa temperatura a resistência elétrica do corpo é baixa, portanto a contribuição deste parâmetro na geração de calor é baixa. Por outro lado, a resistência de contato é alta porque a baixas temperaturas as asperezas são mais resistentes à deformação o que resulta numa tendência em manter a morfologia da superfície. Nessas circunstâncias muito do calor gerado seria consequência da elevada resistência de contato. A resistência elétrica do corpo é muito maior a altas temperaturas, enquanto a resistência de contato é baixa como resultado do colapso das asperezas devido a sua resistência mecânica ser muito menor a altas temperaturas. Isso quer dizer que, após um determinado valor de temperatura, a geração de calor ocorre muito mais pela resistência do corpo do que pela resistência de contato.

## 4.6 Simulação do processo de formação da solda

Muitos dos esforços para simular as interações entre os fenômenos térmicos, elétricos, mecânicos e metalúrgicos que correm durante o processo de soldagem resultam em modelos uni ou bidimensionais utilizando o método dos elementos finitos.

Uma séria limitação da abordagem unidimensional é que a influência de pressões e temperaturas não uniformes na área onde está situada a resistência de contato não pode ser levada em consideração.

Para superar estas limitações, atualmente, os modelos bidimensionais vêm sendo priorizados. Uma das contribuições mais importantes foi dada por (Greenwood, 1961)<sup>48</sup> que realizou uma simulação baseada no método das diferenças finitas bidimensional para obter a solução numérica da distribuição de temperatura no ponto de solda e nas chapas durante o ciclo de solda. Foram assumidas muitas hipóteses neste trabalho, incluindo resistência elétrica de contato desprezível, propriedades do material constantes e inexistência de troca de calor pelas superfícies livres. O calor latente de fusão e a geometria do eletrodo também foram desconsiderados. No entanto, o efeito do eletrodo foi considerado por uma condição de contorno que estabelece que a transmissão de calor para o eletrodo é proporcional à temperatura na interface eletrodo/chapa.

Greenhood<sup>48</sup> constatou que a corrente, que se espalhava no interior da chapa, não entrava no eletrodo de maneira uniforme sendo concentrada na sua borda o que causa uma constrição da passagem da corrente. Este fenômeno resulta em uma concentração de calor na periferia da área de contato eletrodo/chapa formando uma coroa aquecida nos primeiros estágios do ciclo de solda. Se a corrente fosse suficientemente alta para produzir uma solda em pouco tempo ela teria como resultado uma solda em formato anelar. Com o passar do tempo, isotermas de formato elíptico se desenvolveram e a temperatura máxima se localiza perto do eixo central e na interface chapa/chapa. Num estágio posterior do ciclo de solda, as temperaturas máximas foram desenvolvidas no centro geométrico entre os eletrodos, ou seja, na interface chapa/chapa. Greenwood<sup>48</sup> afirmou que a resistência associada à constrição da corrente era parcialmente determinada pelo número e tamanho dos micro contatos e parcialmente por seu agrupamento em algumas regiões, ou seja, pelo modo pelo qual o contato entre as superfícies se estabelece.

Ele concluiu que a área real de contato não poderia ser deduzida a partir de medidas da resistência de contato, e que somente um limite superior poderia ser estimado. Por este trabalho pode-se concluir que a resistência eletrodo/chapa influencia no desenvolvimento da lentalha e não pode ser ignorada em uma simulação realística.

Pesquisa similar conduzida por (Tsai; Dickenson; Jammal, 1990)<sup>49</sup> usando o método dos elementos finitos para prever o crescimento da lentalha de solda num processo de solda a ponto realizado em aço inoxidável sugere que a formação da lentalha tem início em uma região anelar a certa distância do centro do eletrodo e se expande para dentro e para fora durante o ciclo de solda. Constatou-se que a geometria final da lentalha é função da corrente de solda, da pressão aplicada pelo eletrodo e do tempo de solda. Se a solda é realizada em chapas de espessuras diferentes, foi proposto que o ponto de solda se formaria predominantemente na chapa mais grossa. No caso de chapas de materiais diferentes o ponto de solda se formaria predominantemente na chapa com a maior resistividade elétrica.

#### 4.6.1 Estado atual da modelagem termoelétrica

Os modelos discutidos até o presente momento ajudam a facilitar a compreensão sobre os fenômenos de geração de calor e formação do ponto de solda. Porém, são limitados por não realizar o acoplamento dos fenômenos elétricos e termomecânicos de maneira completa. Simulações mais realísticas<sup>52,53</sup> têm sido realizadas utilizando softwares especializados em método dos elementos finitos (MEF) (Figura 4.7) e método das diferenças finitas (MDF), pois eles colocam a disposição do usuário ferramentas que permitem a análise conjunta dos fenômenos termoelétricos.

O resultado de tais simulações indica que um aumento da resistência de contato resulta numa maior zona de solda. A penetração do ponto de solda na chapa é diretamente proporcional à resistência chapa/chapa e inversamente proporcional à resistência eletrodo/chapa. Este não é um resultado surpreendente dado que uma grande resistência eletrodo/chapa resultaria num maior aquecimento do respectivo contato. Este, por sua vez, agiria como uma barreira térmica causando um menor gradiente de temperatura entre o interior e o exterior da chapa. Nessas circunstâncias, o resfriamento dado pela transferência de calor na direção radial ao

longo da chapa se torna significativo o que resulta numa alta taxa de crescimento do diâmetro do ponto de solda e numa baixa taxa de crescimento da solda na direção do ponto de contato entre as chapas. Constatou-se que esta situação dura por poucos ciclos de passagem de corrente, pois o aquecimento do corpo, resultante no aumento de sua resistividade, torna-se menos significante e a resistência de contato que cai para valores muito baixos. Isso causa um aumento da taxa de crescimento do ponto de solda na direção do ponto de contato entre as chapas.

Essas experiências foram incapazes de determinar o que é mais importante para a formação da solda, a resistência chapa/chapa ou a resistência eletrodo/chapa. Embora não considerado nessas experiências, a importância relativa de ambas as resistências de contato e da resistência elétrica do corpo deve ser investigada profundamente, particularmente para o caso de solda de chapas com diferentes espessuras e/ou materiais.

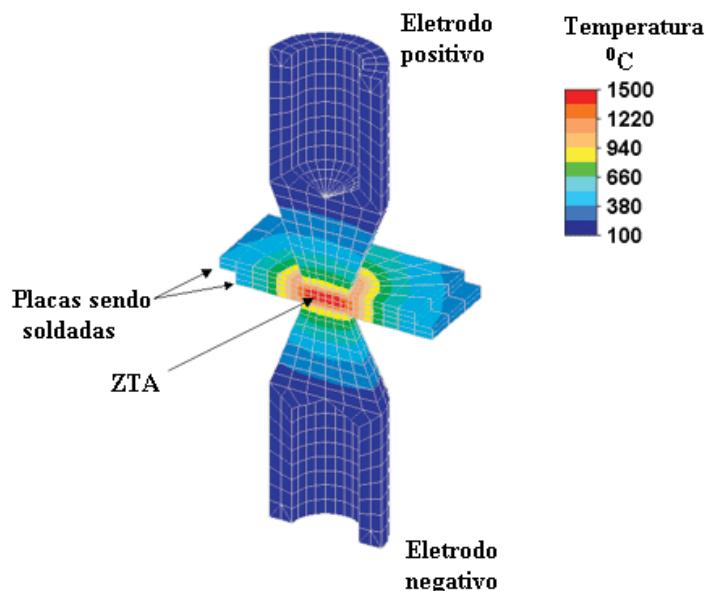


Figura 4.7: Distribuição da temperatura obtida pelo MEF (Fonte: [http://www.algor.com/service\\_support/hints\\_tips/joule\\_heating.asp](http://www.algor.com/service_support/hints_tips/joule_heating.asp); acesso em 23/10/07)

#### 4.6.1.1 Distribuição da corrente na área de solda

A distribuição da corrente entre os eletrodos de solda é, obviamente, um fator que influencia diretamente tanto a formação da solda quanto o desgaste do eletrodo. Sabe-se que a distribuição da corrente que atravessa a face do eletrodo é

não uniforme, sendo concentrada na periferia da área de contato entre a chapa e o eletrodo. A causa desta não uniformidade vem sendo atribuída ao fator de película e à geometria do eletrodo, embora isto venha sendo contestado.

A situação se torna ainda mais complexa pela dispersão da corrente no interior das chapas sendo soldadas (Figura 4.8). Além disso, no caso de pontos de solda muito próximos pode ocorrer uma fuga de corrente (corrente de shunt) que tende a passar através do ponto de solda já pronto. Conseqüentemente, muito pouco sucesso tem sido obtido na determinação da rota da corrente de solda entre os eletrodos.

Em (Bowers; Eagar, 1986)<sup>56</sup> foi usado uma modelagem por elementos finitos para determinar o efeito da geometria do eletrodo na distribuição da corrente em sua face. Os resultados obtidos por esses pesquisadores sugerem que a geometria do eletrodo influencia significantemente na distribuição da corrente na interface de solda. (Nied, 1983)<sup>67</sup> concluiu que a densidade de corrente máxima ocorre na periferia da área de contato entre o eletrodo e a chapa sendo soldada (Figura 4.9), esse fenômeno pode ser atribuído em parte pela pressão maior nesta região causada pela deformação da chapa em resposta à força do eletrodo. Constatou-se que a geração de calor é maior nessa região devido a maior densidade de corrente. É importante observar que, em todos esses modelos, assumiu-se que a resistência de contato era uniforme na face do eletrodo.

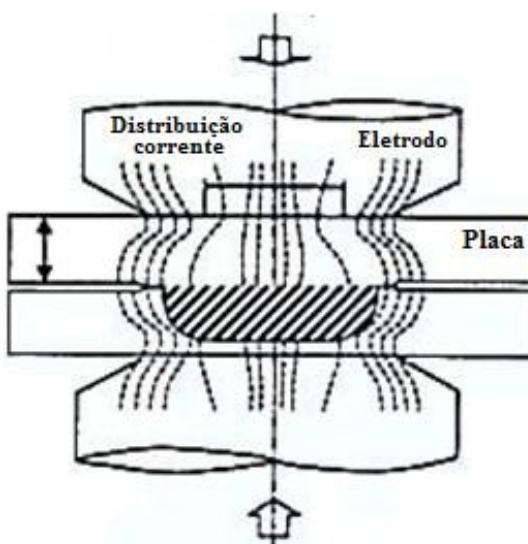


Figura 4.8: Representação esquemática da distribuição de corrente nos eletrodos e nas chapas durante o ciclo de solda. (Bowers, R. J; Eager, T.W.)<sup>56</sup>

É importante notar que, embora a geração de calor seja máxima na periferia dos eletrodos, a temperatura obtida nessa região não é máxima devido à dissipação do calor por condução para o restante da chapa.

Até este momento, uma conclusão satisfatória sobre o percurso da corrente entre os eletrodos ainda não foi obtida. Um fator limitante é o escasso conhecimento da verdadeira área de contato nas interfaces chapa/chapa e eletrodo/chapa nos vários estágios da formação da solda. Conseqüentemente, não é possível entender a densidade de corrente nas várias áreas de contato, limitando, portanto a realização de um modelo matemático completo para descrever o processo de crescimento do ponto de solda.

Outro fator a ser considerado é a mudança da forma do eletrodo com o tempo enquanto o número de soldas produzidas aumenta. Um aumento significativo da ponta do eletrodo é verificado durante a sua vida, o que influencia a o fluxo de corrente entre os eletrodos. Além disso, qualquer liga que possa ocorrer na interface eletrodo/chapa resultará na mudança da resistência eletrodo/chapa o que influenciará nos processos de formação e crescimento do ponto de solda.

Conclui-se que o fluxo/distribuição de corrente entre os eletrodos de solda, e consequentemente a dinâmica do crescimento da lentilha, mudará durante a vida do eletrodo. Portanto, tentativas futuras de modelagem devem levar em consideração o desgaste do eletrodo.

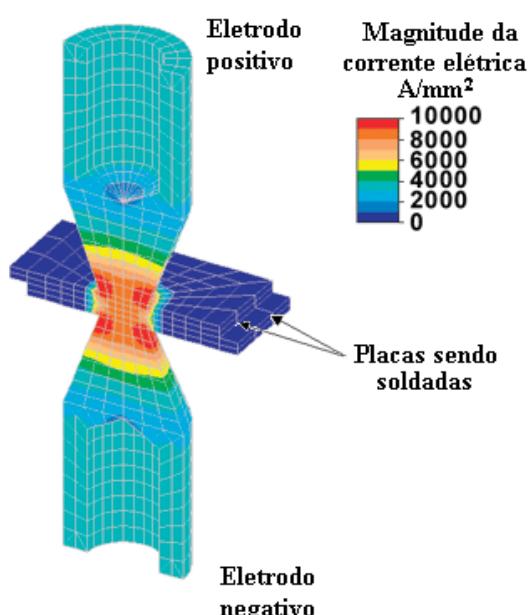


Figura 4.9: Densidade de corrente obtida pelo MEF (Fonte: [http://www.algor.com/service\\_support/hints\\_tips/joule\\_heating.asp](http://www.algor.com/service_support/hints_tips/joule_heating.asp); acesso em: 23/10/2007)

#### 4.6.2 Estado atual da modelagem termomecânica

A modelagem de grandezas mecânicas como a força do eletrodo e o gradiente de tensões resultantes na área de solda levam em consideração tanto os esforços mecânicos, como a força aplicada pelos eletrodos, quanto os fenômenos térmicos envolvidos no processo de soldagem.

A grande maioria das simulações térmicas é realizada empregando-se métodos consagrados com o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas.

##### 4.6.2.1 Distribuição da força entre os eletrodos de solda

A força aplicada pelos eletrodos tem um efeito significante na formação da solda e por isso deve ser considerada como um fator crítico. A força do eletrodo influencia a magnitude da resistência estática de contato e, portanto o grau de aquecimento inicial tanto na interface chapa/chapa quanto na eletrodo/chapa. Além disso, a força determina a área de contato nas interfaces e, portanto a densidade de corrente, o que por sua vez determina a taxa de geração de calor. Um aumento da força de contato resulta em um menor ponto de solda como consequência da diminuição da densidade de corrente no contato chapa/chapa e da maior dissipação de calor causada pelos eletrodos.

A efetividade da força dos eletrodos muda devido ao aumento da área da ponta do eletrodo. Consequentemente, a distribuição de pressão gerada pela força aplicada pelos eletrodos o que por sua vez afeta a resistência chapa/chapa e eletrodo/chapa. Qualquer redução na pressão resultará no aumento dessas resistências causando uma maior geração de calor. No entanto, a resistência diminui em consequência da maior área de contato causada pela deformação do eletrodo. O resultado final é um balanço entre esses dois efeitos.

Estes efeitos devem ser levados em consideração em qualquer simulação válida do processo de solda a ponto.

## 4.7 Aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA)

Em vista das dificuldades em obter descrições matemáticas explícitas do processo de solda a ponto sobre o qual basear o algoritmo de controle, técnicas alternativas para o monitoramento do processo têm que ser examinadas. As últimas tendências nesse contexto incluem a aplicação de técnicas de inteligência artificial, em particular, o uso de redes neurais artificiais (ANN) e lógica nebulosa (fuzzy) para a modelagem e controle do processo de solda a ponto, respectivamente.

### 4.7.1 Integração com as técnicas de inteligência artificial

Embora um sucesso relativo tenha sido alcançado por Feng et al.<sup>24</sup> e Zhang<sup>25</sup>, é muito improvável que uma abordagem multidisciplinar por si só resultará na solução completa para o controle do processo de solda a ponto. Existem muitos parâmetros que têm que ser considerados para obter um sistema de controle que leve em consideração as práticas gerais utilizadas nos sistemas de produção. Para superar estas limitações, existe a possibilidade de introduzir alguma forma de inteligência artificial no sistema. As duas técnicas de particular interesse nesse contexto são as redes neurais artificiais e a lógica nebulosa.

Com a sua capacidade de aprendizado as redes neurais oferecem um meio de representar a relação entre as variáveis de entrada observáveis e as variáveis de saída mensuráveis sem a necessidade de uma descrição matemática do processo. Ao invés disso, as ANN podem ser projetadas armazenar padrões que relacionam as variáveis de entrada com saídas particulares. Essa propriedade torna as ANNs ideais para a modelagem e identificação do sistema.

Na área do controle de processos, a lógica nebulosa emula os estados do processo e a aplicação de regras de comportamento para implementar a ação de controle. Controladores a lógica nebulosa não exigem um modelo matemático do sistema e podem ser regulados através de conhecimentos empíricos fornecidos por um especialista.

## 5 A MÁQUINA DE SOLDA MONOFÁSICA CA

Neste capítulo será elaborado um modelo elétrico da máquina de solda a partir de um modelo em PSIM proposto por Furlanetto em (Furlanetto, V., 2005)<sup>68</sup>. Após a compreensão do modelo citado, será determinado o sistema de equações diferenciais que governam o sistema. Utilizando estas equações será desenvolvido um modelo no ambiente Simulink/Matlab, este software permite a integração da máquina de solda com o sistema de controle.

### 5.1 Introdução

Para analisar o funcionamento de uma máquina de solda a ponto, pode-se decompor a máquina em dois principais subsistemas. O subsistema mecânico tem como principal componente o pistão pneumático responsável pela movimentação dos eletrodos e pela força que os eletrodos exercem nas chapas sendo soldadas. Esta força é de importância fundamental no processo de soldagem visto que a pressão aplicada sobre as chapas e a resistência de contato chapa/chapa são inversamente proporcionais. Assim uma pressão excessiva pode ocasionar uma redução do calor gerado resultando em um ponto de solda menor que o desejado ou até mesmo na inexistência do ponto.

O subsistema elétrico é composto basicamente por um transformador redutor de tensão. O modelo de um transformador ideal será modificado para levar em conta as perdas do transformador. Também estão presentes grandezas que variam de maneira não linear, como a resistência elétrica entre os dois eletrodos, durante o processo de soldagem. A indutância característica do circuito secundário também pode variar, principalmente nas máquinas móveis onde o operador transporta a pinça até o ponto de realização da solda.

As não linearidades presentes no sistema assim como a existência de parâmetros que podem variar no decorrer do processo de soldagem justificam a implementação de um sistema de controle capaz de adaptar-se a diversas condições de operação.

## 5.2 Aspectos mecânicos

Existem duas tipologias básicas de construção de máquinas de solda a ponto. Nas máquinas estáticas (Figura 5.1) o transformador, o circuito pneumático e de refrigeração e o painel de controle encontram-se centralizados em uma única unidade. Nesta arquitetura, em geral, existe um cilindro pneumático de atuação direta que controla tanto a velocidade de deslocamento quanto a força de contato entre os eletrodos e as chapas. As máquinas móveis, ou a pinça, permitem uma maior mobilidade na realização da solda. Neste tipo de máquina tanto o transformador quanto o circuito de controle encontram-se em uma unidade descentralizada e o operador transporta uma pinça (Figura 5.2) para realizar a soldagem. Em geral, nesta última arquitetura emprega-se um cilindro pneumático que movimenta os eletrodos. Máquinas a pinça são freqüentemente encontrada nas estações de soldagem manual presentes na indústria automobilística.

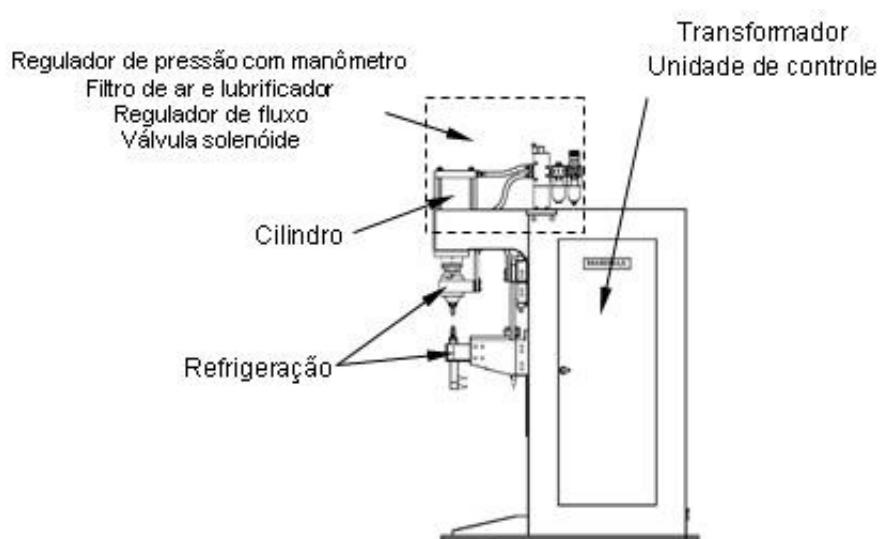


Figura 5.1: Máquina de solda ponto a ponto estática.

O circuito pneumático é composto por um cilindro, um filtro de ar utilizado para eliminar as impurezas e a umidade do ar. Um regulador de pressão é empregado para controlar a pressão do ar na entrada do cilindro e, freqüentemente, é montado junto a um manômetro. Uma válvula proporcional capaz de regular eletronicamente a pressão de entrada através de um sinal elétrico analógico ou

digital, tipicamente entre 0V e 10V. Um regulador de fluxo que controla a velocidade de deslocamento do cilindro. Uma válvula solenóide responsável pela alimentação do cilindro e um pressostato.

Do ponto de vista do controle de qualidade do ponto de solda é fundamental que a força aplicada pelos eletrodos seja controlada durante todo o processo de soldagem, pois a força exercida pelos eletrodos é diretamente correlacionada ao calor gerado na resistência de contato chapa/chapa. Este calor é responsável pela fusão do material. Portanto, controlando o calor gerado pode-se determinar o tamanho do ponto de solda.

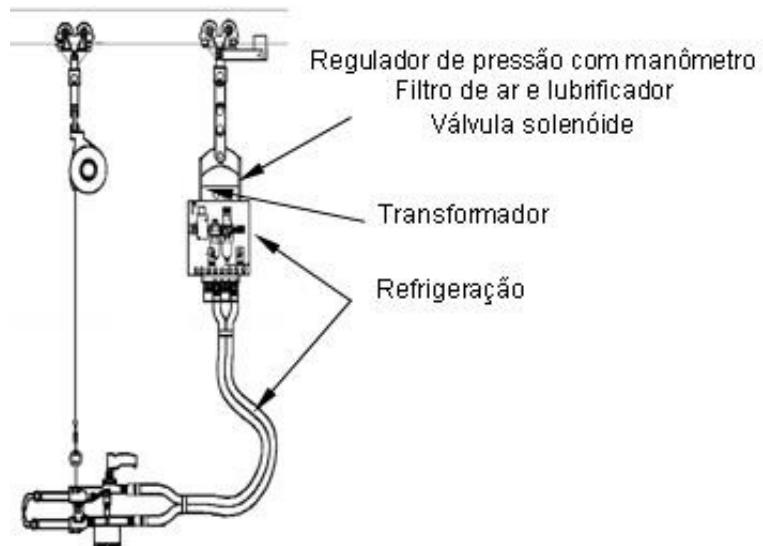


Figura 5.2: Máquina de solda a ponto a pinça.

Um circuito pneumático é caracterizado por uma baixa rigidez, dada pela compressibilidade do fluido de trabalho. Esta baixa rigidez possibilita a vibração do eletrodo (bouncing) durante a soldagem, resultando em um ponto de solda de baixa qualidade e na redução da vida útil do eletrodo.

O sistema de refrigeração é responsável por dissipar o calor, gerado por efeito Joule, controlando a temperatura de operação da máquina. A refrigeração atua no secundário do transformador, porta eletrodos, eletrodos e braços de maneira independente. Um controle correto da temperatura de operação é fundamental

principalmente por influenciar parâmetros elétricos do processo de soldagem como a resistividade dos condutores e as perdas no transformador.

### 5.3 Aspectos elétricos

Do ponto de vista elétrico, a máquina de solda monofásica CA é composta de transformador e carga. No circuito primário do transformador encontram-se os tiristores responsáveis por recortar a tensão aplicada ao primário do transformador, tornando possível a variação do valor eficaz da tensão e do tempo de solda (tempo da tensão presente no primário). Os tiristores são controlados pelo bloco comando de solda. O transformador é do tipo redutor com tensões máximas de saída entre 3,5 V a 14,5 V (transformadores com potências entre 15 kVA e 300 kVA) para níveis máximos de corrente entre os eletrodos (9,6 kA a 51,4 kA) limitados pela carga imposta ao secundário (269  $\mu\Omega$  a 364  $\mu\Omega$ ). Na (Figura 5.3) encontra-se um modelo elétrico simplificado de uma máquina de solda CA.

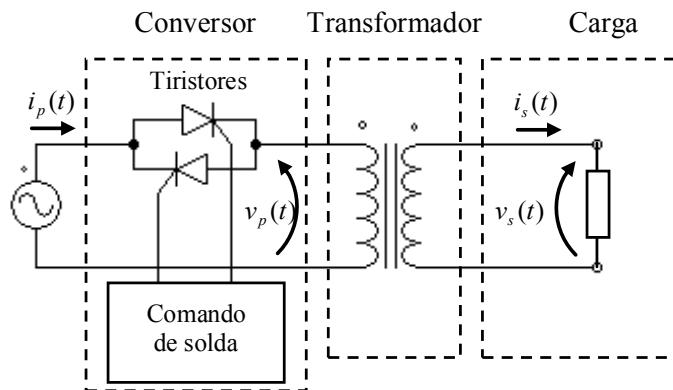


Figura 5.3: Representação elétrica da máquina monofásica CA.

A carga é composta por uma resistência  $R_c$ , que representa a perda de energia por efeito Joule no circuito secundário. Da (Figura 5.4) observa-se que a resistência no secundário pode ser tratada como um conjunto de resistências ligadas em série.

A resistência entre os eletrodos é conhecida como resistência dinâmica por variar de modo não-linear durante o processo de soldagem. Esta variação é resultado do aumento da temperatura durante a soldagem o que influencia a resistividade dos diversos componentes e de processos químicos como a queima do material de revestimento das chapas.

A resistência dinâmica engloba a 7 outras resistências: eletrodo superior, contato eletrodo superior/chapa superior, chapa superior, contato chapa/chapa, chapa inferior, contato chapa inferior/eletrodo inferior.

A geometria dos braços e dos porta eletrodos forma uma bobina (indutor) com uma espira (Figura 5.5). Ao circular corrente pelo secundário o fluxo magnético concatenado com esta bobina caracteriza a indutância da carga  $L_c$ . Esta indutância influenciará o atraso de fase da corrente em relação a tensão e é um parâmetro importante na determinação dos ângulos de disparo dos tiristores.

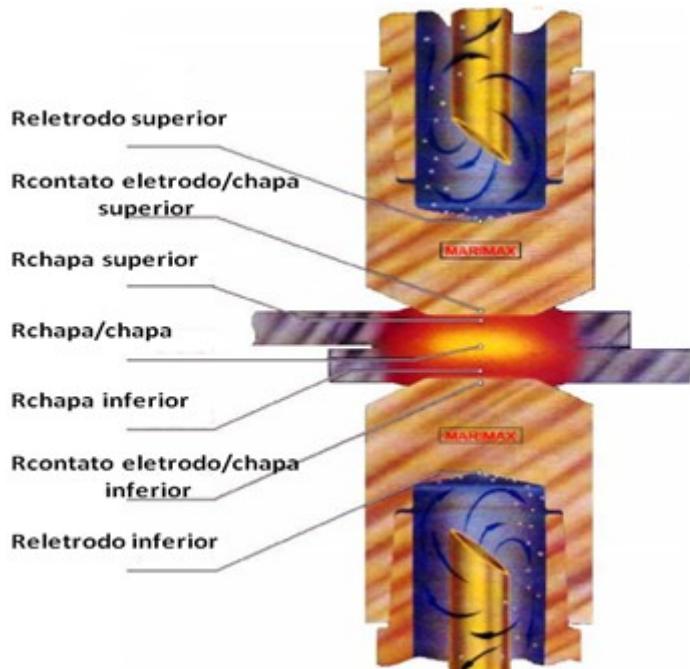


Figura 5.4: Componentes da resistência dinâmica

Para o controle da corrente de solda o comando de solda varia o ângulo de disparo  $\alpha$  dos tiristores, alterando-se dessa forma a tensão no primário  $v_p$  e por consequência a corrente no primário  $i_p$  (Figura 5.6).

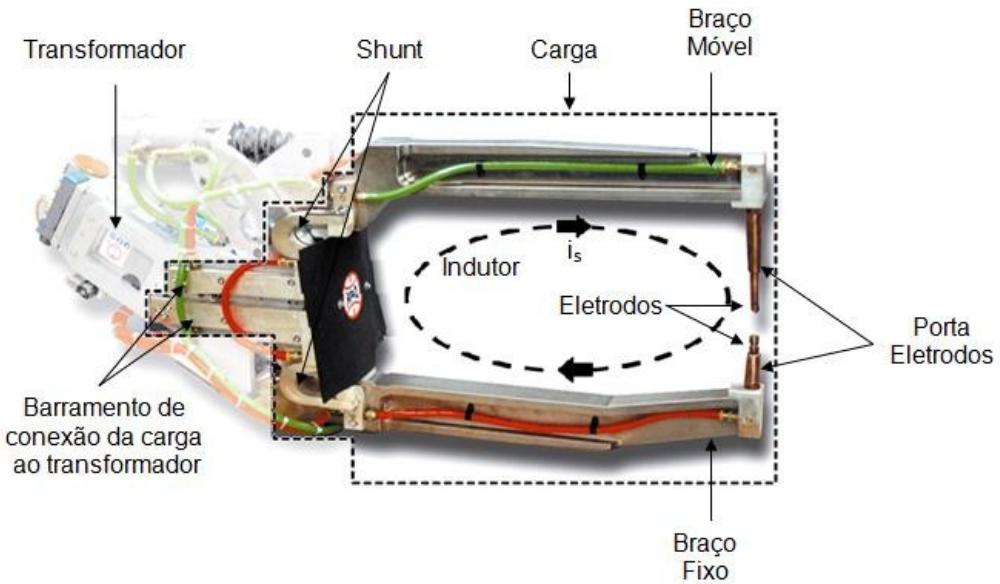


Figura 5.5: Carga no circuito secundário do transformador

Assim, a tensão de secundário  $v_s$  pode aumentar ou diminuir alterando a corrente entre os eletrodos  $i_s$  (corrente no secundário) aumentando ou diminuindo a quantidade de calor no ponto de solda, o que resulta num maior ou menor volume fundido de material. Outra forma de se obter a variação da quantidade de calor na solda é alterar o tempo de circulação da corrente que é determinado pela quantidade de ciclos de solda.

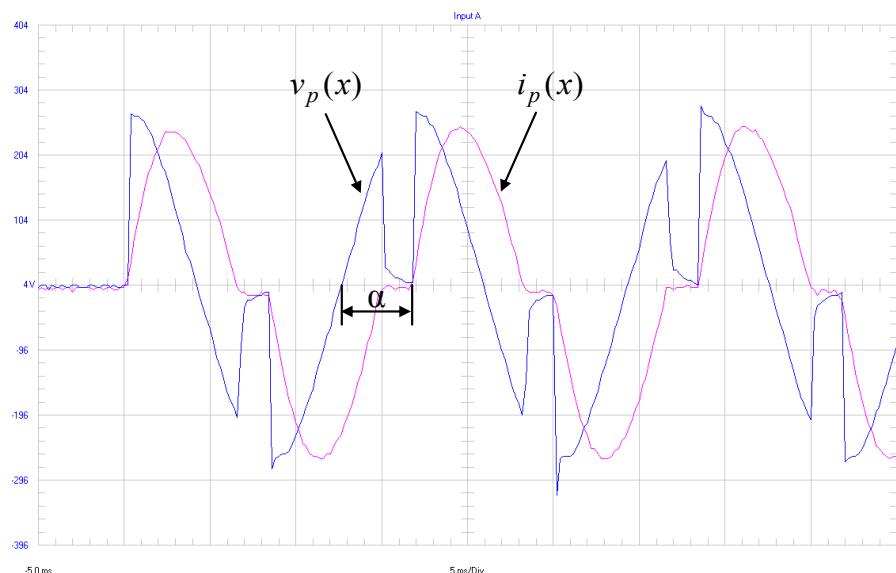


Figura 5.6: Formas de onda características no conversor CA.

## 5.4 Modelagem elétrica da máquina de solda

Como visto anteriormente a máquina de solda monofásica CA pode ser modelada como um transformador monofásico.

Numa primeira aproximação considera-se um transformador ideal onde as perdas no núcleo e nos enrolamentos são nulas, o material do núcleo possui permeabilidade infinita e existe um acoplamento eletromagnético perfeito entre o primário e o secundário o que resulta na inexistência de dispersão de fluxo magnético. Assim, para um transformador ideal a potência fornecida ao primário é totalmente transferida ao secundário. Como nos transformadores ideais existe um acoplamento magnético perfeito, vale a equação:

$$\phi_p = \phi_m = \phi_s \quad (5.1)$$

Portanto, para transformadores ideais vale a relação:

$$\frac{v_p}{v_s} = \frac{i_s}{i_p} = \frac{N_p}{N_s} = N \quad (5.2)$$

Em um transformador real constata-se que mesmo que a corrente no secundário seja nula  $i_s = 0$  a potência consumida pelo primário é não-nula. Além disso, mesmo conectando uma carga no secundário observa-se que a potência consumida no primário é maior que a do secundário. Portanto, conclui-se que os transformadores reais apresentam perdas que devem ser consideradas. Estas perdas podem ser divididas em perda nos enrolamentos e perda no núcleo. A perda no núcleo possui natureza eletromagnética sendo originada pelos fenômenos de histerese, correntes parasitas de Eddy e dispersão magnética. A perda nos enrolamentos é principalmente causada pelo efeito Joule no primário e no secundário. Essas perdas são representadas esquematicamente na Figura 5.7.

Para representar as perdas acima mencionadas são adicionados alguns elementos ao circuito do transformador ideal, conforme indicado na Figura 5.8. As perdas ôhmicas no enrolamento primário e secundário são representadas pelas resistências  $R_p$  e  $R_s$ . As indutâncias  $L_p$  e  $L_s$  correspondem ao efeito do fluxo de

dispersão no transformador referentes ao primário e secundário, sendo responsáveis juntamente com  $R_p$  e  $R_s$  pelas quedas de tensão  $v_a(t)$  e  $v_b(t)$  que fazem com que a potência no primário seja diferente daquela do secundário. As perdas referentes ao núcleo, devido às correntes parasitas e à histerese, estão representadas pela resistência paralela  $R_m$  sendo  $v_m(t)$  a tensão efetiva do primário. A indutância de magnetização não linear  $L_m$  representa a não-linearidade do fluxo em relação ao campo magnético (curva de histerese  $BxH$ ). O transformador ideal completa o circuito equivalente.

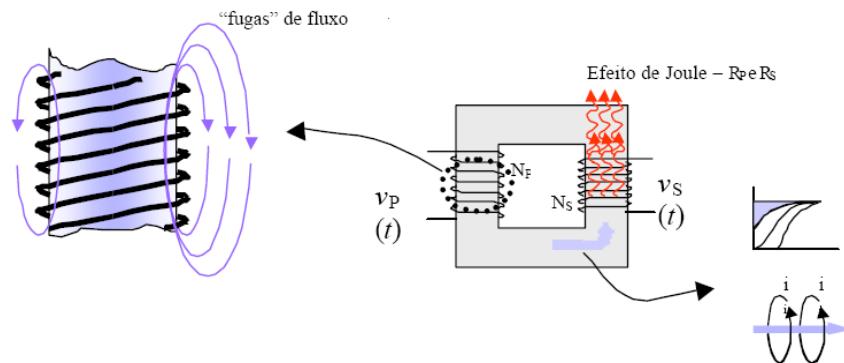


Figura 5.7: Perdas no transformador ideal.

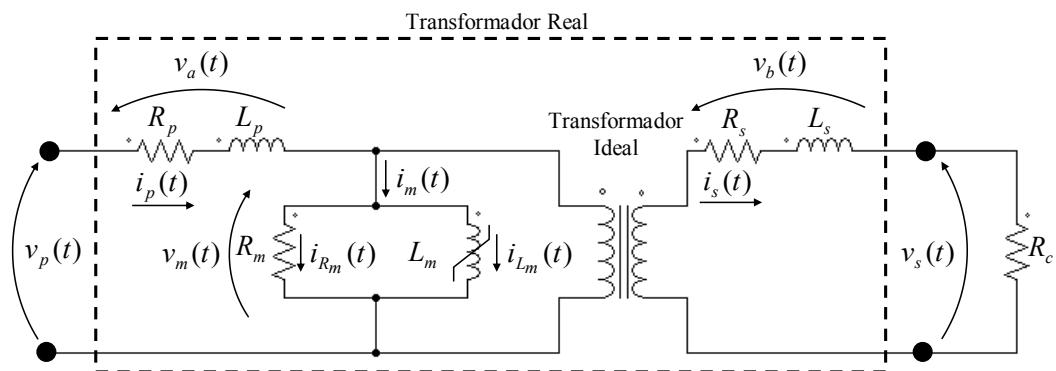


Figura 5.8: Modelo da dinâmica elétrica de uma máquina de solda monofásica CA.

## 5.5 Modelo estático

Como primeira abordagem para o problema foi desenvolvido um modelo estático fasorial. Com este modelo pretende-se compreender melhor o

funcionamento da máquina assim como analisar o comportamento da corrente de secundário, ou seja, seu atraso em relação a tensão do primário, em função dos parâmetros  $R_p$ ,  $L_p$ ,  $R_m$ ,  $L_m$ ,  $R_s$ ,  $L_s$  e  $R_c$ .

O modelo do transformador (Figura 5.8) pode ser modificado. Transportando os componentes do secundário para o circuito primário, ou seja, adicionando uma carga equivalente ao primário capaz representar a carga do secundário, obtém-se o circuito equivalente da Figura 5.9.

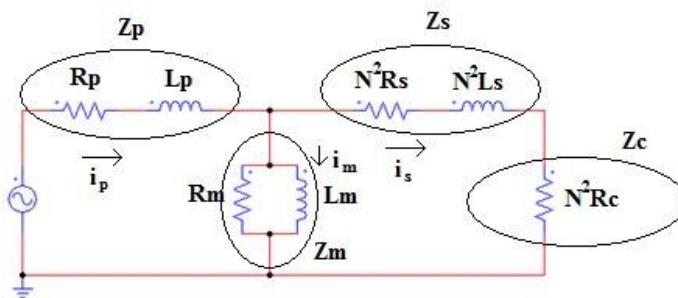


Figura 5.9: Circuito equivalente refletido para o primário

No circuito equivalente estão identificadas as correntes  $i_p$ ,  $i_m$  e  $i'_s = i_s/N$ , assim como as impedâncias presentes no circuito:

$$Z_p = R_p + jX_p \quad (5.3)$$

$$Z_m = \left( \frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} \right)^{-1} \quad (5.4)$$

$$Z_s = N^2 R_s + jN^2 X_s \quad (5.5)$$

$$Z_c = N^2 R_c \quad (5.6)$$

onde,

$$X_p = wL_p \quad (5.7)$$

$$X_m = wL_m \quad (5.8)$$

$$X_s = wL_s \quad (5.9)$$

A soma das impedâncias resulta em:

$$Z = Z_p + \left( \frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_s + Z_c} \right)^{-1} \quad (5.10)$$

de onde podemos concluir que:

$$V_f = Z \cdot I_p \quad (5.11)$$

## 5.6 Modelo Dinâmico

Após uma breve análise do modelo estático. Podemos propor um modelo dinâmico baseado no espaço de estados da máquina de solda. Aplicando a segunda lei das Kirchhoff às malhas 1, 2 e 3 obtemos o seguinte sistema de equações:

$$V_f = R_p \cdot i_p + L_p \cdot \frac{di_p}{dt} + R_m \cdot i_{mR} \quad (5.12)$$

$$R_m \cdot i_{mR} = L_m \frac{di_{mL}}{dt} \quad (5.13)$$

$$L_m \frac{di_{mL}}{dt} = N^2 \left( R_s \cdot i'_s + L_s \frac{di'_{i'_s}}{dt} \right) \quad (5.14)$$

A corrente de magnetização no resistor  $i_{mR}$  pode ser obtida pela primeira lei de Kirchhoff, ou lei dos nós, resultando:

$$i_{mR} = i_p - i_{mL} - i'_{i'_s} \quad (5.15)$$

Substituindo  $i_{mR}$  nas esquações (5.13), (5.14) e (5.15) obtém-se a seguinte representação do sistema no espaço de estados:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_p}{dt} \\ \frac{di_{mL}}{dt} \\ \frac{di'_{i'_s}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(R_p + R_m)}{L_p} & \frac{R_m}{L_p} & \frac{R_m}{L_p} \\ \frac{R_m}{L_m} & -\frac{R_m}{L_m} & -\frac{R_m}{L_m} \\ \frac{R_m}{N^2 L_s} & -\frac{R_m}{N^2 L_s} & -\left( \frac{R_m}{N^2 L_s} + \frac{R_s}{L_s} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_{mL} \\ i'_{i'_s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_f \quad (5.16)$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ i_p \\ i_s \\ i_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_m}{N} & \frac{-R_m}{N} & \frac{-R_m}{N} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_{mL} \\ i_{i_s} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Este modelo foi implementado em Simulink/Matlab (Figura 5.10) com o objetivo de testar o sistema de controle da máquina de solda.

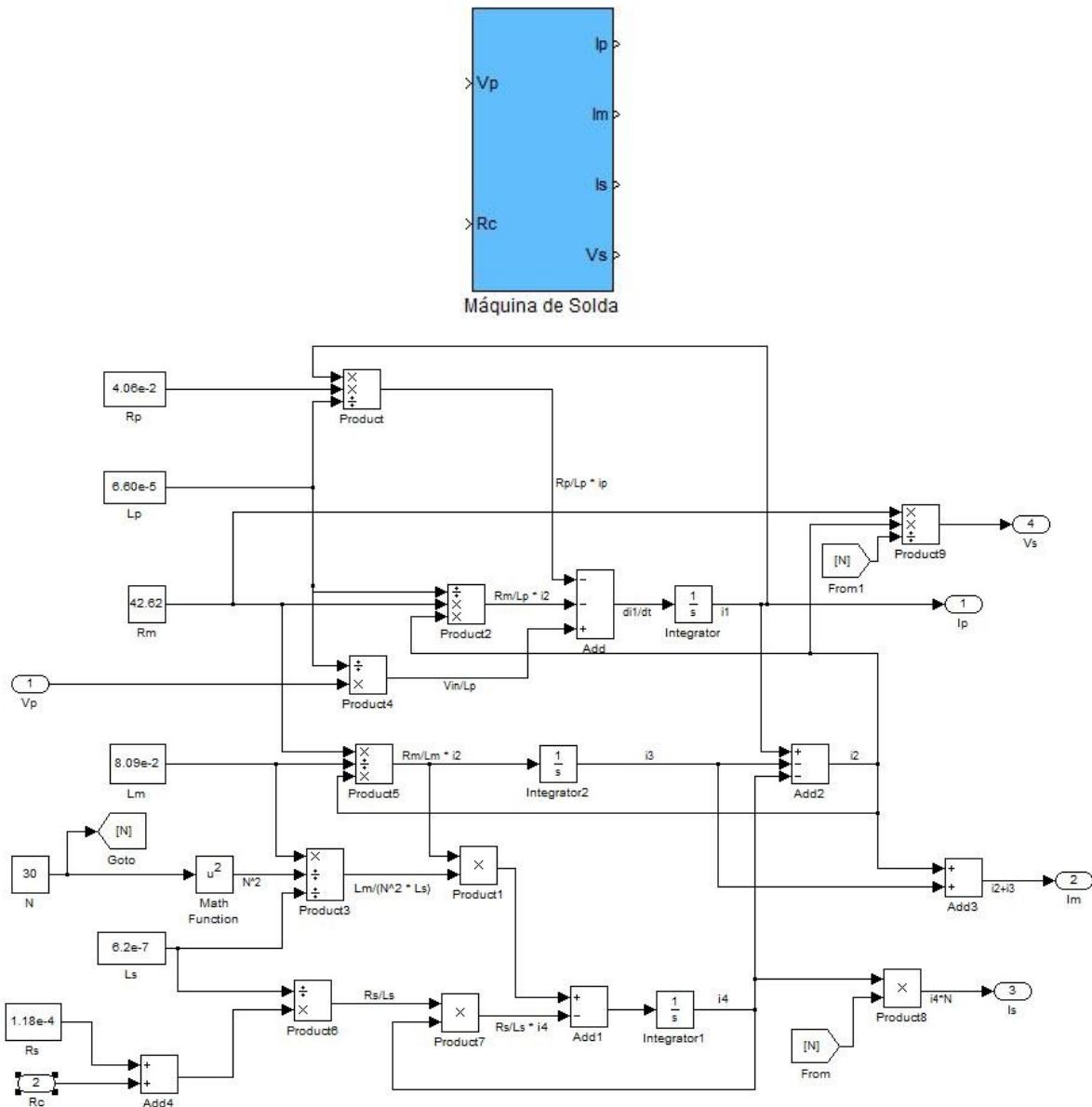


Figura 5.10: Modelo elétrico da máquina de solda implementado em Simulink / Matlab.

Como título de comparação também foi analisado o modelo da máquina de solda construído em (Furlanetto, V., 2005)<sup>68</sup> e representado na Figura 5.11. Este modelo foi desenvolvido em PSIM e validado experimentalmente apresentando bons resultados. No modelo utiliza-se o chaveamento de três indutores para representar a indutância não linear  $L_m$ . A impedância de secundário foi refletida para o primário.

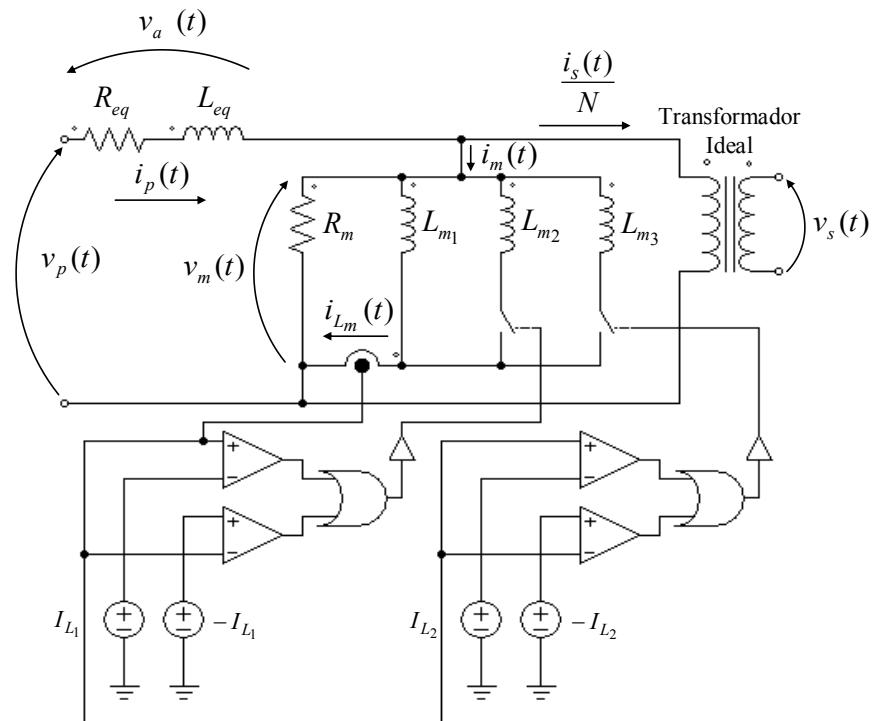


Figura 5.11: Modelo do transformador de solda realizado por (Furlanetto, V. 2005) realizado em PSIM.

### 5.6.1 Identificação dos parâmetros do modelo

Os parâmetros do modelo, a saber:  $R_p$ ,  $L_p$ ,  $R_m$ ,  $L_m$ ,  $R_s$ ,  $L_s$  e  $N$ ; podem ser obtidos realizando-se dois ensaios. No ensaio em vazio, o secundário é deixado em aberto ( $R_s \rightarrow \infty$ ), sendo o enrolamento primário ligado à tensão nominal. Dado que o secundário está em vazio, nenhuma corrente flui nele e, consequentemente nenhuma energia é transmitida para aquele ramo do circuito e as perdas de Joule, no enrolamento secundário, são nulas. Verifica-se, entretanto, que o wattímetro e o amperímetro, inseridos no circuito do primário, mostram valores não nulos – esta

energia é dissipada no enrolamento primário, por efeito Joule e no núcleo de ferro, por perdas de Eddy e histerese. Dado que os valores de  $R_P$  e  $X_P$  são muito inferiores aos de  $R_C$  e  $X_m$ , poderemos dizer que a energia gasta neste ensaio é atribuível às perdas por correntes parasitas e por Histerese denominadas de perdas no ferro. Através deste ensaio determina-se  $R_P$  e  $X_P$ .

O restante dos parâmetros pode ser obtido através de um ensaio em curto-círcuito. Neste ensaio o secundário é curto circuitado ( $R_s = 0$ ) e aumenta-se a tensão no primário até que a corrente no secundário atinja o valor nominal. Note-se que, estando o secundário em curto circuito, a sua impedância é quase nula, portanto, a tensão necessária no primário para obter essa corrente é muito pequena. Note que torna-se necessário possuir uma fonte de tensão regulável para alimentar com um valor reduzido o enrolamento primário porque se a tensão no primário fosse a nominal, a corrente no secundário seria extremamente elevada, danificando esse enrolamento. Para maiores detalhes sobre a identificação dos parâmetros recomenda-se consultar (Furlanetto, V., 2005)<sup>68</sup>.

## 5.7 Eletrônica de potência

De forma geral, os circuitos de eletrônica de potência têm a tarefa de converter a energia fornecida pela fonte em uma forma, diferente da original, requerida pela carga. Portanto, a eletrônica de potência trata especificamente da aplicação de circuitos de componentes semicondutores na conversão e controle da energia fornecida à carga.

Na maioria dos sistemas de eletrônica de potência existem dois módulos principais. O circuito de potência é encarregado de realizar a transferência de potência da entrada para a saída do sistema. Nesta parte do sistema, a potência é elevada podendo atingir a ordem de centenas de gigawatts. O módulo de controle realiza um controle retroativo sobre as válvulas de potência presentes no circuito de potência. Este módulo pode ser visto como o cérebro do sistema, responsável pela decisão da quantidade de potência fornecida à carga. No sistema de controle, a potência envolvida é da ordem de centenas de miliwatts.

### 5.7.1 Componentes semicondutores

Os componentes semicondutores são utilizados nos sistemas de eletrônica de potência pela sua capacidade de conduzir corrente e/ou bloquear tensão. Quando os componentes estão ativados a condução de corrente é a característica a ser considerada. Quando o componente encontra-se desativado o interesse está na capacidade de bloquear a tensão. Componentes reais têm limitações sobre a capacidade máxima de transmissão de corrente e de bloqueio de tensão. Estas limitações são ilustradas na Figura 5.12.

Embora o contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento dos componentes semicondutores tenda a alargar rapidamente o campo de aplicabilidade desses componentes, pode-se perceber que as correntes envolvidas tanto no circuito primário quanto no secundário da máquina de solda superam 1kA. Portanto, tendo em vista as atuais limitações físicas dos componentes, conclui-se que somente SCRs (sigla inglesa para Retificadores Controlados de Silício) e GTOs podem ser empregados para a conversão da potência em máquinas de solda.

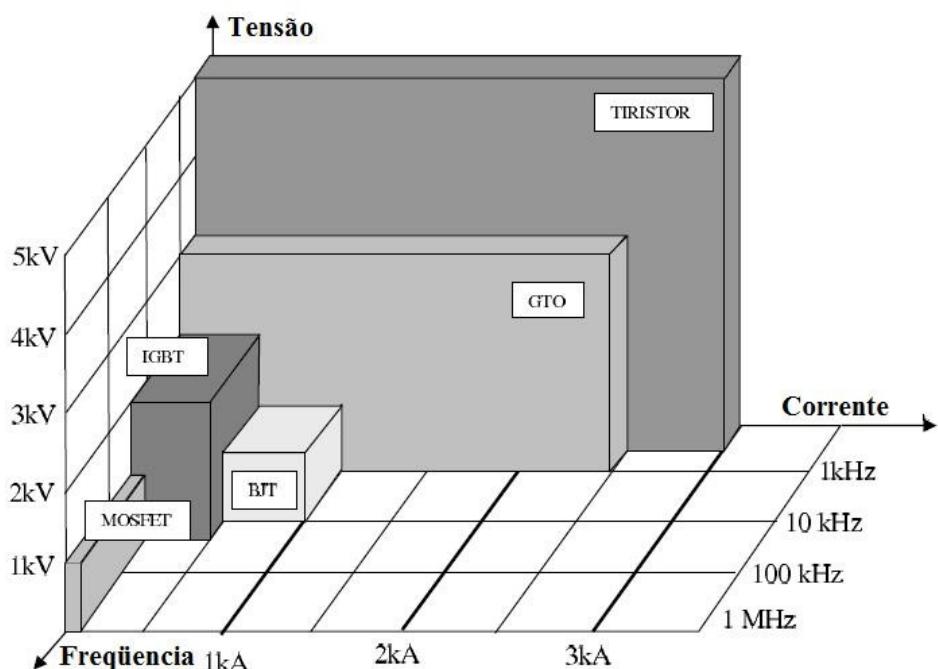


Figura 5.12: Campo de atuação dos componentes semicondutores

## 5.7.2 Tiristores

O termo genérico tiristor faz referência a uma família de componentes semicondutores, empregados em circuitos de potência. Os principais componentes desta família são: SCR (silicon-controlled rectifier), GTO (gate turn-off thyristor), TRIAC (triode ac switch), SIT (static induction transistor), SITH (static inductor thyristor). Os TRIACs, SITs e SITHs são capazes de conduzir 100A, 600A e 600A, respectivamente. Portanto, para este trabalho serão considerados somente SCRs e GTOs.

### 5.7.2.1 Retificadores Controlados de Silício (SCR)

O Tiristor SCR é o mais conhecido e aplicado dos Tiristores existentes. Os Tiristores SCR's funcionam analogamente a um diodo, porém possuem um terceiro terminal conhecido como Gatilho (Gate ou Porta). Este terminal é responsável pelo controle da condução (disparo). Em condições normais de operação, para um SCR conduzir, além de polarizado adequadamente (tensão positiva no Ânodo), deve receber um sinal de corrente no gatilho, geralmente um pulso.

A principal aplicação que os SCR têm é a conversão e o controle de grandes quantidades de potência em sistemas CC e CA, utilizando apenas uma pequena potência para o controle. Isso se deve à sua ação de chaveamento rápido, ao seu pequeno porte e aos altos valores nominais de corrente e tensão em que podem operar.

Algumas características dos SCR's:

- São chaves estáticas bi-estáveis, ou seja, trabalham em dois estados: não condução e condução, com a possibilidade de controle;
- São compostos por quatro camadas semicondutoras (P-N-P-N), três junções (P-N) e três terminais (Ânodo, Cátodo e Gatilho);
- Apresentam alta velocidade de comutação e elevada vida útil;
- Possuem resistência elétrica variável com a temperatura, portanto, dependem da potência que estiverem conduzindo.

A (Figura 5.13) apresenta a simbologia utilizada e as camadas, junções e terminais, enquanto a (Figura 5.14) mostra alguns SCR de alta potência com encapsulamento tipo rosca e tipo disco.

Um SCR ideal se comportaria com uma chave ideal, ou seja, enquanto não recebesse um sinal de corrente no gatilho, seria capaz de bloquear tensões de valor infinito, tanto com polarização direta como reversa. Bloqueado, o SCR ideal não conduziria qualquer valor de corrente.

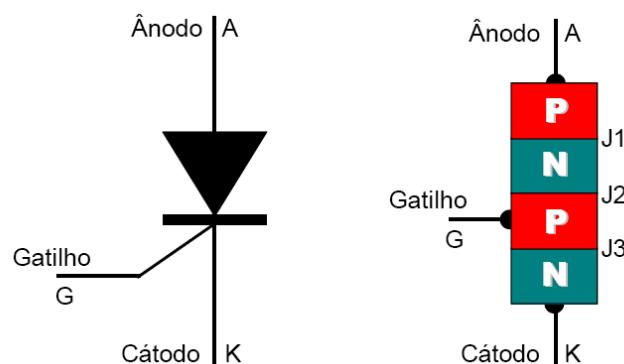


Figura 5.13: SCR: Simbologia, camadas e junções.



Figura 5.14: SCR com encapsulamentos tipo rosca e tipo disco para altas potências.

Quando disparado, ou seja, quando comandado por uma corrente de gatilho  $I_{GK}$ , o SCR ideal se comportaria como um diodo ideal. Nesta condição, o SCR ideal seria capaz de bloquear tensões reversas infinitas e conduzir, quando diretamente polarizado, correntes infinitas sem queda de tensão e perdas de energia por Efeito Joule.

Assim como para os diodos, tais características seriam ideais e não se obtêm na prática. Os SCR reais têm, portanto, limitações de bloqueio de tensão direta e reversa e apresentam fuga de corrente quando bloqueados. Quando habilitados têm limitações de condução de corrente, pois apresentam uma pequena resistência à circulação de corrente e queda de tensão na barreira de potencial das junções que provocam perdas de energia por Efeito Joule e consequente aquecimento do componente. Tais limites constituem as características estáticas reais como mostra a Figura 5.15. As curvas 1 e 2 apresentam as características para o SCR no estado de bloqueio, enquanto as curvas 1 e 3 mostram as características para o SCR com Corrente de Gatilho IGK, para ambas as polarizações. Pode-se, então, que a curva característica de um SCR real apresenta três regiões distintas:

- Bloqueio em Polarização Reversa – curva 1
- Bloqueio em Polarização Direta – curva 2
- Condução em Polarização Direta – curva 3

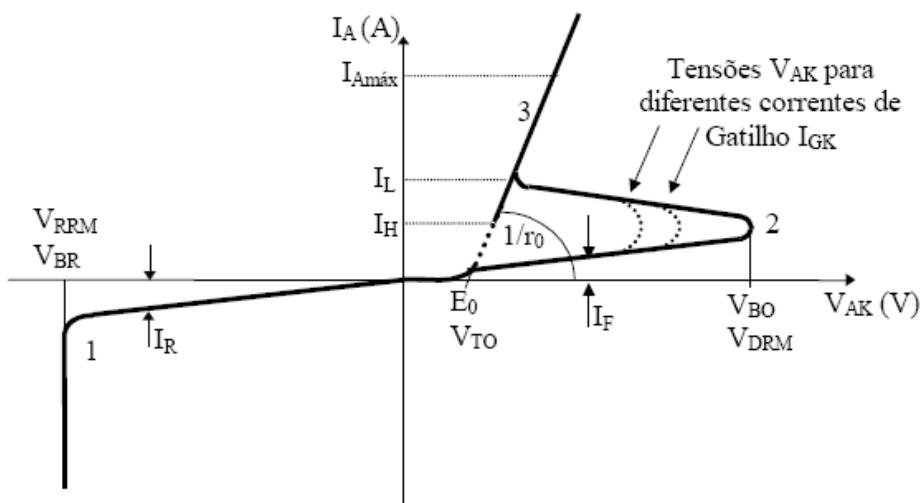


Figura 5.15: Características do SCR

### 5.7.2.2 GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

O GTO foi introduzido comercialmente em 1962. Como o SCR, ele pode ser ativado com um sinal positivo de corrente na porta de controle, mas o que o

diferença do SCR é que o GTO pode ser desativado aplicando um sinal negativo de corrente na porta de controle.

Os GTO são um particular tipo de tiristor e foram introduzidos no mercado em 1962. Com esta válvula de potência é possível comandar a transição do estado de bloqueio ao estado de condução, realizado através de um sinal de corrente positivo na porta de controle. Além disso, pode-se controlar a transição inversa, ou seja, do estado de condução ao estado de bloqueio injetando um sinal de corrente negativo da ordem de um terço da corrente a bloquear na porta de controle. Portanto os circuitos de comando tendem a ser caros. O símbolo e o campo de operação do GTO são ilustrados na Figura 5.16.

A tecnologia de fabricação do GTO é muito mais sofisticada do que aquela empregada na produção de SCR por necessitar da adoção de estratégias que visam a assegurar, na fase de desligamento, do inteiro esvaziamento da superfície de condução. Os GTO, na realidade, são constituídos de um grande número de pequenos SCRs, funcionando em paralelo, impressos sobre um único disco de silício.

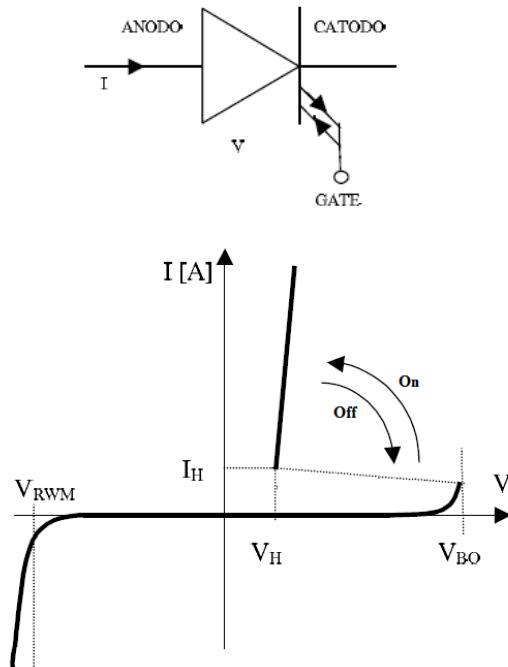


Figura 5.16: Símbolo e característica de operação do GTO

## 6 ANÁLISE DA QUALIDADE DO PONTO DE SOLDA UTILIZANDO REDES NEURAIS

### 6.1 Introdução

Os controles convencionais do processo de soldagem por resistência são baseados no monitoramento de corrente, tensão e força dos eletrodos, além de grandezas derivadas das anteriores como resistência dinâmica e potência. Estes parâmetros não fornecem informação sobre a condição do eletrodo. Eletrodos desgastados podem resultar num ponto de solda enfraquecido, ou até mesmo na inexistência do ponto. Outros fatores que influenciam negativamente na qualidade de um ponto de solda são o desalinhamento axial ou angular dos eletrodos e a má disposição das chapas a serem soldadas. Estas condições indesejadas de soldagem são representadas na Figura 6.1.

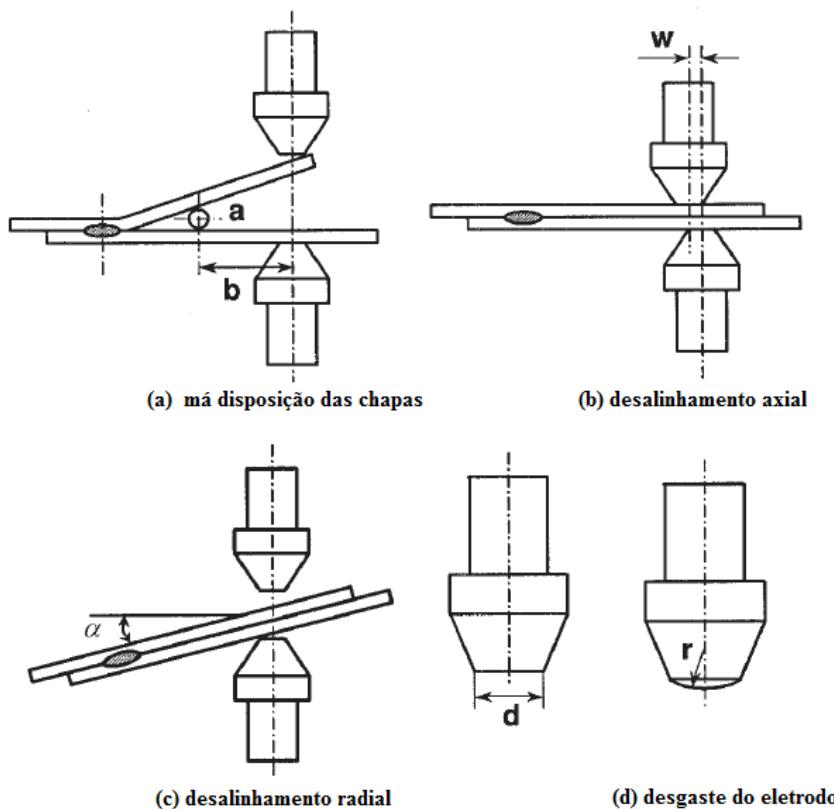


Figura 6.1: Possíveis condições anormais no processo de soldagem a ponto (Cho, Y; Hu, S.J.;Li, W. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture)

Para realizar o controle de qualidade dos pontos muitas vezes são efetuados ensaios destrutivos, os mais comuns são os ensaios de tração e de arrancamento. Neste procedimento, componentes são retirados diretamente da linha de produção e testados. A taxa de falhas é estimada e se existir evidências de falha no processo um lote todo de produtos pode ser perdido. O custo da mão-de-obra utilizada nos testes e o desperdício de produtos tornam esta abordagem de teste ineficiente.

Faz-se necessário uma estratégia de controle de qualidade na qual o monitoramento possa ser realizado on-line e todos os pontos de solda sejam inspecionados assim que o processo de soldagem esteja pronto. Para realizar tal controle de qualidade outras grandezas devem ser levadas em consideração.

Como se deseja que o controle seja realizado em 100% dos pontos obviamente os ensaios destrutivos não são uma opção. Há a necessidade de monitorar a qualidade de uma maneira alternativa. Uma técnica relativamente nova, porém bastante difundida consiste em analisar as propriedades dos pontos de solda através de ultra-sonografia (Stocco, D. 2004). Um exame ultrassônico do ponto de solda pode determinar o tamanho do mesmo assim como identificar qual a falha apresentada pelo ponto.

Com o objetivo de avaliar a qualidade do processo de SPR, vários tipos de sensores vêm sendo estudados. Em (Savage; Nippes; Wassel, 1978) foi concluído que a resistência dinâmica e o deslocamento do eletrodo fornecem as informações mais significantes sobre o surgimento e crescimento do ponto de solda em aços revestidos e não revestidos. (Johnson; Needham, 1972) relacionou o andamento do sinal de deslocamento dos eletrodos com a qualidade da solda.

Recentemente, as redes neurais vêm sendo empregadas para estimar a qualidade da solda. (Brown et al., 1995) utilizou RN para estimar o diâmetro da lenticilha, fator que possui uma correlação forte com a resistência do ponto de solda. (Dilthey; Dickersbach, 1999) usou uma metodologia similar para estimar a resistência a tensões de cisalhamento dos pontos de solda. (Yongjoon; Cho; Rhee, 2001) obtiveram uma relação entre a forma da curva de resistência dinâmica e a qualidade do ponto através de uma RN de Hopfield.

(J.D. Cullen et al.; 2006) propõe que a máquina de solda seja equipada com um conjunto de sensores. As saídas desses sensores serviriam de alimentação para uma rede neural artificial encarregada de determinar a qualidade do ponto de solda.

Na Figura 6.2 pode-se observar a máquina de solda original e a modificada pela montagem do conjunto de sensores. Foram usados, além dos sensores tradicionais de corrente e tensão, câmeras de vídeo e sensores infravermelho e ultrassonico.

Para uma detecção mais efetiva os sensores devem ser corretamente posicionados.

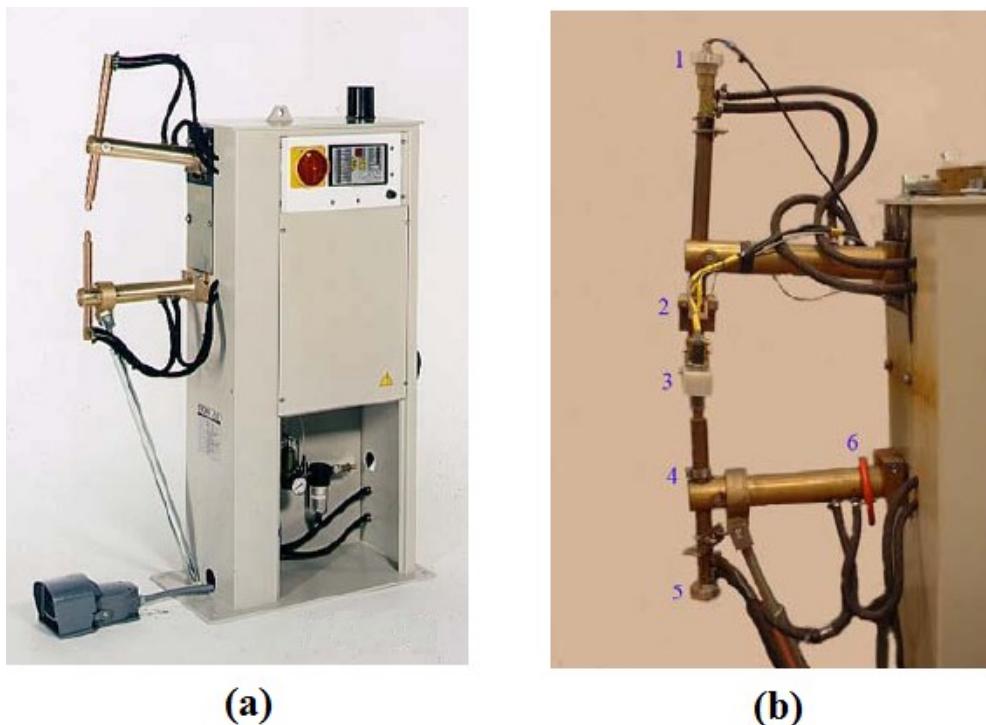


Figura 6.2: (a) Máquina de solda estática tradicional. (b) Sensores acoplados a máquina onde: 1- transmissor ultrassonico, 2- suporte regulável, 3- unidade de monitoramento contendo câmera de vídeo e infravermelho, 4- voltímetro, 5- receptor ultrassonico, 6- amperímetro de Rogowski (J.D. Cullen et al., 2006)

## 6.2 Sensores

### 6.2.1 Amperímetro

As correntes utilizadas nos processos de soldagem por resistência são muito elevadas. Por esta razão o amperímetro de Rogoswski é o mais indicado para a medição da corrente durante a soldagem. Nestes sensores o fluxo magnético atravessa um núcleo de ar o que possibilita a medição de correntes de grande amplitude e banda de freqüência. A maioria dos outros transdutores de corrente

possui núcleo magnético constituído de aço ou outro metal a base de ferro. Isto limita a amplitude da corrente mensurável devido a saturação magnética do metal, além disso, as perdas no ferro em altas freqüência limitam a banda passante desses sensores.

Devido a sua robustez, confiabilidade e possibilidade de um monitoramento remoto os sensores de Rogoswski são ideais para serem implantados no chão de fábrica, exceto pelo fato do seu elevado custo. No entanto, quase todas as máquinas de solda modernas vêm equipadas com amperímetro o que elimina a necessidade da compra deste equipamento.

No entanto, o problema de classificar o ponto de solda em bom ou ruim não é tão simples quanto monitorar as correntes envolvidas. Pode haver, por exemplo, outros contatos elétricos por onde a corrente pode fluir. Conclui-se que a corrente é um importante parâmetro a ser investigado, mas de forma alguma podemos ignorar outros parâmetros.

### **6.2.2 Voltímetro**

O monitoramento da tensão é importante para a determinação de grandezas a ela relacionadas como resistência dinâmica e potência.

### **6.2.3 Resistência dinâmica**

A resistência dinâmica oferece informações sobre o surgimento e o crescimento do ponto de solda e pode ser calculada usando as variáveis de processo corrente e tensão no circuito secundário. Uma alternativa para obtenção desta grandeza é monitorar a tensão e corrente no circuito primário e analisar o modelo equivalente do transformador com a carga do secundário refletida ao primário.

A fim de eliminar a componente relativa a queda de tensão indutiva, o valor instantâneo de corrente e tensão devem ser medidos quando a curva de corrente possui derivada zero.

#### 6.2.4 Sensor de infravermelho

O sensor infravermelho é um diodo fotoelétrico infravermelho. Na montagem sugerida por (J.D. Cullen et al., 2004) o sensor encontra-se a 45 graus e a 20mm de distância da ponta do eletrodo.

Este sensor é empregado para monitorar a quantidade de calor irradiada da ponta dos eletrodos. O diodo fotoelétrico infravermelho é relativamente barato, mecanicamente robusto e de dimensões diminutas. A aplicação deste tipo de diodo em condições de laboratório é satisfatória. Ao ser empregado no chão de fábrica, onde não se tem controle de fatores ambientais tais como irradiação luminosa natural, a radiação medida pode apresentar distorções. Um outro problema na utilização dessa tecnologia é que a leitura da densidade de raios infravermelhos emitidos tanto ponta do eletrodo quanto pela interface eletrodo/chapa não representam necessariamente uma medida do calor efetivamente responsável pela fusão do material.

#### 6.2.5 Sensor de ultrassom

Sensores piezoelétricos podem ser empregados como sensores de ultrassom, um exemplo desse sensor e seus componentes são ilustrados na Figura 6.3.

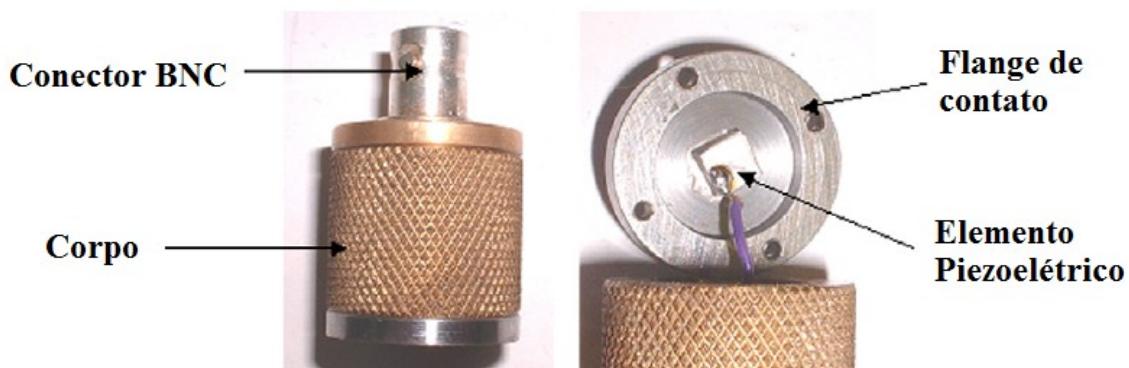


Figura 6.3: Sensor piezoelétrico (J.D. Cullen et al., 2004)

Dentre as duas principais formas de onda ultrassónicas, longitudinal e transversal, somente as ondas longitudinais são capazes de passar por líquidos. Durante o processo de formação do ponto de solda, o sinal ultrassônico reduz sua amplitude a medida que a lente está sendo formada.

O sinal de saída deste sensor pode ser analisado de acordo com sua amplitude, freqüência, máximas amplitudes e taxa de atenuação do sinal. Para alimentar a rede neural responsável pela caracterização da qualidade do ponto devemos primeiramente individuar as propriedades de interesse desse sinal.

Um exame ultrassônico pode tanto determinar o tamanho do ponto de solda quanto identificar qual a falha apresentada pelo ponto (Figura 6.4).

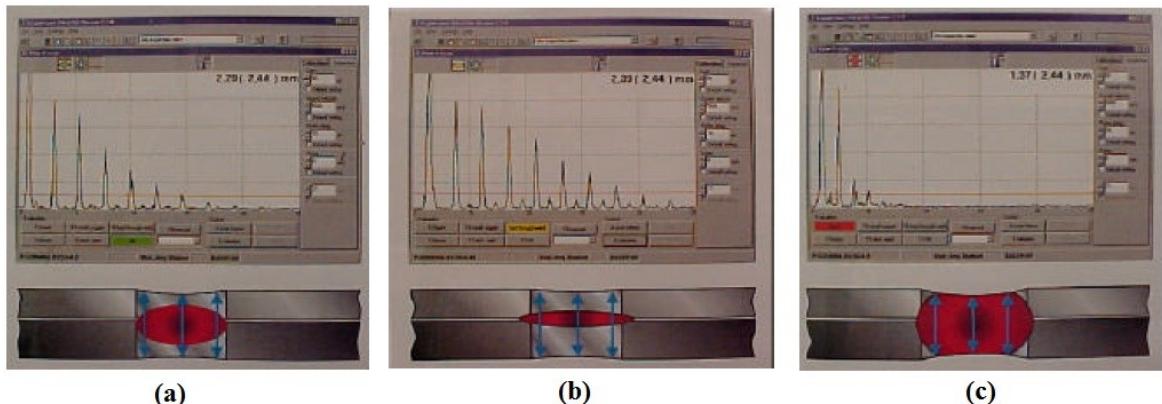


Figura 6.4: Identificação das características dos pontos de solda por exame de ultrassom (a) lente em ordem (b) ponto colado (c) ponto queimado. (Stocco, D; Gonçalves, R. , 2004)

### 6.2.6 Sensores de deslocamento e força

Nas máquinas de solda, em geral, o eletrodo inferior encontra-se fixo na estrutura enquanto o eletrodo superior é móvel. O deslocamento do eletrodo superior pode ser medido usando um sensor de triangulação laser enquanto a força de solda é obtida através de um sensor piezoeletrico. A aquisição desses dados é representada na Figura 6.5.

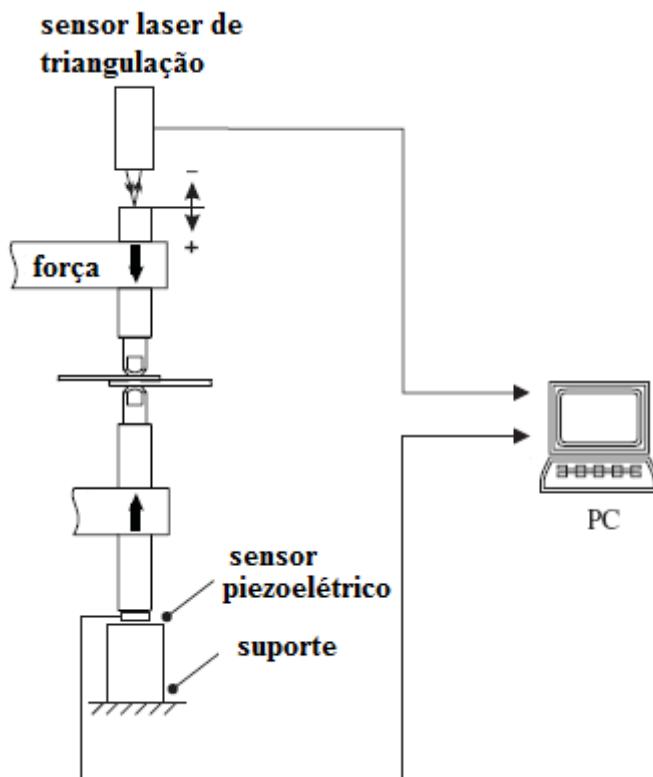


Figura 6.5: Montagem de sensores de deslocamento e força.

### 6.3 Controle da qualidade da solda através de exame de ultrasonografia utilizando redes neurais

A interpretação dos exames de ultrassonografia do ponto e a classificação do ponto de solda em função de sua qualidade é um problema de reconhecimento de padrões, portanto redes neurais podem ser utilizadas para automatizar o processo.

#### 6.3.1 Variáveis de entrada da rede neural

A fim de alimentar uma rede neural com os dados provenientes da ultrassonografia devemos filtrar o sinal retirando dele os dados de interesse. (Martín et al., 2006) afirma que para determinar o número de variáveis de entrada da RN deve-se buscar um equilíbrio entre representação do fenômeno e complexidade da RN resultante e propõe que alimentação da RN seja realizada por um vetor de dez componentes (Figura 6.6) sendo eles:

- Os primeiros cinco componentes são os picos relativos dos ecos: a  $n$ -ésima componente ( $n=1, \dots, 5$ ) é a amplitude do  $(n+1)$ -ésimo eco dividido pela amplitude do primeiro eco;
- Os últimos cinco componentes são as distâncias entre ecos consecutivos: a  $n$ -ésima componente ( $n=6, \dots, 10$ ) é a distância entre o  $(n-4)$ -ésimo eco e o  $(n-5)$ -ésimo eco.

### 6.3.2 Caracterização do ponto de solda por exames de ultrasonografia

O nível de qualidade do ponto de solda é estimado do seu respectivo exame de ultrassonografia. A estimativa é baseada no efeito da lentilha de solda nas ondas ultrassonicas. Dois parâmetros da lentilha são considerados:

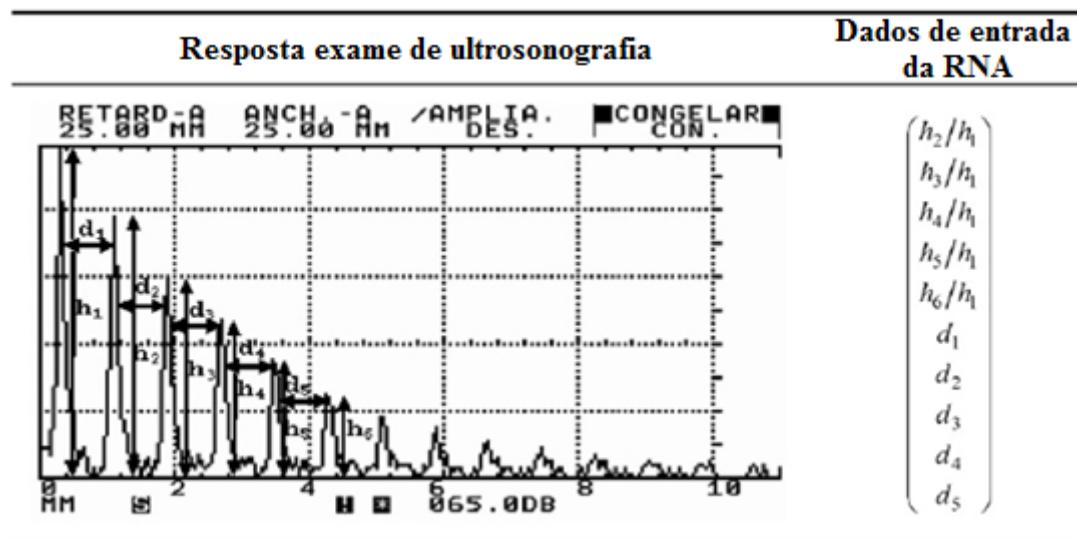


Figura 6.6: Parâmetros extraídos do teste de ultrasonografia (esquerda) e vetor contendo os dados necessários para alimentar a rede neural. (Martín et al., 2006)

- **Microestrutura da lentilha de solda:** a lentilha possui uma microestrutura com grãos mais grosseiros do que aqueles do metal de origem, portanto na região da lentilha tem-se uma maior atenuação. A zona termicamente afetada (ZTA) possui uma microestrutura recristalinizada com grãos pequenos e

alinhados que produzem uma pequena atenuação. A influência da HAZ nos exames de ultrassonografia pode ser desprezada;

- **Tamanho da lentalha de solda:** Ecos de uma camada aparecem entre as componentes principais do eco se o diâmetro da lentalha é menor que o comprimento de onda do ultrassom o que resulta em parte da reflexão ocorrendo na interface entre as duas chapas. Uma lentalha espessa produz uma maior atenuação que uma lentalha fina.

### 6.3.3 Classificação do ponto de solda

Os pontos de solda podem ser classificados de acordo com quatro níveis de qualidade (Cho; Kim; Rhee, 2001). A classificação dos pontos em 4 categorias implica na utilização de dois bits para caracterizá-los.

- Ponto bom (1 1);
- Ponto pequeno (0 1);
- Ponto colado (1 0);
- Ponto solto (0 0).

**Ponto bom:** A estrutura metalográfica básica de um ponto de solda em ordem consiste em um núcleo de estrutura baínitica, com grãos colunares direcionados preferencialmente no sentido vertical, contornado por uma região termicamente alterada, diminuindo progressivamente para uma estrutura praticamente inalterada junto às superfícies das chapas. A espessura do ponto é suficiente para produzir uma alta atenuação, portanto a sequência de ecos é pequena. O diâmetro da lentalha é maior que a largura do feixe de ultrassom. A distância entre ecos consecutivos é a espessura combinada das duas chapas porque a reflexão da onda ultrassônica ocorre na superfície inferior da segunda chapa.

**Ponto pequeno:** Os grãos encontram-se alinhados numa mesma direção. O diâmetro do ponto é menor que a largura da onda de ultrassom, assim a reflexão

que ocorre na interface entre as duas chapas dá origem a ecos de uma camada entre as componentes principais de eco.

**Ponto colado:** A microestrutura é semelhante ao do ponto pequeno, mas a espessura da lenticilha é menor. O diâmetro do ponto é maior que a o comprimento das ondas de ultrassom. A seqüência de ecos é mais longa pela menor atenuação. A distância entre os ecos é a espessura combinada das duas chapas.

**Ponto solto:** Não existe fusão de material, portanto os grãos são pequenos e não se encontram orientados. A seqüência de ecos é a maior porque a atenuação é muito baixa. A distância entre ecos é a mais estreita dada a descontinuidade entre as duas chapas.

## 6.4 Controle de qualidade do ponto de solda utilizando o monitoramento da resistência dinâmica

Em geral, a curva de resistência dinâmica possui o andamento qualitativo apresentado na Figura 6.7. Dez características extraídas desta curva podem ser usadas para caracterizar o ponto de solda. Esses dez índices podem servir de variáveis de entrada para uma rede neural.

### 6.4.1 Variáveis de entrada da rede neural

Os índices relevantes são:

- X1: Localização temporal do pico beta. Indica quando o começa o surgimento do ponto da lenticilha;
- X2: Medida da taxa de calor;
- X3: Diferença entre a máxima e a mínima resistência após o pico beta;
- X4: Variação máxima da resistência entre dois ciclos consecutivos, posteriores ao pico beta;

- X5: Máxima resistência dinâmica;
- X6: Resistência dinâmica inicial;
- X7: Resistência dinâmica final;
- X8: Resistência dinâmica média;
- X9: Desvio padrão da resistência dinâmica;
- X10: Desvio padrão da diferença de resistência dinâmica entre dois ciclos consecutivos

Um modelo de regressão linear multivariável foi utilizado (Cho, Y. et al,2001)<sup>92</sup> para determinar que os índices X1, X2, X5 e X9 apresentam uma forte correlação com a qualidade do ponto de solda quanto o critério de qualidade é a resistência a tensões de cisalhamento.

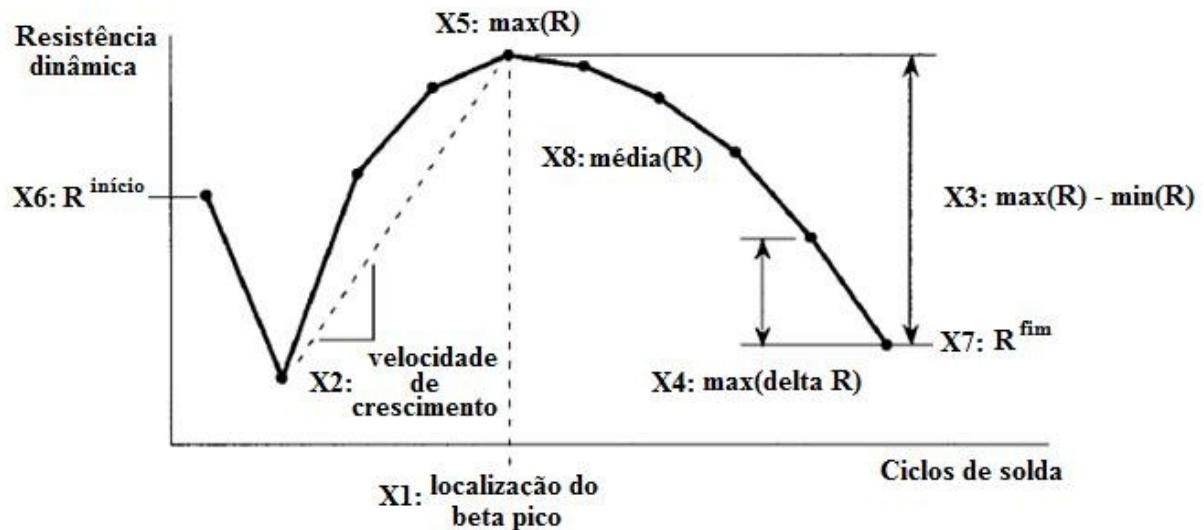


Figura 6.7: Índices que podem ser extraídos da curva de resistência dinâmica.  
(Cho, Y.; Kim, Y. ;Rhee, S.- Proc Instn Mech Engrs Vol 215 Part B)

## 7 CONTROLADOR A LÓGICA NEBULOSA

Para controlar a quantidade de energia fornecida ao ponto propõe-se a utilização de um controlador a lógica nebulosa. A necessidade de implementar este tipo de controlador pode ser justificada realizando-se uma análise do sistema sob controle. A presença de parâmetros que variam durante o processo de soldagem caracteriza um sistema tempo-variante. Entre esses parâmetros destaca-se a resistência dinâmica. Além disso, a presença de tiristores no circuito de eletrônica de potência torna o sistema não-linear.

Quando um sistema é não-linear e tempo-variante não se pode aplicar a teoria de controle clássica para a obtenção de um controlador. No caso da máquina de solda uma linearização em torno do equilíbrio não representaria o funcionamento do sistema de maneira adequada.

Para construir um controlador à lógica nebulosa não é necessário um modelo matemático do sistema. A lógica sobre a qual é baseado o controlador pode ser extraída do conhecimento de especialistas e uma descrição verbal do sistema é utilizada, o que torna o processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento do controlador mais facilmente comprehensível. Também vale ressaltar que uma característica intrínseca da lógica nebulosa é sua capacidade de lidar com dados imprecisos.

Pelas características acima apresentadas, pode-se concluir que um controlador a lógica nebulosa é uma boa opção para o controle da quantidade de energia transmitida ao ponto de solda.

Neste trabalho foi implementado um sistema nebuloso com o objetivo de determinar o ângulo de disparo  $\alpha$  (Figura 7.1) dos tiristores presentes no controle de solda. Através do controle do ângulo de disparo dos tiristores pode-se regular a corrente eficaz e, conseqüentemente, a energia dissipada por efeito Joule no circuito secundário.

O controle da corrente eficaz de secundário pode ser encarado como um primeiro passo quando se deseja garantir a qualidade do ponto de solda. Vale ressaltar que muitas outras grandezas estão envolvidas no processo de soldagem e o controle somente da corrente não garante um ponto de solda de qualidade. Por

exemplo, um aumento da força do eletrodo resulta num menor ponto de solda mesmo ao se manter a corrente constante.

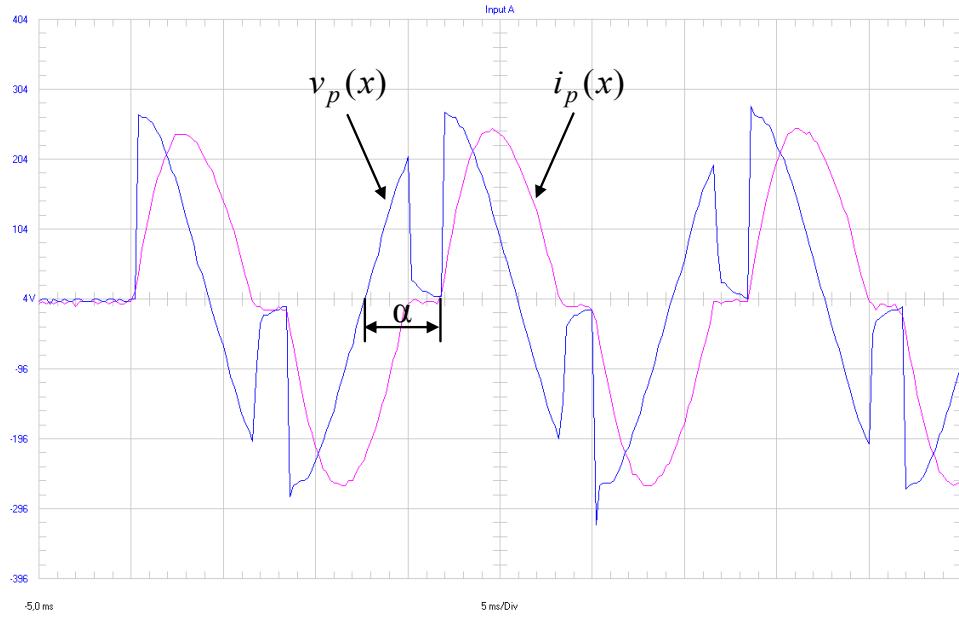


Figura 7.1: Comportamento característico do tensão e corrente no circuito primário do transformador de solda. (Furlanetto,V. 2005)

## 7.1 Análise do sistema

Uma análise do sistema nos mostra, como foi observado na descrição das características elétricas da máquina de solda monofásica CA, que se trata de um circuito resistivo-indutivo. A componente indutiva não permite que uma variação brusca de tensão resulte em uma mudança brusca de corrente. Assim, quando o tiristor for disparado pelo circuito de comando e a tensão da fonte for imposta ao circuito primário do transformador o andamento da corrente representará um atraso em relação à tensão como se pode observar na Figura 7.1.

Este atraso depende da geometria da máquina, portanto cada máquina de solda possui um valor característico de atraso de fase da corrente em relação a tensão. Esta propriedade pode tornar-se crítica nas máquinas de solda móveis nas quais o transformador encontra-se suspenso e a pinça de solda é transportada por um operador. Como a pinça está ligada ao transformador por condutores um

controlador que seja capaz de adaptar-se a situações onde este condutor possa estar disposto de modo a aproximar-se de uma bobina se faz necessário.

Podem-se individuar dois tiristores que recortam a tensão. O primeiro deles atua durante o semi-ciclo positivo e a partir de agora será identificado por transitor 1. O segundo age de maneira de tudo análoga, porém durante o semi-ciclo negativo e será identificado por transitor 2.

A fim de manter a integridade dos componentes elétricos da máquina, torna-se necessário impedir o disparo de um transistores antes que o outro se encontre em estado de bloqueio, ou seja, antes que o valor da corrente de primário seja zero.

Para maximizar o ritmo produtivo da máquina a solda deve ser realizada o mais rapidamente possível. A otimização da quantidade de energia transmitida ao ponto de solda é obtida através da obtenção do menor ângulo de disparo possível. Este ângulo maximiza o valor da corrente eficaz de secundário e, consequentemente, as perdas por efeito Joule responsáveis pela soldagem. A Figura 7.2 mostra o andamento de tensão e corrente no circuito primário da máquina de solda para diferentes ângulos de disparo dos tiristores.

## 7.2 Construção do controlador

### 7.2.1 Estrutura do controlador

O controlador a lógica nebulosa foi elaborado em MATLAB utilizando-se o pacote Fuzzy Logic Toolbox e é representado na Figura 7.3.

Desenvolveu-se um sistema com a seguinte arquitetura:

- Tipo: Mandani;
- T-norma: Mínimo;
- S-norma: Máximo;
- Método de denebulização: Centróide.
- Conseqüência: Mínimo;

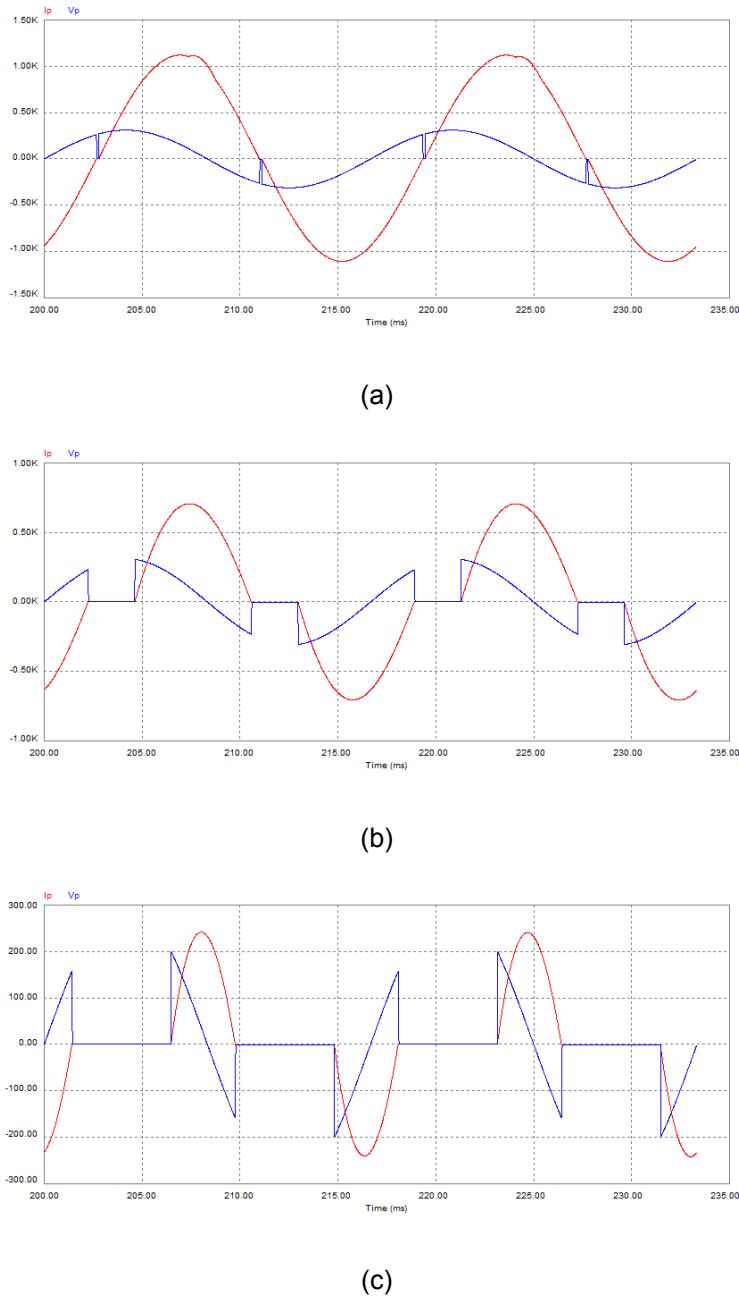


Figura 7.2: Andamento da tensão e corrente de primário para ângulos de disparo de 60 (a), 80 (b) e 120 (c) graus. Para estes ângulos obtém-se uma corrente eficaz no secundário da ordem de 23.06kA, 12.75kA e 3.26kA respectivamente.

- Agregação: Máximo;
- Variáveis de entrada:
  - `anguloDisparo`: Representa uma realimentação do sistema de controle com o ângulo de disparo utilizado no passo anterior. Esta variável permite um comportamento adaptativo ao sistema;

- zeroCorrente: Representa o instante em que a corrente de primário retorna a ser nula após o disparo anterior, ou seja, o instante em que o tiristor está habilitado a realizar um novo disparo;
- energia: É uma medida da quantidade de energia que falta para realizar o ponto. Esta variável é utilizada para impedir o disparo do tiristor acarrete a queima do ponto de solda.

- Variáveis de saída:
  - proximoAngulo: Corresponde ao próximo ângulo de disparo do tiristor;
  - operacao: Habilita ou não o disparo do transistor de acordo com a quantidade de energia entregue ao ponto. Na realidade esta variável especifica quando o processo de soldagem chegou ao final e desabilita ambos os tiristores.

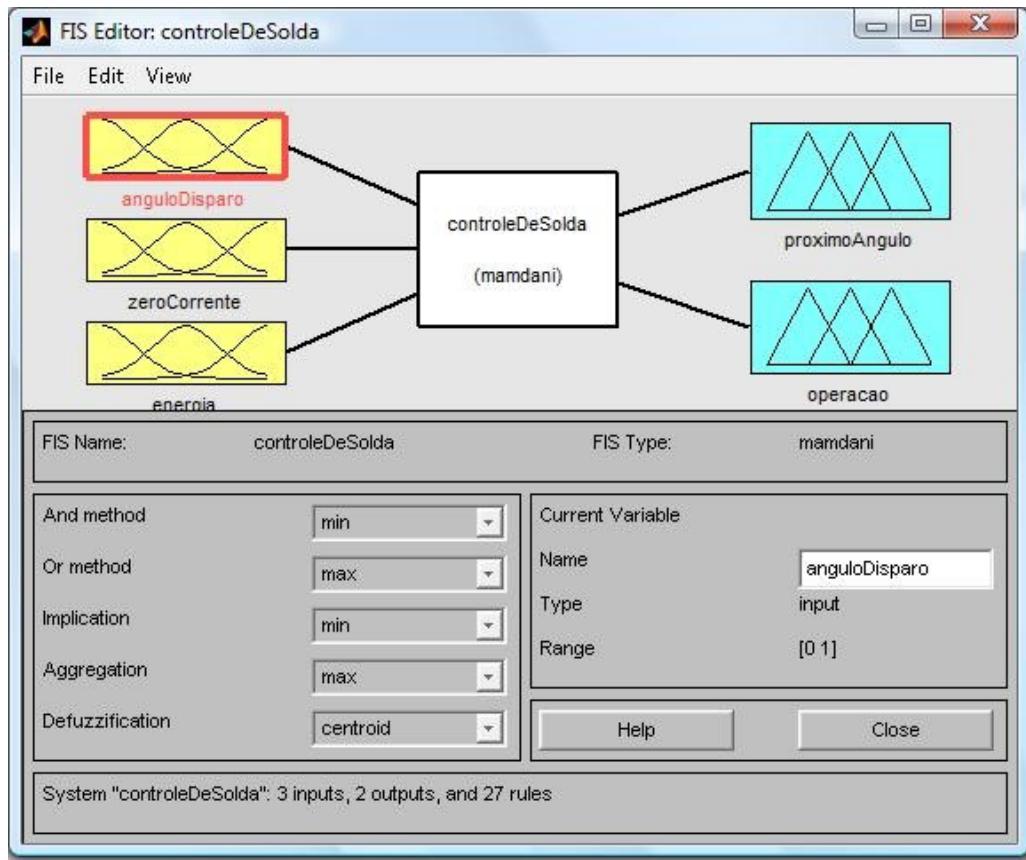


Figura 7.3: Representação do controle a lógica nebulosa implementado

## 7.2.2 Funções de pertinência

- **anguloDisparo, proximoAngulo e zeroCorrente**

As funções de pertinência das variáveis `anguloDisparo`, `proximoAngulo` e `zeroCorrente` foram construídas de maneira análoga e são de tudo idênticas. Uma representação da função de pertinência do ângulo de disparo é apresentada na Figura 7.4. Os ângulos de disparo e o momento em que a corrente de primário vai a zero foram divididos em cinco categorias, sendo elas: muito pequeno (MP), pequeno (P), médio (M), grande (G) e muito grande (MG). O universo de discurso foi normalizado de maneira a pertencer ao intervalo  $[0,1]$ . Esta normalização é obtida dividindo-se o ângulo de disparo pelo semi-período da tensão da fonte. No Brasil, como a alimentação elétrica é realizada em 60 Hz, tem-se que um semi-período corresponde a  $1/120$  segundos.

Note que como o controlador não distingue qual semi-período está sendo analisado. A determinação de qual tiristor deverá ser disparado será realizada de acordo com o sinal da tensão da tensão no primário. Se a tensão for positiva o tiristor 1 deverá ser acionado, caso a tensão seja negativa dispara-se o tiristor 2. Este controle vem realizado fora do sistema nebuloso. Isto permite que caso o tempo necessário para o processamento das informações desabilite o disparo do tiristor, ou seja, o ângulo de disparo previsto pertença a um instante de tempo passado este ângulo vem armazenado para o disparo no próximo semi-ciclo de tensão.

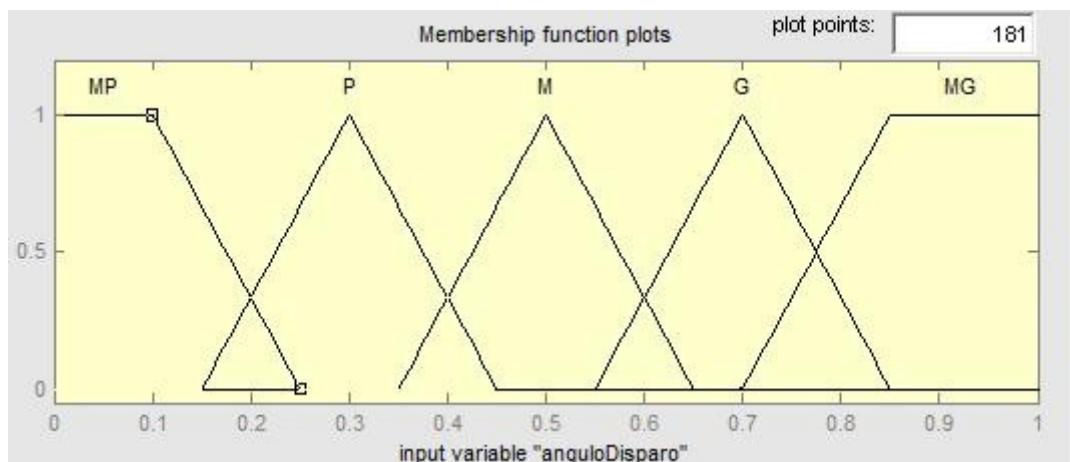


Figura 7.4: Função de pertinência da variável de entrada ângulo de disparo. As funções de pertinência das variáveis `zeroCorrente` e `proximoAngulo` são identicas a esta.

- **energia**

A função de pertinência da variável de entrada energia (Figura 7.5) foi dividida em cinco categorias de acordo com a quantidade de energia a ser transmitida ao ponto de solda, sendo elas: excesso, ok, falta pouco (FP), falta médio (Fmed) e falta muito (FM).

O universo de discurso foi normalizado de acordo com a seguinte relação:

$$\frac{E_0 - E}{E_0} \quad (7.1)$$

onde  $E_0$  é o total de energia necessário e  $E$  é a energia transmitida até o momento.

Assim, um valor negativo de energia significa que foi aplicada uma energia em excesso na formação do ponto de solda. A divisão em FP, Fmed e FM visam a evitar que os tiristores forneçam a máxima energia possível para um ponto de solda que requer apenas uma pequena quantidade de energia para ser completo.

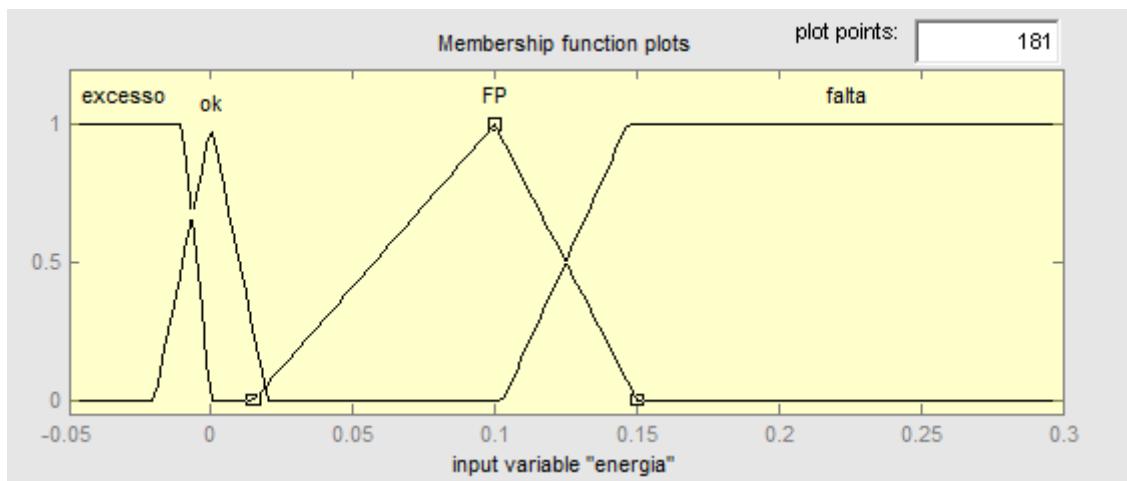


Figura 7.5: Função de pertinência da variável de entrada energia.

- **operação**

A variável operação decide se continuar a operação de soldagem ou não de acordo com a energia. Quando assume o valor liga a operação deve continuar a ser

executada. O valor desliga significa que os tiristores não devem mais ser disparados pois a formação do ponto de solda já está completa. A função de pertinência é representada na Figura 7.6. Portanto caso a variável operação seja positiva o circuito de comando dos tiristores continua permitindo a transmissão de energia, caso contrário o fornecimento é interrompido.

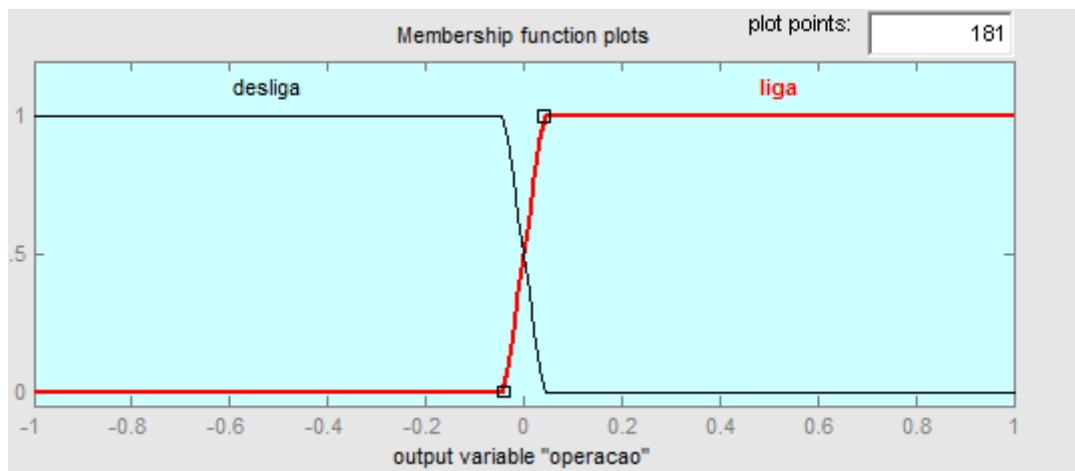


Figura 7.6: Função de pertinência da variável de saída operação.

### 7.2.3 Regras

Conjuntos nebulosos e operadores nebulosos podem ser vistos como sujeitos e verbos na lógica nebulosa. Um controlador a lógica nebulosa tem seu comportamento definido por uma série de sentenças se-então que regem o seu comportamento. Uma única sentença tem a forma: se energia é excesso então operação é desliga. [Onde, excesso e desliga são valores lingüísticos definidos sobre conjuntos nebulosos com amplitudes (universo de discurso) em  $]-0.05, 0]$  e  $]-1, 0.04]$  , respectivamente. A primeira parte da regra (energia é excesso) é chamada de antecedente ou premissa enquanto a segunda parte (operação é desliga) recebe o nome de conseqüente ou conclusão.

Note que excesso é representado por um número entre 0 e 1, portanto o antecedente é uma premissa que retorna um único número entre 0 e 1. Por outro lado, desliga é representado por um inteiro conjunto nebuloso, portanto o

consequente atribui todo o conjunto nebuloso desliga a variável de saída operação. Como veremos posteriormente este conjunto precisará ser denebulizado atribuindo um único valor à variável de saída.

Interpretar uma regra se então envolve duas etapas distintas: a primeira consiste em nebulizar as variáveis de entrada e aplicar as operadores nebulosos necessários e a segunda aplicar o resultado ao consequente.

As regras mais importantes do sistema de controle são as que relacionam o ângulo de disparo anterior com o instante em que a corrente de primário se anula para determinar o próximo ângulo de disparo. Ou seja, a determinação da variável de saída `proximoAngulo` em função das variáveis de entrada `anguloDisparo` e `zeroCorrente`. Seis diferentes estratégias de controle serão testadas, estas estratégias encontram-se nas Tabelas 1-6.

Todas as estratégias são construídas de forma a forçar o sistema a convergir para um dos valores da sua diagonal principal como é ilustrado na Figura 7.7. Ou seja, o sistema tende a um equilíbrio tal que os ângulos de disparo anterior e presente sejam os mesmos.

		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	M	M	→ M
	P	MP	P	M	G	G
	M	MP	P	M	G	MG
	G	P	P	M	G	MG
	MG	M	M	M	G	MG

Figura 7.7: Exemplo da convergência das regras de controle

Porém, em alguns casos particulares o sistema pode oscilar em torno de uma condição de equilíbrio (Figura 7.8), não convergindo para um valor na sua diagonal principal. A probabilidade de o sistema entrar em regime oscilatório cresce ao se implementar uma estratégia de controle que busque a convergência muito rapidamente. Portanto, deve-se buscar uma estratégia ótima que assegure a convergência no menor tempo possível.

		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	M	G	MG
	P	MP	P	M	G	MG
	M	MP	P	M	G	MG
	G	MP	P	M	G	MG
	MG	MP	P	M	G	MG

Figura 7.8: Exemplo onde as regras de controle são cíclicas.

Neste trabalho as seis estratégias de controle foram elaboradas de maneira gradual. A primeira delas (Tabela 7-1) tem a convergência mais lenta, pois os ângulos de disparo consecutivos podem variar no máximo de um nível. As estratégias seguintes tornam-se gradualmente mais agressivas no sentido de buscar a convergência cada vez mais rapidamente.

Tabela 7-1: Estratégia de controle 1

Estratégia 1		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	P	P	P
	P	MP	P	M	M	M
	M	P	P	M	G	G
	G	M	M	M	G	MG
	MG	G	G	G	G	MG

Tabela 7-2: Estratégia de controle 2

Estratégia 2		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	P	M	M
	P	MP	P	M	M	G
	M	P	P	M	G	G
	G	P	M	M	G	MG
	MG	M	M	G	G	MG

Tabela 7-3: Estratégia de controle 3

Estratégia 3		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	M	M	M
	P	MP	P	M	G	G
	M	MP	P	M	G	MG
	G	P	P	M	G	MG
	MG	M	M	M	G	MG

Tabela 7-4: Estratégia de controle 4

Estratégia 4		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	M	M	G
	P	MP	P	M	G	G
	M	MP	P	M	G	MG
	G	P	P	M	G	MG
	MG	P	M	M	G	MG

Tabela 7-5: Estratégia de controle 5

Estratégia 5		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	M	G	G
	P	MP	P	M	G	MG
	M	MP	P	M	G	MG
	G	MP	P	M	G	MG
	MG	P	P	M	G	MG

Tabela 7-6: Estratégia de controle 6

Estratégia 6		zeroCorrente				
		MP	P	M	G	MG
anguloDisparo	MP	MP	P	M	G	MG
	P	MP	P	M	G	MG
	M	MP	P	M	G	MG
	G	MP	P	M	G	MG
	MG	MP	P	M	G	MG

As regras apresentadas nas tabelas 7.1 a 7.6 são do tipo:

Se (anguloDisparo é pequeno) e (zeroCorrente é grande) então (proximoAngulo é médio)

As superfícies de controle relativas as regras de 1 a 6 estão ilustradas na Figura 7.9. Esta figura mostra a mudança no formato das superfícies de controle ao se passar de uma estratégia de controle mais lenta a uma mais rápida. Pode-se notar um dependência gradativamente menor da variável anguloDisparo. No limite, a ação de controle deixa de ser recursiva, ou seja, possui uma correlação fraca com a variável anguloDisparo e passa a depender somente da variável zeroCorrente.

Para completar a lógica de funcionamento do controlador, regras relativas ao seu funcionamento devem ser implementadas. Através dessas regras o controlador decidirá pela continuação ou não da transmissão de energia ao ponto. Essas regras são apresentadas na Tabela 7.7 e são do tipo:

Se (energia é excesso) ou (energia é ok) então (operação é desliga)

Quando o processo de soldagem encontra-se no fim, ou seja, apenas uma pequena quantidade de energia é necessária para finalizá-lo há a necessidade de impor uma regra responsável por habilitar somente os ângulos de disparos que possibilitem a transmissão de pequenas quantidades de energia. Estas regras são do tipo:

Se (energia é falta pouco) então (proximoAngulo é G) ou (proximoAngulo é MG)

Tabela 7-7: Regras que relacionam energia, operação e o próximo ângulo de disparo

		operação	próximoAngulo
energia	excesso	desliga	***
	ok	desliga	***
	falta pouco	liga	G ou MG
	falta	liga	***

As superfícies de controle relativas a estas últimas regras são apresentadas na Figura 7.10. Pode-se constatar que, como projetado, a variável de saída operação depende somente da quantidade de energia fornecida ao ponto.

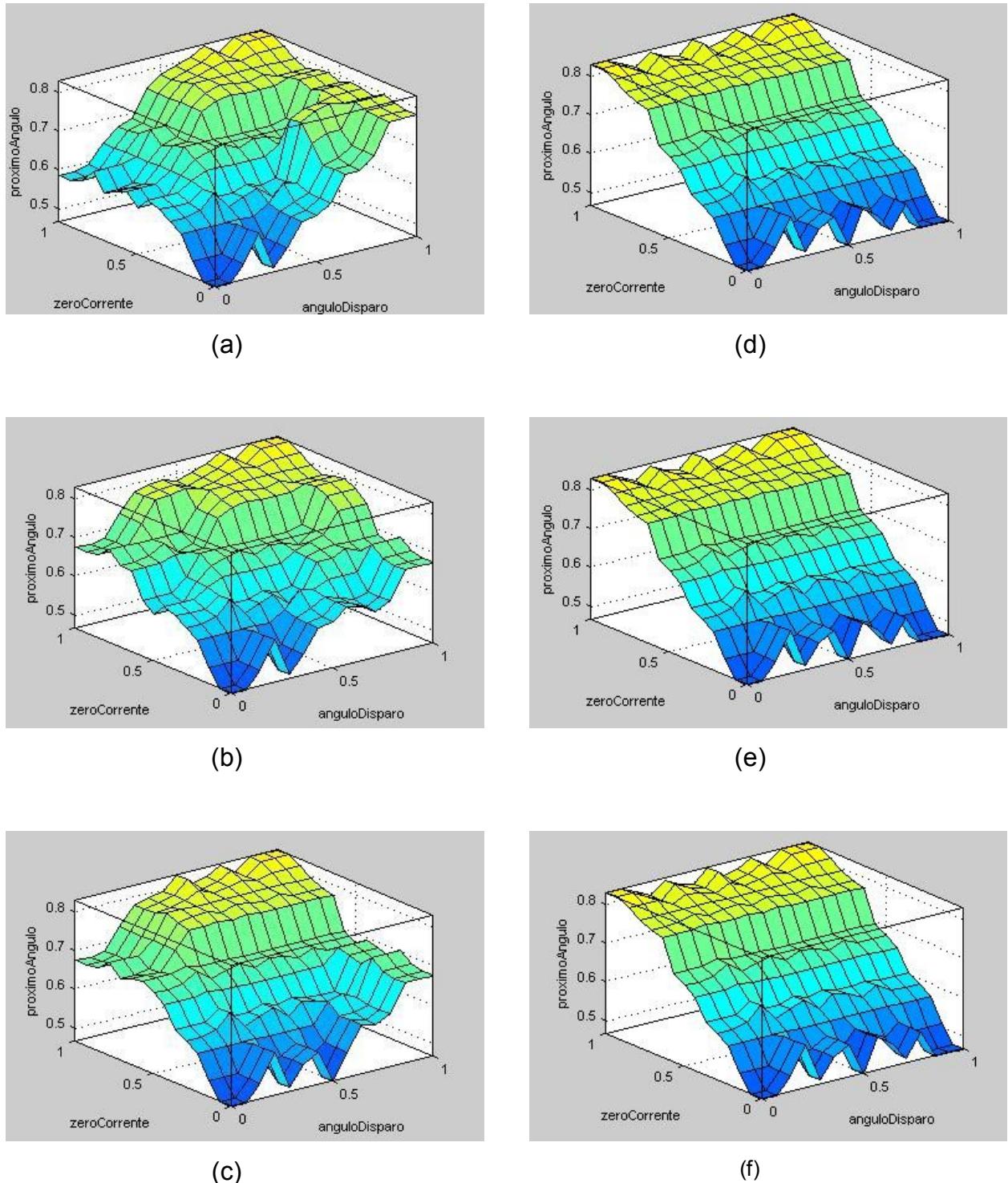


Figura 7.9: Superfícies de controle que relacionam as variáveis de entrada *zeroCorrente* e *anguloDisparo* com a variável de saída *proximoAngulo*. (a) estratégia 1, (b) estratégia 2, (c) estratégia 3, (d) estratégia 4, (e) estratégia 5 e (f) estratégia 6.

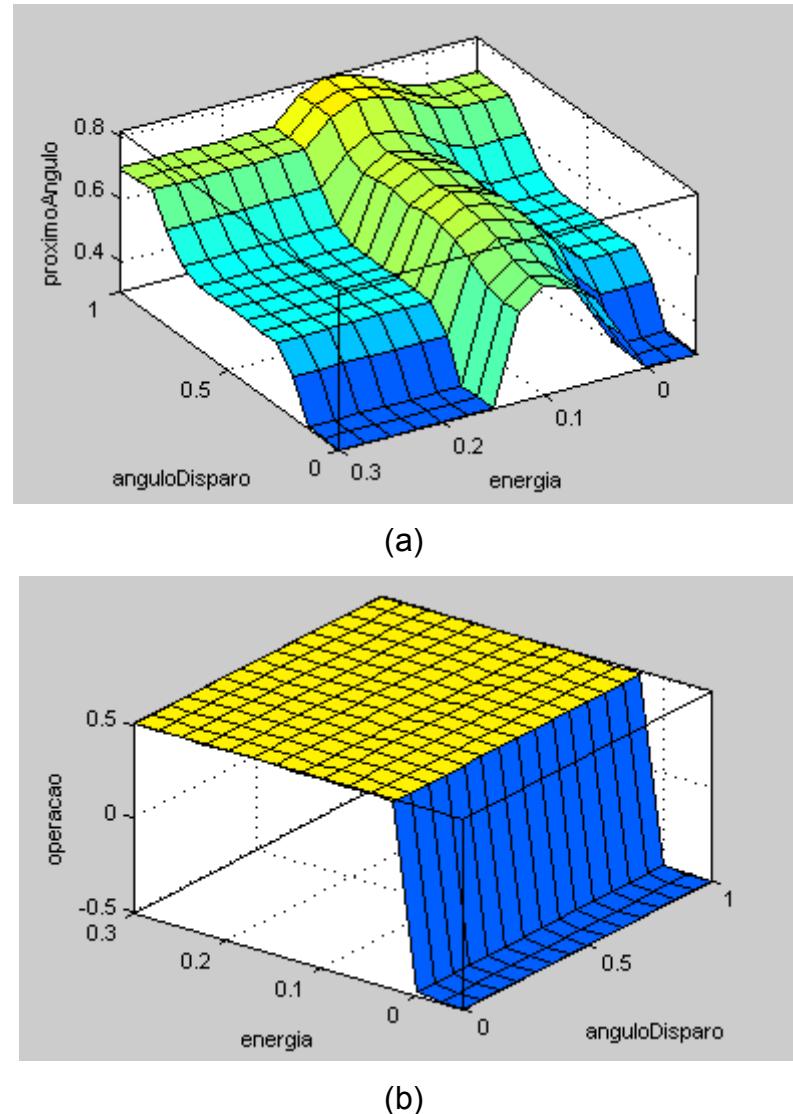


Figura 7.10: Superfícies de controle que relacionam as variáveis *proximoAngulo* e *energia* (a) e *energia* e *operação* (b).

## 8 CONCLUSÃO

O processo de solda a ponto por resistência é de fundamental importância para a indústria automotiva sendo empregado, principalmente, na montagem de carrocerias.

Após um estudo do processo, ficou evidente a existência de não-linearidades e de fenômenos térmicos, elétricos, mecânicos e metalúrgicos fortemente acoplados.

Além disso, ao tentar modelar o efeito da deformação do eletrodo o processo torna-se tempo variante.

A modelagem através de métodos numéricos como MEF e MDF mostraram-se úteis para obter informações sobre o processo. Porém, por serem custosos do ponto de vista computacional, não são apropriados para serem inseridos em um anel de controle em tempo real.

As técnicas de inteligência artificial vêm mostrando-se muito úteis na modelagem e controle do processo de solda a ponto por resistência. A utilização de redes neurais na modelagem permite obter uma correlação entre as variáveis de entrada e saída sem a necessidade de construir um modelo matemático explícito do sistema. Além disso, trata-se de um modelo computacionalmente apropriado para ser inserido num anel de controle em tempo real. Este trabalho sugere o emprego de redes neurais no controle de qualidade dos pontos de solda. Propõem-se o monitoramento da resistência dinâmica e/ou exames de ultrassonografia como maneiras de monitorar a qualidade dos pontos.

Após um estudo da máquina de solda, foi proposto um sistema de controle da energia transmitida ao ponto utilizando lógica nebulosa. O controle da energia fornecida ao ponto é feito por retificadores controlados de silício através da determinação de seus ângulos de disparo. Portanto, cabe ao controlador a lógica nebulosa a tarefa de controlar o ângulo de disparo respeitando os vínculos de energia fornecida ao ponto de solda e a característica indutiva da máquina de solda.

## 9 TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do presente trabalho não foi possível proceder com a implementação de um sistema de controle adaptativo para o processo de solda a ponto por resistência devido a indisponibilidade dos sensores necessários ao monitoramento do processo.

Sugere-se que seja adotada a arquitetura de controle ilustrada na Figura 9.1. Essa arquitetura permite que sejam inseridas diferentes regras de controle para o controlador a lógica nebulosa. Por exemplo, pode-se expandir o controlador apresentado no presente trabalho levando em consideração tanto o ângulo de disparo dos tiristores quanto a força aplicada pelos eletrodos. Dessa maneira, o controlador será capaz de realizar uma ação de controle capaz de controlar parâmetros elétricos e mecânicos da máquina de solda.

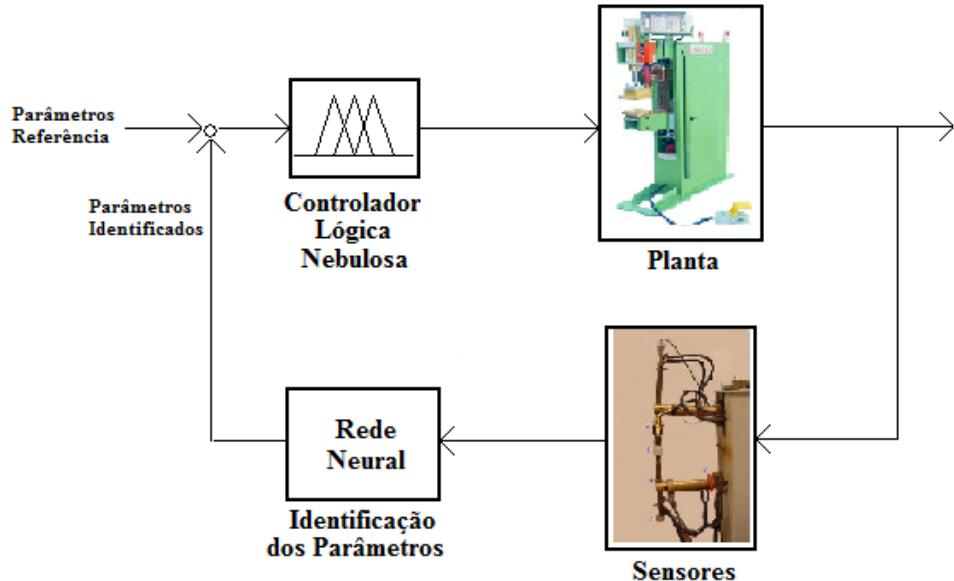


Figura 9.1: Sistema de controle adaptativo a ser implementado

Um controlador adaptativo que leva em conta a força aplicada nas chapas pelos eletrodos e a resistência dinâmica está sendo implementado pelo mestre Valdir Furlanetto, sob a orientação do Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha, durante o seu doutorado.

A identificação dos parâmetros é realizada por uma rede neural. Além da resistência dinâmica e da realização de exames de ultrassonografia, pode-se monitorar a força aplicada nos eletrodos pelas chapas devido a dilatação resultante do aquecimento das mesmas.

O monitoramento e a análise da qualidade da solda por técnicas não destrutivas, em especial o exame de ultrassonografia, está sendo desenvolvido pelo engenheiro Danilo Stocco em seu mestrado, também sob orientação do Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha.

## Bibliografia

- **Sistemas nebulosos**

[1] ZADEH, L.A., **Fuzzy sets**, Information and Control, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

[2] ZADEH, L.A., **Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility**, Fuzzy Sets and Systems, v.1, p. 3-28, 1978.

[3] ZADEH, L.A., **A mathematical theory of evidence** (book review). Artificial Intelligence Magazine, v. 5, n. 3, p. 81-83, 1984.

[4] PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F., **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**, The MIT Press, 1998.

[5] YAGER, R. R.; FILEV,D. P., **Essentials of Fuzzy Modeling and Control**, John Wiley & Sons: New York, 1994.

[6] WANG, X., **Learning planning operators by observation and practice**, Proceedings of the Second International Conference on AI Planning Systems, AIPS-94, p. 335--340, Chicago, 1994

[7] MAMDANI, E. H., **Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant**. Academic Press, New York, 1974.

[8] TAKAGI, T.; SUGENO, M; **Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control**; IEEE Trans.on Systems, Man and Cybernetics, v. 15, n. 1, p. 116-132, 1985.

[9] BERSINI, H.; GORRINE, V., **FUNNY (FUZZY or Neural Net) Methods for Adaptive Process Control**, In Proceedings of the First European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies - EUFIT 93, Elite foundation Aachen, Germany. p 55-61.

[10] GORRINI, V; BERSINI, H.; **Recurrent Fuzzy Systems**, Proceedings of the Third IEEE Conference on Fuzzy Systems. p. 193-198, 1994.

- **Redes neurais artificiais**

[11] McCULLOCH, W. S.; PITTS, W. H., **A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity**. Bulletin of Mathematical Biophysics, v. 5, p. 115-133, 1943.

[12] HEBB, D. O.; **The organization of behavior; a neuropsychological theory**, Wiley-Interscience, New York, 1949.

[13] ROSENBLATT, F.; **The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain**, Psychological Review, v.65, p.386-408, 1958.

[14] ROSENBLATT, F.; **Principles of Neurodynamics**, Spartan Books, New York, 1962.

[15] WIDROW, B.; HOFF, M.E.; **Adaptive switching circuits**. IRE WESCON, p. 96-104, New York. Convention Record, 1960.

[16] MINSKY, M.; PAPERT, S.; **Perceptrons**, MIT Press, Cambridge, 1969.

[17] VON DER MALSBURG, C., **A model for self-organization of orientation sensitivity and columns in the visual cortex**, Pflügers Arch. Suppl., p. 339, 1973.

[18] GROSSBERG, S.; **Adaptive pattern classification and universal recoding**. I. Parallel development and coding of neural feature detectors. Biol Cybern v. v.23, p.121—134, 1976.

[19] KOHONEN, T.; **Self-organized formation of topologically correct feature maps**. Biological Cybernetics, v.43, p.59-69, 1982.

[20] HOPFIELD, J.; **Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, v.9 , 1982.

[21] RUMELHART, D.E; McCLELLAND, J.L; **Parallel Distributed Processing, Vol. 1: Foundations**, The MIT Press, 576p., 1987

[22] WERBOS, P. J.; **Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences**. PhD thesis, Harvard University, 1974.

[23] WERBOS, P.J., **The Roots of Backpropagation**, NY: John Wiley & Sons. Includes Werbos's 1974 Harvard Ph.D. thesis, Beyond Regression, 1984.

[24] HAYKIN, S.; **Neural Networks**. Macmillan College Publishing Company, Inc, New York, 1994.

[25] HUSH, D. and HORNE, B. ;**Progress in supervised neural networks**, IEEE Signal Processing Magazine, v.10(1), p.8-39, 1993.

[26] LIMA, C.A.M, **Emprego de Teoria de Agentes no Desenvolvimento de Dispositivos Neurocomputacionais Híbridos e Aplicação ao Controle e Identificação de Sistemas Dinâmicos**, Master Thesis, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), SP, Brasil, 280 páginas, 2000.

[27] ELMAN, J. L.; **Finding structure in time**, Journal of Cognitive Science, v.14, n.2, p. 179-211, 1990.

[28] JORDAN, M. I.; **Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine**, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Annual Conference on Cognitive Science, p. 531-546, 1986.

[29] NARENDA, K. S.; PARTHASARATHY, K., **Identification and control of dynamical systems using neural networks**, IEEE Trans. Neural Networks, v.1(1), p.4-27, 1990.

[30] NERRAND, O.; PERSONNAZ, L.; DREYFUS, G; **Non-linear recursive identification and control by neural networks: A general framework**, Proceedings of the 2nd European Control Conference, Groningen, Holanda, p. 93-98, 1993.

[31] KOHONEN, T. et al., **Self-organization of a massive document collection**. IEEE Transactions on Neural Networks, v.11, i3, p.574-585, 2000.

[32] KOHONEN, T.; **Self-organized formation of topologically correct feature maps**, Biological Cybernetics, v. 43, p. 59-69, 1982.

[33] LIN, C.T.; LEE, C.G.S, **Neural fuzzy systems: a neuro-fuzzy synergism to intelligent systems**, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, 797 p., USA, 1996

- **Solda a ponto por resistência**

[34] WILLIAMS N. T. **Proc. Conf 'Steel sheet and strip welding'**, Kenilworth, UK, 1972, The Welding Intitute, 50-57.

[35] MESSLER D. W.; JOU M. **Sci. Technol. Weld. Join.**, 1996,1,(1), 1-9.

[36] SCHUMACHER B. W.: **Proc. Conf. 'Sheet Metal Welding III'**, Detroit, MI, 1992, AWS (Detroit Section).

[37] CEN Standard pr-EN/ISO '**Resistance welding: Part I: Assesment of the weldability for spot, seam and projection welding of metallic material; Part II: Alternative procedures for the assesment of steel sheet for spot welding'**, 18278(E): 2002, Brussels, 2002.

[38] WILLIAMS N. T.; JONES T. B.: **Proc. Conf. 'The effect of residual, impurity, micro-alloying elements on weldability and weld properties'**, London, UK, 1983, The Welding Institute, 1983.

[39] DUPUY T.; CLAD A.; BIENVENU Y.: **'The effect of welding schedule on the properties of spot welds in ultra high strength low alloy steels'**, Doc. 111-1129-99, IIW, 1999.

[40] WILLIAMS D.: **'The influence of coating type on the spot weld of zinc coated steels'**, Mphil. thesis, University of Brunel, 1990.

[41] ORTS D. H.: **'The effect of zinc coating in resistance spot welding galvanized steel'**, MSc thesis, Ohio State University, Columbus, OH, 1967.

[42] KAISER J. G.; DUNN G. J.; EAGER T. W.: **The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding**, Weld Journal, 1982, 61, (6), 167-174.

[43] HUTCHING C. L.; WADDELL W.; WILLIAMS N. T.: **Weld Journal**, 1980, 59, (6), 170s-176s.

[44] GOULD J. E.; PETERSON W. A.: **'A detailed examination of weldability lobes for a range of zinc coated steels'**, Technical Paper 880279, Society Automotive Engineers, Detroit, MI, 1988.

[45] ABELWHITE J. D.: **'The application os artificial intelligence techniques to the control of spot welding'**, EngD thesis, University of Wales, Wansea, May 2000.

[46] WADDELL W.; WILLIAMS N. T.: **'Control of resistance spot weld quality using multi-parameter derived algorithms for zinc-coated steel'**, Report n° EUR 17859 EN, European Commission, Technical Steel Research Programme, Brussels, 1997.

[47] HOUCHEWS A. F.; PAGE R. E.; YANG W. H.: Proc. ASME Winter Conference, **'Numerical modelling of resistance spot welding'**, Nov.-Dez. 1997, American Society of Mechanical Engineers, 117-129.

[48] GREENWOOD J. A., **Temperatures in spot welding**, British Weld Journal, 1961, 8, (6), 316-322.

[49] TSAI C. L.; DICKENSON D. W.; JAMMAL O. A.: **'Modelling of resistance spot weld nugget growth – applications in the automotive industry'**, Technical Paper 900738, Society Automotive Engineers, Detroit, MI, 1990.

[50] CHO H. S.; CHO Y. J.: **A Study of Thermal Behavior in Resistance Spot Welds**, Weld Journal, 1989, 68,(6), 236s.-244s.

[51] BABU S. S. et al.; **Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals**, Sci. Technol. Weld. Join., 2001, 6, (3), 126-132.

[52] NISHIGUCHI K.; MATSUYAMA K.: **Influence of Current Wave Form on Nugget Formation Phenomena When Spot Welding Thin Steel Sheet**, Weld World, 1987, 25, (11-12), 222-244.

[53] DE A.; THEDDENS M. P.: **Finite element analysis of resistance spot welding in aluminium**, Sci Technol. Weld. Join., 2002, 7, (2), 111-118.

[54] SCHUMAKER, B. W.; COOPER, J. C.; DILAY, W.: **'Resistance spot welding control that automatically selects the welding schedule'**, Technical paper 850407, Society Automotive Engineers, Detroit, MI, 1985.

[55] GEDEON, S. A.: 'Resistance spot welding of galvanized steel'. MSc thesis, MIT, 1984.

[56] BOWERS, R. J.; EAGER, T. W.: **Proc. Conf. 'Sheet metal welding II'**. Detroit, MI, 1986, AWS.

[57] FENG, Z. et al; 'Modelling of resistance spot welds: Process and performance', Doc. 111-1132-99, IIW, 1990.

[58] ZHANG, W; Proc. Seminar 'Advances in resistance welding'; Technical University of Denmark, Copenhagen, Oct. 2000 SWANTEC.

[59] SHEPPARD, S.; **Proc. Conf. 'Sheet metal welding IV'**, Detroit, MI, 1994, AWS.

[60] KHANNA, T., **Foundations of neural networks**. Addison-Wesley, 1990, 196p.

[61] GROSSBERG, S.; **Neural networks and natural intelligence**. MIT Press, 1988. 637p.

[62] TSOUKALAS, L. H.; UHRIG, R. E.; **Fuzzy and neural approaches in engineering**. Wiley Interscience, 1997. 587p.

[63] NGUYEN, H. T., PRASAD, N. R.; WALKER, C. L.; WALKER, E. A. **A first course in fuzzy and neural control**. Chapman&Hall, 2003. 301p.

[64] LI, H.; CHEN, C. L. P.; HUANG, H. **Fuzzy neural intelligent systems**. CRC Press, 2001. 371p.

[65] MEHROTRA, K.; MOHAN, C. K.; RANKA, S. **Elements of artificial neural networks**. MIT Press, 2000. 344p.

[66] WILLIAMS, N.T.; PARKER J.D., **Review of resistance spot welding of steel sheets Part 1 Modelling and control of weld nugget formation**, International Materials Reviews, v.49, n.2 , p. 45-75(31) , 2004.

[67] NIED, H.A., **The Finite Element Modeling of the Resistance Spot Welding Process**, 64th AWS annual meeting ,Philadelphia, abril, 1983.

- **Máquina de solda a ponto monofásica CA**

[68] FURLANETTO, V., **Proposta e validação experimental de um modelo para "máquina de solda a ponto CA"** .2005. 100p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

[69] ZHENGQIANG, Z. et al.; **Modeling and estimating for external characteristic of welding power source**, Int J Adv Manuf Technol, v. 29, p. 269–272, 2006.

[70] SIMULINK, **Model-Based and System-Based Design, Using Simulink**, MathWorks Inc., Natick, MA, 2000.

[71] SIMULINK, **SimPowerSystems for Use with Simulink: User's Guide**, MathWorks Inc., Natick, MA, 2002.

[72] S. Linke, J. Torgeson, and J. Au, **An interactive computer-graphics program to aid instruction in electric machinery**, IEEE Comput Appl Power 2, p.19-25, 1989.

[73] H. A. Smolleck, **Modeling and analysis of the induction machine: A computational/experimental approach**, IEEE Trans Power Syst 5, p.482-485, 1990.

[74] ACHA, E.; AGELIDIS, V.G.; ANAYA-LARA, O.; MILLER, T.J.E, **Power electronic control in electrical systems**, Newnes power engineering series, Newnes, 2002.

[75] MUSSOI, F.L.R., **Tiristor SCR: Retificador controlado de silício**, versão preliminar 1.1, CEFET/SC, Florianópolis, 2002.

[76] WHITAKER, J.C., **AC Power systems handbook**, CRC Press LLC, 1999.

[77] BALABADIAN, N., BICKART, T. A., **Power and Energy, The Electrical Engineering Handbook**, Richard C. Dorf (ed.), pp. 79, CRC Press, Boca Raton, FL, 1993.

[78] EI-HAWARY, MOHAMED, E., **“Compensation,” in The Electrical Engineering Handbook**, Richard C. Dorf (ed.), pp. 1244, CRC Press, Boca Raton, FL, 1993.

[79] MOHAN, N.,UNDENLAND, T., **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**, John Wiley, New York, 1989.

[80] PEARMAN, R., **Power Electronics**, Reston Publishing Company, Reston, VA, 1980

- **Controlador a lógica nebulosa**

[81] FENG, G.; **A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems**, IEEE Transactions on fuzzy systems, v. 14, n. 5, outubro 2006.

[82] A. Boulkroune, M. Tadjine, M. M'Saad and M. Farza, **How to design a fuzzy adaptive controller based on observers for uncertain affine nonlinear systems**, Fuzzy Sets and Systems (2007), doi:10.1016/j.fss.2007.08.015.

[83] KHOO, L. P.; YOUNG, H. Y. (1995) **'A prototype fuzzy resistance spot welding system'**, International Journal of Production Research, 33:7, 1995.

[84] MAMDANI, E.H.; ASSILIAN, S., **"An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,"** International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13, 1975.

[85] MAMDANI, E.H., **"Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers,"** International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 8, pp. 669-678, 1976.

[86] MAMDANI, E.H., **"Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis,"** IEEE Transactions on Computers, Vol. 26, No. 12, pp. 1182-1191, 1977.

[87] JOU, M.; MESSLER, R. W. Jr., **"A review of control systems resistance spot welding: past and present practices and emerging trends,"** Welding Journal (submitted for publication on May 17, 1995).

[88] TSAI, C. L.; DAI, W. L.; DICKINSON, D. W.; PAPRITAN, J. C., **Analysis and development of a real-time control methodology in resistance spot welding,** Welding Journal, Vol. 70, No. 12, pp. 339~351s December 1991.

[89] LEE, C. C., **"Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - Part I,"** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 404-416, 1990.

- **Análise da qualidade dos pontos de solda utilizando redes neurais**

[90] STOCCO, D.; GONÇALVEZ, R.; **Caracterização dos defeitos encontrados em solda a ponto utilizando a técnica do ultrasom, apoio à exames metalográficos,** DaimlerChrysler do Brasil, 2003.

[91] CULLEN, J.D. et al., **Multisensor fusion for on line monitoring of the quality ...**, *Measurement* (2007), doi:10.1016/j.measurement.2007.01.006.

[92] CHO, Y.; KIM, Y.; RHEE, S.; **Development of a quality estimation model using multivariate analysis during resistance spot welding,** Proc Instn Mech Engineers, v.215, parte B, 2001