Antonio Vanderlei Ortega

**Projeto de Dispositivos Optoeletrônicos
Automotivos Utilizando Abordagem de
Sistemas *Fuzzy***

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2007

Antonio Vanderlei Ortega

Projeto de Dispositivos Optoeletrônicos Automotivos Utilizando Abordagem de Sistemas *Fuzzy*

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2007

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio e Tereza, à minha esposa Mônica, à minha filha Bianca, ao meu filho Giovanni e ao Prof. Ivan, pelo constante incentivo e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por tudo que Ele fez, pelo que está fazendo e pelo que ainda vai fazer.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva, pela confiança depositada em mim nesses anos, pela paciência e pelos ensinamentos que sempre destacaram a importância da pesquisa científica.

Ao Prof. Dr. José Alfredo Covolan Ulson, pelo apoio em importantes etapas de minha vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. Dennis Brandão, pelas valiosas e importantes contribuições na fase de qualificação dessa tese.

Ao Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto e à Prof^a. Dra. Jussara Farias Fardin, pelas contribuições e sugestões na fase de defesa dessa tese.

À empresa TEC-CI Circuitos Impressos Ltda., pela ajuda na confecção das amostras.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro concedido.

À FAPESP pelo apoio financeiro na aquisição dos equipamentos, imprescindíveis no desenvolvimento deste trabalho (Programa PIPE - Processo Nº 04/08973-9).

Aos amigos do Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas da USP de São Carlos.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

“Porque **dele** e por meio **dele**, e para **ele**, são todas as coisas. Glória, pois, a **ele** eternamente. Amém.”

Romanos 11,36

Resumo

ORTEGA, A. V. (2007). *Projeto de Dispositivos Optoeletrônicos Automotivos Utilizando Abordagem de Sistemas Fuzzy*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

Tecnologia de montagem de superfície (SMT) é um método para construção de circuitos eletrônicos, nos quais os componentes são montados diretamente sobre a superfície da placa de circuito impresso. Tais dispositivos eletrônicos são chamados de dispositivos de montagens de superfície ou SMDs. Paralelamente, as vantagens oferecidas pelo componente eletrônico LED SMD têm causado uma grande aplicação desse dispositivo em substituição ao LED convencional. O presente trabalho apresenta um sistema inteligente baseado em sistemas de inferência *fuzzy* para estimar valores de intensidade luminosa de equipamentos automotivos a partir de dados de projeto. Embora o trabalho esteja direcionado para a aplicação de LEDs SMD em lanternas traseiras, o trabalho aqui desenvolvido pode ser generalizado e usado em outras aplicações industriais, tais como semáforos de trânsito, painéis eletrônicos de mensagens ou qualquer outra aplicação onde use LEDs SMD em conjunto. Resultados de protótipos são apresentados para validar a técnica proposta. Por meio desses resultados, pode-se observar que a aplicação de sistemas inteligentes é uma abordagem atrativa para este tipo de problema.

Palavras chave: SMT; LED; sistemas de inferência *fuzzy*; sistemas inteligentes; indústria automotiva.

Abstract

ORTEGA, A. V. (2007). *Design of Automotive Optoelectronic Devices Using Fuzzy System Approach*. Thesis (Doctorate Degree) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

Surface mount technology (SMT) is a method for making electronic circuits in which the components are mounted directly onto the surface of printed circuit boards. Such electronic devices are called surface-mount devices or SMDs. The advantages offered by the electronic component SMD LED (Light Emitting Diode) have caused a wide application of this device in replacement of conventional LEDs. This work shows an intelligent system using fuzzy interference systems to estimate values of luminous intensity in automotive equipments from design data. Although this work is aimed to the application of SMD LEDs in rear lights, methods hereby developed and described can also be used in other applications, such as traffic lights, electronic panels of messages or any other application where SMD LEDs are used in groups. Results of prototypes are presented to validate the proposed technique. From these results, it can be observed that the application of intelligent systems is an attractive approach to this type of problem.

Keywords: SMT; LED; fuzzy interference systems; intelligent systems; automobile industry.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - Foto de componentes eletrônicos SMD.....	15
FIGURA 2.2 - Esquema eletrônico de uma lanterna de posição traseira ou de uma lanterna de freio que utiliza LEDs.....	17
FIGURA 2.3 - Representação de uma placa eletrônica de lanterna de posição traseira ou de freio montada com LEDs SMD.....	18
FIGURA 2.4 - Diagrama de distribuição de intensidade luminosa da lanterna de posição traseira, com valores em candelas (cd).....	19
FIGURA 2.5 - Diagrama de distribuição de intensidade luminosa da lanterna de freio, com valores em candelas (cd).....	20
FIGURA 2.6 - Fluxograma da etapa de medição.....	21
FIGURA 2.7 - Foto de uma lanterna de freio comercial usando LEDs.....	22
FIGURA 2.8 - Diagrama de distribuição de intensidade luminosa das lâmpadas americanas.....	23
FIGURA 2.9 - Diagrama de distribuição de intensidade luminosa das lâmpadas de origem européia.....	23
FIGURA 2.10 - Diagrama de distribuição de intensidade luminosa de uma lanterna montada com lâmpada incandescente.....	24
FIGURA 2.11 - Diagrama de distribuição de intensidade luminosa de uma lanterna montada com LEDs.....	25
FIGURA 2.12 - Diagrama de radiação de um LED.....	27
FIGURA 2.13 - Placa de circuito com LEDs em frente ao sensor de intensidade luminosa.....	28
FIGURA 2.14 - Variação da intensidade luminosa relativa em função da corrente direta de um LED.....	31
FIGURA 2.15 - Diferença nos tempos de acendimento entre LEDs e lâmpadas incandescentes.....	32
FIGURA 2.16 - Formação triangular da iluminação do sistema de freio veicular....	34
FIGURA 3.1 - Diagrama do processo de inferência <i>fuzzy</i>	40
FIGURA 3.2 - Função de pertinência Gaussiana.....	43

FIGURA 3.3 - Ilustração do método da média dos máximos.....	45
FIGURA 3.4 - Processos internos ao modelo de Takagi-Sugeno.....	47
FIGURA 3.5 - Esquema do neurônio artificial.....	50
FIGURA 3.6 - Principais funções de ativação usadas em redes <i>Perceptrons</i> multicamadas.....	52
FIGURA 3.7 - Representação das camadas de uma rede <i>Perceptrons</i>	53
FIGURA 3.8 - Representação dos passos <i>Forward</i> e <i>Backward</i>	55
FIGURA 4.1 - Variáveis envolvidas no treinamento e sintonia dos sistemas inteligentes.....	65
FIGURA 4.2 - Erro de treinamento para a posição (5°L, 0°V).....	67
FIGURA 4.3 - Resultado do treinamento realizado pelo ANFIS referente à posição (5°R, 0°V).....	68
FIGURA 4.4 - Resultado da validação do sistema fuzzy sintonizado pelo ANFIS referente à posição (5°R, 0°V).....	69
FIGURA 4.5 - Funções de pertinência ajustadas para a variável lingüística “Número de colunas” referente à posição (20°L, 5°U).....	72
FIGURA 4.6 - Funções de pertinência ajustadas para a variável lingüística “Distância entre colunas” referente à posição (20°L, 5°U).....	73
FIGURA 4.7 - Funções de pertinência ajustadas para a variável lingüística “Número de linhas” referente à posição (20°L, 5°U).....	74
FIGURA 4.8 - Funções de pertinência ajustadas para a variável lingüística “Distância entre linhas” referente à posição (20°L, 5°U).....	75
FIGURA 4.9 - Funções de pertinência ajustadas para a variável lingüística “Intensidade luminosa do LED” referente à posição (20°L, 5°U)..	76
FIGURA 4.10 - Intensidade luminosa medida na posição (20°R, 5°D), em função das variáveis lingüísticas “Distância entre Colunas” e “Número de Colunas”.....	77
FIGURA 4.11 - Intensidade luminosa medida na posição (10°L, 0°V), em função das variáveis lingüísticas “Distância entre Colunas” e “Número de Colunas”.....	78

FIGURA 4.12 - Intensidade luminosa medida na posição (0°H, 5°U), em função das variáveis lingüísticas “Distância entre Colunas” e “Número de Colunas”.....	79
FIGURA 4.13 - Comparação entre os valores obtidos no teste experimental (TE) e estimados pela rede neural artificial (RNA) para a amostra 95..	92
FIGURA 4.14 - Comparação entre os valores obtidos no teste experimental (TE) e estimados pelo sistema fuzzy (SF) para a amostra 95.....	93
FIGURA 4.15 - Comparação entre os valores de intensidade luminosa obtidos no teste experimental (TE) e estimados pelos sistemas inteligentes para a posição (5°R, 10°U).....	94
FIGURA 4.16 - Comparação entre os valores de intensidade luminosa obtidos no teste experimental (TE) e estimados pelos sistemas inteligentes para a posição (10°L, 5°D).....	95
FIGURA 4.17 - Comparação entre os valores obtidos no teste experimental (TE) e estimados pelo sistema fuzzy (SF) para a amostra de <i>brake light</i>	99
FIGURA 4.18 - Comparação entre os valores obtidos no teste experimental (TE) e estimados pela rede neural artificial (RNA) para a amostra de <i>brake light</i>	99
FIGURA A.1.1 - Fluxograma básico de SMT usando cola.....	112
FIGURA A.1.2 - Fluxograma básico de SMT usando solda em pasta.....	113
FIGURA A.1.3 - Aplicação de cola ou solda em pasta através da tela de impressão.....	114
FIGURA A.1.4 - Máquina para aplicação automática de cola ou solda em pasta através da tela de impressão.....	114
FIGURA A.1.5 - Equipamento para aplicação manual de cola através de seringa por pressão.....	115
FIGURA A.1.6 - Mecanismo de manipulação de componentes SMD utilizado pela máquina <i>Pick and Place</i>	116
FIGURA A.1.7 - Foto de uma máquina <i>Pick and Place</i>	117
FIGURA A.1.8 - Foto de uma máquina de solda por onda.....	119
FIGURA A.1.9 - Curva típica da temperatura variando em função do tempo para um processo de refusão.....	120
FIGURA A.1.10 - Foto de um forno de refusão do tipo estático.....	121

FIGURA A.1.11 - Foto de um forno de refusão do tipo dinâmico.....	122
FIGURA A.1.12 - Foto de componentes SMD soldados ao final do processo de refusão.....	122
FIGURA A.2.1 - Representação da condução de energia através dos pares de elétron-lacuna.....	124
FIGURA A.2.2 - Representação de um semicondutor do tipo-N.....	125
FIGURA A.2.3 - Representação de um semicondutor do tipo-P.....	126
FIGURA A.2.4 - Representação de uma junção PN.....	126
FIGURA A.2.5 - Representação da barreira de potencial em uma junção PN.....	127
FIGURA A.2.6 - Junção PN sendo polarizada.....	128
FIGURA A.2.7 - Representação das bandas de energia em um material semicondutor intrínseco.....	129
FIGURA A.2.8 - Representação da estrutura básica do LED.....	131
FIGURA A.2.9 - Circuito simples para acendimento do LED.....	132
FIGURA A.3.1 - Foto de uma amostra de lanterna traseira acionada na sala escura.....	139
FIGURA A.4.1 - Interface gráfica do ANFIS no Matlab®.....	141
FIGURA A.4.2 - Carregamento dos dados no ANFIS.....	142
FIGURA A.4.3 - Configuração dos parâmetros de inicialização do sistema de inferência <i>fuzzy</i>	143
FIGURA A.4.4 - Realizando o treinamento no ANFIS.....	144
FIGURA A.5.1 - Classes de conjuntos na lógica clássica.....	147
FIGURA A.5.2 - Função de pertinência da lógica <i>fuzzy</i>	148
FIGURA A.5.3 - Conjuntos de funções de pertinência da lógica <i>fuzzy</i>	149
FIGURA A.5.4 - Ativação de regras <i>fuzzy</i>	151
FIGURA A.5.5 - Entrada do sistema <i>fuzzy</i> de exemplo.....	152
FIGURA A.5.6 - Saída do sistema <i>fuzzy</i> de exemplo.....	152
FIGURA A.5.7 - Agregação de regras <i>fuzzy</i>	153
FIGURA A.5.8 - Método de defuzzificação por meio do centro de área	154

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 - Dimensões de cada lanterna traseira.....	63
TABELA 4.2 - Valores de erros relativos médios obtidos para algumas variações possíveis do número de funções de pertinência das variáveis lingüísticas.....	70
TABELA 4.3 - Número de funções de pertinência e erro relativo médio obtido para cada sistema <i>fuzzy</i>	80
TABELA 4.4 - Variações na topologia da rede durante a fase de treinamento utilizando a função de ativação do tipo tangente hiperbólica (“tansig”).....	82
TABELA 4.5 - Variações na topologia da rede durante a fase de treinamento utilizando a função de ativação do tipo logística (“logsig”).....	84
TABELA 4.6 - Topologias obtidas para as 19 posições, durante a fase de treinamento.....	87
TABELA 4.7 - Comparação entre os valores de intensidade luminosa obtidos por testes experimentais, inverso do quadrado da distância e estimados pelos sistemas inteligentes para a posição (10°R, 5°D).....	88
TABELA 4.8 - Comparação entre os valores de intensidade luminosa obtidos por testes experimentais, inverso do quadrado da distância e estimados pelos sistemas inteligentes para a posição (5°R, 10°D).....	90
TABELA 4.9 - Comparação entre os valores de intensidade luminosa de <i>brake lights</i> obtidos por testes experimentais e estimados pelos sistemas inteligentes para a posição (5°R, 0°V).....	97
TABELA A.3.1 - Combinação dos parâmetros para cada amostra de lanternas traseiras.....	133

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABS = *Acrilonitrila Butadieno Stireno*

CONTRAN = Conselho Nacional de Trânsito

D = *down* (abaixo)

Ec = energia de condução

Ev = energia de valência

H = *horizontal* (horizontal)

L = *left* (à esquerda)

R = *right* (à direita)

U = *up* (acima)

V = *vertical* (vertical)

SUMÁRIO

Resumo.....	xi
Abstract.....	xiii
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas.....	xiv
Lista de Siglas e Abreviaturas.....	xxi
1 INTRODUÇÃO	
1.1 Motivação e Relevância do Trabalho.....	01
1.2 Objetivo e Justificativa da Tese.....	08
1.3 Contribuições da Tese de Doutorado.....	10
1.4 Organização da Tese.....	11
2 LEDS SMD APLICADOS EM DISPOSITIVOS LUMINOSOS AUTOMOTIVOS	
2.1 LED e Tecnologia de Montagem de Superfície (SMT).....	13
2.2 Certificação de Lanternas de Posição Traseira e Lanternas de Freio Utilizando LEDs SMD.....	16
2.3 Aspectos das Não-Linearidades na Emissão de Luz em Dispositivos Luminosos Automotivos.....	22
2.4 Influência do Tempo de Acendimento do LED de Lanternas de Freio em Colisões Traseiras.....	31
2.5 Considerações Finais Sobre Estado da Arte.....	35
3 ASPECTOS RELACIONADOS AOS SISTEMAS INTELIGENTES	
3.1 Aspectos de Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i>	38
3.1.1 Composição dos Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i>	39
3.1.2 Sistema de Inferência no Modelo de Takagi-Sugeno.....	45
3.1.3 Sintonização de Parâmetros de Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i>	47
3.1.4 Considerações Finais Sobre os Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i> e ANFIS.....	48
3.2 Aspectos de Redes Neurais Artificiais.....	49
3.2.1 Redes <i>Perceptrons</i> Multicamadas.....	52
3.2.2 Treinamento de Redes <i>Perceptrons</i> Multicamadas.....	54
3.2.3 Considerações Finais Sobre Redes Neurais Artificiais.....	59
4 ESTIMAÇÃO DE VALORES DE INTENSIDADE LUMINOSA UTILIZANDO SISTEMAS INTELIGENTES	
4.1 Aspectos de Construção das Amostras.....	61
4.2 Utilização dos Sistemas Inteligentes.....	64

4.3 Utilização do ANFIS para Sintonizar os Sistemas <i>Fuzzy</i>	66
4.4 Treinamento da Rede <i>Perceptrons</i> Multicamadas.....	81
4.5 Comparação Entre as Abordagens Inteligentes Propostas.....	88
4.6 Comparação de Resultados Entre Estratégias Inteligentes Aplicadas em <i>Brake Lights</i>	96
5 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS	
5.1 Conclusões Gerais.....	101
5.2 Futuras Linhas de Pesquisa.....	104
Referências Bibliográficas.....	105
Apêndice I - Tecnologia de Montagem de Superfície (SMT).....	111
A.1.1 Aplicação de Cola ou Pasta por Tela de Impressão.....	113
A.1.2 Aplicação de Cola por Meio de Seringa por Pressão.....	115
A.1.3 Colocação dos Componentes SMD.....	115
A.1.4 Soldagem de Componentes SMD por Meio de Solda por Onda.....	117
A.1.5 Soldagem de Componentes SMD Usando Forno de Refusão.....	119
Apêndice II - O Dispositivo LED.....	123
A.2.1 Funcionamento do LED.....	124
A.2.2 Estrutura da Pastilha Semicondutora do LED.....	125
A.2.3 Processo de Emissão de Luz na Pastilha Semicondutora.....	127
A.2.4 Estrutura do LED.....	130
A.2.5 Acionamento do LED.....	131
Apêndice III - Construção das Amostras.....	133
A.3.1 Montagem das Amostras.....	133
A.3.2 Medição da Intensidade Luminosa das Amostras.....	139
Apêndice IV - Utilização do ANFIS no Matlab®	142
Apêndice V - Sistemas <i>fuzzy</i>	145
A.5.1 Aspectos principais	145
A.5.2 Funções de pertinência.....	146
A.5.3 Regras <i>fuzzy</i>	149
A.5.4 Agregação de regras <i>fuzzy</i>	151
A.5.5 Defuzzificação.....	154