

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEE  
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEEL**

**Formação: Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO OBTIDA POR  
Carlos Alberto Teixeira**

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO NO  
PROJETO DE CONTROLADORES PARA ELETRODOMÉSTICOS**

**JOINVILLE**

**2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEE**  
**COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEEL**

**CARLOS ALBERTO TEIXEIRA**

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO NO**  
**PROJETO DE CONTROLADORES PARA ELETRODOMÉSTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** André Bittencourt Leal, Dr.

**JOINVILLE**

**2008**

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO NO  
PROJETO DE CONTROLADORES PARA ELETRODOMÉSTICOS**

por

**Carlos Alberto Teixeira**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Área de Concentração em *Automação de Sistemas*,

e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

Banca Examinadora:

---

André Bittencourt Leal, Dr.  
CCT/UDESC (Presidente)

---

Max Hering de Queiroz, Dr.  
DAS/UFSC

---

Fábio Rodrigues de la Rocha, Dr.  
CCT/UDESC

---

Tatiana Renata Garcia, Dra.  
IST/SOCIESC

---

Rogério Romariz Ferreira, ME.  
Whirlpool S. A.

Joinville, SC, 31 de julho de 2008

## FICHA CATALOGRÁFICA

<b>NOME:</b> TEIXEIRA, Carlos Alberto	
<b>DATA DEFESA:</b> 31/07/2008	
<b>LOCAL:</b> Joinville/SC, CCT/UDESC	
<b>NÍVEL:</b> Mestrado	<b>NÚMERO DE ORDEM:</b> 09 – CCT/UDESC
<b>FORMAÇÃO:</b> Engenharia Elétrica	
<b>ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:</b> Automação de Sistemas	
<b>TÍTULO:</b> Aplicação da Teoria de Controle Supervisório no Projeto de Controladores para Eletrodomésticos	
<b>PALAVRAS - CHAVE:</b> Sistemas a Eventos Discretos, Controle Supervisório, Abordagem Modular Local, Sistemas Embarcados.	
<b>NÚMERO DE PÁGINAS:</b> xxi, 96 p.	
<b>CENTRO/UNIVERSIDADE:</b> Centro de Ciências Tecnológicas da UDESC	
<b>PROGRAMA:</b> Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEEL	
<b>CADASTRO CAPES:</b> 41002016012P0	
<b>ORIENTADOR:</b> André Bittencourt Leal, Dr.	
<b>PRESIDENTE DA BANCA:</b> André Bittencourt Leal, Dr.	
<b>MEMBROS DA BANCA:</b> Dr. Max Hering de Queiroz, Dr. Fábio Rodrigues de la Rocha, Dra. Tatiana Renata Garcia, ME. Rogério Romariz Ferreira	

À minha esposa *Fabiola*.  
Aos meus pais *Osny e Sônia*.

*“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve e a vida é muito curta para ser insignificante.”*

Charles Chaplin

## AGRADECIMENTOS

A *Deus*, por permitir-me existir e pelas conseqüências decorrentes.

À minha querida esposa *Fabiola*, pelo amor e carinho, onipresentes e imprescindíveis.

Aos meus pais, *Osny Teixeira* e *Sônia Dahmer*, por serem, simplesmente, meus pais.

Ao professor *André Bittencourt Leal*, melhor sinônimo para o termo *orientador*, que conforme Aurélio, significa *aquele que orienta*. E ademais, um excelente amigo também!

Aos membros da banca examinadora, *Max Hering de Queiroz*, *Fábio Rodrigues de la Rocha*, *Tatiana Renata Garcia* e *Rogério Romariz Ferreira*, pelas preciosas contribuições ao aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos meus irmãos e irmãs, *Bruno Amarildo Teixeira*, *Maria Teresa Teixeira Amarante*, *Darci Roberto Teixeira*, *Mário Sérgio Teixeira*, *Isabel Teixeira*, *Camila Teixeira* e *Leandro Chaves*. Aos meus demais familiares e aos familiares de minha esposa, em especial ao meu cunhado, *Fabiano Menegat*, pelo importante auxílio e constante apoio.

A todos que, de diversas formas e em diferentes intensidades, contribuíram com este trabalho. Meu obrigado aos amigos *Edu de Moraes Machado*, *José Feuser Filho*, *Jônatas Diogo Müller*, *Bruna Zanicoski*, *Naelton Oliveira de Souza*, *Lucas Mondardo Cúnico*, *Nerian Ferreira*, *Sidnei Ferrarezi*, *Hugo Kamigouchi*, *Sandra Rosa* e *Felipe Melo*, sem é claro deixar de mencionar os amigos *Marcelo Zanelato*, *Günter Jonhann Maass*, *Roberto Andrich*, *Ronaldo Ribeiro Duarte*, *Paulo Sérgio Dainez*, *Marcelo Fernandes Alves*, *Cláudio Eduardo Soares*, *Laudo Lamin*, *Anderson Alves*, *Douglas Pereira da Silva* e *Cláudio Bruning*, e de certamente incluir nesta lista os excelentes profissionais e amigos *Cristiane Delboni* e *Liam Cotter*. Agradeço em especial ao amigo *Rogério Romariz Ferreira*, um incentivador e entusasta e um notável colaborador!

À *Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)* e aos professores e funcionários desta instituição, pela oportunidade de desenvolvimento, nos níveis de graduação e mestrado. Em especial, agradeço aos professores *Milton Procópio de Borba*, *Mairton de Oliveira Melo* e *Antonio Heronaldo de Sousa*, exemplos a seguir, inatingíveis no entanto.

Ao *André Rabner*, da Artimar, e ao *Marcelo Patrício*, da NXP, pelo suporte contínuo.

A todos que deveriam ser citados, mas que não foram, por mero esquecimento meu.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um procedimento de projeto de controladores para eletrodomésticos, concebido com base na Teoria de Controle Supervisório (TCS) de sistemas a eventos discretos. Aplica-se a abordagem de controle modular local na síntese automática dos supervisores. O uso de uma linguagem formal requer a consistência dos modelos e garante que os supervisores sintetizados são ótimos, no sentido de serem minimamente restritivos e não bloqueantes. O desenvolvimento de uma estrutura contendo um Mini-Refrigerador Peltier controlado por um circuito eletrônico, permite criar e validar diferentes estratégias de controle a serem implementadas em refrigeradores domésticos e comerciais. A aplicação e validação experimental do procedimento de projeto é feita através da solução de um problema real, o controle de um Mini-Refrigerador de acordo com um conjunto de especificações. Aspectos importantes relacionados ao desenvolvimento de controles embarcados em bens de consumo eletrônicos, comumente produzidos em larga escala e comercializados em diferentes mercados, tais como manutenção de documentação atualizada, velocidade e flexibilidade na criação de variações de plataforma, uso de modelos para melhor comunicação entre profissionais, desenvolvimento de soluções confiáveis e possibilidade de geração automática de código, são naturalmente abordados com o procedimento proposto.

**Palavras-chave:** Sistemas a Eventos Discretos. Controle Supervisório. Abordagem Modular Local. Sistemas Embarcados.

## ABSTRACT

This work presents a design procedure of controllers for household appliances, based on the Supervisory Control Theory (SCT) of discrete event systems. The local modular control approach is applied in the automatic supervisor synthesis, and these supervisors are later reduced. The use of a formal language requires model consistency and assures that the synthesized supervisors are optimum, in the sense of being minimally restrictive and non-blocking. The development of a structure containing a Peltier Mini-Refrigerator controlled by an electronic circuit allows to create and validate different control strategies to be implemented in household and commercial refrigerators. The application and experimental validation of this design procedure is performed through the solution of a real problem, the control of a Mini-Refrigerator according to a set of specifications. Significant issues related to the design of embedded controls for electronic commodities, commonly produced in large scale and sold at different markets, such as maintenance of updated documentation, fast and flexible generation of platform variations, use of models for better communication among professionals, development of reliable solutions and possibility of automatic code generation, are naturally approached with the proposed procedure.

**Key-words:** Discrete Event Systems. Supervisory Control. Local Modular Approach. Embedded Systems.

## SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Abreviaturas.....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Símbolos.....</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica da Teoria de Controle Supervisório.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Caracterização dos Sistemas a Eventos Discretos .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Conjuntos e Funções.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Alfabetos e Palavras .....</b>	<b>8</b>
<b>2.4 Linguagens: Definição e Operações .....</b>	<b>8</b>
2.4.1 Concatenação .....	8
2.4.2 Prefixo-Fechamento.....	8
2.4.3 Fechamento Kleene .....	9
2.4.4 Projeções.....	9
2.4.5 Produto Síncrono .....	9
<b>2.5 Expressões Regulares .....</b>	<b>10</b>
<b>2.6 Autômatos Determinísticos de Estados Finitos.....</b>	<b>10</b>
<b>2.7 Representações de SEDs por Linguagens e Autômatos .....</b>	<b>12</b>
2.7.1 Acessibilidade e Co-Acessibilidade de um SED .....	13
2.7.2 Bloqueio num SED .....	13
2.7.3 Composição Síncrona de Autômatos.....	14
<b>2.8 Controle Supervisório de SEDs: Abordagem Monolítica .....</b>	<b>16</b>
2.8.1 Modelagem da Planta .....	17
2.8.2 Modelagem das Especificações de Controle .....	18
2.8.3 Cálculo da Linguagem Alvo.....	18
2.8.4 Cálculo do Supervisor .....	18
<b>2.9 Controle Supervisório de SEDs: Abordagem Modular Local.....</b>	<b>21</b>
2.9.1 Modelagem por Sistema Produto .....	22
2.9.2 Síntese dos Supervisores .....	22
<b>2.10 Redução de Supervisores .....</b>	<b>24</b>

2.11	Conclusões .....	25
<b>3</b>	<b>Procedimento de Projeto de Controladores para Eletrodomésticos .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Problema Motivador .....</b>	<b>26</b>
3.1.1	Caracterização do <i>Refrigerador Autônomo</i> .....	26
3.1.2	Descrição dos Objetivos de Controle .....	27
<b>3.2</b>	<b>Síntese dos Supervisores .....</b>	<b>29</b>
3.2.1	Descrição dos Eventos .....	29
3.2.2	Modelagem das Subplantas .....	30
3.2.3	Especificações de Controle .....	31
3.2.4	Representação por Sistema Produto .....	32
3.2.5	Síntese dos Supervisores .....	32
<b>3.3</b>	<b>Formalização da Metodologia de Implementação .....</b>	<b>35</b>
3.3.1	Arquitetura de Queiroz e Cury .....	35
3.3.2	Definição da Estrutura Proposta .....	37
3.3.3	Representação do <i>SP</i> e dos <i>SRs</i> no Microcontrolador <i>M</i> .....	38
3.3.4	Convenção de Etiquetagem dos Eventos .....	39
3.3.5	Priorização de Eventos Não Controláveis e Eventos Controláveis .....	39
3.3.6	Dinâmica de Processamento .....	39
3.3.7	Insensibilidade ao Entrelaçamento de Eventos Não Controláveis .....	41
3.3.8	Priorização de Eventos Controláveis .....	43
<b>3.4</b>	<b>Implementação do <i>Refrigerador Autônomo</i> .....</b>	<b>45</b>
3.4.1	Insensibilidade ao Entrelaçamento de Eventos Não Controláveis .....	45
3.4.2	Rotinas de Baixo Nível .....	46
3.4.3	Funções de Leitura e Funções de Escrita .....	46
3.4.4	Priorização de Eventos Controláveis .....	47
3.4.5	Representação do <i>SP</i> e dos <i>SRs</i> no Microcontrolador <i>M</i> .....	48
3.4.6	Estrutura de Implementação .....	49
3.4.7	Condição Inicial .....	50
3.4.8	Dinâmica de Processamento .....	51
3.4.9	Código de Implementação da Estrutura de Controle .....	52
<b>3.5</b>	<b>Resumo do Procedimento de Projeto .....</b>	<b>55</b>
3.5.1	Definição do Problema de Controle .....	55
3.5.2	Síntese dos Supervisores .....	55
3.5.3	Implementação no Microcontrolador <i>M</i> .....	56
3.5.4	Comentários .....	56
<b>3.6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>Projeto do Controlador de um <i>Mini-Refrigerador</i> .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1</b>	<b>Definição do Problema de Controle .....</b>	<b>58</b>
4.1.1	Caracterização do <i>Mini-Refrigerador</i> .....	58
4.1.2	Descrição dos Objetivos de Controle .....	67
<b>4.2</b>	<b>Síntese dos Supervisores .....</b>	<b>68</b>

4.2.1	Descrição dos Eventos.....	68
4.2.2	Modelagem das Subplantas .....	69
4.2.3	Modelagem das Restrições Físicas .....	70
4.2.4	Representação por Sistema Produto .....	71
4.2.5	Especificações de Controle.....	72
4.2.6	Síntese dos Supervisores .....	75
<b>4.3</b>	<b>Implementação do <i>Mini-Refrigerador</i> .....</b>	<b>81</b>
4.3.1	Insensibilidade ao Entrelaçamento de Eventos Não Controláveis .....	81
4.3.2	Rotinas de Baixo Nível.....	81
4.3.3	Priorização de Eventos Controláveis.....	82
4.3.4	Funções de Leitura.....	83
4.3.5	Funções de Escrita .....	84
4.3.6	Representação do <i>SP</i> e dos <i>SRs</i> no Microcontrolador <i>M</i> .....	85
4.3.7	Condição Inicial.....	88
<b>4.4</b>	<b>Resultados Experimentais.....</b>	<b>88</b>
<b>4.5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>91</b>
<b>5</b>	<b>Conclusões e Perspectivas.....</b>	<b>92</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>94</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Trajetória de Estados de um SED (Cury, 2001).....	5
Figura 2.2 – Trajetória de Estados de um Sistema Contínuo (Cury, 2001).....	5
Figura 2.3 – Autômato e Descrição Formal (da Cunha, 2003) .....	11
Figura 2.4 – Modelo SED de uma Lâmpada (Autômato e Linguagens) .....	12
Figura 2.5 – Componente Acessível, Co-Acessível e <i>trim</i> de um Autômato $G$ (da Cunha, 2003) .....	14
Figura 2.6 – Autômatos $G_1$ e $G_2$ .....	16
Figura 2.7 – Autômato $G = G_1 \parallel G_2$ .....	16
Figura 2.8 – Esquema de Controle Supervisório Monolítico (Ramadge e Wonham, 1989).....	17
Figura 2.9 – Planta $G$ (Exemplo 2.6) .....	20
Figura 2.10 – Autômato $R$ que representa a linguagem alvo $K$ (Exemplo 2.6).....	20
Figura 2.11 – Autômato $PI.2$ (Exemplo 2.6) .....	20
Figura 2.12 – Autômato $PI.3$ (Exemplo 2.6) .....	21
Figura 2.13 – Autômato $P2.2$ (Exemplo 2.6) .....	21
Figura 2.14 – Autômato $S$ que representa a máxima linguagem controlável $SupC(K, L(G))$ (Exemplo 2.6) .....	21
Figura 2.15 – Representação por Sistema Produto (Pena, 2007) .....	22
Figura 2.16 – Ilustração para o Exemplo 2.7 .....	23
Figura 2.17 – Esquema de Controle da Abordagem Modular Local (de Queiroz, 2004) .....	23
Figura 3.1 – Diagrama do <i>Refrigerador Autônomo</i> .....	27
Figura 3.2 – Conceito de Evento de Limiar .....	27
Figura 3.3 – Aspectos na Geração de Eventos de Limiar .....	28
Figura 3.4 – Ajuste das Variáveis $T_{Liga}$ e $T_{Desliga}$ em Função de $T_{Amb}$ .....	28
Figura 3.5 – Estratégia de Controle.....	29
Figura 3.6 – Autômato da Subplanta para o <i>Compressor</i> .....	30

Figura 3.7 – Autômato da Subplanta para o Ajuste de $T_{Liga}$ e $T_{Desliga}$ em Função de $T_{Amb}$ .....	31
Figura 3.8 – Autômato da Subplanta para o <i>Sensor A</i> .....	31
Figura 3.9 – Autômato da Subplanta para o <i>Sensor B</i> .....	31
Figura 3.10 – Autômato da Especificação $E_1$ .....	31
Figura 3.11 – Autômato da Especificação $E_2$ .....	32
Figura 3.12 – Autômato da Planta Local $G_{L1}$ .....	33
Figura 3.13 – Autômato da Planta Local $G_{L2}$ .....	33
Figura 3.14 – Autômato do Supervisor Modular Local $SL_1$ .....	34
Figura 3.15 – Autômato do Supervisor Modular Local $SL_2$ .....	34
Figura 3.16 – Autômatos dos Supervisores Reduzidos.....	34
Figura 3.17 – Arquitetura de Queiroz e Cury (de Queiroz e Cury, 2002).....	36
Figura 3.18 – Estrutura de Implementação.....	37
Figura 3.19 – Fluxograma da Dinâmica de Processamento.....	41
Figura 3.20 – Supervisor para Distinção de Seqüência de Eventos (Fabian e Hellgren, 1998).....	42
Figura 3.21 – Supervisor Insensível ao Entrelaçamento.....	43
Figura 3.22 – Subplantas $G_1$ e $G_2$ e Especificação de Controle $E$ .....	44
Figura 3.23 – SED sob Supervisão: (a) Teórico, (b) Ordenação $\langle a_1 \rangle \langle a_2 \rangle$ , (c) Ordenação $\langle a_2 \rangle \langle a_1 \rangle$ .....	44
Figura 3.24 – Autômato do Supervisor Modular Local $SL_1$ .....	45
Figura 3.25 – Autômato do Supervisor Modular Local $SL_2$ .....	46
Figura 3.26 – Estrutura de Implementação do <i>Refrigerador Autônomo</i> .....	49
Figura 3.27 – Código ANSI C das Subplantas Assíncronas.....	52
Figura 3.28 – Código ANSI C dos Supervisores Reduzidos.....	53
Figura 3.29 – Código ANSI C que Implementa a Equação (3.1).....	54
Figura 3.30 – Código ANSI C que Implementa a Equação (3.2).....	54
Figura 3.31 – Código ANSI C que Implementa a Equação (3.3).....	55
Figura 4.1 – Foto do <i>Mini-Refrigerador</i> .....	59
Figura 4.2 – Diagrama do <i>Mini-Refrigerador</i> .....	59
Figura 4.3 – Vista Explodida do <i>Mini-Refrigerador</i> .....	60
Figura 4.4 – Foto do <i>Controle Eletrônico</i> .....	61
Figura 4.5 – Detalhe dos Elementos da <i>Interface com Usuário</i> .....	61
Figura 4.6 – Diagrama de Blocos do <i>Controle Eletrônico</i> .....	62

Figura 4.7 – Controle Eletrônico – Bloco Filtragem .....	62
Figura 4.8 – Controle Eletrônico – Bloco Acionamento das Cargas Liga/Desliga.....	63
Figura 4.9 – Controle Eletrônico – Bloco Condicionamento dos Sinais dos Sensores.....	64
Figura 4.10 – Controle Eletrônico – Bloco Controle do Damper Eletrônico .....	64
Figura 4.11 – Princípio de Operação do Motor de Passo Bipolar .....	65
Figura 4.12 – Ciclo de Energização dos Enrolamentos A e B (Movimentação no Sentido Horário) ...	65
Figura 4.13 – Controle Eletrônico – Bloco Interface com Usuário.....	66
Figura 4.14 – Controle Eletrônico – Bloco Processamento .....	67
Figura 4.15 – Autômatos das Subplantas $G_i$ , $i = 1, 2$ .....	69
Figura 4.16 – Autômatos das Subplantas $G_i$ , $i = 3, 4, \dots, 15$ .....	70
Figura 4.17 – Autômato da Subplanta $G_{16}$ .....	70
Figura 4.18 – Autômatos das Subplantas $G_i$ , $i = 17, 18, 19$ e $20$ .....	70
Figura 4.19 – Autômatos das Subplantas $G_i$ , $i = 21, 22$ e $23$ .....	70
Figura 4.20 – Autômatos das Restrições Físicas $R_i$ , $i = 1$ e $2$ .....	71
Figura 4.21 – Autômatos das Subplantas Assíncronas $SP_i$ , $i = 17$ e $18$ .....	72
Figura 4.22 – Autômatos das Especificações $E_i$ , $i = 1$ e $2$ .....	72
Figura 4.23 – Autômato da Especificação $E_3$ .....	72
Figura 4.24 – Autômato da Especificação $E_4$ .....	73
Figura 4.25 – Autômato da Especificação $E_5$ .....	73
Figura 4.26 – Autômato da Especificação $E_6$ .....	73
Figura 4.27 – Autômato da Especificação $E_7$ .....	74
Figura 4.28 – Autômato da Especificação $E_8$ .....	74
Figura 4.29 – Autômato da Especificação $E_9$ .....	74
Figura 4.30 – Autômato da Especificação $E_{10}$ .....	75
Figura 4.31 – Autômato dos Supervisores Reduzidos $SR_i$ , $i = 1$ e $2$ .....	79
Figura 4.32 – Autômato do Supervisor Reduzido $SR_3$ .....	79
Figura 4.33 – Autômato do Supervisor Reduzido $SR_4$ .....	79
Figura 4.34 – Autômato do Supervisor Reduzido $SR_5$ .....	80
Figura 4.35 – Autômato do Supervisor Reduzido $SR_6$ .....	80
Figura 4.36 – Autômato do Supervisor Reduzido $SR_7$ .....	80
Figura 4.37 – Autômato do Supervisor Reduzido $SR_8$ .....	80

Figura 4.38 – Autômato do Supervisor Reduzido <i>SR<sub>9</sub></i> .....	80
Figura 4.39 – Autômato do Supervisor Reduzido <i>SR<sub>10</sub></i> .....	81
Figura 4.40 – Controle de Temperatura .....	89
Figura 4.41 – Lógica de Controle das <i>Lâmpadas 1 e 2 e Led de Porta Aberta</i> .....	90
Figura 4.42 – Lógica de Controle do <i>Alarme de Porta Aberta</i> .....	91

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Conjunto de Eventos Não Controláveis .....	30
Tabela 3.2 – Conjunto de Eventos Controláveis .....	30
Tabela 3.3 – Processo de Obtenção das Plantas Locais .....	33
Tabela 3.4 – Representação do <i>SP</i> no Microcontrolador <i>M</i> .....	38
Tabela 3.5 – Representação dos <i>SRs</i> no Microcontrolador <i>M</i> .....	39
Tabela 4.1 – Conjunto de Eventos Controláveis .....	68
Tabela 4.2 – Conjunto de Eventos Não Controláveis .....	69
Tabela 4.3 – Subplantas Assíncronas do Sistema Produto.....	71
Tabela 4.4 – Mapa de Eventos das Especificações de Controle e Subplantas Assíncronas.....	76
Tabela 4.5 – Identificação das Plantas Locais.....	77
Tabela 4.6 – Identificação das Plantas Locais Assíncronas .....	78
Tabela 4.7 – Características dos <i>SLs</i> .....	78
Tabela 4.8 – Características dos <i>SRs</i> .....	79

## Lista de Abreviaturas

<b>TCS</b>	Teoria de Controle Supervisório
<b>SED</b>	Sistema a Eventos Discretos
<b>RW</b>	Ramadge-Wonham
<b>RSP</b>	Representação por Sistema Produto
<b>SE</b>	Sistema Embarcado num Eletrodoméstico
<b>M</b>	Microcontrolador
<b>P</b>	Planta
<b>SP</b>	Sistema Produto
<b>SL</b>	Supervisor Modular Local
<b>SR</b>	Supervisor Modular Local Reduzido
<b>I</b>	Interface
<b>SO</b>	Seqüências Operacionais
<b>RBN</b>	Rotina de Baixo Nível
<b>CLP</b>	Controlador Lógico Programável
<b>ANSI</b>	American National Standards Institute
<b>e.r.a.</b>	em relação a
<b>n.c.a.</b>	nenhuma das condições anteriores

# Lista de Símbolos

## Conjuntos e Funções

$A, B, X, Y$	conjuntos
$\mathbb{N}$	conjunto dos números naturais
$x, y$	elementos
$x \in A$	$x$ pertence a $A$
$x \notin A$	$x$ não pertence a $A$
$\emptyset$ ou $\{\}$	conjunto vazio
$A \subseteq B$	$A$ está contido em $B$
$A \subset B$	$A$ está contido propriamente em $B$
$A \supseteq B$	$A$ contém $B$
$A \supset B$	$A$ contém propriamente $B$
$A = B$	$A$ é igual a $B$
$A \cap B$	interseção de $A$ com $B$
$A \cup B$	união de $A$ com $B$
$A - B$	diferença entre $A$ e $B$
$2^A$	conjunto das partes de $A$
$A \times B$	produto cartesiano de $A$ com $B$
$f: A \rightarrow B$	função $f$ de $A$ em $B$
$f(x)$	valor que a função $f$ toma em $x \in A$
$f^{-1}: B \rightarrow A$	função inversa de $f$ , para o caso de $f$ bijetora
$f(X)$	imagem do conjunto $X \subseteq A$ pela função $f$
$f^{-1}(Y)$	imagem inversa do conjunto $Y \subseteq B$ pela função $f$
$f^{-1}(y)$	no caso de $f$ possuir inversa, o valor de $f^{-1}$ em $y \in B$ , caso contrário, imagem inversa do conjunto $\{y\} \subseteq B$

## Linguagens

$\Sigma$	alfabeto
$\sigma$	símbolo
$\sigma \in \Sigma$	símbolo em $\Sigma$
$\varepsilon$	palavra vazia
$s, t$	palavras
$s \in \Sigma^*$	palavra sobre $\Sigma$
$\Sigma^+$	conjunto de todas as palavras de comprimento finito e não nulo sobre $\Sigma$
$\Sigma^*$	conjunto de todas as palavras de comprimento finito sobre $\Sigma$
$st$	concatenação das palavras $s$ e $t$
$s \leq t$	$s$ é prefixo de $t$
$\bar{s}$	conjunto de todos os prefixos de $s$
$L, K$	linguagens
$L \subseteq \Sigma^*$	linguagem sobre $\Sigma$
$LK$	concatenação das linguagens $L$ e $K$
$\bar{L}$	prefixo-fechamento da linguagem $L$
$\Sigma_L(s)$	conjunto ativo dos símbolos em $L$ após $s \in \bar{L}$
$L^*$	fechamento Kleene da linguagem $L$
$p_i : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_i^*$	projeção de palavras sobre o alfabeto $\Sigma$ em palavras sobre $\Sigma_i \subseteq \Sigma$
$p_i(s)$	projeção da palavra $s \in \Sigma^*$ em $\Sigma_i^*$
$p_i(L)$	imagem da linguagem $L \subseteq \Sigma^*$ pela projeção $p_i$
$p_i^{-1}(L_i)$	imagem inversa da linguagem $L_i \subseteq \Sigma_i^*$ pela projeção $p_i$
$p_i^{-1}(t)$	imagem inversa de $t$
$L \parallel K$	produto síncrono de $L$ e $K$

## Expressões Regulares

$r, s$	expressões regulares
$r + s$	expressão regular representando a união de duas linguagens
$rs$	expressão regular representando a concatenação de duas linguagens
$r^*$	expressão regular representando o fechamento Kleene de uma linguagem

## Autômatos Determinísticos de Estados Finitos

$G$	autômato (determinístico de estados finitos)
$(Q, \Sigma, q_0, Q_m, \delta)$	representação de um autômato $G$
$\Sigma$	alfabeto de $G$

$q_0$	estado inicial de $G$
$Q$	conjunto de estados de $G$
$\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$	função de transição de $G$
$Q_m$	conjunto de estados marcados de $G$
$\hat{\delta}: Q \times \Sigma^*$	função de transição estendida para seqüências de eventos $s \in \Sigma^*$
$\Sigma_G(q)$	conjunto ativo de eventos de $G$ no estado $q \in Q$

### Representações de SEDs por Linguagens e Autômatos

$L(G)$	linguagem gerada pelo autômato $G$
$L_m(G)$	linguagem marcada pelo autômato $G$
$Ac(G)$	componente acessível do autômato $G$
$CoAc(G)$	componente co-acessível do autômato $G$
$trim(G)$	componente <i>trim</i> do autômato $G$
$G_1 \parallel G_2$	composição síncrona dos autômatos $G_1$ e $G_2$

### Controle Supervisório de SEDs: Abordagem Monolítica

$G$	SED que representa a planta a ser controlada
$\Sigma$	conjunto de eventos da planta $G$
$\sigma \in \Sigma$	evento da planta $G$
$\Sigma_c$	conjunto de eventos controláveis da planta $G$
$\Sigma_{nc}$	conjunto de eventos não controláveis da planta $G$
$L(G)$	linguagem gerada pela planta $G$
$L_m(G)$	linguagem marcada pela planta $G$
$E$	especificação de controle para a planta $G$
$K$	linguagem alvo de uma planta $G$
$\Gamma$	estrutura de controle para a planta $G$
$\gamma \in \Gamma$	padrão de controle
$S$	supervisor
$S/G$	planta $G$ sob supervisão de $S$
$L(S/G)$	linguagem gerada pela planta $G$ sob supervisão de $S$
$L_m(S/G)$	linguagem marcada pela planta $G$ sob supervisão de $S$
$C(K, L(G))$	linguagens controláveis contidas na linguagem alvo $K$ de uma planta $G$
$SupC(K, L(G))$	elemento supremo de $C$ , máxima linguagem controlável contida em $K$

## Controle Supervisório de SEDs: Abordagem Modular Local

$G_i$	subsistema (subplanta) $i$
$E_{xj}$	especificação genérica local $j$
$G_{Lj}$	planta local $j$ associada à especificação genérica local $E_{xj}$
$K_{Lj}$	linguagem alvo da planta local $G_{Lj}$
$SP_k$	subplanta assíncrona $k$
$SL_j$	supervisor modular local $j$
$SR_j$	supervisor modular local reduzido $j$

## Formalização da Metodologia de Implementação

$L_u(I_P) \rightarrow \sigma$	função de leitura de uma informação de $P$
$I_P$	informação de um elemento de $P$
$E_v(\sigma) \rightarrow A_P$	função de escrita num elemento de $P$
$A_P$	atuação num elemento de $P$
$\sigma \in \Sigma_c$	evento controlável
$\sigma \in \Sigma_{nc}$	evento não controlável
$\varepsilon$	evento vazio, que corresponde à não ocorrência de nenhum evento
$SP_i$	subplanta assíncrona $i$
$SP^i$	matriz que representa a subplanta assíncrona $SP_i$
$EASP$	vetor que contém o estado ativo de cada subplanta assíncrona $SP_i$
$ECASP^i$	vetor contendo os eventos controláveis ativos em cada estado de $SP_i$
$SR_j$	supervisor reduzido $j$
$SR^j$	matriz que representa o supervisor reduzido $SR_j$
$EASR$	vetor que contém o estado ativo de cada supervisor reduzido $SR_j$
$ECDSR^j$	vetor contendo os eventos controláveis desabilitados em cada estado de $SR_j$
$ECAH$	escalar contendo os eventos controláveis ativos no $SP$ e habilitados nos $SRs$
$s_1$ e $s_2 \in \Sigma^*$	seqüências de eventos não controláveis
$s_1 \parallel s_2$	conjunto dos possíveis entrelaçamentos de $s_1$ e $s_2$

# Capítulo 1

## Introdução

O projeto de sistemas de controle embarcados de alta confiabilidade sempre foi visto como um requisito essencial em aplicações críticas nos setores aeroespacial, aeronáutico, automobilístico, médico, entre outros.

Recentemente, esta preocupação vem sendo percebida em áreas antes consideradas secundárias sob este ponto de vista, tais como produtos de consumo da linha branca (refrigeradores, condicionadores de ar, fogões) e da linha marrom (televisores, equipamentos de áudio e vídeo). Cada vez mais, institutos de regulamentação ampliam a exigência ao atendimento de aspectos de segurança destes equipamentos, relacionados tanto à falhas de *hardware* como de *software*. A certificação nestes institutos demanda uma documentação de projeto rigorosa e um extenso relato dos testes de validação efetuados.

Adicionalmente, é consenso que falhas na criação de lógicas de controle acarretam num alto custo. Hoje existem milhões de programadores, que utilizam uma boa parcela do tempo testando e depurando aplicações. Quanto mais tarde a falha é detectada, maior o seu custo e o atraso de lançamento do produto. Conseqüências de falhas no campo, que resultam em *recalls* e processos legais, são comumente delicadas e em alguns casos bastante drásticas.

Equipamentos como refrigeradores, condicionadores de ar e fogões, podem ser vistos como sendo sistemas a eventos discretos (SEDs), que são sistemas dinâmicos que evoluem de acordo com a ocorrência abrupta, em intervalos de tempo irregulares e possivelmente desconhecidos, de estímulos, denominados eventos. São exemplos de eventos o início e o término de uma tarefa e a percepção de uma mudança de estado em um sensor.

O projeto de controladores para SEDs através do uso de metodologias formais, que se caracterizam pelo requisito de consistência dos modelos concebidos, aumenta a identificação de erros durante a fase de concepção e traz maior confiabilidade às soluções desenvolvidas.

A Teoria de Controle Supervisório (TCS) de sistemas a eventos discretos, introduzida em 1989 por Ramadge e Wonham, é uma abordagem para controle de SEDs, sob a ótica da Teoria de Controle, que modela os sistemas por linguagens formais e autômatos.

---

Esta teoria dispõe de ferramentas automáticas para o cálculo de supervisores a partir de pequenos modelos da planta e especificações de controle, o que permite tratar problemas complexos como sendo um conjunto de problemas menores. Além disto, existe a garantia que o supervisor obtido é ótimo (não bloqueante e minimamente restritivo). Sua modelagem por autômatos (grafos dirigidos), auxilia o processo de raciocínio em virtude da inerente característica visual, bem como permite a geração automática de código.

A aplicabilidade da abordagem monolítica (Ramadge e Wonham, 1989) de controle supervísório em problemas reais é bastante reduzida, pois tanto a planta como as especificações de controle são modeladas através de um único autômato, e assim, o procedimento inicial de modelagem da planta já pode induzir a uma explosão combinatória de estados pela composição dos diversos subsistemas.

A abordagem modular local (de Queiroz e Cury, 2002) surgiu como uma alternativa para reduzir a complexidade de síntese de supervisores para sistemas de maior porte. Enquanto o controle monolítico usa a linguagem da planta completa para gerar as linguagens desejadas, o controle modular local usa apenas as subplantas que são afetadas pelas especificações. Dessa forma, menos autômatos são compostos e os autômatos que representam as linguagens alvo são menores que na abordagem monolítica. Conseqüentemente, a complexidade da síntese e os supervisores obtidos são menores prevenindo-se assim a explosão combinatória de estados.

Devido a ser uma teoria recente, o uso da TCS na solução de problemas práticos ainda é restrito, com aplicações principalmente no controle de sistemas de manufatura. Nestas aplicações, comumente empregam-se controladores lógicos programáveis (CLPs), sendo também possível o uso de microcontroladores. São estudos nesta área as referências (Vieira, 2007) e (Brandin, 1996) com enfoque no desenvolvimento de *software* para CLPs e as referências (Wood, 2005) e (Jonerlan, 2007) com ênfase no desenvolvimento de *software* para microcontroladores.

As principais contribuições deste trabalho são listadas a seguir:

- A criação de um procedimento de projeto de controladores para eletrodomésticos, concebido com base na Teoria de Controle Supervísório de sistemas a eventos discretos, que utiliza a abordagem modular local para a síntese de supervisores e que define uma metodologia para a implementação destes supervisores em microcontroladores.

- A concepção e construção de um *Mini-Refrigerador* contendo dois compartimentos, destinado ao desenvolvimento de lógicas de controle para refrigeradores e utilizado como um ambiente real para a implementação e validação dos supervisores sintetizados.
- A aplicação e validação experimental do procedimento de projeto por meio de um problema real, o controle de um *Mini-Refrigerador* de acordo com um conjunto de especificações.
- A publicação de quatro artigos nacionais (XVI e XVII Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 2006 e 2008, VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI, 2007 e XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE, 2007) e dois artigos internacionais (VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – INDUSCON, 2008 e IV IEEE Conference on Automation Science and Engineering – IEEE CASE, 2008).

O texto é organizado como segue. No Capítulo 2, são introduzidos os conceitos essenciais da Teoria de Controle Supervisório (TCS) de sistemas a eventos discretos (SEDs). No Capítulo 3, apresenta-se uma proposta de procedimento de projeto de controladores para eletrodomésticos, concebida com base na TCS. A metodologia é apresentada de forma generalizada e seu uso é ilustrado através da solução de um problema motivador intitulado *Refrigerador Autônomo*. No Capítulo 4, o procedimento de projeto é aplicado num problema real, que consiste no controle de um *Mini-Refrigerador* contendo dois compartimentos. As características construtivas deste *Mini-Refrigerador*, a síntese dos supervisores e a validação experimental são apresentadas em detalhes. Por fim, no Capítulo 5, resumem-se as conclusões e perspectivas.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)