



## DIAGNÓSTICO DE FALHAS NO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UM SISTEMA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA POLIMÉRICA

Ighor Marcovitz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Marcos Vicente de Brito  
Moreira  
Oumar Diene

Rio de Janeiro  
Setembro de 2014

DIAGNÓSTICO DE FALHAS NO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UM  
SISTEMA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA POLIMÉRICA

Ighor Marcovistz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Marcos Vicente de Brito Moreira, D.Sc.

---

Prof. Oumar Diene, D.Sc.

---

Prof. Paulo Eigi Miyagi, Dr.Eng

---

Prof. José Geraldo de Melo Furtado, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2014

Marcovistz, Ighor

Diagnóstico de falhas no sistema de resfriamento de um sistema de células a combustível de membrana polimérica/Ighor Marcovistz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XX, 108 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Marcos Vicente de Brito Moreira

Oumar Diene

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 105 – 108.

1. Célula Combustível. 2. Falhas. 3. Detecção. 4. Diagnóstico. 5. Modelagem. I. Moreira, Marcos Vicente de Brito *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*One Art (by Elizabeth Bishop):*

*The art of losing isn't hard to  
master; so many things seem  
filled with the intent to be lost  
that their loss is no disaster.*

*Lose something every day.  
Accept the fluster of lost door  
keys, the hour badly spent. The  
art of losing isn't hard to master.*

*Then practice losing farther,  
losing faster: places, and names,  
and where it was you meant to  
travel. None of these will bring  
disaster.*

*I lost my mother's watch. And  
look! my last, or next-to-last, of  
three loved houses went. The art  
of losing isn't hard to master.*

*I lost two cities, lovely ones.  
And, vaster, some realms I  
owned, two rivers, a continent. I  
miss them, but it wasn't a  
disaster.*

*Even losing you (the joking  
voice, a gesture I love) I shan't  
have lied. It's evident the art of  
losing's not too hard to master  
though it may look like (Write  
it!) like disaster.*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus familiares, por toda sua contribuição desde meu nascimento. Em especial ao meu pai, George Marcovistz, e aos meus tios, Rugimar Marcovistz e José Oliveira e Silva.

Agradeço aos meus amigos Rafael José Gonçalves Pereira, Thiago Braga de Almeida Antônio, Gabriel Casulari da Motta Ribeiro, Luiz Sérgio de Paiva Amorim e aos demais, pelos momentos que passamos juntos e pelo apoio que me deram.

Agradeço aos meus ídolos na carreira de engenharia: Angélica Sabino Zamith, Fábio da Silva Correa, Daniel Arantes Bernardes, Ricardo Seiti Gondo, Felipe Andrade Lucci, Fabio Pedrotti Terra e Eduardo Valim, assim como agradeço aos demais colegas de trabalho dos quais tive apoio durante toda minha vida profissional, pelos ensinamentos, pelo carisma e por serem os grandes responsáveis pelo meu crescimento profissional.

Agradeço aos professores que encontrei durante o curso de mestrado em Engenharia Elétrica, pela contribuição para minha formação, em especial aos professores Ramon Romankevicius Costa, Alessandro Peixoto Jacoud e Eduardo Vieira Leão Nunes, pelo voto de confiança que depositaram em mim ao oferecer a vaga de trabalho que ocupo hoje, graças à qual foi possível meu auto-financiamento para conclusão deste curso de mestrado e pelo apoio incondicional que me deram para conseguir desempenhar minhas funções em paralelo com o mestrado, da melhor forma possível.

Agradeço ao meu orientador, Marcos Vicente de Brito Moreira, em especial pela oportunidade, empenho, paciência, orientação, didática e confiança. Agradeço também ao professor Oumar Diene e aos demais membros da banca examinadora.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## DIAGNÓSTICO DE FALHAS NO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE UM SISTEMA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA POLIMÉRICA

Ighor Marcovistz

Setembro/2014

Orientadores: Marcos Vicente de Brito Moreira  
Oumar Diene

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho é apresentado um modelo capaz de representar o comportamento de uma célula a combustível de membrana polimérica. O modelo desenvolvido possui como entradas a corrente requerida pela carga, a temperatura do sistema, a pressão no catodo e a pressão no anodo, fornecendo como saídas a tensão elétrica do empilhamento e a sua temperatura. Com base no modelo, foi desenvolvido um estudo a respeito do diagnóstico de falhas no sistema de resfriamento da célula, através de autômatos e diagnosticadores derivados da teoria de Sistemas a Eventos Discretos. Desta forma, o comportamento do sistema de resfriamento e de alguns de seus periféricos foi modelado utilizando-se autômatos e um estudo a respeito da diagnosticabilidade de diversas falhas do sistema de resfriamento foi realizado, com o intuito de garantir a segurança e a eficiência da operação do sistema. Foi possível, por meio do uso de geradores de eventos para criar sensores virtuais adicionais, desenvolver a técnica para diagnosticar as falhas: do sensor de temperatura, de um controlador tipo relé, além das falhas parcial e total do ventilador do sistema de resfriamento.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FAULT DIAGNOSIS IN THE COOLING SYSTEM OF A POLYMERIC  
MEMBRANE FUEL CELL SYSTEM

Ighor Marcovitz

September/2014

Advisors: Marcos Vicente de Brito Moreira  
Oumar Diene

Department: Electrical Engineering

In this work it is presented a model to represent the behavior of a fuel cell with polymer membrane. The model developed has as inputs the current required by the load, the temperature of the system, the pressure at the cathode and the pressure at the anode, providing as outputs the electric voltage of the stack and its temperature. Based on the model, a study concerning the diagnosis of failures in the cooling system of the cell was developed through automata and diagnosers derived from Discrete Event Systems theory. Thus, the behavior of the cooling system and some of its peripherals was modeled using automata and a study about the diagnosability of several failures of the cooling system was carried out in order to ensure the safety and efficiency of the system operation. It was possible, through the use of event generators creating additional virtual sensor, to develop the technique for diagnosing faults on: the temperature sensor, a relay type controller, besides the partial and total failure of the cooling system fan.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.1.1 Diagnóstico e Detecção de Falhas . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Metodologia . . . . .	5
1.4 Organização do Trabalho . . . . .	6
<b>2 Um Modelo Matemático para um Sistema de Célula a Combustível de Membrana Polimérica</b>	<b>7</b>
2.1 Modelo Estático de Tensão de uma Célula a Combustível . . . . .	7
2.1.1 Tensão de Circuito Aberto de uma Célula a Combustível . . . . .	7
2.1.2 Perdas de Tensão . . . . .	11
2.1.3 Modelo de Tensão da Célula . . . . .	16
2.2 Modelo Dinâmico de Temperatura . . . . .	17
2.2.1 Temperatura . . . . .	18
2.3 Controle de Temperatura . . . . .	24
2.4 Simulações . . . . .	24
2.4.1 Análise da Variação de Temperatura . . . . .	27
2.4.2 Funcionamento com Controle de Temperatura . . . . .	27
2.4.3 Análise da Variação de Tensão . . . . .	32
2.4.4 Variação de Corrente . . . . .	34
2.4.5 Relação Tensão x Corrente . . . . .	35
<b>3 Diagnóstico de Falhas em Sistemas a Eventos Discretos</b>	<b>37</b>
3.1 Autômatos . . . . .	41
3.2 Operações Unárias . . . . .	42



3.3	Operações de Composição . . . . .	44
3.4	SED Parcialmente Observados . . . . .	46
3.5	Diagnóstico de Falhas . . . . .	48
3.6	Autômato Diagnosticador de Falhas . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Modelo a Eventos Discretos do Sistema</b>	<b>55</b>
4.1	Modelo a Eventos Discretos do Sensor de Temperatura . . . . .	57
4.2	Modelo a Eventos Discretos do Controlador de Temperatura . . . . .	58
4.3	Modelo a Eventos Discretos da Planta com Atuador . . . . .	59
4.4	Composição Paralela dos Componentes do Sistema . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Análise da Diagnosticabilidade das Falhas no Sistema de Resfriamento das Células a Combustível</b>	<b>65</b>
5.1	Análise da Falha no Sensor de Temperatura . . . . .	65
5.2	Análise da Falha no Controlador de Temperatura . . . . .	75
5.3	Análise da Falha Total do Ventilador . . . . .	84
5.4	Análise da Falha Parcial do Ventilador . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>103</b>
6.1	Propostas de Trabalhos Futuros . . . . .	104
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>105</b>

# Lista de Figuras

2.1	Esquema Ilustrativo de uma Célula Combustível . . . . .	9
2.2	Diagrama do Sistema de Controle de Temperatura . . . . .	24
2.3	Diagrama de Blocos para o Calor Químico e o Potencial Elétrico . . . . .	25
2.4	Diagrama de Blocos para o Calor Sensível e Latente . . . . .	25
2.5	Diagrama de Blocos para o Calor de Convecção . . . . .	26
2.6	Diagrama de Blocos da Temperatura . . . . .	26
2.7	Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema sem Controle . . . . .	27
2.8	Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 40A . . . . .	28
2.9	Gráfico Sinal de Controle x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 40A . . . . .	28
2.10	Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 45A . . . . .	29
2.11	Gráfico Sinal de Controle x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 45A . . . . .	30
2.12	Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 50A . . . . .	31
2.13	Gráfico Sinal de Controle x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 50A . . . . .	31
2.14	Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema sem controle . . . . .	32
2.15	Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com controle com 40A . . . . .	33
2.16	Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com controle com 45A . . . . .	33
2.17	Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com controle com 50A . . . . .	34
2.18	Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com aumento de 10A na corrente nominal . . . . .	35
2.19	Gráfico Tensão(V) x Corrente(A) do Sistema para 328K, 337K, 338K, 339K e 348K . . . . .	36
3.1	Autômato Rotulador de Estados: $A_{label}$ . . . . .	51
3.2	Exemplo da Construção de um Diagnosticador de Falhas . . . . .	52

4.1	Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) com (a)75%, (b)50% e (c)25% de Eficiência do Ventilador . . . . .	56
4.2	Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) com 25% do Ventilador . . . . .	56
4.3	Autômato para o Sensor de Temperatura . . . . .	58
4.4	Autômato para o Controlador de Temperatura . . . . .	59
4.5	Autômato da Planta e do Atuador . . . . .	61
4.6	Parte Normal do Autômato da Planta e do Atuador . . . . .	62
4.7	Composição Paralelo Renomeada do Sistema . . . . .	64
5.1	Autômato Rotulador de Falha no Sensor . . . . .	67
5.2	Composição Paralela entre o Autômato que Modela o Sistema Apre- sentado na Figura 4.7 com o Autômato Rotulador da Figura 5.1 . . .	68
5.3	Parte do Autômato da Figura 5.2 . . . . .	69
5.4	Diagnosticador para Falha no Sensor . . . . .	70
5.5	Parte do Autômato da Figura 5.4 . . . . .	71
5.6	Autômato da Figura 5.2 com Geração de Eventos para Tensão Baixa	72
5.7	Parte do Autômato da Figura 5.6 . . . . .	73
5.8	Diagnosticador da Falha no Sensor Após Introdução do Evento Ob- servável $l_V$ . . . . .	74
5.9	Autômato Rotulador de Falha no Controlador . . . . .	76
5.10	Composição Paralela entre o Autômato que Modela o Sistema Apre- sentado na Figura 4.7 com o Autômato Rotulador da Figura 5.9 . . .	77
5.11	Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.10 . . . . .	78
5.12	Diagnosticador para Falha no Controlador . . . . .	79
5.13	Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.12 . . . . .	80
5.14	Autômato da Figura 5.10 com Geração de Eventos para Tensão Baixa e Atrasos no Tempo de Varredura . . . . .	81
5.15	Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.14 . . . . .	82
5.16	Diagnosticador da Falha no Controlador Após Introdução dos Eventos Observáveis $l_V$ e $t_c$ . . . . .	83
5.17	Autômato Rotulador de Falha Total do Ventilador . . . . .	85
5.18	Composição Paralela entre o Autômato que Modela o Sistema Apre- sentado na Figura 4.7 com o Autômato Rotulador da Figura 5.17 . . .	86
5.19	Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.18 . . . . .	87
5.20	Diagnosticador para Falha Total de Ventilador Rotulada . . . . .	88
5.21	Ilustração de parte do Diagnosticador da Figura 5.20 . . . . .	89
5.22	Autômato da Figura 5.18 com Geração de Eventos para Tensão Baixa, Tempo de Subida e Tempo de Descida . . . . .	90
5.23	Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.22 . . . . .	91

5.24	Diagnosticador da Falha Total do Ventilador Após Introdução dos Eventos Observáveis $l_V$ , $t_s$ e $t_d$ . . . . .	92
5.25	Autômato Rotulador de Falha Parcial do Ventilador . . . . .	94
5.26	Composição Paralela entre o Autômato que Modela o Sistema Apre- sentado na Figura 4.7 com o Autômato Rotulador da Figura 5.25 . . .	95
5.27	Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.26 . . . . .	96
5.28	Diagnosticador para Falha Parcial de Ventilador Rotulada . . . . .	97
5.29	Ilustração de parte do Diagnosticador da Figura 5.28 . . . . .	98
5.30	Autômato da Figura 5.26 com Geração de Eventos para Tensão Baixa, Tempo de Subida e Tempo de Descida . . . . .	99
5.31	Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.30 . . . . .	100
5.32	Diagnosticador da Falha Parcial do Ventilador Após Introdução dos Eventos Observáveis $l_V$ , $t_s$ e $t_d$ . . . . .	101
5.33	Ilustração de parte do Diagnosticador da Figura 5.32 . . . . .	102

# Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros de Ajuste do Modelo de Tensão Elétrica da Célula . . . .	17
2.2	Parâmetros de Ajuste do Modelo Dinâmico . . . . .	23
4.1	Mapa de Estados Renomeados . . . . .	63

# Lista de Símbolos

$A$	Área da CaC, p. 13
$A_c(G)$	Parte Acessível do Autômato G, p. 43
$A_{ext}$	Área Externa da CaC, p. 22
$C$	Calor Específico Molar, p. 19
$CO_2$	Dióxido de Carbono, p. 1
$C_0$	Estado Inicial do Controlador, p. 59
$C_1$	Recepção do Sinal de Temperatura Alta no Controlador, p. 59
$C_2$	Recepção do Sinal de Temperatura Baixa no Controlador, p. 59
$C_f$	Estado de Falha do Controlador, p. 59
$C_{H_2}$	Capacidade Térmica Média do Hidrogênio, p. 20
$C_{N_2}$	Capacidade Térmica Média do Nitrogênio, p. 20
$C_{O_2}$	Capacidade Térmica Média do Oxigênio, p. 20
$C_{O_2}^*$	Concentração Efetiva de Oxigênio na Camada Catalítica do Catodo, p. 13
$C_{VaporH_2O}$	Capacidade Térmica Média do Vapor d'Água, p. 20
$C_{avg}$	Calor Específico Médio da CaC, p. 21
$C_p$	Calor Específico do Ar Injetado na CaC, p. 22
$CoAc(G)$	Parte Coacessível de um Autômato, p. 43
$Co_f$	Estado de Falha do Controlador, p. 59
$D$	Diâmetro das Pás do Ventilador, p. 22

$E$	Tensão de Circuito Aberto Gerada, p. 10
$E^0$	Tensão de Circuito Aberto de Formação, p. 10
$F$	Constante de Faraday, p. 10
$G$	Autômato Determinístico, p. 41
$G_d$	Autômato Diagnosticador, p. 51
$G_1 \parallel G_2$	Operação de Paralelo entre os Autômatos $G_1$ e $G_2$ , p. 45
$G_1 \times G_2$	Operação de Produto entre os Autômatos $G_1$ e $G_2$ , p. 44
$G_{nd}$	Autômato Não Determinístico, p. 46
$H^+$	Próton de Hidrogênio, p. 8
$H_2O$	Água, p. 7
$H_2$	Gás Hidrogênio, p. 4
$H_{vap}$	Calor de Vaporização, p. 20
$I$	Corrente de Carga, p. 19
$K$	Temperatura em Kelvin, p. 19
$K_a$	Constante para o Cálculo da Perda por Ativação, p. 12
$K_p$	Fator de Compressibilidade, p. 22
$L(G)$	Linguagem Gerada pelo Autômato $G$ , p. 42
$L/s$	Pós Linguagem de L Após a Sequência de Eventos $s$ , p. 39
$L^*$	<i>fecho de Kleene</i> de L, p. 38
$L_m(G)$	Linguagem Marcada pelo Autômato $G$ , p. 42
$M_{avg}$	Massa Total da CaC, p. 21
$N$	Número de Células no Empilhamento, p. 23
$O_2$	Gás Oxigênio, p. 4
$Obs(G, \Sigma_o)$	Autômato Observador de um Autômato com relação a um conjunto de eventos Observáveis, p. 47
$P$	Pressão Parcial do Gás, p. 10

$P(e)$	Projeção do Evento $e$ , p. 39
$P^0$	Pressão Atmosférica Padrão, p. 10
$P^{-1}(L)$	Projeção Inversa de $L$ , p. 40
$P_{H_2O}$	Pressão Parcial de Água, p. 10
$P_{H_2O}^{sat}$	Pressão de Saturação da Água, p. 11
$P_{H_2}$	Pressão Parcial de Hidrogênio, p. 10
$P_{O_2}$	Pressão Parcial de Oxigênio, p. 10
$P_{an}$	Pressão no anodo, p. 11
$P_{ca}$	Pressão no Catodo, p. 11
$R$	Constante Universal dos Gases, p. 10
$R^{int}$	Resistência Interna da CaC, p. 15
$R^{proton}$	Resistência ao Fluxo de Prótons em uma Membrana Polimérica, p. 15
$R_{eq}$	Resistência Equivalente da CaC, p. 16
$SDVC$	Sistemas Dinâmicos de Variáveis Contínuas, p. 37
$S_0$	Estado Inicial do Sensor de Temperatura, p. 58
$S_1$	Deteção de Temperatura Alta pelo Sensor, p. 58
$S_2$	Deteção de Temperatura Baixa pelo Sensor, p. 58
$Se_f$	Falha no Sensor de Temperatura, p. 58
$T$	Temperatura da CaC em Kelvin, p. 10
$T_0V_0$	Estado Inicial da Planta com Atuador, p. 62
$T_hV_d$	Temperatura Alta e Ventilador Desligado, p. 62
$T_hV_l$	Temperatura Alta e Ventilador Ligado, p. 62
$T_hV_p$	Temperatura Alta e Ventilador Ligado com Falha Parcial, p. 62
$T_hV_t$	Temperatura Alta e Ventilado Travado, p. 62



$T_h V_{dp}$	Temperatura Alta e Ventilador Desligado com Falha Parcial, p. 62
$T_l V_d$	Temperatura Baixa e Ventilador Desligado, p. 62
$T_l V_l$	Temperatura Baixa e Ventilador Ligado, p. 62
$T_l V_p$	Temperatura Baixa e Ventilador Ligado com Falha Parcial, p. 62
$T_l V_t$	Temperatura Baixa e Ventilador Travado, p. 62
$T_l V_{dp}$	Temperatura Baixa e Ventilador Desligado com Falha Parcial, p. 62
$T_m V_d$	Temperatura na Média e Ventilador Desligado, p. 62
$T_m V_l$	Temperatura na Média e Ventilador Ligado, p. 62
$T_m V_p$	Temperatura na Média e Ventilador Ligado com Falha Parcial, p. 62
$T_m V_t$	Temperatura na Média e Ventilador Travado, p. 62
$T_m V_{dp}$	Temperatura na Média e Ventilador Desligado com Falha Parcial, p. 62
$T_{in}$	Temperatura do Fluido, p. 22
$T_l(s)$	Perdas por Atrito e Ventilação, p. 21
$T_{out}$	Temperatura da CaC, p. 22
$UR(x)$	Alcance Não Observável, p. 47
$V_{at}$	Perda de Tensão por Ativação, p. 12
$V_a(s)$	Tensão de Armadura Imposta sobre o Motor, p. 21
$V_{cell}$	Tensão Produzida pela CaC, p. 16
$X$	Espaço de Estados, p. 41
$X_m$	Conjunto de Estados Marcados, p. 41
$\Delta T$	Variação de Temperatura, p. 19
$\Delta G_f$	Variação da Energia Livre de Gibbs, p. 10

$\Delta G_f^\circ$	Varição da Energia Livre de Gibbs de Formação, p. 10
$\Gamma$	Função dos Eventos Ativos, p. 41
$\Sigma$	Conjunto de Eventos, p. 38
$\Sigma_f$	Conjunto de Eventos de Falha, p. 48
$\Sigma_o$	Conjunto de Eventos Observáveis, p. 46
$\Sigma_{uo}$	Conjunto de Eventos Não Observáveis, p. 46
$\alpha$	Coefficiente de Transferência de Carga, p. 13
$\bar{L}$	Fecho de Prefixo de L, p. 39
$\beta$	Razão entre a Fração Molar de Nitrogênio e a Fração Molar de Oxigênio, p. 11
$\dot{m}(t)$	Vazão Mássica de Ar Injetado na CaC, p. 22
$\dot{n}$	Vazão Molar do Reagente, p. 19
$\dot{n}_{H_2}$	Vazão Molar de Hidrogênio, p. 20
$\dot{n}_{N_2}$	Vazão Molar de Nitrogênio, p. 20
$\dot{n}_{O_2}$	Vazão Molar de Oxigênio, p. 20
$\dot{n}_{VaporH_2O}$	Vazão Molar de Vapor d'Água, p. 20
$\dot{q}_{calor}$	Fluxo de Calor que é Gerado na CaC, p. 18
$\dot{q}_{conv}$	Perdas de Calor por Convecção, p. 18
$\dot{q}_{elec}$	Potência Elétrica do Circuito Externo, p. 18
$\dot{q}_{lat}$	Fluxo de Calor Latente, p. 18
$\dot{q}_{quimico}$	Fluxo de Energia Livre de Gibbs, p. 18
$\dot{q}_{sens}$	Fluxo de Calor Sensível, p. 18
$\eta_{act}$	Perda de Tensão por Ativação Calculada Empiricamente, p. 14
$\eta_{conc}$	Perda de Tensão por Transporte de Massa, p. 16
$\eta_{ohm}$	Perda de Tensão Ôhmica Calculada Empiricamente, p. 15
$\gamma$	$\frac{1}{\beta}$ , p. 11

$\omega(s)$	Transformada de Laplace da Velocidade Angular da Hélice, p. 21
$\rho$	Densidade do Ar, p. 22
$\rho^{int}$	Resistividade Interna ao Fluxo de Prótons, p. 16
$\rho_m$	Resistividade Específica da CaC ao Fluxo de Prótons Hidratados, p. 15
$\tau$	Parâmetro Ajustável, p. 15
$a$	Atividade dos Elementos da Reação, p. 10
$e^-$	Elétron, p. 8
$f(X \times \Sigma) \rightarrow X$	Função de Transição de Estados, p. 41
$h_{Ts}$	Sinal Indicador de Temperatura Alta, p. 58
$h_T$	Evento de Temperatura Alta, p. 58
$h_f$	Coefficiente de Convecção Forçada, p. 23
$h_{natural}$	Coefficiente de Convecção Natural, p. 22
$i$	Densidade de Corrente no Eletrodo, p. 12
$i_0$	Densidade de Corrente de Troca para Passagem de Elétrons, p. 12
$ihc$	Ciclo Escondido Indeterminado, p. 52
$jJ$	j Moles de um Reagente J, p. 9
$kK$	k moles de um Reagente M, p. 9
$l$	Espessura da Membrana Polimérica, p. 15
$l_{Ts}$	Sinal Indicador de Temperatura Baixa, p. 58
$l_T$	Evento de Temperatura Baixa, p. 58
$l_V$	Evento que Representa Queda de 1 Volt na Tensão da CaC, p. 65
$m$	Evento Indicando que a Temperatura da CaC Entrou em sua Correta Faixa de Funcionamento, p. 62

$n$	Evento Genérico que apenas torna a Linguagem Viva, p. 65
$nM$	n moles de um produto M, p. 9
$off$	Evento para Desligar o Ventilador, p. 59
$on$	Evento para Ligar o Ventilador, p. 59
$p$	Falha Parcial do Ventilador, p. 62
$t$	Falha Total do Ventilador, p. 62
$t_c$	Evento de Atraso no Tempo de Resposta do Controlador, p. 75
$t_d$	Evento de Tempo de Descida, p. 84
$t_s$	Evento de Tempo de Subida, p. 84
$t_o$	Instante de Tempo Inicial, p. 38
$u(t)$	Sinal de Controle do Ventilador, p. 22
$x(t)$	Estado do Sistema no instante $t$ , p. 38
$x_0$	Estado Inicial, p. 41
$x_{N_2}$	Fração Molar de Nitrogênio, p. 11
$x_{O_2}$	Fração Molar de Oxigênio, p. 11
$\dot{n}_{H_2}$	Vazão Molar de Hidrogênio Consumido pela CaC, p. 19
CaC	Célula a Combustível, p. 4
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell, p. 5
SED	Sistemas a Eventos Discretos, p. 6
hc	Ciclo Escondido Determinado, p. 53

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

De acordo com CANÇADO *et al.* (2006), a queima de biomassa, em ambientes externos e internos, utilizada desde a pré-história para produção de energia, tem sido uma das importantes fontes de poluição atmosférica. A partir da Revolução Industrial, surgiram novas fontes de poluição do ar devido à queima de combustíveis fósseis nos motores a combustão, nas indústrias siderúrgicas e nos veículos automotivos, além dos produtos químicos. Esses processos não foram acompanhados de análises que pudessem avaliar seu impacto sobre o meio ambiente, a toxicidade dos resíduos produzidos e os prováveis danos à saúde.

Diante deste fato, MARCILIO e GOUVEIA (2007) afirmam que o reconhecimento de que os níveis de poluição do ar podem produzir efeitos adversos sobre a saúde humana motivou um amplo debate sobre o tema. Os primeiros estudos que examinaram qual associação pode haver entre a poluição atmosférica e os efeitos na saúde datam da primeira metade do século XX e relatam aumentos significativos na morbidade e mortalidade em cidades dos países industrializados. Seguindo essa onda inicial de pesquisas, uma série de estudos foram realizados a fim de caracterizar adequadamente esta associação. A quantidade e diversidade de estudos publicados nas últimas décadas reforçam a identificação da poluição do ar como um importante fator de risco para a saúde humana.

Como uma das formas de combater esse problema, LARMINIE e DICKS (2003) argumentam que durante os últimos anos do século XX, diversas mudanças surgiram no sentido de estimular um interesse novo e crescente a respeito da tecnologia de CaCs. Preocupações ambientais sobre o aquecimento global e a necessidade de reduzir as emissões de  $CO_2$  proporcionaram o estímulo para buscar formas de melhorar a eficiência na conversão energética. A indústria de veículos automotivos, além de buscar uma maior eficiência no consumo de combustível, é também cada vez mais

pressionada por leis ambientais a buscar tecnologias capazes de eliminar as emissões, cujo objetivo final seria o carro com emissão zero de poluição. As indústrias, após o impacto da privatização e desregulamentação, estão procurando maneiras de aumentar sua posição competitiva e, ao mesmo tempo, vão acabar contribuindo para a redução das emissões ambientais.

O uso de uma célula a combustível, sempre referenciada neste trabalho como CaC, tem várias vantagens sobre os dispositivos de conversão de energia existentes atualmente. Estes incluem o tipo e quantidade de emissões que produzem e sua eficiência. Uma CaC produz apenas eletricidade, água e calor, eliminando assim a poluição no dispositivo de conversão de energia. Em contraste, os dispositivos de conversão de energia existentes são responsáveis pela maioria das emissões que degradam a qualidade do ar da maior parte das cidades. A eficiência das CaCs é mais alta do que a dos demais dispositivos de conversão de energia usados atualmente, como, por exemplo, a energia solar fotovoltaica (LEE e LALK, 1998).

Além disso, HUA *et al.* (2011) destacam as CaCs com membrana trocadora de prótons (Proton Exchange Membrane Fuel Cells - PEMFC), que utilizam pilhas simples e compactas, ou seja, sem requisitos complexos em relação ao oxidante, combustível e material de refrigeração. As CaCs com membrana trocadora de prótons fornecem alta densidade de energia e oferecem as vantagens de baixo peso e volume em relação a outras CaCs. Assim, as CaCs do tipo PEM são usadas principalmente para aplicações automotivas. Como exemplo, um laboratório da Universidade Tsinghua iniciou a pesquisa sobre o veículo movido por CaC em 2002 (JIA *et al.*, 2006), voltada principalmente para veículos comerciais. Com o apoio do Programa Nacional de Pesquisa de Alta Tecnologia da China, várias frotas de ônibus movidos por CaCs foram postas em serviço para o Jogos Olímpicos de Pequim em 2008 (HUA *et al.*, 2009), na Expo 2010 de Xangai (XU *et al.*, 2010) e nos Jogos Olímpicos da Juventude em Cingapura (BARRETT *et al.*, 2010).

Uma vez que seu uso passa a representar reais tecnologias alternativas de fornecimento de energia inclusive para uso da população, tornam-se importantes os estudos como os de VEGA-LEAL *et al.* (2007), que introduzem a concepção de um sistema de controle para as CaCs para gerenciar empilhamentos de CaCs, tornando seu uso mais eficiente e seguro. O sistema de controle garante o correto desempenho da pilha em torno do ponto de operação ideal, controlando fluxo de ar e temperatura. A evolução atual no projeto de sistemas de CaCs, junto com o considerável desenvolvimento de técnicas de controle integrado em sistemas de microprocessadores, permite o desenvolvimento de aplicações de CaCs portáteis com controle otimizado para o desempenho das mesmas.

Neste sentido, torna-se indispensável o desenvolvimento de técnicas de controle para estabilizar a temperatura desse tipo de sistema, uma vez que tal variável re-

presenta uma das componentes que mais influencia na determinação da energia produzida por uma CaC, ou seja, seria interessante também o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de representar o sistema de resfriamento da mesma.

Como um outro exemplo de aplicação de CaCs, LUO *et al.* (2008) desenvolvem um sistema para diagnóstico de falhas em veículos movidos por CaCs. Quando comparados com veículos convencionais, tais veículos usam hidrogênio como fonte de energia para produzir eletricidade, sendo então basicamente livre de emissão de poluentes. Entretanto, para isso, há um conjunto maior de componentes elétricos, como um motor e conversores eletrônicos de potência. Isso indica um certo nível de complexidade ao garantir um trabalho seguro e eficaz com tais CaCs.

Portanto, a detecção e diagnóstico de falhas em sistemas de CaC é um aspecto importante ao promover a comercialização de veículos alimentados por meio desta fonte, tanto quando a mesma for utilizada de forma compartilhada com outros tipos de tecnologia de conversão de energia quanto em aplicações onde a mesma é responsável por produzir toda a carga requerida pelo sistema.

Desta forma será possível viabilizar um uso em larga escala de uma alternativa segura, eficaz e, principalmente, ecologicamente correta de tecnologia, capaz de substituir plenamente os atuais motores movidos por combustíveis fósseis, que geram tantos problemas ambientais.

### 1.1.1 Diagnóstico e Detecção de Falhas

Em RIASCOS *et al.* (2008) é desenvolvido um diagnóstico através de redes bayesianas, que qualificam e quantificam a relação de causa-efeito entre as variáveis do processo. O diagnóstico de falhas é baseado no monitoramento on-line de variáveis, tais como a corrente, a tensão elétrica e a temperatura. O equipamento é um sistema de CaC que pode funcionar mesmo quando ocorre uma falha. Os efeitos de falha são baseados em experiências com a CaC tolerante a falhas, que são reproduzidas num modelo de CaC. Uma base de dados de registros de falhas é construída a partir do modelo, melhorando o tempo de geração e evitando danos permanentes no equipamento.

Em HISSEL *et al.* (2004) é proposto um sistema para diagnóstico de falhas utilizando lógica fuzzy. Uma desvantagem desse trabalho é a metodologia proposta, que leva em conta apenas dois tipos de falhas (acúmulo de água / nitrogênio no compartimento do anodo e secagem da membrana). A vantagem do método proposto nesta dissertação é que o estudo foi feito com base em um modelo matemático que buscou ser o mais acurado possível em relação às variáveis de processo consideradas, validando seus resultados com os vistos na literatura. Além disso, o modelo matemático proposto é adaptável às características físicas de qualquer CaC, permi-

tindo uma análise mais precisa da evolução do sistema.

Em HUA *et al.* (2011) é apresentado um trabalho sobre diagnóstico de falhas baseado em métodos estatísticos multivariáveis em que é apresentada uma análise de diagnóstico e estudo de implementação com base no método da Análise de Componentes Principais (PCA) para um sistema de CaC. O modelo é implementado com sucesso para detectar uma falha na rede de sensores de um empilhamento de CaCs usado em uma frota de ônibus na Shangai Expo em 2010. A vantagem de usar um método estatístico como o PCA reside no fato de que quanto maior a sua base de dados, melhor será a representação do sistema real pelo modelo.

Por fim, MERIDA *et al.* (2006) investigam medidas de espectroscopia de impedância para caracterizar os efeitos macroscópicos de desidratação e inundações do catodo na impedância de uma CaC. Os dois modos de falha foram simulados em CaCs individuais dentro de uma pilha de quatro CaCs sob carga. Os efeitos da desidratação e de inundações foram mensuráveis na faixa de frequência de 0,5 até 100 Hz. Esses resultados ilustram que as medições de impedância separadas ou em simultâneo para diferentes gamas de frequência podem ser utilizadas para identificar os dois modos de falhas quase instantaneamente (com tempo de detecção sendo limitado pela resposta ou o tempo de aquisição de um dispositivo de diagnóstico eventual).

Os autores BÜCHI e SCHERER (1996) priorizam medidas in situ da resistência de membranas Nafion® 117 para determinar a dependência dessa resistência em relação aos valores de temperatura, densidade de corrente, pressão e projeto dos campos de fluxo. MANN *et al.* (2006) avaliam os dados de solubilidade publicados, propõem uma série de correlações e resumem os procedimentos para usar tais correlações. ZHANG *et al.* (2006) mediram a tensão de circuito aberto em determinadas condições e observaram seu comportamento em relação ao que variou na temperatura, assim como verificou a influência das pressões parciais de  $O_2$  e  $H_2$ . De um modo geral, é possível perceber que na modelagem feita por cada autor há diversos tipos de simplificações ou até mesmo são desconsiderados alguns parâmetros importantes para o desempenho deste tipo de sistema.

## 1.2 Objetivos

Um dos objetivos da presente dissertação é propor um modelo matemático apropriado para diagnóstico de falhas em CaCs. Esse modelo deve representar a tensão elétrica, a dinâmica de temperatura e, principalmente, um sistema de resfriamento da CaC para, a partir dele, obter-se uma representação a eventos discretos para análise da diagnosticabilidade das falhas no sistema de resfriamento do empilhamento. O presente trabalho busca elaborar um modelo que leve em consideração



um maior número de iterações físicas, mecânicas e químicas de uma CaC para ser capaz de representar mais fielmente seu comportamento.

Após realizar esta tarefa de construir um modelo fiel ao comportamento de uma CaC, figura como objetivo principal desta dissertação demonstrar o potencial de técnicas da teoria de Sistemas a Eventos Discretos (SED) aplicadas à detecção e identificação das falhas do sistema de CaCs. Além disso, é desejável também que se desenvolva uma ferramenta de análise que seja capaz de fornecer de forma clara e consistente ao seu usuário um diagnóstico da falha encontrada, de modo que seja possível saber exatamente como evoluiu a dinâmica de um dado sistema para aquela falha.

### 1.3 Metodologia

Para simulação do sistema a ser considerado, foram utilizadas as ferramentas MatLab MATHWORKS (2005) e Simulink MATLAB (2012). O marco inicial deste estudo foi o trabalho de MOREIRA e DA SILVA (2009), onde é proposto um novo modelo semi-empírico que requer menor esforço computacional em relação aos outros modelos apresentados na literatura.

O modelo de estado estacionário apresentado em MOREIRA e DA SILVA (2009) consiste de apenas uma equação derivada das equações semi-empíricas apresentados por AMPHLETT *et al.* (1995b), AMPHLETT *et al.* (1995a) e MANN *et al.* (2000), e tem, portanto, uma base teórica. Em MOREIRA e DA SILVA (2009) é mostrado que a equação de cálculo da tensão elétrica de uma CaC tem graus de liberdade suficientes para prever com adequada precisão o desempenho da CaC com variações nas principais variáveis de processo da CaC.

A tensão elétrica de saída que a CaC fornece para uma carga conectada em seus terminais deve ser calculada considerando o potencial de equilíbrio termodinâmico e descontando perdas de potencial. Geralmente são consideradas perdas por ativação da reação, perdas ôhmicas e perdas por concentração de gases reagentes.

Além disso, um dos principais fatores responsáveis pela eficiência na tensão produzida pela CaC é sua dinâmica de temperatura, capaz de reduzir seu potencial energético, em temperaturas baixas, ou até mesmo danificar o sistema, por causa de níveis térmicos elevados. Com isso, construiu-se um modelo de sistema para controle do resfriamento da CaC/PEMFC, possibilitando avaliar maneiras de inserir perturbações que representassem falhas em destaque para esse tipo de sistema, sendo elas: falhas parcial ou total no sistema de ventilação, no sensor de temperatura e no controle de temperatura.

Assim, foi possível analisar o modelo de tempo contínuo construído para o sistema de resfriamento e, com base neste, obter um segundo modelo, agora pertencente ao

domínio dos Sistemas a Eventos Discretos - SED, que também representasse seu funcionamento. Através deste, buscou-se então construir um diagnosticador capaz de inferir se um evento de falha ocorreu, além de identificá-lo.

## 1.4 Organização do Trabalho

No capítulo 2 é apresentado um modelo matemático para um sistema de CaCs. Desenvolveu-se um modelo estático para a tensão produzida por uma CaC, considerando suas perdas. Em seguida, tal modelo serve como base para o desenvolvimento de um modelo dinâmico para a evolução da temperatura e, principalmente, para um sistema de resfriamento, que serão indispensáveis para avaliar em tempo contínuo a temperatura da CaC. É o conhecimento desta dinâmica de temperatura que serve de base para a construção dos modelos a eventos discretos, protagonistas da presente dissertação.

No capítulo 3 são apresentados os fundamentos de Sistemas a Eventos Discretos (SEDs), que permitem a construção do modelo do sistema e sua posterior avaliação em relação a diagnosticabilidade em relação à falhas não observáveis.

No capítulo 4 são apresentados modelos desenvolvidos para o sensor e o controlador de temperatura, além do controlador de temperatura e da dinâmica conjunta da temperatura da CaC com o sistema de resfriamento. Além disso, são feitas análises do comportamento esperado de um ventilador, do controlador, da variação de temperatura após eventos determinados e do comportamento em geral do modelo de CaC estudado. São apresentadas também composições em paralelo dos componentes do sistema, junto com as conclusões sobre a diagnosticabilidade das falhas consideradas no presente trabalho para a CaC em questão.

No capítulo 5 faz-se um estudo a respeito de como tornar todas as falhas consideradas como diagnosticáveis e no capítulo 6 conclui-se o presente trabalho mostrando até que ponto foi possível tornar o sistema diagnosticável e indicando propostas de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Um Modelo Matemático para um Sistema de Célula a Combustível de Membrana Polimérica

Neste capítulo apresenta-se dois modelos: um estático de tensão elétrica de uma CaC e outro modelo dinâmico para a temperatura da CaC. Esses modelos são simulados utilizando as ferramentas MatLab MATHWORKS (2005) e Simulink MATLAB (2012) para estudo da dinâmica do sistema. Primeiro é apresentado um modelo de estado estacionário desenvolvido por MOREIRA e DA SILVA (2009) e, em seguida, é desenvolvida uma componente dinâmica do modelo para a temperatura da CaC.

## 2.1 Modelo Estático de Tensão de uma Célula a Combustível

### 2.1.1 Tensão de Circuito Aberto de uma Célula a Combustível

A primeira demonstração de uma CaC foi feita pelo advogado e cientista William Grove em 1839, usando um experimento em que hidrogênio e oxigênio são combinados, produzindo uma corrente elétrica (LARMINIE e DICKS, 2003). Outra maneira de olhar para a CaC é dizer que o hidrogênio é um combustível que está sendo oxidado na reação simples



No entanto, em vez de liberar energia na forma de calor, energia elétrica é pro-

duzida justamente porque não há oxidação ou combustão, mas sim ocorrem separadamente as semi-reações eletroquímicas, ou seja, a reação global não ocorre em fase homogênea. A experiência apresentada por William Grove faz uma demonstração do princípio básico de funcionamento da CaC, mas as correntes produzidas são muito pequenas. As principais razões para isso são a pequena área de contato entre o gás, o eletrodo e o eletrólito, e também a distância entre os eletrodos.

Para superar esses problemas, os eletrodos atualmente são feitos geralmente de forma plana, com uma fina camada de eletrólito. A estrutura do eletrodo é porosa, de modo que possam penetrar tanto o eletrólito de um lado, quanto o gás do outro, visando permitir o máximo de contato possível entre o eletrodo, o eletrólito e o gás.

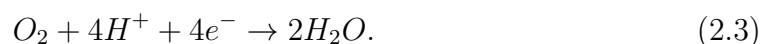
A membrana é uma fina camada de eletrólito que conduz prótons do anodo para o catodo. A camada de difusão de gases promove a transferência de combustível gasoso para a camada catalítica da CaC, sendo tipicamente baseada em carbono, que pode ser um papel de carbono ou tecido de fibras de carbono tratado hidrofobicamente. A camada catalítica é onde a oxidação do hidrogênio ou a reação de redução de oxigênio ocorre. Estes componentes são ilustrados pela figura 2.1.

Para entender como a reação entre hidrogênio e oxigênio produz uma corrente elétrica, e de onde os elétrons vêm, é preciso considerar as reações distintas que ocorrem em cada eletrodo (catodo e anodo).

Na placa que está em contato com o hidrogênio, chamada de anodo, tem-se uma reação de oxidação, isto é, duas moléculas de gás hidrogênio se decompõem em quatro cátions  $H^+$  e quatro elétrons:



Já na placa que está em contato com oxigênio, chamada de catodo, o reagente  $O_2$  combina-se com íons  $H^+$  e elétrons, gerando água, como mostrado a seguir:



Para CaC do tipo Membrana Trocadora de Prótons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC), o meio entre o anodo e o catodo é um polímero que possui afinidade a prótons, de modo que ele permite a sua passagem pela membrana, mas impossibilita a passagem de elétrons. Com a passagem dos íons  $H^+$  pela membrana, os elétrons são forçados a passar pelo circuito externo e, assim, é fornecida energia elétrica.

A energia potencial de uma reação é determinada pela energia livre de Gibbs, que pode ser definida como a energia disponível para realizar trabalho (LARMINIE e DICKS, 2003). A energia livre de Gibbs não pode ser medida diretamente, mas

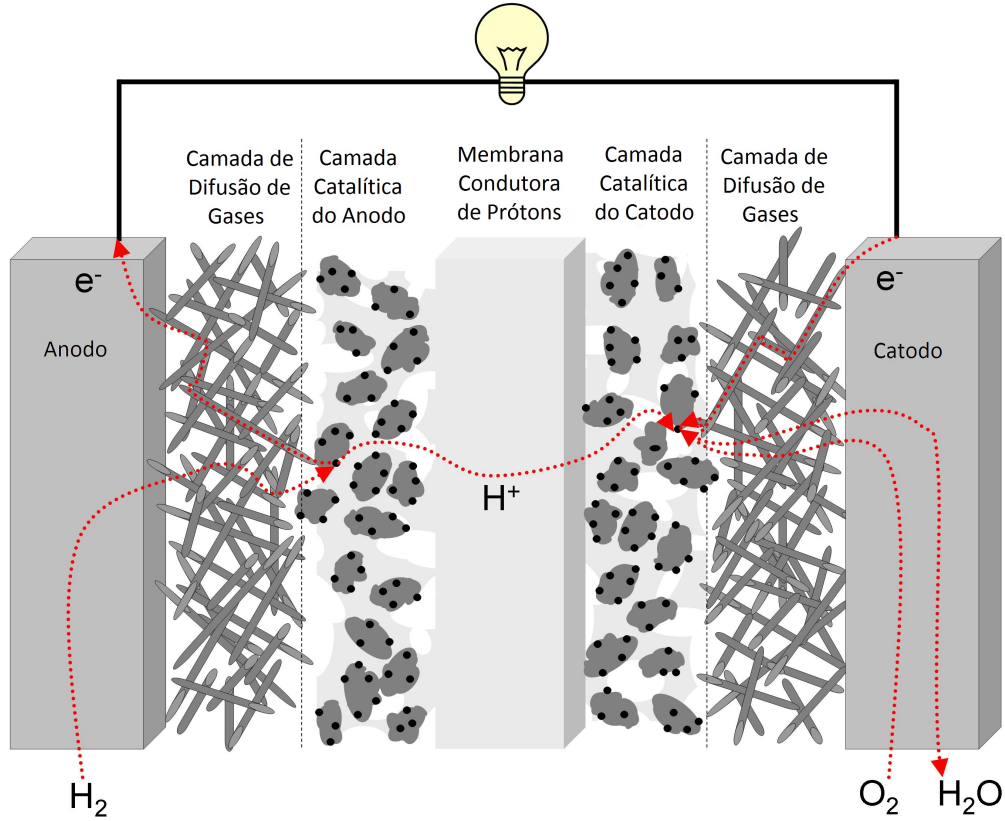


Figura 2.1: Esquema Ilustrativo de uma Célula Combustível.

sim através de sua variação.

A energia livre de Gibbs de um elemento puro no seu estado normal e nas condições de temperatura e pressão padrões é chamada de energia livre de Gibbs de formação, sendo definida como tendo valor absoluto zero. Para determinar a energia de uma reação



em que  $j$  moles de um reagente  $J$  reagem com  $k$  moles de um reagente  $K$ , e esta reação forma  $m$  moles de produto  $M$ , calcula-se a variação da energia livre de Gibbs entre os elementos antes e depois da ocorrência da reação, através da seguinte equação (BALMER, 1990):

$$\Delta G_f = \Delta G_f^\circ - RT \ln \left( \frac{a_J^j a_K^k}{a_M^m} \right), \quad (2.5)$$

em que  $\Delta G_f^\circ$  é variação da energia livre de Gibbs de formação,  $R$  é a constante

universal dos gases,  $T$  é a temperatura em Kelvin e  $a$  é a atividade dos elementos da reação. Segundo LARMINIE e DICKS (2003), os gases da reação de uma CaC podem ser considerados ideais. Portanto, o valor de atividade dos gases reagentes pode ser descrito por:

$$a = \frac{P}{P^0}, \quad (2.6)$$

em que  $P$  é a pressão parcial do gás e  $P^0$  é a pressão atmosférica padrão, cujo valor é de  $0,1MPa$ . A pressão padrão quando expressa em *bar* é igual a 1, e, portanto, a equação (2.5) pode ser reescrita como:

$$\Delta G_f = \Delta G_f^o - RT \ln \left( \frac{P_{O_2}^{0.5} P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right), \quad (2.7)$$

em que  $P_{O_2}$  denota a pressão parcial de oxigênio,  $P_{H_2}$  é a pressão parcial de hidrogênio e  $P_{H_2O}$  é a pressão parcial de água, para todos os casos medida em *MPa*.

A tensão de circuito aberto de uma CaC que utiliza hidrogênio é dada pela seguinte equação (LARMINIE e DICKS, 2003):

$$E = \frac{-\Delta G_f}{2F}, \quad (2.8)$$

em que  $F$  é a constante de Faraday.

A partir das equações (2.7) e (2.8) obtém-se a equação de Nernst, representada por:

$$E = E^o - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{O_2}^{0.5} P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right). \quad (2.9)$$

Em LARMINIE e DICKS (2003), é mostrado que  $E^o$  em uma CaC varia conforme a relação seguinte:

$$E^o = 1,229 - 0,85 \times 10^{-3}(T - 298,15). \quad (2.10)$$

Em MOREIRA e DA SILVA (2009), é desenvolvida uma relação para a pressão parcial de oxigênio,  $P_{O_2}$ , em uma CaC, dada por:

$$P_{O_2} = \frac{1}{1 + \beta} (P_{ca} - P_{H_2O}^{sat}), \quad (2.11)$$

em que  $P_{ca}$  é a pressão no catodo,  $\beta$  é a razão entre a fração molar de nitrogênio  $x_{N_2}$  e a fração molar de oxigênio  $x_{O_2}$  no ar, e  $P_{H_2O}^{sat}$  é a pressão de saturação da água, que depende da temperatura, de acordo com a seguinte expressão (AL-BAGHDADI, 2005):

$$\log P_{H_2O}^{sat} = -2,1794 + 0,02953(T - 273,15) - 9,1837 \times 10^{-5}(T - 273,15)^2 + 1,4454 \times 10^{-7}(T - 273,15)^3. \quad (2.12)$$

A pressão parcial de hidrogênio,  $P_{H_2}$ , considerando este um gás puro e humidificado com vapor de água, e considerando que a pressão de vapor de água efetiva é 50% da pressão de vapor de água saturada, pode ser descrita da seguinte forma:

$$P_{H_2} = P_{an} - 0,5P_{H_2O}^{sat}, \quad (2.13)$$

em que  $P_{an}$  é a pressão no anodo.

Substituindo as equações (2.10), (2.11), (2.13) na equação (2.9), obtém-se a equação (2.14) (MOREIRA e DA SILVA, 2009) para a tensão elétrica de equilíbrio termodinâmico em uma CaC do tipo PEM:

$$E = 1,229 - 0,85 \times 10^{-3}(T - 298,15) + 4,31 \times 10^{-5}T \left[ \ln(P_{an} - 0,5P_{H_2O}^{sat}) + \frac{1}{2} \ln(\gamma(P_{ca} - P_{H_2O}^{sat})) \right] \quad (2.14)$$

em que  $\gamma = \frac{1}{\beta}$ .

Note que a expressão 2.14 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 T + \varepsilon_3 T \ln(P_{an} - 0,5P_{H_2O}^{sat}) + \varepsilon_4 \ln(P_{ca} - P_{H_2O}^{sat}), \quad (2.15)$$

em que  $\varepsilon_1 = 1,48833$ ,  $\varepsilon_2 = -0,85 \times 10^{-3} + 2,155 \times 10^{-5} \ln(\gamma)$ ,  $\varepsilon_3 = 4,31 \times 10^{-5}$  e  $\varepsilon_4 = 2,155 \times 10^{-5}$ .

### 2.1.2 Perdas de Tensão

Para um modelo mais próximo da realidade, devemos incorporar as perdas que existem no sistema à equação (2.15). De acordo com LARMINIE e DICKS (2003), tais perdas são:

1. Perda por ativação: é causada pela lentidão da reação que ocorre na superfície dos eletrodos. Uma parte da tensão elétrica gerada é perdida ao fazer a reação química que transfere os elétrons para o eletrodo ou os retira.
2. Perda por cruzamento de combustível: essa perda ocorre devido à imperfeição da membrana, de modo que mesmo que ela seja construída para permitir a passagem apenas de prótons, um pouco do reagente e uma quantidade menor ainda de elétrons consegue atravessá-la.
3. Perdas ôhmicas: causada pela resistência ao fluxo de elétrons no material dos eletrodos e nas suas interconexões, ou pela resistência ao fluxo de prótons.
4. Perda por transporte de massa: ocorre devido à mudança de concentração de reagentes na superfície dos eletrodos enquanto a reação ocorre. Essa perda geralmente acontece quando não se consegue suprir a quantidade de reagentes necessária para alimentar a carga. Por exemplo, quando há uma mudança abrupta de corrente demandada, o que causa uma necessidade maior de reagentes, porém o fluxo de hidrogênio que chega não consegue acompanhar a velocidade da mudança exigida. Outra justificativa para esta perda ocorre quando a concentração de água na CaC torna-se elevada e impede a chegada eficiente dos reagentes na membrana, fenômeno chamado de inundação.

### Perda por Ativação

A partir de experimentos, o químico suíço Julius Tafel (LARMINIE e DICKS, 2003) descobriu que a perda por ativação segue um modelo geral, independente da reação química que está acontecendo. Essa perda pode ser modelada através da equação logarítmica

$$\Delta V_{at} = K_a \ln \left( \frac{i}{i_0} \right), \quad (2.16)$$

em que a constante  $K_a$  é maior quando a velocidade de reação é menor,  $i_0$  é a densidade de corrente de troca para que haja a passagem de elétrons e  $i$  é a densidade de corrente no eletrodo.

Na condição de equilíbrio, a reação eletroquímica responsável pela formação da dupla camada dá-se tanto no sentido da oxidação quanto da redução com a mesma velocidade, chamada densidade de corrente de troca, e estabelece-se um potencial de equilíbrio. Se por um processo qualquer este potencial for alterado, diz-se que o eletrodo sofreu polarização.

Em MCDUGALL (1976) demonstra-se que para uma CaC que utiliza hidrogênio, a constante  $K_a$  pode ser determinada pela seguinte relação:



$$K_a = \frac{RT}{2\alpha F}, \quad (2.17)$$

em que  $\alpha$  é o coeficiente de transferência de carga e possui o valor 0,5 (DAVIES, 1967) para uma ampla faixa de materiais do eletrodo.

Para reduzir tal perda, devemos procurar meios de aumentar o valor de  $i_0$ . Existem várias alternativas para reduzir a perda por ativação, dentre elas:

1. aumentar a temperatura da CaC;
2. utilizar um catalisador para a reação que possua maior eficiência;
3. aumentar a superfície do eletrodo;
4. aumentar a concentração de  $O_2$  ou mesmo aumentar a pressão.

Visando representar a perda por ativação, pode-se utilizar um modelo empírico desenvolvido por AMPHLETT *et al.* (1995a):

$$\eta = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 T \ln(i), \quad (2.18)$$

em que os coeficientes  $\xi_j$  são obtidos através de dados experimentais,  $i$  é a corrente elétrica da CaC e  $C_{O_2}^*$  é a concentração efetiva de oxigênio na camada catalítica do catodo. MANN *et al.* (2000) propõe os seguintes valores:

$$\xi_1 = -0,948(\pm 0,004); \quad \xi_3 = (7,6 \pm 0,2) \times 10^{-5}; \quad \xi_4 = -(1,93 \pm 0,05) \times 10^{-4}.$$

O termo  $C_{O_2}^*$  pode ser expresso da seguinte forma

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}}{5,08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)}. \quad (2.19)$$

Diferente de AMPHLETT *et al.* (1995a), que supõe que  $\xi_2$  é constante, MOREIRA e DA SILVA (2009) consideram a equação (2.20) como expressão para  $\xi_2$ , em que tal parâmetro varia com a área ativa e com a concentração efetiva de hidrogênio:

$$\xi_2 = 0,0023 + 0,0002 \ln(A) + 4,3 \times 10^{-5} \ln(P_{H_2}) - \frac{0,0033}{T}. \quad (2.20)$$

MOREIRA e DA SILVA (2009) mostram através de substituições algébricas que a expressão final para a perda da tensão por meio da energia de ativação pode ser modelada por:

$$\eta_{act} = \alpha_1 + \alpha_2 T + \alpha_3 T \ln(P_{an} - \frac{1}{2} P_{H_2O}^{sat}) + \alpha_4 T \ln(P_{ca} - P_{H_2O}^{sat}) + \alpha_5 T \ln(i), \quad (2.21)$$

em que:

$$\alpha_1 = \xi_1 - 0,0033 + 498\xi_3;$$

$$\alpha_2 = 0,0023 + 0,002 \ln(A) + (\ln\gamma - 15,4408)\xi_3;$$

$$\alpha_3 = 4,3 \times 10^{-5};$$

$$\alpha_4 = \xi_3;$$

$$\alpha_5 = \xi_4.$$

### Perda por Cruzamento de Combustível

A passagem de uma molécula de hidrogênio do anodo para o catodo equivale a dois elétrons a menos que passam pelo circuito, pois quando o hidrogênio atravessa a membrana, ele não se ioniza no anodo e não ocorre a liberação de elétrons para a carga. Em vez disso, a reação de ionização do hidrogênio, representada pela seguinte equação, ocorre no catodo:



Além dessa possibilidade, outra forma de cruzamento de combustível é a passagem de elétrons diretamente pela membrana, ou seja, uma corrente interna que atravessa a membrana (LARMINIE e DICKS, 2003).

Tal tipo de perda, ao ser entendida como uma passagem de elétrons indica de forma direta uma relação de corrente. Entretanto, por ser um fenômeno fisico-químico cuja medição seria complexa, seu impacto na tensão elétrica produzida pela CaC não foi modelada de forma direta neste trabalho, sendo apenas considerada como parte implícita nos modelos semi-empíricos considerados para modelagem da tensão elétrica.

### Perda Ôhmica

A perda ôhmica ocorre devido à resistência ao fluxo de elétrons através dos eletrodos, a resistência no contato entre o eletrodo e o circuito externo e a resistência ao fluxo de prótons na membrana polimérica.

Em AMPHLETT *et al.* (1995b), a perda ôhmica é modelada como

$$\eta_{ohm} = R^{int} i, \quad (2.23)$$

sendo  $R^{int} = r_1 + r_2T + r_3i + r_4T^2 + r_5i^2 + r_6Ti$ .

Os valores de  $r_j$  são determinados através da utilização de uma regressão linear a partir de dados experimentais.

Em AMPHLETT *et al.* (1995a) é demonstrado de forma empírica que a resistência interna pode ser representada como

$$R^{int} = r_1 + r_2T + r_3i. \quad (2.24)$$

Por outro lado, em MANN *et al.* (2000) a resistência é modelada por meio de outra expressão empírica, representando a resistência ao fluxo de prótons em uma membrana polimérica da seguinte forma

$$R^{proton} = \frac{\rho_m l}{A}, \quad (2.25)$$

em que  $l$  representa a espessura da membrana polimérica,  $A$  representa a área ativa da CaC em  $cm^2$  e  $\rho_m$  representa a resistividade específica da CaC ao fluxo de prótons hidratados, sendo este último calculado da seguinte forma:

$$\rho_m = \frac{181,6[1 + 0,03(\frac{i}{A}) + 0,062(\frac{T}{303})^2(\frac{i}{A})^{2,5}]}{[\tau - 0,632 - 3(\frac{i}{A})]exp(4,18[\frac{T-303}{T}])}, \quad (2.26)$$

em que  $\tau$  é um parâmetro ajustável com valor máximo de 23, sendo influenciado por diversos fatores como: procedimento de preparação da membrana, humidade relativa, razão estequiométrica de alimentação de gás no anodo e também é função do tempo de serviço da membrana.

Com todos esses fatores influenciando um parâmetro, torna-se difícil ajustar o mesmo. Sendo assim, não há um procedimento para escolher um valor correto para  $\tau$  de forma independente em relação aos dados experimentais, ou seja, esse parâmetro é escolhido de forma que se ajuste aos dados experimentais observados.

Por outro lado, em MOREIRA e DA SILVA (2009) é desenvolvida uma abordagem na qual a resistividade interna ao fluxo de prótons pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\rho^{int} = \bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2T + \bar{\rho}_3i + \bar{\rho}_4T^2 + \bar{\rho}_5i^2 + \bar{\rho}_6Ti, \quad (2.27)$$

em que  $\bar{\rho}_j$  também são parâmetros encontrados empiricamente. Além disso, no caso em que  $\tau$  (parâmetro empírico que varia de 0 a 23) seja igual a 14, a diferença obtida entre os modelos de MOREIRA e DA SILVA (2009) e MANN *et al.* (2000) é

pequena. Ainda em MOREIRA e DA SILVA (2009), é mostrado que os termos  $i^2$  e  $Ti$  podem ser desprezados sem mudança significativa no resultado, de modo que a expressão para a resistividade interna é simplificada como:

$$\rho^{int} = \bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2 T + \bar{\rho}_3 i + \bar{\rho}_4 T^2. \quad (2.28)$$

Tanto a expressão para a resistência ao fluxo de prótons quanto a expressão para resistência interna possuem a mesma estrutura, de modo que podem ser consideradas pela mesma expressão:

$$R_{eq} = \tilde{\rho}_1 + \tilde{\rho}_2 T + \tilde{\rho}_3 i + \tilde{\rho}_4 T^2. \quad (2.29)$$

### Perda por Transporte de Massa

A perda de tensão elétrica por concentração, segundo LARMINIE e DICKS (2003), pode ser determinada através de uma relação exponencial

$$\eta_{conc} = m \exp(ni), \quad (2.30)$$

em que  $m$  e  $n$  são constantes que podem ser obtidas experimentalmente. O efeito da perda de tensão por concentração é mais proeminente quando a CaC é operada em altas densidades de corrente. Isso é, em geral, evitado porque reduz a vida útil da CaC. Sendo assim, tal efeito não será considerado no modelo aqui proposto.

### 2.1.3 Modelo de Tensão da Célula

Unindo as expressões para as perdas com a da tensão elétrica de equilíbrio termodinâmico, obtida em MOREIRA e DA SILVA (2009), podemos formar um modelo da tensão elétrica em uma CaC. Esse modelo assume a forma da equação (2.31).

$$V_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohm}. \quad (2.31)$$

Substituindo as equações (2.15), (2.21), (2.29) e (2.30) na equação (2.31), obtém-se a seguinte expressão para representar o modelo da CaC:

$$\begin{aligned} V_{cell} = \psi_1 + \psi_2 T + \psi_3 T \ln(P_{an} - \frac{1}{2} P_{H_2O}^{sat}) + \psi_4 T \ln(P_{ca} - P_{H_2O}^{sat}) + \\ \psi_5 T \ln(i) + \psi_6 i + \psi_7 T i + \psi_8 i^2 + \psi_9 T^2 i. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Para determinar os parâmetros  $\psi_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 9$ , é necessário utilizar a curva de polarização da CaC específica. Foi escolhida uma CaC BPS Nexa Power Module da Ballard Power System, CaC do tipo PEM com 1200W de potência não regulada e com 47 unidades de CaC unitárias ligadas em série. Os valores de  $\psi_j$  foram determinados e validados em MOREIRA e DA SILVA (2009), sendo agrupados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros de Ajuste do Modelo de Tensão Elétrica da Célula

$\psi_1$	$5,6985 \times 10^{-1}$
$\psi_2$	$9,4309 \times 10^{-4}$
$\psi_3$	$8,6100 \times 10^{-5}$
$\psi_4$	$9,7550 \times 10^{-5}$
$\psi_5$	$-1,5304 \times 10^{-5}$
$\psi_6$	$5,3332 \times 10^{-1}$
$\psi_7$	$3,1428 \times 10^{-3}$
$\psi_8$	$8,1278 \times 10^{-5}$
$\psi_9$	$-4,7120 \times 10^{-6}$

Neste trabalho será considerado o mesmo modelo de CaC para o estudo de diagnóstico de falhas. Até então foram apresentadas as características estáticas do modelo, em seguida, serão introduzidos os comportamentos dinâmicos no modelo do sistema, como a evolução e influência na tensão elétrica por parte da temperatura da CaC e do controle de resfriamento.

## 2.2 Modelo Dinâmico de Temperatura

Para fazer o diagnóstico de falhas, precisamos modelar o comportamento do sistema operando sem a ocorrência delas (comportamento normal) e após a ocorrência do evento de falha (comportamento pós-falha). Para cumprir o objetivo deste trabalho, foi necessário modelar a tensão elétrica através de suas equações eletroquímicas e termodinâmicas, que relacionam tensão com corrente, pressão no anodo, pressão no catodo e temperatura da CaC. Para uma análise mais detalhada do comportamento dinâmico do sistema da CaC é preciso determinar como evolui a temperatura e quais são os parâmetros que a influenciam. Para isso, foi desenvolvido um modelo dinâmico para a temperatura, embasado na primeira lei da termodinâmica. Além disso, modelou-se um sistema de refrigeração por ar, no qual podem ser inseridas falhas no atuador, no sensor e no controlador deste sistema.

## 2.2.1 Temperatura

Em uma CaC, a energia gerada que não alimenta o circuito elétrico externo é transformada em aumento de temperatura devido ao efeito Joule. Para obter uma expressão para essa energia responsável pela aumento de temperatura, deve ser realizado um balanço energético considerando toda a transformação de energia que há em uma CaC.

Segundo a definição de INCROPERA *et al.* (2011), “o calor é a energia térmica em trânsito devido à diferença espacial de temperatura”, de modo que é estabelecida uma equivalência entre o calor, ou fluxo de calor como será chamado para evidenciar a noção de transmissão e a sua correspondência com a potência elétrica.

A primeira lei da termodinâmica determina a conservação da energia de um sistema, portanto, pode-se determinar, por exclusão, o fluxo de calor gerado ao encontrar todos os outros meios de transformação da energia livre de Gibbs. O principal meio de transformação é a energia elétrica, que é fornecido ao circuito externo. Depois deste há a energia que causa o aumento da temperatura dos gases reagentes, a mudança de fase, a energia que causa o aumento da temperatura do ambiente e a energia que é dissipada pelo sistema de resfriamento.

O calor latente é a grandeza física relacionada à quantidade de calor que uma unidade de massa de determinada substância deve receber ou ceder para mudar de estado físico. Durante a mudança de fase, a temperatura da substância não varia, mas seu estado de agregação molecular se modifica. O calor latente pode assumir tanto valores positivos quanto negativos. Se for positivo quer dizer que a substância está recebendo calor, se negativo significa que ela está cedendo calor. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de calor latente é  $J/kg$  (Joule por quilograma). Por outro lado, a energia responsável por modificar a temperatura de um elemento é chamada de calor sensível, cuja unidade também é  $J/kg$ .

É possível então equacionar o balanço de energia na CaC através da seguinte equação:

$$\dot{q}_{calor} = \dot{q}_{quimico} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens} - \dot{q}_{lat} - \dot{q}_{conv}, \quad (2.33)$$

em que o termo  $\dot{q}_{calor}$  representa o fluxo de calor que é gerado na CaC, enquanto  $\dot{q}_{quimico}$  representa o fluxo de energia ideal (o fluxo de energia livre de Gibbs);  $\dot{q}_{elec}$  a potência elétrica do circuito externo;  $\dot{q}_{sens}$  o fluxo de calor sensível, que provoca a troca de temperatura dos fluidos;  $\dot{q}_{lat}$  o fluxo de calor latente, que causa a troca de estado físico da água no empilhamento e  $\dot{q}_{conv}$  que representa as perdas de calor para o sistema de resfriamento e para o ambiente por convecção. O fluxo de energia é medido em  $J/s$ .

Como  $\dot{q}_{quimico}$  representa o fluxo de energia livre de Gibbs, tem-se que ele pode ser determinado através da multiplicação da energia livre de Gibbs pela vazão molar do hidrogênio. Esse fato é fácil de entender tendo em vista que a reação entre o oxigênio e o hidrogênio pode ser vista como uma reação de combustão. Para uma combustão ocorrer é necessário que o oxigênio reaja com um hidrocarboneto (cadeia longa com carbono e hidrogênio como elementos básicos) e o seu produto deve ser água e um composto a base de carbono, liberando calor. No caso de CaC, o reagente é o hidrogênio e não um hidrocarboneto, sendo o único produto resultante a água. Portanto,  $\dot{q}_{quimico}$  pode ser determinado como:

$$\dot{q}_{quimico} = \frac{d(n_{H_2}\Delta G_f)}{dt} = \Delta G_f \dot{n}_{H_2}, \quad (2.34)$$

sendo  $\Delta G_f$  a energia livre de Gibbs, em  $J/mol$  (Joule por mol) e constante no tempo, enquanto  $\dot{n}_{H_2}$ , em  $mol/s$ , é a vazão molar de hidrogênio consumido pela CaC.

A potência elétrica do circuito externo,  $\dot{q}_{elec}$ , é determinada pelo produto da corrente  $I$  pela tensão na carga, que é igual a tensão na CaC  $V_{cel}$ ,

$$\dot{q}_{elec} = V_{cel}I. \quad (2.35)$$

O fluxo de calor sensível,  $\dot{q}_{sens}$ , é o calor que é absorvido pelos reagentes ou pelos produtos e que é empregado na troca de temperatura, aquecendo os mesmos. O calor sensível é determinado através da relação

$$\dot{q}_{sens} = \dot{n}\Delta TC, \quad (2.36)$$

em que  $\dot{n}$  é a vazão molar do reagente, em  $mol/s$ ,  $\Delta T$  a variação de temperatura do reagente, em  $K$  (Kelvin), e  $C$  é o calor específico molar, em  $\frac{J}{mol \times K}$ .

Em AMPHLETT *et al.* (1996) considera-se apenas hidrogênio e oxigênio recebendo calor sensível, porém a CaC é alimentada de ar, do qual apenas 20,9% é oxigênio, 78% é nitrogênio e o restante é composto de diversas substâncias que não possuem quantidades suficientes para serem consideradas. Portanto, neste modelo incluímos o nitrogênio para aumentar a precisão.

A relação para o calor sensível perdido para todos os elementos pode ser expressa da seguinte forma:

$$\dot{q}_{sens} = \dot{n}_{H_2}\Delta TC_{H_2} + \dot{n}_{O_2}\Delta TC_{O_2} + \dot{n}_{N_2}\Delta TC_{N_2} + \dot{n}_{VaporH_2O}\Delta TC_{VaporH_2O}, \quad (2.37)$$

em que  $\dot{n}_{H_2}$  é a vazão molar de hidrogênio em  $mol/s$ ,  $C_{H_2}$  é a capacidade térmica média do hidrogênio em  $J/molK$ ,  $\dot{n}_{O_2}$  é a vazão molar de oxigênio em  $mol/s$ ,  $C_{O_2}$  é a capacidade térmica média do oxigênio em  $J/molK$ ,  $\dot{n}_{N_2}$  é a vazão molar de nitrogênio em  $mol/s$ ,  $C_{N_2}$  é a capacidade térmica média do nitrogênio em  $J/molK$ ,  $\dot{n}_{VaporH_2O}$  é a vazão molar de vapor d'água em  $mol/s$ ,  $C_{VaporH_2O}$  é a capacidade térmica média do vapor d'água em  $J/molK$  e  $T$  é a temperatura em Kelvin.

O fluxo de calor latente,  $\dot{q}_{lat}$ , é o calor absorvido que provoca a troca de fase do composto. O único neste caso é a água, que ao ser formada pode receber energia e trocar de fase indo para o estado de vapor. A equação a seguir representa o calor removido da CaC para que o composto possa trocar de estado físico:

$$\dot{q}_{lat} = \dot{n}H_{vap}, \quad (2.38)$$

em que  $\dot{n}$  é a vazão molar da água e  $H_{vap}$  é o calor de vaporização. O valor de  $H_{vap}$  é dependente da temperatura da CaC e é dado por (YU *et al.*, 2005):

$$H_{vap} = 45070 - 41,9T + 3,44 \times 10^{-3}T^2 + 2,54 \times 10^{-6}T^3 - 8,98 \times 10^{-10}T^4. \quad (2.39)$$

Segundo AMPHLETT *et al.* (1996), deve-se agrupar o modelo de regime permanente da tensão elétrica com o modelo dinâmico da temperatura e deste modo, forma-se um modelo transiente que consegue representar a transição entre os estágios de regime permanente da CaC.

O modelo transiente pode ser obtido através da equação:

$$\frac{dT_{cell}}{dt} = \frac{1}{M_{avg}C_{avg}}(\dot{q}_{quimico} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens} - \dot{q}_{lat} - \dot{q}_{conv}), \quad (2.40)$$

em que  $M_{avg}$  é a massa total da CaC e  $C_{avg}$  é o calor específico médio. O valor de  $MC_{avg}$  pode ser determinado segundo AMPHLETT *et al.* (1996), somando-se os valores  $M_iC_{avg_i}$  dos components da CaC um a um. Em AMPHLETT *et al.* (1996), foi estimado  $35kJ/K$  para o produto  $MC_{avg}$  de uma CaC Mark V da Ballard, sendo que ela possui 35 CaC empilhadas com a possibilidade de fornecer  $5kW$ , com dimensões  $38cm \times 21cm \times 21cm$  e pesa 43 Kg. A CaC utilizada neste estudo, Nexa Power Module, que também é da Ballard, possui 47 CaC empilhadas, fornecendo  $1,2kW$  e possui as dimensões  $56cm \times 25cm \times 33cm$ , segundo manual da Nexa (BALLARD, 2003). Para a determinação do parâmetro  $MC_{avg}$  para a Nexa, que pesa apenas 13Kg, fez-se uma estimativa com base no peso da mesma, em sua potência



fornecida e em comparação com a Ballard Mark V, considerando-se valor  $17 \text{ kJ/K}$ . Tal valor foi aproximado considerando o valor de área ativa da CaC, que no caso experimental utilizou o valor de  $120 \text{ cm}^2$ , enquanto que o modelo da Ballard Mark V apresenta  $232 \text{ cm}^2$ .

Para os cálculos do modelo de temperatura foram considerados os valores de calor específico e cálculos de vazão conforme o livro DEWITT e INCROPERA (1996) e o apêndice 2 de LARMINIE e DICKS (2003), ilustrados na tabela 2.2.

Concluída esta etapa, segue-se agora pra modelagem do sistema de resfriamento da CaC.

## Resfriamento

O resfriamento da CaC é feito por meio de um ventilador que força a passagem de ar por pequenos dutos internos à ela, que passam em canais nas placas dos eletrodos. Esse fato caracteriza a troca de calor como sendo uma convecção interna, conforme apresentado em INCROPERA *et al.* (2011).

No modelo do sistema de resfriamento, o ventilador foi considerado como sendo acionado por um motor DC adequado ao modelo elaborado por DEL REAL *et al.* (2007) e fez-se um controle por tensão elétrica de armadura, obtendo, portanto, uma expressão que determina a velocidade angular da hélice do ventilador

$$\omega(s) = \frac{k}{\tau s + 1} V_a(s) - \frac{\bar{k}}{\tau s + 1} T_l(s), \quad (2.41)$$

no qual  $\omega(s)$  é a transformada de Laplace da velocidade angular da hélice, enquanto  $k$  e  $\bar{k}$  são constantes elétricas e  $\tau$  é uma constante de tempo.  $V_a(s)$  é a tensão elétrica de armadura imposta sobre o motor e  $T_l(s)$  envolve perdas por atrito e ventilação.

Para um motor de corrente contínua com potência similar ao da CaC considerada, os valores  $k = 0,01$ ,  $\bar{k} = 0,02$  e  $\tau = 0,1 \text{ s}$  serão utilizados neste trabalho.

Em DEL REAL *et al.* (2007) é apresentada uma modelagem que relaciona diretamente o sinal de controle do ventilador com a vazão mássica de ar. Não utilizaremos essa modelagem neste trabalho, porém ela servirá como base para ajustar alguns valores de constantes físicas do ventilador. Segundo DEL REAL *et al.* (2007) a vazão mássica é dada por

$$\dot{m}(t) = 36u(t), \quad (2.42)$$

no qual  $u(t)$  é o sinal de controle do ventilador, que varia no intervalo de 0 a 1. Para

obter um modelo mais detalhado, utilizamos o modelo elaborado para o sistema de resfriamento e as equações das leis dos ventiladores apresentadas em DALY(1978), que determinam que o fluxo de massa de ar é proporcional à velocidade angular da hélice da seguinte forma:

$$\dot{m} \propto K_p \rho \omega D^3, \quad (2.43)$$

em que,  $\rho$  é a densidade do ar,  $\omega$  a velocidade angular da hélice do ventilador,  $D$  o diâmetro das pás do ventilador e  $K_p$  é um fator de compressibilidade.

Segundo DEL REAL *et al.* (2007), para o fenômeno de resfriamento em sistemas em que há convecção interna utiliza-se a seguinte equação:

$$\dot{q}_{conv1} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}), \quad (2.44)$$

em que  $T_{out}$  é a temperatura da superfície que envolve o fluido, neste caso a temperatura da CaC, e  $T_{in}$  é a temperatura do fluido. Para efeito de simplificação, foi considerado que não há variação de temperatura na seção do fluxo de ar.

Como a CaC se encontra em um ambiente cuja temperatura é menor do que a do seu valor de operação, que é em torno de  $65^\circ C$ , temos a ocorrência do fenômeno chamado convecção natural. Em DEL REAL *et al.* (2007) afirma-se que o calor trocado com o ambiente através de convecção natural pode ser determinado como:

$$\dot{q}_{conv2} = h_{natural} A_{ext} (T_{out} - T_{in}), \quad (2.45)$$

em que  $h_{natural}$  é o coeficiente de convecção natural e  $A_{ext}$  é a área externa da CaC. Segundo AMPHLETT *et al.* (1996), para a CaC Mark V da Ballard, os valores teóricos calculados para  $h_{natural}$  variam de 3 a  $7 W/(m^2 K)$  para temperaturas ente 25 e 85 graus Celsius, enquanto o produto  $h_{natural} A_{ext}$  está no intervalo de 1 a 2  $W/K$ . Porém, neste mesmo artigo, os resultados experimentais indicam o valor para este produto no intervalo de 10 a 20  $W/K$ .

A equação (2.45) também pode representar a convecção forçada, segundo INCROPERA *et al.* (2011). Entretanto, deve-se fazer um ajuste nos parâmetros, mudando os seus valores de acordo com a geometria do sistema. Em FULLER e NEWMAN (1993) e NGUYEN e WHITE (1993) é proposto que os valores do coeficiente de convecção forçada,  $h_f$ , em uma CaC, variam de 25 a 26  $W/(m^2 K)$ . Também é apresentada uma faixa de valores para o produto  $h_f A$  entre 7 e 10  $W/K$ . Na forma de convecção forçada a equação (2.45) assume a seguinte forma:

$$\dot{q}_{conv3} = h_f A_{ext} (T_{out} - T_{in}). \quad (2.46)$$

Em WELTY *et al.* (2009) são apresentados resultados para o coeficiente de convecção natural variando entre 5 e 50  $W/(m^2K)$  e para o coeficiente de convecção forçada variando entre 25 e 250  $W/(m^2K)$ .

Dos resultados da literatura, podemos observar que os valores teóricos estão sempre abaixo dos valores experimentais obtidos. Uma explicação para este fato é a existência de uma perda por condução. Em AMPHLETT *et al.* (1996) obtém-se um valor médio aceitável de 17  $W/K$  para o produto  $h_f A_{ext}$ .

Portanto, para o modelo do sistema dinâmico da temperatura foi utilizada a equação de convecção natural para representar a condição de resfriamento da CaC com o ambiente ao seu redor, conforme equação (2.45). Além disso foram utilizadas as equações (2.44) e (2.46) em conjunto para representar a dinâmica de temperatura gerada pelo resfriamento do ventilador.

Além dos parâmetros cujos valores já se encontram previamente definidos neste capítulo, a tabela 2.2 indica os valores considerados para as demais constantes necessárias para construção do sistema proposto:

Tabela 2.2: Parâmetros de Ajuste do Modelo Dinâmico

$\dot{n}_{H_2}$	$\frac{i \times N}{2 \times F}$
$\dot{n}_{O_2}$	$\frac{i \times N}{4 \times F}$
$\dot{n}_{N_2}$	$\frac{i \times N}{2 \times F}$
$\dot{n}_{H_2O}$	$\frac{i \times N \times 1,05}{10^8}$
$C_{H_2}$	$28,82 \frac{J}{mol.K}$
$C_{H_2O}$	$40,68 \frac{J}{mol.K}$
$C_{O_2}$	$29,38 \frac{J}{mol.K}$
$C_{N_2}$	$29,12 \frac{J}{mol.K}$
$C_p$	$1,012 \frac{J}{mol.K}$
$A_{ext}$	$120cm^2$
$h_{natural}$	$25 \frac{W}{K}$
$h_f$	$17 \frac{W}{K}$

em que  $N$  é o número de CaC, que no caso do presente trabalho é 47.

## 2.3 Controle de Temperatura

Para o controle da temperatura foi considerado um relé com histerese conforme a figura 2.2.

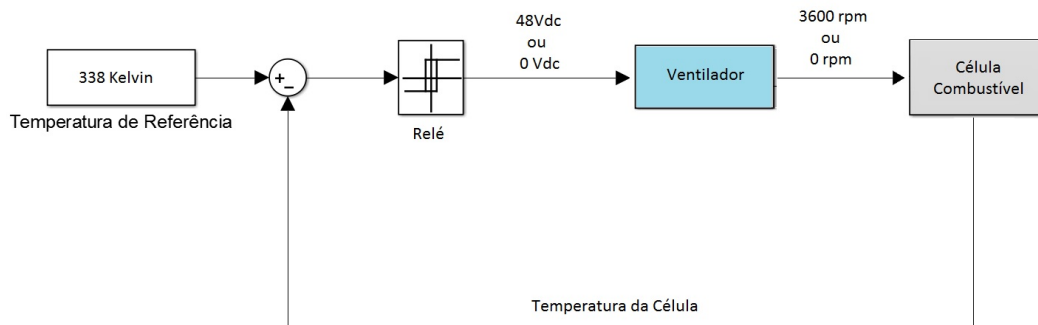


Figura 2.2: Diagrama do Sistema de Controle de Temperatura.

Para o modelo de CaC considerado, com base nos dados informados pelo fabricante, a corrente nominal da CaC é de  $40A$ , devendo ser mantida uma temperatura ótima de  $338K$ . Valores menores de corrente não utilizarão toda a capacidade da CaC e valores maiores podem comprometer o funcionamento da mesma. Assim, a histerese considerada para o controlador foi de  $1K$ , ou seja, o controlador acionará o ventilador quando a temperatura atingir  $339K$  e somente o desligará quando a temperatura for inferior a  $337K$ .

## 2.4 Simulações

Pela seção anterior tem-se então que, no Simulink MATLAB (2012), pode-se calcular por meio da figura 2.3 o  $\dot{q}_{elec}$  com base na tensão elétrica e na corrente da CaC, assim como encontra-se o valor de  $\dot{q}_{quimico}$  sabendo-se quais são os valores de corrente da CaC e da variação de  $\Delta G_f$ .

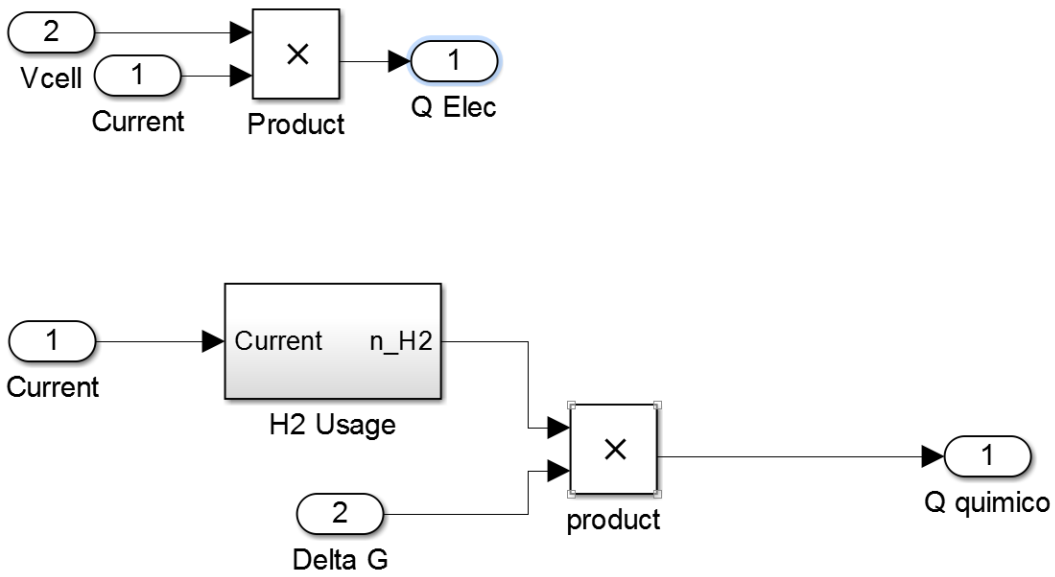


Figura 2.3: Diagrama de Blocos para o Calor Químico e o Potencial Elétrico

Por outro lado, para encontrar os valores de  $\dot{q}_{sens}$  e  $\dot{q}_{lat}$  torna-se necessário obter os valores de tensão e corrente da CaC, junto dos valores da vazão de ar que o ventilador injeta na CaC, da fração molar de gás nitrogênio e da temperatura do ambiente em que a CaC se encontra, conforme ilustrado pela figura 2.4.

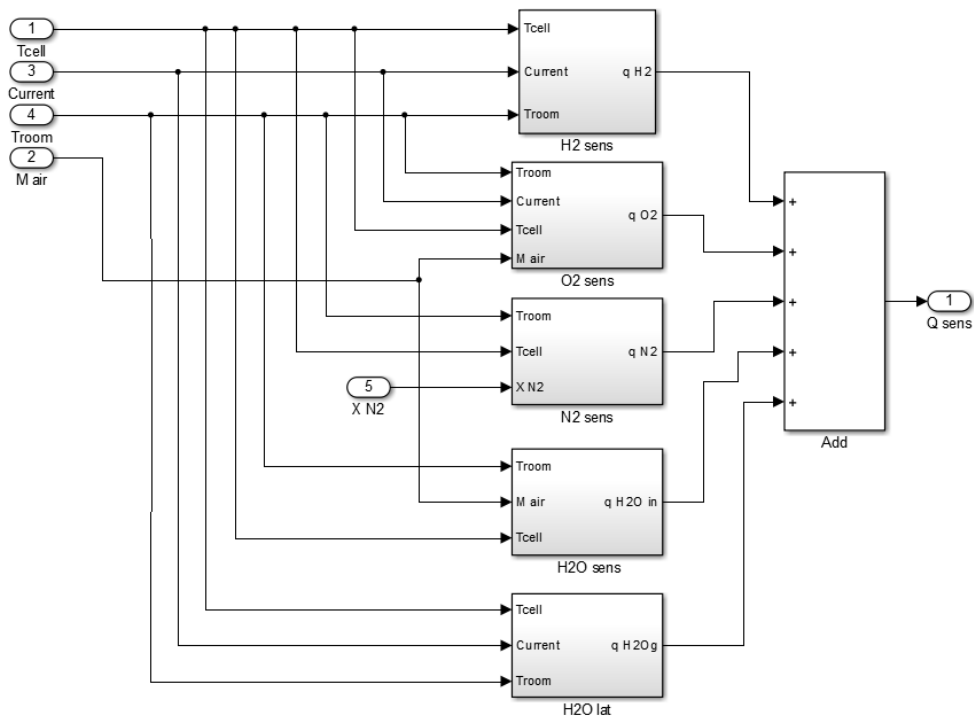


Figura 2.4: Diagrama de Blocos para o Calor Sensível e Latente

Por fim, para encontrar os valores de calor por convecção natural e forçada,  $\dot{q}_{conv}$ , utiliza-se o diagrama da figura 2.5, que mostra então a necessidade do conhecimento dos valores de tensão elétrica aplicada na armadura do motor DC que promove a rotação do ventilador e da diferença de temperatura entre a CaC e o ambiente no qual ela se encontra.

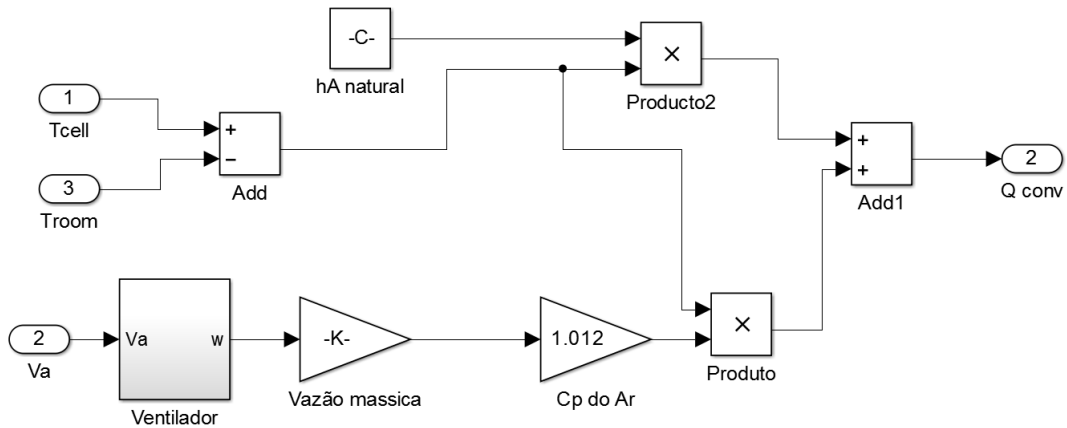


Figura 2.5: Diagrama de Blocos para o Calor de Convecção

Com isso é possível construir o diagrama de blocos que fornece o modelo transitente de temperatura, que pode ser integrado para o cálculo da temperatura real da CaC de forma instantânea, como ilustrado na figura 2.6.

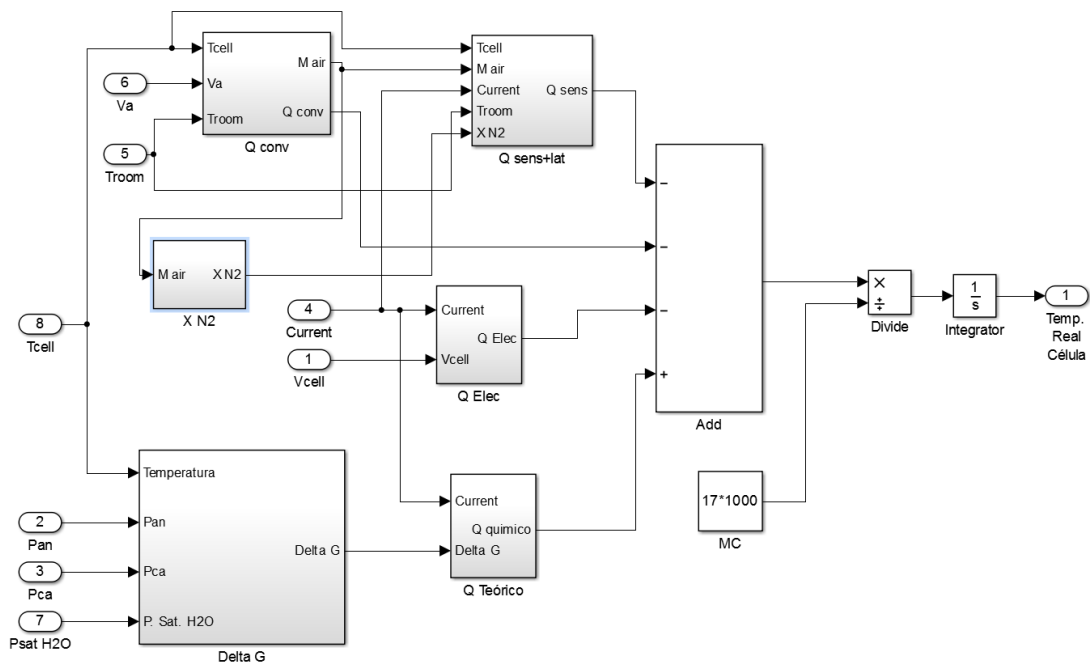


Figura 2.6: Diagrama de Blocos da Temperatura

### 2.4.1 Análise da Variação de Temperatura

Neste trabalho, foi suposto que a CaC está inicialmente em equilíbrio térmico com o ambiente, cuja temperatura seria de  $25^{\circ}C$ , ou seja,  $298K$ .

Em todos os resultados simulados, a unidade de temperatura será Kelvin (eixo vertical) e a unidade para medida do tempo será em segundos (eixo horizontal). A figura 2.7 mostra como se comporta a dinâmica de aquecimento em uma CaC sem controle para um degrau de corrente de amplitude de  $40A$ . Note que sua dinâmica de aquecimento é típica de um sistema de primeira ordem.

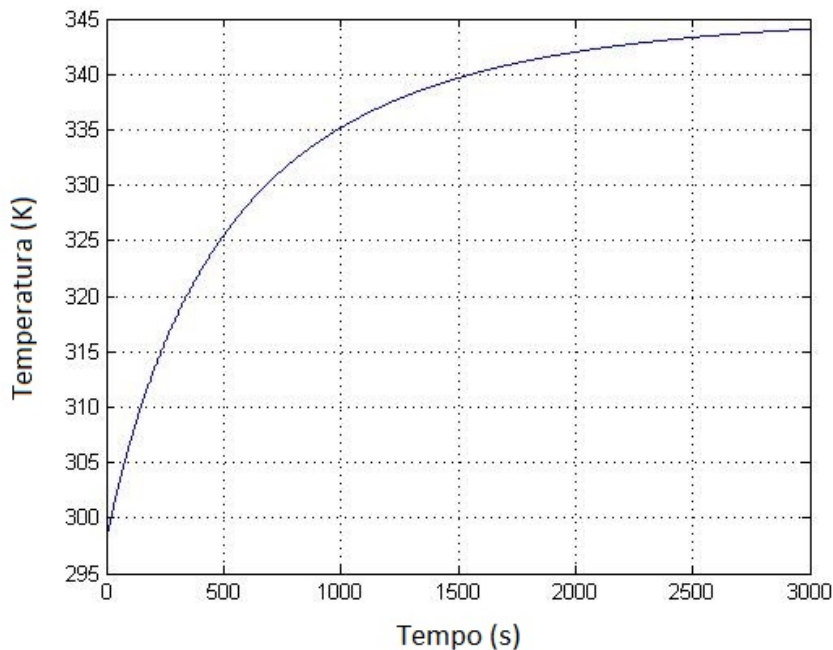


Figura 2.7: Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema sem Controle.

### 2.4.2 Funcionamento com Controle de Temperatura

A CaC não pode atingir temperaturas muito superiores a  $65^{\circ}C$ , ficando sujeita ao início de um processo de deterioração. Assim, se faz necessário usar um sistema de controle para manter a CaC em sua temperatura ideal, cerca de  $338K$  ( $65^{\circ}C$ ). Tal controle foi implementado por meio de um relé que aciona o sistema de refrigeração quando ela atinge  $339K$ , desligando o mesmo quando ela retorna para o valor de  $337K$ , mantendo a CaC em sua temperatura ideal de funcionamento, conforme ilustrado na figura 2.8.

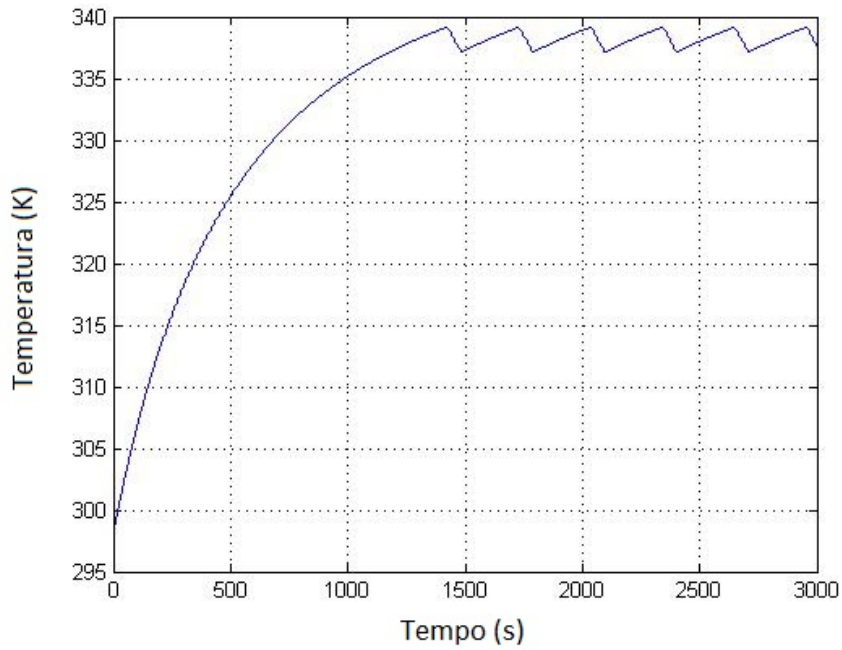


Figura 2.8: Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 40A

Na figura 2.9 é possível ver também o comportamento do sinal de controle. Note que os tempos de chaveamento do relé podem ser derivados diretamente do gráfico de evolução de temperatura.

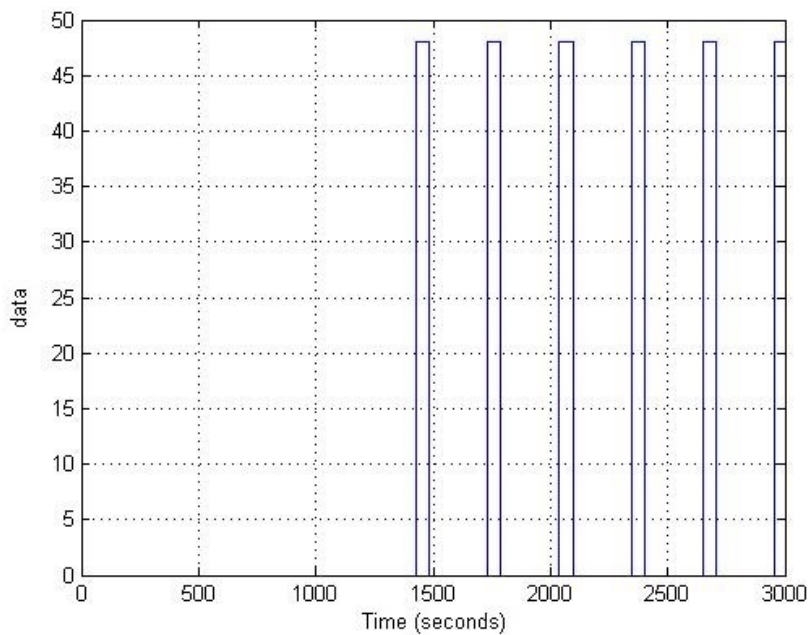


Figura 2.9: Gráfico Sinal de Controle x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 40A



Para comparação, é possível também avaliar a dinâmica de temperatura para outros níveis de corrente. Neste caso, foi simulada uma corrente de 45A, em que a mesma se comportou conforme a figura 2.10, com o sinal de controle se comportando conforme a figura 2.11.

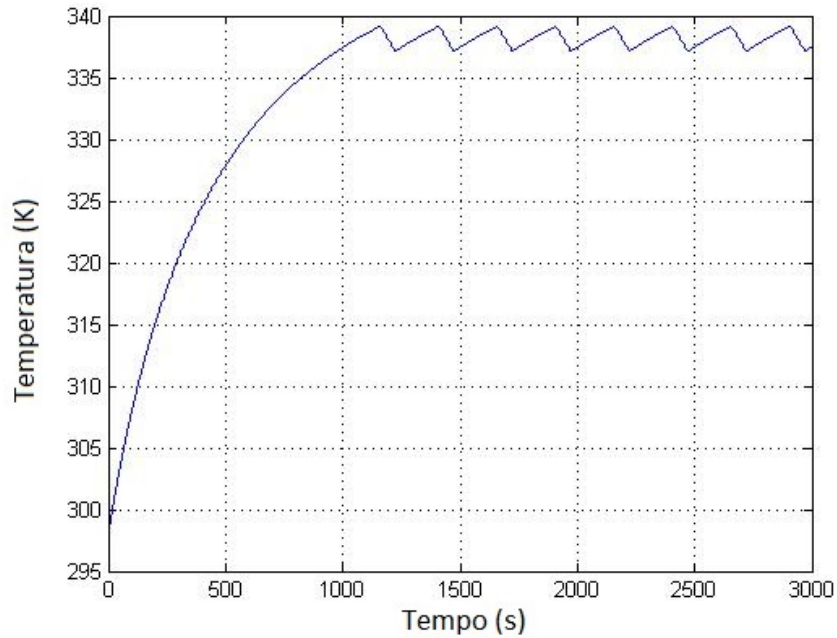


Figura 2.10: Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 45A

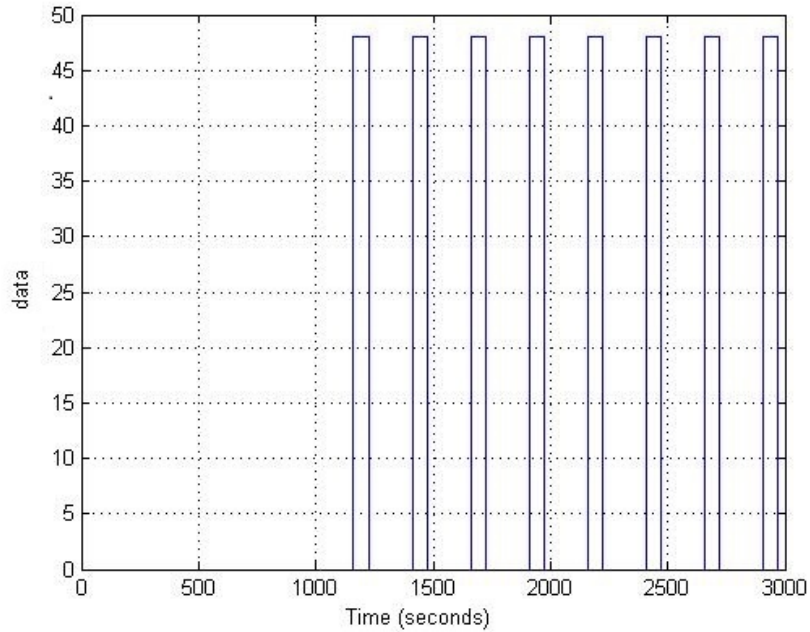


Figura 2.11: Gráfico Sinal de Controle x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 45A

Constata-se que um aumento da corrente provoca então uma dinâmica mais rápida de aquecimento da mesma, fato demonstrado pelo aumento na frequência de chaveamento do relé.

Por fim, foi simulado um caso com corrente de 50A. A temperatura se comportou conforme a figura 2.12 enquanto que o sinal de controle se comportou conforme a figura 2.13. Não serão ilustradas simulações para correntes mais baixas pois a CaC demora mais tempo para se aquecer até que seja necessário acionar o sistema de controle e seu comportamento é análogo aos comportamentos já observados. As simulações mostram que a corrente requerida pela carga apresenta influência direta no aquecimento da mesma.

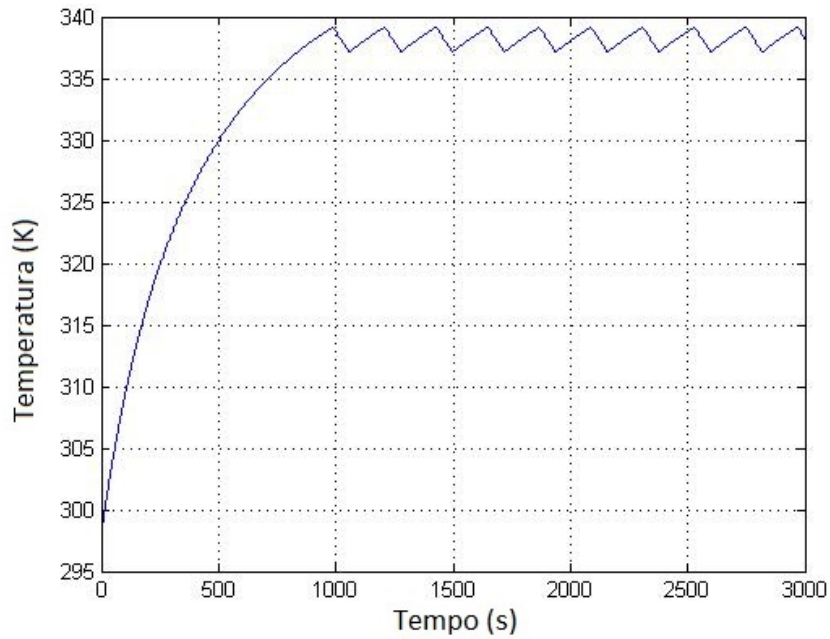


Figura 2.12: Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 50A

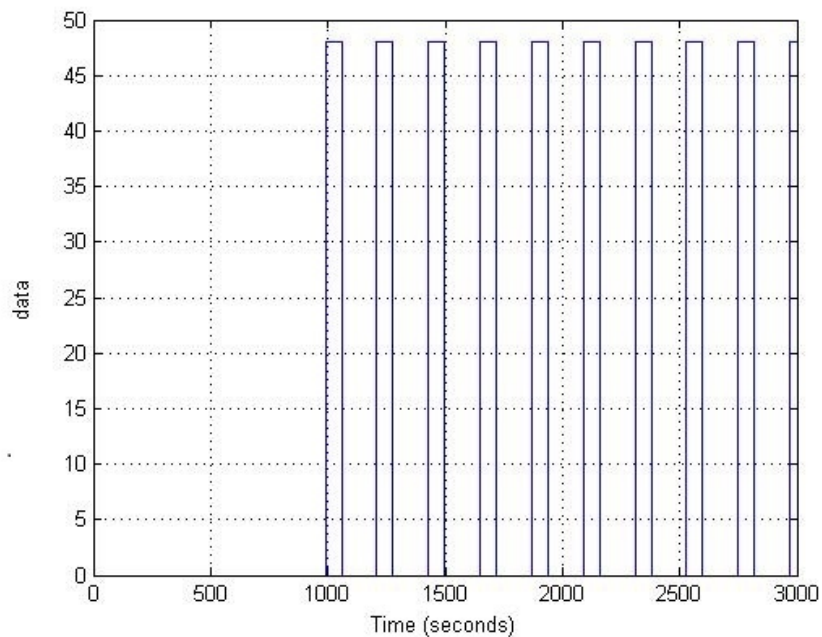


Figura 2.13: Gráfico Sinal de Controle x Tempo(s) do Sistema com Controle de Temperatura e empilhamento fornecendo 50A

Após análise da variação de temperatura, do ponto de vista prático, é ainda mais interessante avaliar o comportamento da potência fornecida por um sistema de alimentação. Neste caso, como as correntes serão sempre determinadas neste

trabalho, deve-se verificar então a dinâmica de tensão na CaC.

### 2.4.3 Análise da Variação de Tensão

Em sua operação normal, sem controle térmico, aplicou-se a mesma corrente de 40A com a qual foram feitas as análises de temperatura, mas de forma síncrona avaliou-se a evolução de tensão elétrica produzida pela CaC. Neste caso, observa-se que de fato há uma temperatura ideal para o funcionamento da mesma, onde os 338K citados anteriormente fornecem a tensão/potência máxima.

Temperaturas altas ressecam a membrana e as muito baixas desaceleram a reação, ou seja, temperaturas altas atuam como catalizador, mas apenas até um limite a partir do qual o sistema se deteriora. Tais fenômenos podem ser evidenciados pela figura 2.14, em que o valor de tensão elétrica cresce junto com o gráfico de temperatura visto na figura 2.7 até certo ponto, tido como ideal para o funcionamento, mas a partir do qual o seu aumento gera perda de tensão. Todos os gráficos apresentam a tensão medida em Volts e o tempo transcorrido está medido em segundos.

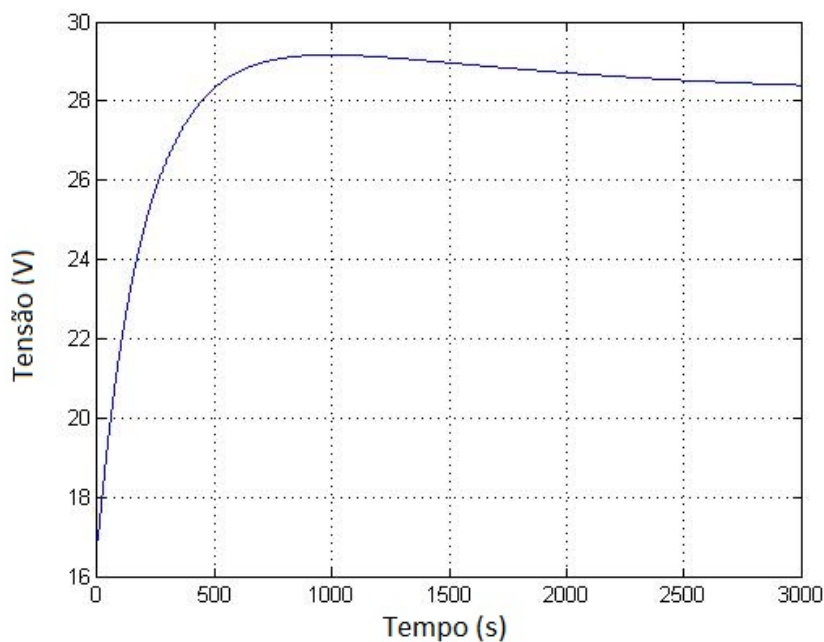


Figura 2.14: Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema sem Controle

### Funcionamento com Controle de Temperatura

Uma vez que a CaC não pode atingir temperaturas acima de  $65^{\circ}C$ , a ação do sistema de controle também pode ser visualizada por meio da medição de tensão elétrica produzida, conforme ilustrado pela figura 2.15, na qual a tensão é mantida

em cerca de 29V.

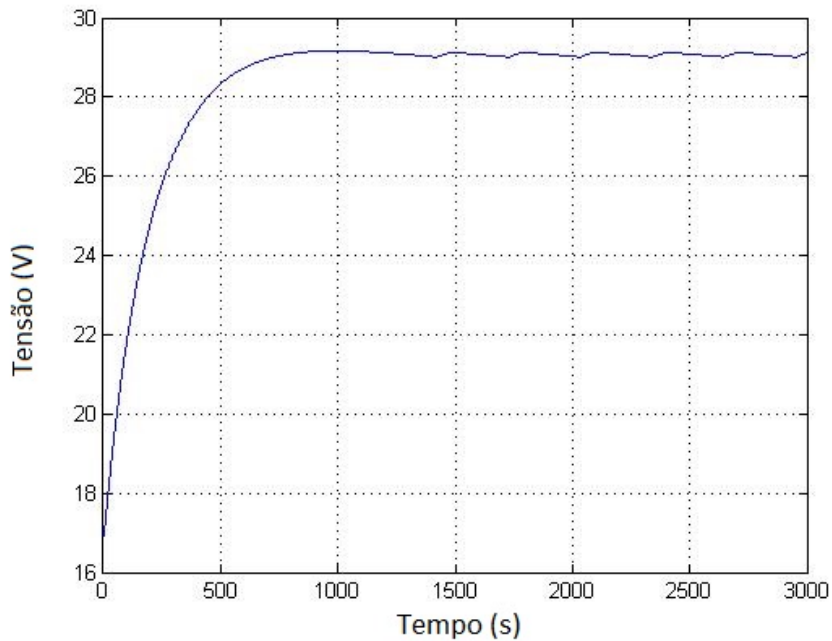


Figura 2.15: Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com controle com 40A

Para comparação, é possível também avaliar a dinâmica de tensão elétrica para outros níveis de corrente. Neste caso, foi simulado também o que ocorre com a tensão para uma corrente de 45A, em que a mesma comportou-se conforme a figura 2.16, também indicando um aumento na frequência de chaveamento do relé.

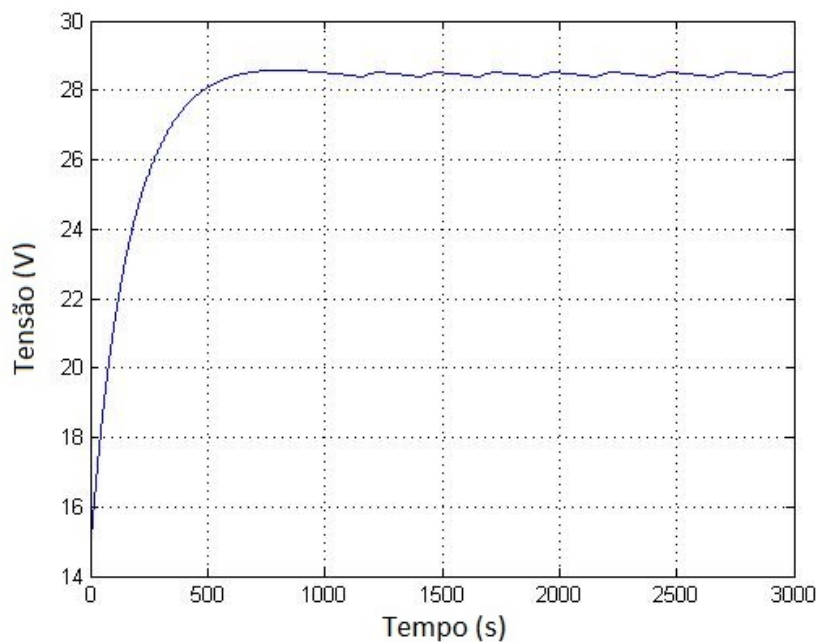


Figura 2.16: Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com controle com 45A

Por fim, foi simulado um caso de tensão elétrica para corrente de 50A, que se comportou conforme a figura 2.17:

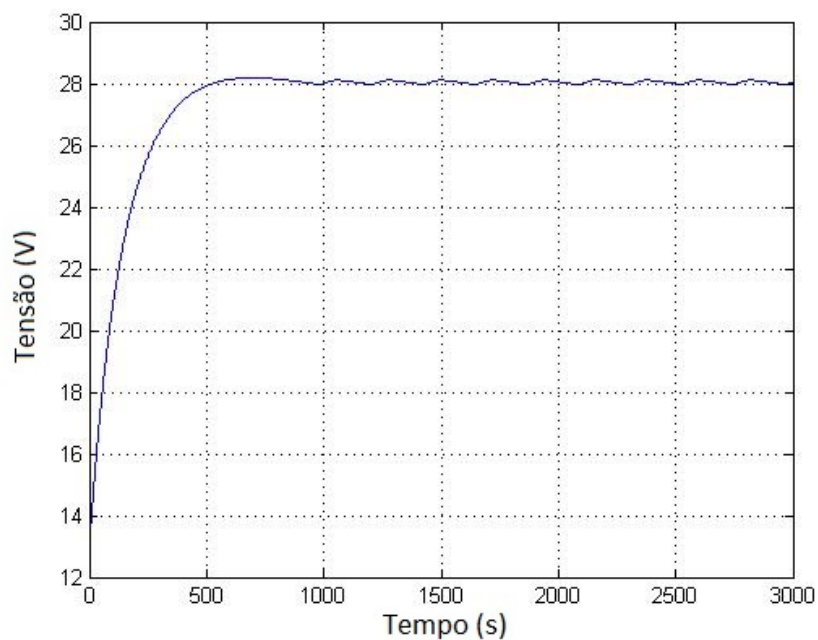


Figura 2.17: Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com controle com 50A

Tal resultado demonstra que, mesmo não sendo indicado trabalhar com temperaturas muito altas para evitar degradação da CaC, um sistema de controle da mesma é capaz de fazer com que a CaC seja capaz de trabalhar com níveis maiores de corrente.

#### 2.4.4 Variação de Corrente

Considerou-se também uma possível variação da corrente durante a operação. Neste caso, avaliou-se o que aconteceria caso a corrente de carga sofresse um aumento de 10A (figura 2.18). Com base nesta simulação, vê-se que este acréscimo gera menor tensão elétrica produzida pela CaC.

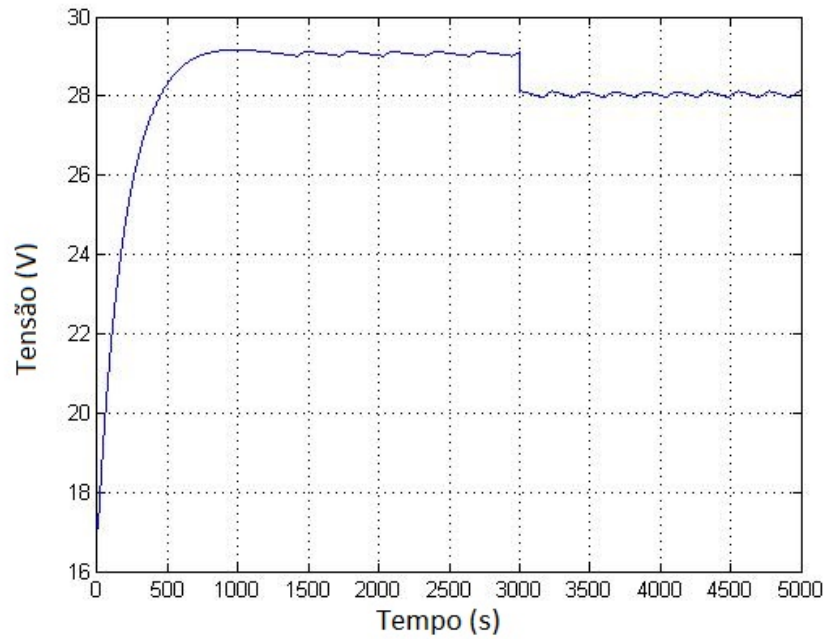


Figura 2.18: Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) do Sistema com aumento de 10A na corrente nominal

A partir deste resultado, torna-se interessante então verificar a relação que há entre tensão e corrente para uma determinada CaC, de modo que seja possível reafirmar qual o ponto ótimo de trabalho da CaC em questão.

### 2.4.5 Relação Tensão x Corrente

Para concluir uma análise geral do modelo, tem-se a figura 2.19 que mostra as curvas de polarização da célula para temperaturas de 328K, 337K, 338K, 339K e 348K. Tais curvas ilustram a relação que existe entre a tensão e a corrente da CaC para determinados valores de temperatura.

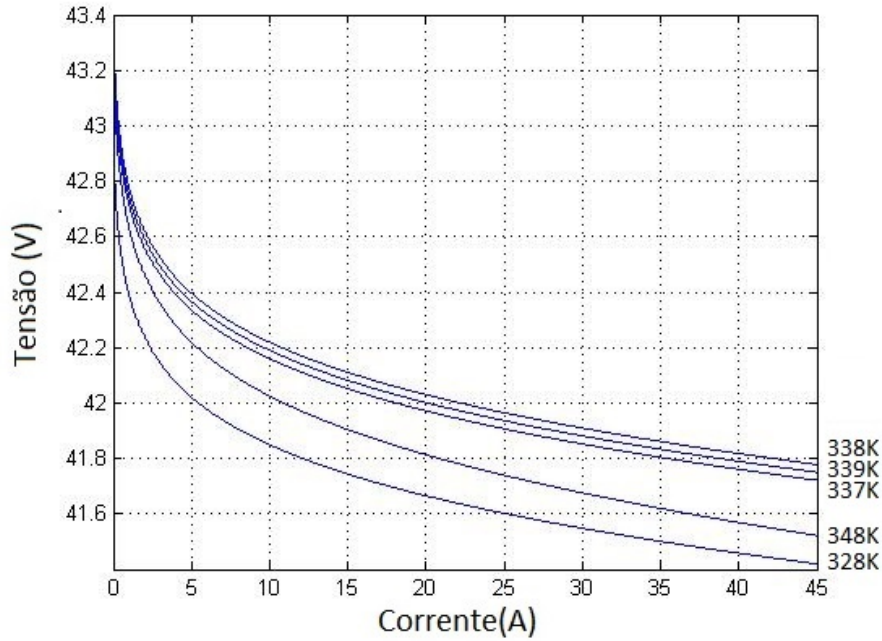


Figura 2.19: Gráfico Tensão(V) x Corrente(A) do Sistema para 328K, 337K, 338K, 339K e 348K

Por meio desta, vê-se que a temperatura ideal para o funcionamento mais eficiente da CaC considerada é de fato 338K, pois neste caso a potência da CaC modelada (potência = corrente  $\times$  tensão) será maior. Para outros valores de temperatura fica evidenciado que haverá uma queda na eficiência da CaC, tanto para um nível mais alto quanto para um nível mais baixo.

Com isso, para prosseguir com os estudos a respeito da modelagem do sistema de CaC garantindo seu correto funcionamento e segurança, faz-se necessário então introduzir os conceitos de sistemas a eventos discretos visando utilizar suas técnicas para diagnóstico e detecção de falhas.



## Capítulo 3

# Diagnóstico de Falhas em Sistemas a Eventos Discretos

Neste capítulo serão introduzidos conceitos de Sistemas a Eventos Discretos (SED) que servirão de base para o diagnóstico de falhas no sistema de CaC.

**Definição 3.1.** *(Sistemas a eventos discretos - SEDs) Sistemas a eventos discretos são sistemas dinâmicos de estados discretos cuja transição de estados se dá através da ocorrência, em geral assíncrona, de eventos.*

O fato do estado do sistema ser discreto implica que ele pode assumir valores simbólicos, como, por exemplo,  $\{\text{ligado}, \text{desligado}\}$ ,  $\{\text{verde}, \text{amarelo}, \text{vermelho}\}$ , ou valores discretos tais como valores numéricos pertencentes aos conjuntos dos números naturais ou inteiros, ou ser formado por um subconjunto enumerável de elementos do conjunto de números reais.

Eventos podem estar associados a ações específicas (por exemplo, alguém aperta um botão, um avião levanta vôo etc) ou ser o resultado de diversas condições que são satisfeitas (uma peça atinge um determinado ponto de uma linha de produção, o líquido dentro de um tanque atinge uma determinada altura etc). Embora seja possível modelar qualquer sistema físico como um SED de acordo com o grau de abstração considerado, determinados sistemas são naturalmente discretos e com evolução determinada pela ocorrência de eventos.

Assim como na modelagem de sistemas dinâmicos de variáveis contínuas (SDVC), um modelo para um SED deve ser capaz de reproduzir, dentro de limites de tolerância pré-estabelecidos, o comportamento do sistema. Enquanto nos SDVCs as trajetórias dos estados são descritas em função do tempo, nos SEDs elas são função de uma sequência de eventos.

Todas as sequências de eventos possíveis de serem geradas por um SED caracterizam a linguagem deste, sendo esta definida sobre o conjunto de eventos (alfabeto) do sistema. Assim, ao se considerar a evolução dos estados de um SED, a maior

preocupação é com a sequência de estados visitados e com os eventos que causaram as correspondentes transições de estado, isto é, o modelo de um SED é composto basicamente de dois elementos, estados e eventos.

**Definição 3.2.** (*Estado de um SED*) O estado de um sistema dinâmico  $x(t_o)$  em um instante de tempo  $t_o$  é o conjunto de informações que junto com o conhecimento da entrada do sistema  $u(t)$ ,  $\forall t \geq t_o$ , é suficiente para determinar unicamente a resposta do sistema  $x(t)$ ,  $\forall t \geq t_o$ .

**Definição 3.3.** (*Evento de um SED*) Um evento é uma ocorrência instantânea que pode promover uma mudança de estado no sistema.

Todo SED possui um conjunto de eventos  $\Sigma$ , cujos componentes formam o alfabeto da linguagem do sistema. Sequências realizadas a partir desses elementos devem ser interpretadas como as palavras de uma linguagem. Dessa forma, uma linguagem modela e representa o comportamento de um SED. A definição formal de linguagem é dada a seguir.

**Definição 3.4.** (*Linguagem*) Uma linguagem definida sobre um conjunto de eventos  $\Sigma$  é um conjunto formado por sequências de comprimento finito construídas a partir de eventos pertencentes a  $\Sigma$ .

Além disso, algumas notações se fazem necessárias antes de aprofundar o estudo de um SED. Representa-se por  $\Sigma$  o conjunto finito dos eventos, tem-se que uma sequência que não possua eventos é chamada de sequência vazia, sendo denotada por  $\varepsilon$ , e define-se o comprimento de uma sequência como sendo igual ao número de eventos (contando as multiplicidades) dela. Seja  $s$  uma sequência, a notação do comprimento de  $s$  é  $|s|$ , onde se  $s = aacd$ , teremos  $|s| = 4$ , e também,  $|\varepsilon| = 0$ .

A linguagem de um SED está contida em um conjunto que contem todas as sequências finitas formadas pelos elementos de  $\Sigma$ , incluindo a sequência vazia denotada por  $\varepsilon$ . Esse conjunto, denotado por  $\Sigma^*$ , é chamado de *Fecho de Kleene* de  $\Sigma$ . É possível também definir o *Fecho de Kleene* de uma linguagem  $L$  da seguinte forma:

**Definição 3.5.** (*Fecho de Kleene*) Seja  $L \subseteq \Sigma^*$ , então o fecho de Kleene de  $L$ ,  $L^*$ , é definido como:

$$L^* = \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \dots$$

Outra operação de linguagens importante neste contexto é a concatenação, definida assim:

**Definição 3.6.** (*Concatenação*) Sejam  $L_a, L_b \subseteq \Sigma^*$ , então a concatenação  $L_a L_b$  é definida como:

$$L_a L_b = \{s \in \Sigma^* : (s = s_a s_b)[s_a \in L_a, s_b \in L_b]\}.$$

Com isso, se  $L$  é uma linguagem definida sobre  $\Sigma$ , então  $L \subseteq \Sigma^*$ . Note que os conjuntos  $\Sigma$ ,  $\Sigma^*$  e  $\emptyset$  também são linguagens. Além disso, seja  $s = tuv$ , então tem-se que  $t$  é um prefixo de  $s$ ,  $u$  é uma subsequência de  $s$  e  $v$  é um sufixo de  $s$ .

A sequência vazia  $\varepsilon$  é o operador identidade da operação de concatenação, ou seja, para uma sequência  $u \in \Sigma^*$  tem-se que:  $u\varepsilon = \varepsilon u = u$ . Tanto a sequência  $s$  quanto a sequência  $\varepsilon$  são então prefixo, subsequência e sufixo de  $s$ .

Não apenas operações de concatenação, mas também outras operações podem ser realizadas com uma linguagem  $L$  contida em  $\Sigma^*$  normalmente, uma vez que  $L$  é um conjunto, como: união, interseção, diferença e complemento com relação a  $\Sigma^*$ . Além disso, podem ser definidas as seguintes operações com linguagens:

**Definição 3.7.** (*Fecho de prefixo*) Seja  $L \subseteq \Sigma^*$ , então o fecho de prefixo de  $L$ , denotado por  $\bar{L}$ , é definido como:

$$\bar{L} = \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*)[st \in L]\}.$$

Uma linguagem  $L$ , tal que  $L = \bar{L}$ , é dita ser prefixo-fechada.

**Definição 3.8.** (*Pós linguagem*) Seja  $L \subseteq \Sigma^*$  e  $s \in L$ . Então a pós linguagem de  $L$  após  $s$ , denotada por  $L/s$ , é definida como:

$$L/s = \{t \in \Sigma^* : st \in L\}.$$

Por definição,  $L/s = \emptyset$  se  $s \notin \bar{L}$ , em que  $\setminus$  denota a diferença entre conjuntos.

**Definição 3.9.** (*Projeção*)

Considerando dois conjuntos de eventos  $\Sigma_s$  e  $\Sigma_l$ , tais que  $\Sigma_s \subset \Sigma_l$ . Pode-se definir a projeção

$$P : \Sigma_l \rightarrow \Sigma_s,$$

em que:

$$P(\varepsilon) = \varepsilon,$$

$$P(e) = \begin{cases} e, & \text{se } e \in \Sigma_s \\ \varepsilon, & \text{se } e \in \Sigma_l \setminus \Sigma_s. \end{cases}$$

Tem-se também que o conceito de projeção pode ser estendido para sequências da seguinte forma:

$$P(se) = P(s)P(e), \forall s \in \Sigma_e^*, \forall e \in \Sigma_l,$$

em que tal conceito também pode ser estendido para linguagens.

De acordo com a definição acima, a projeção consiste em apagar das sequências de  $L$  os eventos que não pertencem a  $\Sigma_s$ . Do ponto de vista prático, essa operação representa a linguagem observada de um sistema, isto é, as sequências formadas pelos eventos cujas ocorrências são, de alguma forma, do conhecimento do observador.

Isso pode gerar ambiguidade, isto é, duas sequências distintas da linguagem podem ter a mesma projeção, o que pode levar a dificuldades tanto no controle quanto na diagnose de falhas.

Além disso, a projeção de uma sequência é definida de forma recursiva como:

**Exemplo 3.1.** *Sejam  $\Sigma_l = \{a, b, c, g\}$ ,  $\Sigma_s = \{a, b\}$  e considere a sequência  $s = abbcgacb \in \Sigma_l^*$ . Então a projeção de  $s$  é dada por  $P(s) = abbab$*

**Definição 3.10.** *(Projeção Inversa)*

*Além da operação de projeção pode-se também definir a projeção inversa de sequências*

$$P^{-1} : \Sigma_s^* \rightarrow 2^{\Sigma_l^*},$$

em que  $2^{\Sigma_l^*}$  é o conjunto potência de  $\Sigma_l^*$ .

*A projeção inversa de uma sequência  $s \in \Sigma_s^*$  é a operação que fornece toda e qualquer sequência de  $\Sigma_l^*$  que se for projetada no conjunto  $\Sigma_s^*$  irá fornecer a sequência  $s$ .*

*Para uma linguagem  $L \subseteq \Sigma_s^*$ , a operação de projeção inversa é definida como:*

$$P^{-1}(L) = \{s \in \Sigma_l^* : (\exists t \in L) \text{ e } P(s) = t\}$$

**Exemplo 3.2.** *Sejam  $\Sigma_l = \{a, b, c\}$  e  $\Sigma_s = \{a, b\}$  e considere a projeção  $P : \Sigma_l^* \rightarrow \Sigma_s^*$ .*

*Seja  $s = \varepsilon$ . Então a projeção inversa de  $s$  é igual a*

$$P^{-1}(\{\varepsilon\}) = \{c\}^*.$$

## 3.1 Autômatos

Uma das maneiras de se modelar SEDs é através de autômatos (também chamados máquinas de estados ou geradores). São dispositivos capazes de representar linguagens através de regras bem definidas.

**Definição 3.11.** (*Autômato Determinístico*) Um autômato determinístico  $G$  é uma sêxtupla

$$G = \{X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m\}$$

em que  $X$  é o espaço de estados,  $\Sigma$  é o conjunto finito de eventos,  $f(X \times \Sigma) \rightarrow X$  é a função de transição de estados.  $\Gamma : X \rightarrow 2^\Sigma$  é a função dos eventos ativos (viáveis).  $x_0$  é o estado inicial e  $X_m \subseteq X$  é o conjunto de estados marcados.

Autômatos são representados graficamente através de diagramas de transição de estados. Nesses diagramas os estados são representados por circunferências e são conectados entre si por arcos identificados (rotulados) com símbolos, que representam os eventos que determinam as transições entre os estados ligados pelo arco. Os estados marcados são identificados por duas circunferências concêntricas e estão, em geral, relacionados ao cumprimento de uma tarefa a ser realizada pelo sistema modelado pelo autômato. O estado inicial é indicado por uma seta apontada a ele, não oriunda de qualquer outro estado.

**Observação 3.1.** A função de transição de estados  $f$  é usualmente estendida com relação ao seu domínio, isto é,  $f : X \times \Sigma^* \rightarrow X$ , em que:

$$f(x, \varepsilon) = x,$$

$$f(x, se) = f(f(x, s), e), \forall s \in \Sigma^*, \forall e \in \Sigma.$$

**Observação 3.2.** Um autômato é denominado determinístico quando para todo estado  $x \in X$  e para todo evento  $\sigma \in \Gamma(x)$ , existe um único estado  $y \in X$  tal que  $f(x, \sigma) = y$ . Note que, se um autômato for não-determinístico,  $f(x, \sigma)$  poderá levar não só a um novo estado, mas sim a um conjunto de estados.

Existem dois tipos de linguagens que podem ser associadas ao comportamento de um autômato: a linguagem gerada e a linguagem marcada.

A linguagem gerada (denotada por  $L$ ) é composta por todas as sequências que podem ser seguidas no diagrama de transição de estados, começando pelo estado

inicial. A linguagem marcada (denotada por  $L_m$ ) é um subconjunto da linguagem gerada e consiste de todas as sequências que terminam em um estado marcado no diagrama de transição de estados.

**Definição 3.12.** (*Linguagem gerada*) A linguagem gerada por um autômato  $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$  é definida como

$$L(G) = \{s \in \Sigma^* : f(x_0, s) \text{ é definida}\}.$$

em que a linguagem gerada por  $G$  é prefixo fechada, ou seja,  $L(G) = \overline{L(G)}$ .

**Definição 3.13.** (*Linguagem marcada*) A linguagem marcada por um autômato  $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$  é definida como

$$L_m(G) = \{s \in L(G) : f(x_0, s) \in X_m\}.$$

As definições de caminho, caminho cíclico também são importantes para o desenvolvimento dos conceitos desta dissertação, e são apresentadas a seguir.

**Definição 3.14.** (*Caminho e caminho cíclico*) Em um autômato, um caminho  $(x_k, \sigma_1, x_{k+1}, \sigma_2, \dots, x_l, \sigma_{k+l}), l > 0$ , é a sequência de estados e eventos tais que  $x_{k+1} = f(x_{k+i-1}, \sigma_i), \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, l\}$ .

Um caminho  $(x_{k+1}, \sigma_1, x_{k+1}, \sigma_2, \dots, \sigma_l, x_{k+l})$  é dito ser cíclico se  $x_{k+l} = x_k$ .

A sequência de eventos associada a um caminho é formada pela concatenação dos eventos que pertencem a esse caminho. Assim, uma sequência  $s \in L(G)$  se, e somente se,  $s$  está associada a um caminho possível no autômato  $G$ .

Em algumas situações, pode ser necessário analisar apenas parte de um autômato. Em outras, pode vir a ser necessário criar um novo autômato que represente a composição de dois ou mais componentes. Em situações assim, devem ser realizadas operações com autômatos, conforme visto a seguir.

## 3.2 Operações Unárias

Operações com autômatos são fundamentais para o diagnóstico de falhas. A seguir serão definidas operações necessárias para permitir a compreensão dos algoritmos que serão ilustrados no próximo capítulo.

**Definição 3.15.** (*Parte acessível de um autômato,  $Ac(G)$* ) Tomar a parte acessível de um autômato significa eliminar todos os estados, e os respectivos eventos, que não são alcançáveis a partir do estado inicial. Formalmente, a parte acessível de  $G$  é um autômato

$$A_c(G) = (X_{ac}, \Sigma, f_{ac}, x_o, X_{m,ac})$$

em que

$$X_{ac} = \{x \in X : (\exists s \in \Sigma^*)[f(x_o, s) = x]\},$$

$$e X_{m,ac} = X_m \cap X_{ac}$$

Quando  $G = A_c(G)$ ,  $G$  é dito ser acessível. Note que  $L(G) = L(A_c(G))$  e  $L_m(G) = L_m(A_c(G))$ .

**Definição 3.16.** (*Parte coacessível de um autômato,  $CoAc(G)$* ) Tomar a parte coacessível de um autômato significa eliminar os estados a partir dos quais não é possível alcançar um estado marcado. Formalmente, a parte coacessível é um autômato:

$$CoAc(G) = (X_{CoAc}, \Sigma, f_{CoAc}, x_{oCoAc}, X_m)$$

$$em\ que\ X_{CoAc} = \{x \in X : (\exists s \in \Sigma^*)[f(x, s) \in X_m]\},$$

$$f_{CoAc} = f(X_{CoAc}) \times \Sigma^* \rightarrow X_{CoAc}\ e$$

$$x_{oCoAc} = \begin{cases} x_0, & se\ x_0 \in X_{CoAc} \\ \text{indefinido, caso contrário} \end{cases}$$

A linguagem gerada por  $G$  não é necessariamente igual a linguagem gerada por  $CoAc(G)$ , contudo,  $L_m(G) = L_m(CoAc(G))$ .

**Definição 3.17.** (*Trim( $G$ )*)

A operação  $Trim(G)$  nada mais é do que tomar a parte coacessível da parte acessível de um autômato, ou vice-versa:

$$Trim(G) = CoAc[A_c(G)] = A_c[CoAc(G)].$$

A seguir são apresentadas as operações de composição de autômatos.

### 3.3 Operações de Composição

**Definição 3.18.** (*Produto, composição completamente síncrona*)

Considere os autômatos  $G_1 = (X_1, \Sigma_1, f_1, \Gamma_1, X_{01}, X_{m1})$  e  $G_2 = (X_2, \Sigma_2, f_2, \Gamma_2, X_{02}, X_{m2})$ .

A composição produto permite somente transições com eventos comuns. Defini-se a operação produto como

$$G_1 \times G_2 = A_c(X_1 \times X_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, f_{1 \times 2}, \Gamma_{1 \times 2}, (X_{01}, X_{02}), X_{m1} \times X_{m2}),$$

em que:

$$f_{1,2}((x_1, x_2), e) = \begin{cases} (f_1(x_1, e), f_2(x_2, e)), & \text{se } e \in \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2) \\ \text{indefinido,} & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

e

$$\Gamma_{1 \times 2}(x_1, x_2) = \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2).$$

**Observação 3.3.** Se  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ , então  $L(G_1 \times G_2) = \{\varepsilon\}$  e

$$L_m(G_1 \times G_2) = \begin{cases} \{\varepsilon\}, & \text{se } X_{o1}, X_{o2} \text{ são marcados} \\ \emptyset, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Note que uma transição em  $G_1 \times G_2$  será possível se, e somente se, a mesma for possível nos dois autômatos, ou seja, os estados do autômato  $G_1 \times G_2$  evoluem de modo totalmente sincronizado com a evolução de estados dos autômatos  $G_1$  e  $G_2$ . Com isso, pode-se afirmar que  $\mathcal{L}(G_1 \times G_2) = \mathcal{L}(G_1) \cap \mathcal{L}(G_2)$  e  $\mathcal{L}_m(G_1 \times G_2) = \mathcal{L}_m(G_1) \cap \mathcal{L}_m(G_2)$ .

Suponha que se deseje obter um autômato que modele o comportamento síncrono de  $G_1$  e  $G_2$ , isto é: (i) um evento comum a  $G_1$  e  $G_2$  somente poderá ocorrer quando ambos,  $G_1$  e  $G_2$ , estiverem em estados cujos conjuntos dos eventos ativos tenham esse evento como elemento; (ii) eventos privados, isto é, pertencentes a  $\Sigma_1 \setminus \Sigma_2$  ou a  $\Sigma_2 \setminus \Sigma_1$  podem ser executados sempre que possível.

**Definição 3.19.** (*Paralelo, composição síncrona*)

Considere os autômatos  $G_1 = (X_1, \Sigma_1, f_1, \Gamma_1, X_{01}, X_{m1})$  e  $G_2 = (X_2, \Sigma_2, f_2, \Gamma_2, X_{02}, X_{m2})$ .



A composição paralela entre  $G_1$  e  $G_2$ , denotada por  $G_1 \parallel G_2$ , é definida da seguinte forma:

$$G_1 \parallel G_2 = A_c(X_1 \times X_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, f_{1\parallel 2}, \Gamma_{1\parallel 2}, (X_{01}, X_{02}), X_{m1} \times X_{m2})$$

em que:

$$f_{1\parallel 2}((x_1, x_2), e) = \begin{cases} (f_1(x_1, e), f_2(x_2, e)), & \text{se } e \in \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2) \\ (f_1(x_1, e), x_2), & \text{se } e \in \Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2 \\ (x_1, f_2(x_2, e)), & \text{se } e \in \Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1 \\ \text{indefinido, caso contrário,} & \end{cases}$$

$$e \in \Gamma_{1\parallel 2}(x_1, x_2) = [\Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2)] \cup [\Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2] \cup [\Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1].$$

É possível mostrar que

$$L(G_1 \parallel G_2) = P_1^{-1}[L(G_1)] \cap P_2^{-1}[L(G_2)]$$

e

$$L_m(G_1 \parallel G_2) = P_1^{-1}[L_m(G_1)] \cap P_2^{-1}[L(G_2)].$$

em que:

$$P_i : (\Sigma_1 \cup \Sigma_2)^* \rightarrow \Sigma_i^*, i = 1, 2.$$

**Observação 3.4.** *É importante ressaltar que:*

1. Se  $\Sigma_1 = \Sigma_2$ , então a composição paralela é igual ao produto;
2. Se  $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \emptyset$ , então a composição paralela modela o comportamento simultâneo de  $\Sigma_1$  e  $\Sigma_2$ .

Note que a composição paralela permite a ocorrência de um evento comum a  $\Sigma_1$  e  $\Sigma_2$  se, e somente se, tal evento estiver ativo simultaneamente nos estados atuais tanto de  $G_1$  quanto de  $G_2$ . Enquanto isso, eventos pertencentes a  $\Sigma_1 \setminus \Sigma_2$  ou  $\Sigma_2 \setminus \Sigma_1$  podem ser executados sempre que isso for possível.

### 3.4 SED Parcialmente Observados

Existem casos em que não é possível considerar que todos os eventos de  $\Sigma$  são observáveis, ou seja, é possível que haja eventos cuja ocorrência não é percebida: são eventos não-observáveis. SEDs parcialmente observados são formados por autômatos cujo conjunto de eventos pode ser particionado em dois subconjuntos:  $\Sigma_o$  e  $\Sigma_{uo}$ , ou seja,  $\Sigma = \Sigma_o \dot{\cup} \Sigma_{uo}$ .

O conjunto de eventos observáveis,  $\Sigma_o$ , consiste no conjunto de eventos cuja ocorrência pode ser registrada por um observador externo. Por outro lado, o conjunto de eventos não-observáveis,  $\Sigma_{uo}$ , é formado por todos os eventos cuja ocorrência não pode ser identificada. Os eventos de falha, objeto de interesse do presente trabalho, farão parte do conjunto de eventos não-observáveis, uma vez que, caso pudessem ser registradas, as falhas seriam trivialmente diagnosticadas.

No caso de sistemas determinísticos contendo eventos que não podem ser observados,  $\mathcal{L}(G)$  observada será composta por todas as sequências da linguagem gerada desconsiderando-se eventos não observáveis. Tal linguagem pode ser obtida por meio da projeção, ou seja, a linguagem gerada observada do autômato  $G$  será  $P_o[\mathcal{L}(G)]$ , em que  $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$ . O mesmo pode ser feito para obter a linguagem marcada observada do autômato  $G$ , que será igual a  $P_o[\mathcal{L}_m(G)]$ . Com isso, fica claro que sequências distintas podem ter a mesma projeção, o que requer a definição de autômatos não-determinísticos.

Autômatos determinísticos apresentam três características:

1. Há apenas um estado inicial;
2. Se  $e \in \Gamma(x)$ , então  $f(x, e)$  leva a um único estado  $y$ ;
3. Todas as transições são rotuladas por eventos pertencentes a  $\Sigma$ .

Em um autômato não determinístico pelo menos uma dessas características não é observada.

**Definição 3.20.** (*Autômatos Não-Determinísticos*)

*Um autômato não determinístico  $G_{nd}$  é uma sêxtupla:*

$$G_{nd} = (X, \Sigma \cup \{\varepsilon\}, f_{nd}, \Gamma_{nd}, X_0, X_m),$$

*em que  $f_{nd} = X \times \Sigma \cup \{\varepsilon\} \rightarrow 2^X$  e  $X_0 \subseteq X$ .*

Note que, se um autômato for não-determinístico,  $f_{nd}(x, \sigma)$  poderá levar não só a um novo estado, mas sim a um conjunto de estados.

Para obter um autômato determinístico que gere e marque as linguagens observadas no autômato parcialmente observável, faz-se necessário introduzir o conceito de autômato observador, cuja obtenção requer também o conceito de alcance não observável.

**Definição 3.21.** (*Alcance não observável*) O alcance não observável de um estado  $x \in X$ , denotado por  $UR(x)$ , é definido como:

$$UR(x) = \{y \in X : (\exists t \in \Sigma_{uo}^*) [f(x, t) = y]\}.$$

O alcance não observável pode ser definido também para um conjunto  $B \in 2^X$  da seguinte forma:

$$UR(B) = \cup_{x \in B} UR(x).$$

Note que o alcance não-observável para um determinado estado  $x$  fornece todos os estados que podem ser alcançados a partir deste estado por meio de transições rotuladas por eventos não observáveis. Este conceito permite então a definição de observador.

**Definição 3.22.** (*Autômato Observador*) Um autômato observador pode ser obtido a partir de um autômato  $G$  com relação a um conjunto de eventos observáveis  $\Sigma_o$ , denotado por  $Obs(G, \Sigma_o)$ , sendo este dado por

$$Obs(G, \Sigma_o) = (X_{Obs}, \Sigma_o, f_{Obs}, \Gamma_{Obs}, x_{0,Obs}, X_{m,Obs}),$$

em que  $X_{Obs} \subseteq 2^X$  e  $X_{m,Obs} = \{B \in X_{Obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$ .  $f_{Obs}$ ,  $\Gamma_{Obs}$  e  $x_{0,Obs}$  são definidos de acordo com o algoritmo 3.1 de obtenção do mesmo.

**Algoritmo 3.1.** (*Algoritmo para obtenção de  $Obs(G)$* )

Seja  $G = (X, \Sigma \cup \{\varepsilon\}, f, \Gamma, X_0, X_m)$  um autômato, então  $Obs(G) = (X_{obs}, \Sigma, f_{obs}, \Gamma_{obs}, X_{0,obs}, X_{m,obs})$  é construído da seguinte forma:

1. Defina  $X_{0,obs} = UR(X_0)$ . Faça  $X_{obs} = \{X_{0,obs}\}$  e  $\tilde{X}_{obs} = X_{obs}$ ;
2.  $\hat{X}_{obs} = \tilde{X}_{obs}$  e  $\tilde{X}_{obs} = \emptyset$ ;
3. Para cada  $B \in \hat{X}_{obs}$  faça:

- A união de eventos ativos em  $\Sigma$ :  $\Gamma_{obs}(B) = (\cup \Gamma(x), \forall x \in B) \cap \Sigma_o$ ,
- Para cada evento  $e \in \Gamma_{obs}(B)$  crie  $f_{obs}(B, e) = \cup R\{x \in X : (\exists x_e \in B)[x \in f(x_e, e)]\}$ ,
- Una o  $\tilde{X}$  novo que foi criado com o  $\tilde{X}$  antigo:  $\tilde{X}_{obs} \leftarrow \tilde{X}_{obs} \cup f_{obs}(B, e)$ ;

4. Atualize  $X_{obs}$ :  $X_{obs} \leftarrow X_{obs} \cup \tilde{X}_{obs}$

5. Repita os passos 2 a 4 até que toda a parte acessível de  $Obs(G)$  tenha sido obtida;

6.  $X_{m,obs} = \{B \in X_{obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$

Um autômato observador é sempre gerado a partir de um autômato qualquer original, seja este determinístico ou não determinístico, e o resultado será sempre o autômato determinístico que representa a evolução observável do mesmo, ou seja, unindo estados ligados apenas por eventos não observáveis em um único novo estado.

De posse dos conceitos vistos até agora, é possível então dar-se início aos estudos acerca da teoria do diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos.

### 3.5 Diagnóstico de Falhas

Se as falhas puderem ser detectadas por sensores o diagnóstico pode realizado trivialmente, mas em muitos casos não haverá qualquer sensor que torne essa tarefa possível e, portanto, a falha deverá ser modelada como um evento não observável e sua ocorrência precisará ser inferida utilizando a teoria de diagnóstico de falhas em SEDs. Para esse fim, será considerado que  $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{uo}$  é o conjunto de eventos de falha do sistema.

Diz-se que a linguagem gerada por um autômato será diagnosticável em relação a um conjunto de eventos observáveis  $\Sigma_o$  e um conjunto de eventos de falhas se a ocorrência de uma falha puder ser detectada após um número finito de transições depois da ocorrência do evento de falha usando somente sequências de eventos observáveis.

Em geral, o conjunto  $\Sigma_f$  é particionado em diferentes subconjuntos  $\Sigma_{f_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , não necessariamente unitários, em que cada conjunto  $\Sigma_{f_i}$  é formado por eventos que modelam falhas que são, de alguma forma, correlacionadas. Suponha que  $\prod_f = \{\Sigma_{f_1}, \Sigma_{f_2}, \dots, \Sigma_{f_m}\}$  denote essa partição. Assim, cada vez que for dito que uma falha  $f_i$  ocorreu, deve ser entendido que algum evento do conjunto  $\Sigma_{f_i}$  ocorreu.

Nos trabalhos envolvendo diagnose de falhas em SEDs, as seguintes hipóteses são feitas (BASILIO e LAFORTUNE, 2009), (BASILIO *et al.*, 2012):

- H1. A linguagem gerada por  $G$  é viva, i.e.,  $\Gamma(x_i) \neq \emptyset$  para todo  $x_i \in X$ ;
- H2. O autômato  $G$  não possui nenhum ciclo formado somente por eventos não-observáveis;
- H3. Existe somente um único tipo de falha, i.e.,  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$ .

A hipótese **H1** pode ser entendida do ponto de vista prático uma vez que se deseja que os sistemas estejam em contínua operação. A premissa **H2** é realizada inicialmente para evitar que a ocorrência do evento de falhas seja sucedida por um ciclo de eventos não observáveis, o que impediria que a detecção dessa falha fosse realizada. Essa hipótese será removida posteriormente, ao definirmos os chamados ciclos escondidos (BASILIO e LAFORTUNE, 2009). A premissa **H3** foi realizada apenas por questões de simplificação de análise. Em caso de existência de mais de um evento de falha, bastaria analisar a diagnosticabilidade do sistema para cada um desses eventos individualmente, isto é, considerar um deles como sendo de falha e os demais como eventos comuns não observáveis do sistema, e repetir o procedimento até que todo o conjunto que representa as falhas do sistema tenha sido verificado.

Seja  $L$  a linguagem gerada por um autômato e  $L_N \subseteq L$  a linguagem que representa o comportamento normal do sistema, ou seja, formada por todas as sequências de  $L$  sem eventos de falha. Note que  $L_N$  é necessariamente prefixo fechada e, utilizando essa definição, é possível então definir o que é uma linguagem diagnosticável.

**Definição 3.23.** (*Linguagem diagnosticável*) *Seja  $L$  a linguagem viva prefixo fechada gerada por um autômato  $G$  e seja  $L_N \subset L$  a linguagem prefixo fechada que representa o comportamento normal do sistema. Considere o conjunto de eventos  $\Sigma$  particionado da seguinte forma:  $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{uo}$ , sendo  $\Sigma_f \subseteq \Sigma_{uo}$  o conjunto de eventos de falha. Então  $L$  é diagnosticável com relação a  $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$  e  $\Sigma_f$ , se, e somente se,*

$$(\exists n \in \mathbb{N})(\forall s \in L \setminus L_N)(\forall st \in L \setminus L_N, \|t\| \geq n) \Rightarrow (\forall \omega \in P_o^{-1}(P_o(st)) \cap L, \omega \in L \setminus L_N), \quad (3.1)$$

em que  $\|\cdot\|$  denota o comprimento de uma sequência.

Conforme a definição acima,  $L$  é diagnosticável com relação a  $P_o$  e  $\Sigma_f$  se, e somente se, para todas as sequências  $st$  de comprimento arbitrariamente longo contendo o evento de falha, não existe qualquer sequência  $s' \in L_N$  tal que  $P_o(s') = P_o(st)$ .

**Definição 3.24.** (*Ciclo indeterminado*)

Um conjunto de estados incertos  $\{x_{d_1}, x_{d_2}, \dots, x_{d_p}\} \subseteq X_d$  forma um ciclo indeterminado se as seguintes condições forem satisfeitas:

1.  $\{x_{d_1}, x_{d_2}, \dots, x_{d_p}\}$  forma um ciclo em  $G_d$ ;
2.  $\exists(x_l^{k_l}, Y), (\tilde{x}_l^{r_l}, N) \in x_{d_l}$ , sendo  $x_l^{k_l}$  não necessariamente distinto de  $\tilde{x}_l^{r_l}$ ,  $l = 1, 2, \dots, p, k_l = 1, 2, \dots, m_l$ , e  $r_l = 1, 2, \dots, \tilde{m}_l$  de tal forma que os estados  $\{x_l^{k_l}\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, p, k_l = 1, 2, \dots, m_l$  e  $\{\tilde{x}_l^{r_l}\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, p, r_l = 1, 2, \dots, \tilde{m}_l$  podem ser rearrumados para formar ciclos em  $G$ .

Ao considerar a existência de ciclos escondidos, as hipóteses 1 e 2 podem ser relaxadas. Observe que os estados que formam um ciclo escondido podem ser certos, normais ou incertos. Ciclos indeterminados que não são escondidos serão referidos como ciclos observados indeterminados.

**Teorema 3.1.** *Suponha que a linguagem  $L$  seja diagnosticável com relação a projeção  $P_o$  e  $\Sigma_f$ . Então,  $L$  também será diagnosticável com relação a projeção  $P'_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma'_o, \Sigma'_o \subset \Sigma_o$  e  $\Sigma_f = \{\sigma\}$  se, e somente se, não houver nenhum ciclo indeterminado (escondido ou observado) no observador final.*

*Prova.* A prova é apresentada em SAMPATH *et al.* (1995). □

## 3.6 Autômato Diagnosticador de Falhas

Para realizar o diagnóstico de falhas por meio da observação do comportamento do sistema em tempo real e para verificar se a linguagem gerada por um autômato  $G$  é diagnosticável, deve-se utilizar um autômato determinístico chamado diagnosticador. Tal autômato, identificado como  $G_d = (X_d, \Sigma_o, f_d, \Gamma_d, x_{o_d})$ , é formado por um conjunto de eventos igual ao conjunto dos eventos observáveis de  $G$  e seus estados possuem rótulos para indicar a ocorrência ou não de um evento de falha. Neste sentido, são considerados dois rótulos distintos em sua construção:  $N$ , que indica a não ocorrência de eventos de falha, e  $F$ , que indica a ocorrência de  $\sigma_f$ .

O algoritmo para construção do autômato diagnosticador  $G_d$ , pode ser visto em CASSANDRAS e LAFORTUNE (2008), funciona da seguinte forma:

**Algoritmo 3.2.** (*Diagnosticador*)

1. Faça a composição  $G \parallel A_{label}$ , sendo  $G$  o autômato que modela o sistema e  $A_{label}$  o autômato que definirá os rótulos nos estados de  $G$ , vide figura 3.1;
2. Calcule  $G_d = Obs(G \parallel A_{label})$ .

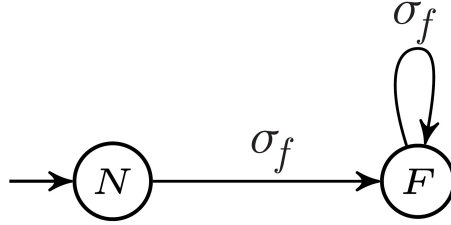


Figura 3.1: Autômato Rotulador de Estados:  $A_{label}$

Desta forma, quando  $G_d$  alcança um estado apenas com rótulos  $N$  tem-se a certeza de que a falha não ocorreu, caracterizando um estado *normal*. Por outro lado, se  $G_d$  alcança um estado apenas com rótulos  $F$  tem-se a certeza de que a falha ocorreu, o que caracteriza um estado *certo* ou *positivo*. Caso haja estados em  $G_d$  contendo um estado rotulado por  $N$  e ao mesmo tempo por  $F$ , tem um estado *incerto*, no qual não é possível ter-se a certeza da ocorrência da falha.

Note que uma vez que o diagnosticador alcance um estado *positivo*, todos os estados seguintes também serão *positivos*, entretanto, é possível para um diagnosticador mudar de um estado *normal* para outro *incerto* ou *certo*.

**Definição 3.25.** (*Estado normal, certo ou incerto*) Um estado  $x_d \in X_d$  é composto por estados da forma  $(x, l)$  em que  $x$  é o estado proveniente do autômato original e  $l$  representa seu rótulo, que pode ser  $N$ , de normal, ou  $F$ , de falha. O estado  $x_d$  é denominado *certo*, se  $l = F$  para todo  $(x, l) \in x_d$ , e *normal* se  $l = N$  para todo  $(x, l) \in x_d$ . Caso exista  $(x, l), (y, \tilde{l}) \in x_d$ ,  $x$  não necessariamente distinto de  $y$  tal que  $l = F$  e  $\tilde{l} = N$ , então  $x_d$  é um estado *incerto* de  $G_d$ .

**Observação 3.5.** Seja  $x_d$  um estado *incerto* de  $G_d$ , então, existem  $s_1 \in L \setminus L_N$  e  $s_2 \in L_N$  tais que  $P_o(s_1) = P_o(s_2) = \nu$  e  $f_d(x_{0_d}, \nu) = x_d$ . Ou seja, existe pelo menos uma sequência normal e pelo menos uma sequência de falha cujas projeções são idênticas e levam ao mesmo estado.

**Observação 3.6.** Seja  $x_d = f_d(x_{0_d}, \nu)$ . Se  $x_d$  é um estado *certo* de  $G_d$ , então  $\forall w \in (P_o^{-1}(\nu) \cap L)$ ,  $w \in L \setminus L_N$ .

Uma consequência das observações 3.5 e 3.6 é que a linguagem gerada por  $G$  será diagnosticável com relação a  $\Sigma_f$  e  $P_o$  se, e somente se, o diagnosticador  $G_d$  sempre alcançar um estado certo para toda sequência arbitrariamente longa de  $L$  que contém o evento de falha  $\sigma_f$ .

**Exemplo 3.3.** A figura 3.2(a) mostra um autômato genérico  $G$  em que há um evento não-observável  $\sigma_f$  de falha, além de eventos observáveis  $a, b, c$  e  $d$ . Na figura 3.2(b) encontra-se o autômato rotulador desta falha  $\sigma_f$ , entitulado  $A_l$ , cuja composição paralela  $G \parallel A_l$  fornece o resultado da figura 3.2(c), em que os estados onde há certeza de que a falha ocorreu estão rotulados com  $F$  e os não há ocorrência de falha foram rotulados por  $N$ . O resultado final é o diagnosticador representado na figura 3.2(d), que apresenta um caminho certo de falha até o estado  $4F$  e outro caminho no qual garante-se ausência de falha ao alcançar o estado  $7N$ .

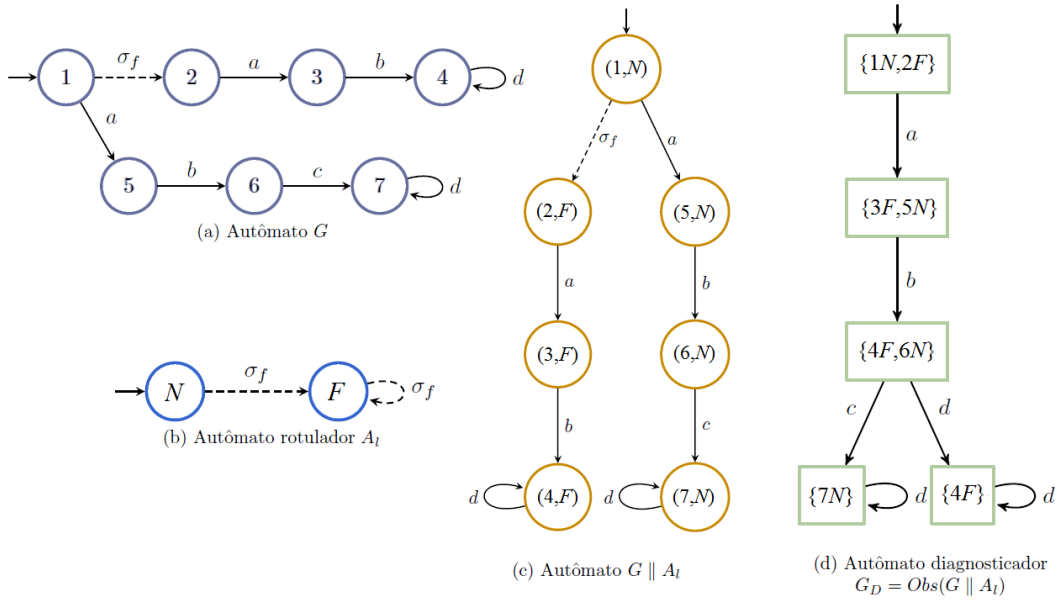


Figura 3.2: Exemplo da Construção de um Diagnosticador de Falhas

**Definição 3.26.** (Ciclos escondidos e ciclos escondidos indeterminados) Suponha que  $\times_d \in X_d$  tenha sido obtido agrupando-se os estados  $x_{d1}, x_{d2}, \dots, x_{dn} \in X_d$ . Então, existe um ciclo escondido em  $\times_d$  de  $G_d$  se para algum  $\{i_1, i_2, \dots, i_k\} \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $\{x_{di_1}, x_{di_2}, \dots, x_{di_k}\}$  forma um ciclo em  $G_d$ . Além disso, se  $\times_d$  é um estado incerto e todos os estados  $\{x_{di_1}, x_{di_2}, \dots, x_{di_k}\}$  são certos, então o ciclo escondido é denominado indeterminado.

Os ciclos escondidos serão representados nos diagramas de transição de estados por laços rotulados da seguinte forma:

- os ciclos escondidos indeterminados serão rotulados como "ihc" (do inglês "indeterminate hidden cycle") em estados onde não seja possível determinar se o sistema está ou não em falha.



- os ciclos escondidos em estados normais, ou em estados certos (de falha ou não), serão rotulados simplesmente como "hc" (do inglês "hidden cycle"). A existência de ciclos escondidos que não sejam indeterminados não incorre na perda de diagnosticabilidade da linguagem quando se tem apenas observação parcial dos eventos.

Com base nas definições de ciclo, de ciclo indeterminado, de ciclo escondido indeterminado e de linguagens diagnosticável, é possível então enunciar a condição necessária e suficiente para o diagnóstico de uma linguagem.

**Teorema 3.2.** *Após relaxar as hipóteses H1 e H2, considerando ainda que a hipótese H3 permaneça satisfeita, a linguagem gerada  $L$  por um autômato  $G$  será diagnosticável com relação a projeção  $P_o$  e ao conjunto de eventos de falha  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$  se, e somente se, o seu diagnosticador  $G_d$  não apresentar ciclos indeterminados, escondidos ou não.*

*Prova.* A prova é apresentada em (BASILIO *et al.*, 2010). □

Desta forma, a partir da obtenção do diagnosticador de um sistema, deve-se apenas verificar se formaram-se ciclos indeterminados, escondidos ("ihc") ou não. Na presença destes tipos de ciclos,  $L$  não será diagnosticável em relação a falha  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$  e  $P_o$ . Apenas no caso de não haver nenhum ciclo ou então apenas ciclos determinados ("hc") é que  $L$  será dita diagnosticável.

Entretanto, o diagnóstico de falhas tem uma característica inerente de que quanto maior for a quantidade de informações disponíveis com relação ao estado atual do sistema (registros de comportamentos do sistema capturados por sensores instalados no processo), maior será o número de falhas que podem ser detectadas.

Há então uma última possibilidade. Nos casos em que determina-se  $L$  como sendo não diagnosticável, em relação a falha  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$  e  $P_o$ , tornam-se interessantes métodos alternativos que façam com que falhas antes não diagnosticáveis possam ser diagnosticadas pela detecção de novas variáveis do processo. Neste sentido pode ser considerado então o conceito de gerador de eventos.

Um gerador de eventos exerce o papel de um sensor virtual introduzido no sistema, com intuito de fornecer informações extras. Trata-se da possível análise de outras variáveis do sistema cujo conhecimento prévio em paralelo com a verificação da diagnosticabilidade de  $L$  permite que um determinado conjunto de falhas  $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$  possa vir a ser diagnosticável.

Na prática, após realizar a composição paralela dos componentes do sistema, novos eventos/estados são criados para representar tais sensores novos, indicando novas situações possíveis de serem medidas.

Quando tal procedimento for necessário, tais eventos levarão o sistema para novos estados, criados especificamente para representar situações novas, representativas do real estado do sistema. Com isso, pode-se dizer que um conjunto de falhas não será diagnosticável apenas enquanto não for possível encontrar sensores que permitam a sua detecção, seja de forma direta ou indireta.

Pode-se então analisar o modelo desenvolvido no capítulo 2 para se avaliar o comportamento do sistema em tempo contínuo e, com base na teoria desenvolvida no capítulo 3, elaborar modelos em tempo discreto que representem o comportamento normal e o comportamento de falha da CaC, para que seja possível verificar a diagnosticabilidade individual de cada falha.

# Capítulo 4

## Modelo a Eventos Discretos do Sistema

Com base nos modelos matemáticos desenvolvidos e nos resultados obtidos por meio das simulações referentes ao funcionamento normal do sistema de resfriamento do empilhamento de CaC, ao final do capítulo 2, faz-se necessário então avaliar os comportamentos da CaC em casos de falha no sensor de temperatura, no ventilador e no controlador deste sistema de resfriamento.

### Considerações sobre o Controle de Refrigeração da Célula

Foram consideradas neste trabalho falhas no atuador do sistema de resfriamento que podem ser ocasionadas por agentes mecânicos que não permitam o correto funcionamento do mesmo (que prejudiquem a rotação das hélices) ou, até mesmo, no próprio sistema de ventilação (caso de mal funcionamento das peças do próprio ventilador). Foram simulados, então, os casos em que o ventilador operou com apenas 75% de sua eficiência, figura 4.1(a), 50% de sua eficiência, figura 4.1(b), e 25% de sua eficiência, figura 4.1(c).

Neste caso o controle envia um sinal indicando que o ventilador deve funcionar em sua velocidade máxima e este não é capaz de fazê-lo da forma correta, mas apenas parcialmente. A presente falha foi simulada considerando uma saturação no cálculo da rotação do ventilador. Ele recebe o valor de sinal necessário para rotação máxima, mas a vazão de ar de resfriamento produzido é limitado, ou seja, impede-se a rotação do ventilador na velocidade máxima.

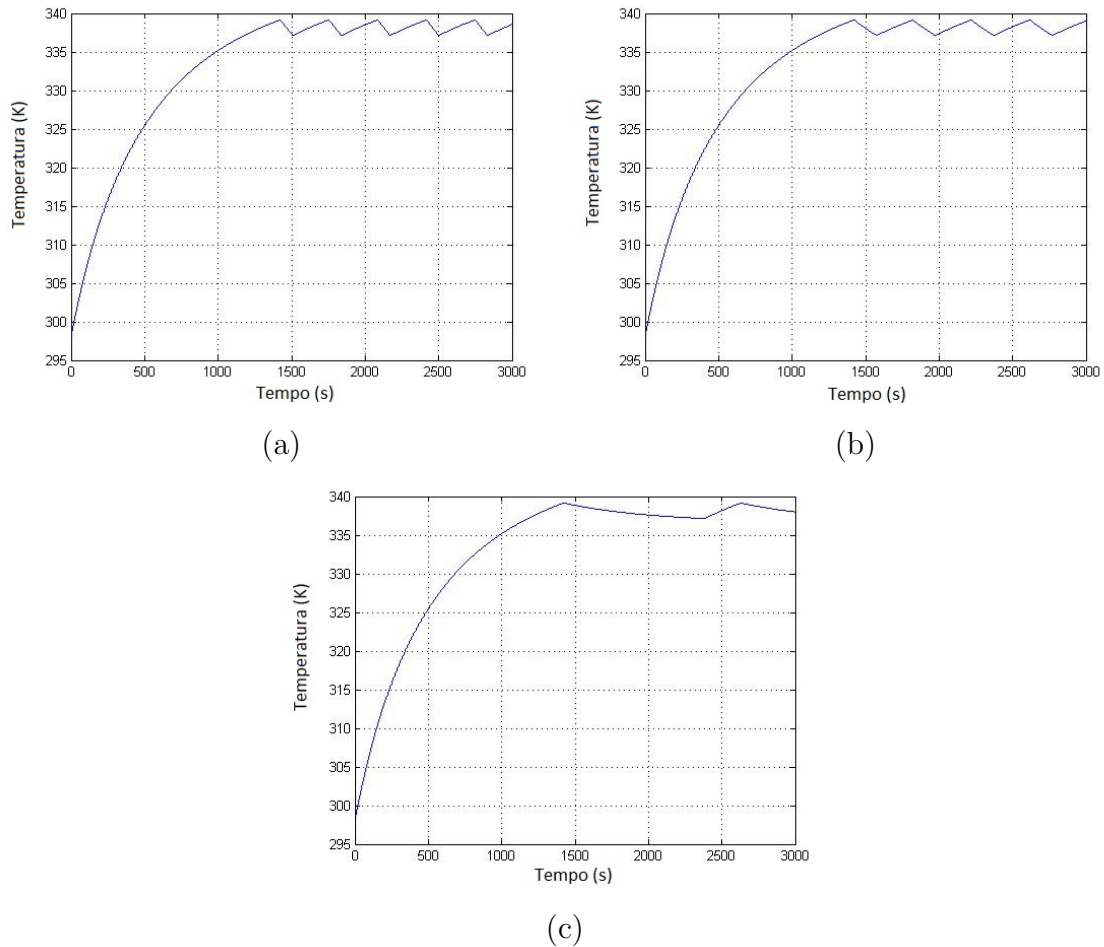


Figura 4.1: Gráfico Temperatura(K) x Tempo(s) com (a)75%, (b)50% e (c)25% de Eficiência do Ventilador

**Observação 4.1.** *Em paralelo, ao avaliar o efeito desta falha na tensão elétrica produzida pela CaC verificou-se, conforme indicado pela figura 4.2, que mesmo com apenas 25% de eficiência o ventilador ainda é capaz de resfriar a CaC e manter seu funcionamento.*

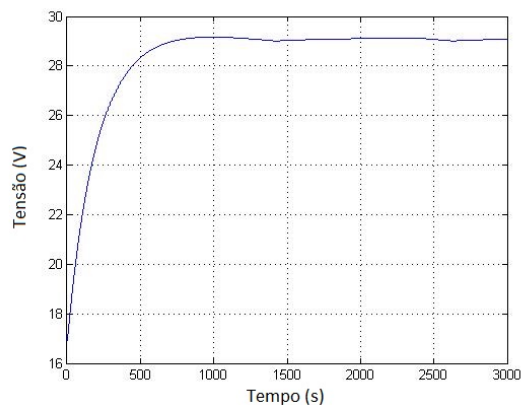


Figura 4.2: Gráfico Tensão(V) x Tempo(s) com 25% do Ventilador

*Observa-se que, como já foi visto antes na análise de temperatura, o controle desta foi capaz de manter a CaC em sua tensão elétrica ideal, manifestando apenas uma frequência de chaveamento do relé cada vez menor conforme perde-se o potencial de resfriamento.*

Com os resultados obtidos até o presente momento, representando os comportamentos em tempo contínuo do sistema, e de posse dos conceitos de sistemas a eventos discretos vistos no capítulo 3, é possível então desenvolver autômatos para representar o comportamento em tempo discreto dos componentes do sistema, para que depois seja possível analisar o comportamento geral da CaC em relação a determinadas falhas utilizando-se a técnica do diagnosticador vista também no capítulo 3.

Primeiramente são desenvolvidos modelos discretos para componentes mais simples, no caso: sensor de temperatura, controlador de temperatura e modelo combinado de temperatura da CaC com o estado do seu ventilador. Em seguida, faz-se a composição paralelo destes componentes para que seja possível avaliar o comportamento síncrono de todas as suas partes. Foram consideradas, além da falha parcial do ventilador, a falha total deste, a do controlador de temperatura e a do sensor de temperatura.

## 4.1 Modelo a Eventos Discretos do Sensor de Temperatura

O primeiro componente considerado foi um sensor de temperatura, modelado pelo autômato da figura 4.3. A partir do estado inicial  $S_0$ , o evento  $l_T$  indica a temperatura do sistema abaixo do limite inferior de controle, determinado como sendo  $337K$ , e leva o sistema para o estado  $S_1$ . Neste estado, apenas duas hipóteses foram consideradas: ou o sensor apresenta seu funcionamento correto ao emitir o sinal de temperatura baixa (identificado pelo evento  $lTs$ ) ou ocorre a falha do mesmo (representada pelo evento  $Se_f$ ), que leva o sistema para o estado  $S_f$  indicando que o sensor está em falha e não considera a possibilidade do mesmo ser consertado.

Analogamente, a partir do estado inicial  $S_0$ , o evento  $h_T$  indica a temperatura do sistema acima do limite superior de controle, determinado como sendo  $339K$ , e leva o sistema para o estado  $S_2$ . Neste estado, apenas duas hipóteses foram consideradas: ou o sensor apresenta seu funcionamento correto ao emitir o sinal de temperatura alta (identificado pelo evento  $hTs$ ) ou ocorre a falha do mesmo (representada pelo evento  $Se_f$ ), que também leva o sistema para o estado de falha  $S_f$ .

Foram inseridos autolaços nos estados  $S_0$  e  $S_f$  com os eventos dos outros autômatos de componentes que foram modelados, no caso, do controlador de temperatura ou da dinâmica de resfriamento. Tal procedimento serve para modelar

que após um evento  $lT$  ou  $hT$ , apenas os eventos  $lTs$ ,  $hTs$  ou  $Sef$  podem ocorrer quando for feita a composição paralela dos autômatos do controlador, sensor e da planta de evolução da temperatura com o ventilador. Assim, é inibida qualquer ocorrência dos eventos de outros componentes após a ocorrência dos eventos  $lT$  ou  $hT$ , representando que a emissão de  $hTs$ ,  $lTs$  ou  $Sef$  ocorre imediatamente após a medição do sensor.

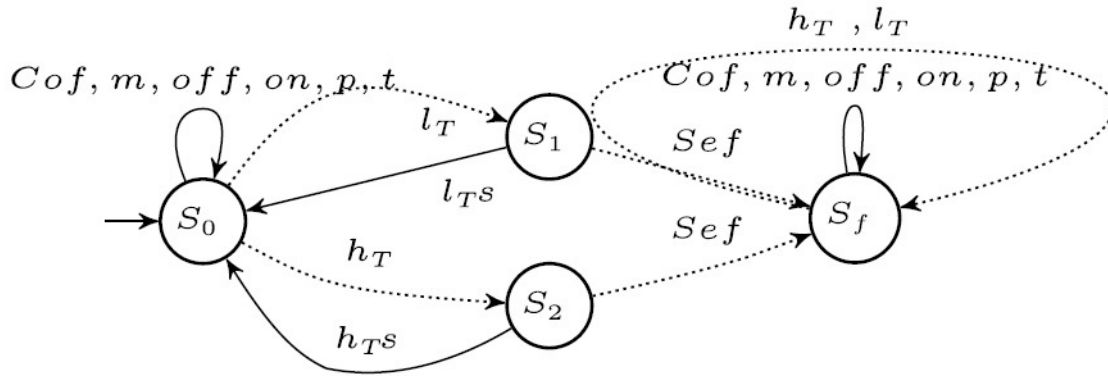


Figura 4.3: Autômato para o Sensor de Temperatura

Todos os desenhos relacionados com sistemas a eventos discretos apresentados na presente dissertação foram desenvolvidos por meio da ferramenta DESLAB (CLAVIJO *et al.*, 2012). Construído este modelo para um sensor de temperatura, o próximo passo deve ser a configuração do controlador que deverá atuar em conjunto com este sensor.

## 4.2 Modelo a Eventos Discretos do Controlador de Temperatura

O segundo componente considerado foi o controlador de temperatura, conforme modelado pelo autômato da figura 4.4. A partir do estado inicial  $C_0$ , o evento  $hTs$ , gerado pelo sensor explicado anteriormente, indica um sinal emitido pelo sensor quando a temperatura do sistema atinge o limite superior de  $339K$ , e que leva o sistema para o estado  $C_1$ . Neste estado, apenas duas hipóteses foram consideradas: ou o controlador apresenta seu funcionamento correto ao emitir o sinal para ligar o ventilador responsável por resfriar a CaC (identificado pelo evento  $on$ ) ou ocorre a falha do mesmo (representada pelo evento  $Cof$ ), que leva o sistema para o estado  $C_f$ , indicando que o controlador está em falha e não considerando a possibilidade do mesmo ser reparado.

Por outro lado, o evento  $lTs$ , emitido pelo sensor quando este indica que a temperatura do sistema atingiu valores abaixo do limite inferior estipulado como  $337K$ ,

leva o autômato do controlador para seu estado  $C_2$ , a partir do qual deverá ocorrer o evento *off* para comandar o desligamento do sistema de refrigeração (ventilador), a menos que o controlador sofra uma falha e o sistema apresente o evento *Cof* para levar o autômato até o estado de falha,  $C_f$ .

Neste caso também foram inseridos autolaços, agora nos estados  $C_0$  e  $C_f$ , com os eventos dos outros autômatos de componentes do sistema. Tal procedimento serve aqui para o mesmo propósito: após um evento *lTs* ou *hTs* recebido pelo sensor de temperatura, apenas os eventos *on*, *off* ou *Cof* podem ocorrer quando for feita a composição paralela dos autômatos dos componentes do sistema. Desta forma, aqui também é inibida qualquer ocorrência dos eventos de outros componentes após a ocorrência dos eventos iniciais do controlador, no caso, *lTs* ou *hTs*, ou seja, a emissão de *on*, *off* ou *Cof* deve ocorrer imediatamente depois da recepção do sinal de temperatura por parte do sensor.

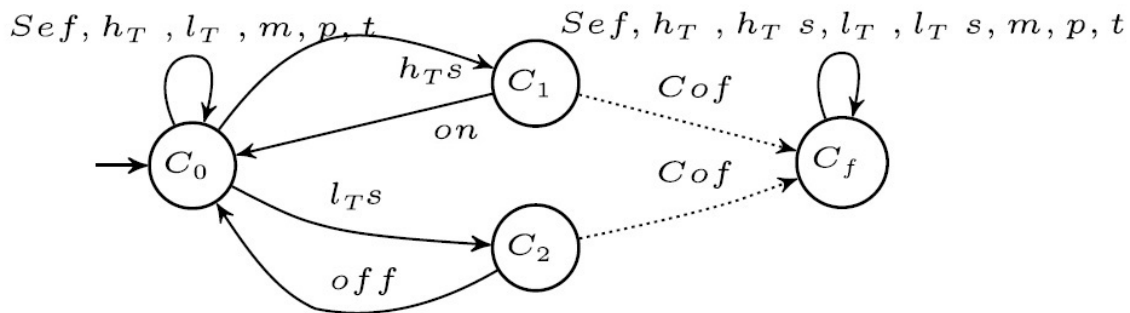


Figura 4.4: Autômato para o Controlador de Temperatura

Para se ter uma ideia completa do sistema, falta ainda construir um autômato que represente a evolução da temperatura da CaC e, ao mesmo tempo, o estado de operação do ventilador.

### 4.3 Modelo a Eventos Discretos da Planta com Atuador

Por fim, resta apenas o terceiro autômato desenvolvido, que está representado na figura 4.5 e ilustra o comportamento de temperatura da CaC associado ao estado de operação do ventilador utilizado na refrigeração da CaC.

Cada estado está nomeado no formato  $T_iV_j$ . O índice  $i$  pode assumir os valores:  $h$  (temperatura acima do limite superior de temperatura,  $339K$ ),  $l$  (temperatura abaixo do limite inferior de temperatura,  $337K$ ) ou  $m$  (temperatura entre os limites estipulados para correta operação  $337K$  e  $339K$ ). Já o índice  $j$  pode assumir os valores:  $l$  (ventilador ligado e com funcionamento normal),  $d$  (ventilador deligado,

mas com funcionamento tido como normal),  $p$  (ventilador ligado com falha parcial, ou seja, com menos do que 100% de sua eficiência de rotação),  $dp$  (ventilador desligado, mas com falha parcial na sua rotação) ou  $t$  (ventilador com falha total de funcionamento, ou seja, mesmo que receba sinal para ligar o mesmo não mais será capaz).

Além da descrição dos estados, para concluir o entendimento da dinâmica de resfriamento foram criados também os eventos  $m$  (temperatura em evolução entrando na faixa de controle, entre  $337K$  e  $339K$ ),  $p$  (instante em que ocorre a falha parcial do ventilador e o mesmo perde apenas parte da sua eficiência de rotação, possível apenas após o mesmo estar ligado) e  $t$  (perda total do ventilador, quando este não será capaz de ligar mesmo recebendo comando para isso).

Com isso, tem-se o comportamento normal e de falha na dinâmica de temperatura da CaC junto da descrição do estado em que se encontra o ventilador. Com os componentes do sistema modelados, resta agora realizar a composição paralela dos três para obter-se o comportamento síncrono desses componentes e, com isso, obter a representação completa do comportamento deste sistema.



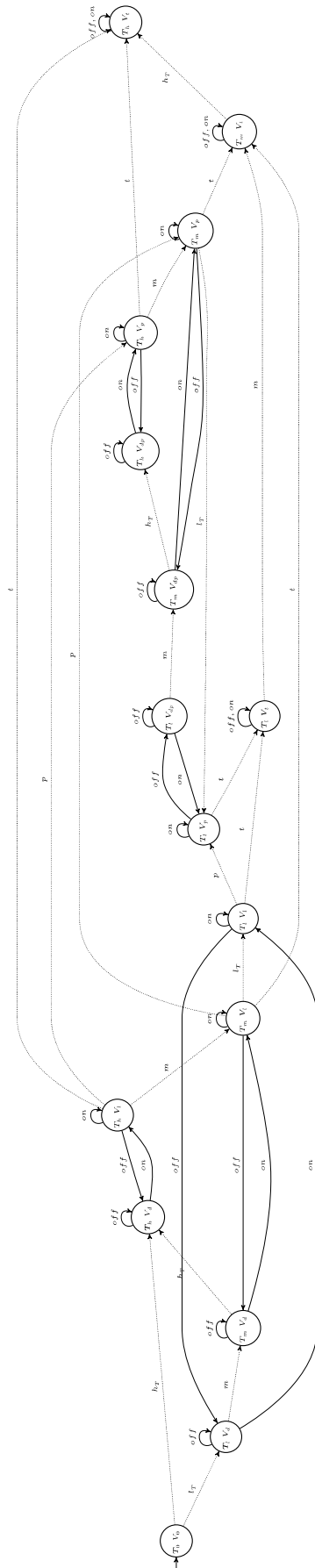


Figura 4.5: Autômato da Planta e do Atuador

Para uma melhor visualização, tem-se a figura 4.6, recorte da figura 4.5, que representa apenas o funcionamento normal da planta com o atuador.

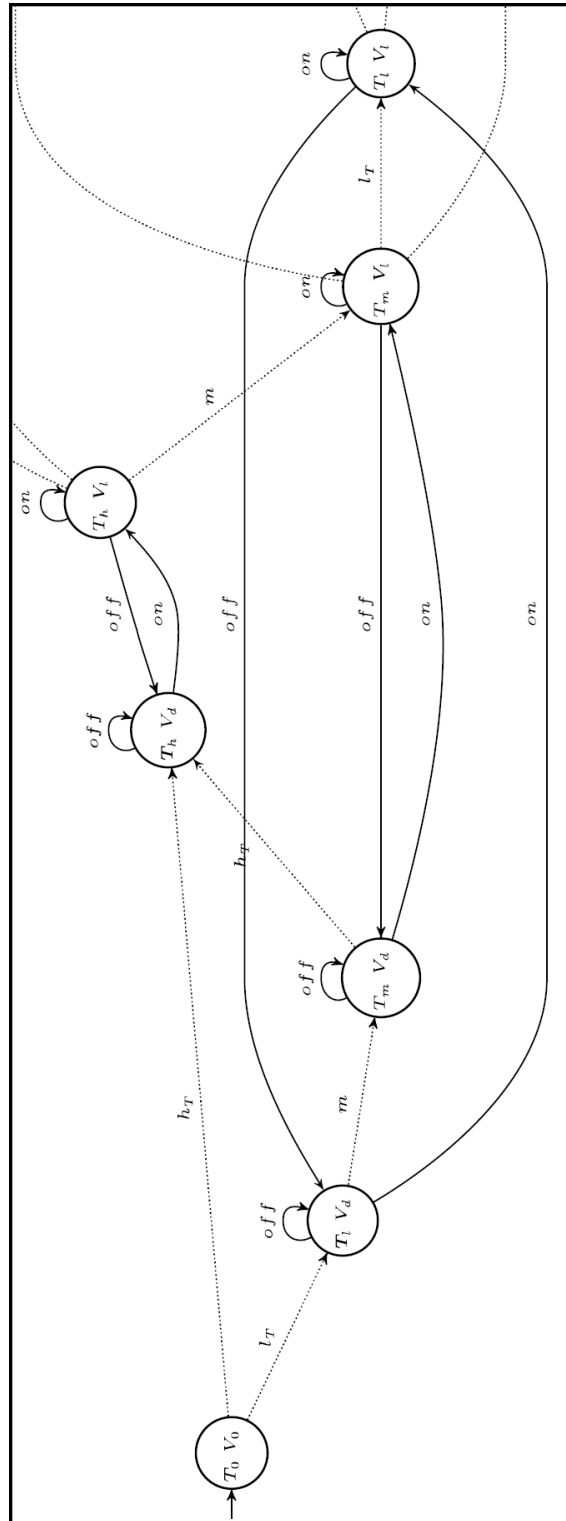


Figura 4.6: Parte Normal do Autômato da Planta e do Atuador

## 4.4 Composição Paralela dos Componentes do Sistema

Definidos os três autômatos que representam o comportamento básico dos subsistemas que compõem o sistema de refrigeração da CaC, foi possível então realizar a composição paralela entre sensor de temperatura, controlador de temperatura e planta com atuador. O resultado obtido indica de forma síncrona como estão evoluindo os três subsistemas para cada instante de tempo.

Pela dificuldade encontrada para visualizar o diagrama de transição de estados do autômato que determina o comportamento completo do sistema, foi realizada uma renomeação dos seus estados utilizando números, tornando a visualização do autômato mais inteligível, conforme a figura 4.7, em que a renomeação segue a tabela 4.1. Nesta tabela, o primeiro termo está relacionado com o estado do sensor e o segundo termo com o estado do controlador, em que esta informação encontra-se entre parênteses porque representa a primeira composição paralela realizada. O resultado disto passou então por outra composição, agora com o autômato da planta com atuador, dando origem ao terceiro termo de cada estado.

Tabela 4.1: Mapa de Estados Renomeados

<i>Original</i>	<i>Novo</i>	<i>Original</i>	<i>Novo</i>	<i>Original</i>	<i>Novo</i>
$((S_0, C_2), T_l V_l)$	0	$((S_f, C_0), T_l V_d)$	1	$((S_0, C_0), T_0 V_0)$	3
$((S_0, C_f), T_l V_p)$	4	$((S_0, C_f), T_l V_l)$	5	$((S_0, C_f), T_h V_d)$	6
$((S_0, C_0), T_l V_d)$	7	$((S_2, C_0), T_h V_{dp})$	8	$((S_2, C_0), T_h V_t)$	9
$((S_0, C_0), T_m V_d)$	10	$((S_0, C_f), T_l V_d)$	11	$((S_0, C_0), T_h V_l)$	12
$((S_0, C_0), T_l V_{dp})$	13	$((S_0, C_1), T_h V_{dp})$	14	$((S_0, C_0), T_h V_p)$	15
$((S_1, C_0), T_l V_p)$	16	$((S_0, C_0), T_m V_l)$	17	$((S_0, C_0), T_h V_t)$	18
$((S_f, C_0), T_h V_t)$	19	$((S_0, C_1), T_h V_t)$	20	$((S_0, C_0), T_m V_{dp})$	21
$((S_2, C_0), T_h V_d)$	22	$((S_0, C_f), T_h V_{dp})$	23	$((S_0, C_2), T_l V_p)$	24
$((S_1, C_0), T_l V_l)$	25	$((S_f, C_0), T_l V_p)$	26	$((S_0, C_0), T_m V_p)$	27
$((S_0, C_f), T_h V_t)$	28	$((S_f, C_0), T_l V_l)$	29	$((S_f, C_0), T_h V_{dp})$	30
$((S_0, C_0), T_m V_t)$	31	$((S_1, C_0), T_l V_d)$	32	$((S_f, C_0), T_h V_d)$	33
$((S_0, C_1), T_h V_d)$	34	$((S_0, C_2), T_l V_d)$	35	$((S_f, C_0), T_m V_d)$	36
$((S_0, C_f), T_m V_d)$	37	$((S_2, C_f), T_h V_d)$	38	$((S_f, C_f), T_h V_d)$	39
$((S_f, C_0), T_l V_t)$	40	$((S_f, C_0), T_m V_t)$	41	$((S_0, C_f), T_l V_t)$	42
$((S_0, C_f), T_m V_t)$	43	$((S_2, C_f), T_h V_t)$	44	$((S_f, C_f), T_h V_t)$	45

Com isso cada número representa respectivamente os estados em que se encontram o sensor, o controlador, a temperatura da CaC e o ventilador. Assim, torna-se

possível identificar quais as consequências de um evento em qualquer um dos três subsistemas nos outros dois.

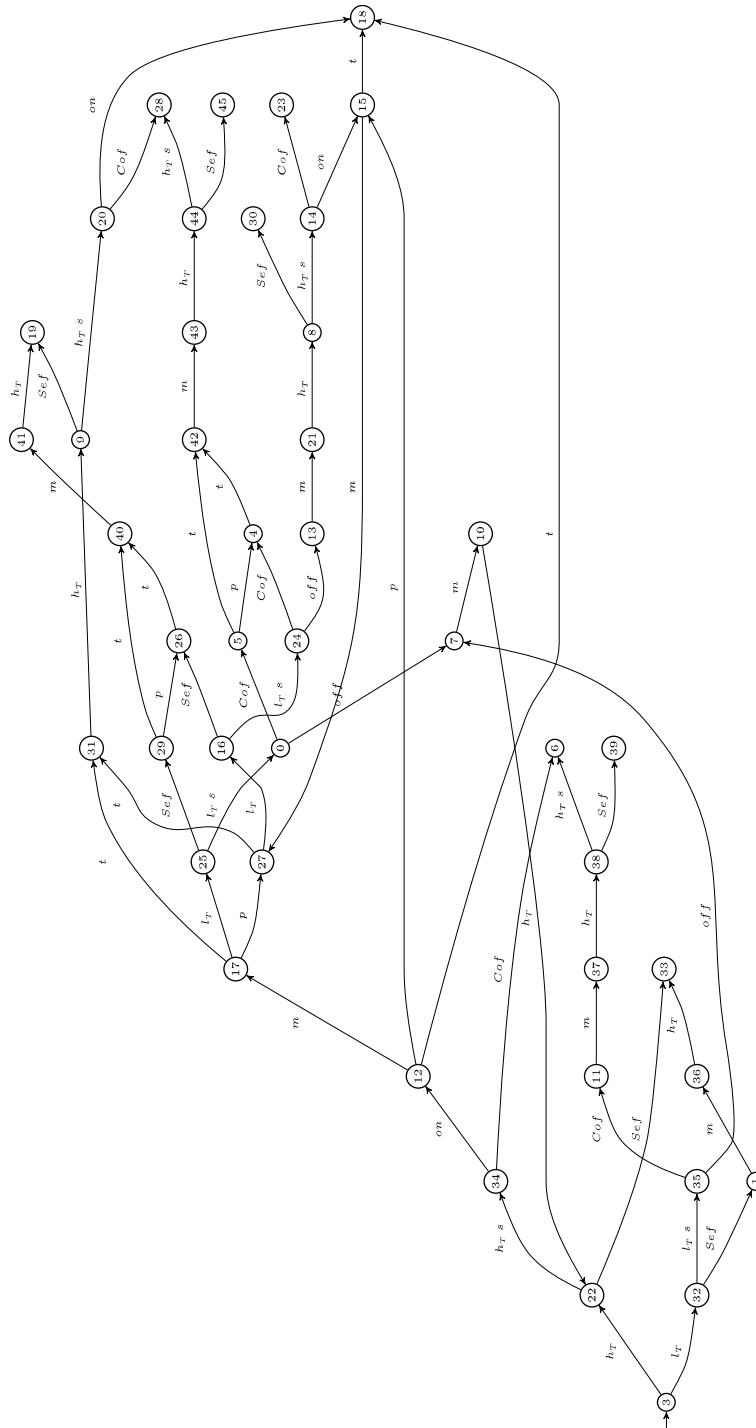


Figura 4.7: Composição Paralelo Renomeada do Sistema

De posse do comportamento do sistema completo, normal e de falha, pode-se então prosseguir para uma análise da diagnosticabilidade de suas falhas, com base nos conceitos vistos no capítulo 3.

## Capítulo 5

# Análise da Diagnosticabilidade das Falhas no Sistema de Resfriamento das Células a Combustível

Para todas as falhas estudadas na presente dissertação, a teoria de Sistemas a Eventos Discretos diz que o correto seria tornar a linguagem do autômato viva antes de se obter o diagnosticador. Tal ação não foi representada no autômato que representa o comportamento completo da CaC, figura 4.7, mas foi considerada na obtenção dos diagnosticadores finais de cada falha por meio da inclusão de autolaços em estados de bloqueio com um evento  $n$ , que não representa nenhuma ocorrência em particular, apenas permite a utilização da teoria de diagnóstico de falhas.

Nos quatro casos de falha considerados, foi utilizada a técnica do gerador de eventos para criar algum tipo de medição nova com objetivo de tentar tornar cada falha diagnosticável por meio de seu uso em paralelo com o autômato rotulado inicial que foi obtido. Todas as situações tiveram em comum o fato de que em algum ponto seria coerente criar o evento  $l_V$  para indicar a queda de tensão acima de 1 *Volt* provocada pelo resfriamento da CaC além do necessário ou, no pior caso, quando há um aquecimento excessivo da mesma, o que provocará em ambos os casos uma queda na tensão, conforme vislumbrado pelos resultados obtidos na figura 2.19.

### 5.1 Análise da Falha no Sensor de Temperatura

De posse do comportamento síncrono do sistema, utilizou-se então um rotulador de falha no sensor, representado pela figura 5.1. Este, depois da composição paralela com o autômato do sistema, fornece a figura 5.2, que marca com  $F$  os estados onde a falha do sensor já terá ocorrido, evento  $Se_f$ . Desta forma, é possível obter-se o diagnosticador da falha no sensor, cujo resultado encontra-se ilustrado na figura 5.4

e onde a presença de ciclos indeterminados determina que essa falha não é diagnosticável.

Vê-se pela figura 5.4 que a própria sequência nula, representada pelo estado inicial do diagnosticador, já leva o sistema para um ponto com ciclo escondido indeterminado "ihc", formado pelos estados  $((S_f; C_0); T_i V_d)$ ,  $((S_f; C_0); T_h V_d)$  e  $((S_f; C_0); T_m V_d)$  de falha no sensor, mas formado também pelos estados  $((S_2; C_0); T_h V_d)$ ,  $((S_0; C_0); T_0 V_0)$  e  $((S_1; C_0); T_i V_d)$  de funcionamento normal do mesmo. Além deste caso, as seguintes sequências observáveis também levam o sistema para o mesmo tipo de cenário indeterminado acerca da ocorrência ou não desta falha, tornando-a não diagnosticável:

- $lTs$ ;
- $lTs \rightarrow off$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off$ .

Analisando uma falha no sensor de temperatura tem-se que a mesma impedirá o correto funcionamento do controlador uma vez que o sensor não será mais capaz de emitir os sinais que indicam temperatura alta ( $hTs$ ) ou temperatura baixa ( $lTs$ ).

Sem ter como receber os sinais  $lTs$  e  $hTs$ , a partir do instante em que ocorrer uma falha no sensor o controlador jamais irá receber novamente os sinais que requer para emitir os comandos para ligar ou desligar o ventilador, fazendo com que a CaC sofra os efeitos que requerem o novo evento  $l_V$ .

Um exemplo em que isso ocorre é o estado  $(33, F)$ . No caminho para tal estado, há uma falha do sensor seguida por um evento não observável  $hT$ , indicando que a temperatura da CaC está acima do limite superior de controle. Como não é mais possível contar com o sensor neste caminho, tem-se que não há mais como ser emitido um sinal  $hTs$ , que permitiria ao controlador ligar o ventilador, ou seja, ocorrerá um super aquecimento da CaC.

O resultado dessa nova consideração é ilustrado pela figura 5.6, que nada mais é do que o resultado apresentado na figura 5.2 complementado com os conceitos de geradores de eventos. O diagnosticador deste novo autômato resulta na figura 5.8, através da qual vê-se que agora não há mais ciclos indeterminados e, portanto, a falha é agora diagnosticável.

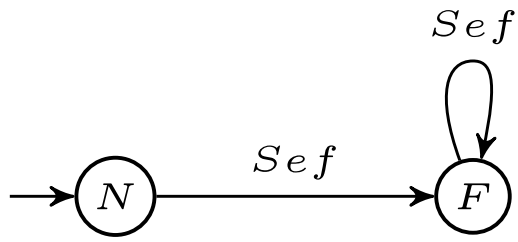


Figura 5.1: Autômato Rotulador de Falha no Sensor





Para melhor visualização tem-se a figura 5.3, que mostra apenas parte do autômato da figura 5.2.

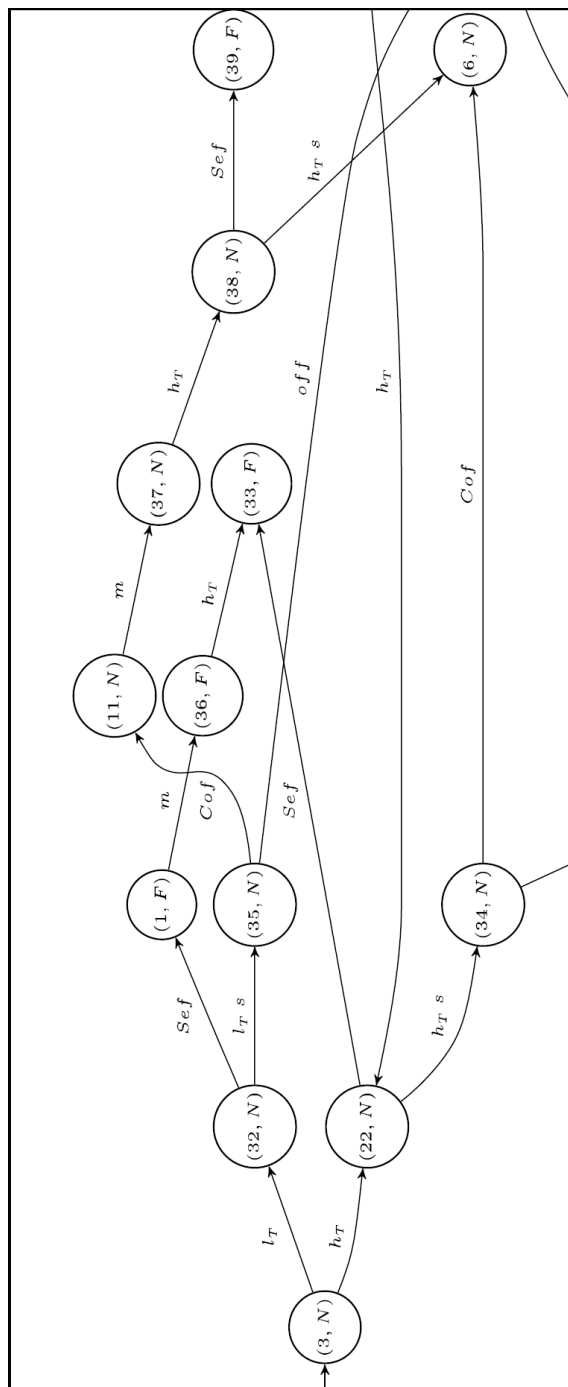


Figura 5.3: Parte do Autômato da Figura 5.2

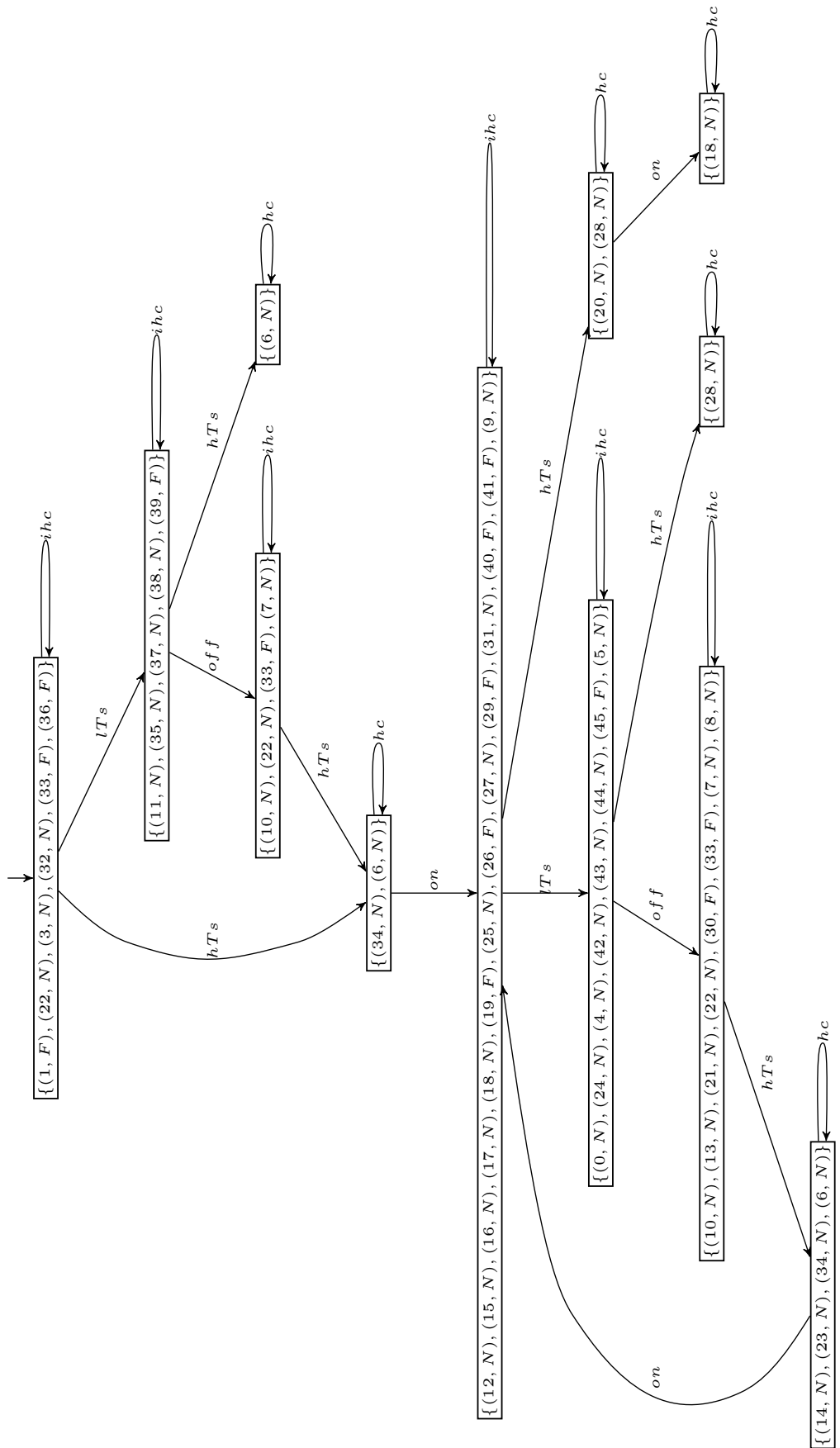


Figura 5.4: Diagnosticador para Falha no Sensor

Novamente, para melhor visualização, tem-se a figura 5.5, que mostra apenas parte do diagnosticador da figura 5.4, dando destaque para os ciclos escondidos indeterminados.

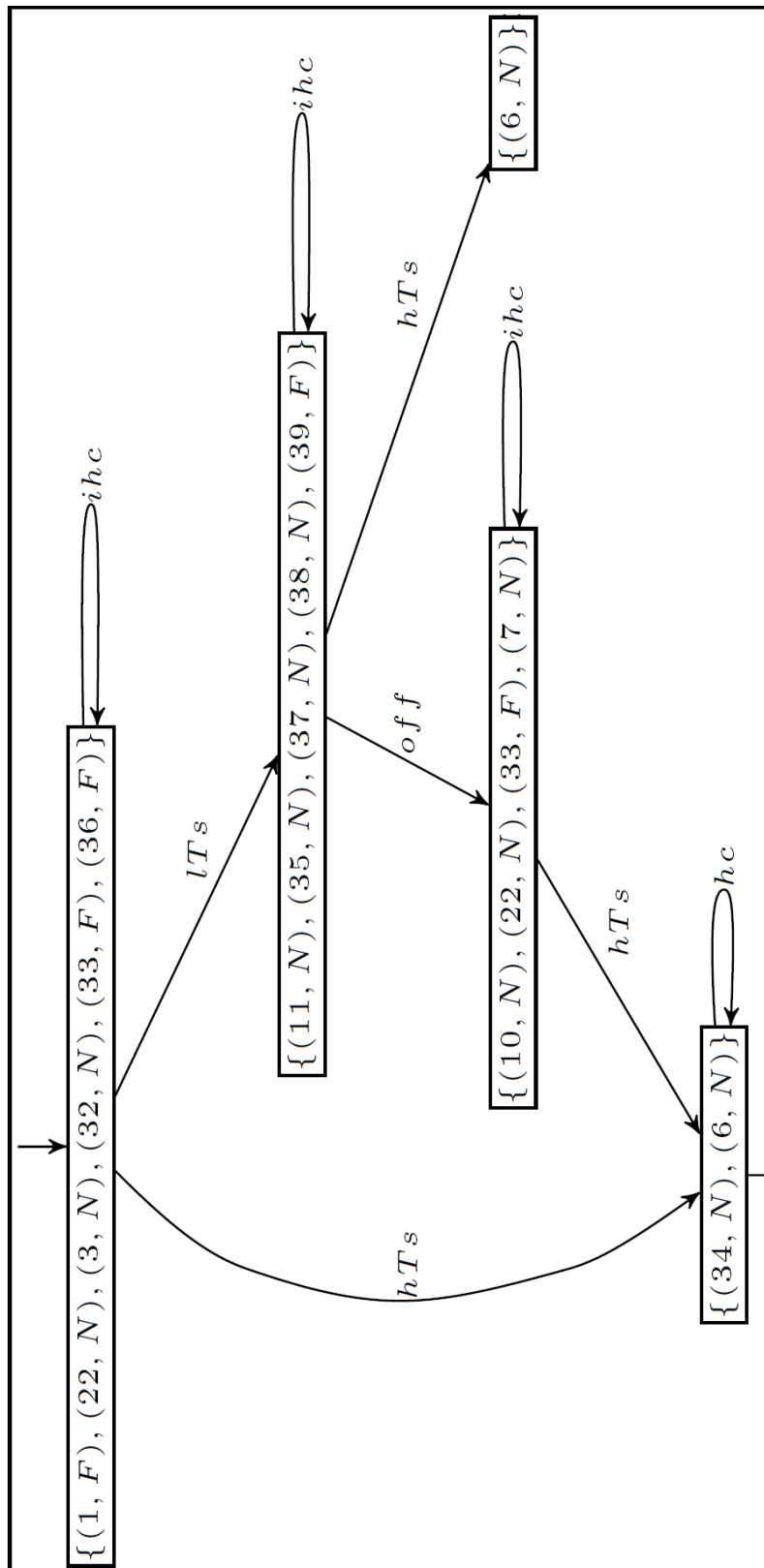


Figura 5.5: Parte do Autômato da Figura 5.4



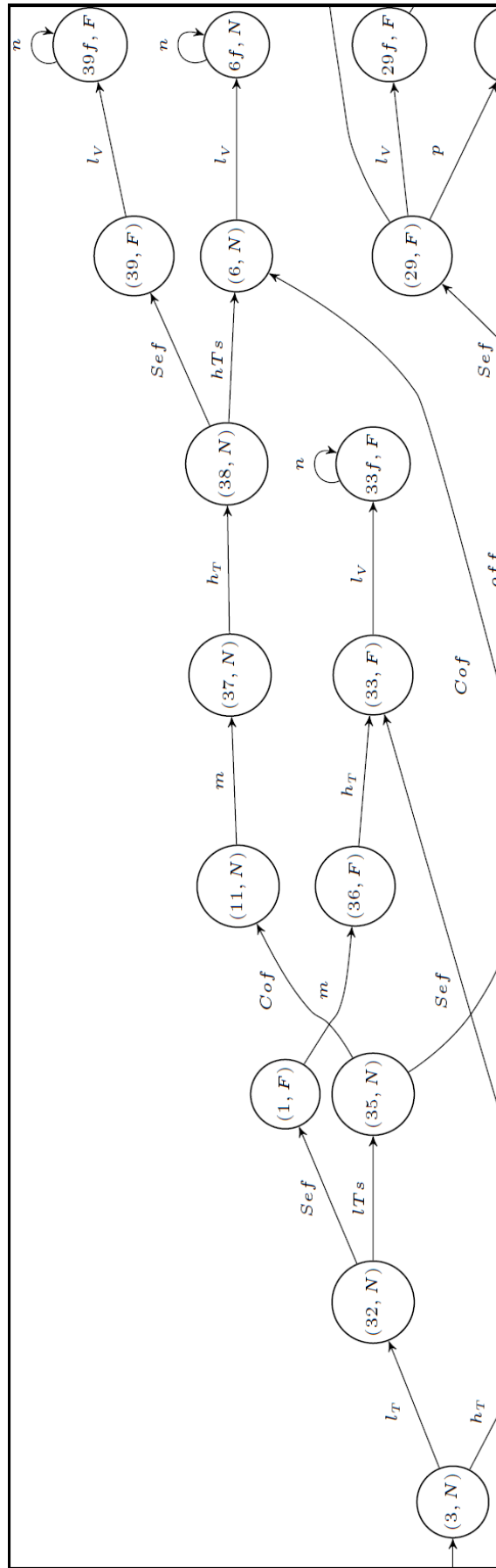


Figura 5.7: Parte do Autômato da Figura 5.6

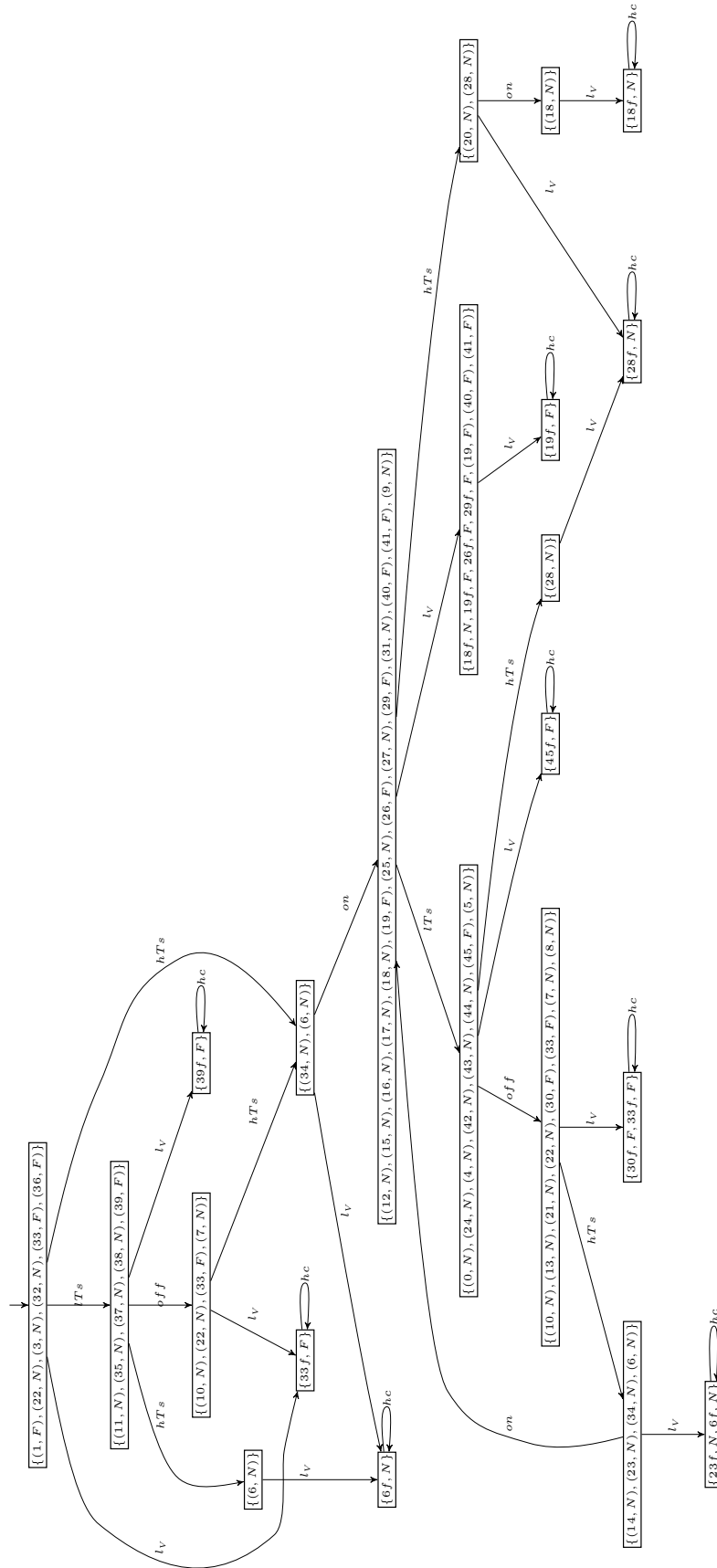


Figura 5.8: Diagnosticador da Falha no Sensor Após Introdução do Evento Observável  $l_v$

## 5.2 Análise da Falha no Controlador de Temperatura

Em seguida, utilizou-se então um rotulador de falha no controlador, representado pela figura 5.9. A composição paralela deste rotulador com o autômato do sistema completo fornece o autômato apresentado na figura 5.10, marcando com  $F$  os estados em que a falha do controlador já terá ocorrido. Com isso, pode-se obter um diagnosticador para este caso de forma análoga ao que foi feito com o sensor, mas que representará, neste caso, o diagnóstico da falha no controlador.

O diagnosticador da falha no controlador pode ser então ser ilustrado pela figura 5.12, por onde verifica-se que novamente podem ser identificados ciclos indeterminados, indicando que tal falha, em uma primeira análise, não é diagnosticável.

Portanto, há neste caso uma série de sequências observáveis que levam o sistema para ciclos indeterminados tornando tal falha não diagnosticável. Se for observado apenas o evento  $lTs$ , por exemplo, o sistema poderá estar nos estados  $((S_0; C_f); T_lV_d)$ ,  $((S_0; C_f); T_mV_d)$ ,  $((S_2; C_f); T_hV_d)$  ou  $((S_f; C_f); T_hV_d)$  com falha no controlador, ou então o sistema poderá até mesmo estar no estado  $((S_0; C_2); T_lV_d)$ , de funcionamento normal. É formado um ciclo indeterminado neste caso porque o estado  $((S_f; C_f); T_hV_d)$  requer um autolaço para tornar a linguagem viva, sendo este o mesmo fator que torna as seguintes sequências observáveis não diagnosticáveis:

- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs$ ;
- $hTs$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off \rightarrow hTs$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off \rightarrow hTs$ .

Neste caso, antes mesmo de se observar uma falha na tensão pelo evento  $l_V$ , o tempo de resposta  $t_c$  do controlador indicará que algo de errado ocorreu. Com base no seu funcionamento normal, assim que o controlador receber um primeiro sinal  $lTs$  ou  $hTs$ , o mesmo terá como registrar o tempo  $t_c$  até que seja emitido um sinal de  $on$  ou  $off$ , que deveria ser praticamente imediato. Desta forma, caso este registro de tempo  $t_c$  seja ultrapassado sem a emissão de ordem para ligar ou desligar o ventilador, tem-se que ocorreu um problema.

O resultado dessa nova consideração está ilustrado pela figura 5.14, cujo diagnosticador resulta na figura 5.16. Pelo novo diagnosticador vê-se que agora não há

ciclos incertos, tornando essa falha diagnosticável. Com isso, sequências que apresentam o evento  $t_c$  são aquelas que levaram o controlador para sua falha em relação ao tempo de resposta do mesmo.

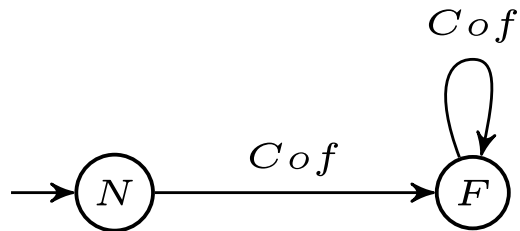


Figura 5.9: Autômato Rotulador de Falha no Controlador



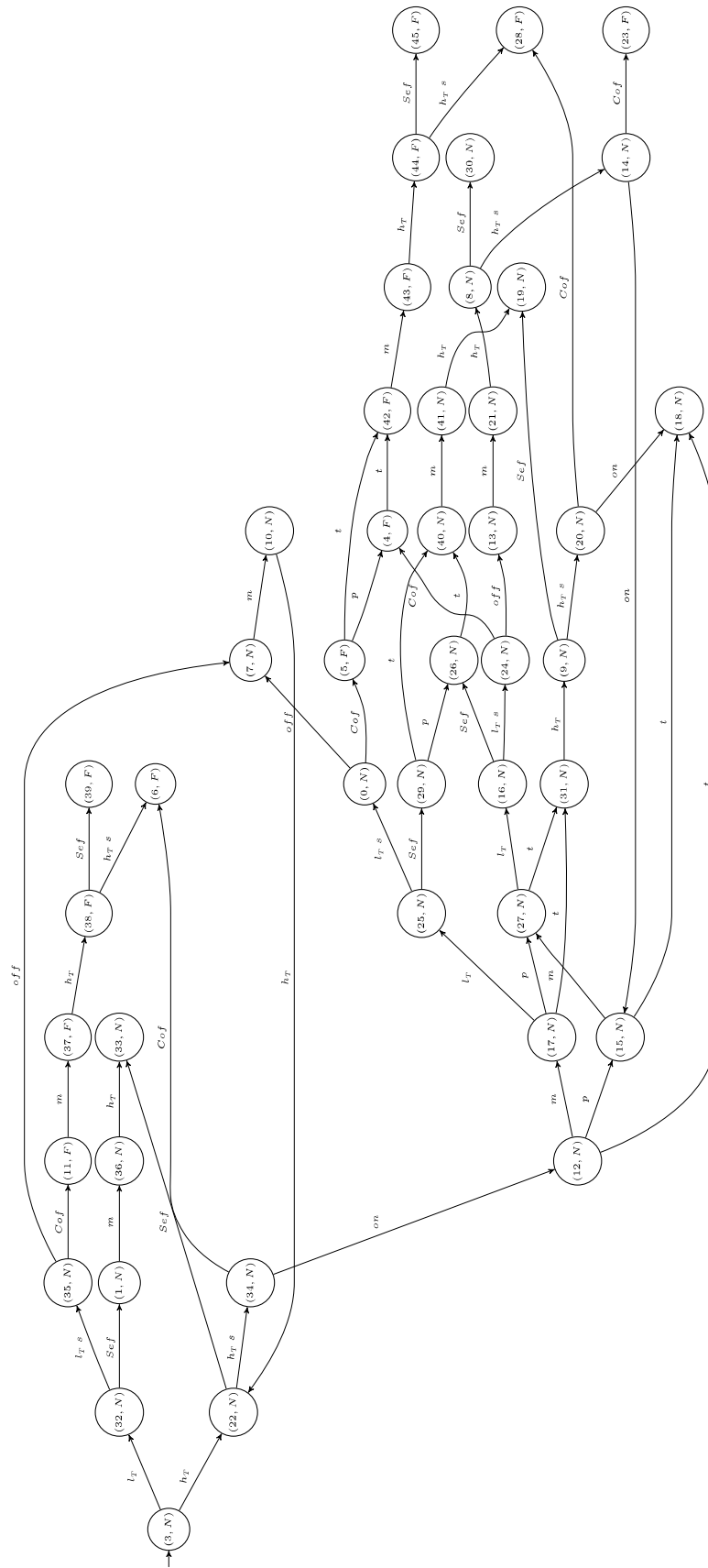


Figura 5.10: Composição Paralela entre o Autômato que Modela o Sistema Apresentado na Figura 4.7 com o Autômato Rotulador da Figura 5.9

Por meio da figura 5.11, pode-se focar em um ponto da figura 5.10 que mostre a falha do controlador.

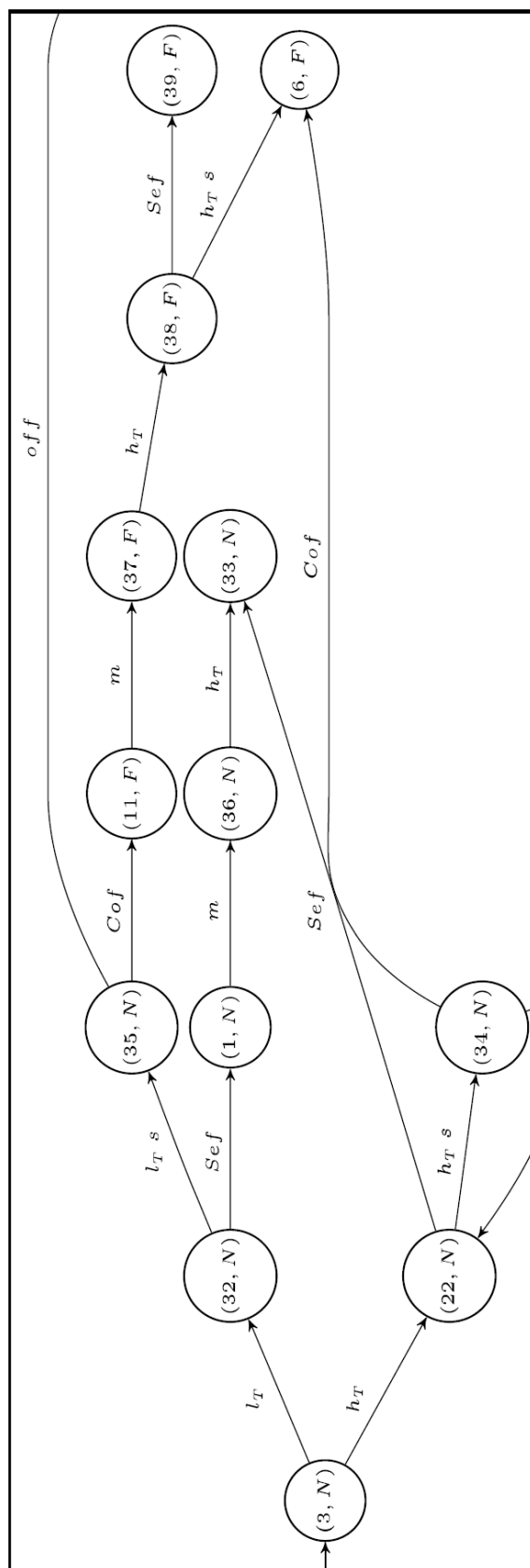


Figura 5.11: Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.10

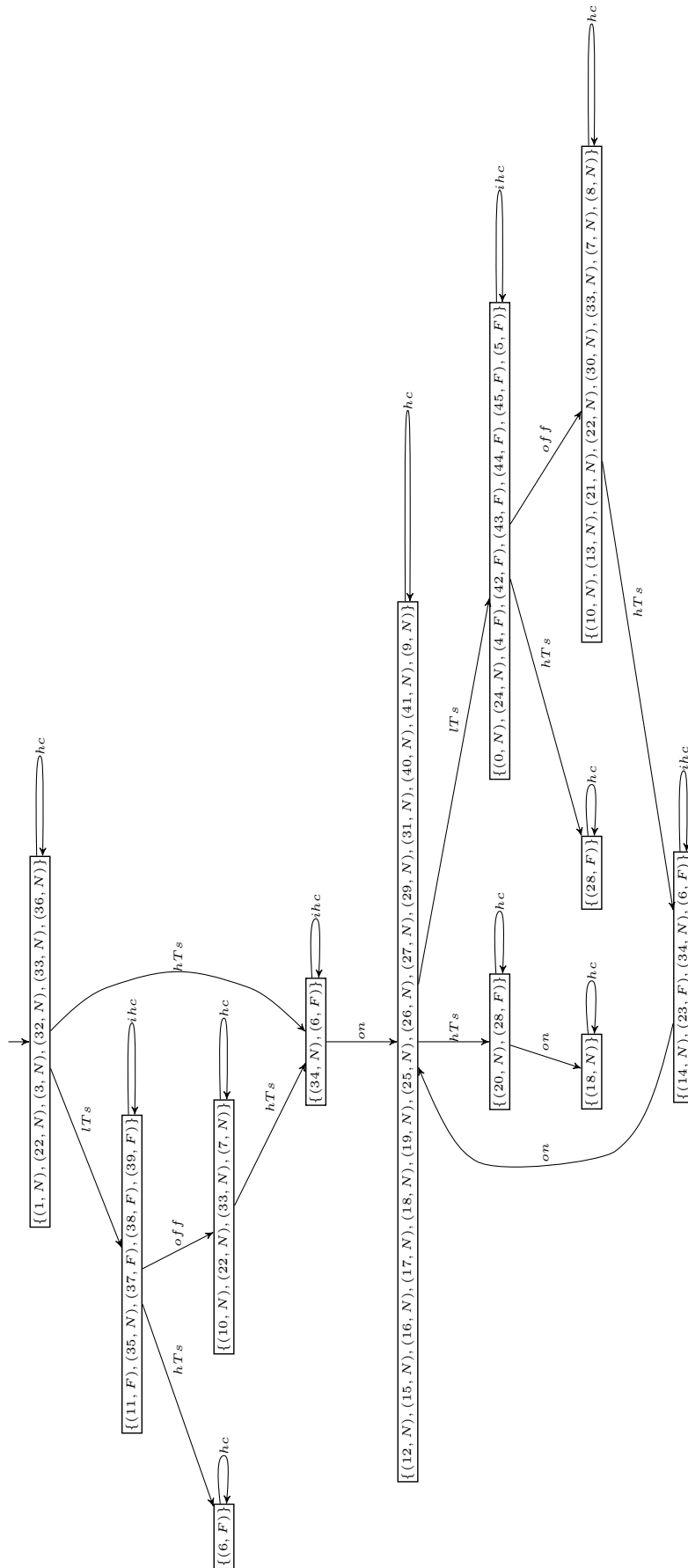


Figura 5.12: Diagnosticador para Falha no Controlador

Agora tem-se então, por meio da figura 5.13, o foco em um ponto da figura 5.12 mostrando a presença dos ciclos escondidos indeterminados.

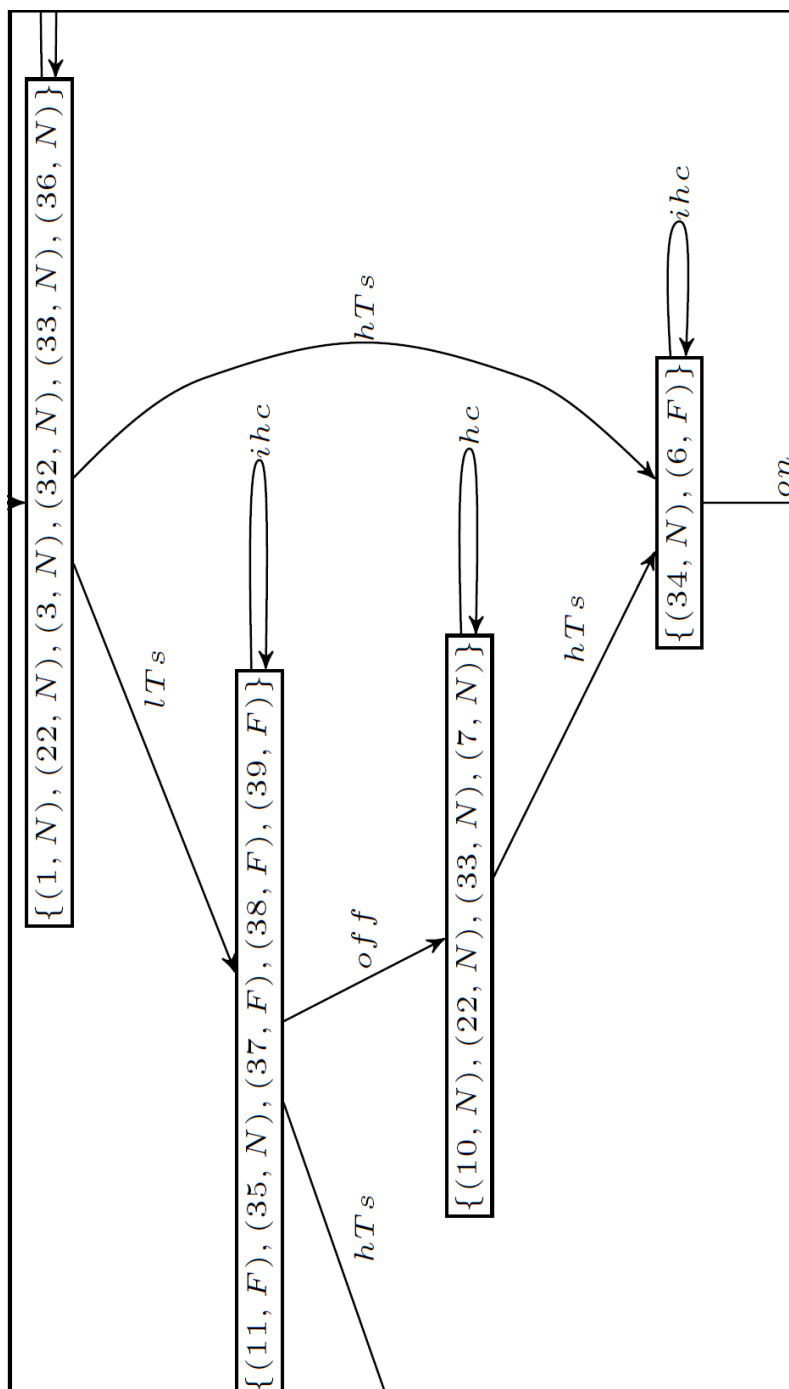


Figura 5.13: Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.12

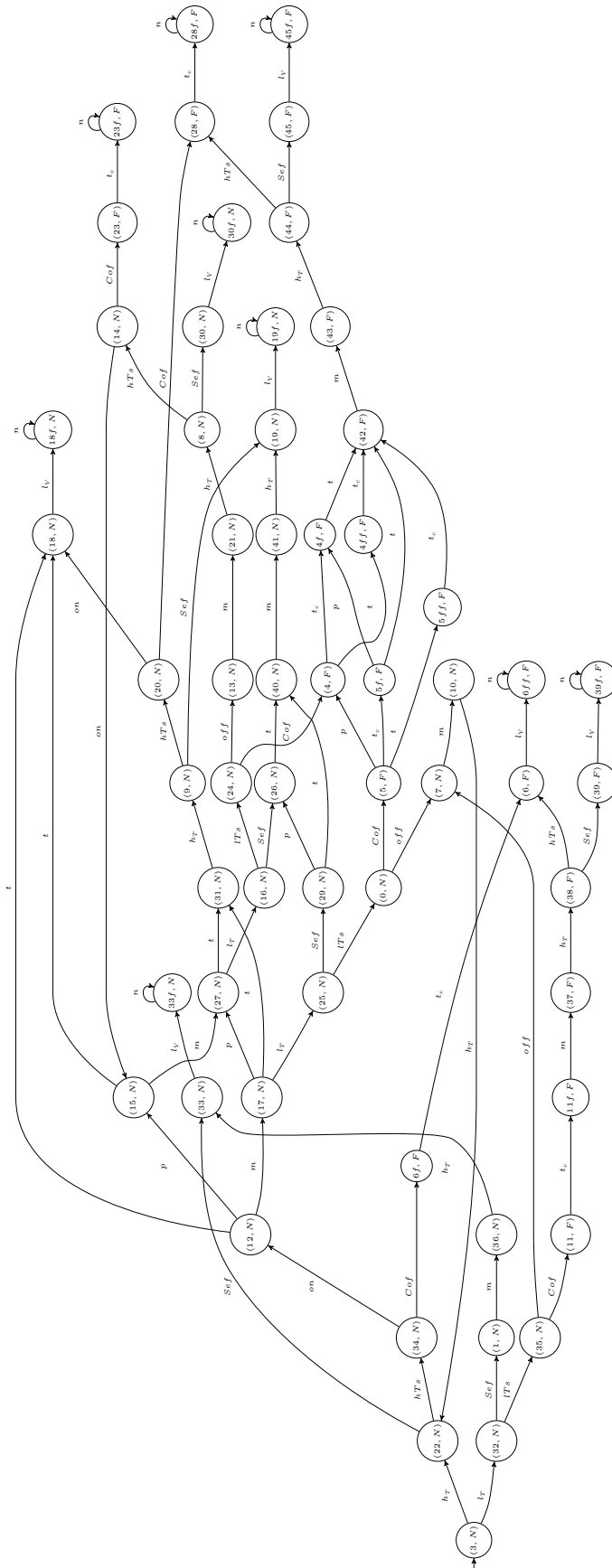


Figura 5.14: Autômato da Figura 5.10 com Geração de Eventos para Tensão Baixa e Atrasos no Tempo de Varredura

Com base na figura 5.15, destaca-se um dos pontos da figura 5.14 em que inseriu-se uma falha por tempo de resposta do controlador.

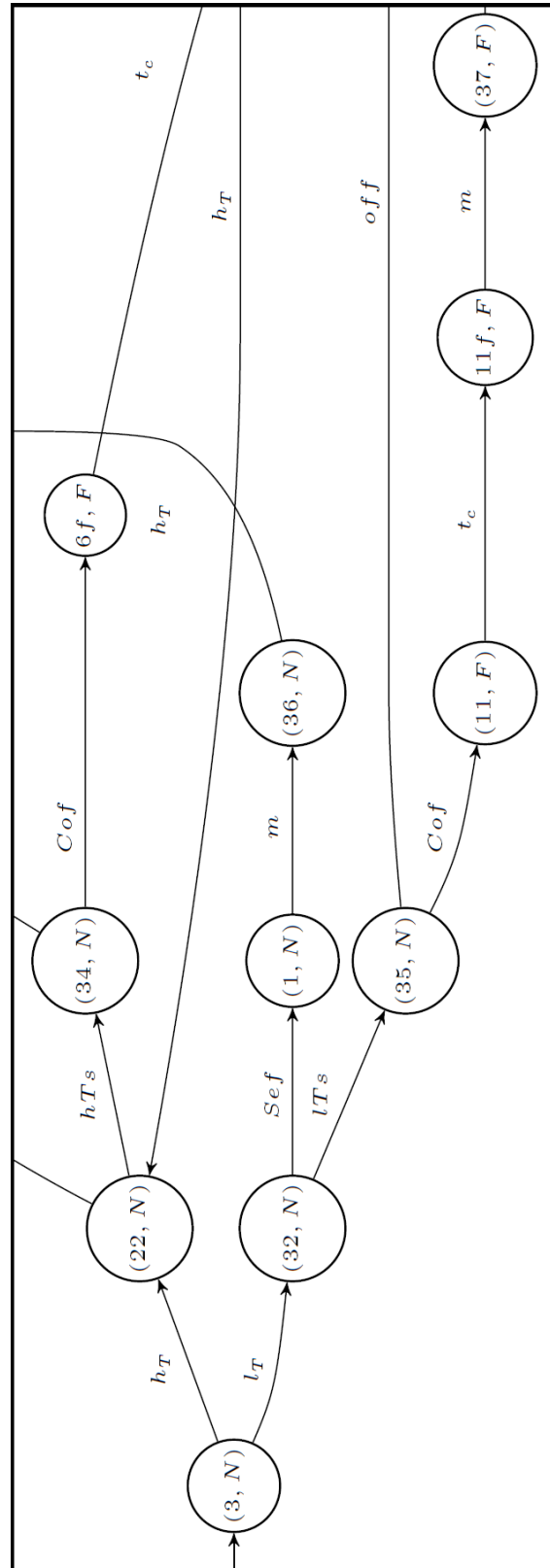


Figura 5.15: Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.14

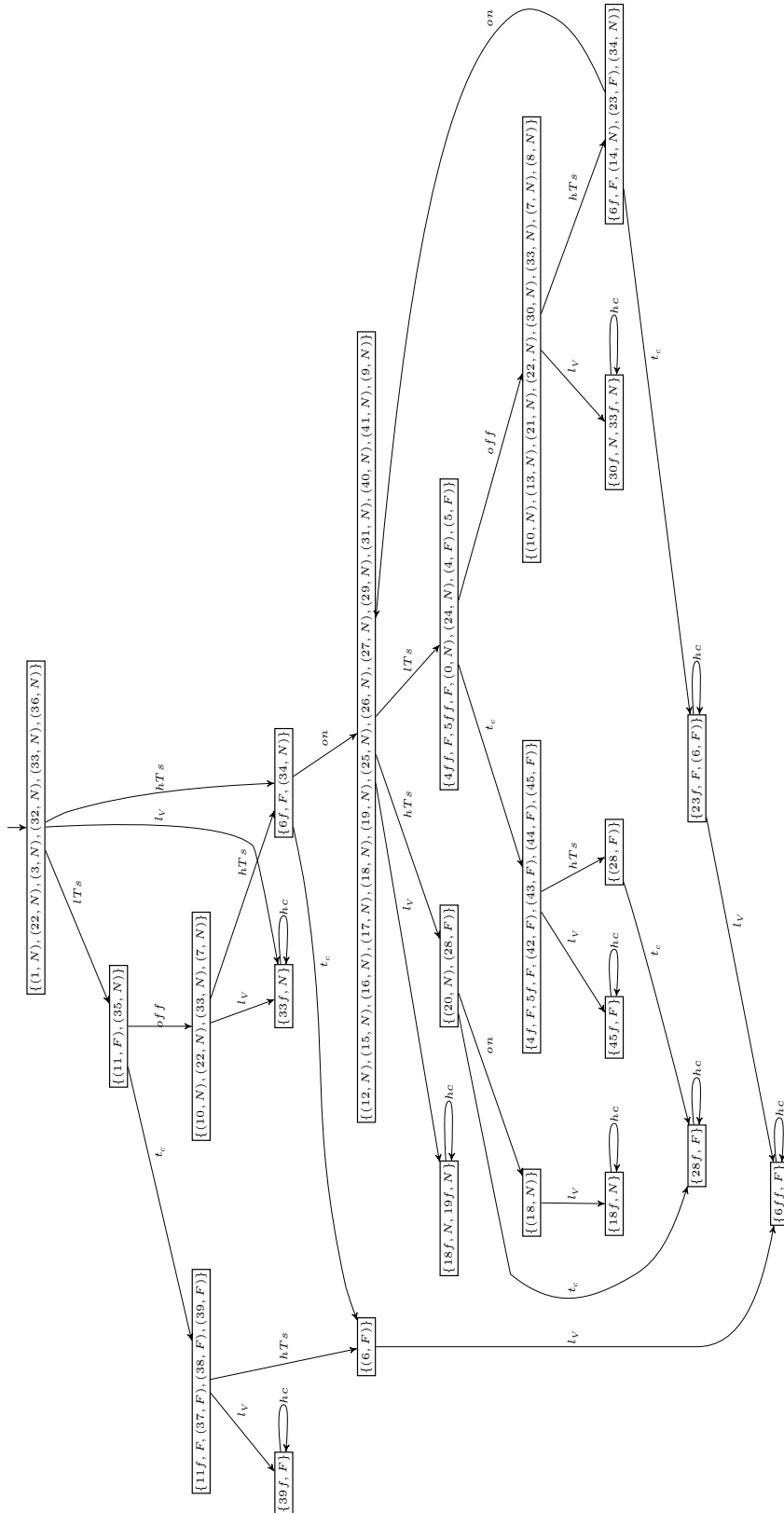


Figura 5.16: Diagnosticador da Falha no Controlador Após Introdução dos Eventos Observáveis  $l_V$  e  $t_c$

### 5.3 Análise da Falha Total do Ventilador

O terceiro caso analisado considera um rotulador para falha total do ventilador, evento  $t$ , representado pela figura 5.17. A composição paralela deste com o autômato do sistema resulta na figura 5.18, que marca os estados que apresentam uma falha total do ventilador.

O diagnosticador, ilustrado na figura 5.20, também apresenta ciclos escondidos indeterminados, o que torna esta falha não diagnosticável. A sequência observável  $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs$  leva o sistema rotulado para o grupo de estados  $((S_0; C_2); T_l V_l)$ ,  $((S_0; C_2); T_l V_p)$ ,  $((S_0; C_f); T_l V_p)$  e  $((S_0; C_f); T_l V_l)$ , que representam estados onde o ventilador não sofre de uma falha total, mas ao mesmo tempo esta sequência leva para o grupo de estados  $((S_0; C_f); T_l V_t)$ ,  $((S_0; C_f); T_m V_t)$ ,  $((S_2; C_f); T_h V_t)$  e  $((S_f; C_f); T_h V_t)$  nos quais há uma falha total do ventilador.

Esta mesma análise pode ser feita para uma sequência de eventos observáveis  $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs$ , que leva o diagnosticador para o mesmo estado com ciclo indeterminado. Note que estados rotulados como normais podem apresentar falhas em outros componentes, como a falha do controlador presente no estado  $((S_0; C_f); T_l V_l)$  ou também como no caso do estado  $((S_0; C_f); T_l V_p)$ , que apresenta uma falha de controlador e ao mesmo tempo uma falha apenas parcial do ventilador. Ou seja, deve-se tomar cuidado com as análises feitas com base no diagnosticador uma vez que a técnica se preocupa única e exclusivamente com uma falha por vez.

Mais uma vez foi utilizada, então, a técnica do gerador de eventos para tentar tornar a presente falha diagnosticável. Analisando esse ventilador, verifica-se que de posse do tempo de subida ( $t_s$ ) medido entre a geração de um sinal  $lTs$  até que se veja um sinal  $hTs$  ou então de um tempo de descida ( $t_d$ ) medido entre um sinal  $hTs$  até que seja gerado um sinal  $lTs$ , de acordo com os gráficos de controle para o funcionamento normal de uma CaC vistos no capítulo 2, seria possível determinar se houve um atraso no chaveamento esperado para o relé de controle.

Com isso, após pelo menos um ciclo de funcionamento normal do chaveamento deste relé de controle, instantes onde a CaC sofrerá alguma falha que faça com que o sistema leve um tempo maior do que seus tempos de subida ou descida podem receber um novo evento gerado  $t_s$  ou  $t_d$ , respectivamente, além da consideração de casos com queda de tensão demarcados pelo evento  $l_V$ .

Ilustra-se, então, o resultado final destas considerações na figura 5.22, que representa o autômato do sistema completo e rotulado acrescido de novos eventos  $l_V$ ,  $t_s$  e  $t_d$ . Desta forma, o diagnosticador resultante, representado pela figura 5.24, não apresenta ciclos indeterminados. Ou seja, agora tal falha tornou-se diagnosticável, de modo que todas as sequências que apresentam os eventos  $t_d$  ou  $t_s$  são sequências que fazem com que o ventilador sofra com esta falha.



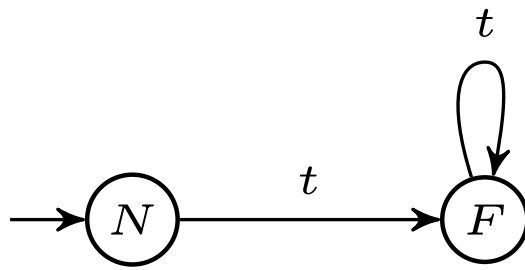


Figura 5.17: Autômato Rotulador de Falha Total do Ventilador



Por meio da figura 5.19, pode-se focar em um ponto da figura 5.18 onde ocorre a falha total do ventilador.

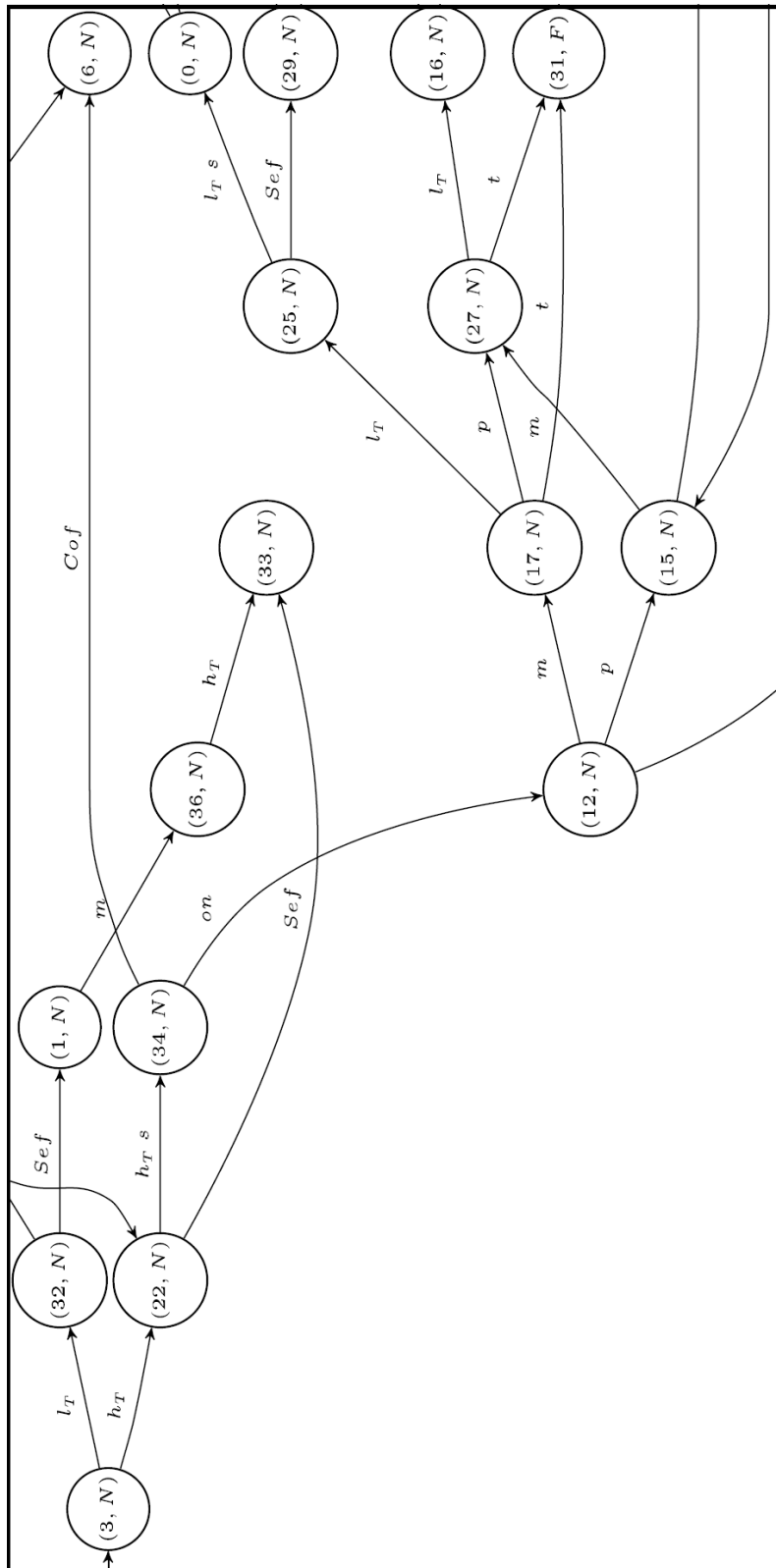


Figura 5.19: Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.18

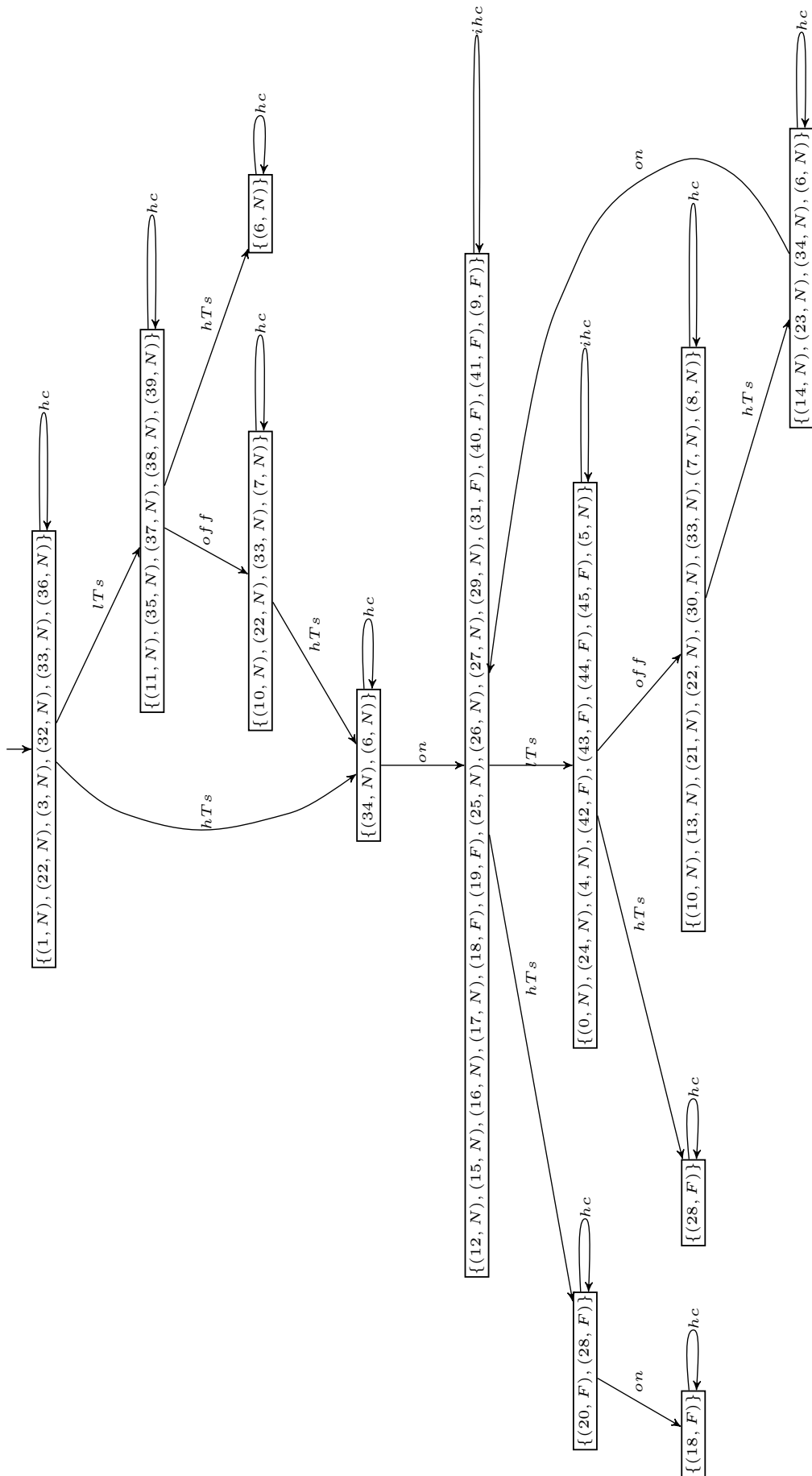


Figura 5.20: Diagnosticador para Falha Total de Ventilador Rotulada

Por meio da figura 5.21, pode-se focar em um ponto da figura 5.20 que ilustra o surgimento de ciclos escondidos indeterminados para o caso da falha total do ventilador.

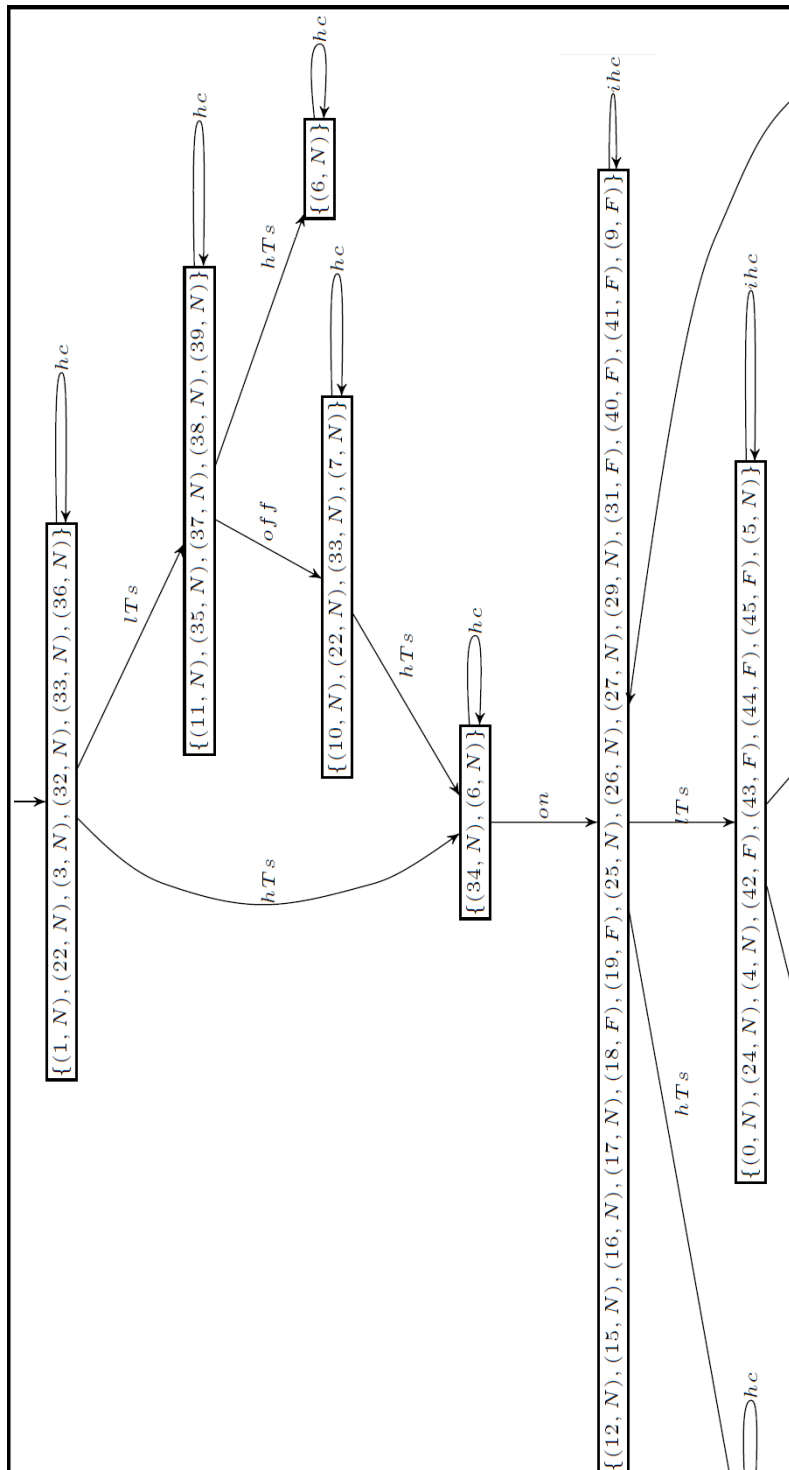


Figura 5.21: Ilustração de parte do Diagnosticador da Figura 5.20

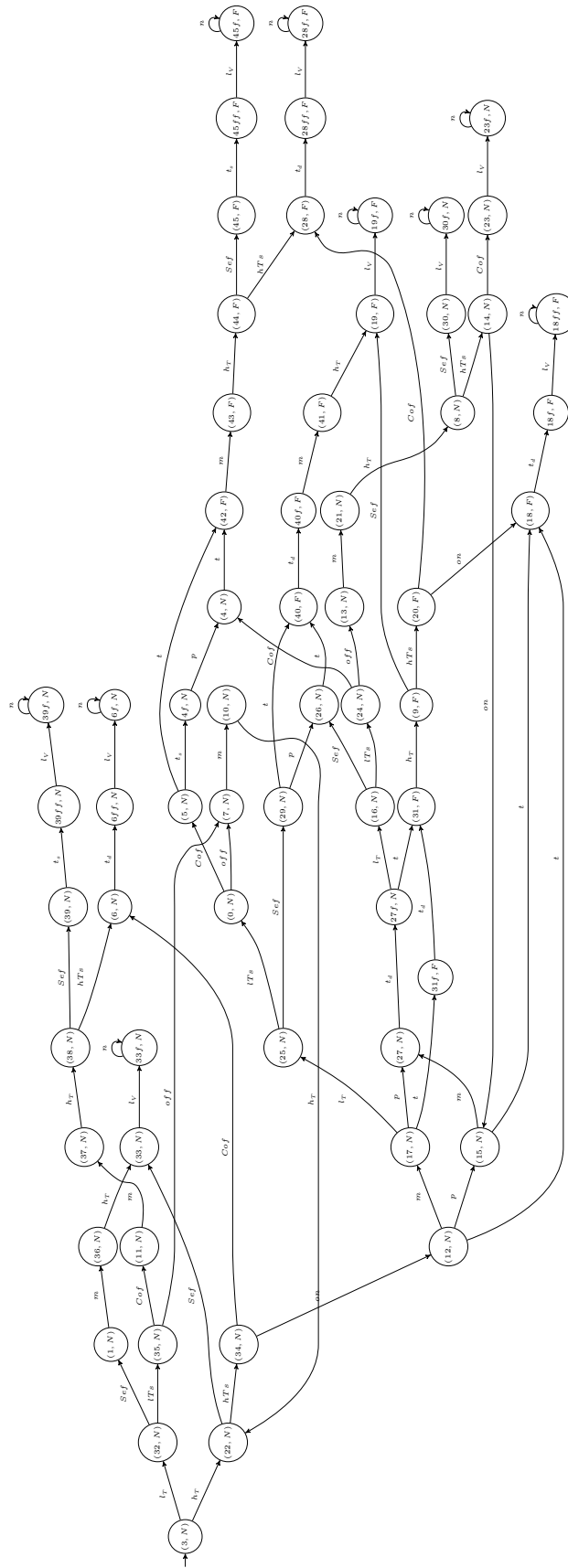


Figura 5.22: Autômato da Figura 5.18 com Geração de Eventos para Tensão Baixa, Tempo de Subida e Tempo de Descida

Com base na figura 5.23, destaca-se um dos pontos da figura 5.22 em que foram considerados eventos de falha no tempo de subida ou no tempo de descida.

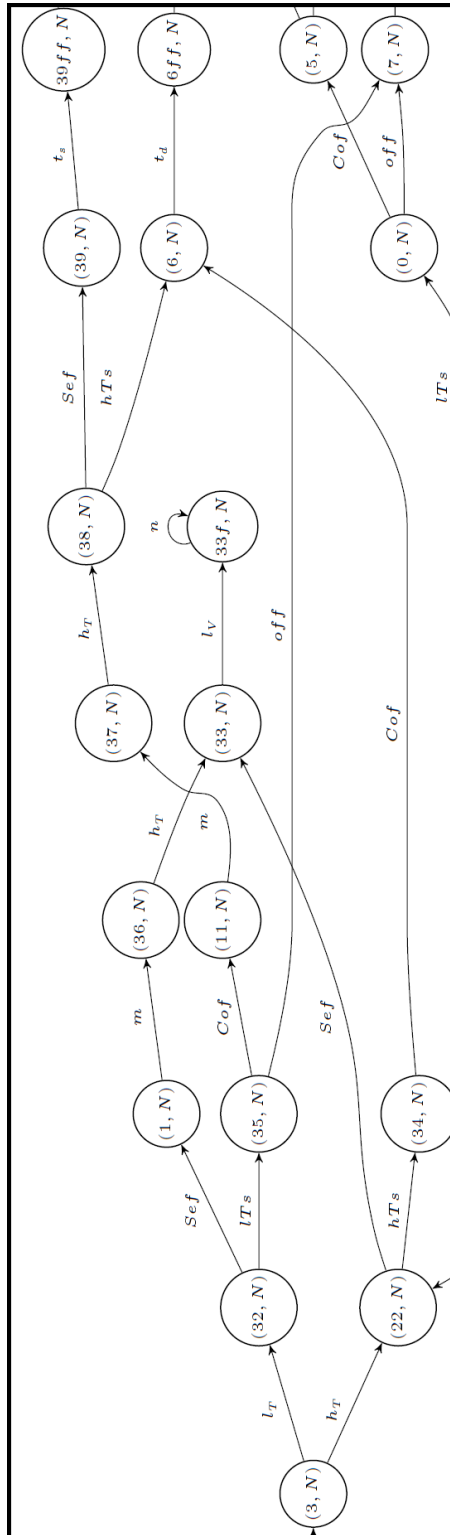


Figura 5.23: Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.22

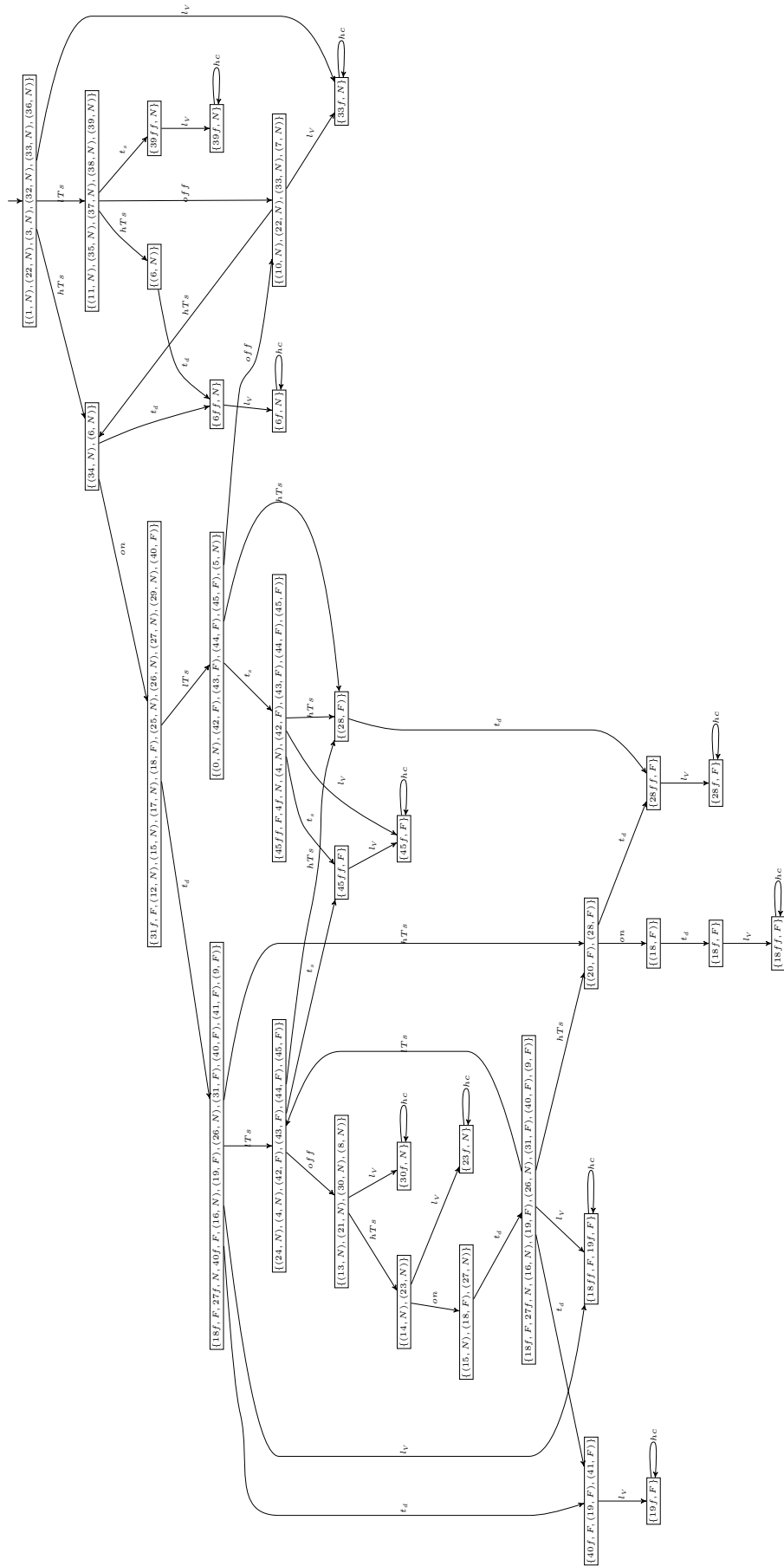


Figura 5.24: Diagnosticador da Falha Total do Ventilador Após Introdução dos Eventos Observáveis  $l_v$ ,  $t_s$  e  $t_d$



## 5.4 Análise da Falha Parcial do Ventilador

Por fim, resta avaliar a diagnosticabilidade da falha parcial do ventilador, cujo autômato rotulador é representado pela figura 5.25. O paralelo deste rotulador com o autômato do sistema fornece a figura 5.26, marcando estados onde o presente problema já terá ocorrido.

O diagnosticador desta falha está ilustrado na figura 5.28 e a presença de ciclos indeterminados indica mais uma falha não diagnosticável. Como exemplo, tem-se a sequência  $hTs \rightarrow on \rightarrow hTs$ , que faz com que o sistema possa alcançar os estados de falha  $((S_0; C_1); ThVt)$  e  $((S_0; C_f); ThVt)$ , ou então alcançar os estados normais  $((S_0; C_1); ThVt)$  e  $((S_0; C_f); ThVt)$ . Além dessa, verifica-se que existem também outras sequências que levam o sistema até grupos de estados que formam ciclos indeterminados, no caso:

- $hTs \rightarrow on$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow hTs$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow hTs \rightarrow on$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow hTs \rightarrow on$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow hTs$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow hTs$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off \rightarrow hTs$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off \rightarrow hTs$ ;
- $hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on$ ;
- $lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on \rightarrow lTs \rightarrow off \rightarrow hTs \rightarrow on$ .

Assim como fez-se no caso da falha total do ventilador, verifica-se que apenas a mesma análise de tempos de descida  $t_d$  e tempos de subida  $t_s$  pode ser aplicada, com base nos atrasos do chaveamento esperados para o relé de controle. Também neste caso, pode-se observar uma falha na tensão pelo evento  $l_V$ , da mesma forma como fez-se nos casos anteriores.

O resultado obtido para o novo autômato rotulador com base nessa nova consideração está ilustrado na figura 5.30, cujo diagnosticador resulta na figura 5.32. Pelo novo diagnosticador vê-se que mesmo agora não foi possível resolver um caso de ciclo indeterminado após as sequências  $hTs \rightarrow on \rightarrow t_d \rightarrow l_V$  e  $lTs \rightarrow off \rightarrow hts \rightarrow on \rightarrow t_d \rightarrow l_V$ .

Sendo assim, mesmo observando os novos eventos gerados, a falha ainda manteve-se como não diagnosticável por causa do ciclo escondido indeterminado, destacado na figura 5.33, formado pelos estados  $((S_0; C_0); T_h V_t)$  e  $((S_f; C_0); T_h V_t)$ , rotulados como normais ao mesmo tempo que podem ser rotulados como falhas, ou seja, não foi possível solucionar a falha parcial do ventilador.

Entretanto, ao avaliar estes resultados, vê-se que utilizando os novos eventos observados, os caminhos que levam o sistema para um ciclo indeterminado são alcançados apenas após a ocorrência de dois eventos de falha ( $t_d$  e  $l_V$ ), indicando que já teriam sido detectados erros.

A prática mostra que neste caso específico pode-se considerar que esta falha poderá ser diagnosticada. Ao analisar o autômato rotulador da figura 5.30 vê-se que as duas sequências indeterminadas possuem eventos não observáveis do tipo  $t$ , ou seja, a única dúvida que o diagnosticador não foi capaz de resolver já teria sido resolvida pelo diagnosticador da falha total do ventilador, indicando que apenas quando houver uma falha total do ventilador é que o operador não seria capaz de detectar a parcial, o que neste caso não seria relevante uma vez que a perda total representa impactos mais significativos ao sistema.

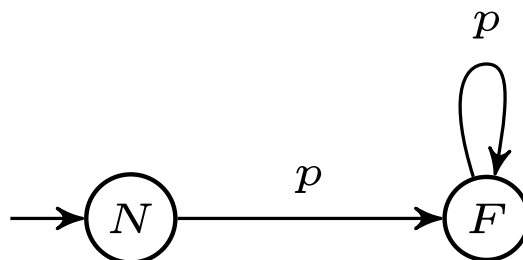


Figura 5.25: Autômato Rotulador de Falha Parcial do Ventilador

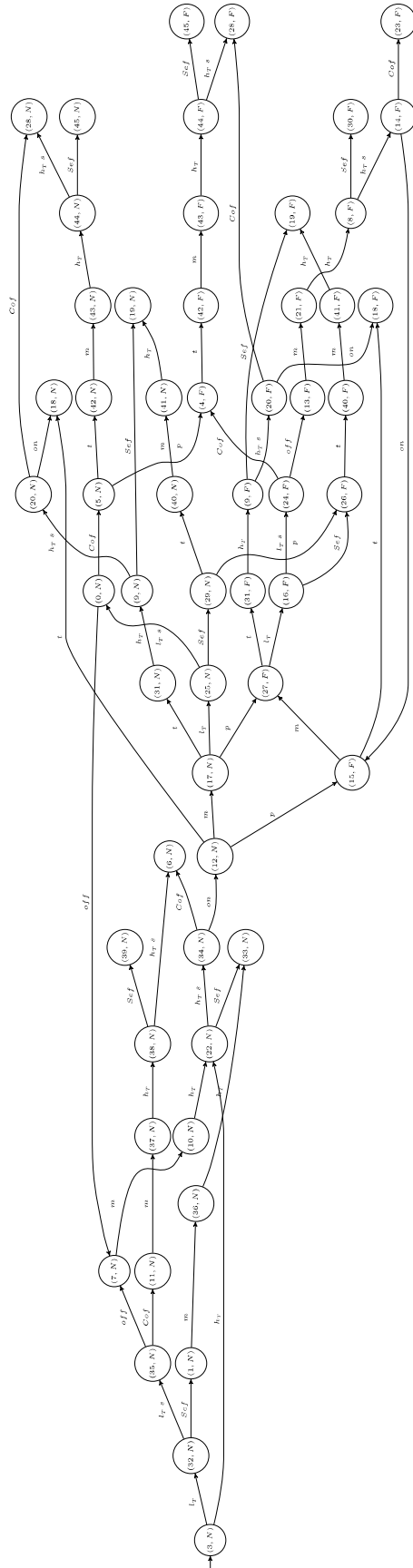


Figura 5.26: Composição Paralela entre o Autômato que Modela o Sistema Apresentado na Figura 4.7 com o Autômato Rotulador da Figura 5.25

Por meio da figura 5.27, pode-se focar em um ponto da figura 5.26 onde ocorre a falha parcial do ventilador.

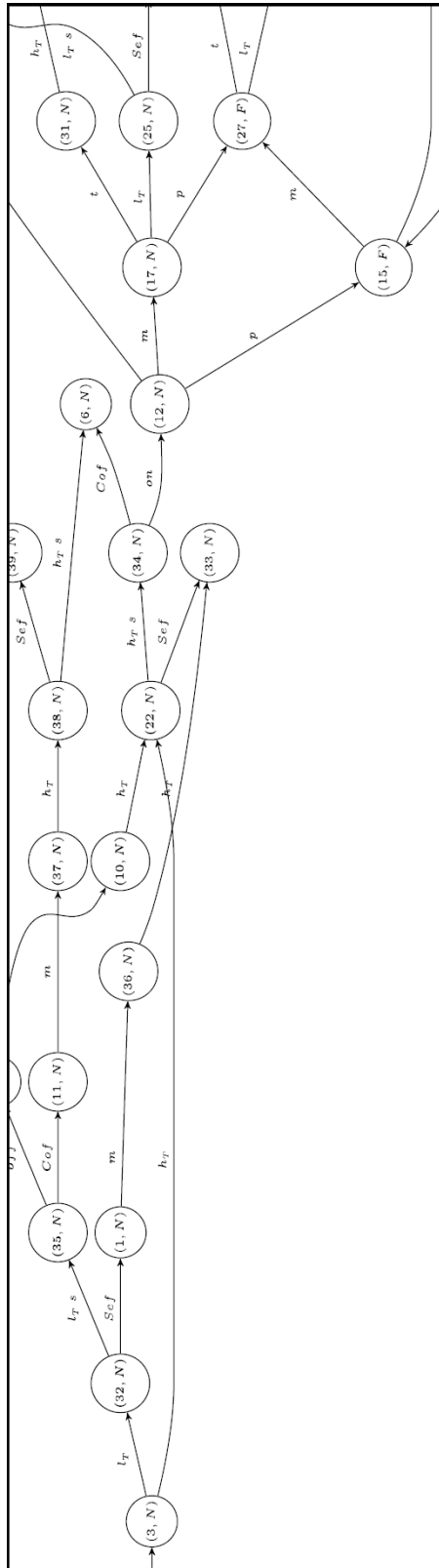


Figura 5.27: Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.26

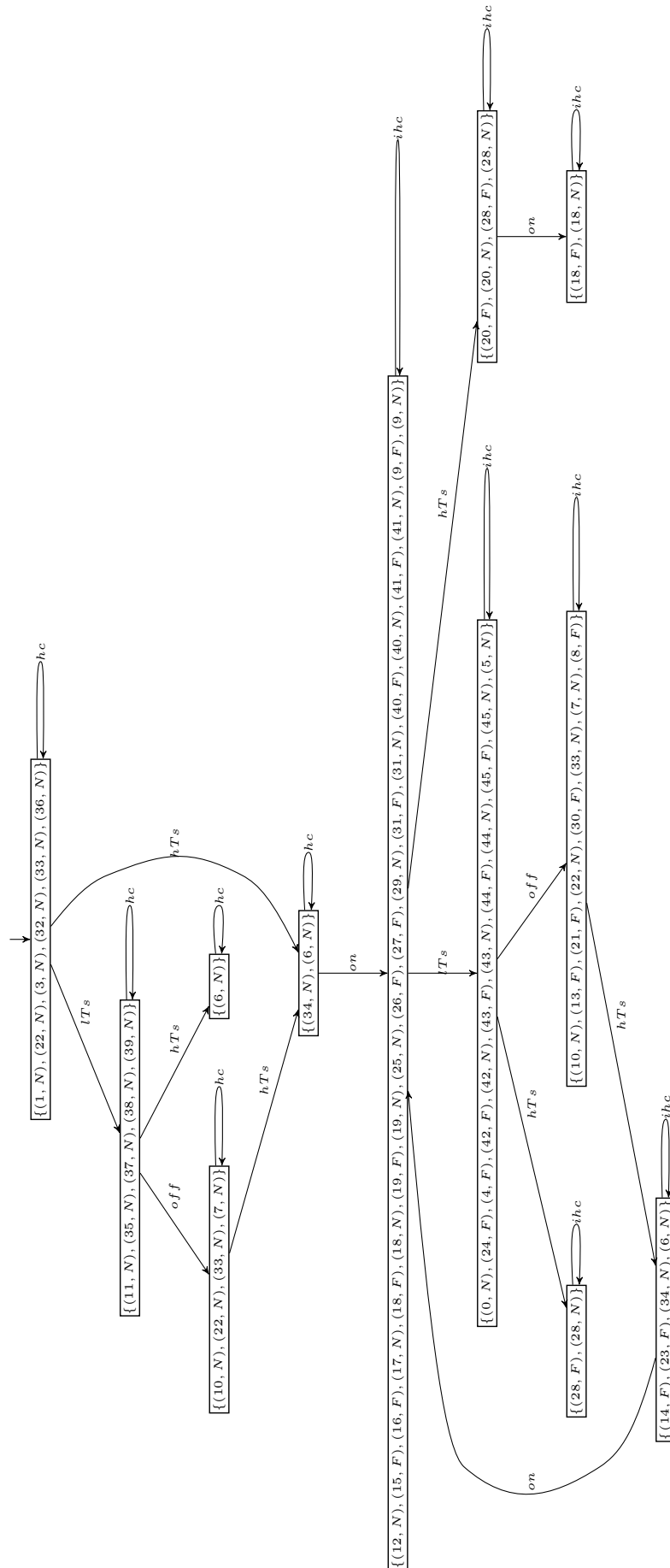


Figura 5.28: Diagnosticador para Falha Parcial de Ventilador Rotulada  
97

Na figura 5.29, destaca-se em um ponto da figura 5.28 onde ocorre o surgimento de ciclos escondidos indeterminados para o caso da falha parcial do ventilador.

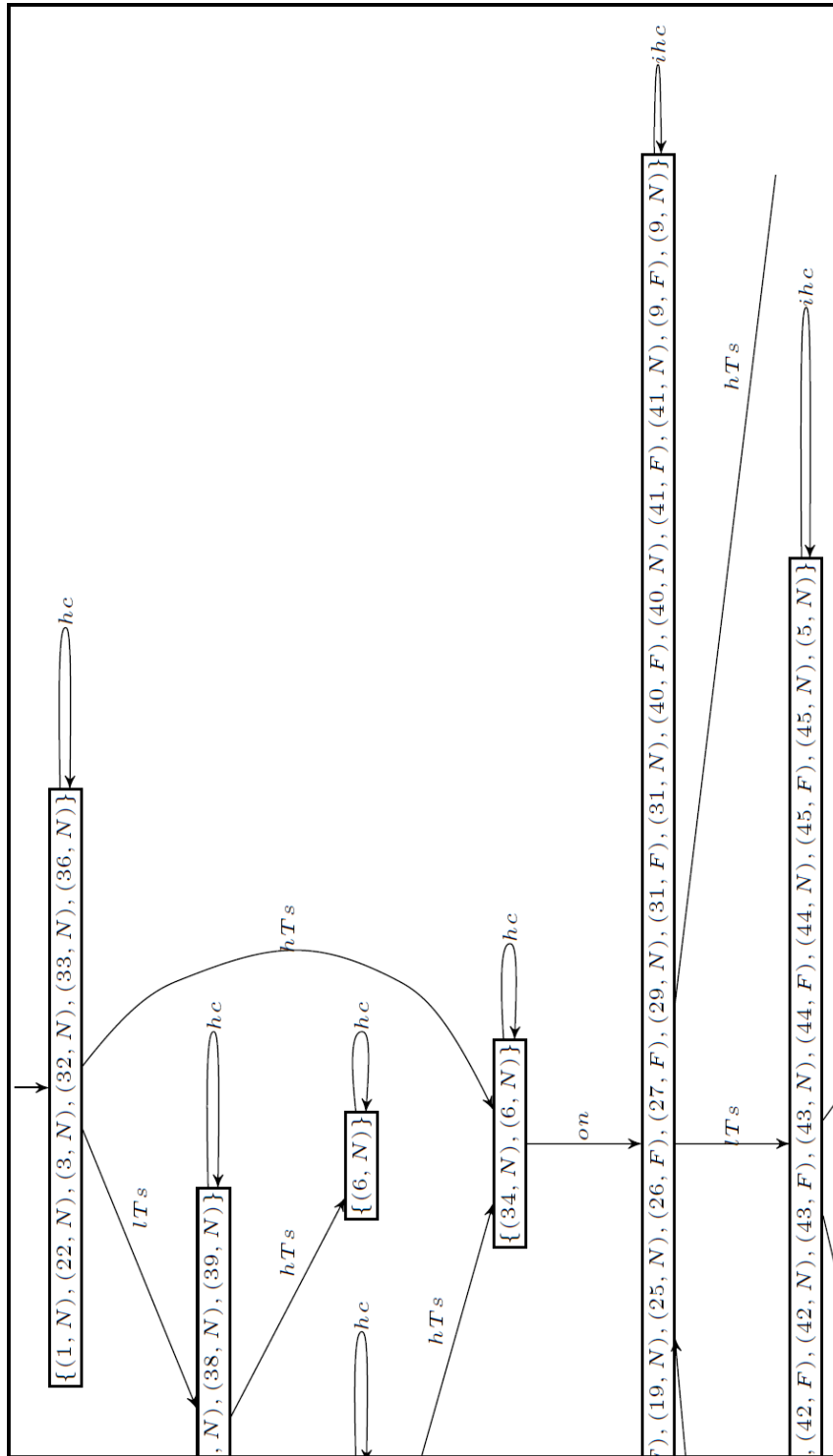


Figura 5.29: Ilustração de parte do Diagnosticador da Figura 5.28



Por meio da figura 5.31, vê-se um dos pontos da figura 5.30 em que foram considerados eventos de falha no tempo de subida ou no tempo de descida para falha parcial do ventilador.

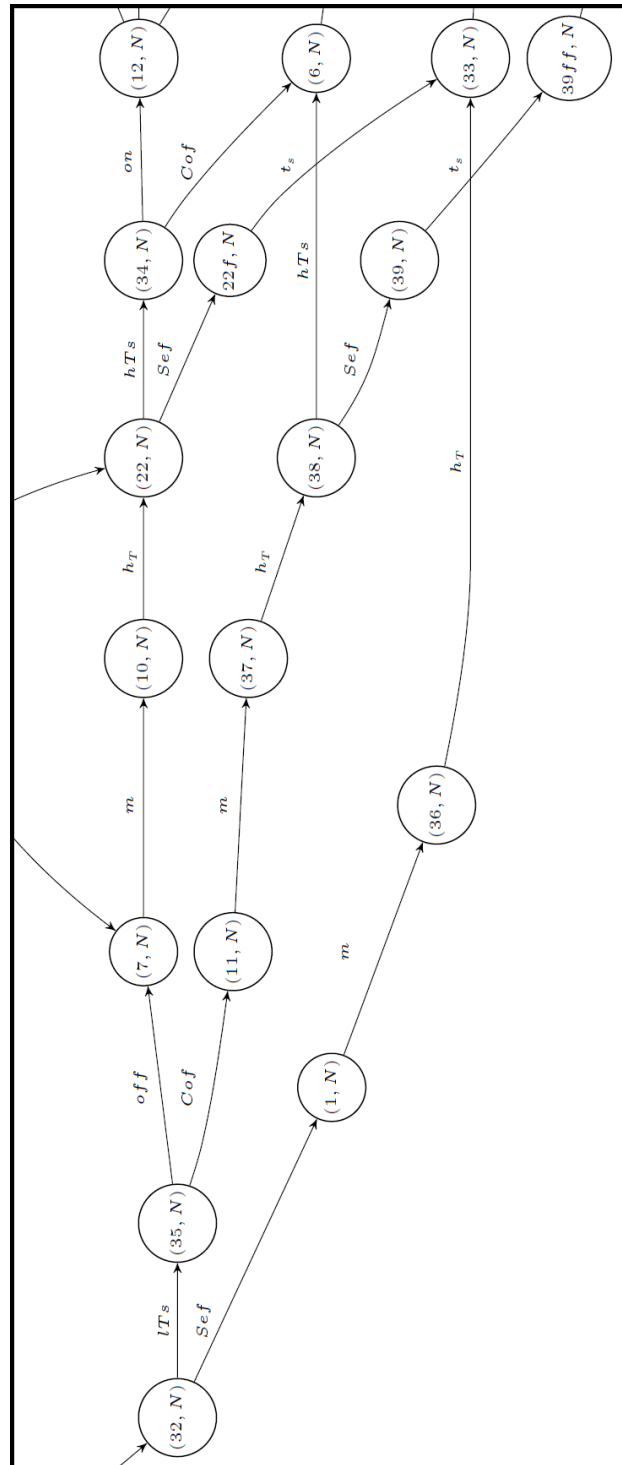


Figura 5.31: Ilustração de parte do Autômato da Figura 5.30



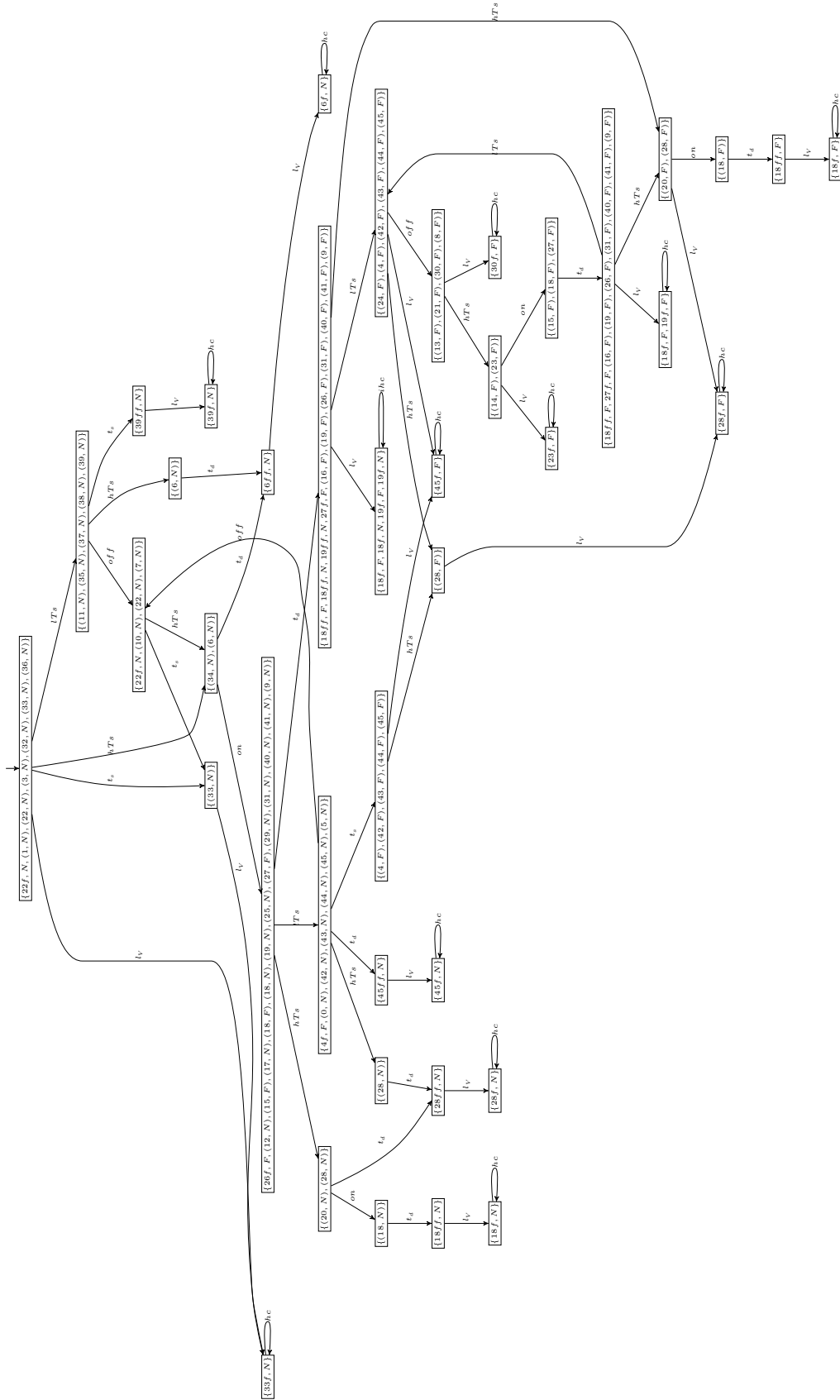


Figura 5.32: Diagnosticador da Falha Parcial do Ventilador Após Introdução dos Eventos Observáveis  $l_v$ ,  $t_s$  e  $t_d$

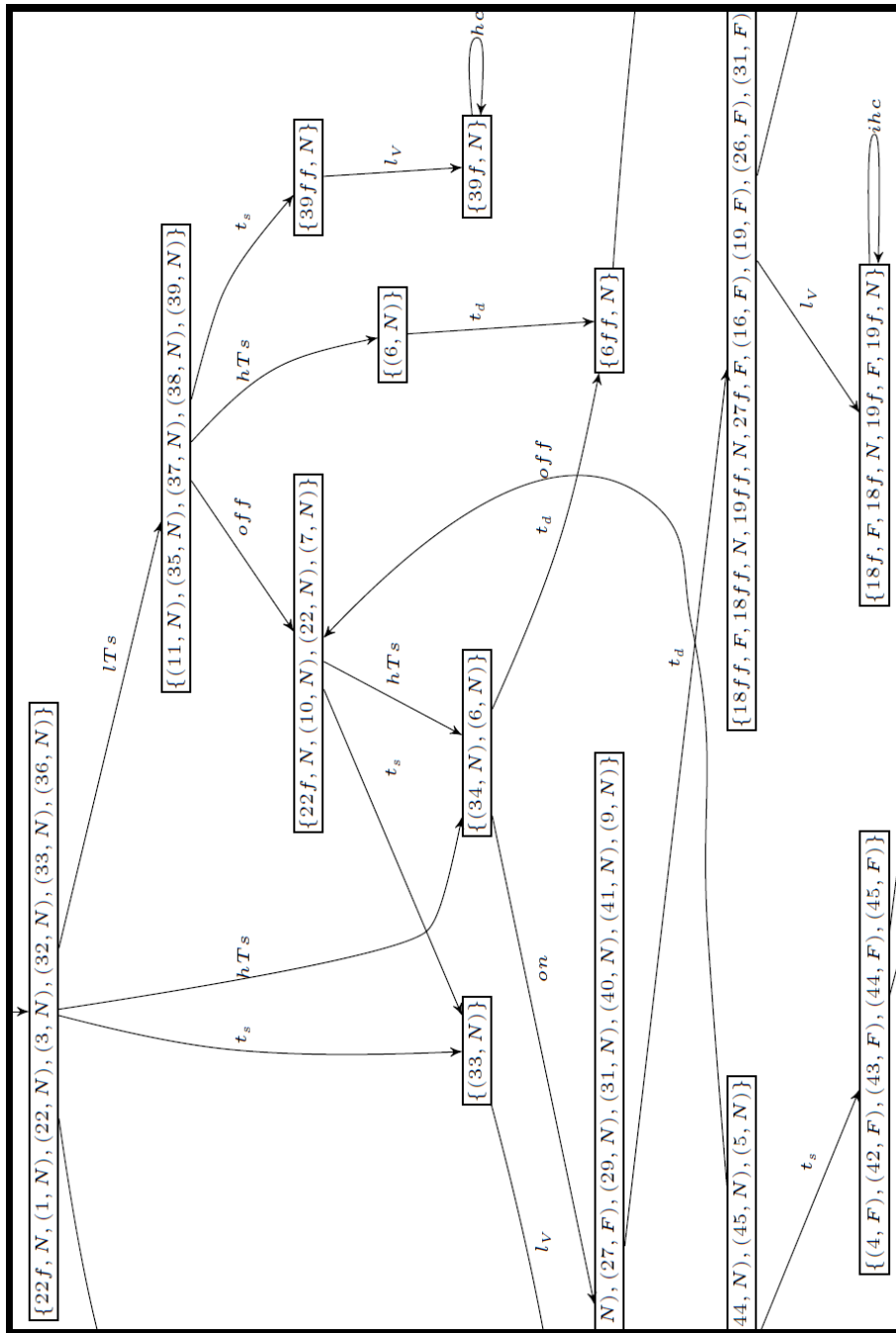


Figura 5.33: Ilustração de parte do Diagnosticador da Figura 5.32

Estes resultados são de extrema importância pois permitem concluir que foi possível modelar e detectar quatro tipos de falhas no sistema de resfriamento das CaC, solucionando de forma clara os problemas considerados e mostrando que foi possível alcançar os objetivos da presente dissertação.

# Capítulo 6

## Conclusões

A presente dissertação apresentou o desenvolvimento de um modelo matemático, baseado em leis da química, da mecânica e em equações empíricas, para representar o comportamento de uma CaC. Em contraste com o que comumente se encontra na literatura, o simulador desenvolvido neste trabalho levou em conta um sistema dinâmico para descrever a evolução da temperatura e seu consequente efeito na tensão de saída da CaC.

Este modelo foi implementado no ambiente Simulink/Matlab e permite adaptações para representar diferentes tipos de CaCs, bastando para isso uma simples configuração prévia das seguintes grandezas: área da CaC, pressões do catodo e do anodo, temperatura de controle, temperatura do entorno da CaC, corrente de carga e número de CaCs no empilhamento. Em particular, a correspondente tensão de saída foi produzida para um empilhamento de 47 CaCs e o desempenho do simulador foi coerente com os comportamentos de CaCs reportadas na literatura.

Com o simulador desenvolvido foi possível analisar o comportamento do empilhamento de 47 CaCs considerando a ação de um controle de temperatura para regulação em 338 K. Inicialmente, condições normais de operação foram consideradas e, em seguida, alguns cenários de falha foram avaliados, entre eles: falha parcial e total no ventilador de resfriamento e falhas no sensor e no controlador de temperatura.

Após diversas simulações numéricas, em tempo contínuo, avaliou-se o comportamento do sensor/controlador, da temperatura, do ventilador e da tensão da CaC. Com isso, foi possível então discretizar o sistema e gerar autômatos representando seus respectivos comportamentos. Além disso, a teoria de diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos permitiu realizar análises da diagnosticabilidade de algumas falhas típicas deste sistema e, assim, foi possível atingir o objetivo principal deste trabalho, ou seja, desenvolver uma ferramenta de análise que seja capaz de fornecer de forma clara e consistente ao usuário um diagnóstico da falha encontrada.

Em particular, alguns tipos de falhas são de fácil detecção, como: queda de

tensão, tempo de chaveamento do relé de controle e tempo de resposta do controlador. Apenas com este tipo de informação extra foi possível detectar e diagnosticar algumas das falhas abordadas, como foi o caso do sensor, do controlador e da falha perda do ventilador. Entretanto, não foi possível isolar a falha parcial do ventilador por meio da técnica de gerador de eventos.

Com relação a falha parcial do ventilador, a mesma só poderia ser diagnosticada se houvesse um gerador de eventos e/ou controle de alguma outra variável extra que não foi possível identificar, pois sem isso a mesma não seria diagnosticável segundo a teoria de sistemas a eventos discretos. Mesmo assim, tal falha foi dada como diagnosticável porque sua única sequência observável indeterminada já inclui a perda total do ventilador, ou seja, de qualquer forma seria possível detectar que o sistema está com um problema. Considera-se, com isso, que o resultado obtido para diagnose foi satisfatório para os quatro casos avaliados.

## 6.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, a principal indicação é validar o modelo simulado com resultados gerados por CaCs reais do mercado, de modo que afirmações precisas possam ser feitas a respeito de todo e qualquer comportamento da CaC.

Uma característica muito influente nos resultados do comportamento de uma CaC é o nível de umidade da membrana. Uma membrana inundada gera graves efeitos na tensão uma vez que impede a chegada eficiente de reagentes nas placas da CaC, enquanto que uma membrana ressecada compromete a energia gerada e também provoca degradação do equipamento. Este fator é muito citado pela bibliografia, mas não foram desenvolvidos métodos eficientes para este tipo de medida, que apresenta grande complexidade. A presente dissertação considerou seus efeitos apenas implícitos nas partes empíricas do modelo, faltando um modelo matemático especificamente para o mesmo.

Para qualquer trabalho futuro, quanto mais componentes do sistema puderem ser modelados e considerados ao mesmo tempo, mais completo será o modelo. Sendo assim, trabalhos que considerem todos os componentes e falhas já considerados aqui e que incorporem novos componentes serão mais complexos e próximos da realidade.

Seria interessante considerar falhas do tipo: vazamentos na alimentação de gases para a membrana, problemas no compressor de oxigênio e defeitos na válvula reguladora de pressão.

Por fim, poderia ser feito um estudo mais aprofundado a respeito de técnicas que pudessem tornar a falha parcial do ventilador detectável e diagnósticável.

# Referências Bibliográficas

- AL-BAGHDADI, M. A., 2005, “Modelling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations”, *Renewable Energy*, v. 30, n. 10, pp. 1587–1599.
- AMPHLETT, J., MANN, R., PEPPLEY, B., et al., 1996, “A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, v. 61, n. 1, pp. 183–188.
- AMPHLETT, J. C., BAUMERT, R., MANN, R. F., et al., 1995a, “Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell II. Empirical model development”, *Journal of the Electrochemical Society*, v. 142, n. 1, pp. 9–15.
- AMPHLETT, J. C., BAUMERT, R., MANN, R. F., et al., 1995b, “Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell I. Mechanistic model development”, *Journal of the Electrochemical Society*, v. 142, n. 1, pp. 1–8.
- BALLARD, P. S., 2003. “*Nexa<sup>TM</sup>* Power Module User’s Manual”. .
- BALMER, R., 1990. “Thermodynamics”. .
- BARRETT, S., VALERO, G., LUCAS, L., 2010, “NTU, Tsinghua get Green-Lite for cleanest bus in Singapore”, *Fuel Cells Bulletin*, v. 2010, n. 8, pp. 2 –. ISSN: 1464-2859. doi: 10.1016/S1464-2859(10)70239-X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146428591070239X>>.
- BASILIO, J. C., LAFORTUNE, S., 2009, “Robust codiagnosability of discrete event systems”. In: *American Control Conference, 2009. ACC’09.*, pp. 2202–2209. IEEE.
- BASILIO, J. C., CARVALHO, L. K., MOREIRA, M. V., 2010, “Diagnose de falhas em sistemas a eventos discretos modelados por autômatos finitos”, *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 5, pp. 510–533.

- BASILIO, J. C., LIMA, S. T. S., LAFORTUNE, S., et al., 2012, “Computation of minimal event bases that ensure diagnosability”, *Discrete Event Dynamic Systems*, v. 22, n. 3, pp. 249–292.
- BÜCHI, F. N., SCHERER, G. G., 1996, “In-situ resistance measurements of Nafion® 117 membranes in polymer electrolyte fuel cells”, *Journal of electroanalytical chemistry*, v. 404, n. 1, pp. 37–43.
- CANÇADO, J. E. D., BRAGA, A., PEREIRA, L. A. A., et al., 2006, “Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica”, *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 32 (05), pp. S5 – S11. ISSN: 1806-3713. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-37132006000800003&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-37132006000800003&nrm=iso)>.
- CASSANDRAS, C. G., LAFORTUNE, S., 2008, *Introduction to discrete event systems*. Springer.
- CLAVIJO, L. B., BASILIO, J. C., CARVALHO, L. K., 2012, “DESLAB: A scientific computing program for analysis and synthesis of discrete-event systems”. In: *Discrete Event Systems*, v. 11, pp. 349–355.
- DAVIES, C. W., 1967, *Electrochemistry*. Newnes, London.
- DEL REAL, A. J., ARCE, A., BORDONS, C., 2007, “Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model”, *Journal of power sources*, v. 173, n. 1, pp. 310–324.
- DEWITT, F. P. I. D. P., INCROPERA, F. P., 1996, “Introduction to heat transfer”, *Chapter Five Transient Conduction*.
- FULLER, T. F., NEWMAN, J., 1993. “Water and Thermal Management in Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells”. .
- HISSEL, D., PÉRA, M., KAUFFMANN, J., 2004, “Diagnosis of automotive fuel cell power generators”, *Journal of Power sources*, v. 128, n. 2, pp. 239–246.
- HUA, J., LIN, X., XU, L., et al., 2009, “Bluetooth wireless monitoring, diagnosis and calibration interface for control system of fuel cell bus in Olympic demonstration”, *Journal of Power Sources*, v. 186, n. 2, pp. 478–484.
- HUA, J., LI, J., OUYANG, M., et al., 2011, “Proton exchange membrane fuel cell system diagnosis based on the multivariate statistical method”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 16, pp. 9896–9905.

- INCROPERA, F. P., LAVINE, A. S., DEWITT, D. P., 2011, *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- JIA, Y., WANG, H., OUYANG, M., 2006, “Electric power system for a Chinese fuel cell city bus”, *Journal of power sources*, v. 155, n. 2, pp. 319–324.
- LARMINIE, J., DICKS, A., 2003, *Fuel cell systems explained*. J. Wiley. ISBN: 9780470848579. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=IRAoAQAAMAAJ>>.
- LEE, J., LALK, T., 1998, “Modeling fuel cell stack systems”, *Journal of Power Sources*, v. 73, n. 2, pp. 229–241.
- LUO, F., MO, M., CHEN, J., et al., 2008, “Fault diagnosis systems development for Fuel Cell Vehicle”. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE*, pp. 1–4. IEEE.
- MANN, R., AMPHLETT, J., PEPPLEY, B., et al., 2006, “Henry’s Law and the solubilities of reactant gases in the modelling of PEM fuel cells”, *Journal of power sources*, v. 161, n. 2, pp. 768–774.
- MANN, R. F., AMPHLETT, J. C., HOOPER, M. A., et al., 2000, “Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell”, *Journal of Power Sources*, v. 86, n. 1, pp. 173–180.
- MARCILIO, I., GOUVEIA, N., 2007, “Quantifying the impact of air pollution on the urban population of Brazil”, *Cadernos de Saúde Pública*, v. 23 (00), pp. S529 – S536. ISSN: 0102-311X. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-311X2007001600013&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2007001600013&nrm=iso)>.
- MATHWORKS, I., 2005, *MATLAB: the language of technical computing. Desktop tools and development environment, version 7*, v. 9. MathWorks.
- MATLAB, M., 2012. “SIMULINK for technical computing”. .
- MCDUGALL, A., 1976, *Fuel Cells*. Macmillan, London.
- MERIDA, W., HARRINGTON, D., LE CANUT, J., et al., 2006, “Characterisation of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) failures via electrochemical impedance spectroscopy”, *Journal of power sources*, v. 161, n. 1, pp. 264–274.

- MOREIRA, M. V., DA SILVA, G. E., 2009, “A practical model for evaluating the performance of proton exchange membrane fuel cells”, *Renewable energy*, v. 34, n. 7, pp. 1734–1741.
- NGUYEN, T. V., WHITE, T. E. J., 1993. “A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells” . .
- RIASCOS, L. A. M., SIMOES, M. G., MIYAGI, P. E., 2008, “On-line fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, v. 175, n. 1, pp. 419–429.
- SAMPATH, M., SENGUPTA, R., LAFORTUNE, S., et al., 1995, “Diagnosability of discrete-event systems”, *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 9, pp. 1555–1575.
- VEGA-LEAL, A. P., PALOMO, F. R., BARRAGÁN, F., et al., 2007, “Design of control systems for portable PEM fuel cells”, *Journal of power sources*, v. 169, n. 1, pp. 194–197.
- WELTY, J. R., WICKS, C. E., RORRER, G., et al., 2009, *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- XU, L., OUYANG, M., LI, J., et al., 2010, “Hierarchical control of vehicular fuel cell/battery hybrid powertrain”. In: *Proceedings of the 25th world battery, hybrid and fuel cell electric vehicle Symposium & Exhibition. Shenzhen, China*.
- YU, X., ZHOU, B., SOBIESIAK, A., 2005, “Water and thermal management for Ballard PEM fuel cell stack”, *Journal of Power Sources*, v. 147, n. 1, pp. 184–195.
- ZHANG, J., TANG, Y., SONG, C., et al., 2006, “PEM fuel cell open circuit voltage (OCV) in the temperature range of 23 C to 120 C”, *Journal of power sources*, v. 163, n. 1, pp. 532–537.