

Modelagem e Supervisão de Bancos de Baterias em Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia Utilizando Redes de Petri

José Renato de Brito Sousa

Tese de Doutorado submetida à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©José Renato de Brito Sousa, Setembro de 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725m

2008 Sousa, José Renato de Brito.

Modelagem e supervisão de bancos de baterias em sistemas de múltiplas fontes de energia utilizando Redes de Petri / José Renato de Brito.— Campina Grande, 2008.

182 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima.

1. Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia 2. Sistemas Híbridos
3. Redes de Petri 4. Banco de Baterias 5. Modelagem 6. Análise
7. Desempenho 8. Tempo de Vida I. Título.

CDU – 621.355 (043)

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I

5033


25.05.09


**MODELAGEM E SUPERVISÃO DE BANCOS DE BATERIAS EM SISTEMAS DE
MÚLTIPLAS FONTES DE ENERGIA UTILIZANDO REDES DE PETRI**


JOSÉ RENATO DE BRITO SOUSA

Tese Aprovada em 21.11.2008

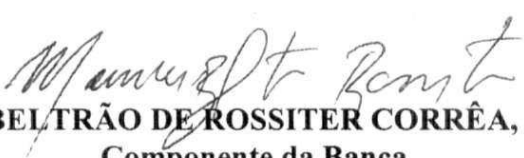

ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG
Orientador


PAULO EIGI MIYAGI, Dr., DEM/USP
Componente da Banca


GERMANO LAMBERT TORRES, Dr., UNIFEI
Componente da Banca


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


JORGE CÉSAR ABRANTES DE FIGUEIREDO, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORRÊA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE – PB
NOVEMBRO - 2008

Dedicatória

Em especial a minha esposa Sofia e aos meus filhos Renan, Renata e Renno por fazerem parte da minha vida, por confiarem em mim e pelo apoio e dedicação em todos os momentos.

À Socorro, minha querida irmã, pela educação que me deu e pelo apoio constante nos momentos difíceis desta jornada.

Aos meus queridos pais, Antônio e Alaíde e aos meus queridos irmãos Luiz Carlos e Francisco, pelo incentivo, condições para estudar, compreensão, amor e carinho e de quem tenho muitas saudades.

À Da. Cândida, Junior e Holanda.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Antonio Marcus Nogueira Lima, pela paciência, estímulo e sábia orientação ao longo destes quatro anos, sem a qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

Aos componentes da banca, pelas contribuições, sugestões e por se disporem a participar da avaliação desta tese.

Aos meus companheiros da Área da Indústria do CEFET-CE, por confiarem e possibilitarem o meu afastamento para a realização deste trabalho.

À todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica que, de uma maneira ou outra, contribuíram para a realização e o sucesso deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, Angela, Lucimar, Suênia, Pedro, Danilo, Luiz Carlos Souza, Luiz Carlos Matias, Aleixo, Cícero e Bartolomeu.

Aos amigos que fiz ao longo destes anos, pelas trocas de informações e por tornarem o ambiente de trabalho agradável. Em especial, aos amigos Alfranke, Walter, Jaidilson, Saulo, Luiz Cláudio, Jadsonlee, Ademar, Tomás, Luciano Barbosa, Luciano Lisboa e Paulo Sausen.

Também agradeço ao CNPq por ter proporcionado o suporte financeiro para viabilizar a realização deste trabalho.

Resumo

Os Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia (SMFEs), são sistemas elétricos compostos de duas ou mais fontes de energia, renováveis e não renováveis, com o objetivo básico de gerar energia elétrica. SMFEs isolados, normalmente por razões econômicas, utilizam sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias do tipo chumbo-ácido. Por sua vez, baterias chumbo-ácido têm sua vida útil diretamente relacionada com o número de ciclos de carga e descarga aos quais elas são submetidas, temperatura de operação, tempo com baixo estado de carga, carga incompleta, etc. Portanto, prever o tempo de vida de baterias chumbo-ácido nestas condições de operação, é uma tarefa relativamente difícil. Sistemas Híbridos (SHs), são sistemas nos quais o comportamento é determinado pela interação entre duas dinâmicas: uma contínua e outra a eventos discretos. Neste trabalho, os SMFEs são modelados e analisados como SHs através da utilização das Redes de Petri Híbridas Diferenciais. Desta forma, pretende-se estudar os SMFEs através da utilização de métodos que levam em conta as interações entre suas dinâmicas, auxiliando os projetistas destes sistemas durante as fases de especificação, desenvolvimento e projeto. Em resumo, SMFEs com perfis de operação diferentes, dependendo da complexidade do sistema e da estratégia de operação, podem ser supervisionados e analisados com respeito ao desempenho e tempo de vida do sistema de armazenamento de energia.

Abstract

Systems of Multiple Sources of Energy (SMSEs) are electric systems composed by two or more sources of energy, renewable and not renewable, to generate electrical energy. Isolated SMSEs, usually for economical reasons, use energy storage systems based on Lead-acid batteries. However, Lead-acid batteries have its useful lifetime directly related with the number of charge and discharge cycles to the which they are submitted, operation temperature, time with low state of charge, incomplete charge, etc. Therefore, predicting the lifetime of Lead-acid batteries in these operation conditions, is a difficult task. Hybrid Systems (HSs), are systems where the behavior is determined by the interaction among two dynamics: a continuous and other to discrete events. In this work, SMSEs are modeled and analyzed like HSs by the use of the Differential Hybrid Petri Nets. In this manner, the objective is to study SMSEs by the use of methods that take into account the interactions among their dynamics, aiding the planners of these systems during the specification phases, development and project. In summary, SMSEs with different operating profiles, depending on the complexity of the system and operation strategy, can be supervised and analyzed with regard to their impact on the performance and lifetime of the energy storage system.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Introdução	1
1.2	Sistemas Híbridos	3
1.3	Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia	5
1.4	Trabalhos Correlatos	8
1.5	Motivação do Estudo	12
1.6	Objetivos da Tese	13
1.7	Organização do Documento	14
2	Sistema de Armazenamento de Energia	15
2.1	Introdução	15
2.2	Tecnologia das Baterias	16
2.2.1	Bancos de Baterias	18
2.3	Baterias chumbo-ácido	20
2.3.1	Processo de Carga-Descarga	20
2.3.2	Tipos de Baterias Chumbo-Ácido	24
2.4	Fatores de Estresse e Mecanismos de Envelhecimento	26
2.5	Métodos de Carga de Baterias Chumbo-Ácido	29
2.6	Supervisão e Controle de Bancos de Baterias	32
3	Modelagem de Baterias Chumbo-Ácido	34
3.1	Introdução	34
3.2	Modelagem de Baterias Chumbo-Ácido	34
3.2.1	Classificação dos Modelos quanto à Complexidade	35

3.2.2	Classificação dos Modelos quanto à Finalidade	35
3.3	Modelo de desempenho Copetti-Murillo	36
3.3.1	Circuito Equivalente	37
3.3.2	Estado de Carga	37
3.3.3	Estado de Energia	38
3.3.4	Zonas de Trabalho da Bateria	39
3.3.5	Transição entre Carga/Descarga ou Descarga/Carga	42
3.4	Modelo de tempo de vida Shepherd-Schiffer	42
3.4.1	Descrição do Modelo	43
3.4.2	Características de Tensão e Corrente	45
3.4.3	Corrente de Gaseificação e Estado de Carga	46
3.4.4	Corrosão da Grade Positiva	47
3.4.5	Degradação da Massa Ativa	48
3.4.6	Evolução no Tempo dos Parâmetros Afetados pelo Envelhecimento	52
4	Formalismo Redes de Petri Híbridas Diferenciais	54
4.1	Introdução	54
4.2	Modelagem e Simulação de Sistemas Híbridos com Redes de Petri	54
4.3	Redes de Petri Híbridas Diferenciais	58
4.3.1	Marcação de uma RPHD	61
4.3.2	Mapa de Temporização	62
4.3.3	Condições Particulares para a estrutura de uma RPHD	62
4.3.4	Regras de Evolução	64
4.3.5	Representação Matricial da Dinâmica a Eventos Discretos	68
4.3.6	Conjunto de Tempo Híbrido	69
4.4	Modelando SHs com RPHDs	71
4.4.1	Modelando Comportamentos Híbridos Básicos	76
4.4.2	Estruturas Particulares de Modelagem	78
4.4.3	Composição de Modelos RPHDs	81

5	Controle Supervisório de Sistemas Híbridos	83
5.1	Introdução	83
5.2	Controle Supervisório de Sistemas Híbridos	84
5.3	Controle Supervisório de SHs com as RPHDs	86
5.3.1	Estrutura do SH/Supervisor	86
5.3.2	Vetores V_C e V_D	88
5.3.3	Metodologia de Construção do Supervisor	89
5.4	Exemplo: Supervisão da Recarga de uma Bateria Chumbo-Ácido	90
6	Modelagem, Simulação e Supervisão de SMFEs utilizando as RPHDs	100
6.1	Introdução	100
6.2	Dimensionamento do SMFE isolado	101
6.3	Especificações Gerais de Operação do SMFE isolado	102
6.4	Modelos RPHDs dos Subsistemas do SMFE Isolado	103
6.4.1	Gerador FV e Aerogerador	103
6.4.2	Banco de Baterias e Controlador de Carga/Descarga	104
6.4.3	Carga	106
6.5	Modelo RPHDs do SMFE isolado	107
6.6	Exemplos de simulação	111
6.6.1	Exemplo de Simulação da Operação do SMFE	111
6.6.2	Exemplo de Simulação de Desempenho do BB	114
6.6.3	Exemplo de Simulação do Tempo de Vida do BB	117
6.6.4	Exemplo de Simulação de Supervisão do BB	120
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	125
7.1	Conclusões e Contribuições	125
7.2	Trabalhos Futuros	127
A	Complemento do modelo RPHDs	129
A.1	Conjunto de Marcações Discretas do modelo RPHD utilizado no Capítulo 6	130
A.2	Grafo de Alcançabilidade Discreto do modelo RPHD utilizado no Capítulo 6 . . .	131

B Componentes de SMFEs	132
B.1 Introdução	132
B.2 Energia Fotovoltaica	133
B.3 Energia Eólica	142
B.4 Sistema de Condicionamento de Potência	148
B.5 Seguidor de Ponto de Máxima Potência	153
B.6 Configurações	158
B.7 Estratégias de Operação	160
B.8 Ferramentas de Projeto e Simulação de SMFEs	160
C Circuito Integrado bq2031	164
D Publicações Produzidas	168
Referências Bibliográficas	170

Nomenclatura

— Baterias

C	Capacidade da bateria	[Ah]
C_{BB}	Capacidade total do banco de baterias	[Ah]
C_n	Capacidade nominal da bateria	[Ah]
DOD	Profundidade de descarga da bateria	[%]
DOD_{BB}	Profundidade de descarga do banco de baterias	[%]
I_{bat}	Corrente da bateria	[A]
I_{BB}	Corrente do banco de baterias	[A]
I_n	Corrente nominal da bateria	[A]
NB_P	Quantidade de baterias em paralelo no banco de baterias	
NB_S	Quantidade de baterias em série no banco de baterias	
SOC	Estado de carga da bateria	[%]
SOC_{BB}	Estado de carga do banco de baterias	[%]
T	Temperatura de trabalho da bateria	[°C]
V_{bat}	Tensão da bateria	[V]
V_{BB}	Tensão do banco de baterias	[V]
V_{co}	Tensão de corte da bateria	[V]
V_n	Tensão nominal da bateria	[V]

— Modelo de desempenho: modelo Copetti-Murillo

α_c	Coeficiente de temperatura	$[\text{°C}^{-1}]$
β_c	Coeficiente de temperatura	$[\text{°C}^{-2}]$
ΔT	Varição de temperatura na bateria	$[\text{°C}]$
η_c	Eficiência de carga	
$C_{nominal}$	Capacidade nominal da bateria	$[\text{Ah}]$
$I\delta$	Valor limite de corrente	$[\text{A}]$
$I_{nominal}$	Corrente de descarga correspondente a $C_{nominal}$	$[\text{A}]$
LOE	Nível de energia	$[\%]$
$V_{cdc}(t)$	Tensão de transição entre carga/descarga	$[\text{V}]$
V_c	Tensão de carga da bateria	$[\text{V}]$
V_{dc}	Tensão de descarga da bateria	$[\text{V}]$
V_{ec}	Tensão máxima da bateria	$[\text{V}]$
V_g	Tensão de gaseificação da bateria	$[\text{V}]$
V_{sc}	Tensão de sobrecarga da bateria	$[\text{V}]$

— **Modelo de tempo de vida: modelo Shepherd-Schiffer**

ΔW	Espessura da camada de corrosão	
ρ_{corr}	Resistência da camada de corrosão	$[\Omega]$
ρ_c	Resistência interna agregada de carga	$[\Omega\text{Ah}]$
ρ_d	Resistência interna agregada de descarga	$[\Omega\text{Ah}]$
C_{corr}	Perda de capacidade por corrosão	$[\text{Ah}]$
C_c	Capacidade normalizada de carga	$[\%]$
C_{deg}	Perda de capacidade por degradação	$[\text{Ah}]$
C_d	Capacidade normalizada de descarga	$[\%]$
C_N	Capacidade nominal da bateria	$[\text{Ah}]$
c_T	Coeficiente de temperatura	$[\text{K}^{-1}]$

c_u	Coeficiente de tensão	$[V^{-1}]$
g	Constante de proporcionalidade do eletrólito	$[V]$
I_{dch}	Corrente de descarga	$[A]$
$I_{gas,0}$	Corrente de gás normalizada para 100 Ah	$[mA]$
I_{gas}	Corrente de gaseificação da bateria	$[A]$
I_{ref}	Corrente de referência, normalmente igual a I_{10}	$[A]$
L	Tempo de vida em flutuação	$[Anos]$
n_*	Número de recargas ruins	
$T_{gas,0}$	Temperatura nominal para gaseificação	$[^{\circ}C]$
U	Tensão terminal da célula	$[V]$
U_0	Tensão de circuito aberto da célula completamente carregada	$[V]$
$U_{corr,0}$	Tensão de corrosão para uma bateria completamente carregada	$[V]$
$U_{corr}(t)$	Tensão de corrosão da bateria	$[V]$
$U_{gas,0}$	Tensão nominal para gaseificação	$[V]$
z	Número de cristais de sulfato de chumbo	
z_*	Altura da bateria	$[cm]$
Z_{IEC}	Número de ciclos para condições padrão	
Z_N	Número de ciclos nominais	

— **Redes de Petri Híbridas Diferenciais**

Δt	Intervalo de tempo
$\dot{\mathbf{X}}$	Derivada no tempo do vetor de estado contínuo \mathbf{X}
\emptyset	Conjunto vazio
\mathbb{N}	Números naturais
$\mathbb{R}^{\geq 0}$	Conjunto dos números reais positivos
\mathbb{R}	Números reais

\mathbf{U}	Vetor de entrada contínua do sistema híbrido
\mathbf{X}	Vetor de estado contínuo associado ao lugar diferencial P_i
\mathcal{T}	Mapa de temporização para as transições discretas
τ	Passo de integração
θ_k	Instante de tempo do início de um intervalo de tempo I_k
θ'_k	Instante de tempo do final de um intervalo de tempo I_k
$\bullet P$	Conjunto de transições predecessoras de um lugar P_i
$\bullet T$	Conjunto de lugares predecessores de uma transição T_j
A_I	Conjunto de arcos direcionados de tipo inibidor
A_N	Conjunto de arcos direcionados de tipo normal
A_T	Conjunto de arcos direcionados de tipo teste
d_j	Tempo de atraso associado às transições discretas
H_{P_i, T_j}	Função de habilitação de uma transição discreta T_j
I_k	Intervalo de tempo de um conjunto de tempo híbrido
J_{T_j, P_i}	Função de junção de uma transição discreta T_j
l	Dimensão do vetor de estado contínuo
m	Cardinalidade de T_D
$M'_D(t)$	Nova marcação discreta da rede no tempo t
$M(t)$	Marcação da rede no tempo t
M_0	Marcação inicial da rede em $t = 0$
$m_C(P_i)(t)$	Marcação do lugar diferencial P_i no tempo t
$M_C(t)$	Marcação contínua da rede no tempo t
$m_D(P_i)(t)$	Marcação do lugar discreto P_i no tempo t
$M_D(t)$	Marcação discreta da rede no tempo t
n	Cardinalidade de P_D

- P^\bullet Conjunto de transições sucessoras de um lugar P_i
- P_{DF} Conjunto finito de lugares diferenciais
- P_D Conjunto finito de lugares discretos
- P_i Lugar discreto ou diferencial
- $Pos_{DDF}(P_i, T_j)$ Função que define os arcos normais de uma transição diferencial para um lugar discreto
- $Pos_{DF}(P_i, T_j)$ Função que define os arcos normais de uma transição diferencial para um lugar diferencial
- Pos_D Matriz de incidência posterior discreta
- $Pos_D(P_i, T_j)$ Função que define os arcos normais de uma transição discreta para um lugar discreto
- $Pre_{DDF}(P_i, T_j)$ Função que define os arcos normais de um lugar discreto para uma transição diferencial
- Pre_D Matriz de incidência anterior discreta
- $Pre_D(P_i, T_j)$ Função que define os arcos normais de um lugar discreto para uma transição discreta
- $Pre_I(P_i, T_j)$ Função que define os arcos inibidores de um lugar discreto para uma transição discreta
- q Cardinalidade de T_{DF}
- r Cardinalidade de P_{DF}
- t Parâmetro de tempo absoluto
- T^\bullet Conjunto de lugares sucessores de uma transição T_j
- T_{DF} Conjunto finito de transições diferenciais
- T_D Conjunto finito de transições discretas
- T_j Transição discreta ou diferencial
- x_k Variável de estado contínuo

— **Controle Supervisório de Sistemas Híbridos com as RPHDs**

λ_{T_j}	Operador de habilitação da transição discreta T_j
ρ_{T_j}	Operador de execução da função de junção de uma transição discreta T_j
H_{T_j}	Função de habilitação associada a uma transição discreta T_j
J_{T_j}	Função de junção associada a uma transição discreta T_j
M_C	Marcação contínua do SH
$M_{D_{SH}}$	Marcação discreta do sistema híbrido supervisionado
$M_{D_{SUP}}$	Marcação discreta do supervisor
M_D	Marcação discreta do SH/Supervisor
V_C	Vetor de controle do disparo das transições discretas do supervisor
V_D	Vetor das transições discretas disparadas no supervisor

— **Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia**

I_{c_0}	Valor inicial de corrente da carga	[A]
I_c	Corrente da carga	[A]
P_{c_0}	Valor inicial de potência da carga	[W]
$P_{c_{nom}}$	Potência nominal da carga	[W]
P_c	Potência da carga	[W]
P_{FV_0}	Valor inicial de potência FV gerada	[W]
P_{FV}	Potência FV gerada	[W]
P_{GE_0}	Valor inicial de potência eólica gerada	[W]
P_{GE}	Potência eólica gerada	[W]
T_{amb}	Temperatura ambiente	[°C]

— **Energia Fotovoltaica**

G	Irradiância solar	[W/m ²]
G^r	Irradiância solar de referência	[W/m ²]

I	Corrente elétrica gerada pela célula FV	[A]
I_d	Corrente elétrica que passa pelo diodo	[A]
I_M	Corrente elétrica fornecida por um módulo FV	[A]
I_o	Corrente reversa máxima de saturação do diodo	[A]
I_P	Corrente elétrica fornecida por um painel FV	[A]
I_p	Corrente elétrica que passa pela resistência paralela	[A]
I_{sr}	Corrente FV gerada pela célula FV nas condições de referência	[A]
I_s	Corrente FV gerada pela célula FV	[A]
NC_P	Quantidade de ramos em paralelo num módulo FV	
NC_S	Quantidade de células em série, por ramo, num módulo FV	
NM_P	Quantidade de módulos em paralelo num painel FV	
NM_S	Quantidade de módulos em série, por ramo, num painel FV	
P_C	Potência elétrica fornecida por uma célula FV	[W]
P_M	Potência elétrica fornecida por um módulo FV	[W]
P_P	Potência elétrica fornecida por um painel FV	[W]
R_p	Resistência parasita paralela	[Ω]
R_s	Resistência parasita série	[Ω]
T_C	Temperatura de operação de uma célula FV	[$^{\circ}$ K]
V	Tensão no terminais de uma célula FV	[V]
V_M	Tensão nos terminais de um módulo FV	[V]
V_P	Tensão nos terminais de um painel FV	[V]
V_t	Potencial térmico	[V]
— Energia Eólica		
β	Ângulo de ataque da pá da turbina	[$^{\circ}$]
λ	TSR - tip speed ratio	

Ω	Velocidade angular do eixo	[rad/s]
ω	Frequência angular elétrica	[rad/s]
ρ	Densidade do ar	[kg/m ³]
C_p	Coeficiente de potência da turbina eólica	
E	Força eletromotriz gerada por fase	[V]
I_{cc}	Corrente de saída do conversor CA-CC trifásico	[A]
I_f	Corrente de fase do gerador elétrico	[A]
k	Amplitude do enlace de fluxo	[Vs]
L_s	Reatância síncrona do gerador elétrico	[H]
P	Número de pólos do gerador elétrico	
P_m	Potência mecânica capturada pela turbina eólica	[W]
P_t	Potência gerada pelo gerador elétrico	[W]
r	Comprimento da pá da turbina	[m]
R_S	Resistência de estator	[Ω]
V_{cc}	Tensão na saída do conversor CA-CC trifásico	[V]
V_f	Tensão de fase do gerador elétrico	[V]
$V_{v_{ci}}$	Velocidade do vento que provoca a partida da turbina eólica	[m/s]
$V_{v_{co}}$	Velocidade de vento que provoca o corte da turbina eólica	[m/s]
V_v	Velocidade do vento	[m/s]

— **CI bq2031**

I_{COND}	Corrente de pré-carga da bateria	[A]
I_{FLT}	Corrente de carga de flutuação da bateria	[A]
I_{MAX}	Corrente máxima de carga da bateria	[A]
I_{MIN}	Corrente mínima de retenção de carga da bateria	[A]
I_{SNS}	Corrente de carga da bateria	[A]

T_{MAX}	Temperatura máxima para carga da bateria	[°C]
T_{MIN}	Temperatura mínima para carga da bateria	[°C]
t_{QT1}	Tempo limite para o teste de qualificação 1	[s]
t_{QT2}	Tempo limite para o teste de qualificação 2	[s]
V_{BAT}	Tensão da bateria	[V]
V_{BLK}	Tensão de equalização da bateria	[V]
V_{CELL}	Tensão de cada célula da bateria	[V]
V_{FLT}	Tensão de flutuação da bateria	[V]
V_{HCO}	Limite de alta tensão de corte	[V]
V_{LCO}	Limite de baixa tensão de corte	[V]
V_{MIN}	Tensão mínima para início da carga da bateria	[V]

— **Acrônimos e Abreviaturas**

A/D	Conversor analógico/digital
Ag	Elemento químico prata
AM	Massa de ar atmosférico
B	Elemento químico boro
BB	Banco de baterias
CA	Corrente alternada
Ca	Elemento químico cálcio
CC	Corrente contínua
CCD	Controlador de carga/descarga de BB
CI	Circuito integrado
D	Razão cíclica do conversor estático
D/A	Conversor digital/analógico
DBT	Limite para desconexão por baixa tensão

FV	Fotovoltaico
GSIP	Gerador síncrono de ímãs permanentes
HSP	Horas de Sol pleno
P	Elemento químico fósforo
PWM	Pulse width modulation
RBT	Limite para reconexão por baixa tensão
RPHD	Rede de Petri Híbrida Diferencial
RRT	Limite para reconexão por regulação de tensão
RT	Limite para regulação de tensão
SAE	Sistema de armazenamento de energia
Sb	Elemento químico antimônio
SCP	Sistema de condicionamento de potência
Se	Elemento químico selênio
SED	Sistema dinâmico a eventos discretos
SGB	Sistema de gerenciamento de baterias
SH	Sistema dinâmico híbrido
Si	Elemento químico silício
SMFE	Sistemas de múltiplas fontes de energia
SPMP	Seguidor de ponto de máxima potência
SVC	Sistema dinâmico de variáveis contínuas
UPS	Uninterruptible power supply

Lista de Tabelas

3.1	Condições para as zonas de trabalho de uma bateria.	40
3.2	Parâmetros da bateria chumbo-ácido utilizada nas simulações de desempenho.	43
3.3	Parâmetros da bateria chumbo-ácido utilizada nas simulações de tempo de vida.	53
4.1	Conexões possíveis para modelar SHs com as RPHDs.	75
5.1	Lugares do modelo RPHDs da Figura 5.4.	95
5.2	Transições do modelo RPHDs da Figura 5.4.	96
6.1	Lugares dos modelos RPHDs da Figura 6.2.	104
6.2	Transições dos modelos RPHDs da Figura 6.2.	104
6.3	Lugares dos modelos RPHDs da Figura 6.3.	105
6.4	Transições dos modelos RPHDs da Figura 6.3.	105
6.5	Lugares dos modelos RPHDs da Figura 6.4.	107
6.6	Transições dos modelos RPHDs da Figura 6.4.	107
6.7	Resultados de simulação: valores finais dos parâmetros de cada bateria do BB.	118
6.8	Resultados de simulação: valores finais dos parâmetros de cada bateria do BB.	124
A.1	Conjunto de marcações discretas do modelo RPHD estudado no Capítulo 6.	130
A.2	Grafo de alcançabilidade discreto do modelo RPHD estudado no Capítulo 6.	131

Lista de Figuras

1.1	Definição de sistemas híbridos: (a) SVC - sistema dinâmico de variáveis contínuas, (b) SED - sistema dinâmico a eventos discretos e (c) sistema dinâmico híbrido.	3
1.2	Estrutura simplificada de um SE com SMFEs dos tipos conectado e isolado.	6
1.3	Estrutura básica de um SMFE isolado.	7
2.1	Elementos de uma célula recarregável, adaptado de (Sá Junior, 2004).	16
2.2	Associação de baterias: (a) série, (b) paralela e (c) série-paralela.	19
2.3	Estrutura de uma bateria chumbo-ácido tipo selada (Baterias MOURA, 2007).	21
2.4	Evolução da capacidade de uma bateria em função do número de ciclos e da profundidade de descarga (Macêdo, 2002).	21
2.5	Capacidade de uma bateria chumbo-ácido ($C_{20} = 221$ Ah) em função da corrente de descarga (Baterias MOURA, 2007).	22
2.6	Variação da tensão de uma bateria chumbo-ácido em função da corrente de descarga. C representa a capacidade de descarga da bateria no regime de 20 h. Tensão final de descarga igual a 10,5 V (Baterias MOURA, 2007).	23
2.7	Vida útil em função da temperatura de trabalho (Baterias MOURA, 2007).	23
2.8	Número de ciclos em função da profundidade de descarga (Hauschild, 2006).	24
2.9	Tensão e corrente da bateria durante o processo de carga constante (Lazzarin, 2006).	30
2.10	Ciclo típico de carga pulsada (Nguyen e Bushnell, 2003).	31
2.11	Carga pulsada “Burp” (Nguyen e Bushnell, 2003).	32
3.1	Circuito equivalente básico para uma bateria (Guasch e Silvestre, 2003).	37

3.2	(a) corrente elétrica I_{bat} na bateria; (b) zonas de trabalho em função da tensão da bateria.	39
3.3	Diagrama simplificado do modelo Shepherd-Schiffer (Schiffer et al., 2007).	44
3.4	Diagrama de fluxo do modelo FhG/Risø (Bindner et al., 2005).	44
3.5	Fator de peso para a contagem de ciclos de recargas ruins (Schiffer et al., 2007).	51
4.1	Lugares e transições de uma RPHD.	58
4.2	Tipos de arcos de uma RPHD.	59
4.3	Condição particular de uma RPHD para garantir a integridade da marcação de lugares discretos conectados a transições diferenciais, neste caso a marcação de P_1	63
4.4	Condição particular de uma RPHD. (a) conexão entre uma transição diferencial e um lugar diferencial; (b) evolução de $m_C(P_2)(t) = \mathbf{X} = [x]$	64
4.5	Exemplos de lugares de fusão numa RPHD: (a) discretos e (b) diferenciais.	64
4.6	(a) Exemplo de modelo RPHDs de um BB. (b) Evolução contínua do SOC (%) resultante do disparo da transição diferencial T_3 durante 20 h.	67
4.7	Exemplo de modelo RPHD: prioridade no disparo das transições diferenciais.	68
4.8	Exemplo de conjunto de tempo híbrido $\theta = \{[\theta_k, \theta'_k]\}_{k=0}^5$	70
4.9	Exemplo de modelagem da dinâmica a eventos discretos de uma RPHD.	72
4.10	Exemplo de modelagem de uma dinâmica contínua de uma RPHD.	72
4.11	Exemplo de modelagem da interação entre as dinâmicas de uma RPHD. (a) Inclusão de arcos normais; e (b) Inclusão de arcos teste.	74
4.12	Modelo RPHD para um <i>Switch</i> . (a) Autônomo. (b) Controlado.	77
4.13	Um modelo RPHD para um <i>Jump</i> . a) Autônomo. b) Controlado.	77
4.14	Modelo RPHD para um SH sequencial.	78
4.15	Modelo RPHD para um SH com concorrência e sincronização.	79
4.16	Modelo RPHD para um SH com conflito e prioridade.	80
4.17	Exemplo de composição de modelos RPHDs.	81
5.1	Estrutura genérica para controle supervisorio (Leal, 2005).	84
5.2	Comportamento do conjunto planta-interface como um SED (Leal, 2005).	85
5.3	Estrutura de controle supervisorio utilizando as RPHDs.	86

5.4	Modelos RPHDs: (a) supervisor de carga da bateria e (b) bateria.	91
5.5	Grafo de alcançabilidade das marcações discretas (estados discretos) do modelo RPHD do SH/Supervisor mostrado na Figura 5.4.	97
5.6	Grafo de alcançabilidade das marcações discretas (estados discretos) resultante da ação supervisor RPHD mostrado na Figura 5.4 (a).	98
5.7	Simulação do modelo RPHD mostrado na Figura 5.4: corrente da bateria. . .	98
5.8	Simulação do modelo RPHD mostrado na Figura 5.4: tensão da bateria. . .	99
5.9	Simulação do modelo RPHD mostrado na Figura 5.4: <i>SOC</i> da bateria. . . .	99
6.1	Estrutura básica do SMFE isolado estudado neste trabalho.	101
6.2	Modelos RPHDs: (a) Gerador FV e (b) Aerogerador.	104
6.3	Modelos RPHDs: (a) Banco de baterias e (b) Controlador de Carga/Descarga.	105
6.4	Modelos RPHDs para a carga principal.	106
6.5	Modelo RPHDs de um SMFE isolado composto de cinco subsistemas.	108
6.6	Exemplo de evolução no tempo da variável de estado V_{BB} conforme o modelo RPHDs mostrado na Figura 6.5.	112
6.7	Evolução no tempo de: (a) G , (b) T_{amb} e (c) V_v	115
6.8	Resultados de simulação: (a) Potência total gerada ($P_{FV}+P_{GE}$), (b) Corrente da carga, (c). Estado de carga do BB, (d) Corrente do BB, (e) $V_{BB} \times SOC_{BB}$ e (f) Tensão do BB. Cada (\circ) indica a ocorrência de um, ou mais, eventos discretos.	116
6.9	Cenário 1, evoluções no tempo de: (a) I_{BB} e (b) C_d por bateria.	118
6.10	Cenário 2, evoluções no tempo de: (a) I_{BB} e (b) C_d por bateria.	119
6.11	Cenário 3, evoluções no tempo de: (a) I_{BB} e (b) C_d por bateria.	119
6.12	Modelos RPHDs: (a) Supervisor de carga/descarga do BB e (b) SH supervisionado e controlado.	121
6.13	Resultados de simulação: evoluções no tempo de I_{BB} e V_{BB} . (a) e (b) para o cenário 1; e (c) e (d) para o cenário 2. Cada (\circ) indica a ocorrência de um, ou mais, eventos discretos.	122

6.14	Resultados de simulação: evoluções no tempo de I_{BB} e V_{BB} . (a) e (b) para o cenário 1; e (c) e (d) para o cenário 2. Cada (o) indica a ocorrência de um, ou mais, eventos discretos.	123
6.15	Resultados de simulação: evoluções no tempo de C_d . (a) para o cenário 1 e (b) para o cenário 2.	124
B.1	Estrutura básica de um SMFE isolado.	132
B.2	Decomposição da radiação solar (Blasques, 2005).	134
B.3	Esquema simplificado de uma célula FV (Macêdo, 2002).	135
B.4	Modelo elétrico de uma célula FV (Castro, 2007).	137
B.5	Curva I-V e P-V de uma célula FV (Castro, 2007).	138
B.6	Estrutura básica de um módulo FV composto de $NC_P \times NC_S$ células.	140
B.7	Estrutura básica de um painel FV composto de $NM_P \times NM_S$ módulos.	141
B.8	Painel FV em operação.	141
B.9	Aerogeradores do tipo: (a) Eixo horizontal de 10 kW, (b) Eixo Horizontal de 1,5 MW e (c) Eixo vertical.	144
B.10	Curva de potência de uma turbina eólica de 850 kW (Blasques, 2005).	144
B.11	C_p em função de λ e β . $C_{p_{max}}$ ocorre quando $\lambda = \lambda_{nom}$ (Tafticht, Agbossou, Chériti e Doumbia, 2006).	146
B.12	P_m em função de Ω e V_v (Tafticht, Agbossou, Chériti e Doumbia, 2006).	146
B.13	Conexão entre o GSIP e o barramento CC através de um retificador trifásico.	147
B.14	Tipos de chaveamento utilizados pelos CCDs: (a) série e (b) shunt (Blasques, 2005).	150
B.15	Curvas de carga e descarga de uma bateria controlada pelo método liga/desliga (Glavin e Hurley, 2006).	150
B.16	Simbologia utilizada para representar os tipos de conversores estáticos: (a) CC-CC, (b) CA-CC e (c) CC-CA.	151
B.17	Diagrama do sistema de geração solar.	154
B.18	Variação da potência de um painel FV com a tensão.	154
B.19	SPMP Solar - Fluxograma do algoritmo incremento de condutância.	155

B.20	Potência fornecida por um painel FV para um período de 24 h: (a) sem SPMP e (b) com SPMP.	155
B.21	Diagrama do sistema de geração eólica.	156
B.22	Variação da potência de uma turbina eólica com a velocidade.	156
B.23	Fluxograma do algoritmo de SPMP eólico.	157
B.24	Potência fornecida por um aerogerador para um período de 24 h: (a) sem SPMP e (b) com SPMP.	157
B.25	Configurações utilizadas em SMFEs: (a) isolada e (b) conectada à rede. . . .	158
B.26	Diagrama de um SMFE isolado.	159
C.1	CI bq2031 - Algoritmo de carga 1 (Unitrode, 1999).	166
C.2	CI bq2031 - Algoritmo de carga 2 (Unitrode, 1999).	167
C.3	CI bq2031 - Algoritmo de carga 3 (Unitrode, 1999).	167

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

A necessidade de dominar fontes de energia pelo homem começou por volta de 500.000 anos atrás, quando o homem primitivo passou a controlar o fogo, aproveitando esta forma de energia para aquecê-lo, afastar predadores e preparar alimentos. Desde então o homem foi descobrindo novas fontes, formas de energia e criando dispositivos para utilizá-las a seu favor. As fontes de energia tornaram-se vitais para a sobrevivência e a evolução do homem. Portanto, devido a grande importância da energia para a humanidade nos dias de hoje, são incessantes as pesquisas que visam o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de obtenção de energia, com o objetivo principal de conciliar grande capacidade de geração, baixo custo e mínimo impacto ao meio ambiente (Rosemback, 2004).

A preocupação crescente com o aquecimento global e sua influência nas alterações climáticas do planeta, também têm estimulado o desenvolvimento e utilização de tecnologias de geração limpa de energia elétrica. Num futuro próximo, os sistemas elétricos deverão incluir uma quantidade considerável de usinas geradoras que utilizarão fontes de energia renováveis, tais como painéis solares ou unidades eólicas, entre outras (Patel, 2006).

É necessário buscar novas tecnologias de geração elétrica capazes de garantir o abastecimento da demanda futura, permitindo diversificar as tecnologias de geração utilizadas no país, de forma, a garantir o abastecimento energético do setor elétrico brasileiro e diminuir a dependência em relação a um único recurso energético, o que agrega robustez e confiabili-

dade ao setor. Da mesma forma, a busca pela viabilização de tecnologias limpas e renováveis alternativas visa diminuir a necessidade crescente de utilizar recursos fósseis para garantir o abastecimento da demanda futura de eletricidade (Blasques, 2005).

Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia (SMFEs) são sistemas elétricos compostos de duas ou mais fontes de energia, renováveis e não renováveis, com o objetivo básico de gerar energia elétrica. Uma das principais vantagens dos SMFEs é a possibilidade do aproveitamento conjunto e otimizado dos recursos locais disponíveis, podendo garantir assim altos níveis de qualidade e confiabilidade do atendimento, com redução de custos de investimento e operação (Blasques, 2005).

Baterias chumbo-ácido, devido o seu baixo custo em comparação com outros tipos de baterias e sua grande disponibilidade no mercado, são as mais utilizadas em sistemas de armazenamento de energia de SMFEs. Porém, baterias chumbo-ácido têm o seu tempo de vida diretamente relacionado com o número de ciclos de carga e descarga a que elas são submetidas, temperatura de operação, tempo com baixo estado de carga, carga incompleta, sulfatação, corrosão e estratificação do eletrólito. Além disso, bancos de baterias chumbo-ácido apresentam custo alto e tempo de vida reduzido quando comparados com os outros componentes de um SMFE (Bindner et al., 2005).

Portanto, prever o tempo de vida de baterias chumbo-ácido nestas condições de operação, é uma tarefa relativamente difícil. Modelos de baterias são utilizados para modelar o desempenho, a degradação e o tempo de vida de baterias. Estes modelos constituem-se em ferramentas úteis para o projeto de sistemas alimentados por baterias, porque permitem a análise do comportamento de baterias sob diferentes especificações de projeto (Lahiri et al., 2002). Neste trabalho, enfatiza-se a supervisão e a análise do desempenho e tempo de vida de sistemas de armazenamento de energia com baterias chumbo-ácido em SMFEs.

Sistemas híbridos, são sistemas nos quais o comportamento é determinado pela interação entre duas dinâmicas: uma contínua e outra a eventos discretos (Dang, 2000). Neste trabalho, os SMFEs são modelados e analisados como sistemas híbridos através da utilização de Redes de Petri Híbridas Diferenciais (Sousa et al., 2005b; Sousa, 2005; Sousa, 2006; Sousa et al., 2007; Sousa, 2007). Desta forma, pretende-se estudar os SMFEs através da utilização de métodos de modelagem e análise oriundos da ciência da computação. O objetivo é fornecer uma nova metodologia de modelagem e simulação para auxiliar os projetistas destes

sistemas durante as fases de especificação, desenvolvimento e projeto.

A estrutura deste capítulo está organizada da seguinte forma: na próxima seção os sistemas híbridos são apresentados; na Seção 1.3 apresentam-se as principais características dos SMFEs; os trabalhos correlatos são apresentados na Seção 1.4; na Seção 1.5 é apresentada a motivação para o estudo realizado; a seguir os objetivos desta tese são apresentados na Seção 1.6; e, por fim, na Seção 1.7 mostra-se a forma com que este documento está organizado.

1.2 Sistemas Híbridos

De acordo com (Engell, 1998), Sistemas Híbridos (SHs) são sistemas nos quais dinâmicas contínuas e a eventos discretos interagem e suas interações determinam o seu comportamento qualitativo e quantitativo. Eles estão presentes em muitas aplicações, tais como, controle de processos químicos, sistemas biológicos, sistemas de transporte, sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo, robótica, sistemas de fornecimento de energia, sistemas elétricos, redes de sensores e automóveis (Dang, 2000). A Figura 1.1 ilustra a definição de SHs. Note que a trajetória mostrada na Figura 1.1 (c) é o resultado da alternância entre a ocorrência de eventos discretos e evoluções contínuas.

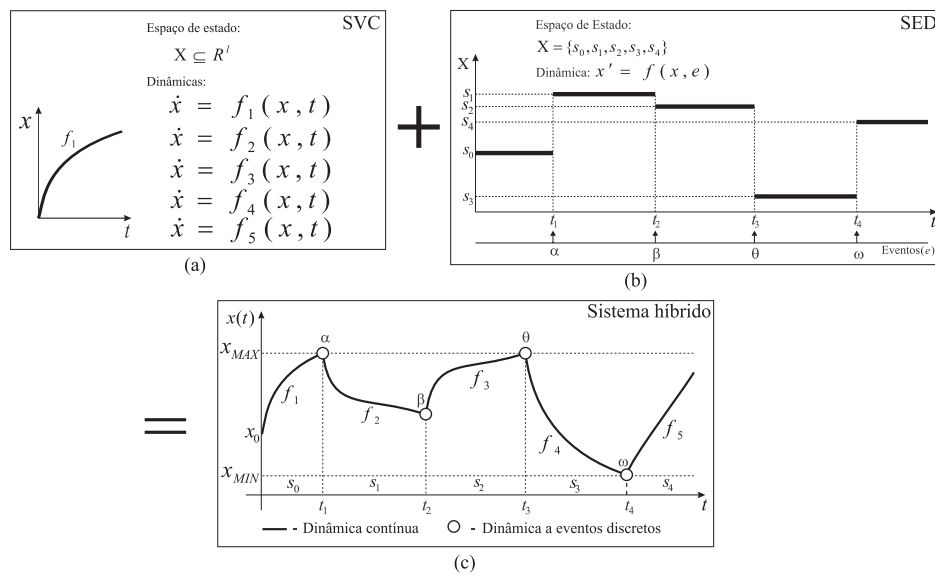


Figura 1.1: Definição de sistemas híbridos: (a) SVC - sistema dinâmico de variáveis contínuas, (b) SED - sistema dinâmico a eventos discretos e (c) sistema dinâmico híbrido.

O estudo de SHs teve início com a utilização de computadores no controle de processos contínuos. Uma das principais motivações foi o interesse em explicitar em um único modelo descontinuidades inerentes a processos tradicionalmente representados por variáveis contínuas, nas quais o comportamento do sistema é modificado de modo abrupto (Villani, 2004).

No passado, os SHs eram freqüentemente abordados de forma que as dinâmicas dirigidas a eventos eram estudadas separadamente das dinâmicas dirigidas pelo tempo. As técnicas disponíveis para a modelagem, análise e síntese de controladores, bem como as ferramentas associadas a estas técnicas, não eram capazes de tratar conjuntamente tais dinâmicas. As primeiras eram geralmente modeladas por autômatos ou redes de Petri e as últimas por equações diferenciais ou de diferenças. Assim, sistemas de natureza híbrida eram convertidos em entidades puramente contínuas ou puramente discretas, de acordo com o objetivo a ser alcançado. Entretanto, na maioria dos casos não triviais estas duas dinâmicas interagem de forma significativa, tal que não podem ser desacopladas efetivamente por nenhum tipo de abstração e precisam ser analisadas simultaneamente. Assim, para entender com profundidade o comportamento de um sistema e/ou para alcançar especificações de alto desempenho, em geral torna-se necessário modelar e analisar conjuntamente tais dinâmicas, bem como suas interações (Leal, 2005).

Vários formalismos têm sido propostos com o objetivo de estabelecer uma estrutura matemática que possibilite lidar com cada uma das dinâmicas de um SH, bem como com as interações entre estas. A abordagem de modelagem de SHs seguida pelos cientistas de computação é a de estender o tradicional autômato de estados finitos pela introdução progressiva de dinâmicas contínuas mais complexas. Pesquisadores da área de controle, por outro lado, modelam os SHs pela incorporação de comportamentos discretos dentro das descrições da dinâmica contínua, especificamente, equações diferenciais ordinárias ou equações de diferenças (Dang, 2000).

Entre as estratégias utilizadas para modelar e analisar SHs, este trabalho considera particularmente aquelas que utilizam uma interface para a comunicação entre os dois tipos de modelos, pois a extensão de formalismos discretos leva, em geral, a uma ferramenta com capacidade de modelagem da parte contínua relativamente restrita e específica. O equivalente pode ser afirmado para as extensões de formalismos contínuos (Villani, 2004).

Por outro lado, as estratégias que especificam uma solução a partir da integração de

um formalismo discreto com um formalismo contínuo apresentam maior flexibilidade e poder de modelagem (Villani, 2004). Entre as abordagens deste grupo, considerou-se em especial aquelas onde o formalismo discreto baseia-se em RPs. Esta escolha foi realizada considerando-se as já bem conhecidas características das RPs, tais como a possibilidade de representar: causalidade, eventos e processos concorrentes, sincronização de processos, compartilhamento de recursos, conflitos, etc.

Na classe de SHs considerada neste trabalho, a dinâmica a eventos discretos é definida por eventos gerados quando variáveis do espaço de estados contínuo (ou funções destas) alcançam uma superfície de limiar (valor que atende a uma condição de habilitação) ou devido à restrições de tempo, forçando então transições no estado discreto. A dinâmica contínua, por sua vez, é determinada por um estado discreto, função do estado discreto atual do sistema. Desta forma, neste trabalho foi escolhido o domínio dos eventos discretos como estrutura base de modelagem.

Um histórico dos SHs e uma relação das principais ferramentas computacionais para estudar SHs, são apresentados em (Leal, 2005). O leitor poderá encontrar mais detalhes sobre SHs em (Alur et al., 1995; Branicky, 1995; Dang, 2000; Lygeros, 2004).

1.3 Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia

Os sistemas elétricos (SEs) são responsáveis pela geração, transporte e distribuição de energia elétrica para os consumidores. A disponibilidade de energia elétrica para os consumidores tem sido a chave para o progresso industrial e é essencial para o crescimento no padrão de vida das pessoas ao redor do mundo. A indústria de energia elétrica pode ser considerada, sob alguns aspectos, a maior indústria no mundo. Esta indústria emprega ciência e tecnologia para garantir um alto grau de confiabilidade sem interferir nos sistemas ecológicos ou o meio ambiente (Stevenson, 1986).

SEs são compostos por usinas geradoras de energia, subestações, transformadores elevadores/abaixadores e linhas de transmissão e distribuição. Os geradores transformam uma dada forma de energia em energia elétrica e injetam a potência gerada na rede de transmissão ou em sistemas de distribuição isolados. Entende-se por transmissão a transferência de energia através de linhas, entre um centro gerador e um centro consumidor. A trans-

missão da energia é efetuada em tensões elevadas, caracterizando assim a necessidade dos transformadores (Stevenson, 1986). Na Figura 1.2 é mostrada uma estrutura simplificada de um SE. As letras G, T e D representam os elementos gerador, transformador e disjuntor, respectivamente.

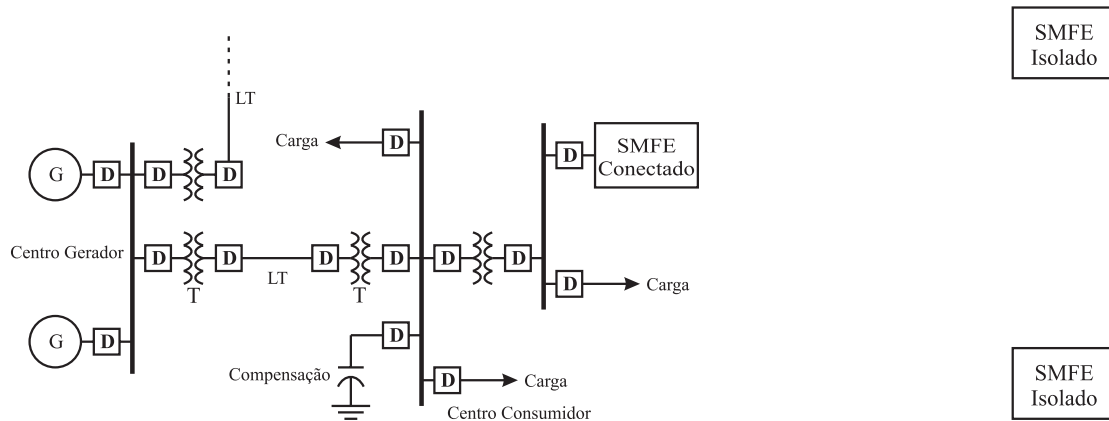


Figura 1.2: Estrutura simplificada de um SE com SMFEs dos tipos conectado e isolado.

SMFEs são SEs formados por duas ou mais fontes de energia para geração de energia elétrica. As fontes de energia renováveis mais comumente utilizadas nesses sistemas são a solar (fotovoltaica) e a eólica. Quando o atendimento é realizado diretamente a uma carga ou a uma mini-rede de distribuição onde não haja o suprimento de eletricidade através do sistema interligado (concessionária de energia), define-se o sistema como SMFE *isolado* (veja a Figura 1.2). Caso o SMFE seja instalado de forma a complementar o sistema interligado, ele é definido como SMFE *conectado* à rede, sendo essa forma de geração é conhecida como geração distribuída (Blasques, 2005).

Geração distribuída (GD) é uma forma estratégica de se instalar pequenas unidades geradoras, de poucos kW até algumas dezenas de MW, próximas aos consumidores. Essas unidades geradoras (SMFEs) podem ou não estar ligadas à rede de distribuição, e têm como principais vantagens uma maior confiabilidade, um maior aproveitamento da energia gerada através da cogeração ou trigeração (produção simultânea de eletricidade, calor e frio), a redução de perdas no transporte dessa energia até o consumidor e o aproveitamento das diversas fontes de energia existentes no local de consumo. Diversas tecnologias podem ser usadas em GD, entre as quais pode-se citar: geração fotovoltaica, geração eólica, geração através de microturbinas, geração através de motores de combustão interna, geração através

células combustível, geração através de pequenas centrais hidrelétricas (Bona e Ruppert Filho, 2004).

Neste trabalho são abordados os SMFEs que utilizam duas fontes de energia, a solar e a eólica, e um sistema de armazenamento de energia. A Figura 1.3, ilustra a estrutura básica do SMFE estudado neste trabalho.

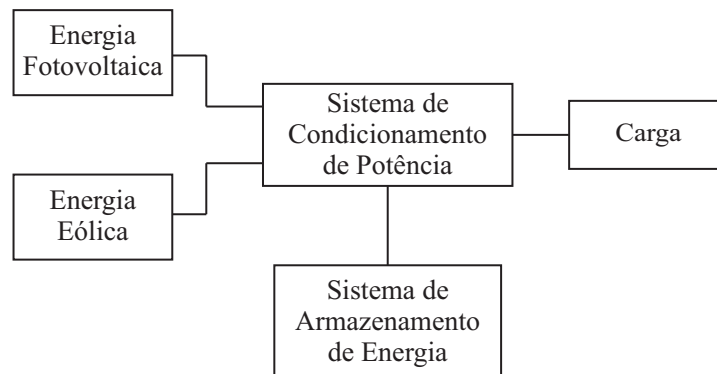


Figura 1.3: Estrutura básica de um SMFE isolado.

No Capítulo 2, apresentam-se os detalhes de sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias, enquanto que no Apêndice B são apresentados os detalhes dos demais componentes de um SMFE isolado. O leitor poderá encontrar mais detalhes sobre o estudo de SEs e SMFEs em (Stevenson, 1986; Dorf, 2001; Blasques, 2005; Hauschild, 2006).

Comportamento Híbrido de SMFEs

SMFEs exibem interações entre as dinâmicas contínua e a eventos discretos. A modelagem e análise de SMFEs tornam-se tarefas desafiadoras quando estas interações são essenciais durante as etapas de projeto e operação desses sistemas (Paruchuri et al., 2005). Estas interações caracterizam-se por (Lin et al., 2006):

- Geradores e seus controladores, sistemas de armazenamento de energia e cargas, exibem comportamentos contínuos que obedecem à leis físicas, e podem ser descritos por equações algébricas e diferenciais;
- Outros equipamentos, tais como conversores estáticos, sistemas de proteção e manobra, sistemas de condicionamento de potência e cargas, exibem comportamentos a

eventos discretos;

- Comportamentos a eventos discretos em SMFEs, normalmente baseiam-se em regras de lógica e dependem de comportamentos contínuos. A topologia de SMFEs e seus modos de operação (carga ligada, carga desligada, gerador solar desconectado, aerogerador conectado), freqüentemente, mudam com a ocorrência de eventos discretos.

1.4 Trabalhos Correlatos

Diversos trabalhos têm aplicado os conceitos e técnicas de modelagem e análise dos SHs no estudo de SEs. Em (Hiskens e Pai, 2000), é proposto um modelo denominado Differential-Algebraic-Discrete (DAD), para modelar SHs. O modelo baseia-se na metodologia apresentada em (Taylor, 1995), sendo consistente com a abordagem de Branicky (Branicky, 1995). Os objetivos deste trabalho são aplicar análise de estabilidade e controle híbrido aos SEs; e explorar as vantagens da abordagem modular na modelagem de sistemas complexos, através da utilização dos conceitos de orientação a objetos. Como estudo de caso, o modelo é aplicado no estudo de um regulador automático de tensão (AVR) de um transformador com comutação de tap em carga. Entretanto, apesar do modelo proposto possuir vários conjuntos de variáveis para lidar com as dinâmicas de um SH e suas interações, o mesmo não permite visualizar as dinâmicas separadamente, nem suas interações. A necessidade de uma representação gráfica é evidente.

Uma extensão ao modelo DAD é apresentada em (Hiskens e Sokolowski, 2001), esta extensão é denominada Differential Switched Algebraic and state-Reset (DSAR). Neste artigo é apresentada uma abordagem orientada a objetos para implementar o modelo DSAR. A implementação da abordagem é realizada utilizando a ferramenta computacional Matlab. Apesar de ser uma extensão em relação a (Hiskens e Pai, 2000), ainda existe a necessidade de uma representação gráfica para ajudar durante o processo de modelagem. Para compensar este fato, os autores utilizam uma RP para modelar a evolução da dinâmica a eventos discretos de um regulador automático de tensão (AVR) de um transformador com comutação de tap em carga. A seguir, é apresentado o modelo DSAR equivalente para esta RP. Conforme é exposto no artigo, cada subsistema de um SE pode ser modelado de forma

independente. Posteriormente, os modelos são integrados através de relações matemáticas entre suas variáveis algébricas. Embora o modelo DSAR seja capaz de modelar e analisar SHs através de simulação, existe uma deficiência na representação explícita das dinâmicas de um SH. Além disso, o modelo não permite a representação de descontinuidades no espaço de estado contínuo, ou seja, efeitos de impulso não podem ser modelados.

Para compensar esta deficiência, em (Hiskens, 2004) é proposto um modelo denominado Differential-algebraic impulsive-switched (DAIS), o qual é uma realização de um autômato híbrido e é composto de um conjunto de equações algébricas diferenciais, modificado para incorporar ações de impulso (estados de reset) e restrições de chaveamento. Nesta artigo é apresentada uma abordagem orientada a objetos para implementar o modelo DAIS. Cada componente do sistema é modelado de forma autônoma. O estudo de caso apresentado é semelhante ao apresentado em (Hiskens e Sokolowski, 2001). Além disso, neste trabalho a modelagem sistemática de SEs é utilizada para facilitar a implementação dos algoritmos para resolver problemas inversos, os quais incluem incerteza e estimação de parâmetros, problemas de valores de fronteira, análise de bifurcação e otimização dinâmica. Este modelo é uma extensão aos modelos DAD e DSAR, principalmente no aspecto matemático.

Em (Hong-Shan et al., 2004), os autores propõem um novo método para aplicar o formalismo RPs Híbridas Generalizadas na modelagem de um sistema de proteção digital usando a linguagem de modelagem orientada a objetos MODELICA (Elmqvist et al., 1999). O formalismo de modelagem GHPN é apresentado com detalhes. Usando o modelo GHPN para um relé de proteção, o comportamento dinâmico interno do sistema de proteção pode ser simulado, e as interações entre o sistema de proteção e o SE que ele protege também são simuladas.

O objetivo deste artigo é apresentar um modelo GHPN de um relé de proteção digital. O modelo é utilizado para descrever a operação deste relé, durante as ocorrências de faltas no sistema, de modo que o projeto e análise do sistema de proteção possa ser tratado através de uma formulação unificada. Como a maioria dos formalismos baseados em RPs para modelar SHs, variáveis contínuas são anexadas (incluídas) à estrutura discreta.

Entretanto, não fica claro como são calculadas as evoluções da dinâmica contínua, ou seja, se a linguagem MODELICA é utilizada para realizar esses cálculos. Embora não seja dito, o formalismo GHPN também baseia-se nos autômatos híbridos. O exemplo apresen-

tado no referido artigo é uma classe particular de RP denominada máquina de estado.

A modelagem de SEs, em geral trata as dinâmicas contínua e a eventos discretos separadamente, ou seja, estas técnicas não possibilitam descrever o comportamento complexo de interação entre essas dinâmicas. Com o propósito de visualizar este comportamento complexo, em (Paruchuri et al., 2005) é proposta uma nova metodologia para a modelagem de SEs usando RPs híbridas (Alla e David, 2004). Estas descrevem SHs, permitindo a modelagem conjunta das dinâmicas contínua e a eventos discretos através de uma linguagem descritiva integrada.

Basicamente, neste artigo é aplicado o formalismo RPs híbridas na modelagem de SEs. Para realizar a modelagem e simulação de SEs, os autores utilizam a ferramenta Visual Object Net ++ (Drath, 1998). Porém, alguns pontos precisam ser destacados no que diz respeito aos exemplos de modelagem apresentados no artigo. Embora a dinâmica a eventos discretos seja apresentada de forma clara, as dinâmicas contínuas envolvidas não são detalhadas. Assim, fica difícil entender o comportamento híbrido do sistema modelado, ou seja, de que forma as dinâmicas interagem.

Em (Foullas, Kyriakopoulos e Vournas, 2004; Foullas, 2005), os autores apresentam uma infraestrutura para a modelagem de SEs utilizando o formalismo Autômato Híbrido com Entrada/Saída (Lynch et al., 2003). O sistema é implementado e simulado utilizando os pacotes Simulink e Stateflow da ferramenta computacional Matlab^{©1}. O objetivo principal da abordagem é capturar o comportamento em regime permanente do sistema após a ocorrência de mudanças de carga e chaveamentos de disjuntores sem levar em conta os transitórios eletromagnéticos envolvidos. Esta abordagem foca no caráter lógico da atuação do sistema de proteção e de como o SE deve ser controlado para evitar-se situações de colapso. Não existe uma preocupação em apresentar a complexidade da dinâmica contínua de um SE, uma vez que a análise é realizada em regime permanente.

Um ponto interessante do trabalho é o formalismo utilizado. Trata-se de um autômato híbrido que permite o compartilhamento de variáveis e ações. Este autômato possui três tipos de variáveis: de entrada, internas e de saída. Além disso, possui três conjuntos de eventos associados às ações do sistema, sendo estes conjuntos também denominados como de

¹Matlab é um produto da MathWorks, Inc.

entrada, interno e de saída. Desta forma, a abordagem utilizada possibilita a visualização do compartilhamento de variáveis e ações através da integração entre as ferramentas Simulink e Stateflow, para modelar a interação entre as dinâmicas de um SH.

No que diz respeito a diagnóstico de faltas em SEs, em (Foullas et al., 2001; Foullas, Kyriakopoulos e Krikelis, 2004; Foullas et al., 2005), os autores apresentam uma metodologia geral para detecção e eliminação de faltas em SHs através da utilização de um diagnosticador. Este é um autômato híbrido que gera um sinal sempre que uma falta ocorre. Novamente, o formalismo utilizado é Autômato Híbrido com Entrada/Saída. As faltas podem ser modeladas como transições discretas partindo de um estado normal para um estado faltoso, bem como um desvio de trajetórias que descrevem a evolução contínua a partir de um conjunto predefinido. Os estados de um SH refletem a situação normal e faltosa de seus componentes. Portanto, faltas são modeladas como mudanças contínuas ou discretas de estado. A principal contribuição desses trabalhos é o diagnóstico de faltas em SEs baseado na teoria de SHs. Entretanto, neste artigo não são apresentados resultados de diagnóstico que demonstrem a eficácia da metodologia apresentada.

Os trabalhos apresentados em (Ferrari-Trecate et al., 2002; Beccuti et al., 2005; Munoz-Hernandez et al., 2005) utilizam a infraestrutura de modelagem denominada Mixed Logical Dynamical (MLD) (Bemporad e Morari, 1999). Esta infraestrutura permite a descrição de várias classes de sistemas, tais como máquinas de estados finitos interagindo com sistemas dinâmicos, sistemas lineares por partes, sistemas que mesclam entradas e estados discretos e contínuos, etc. Nestes trabalhos, os SEs são modelados como SHs.

Um modelo para análise híbrida baseado em Controlled General Hybrid Dynamical Systems (CGHDS) (Branicky, 1995) é proposto em (Wang et al., 2005). Este modelo é utilizado neste trabalho para diagnosticar faltas em SEs.

Em (Ferrarini et al., 2006), os autores propõem um modelo híbrido baseado nas RPs Estocásticas Generalizadas (Marsan et al., 1995) integradas a um simulador contínuo. Este modelo híbrido é aplicado na análise de riscos de diferentes estratégias de proteção em SEs. A linguagem de modelagem orientada a objetos MODELICA (Elmqvist et al., 1999) é utilizada para implementar o modelo híbrido e estocástico proposto. Entretanto, o artigo não apresenta nenhum resultado de simulação.

Estes trabalhos comprovam a relevância da aplicação dos conceitos de SHs no estudo de

SEs. Entretanto, até a data da edição deste texto, os únicos trabalhos relacionando SHs, RPs e SMFEs são os comentados a seguir.

No trabalho apresentado em (Tafticht et al., 2003) é proposto um comando de conversor para SPMP (Seguidor de Ponto de Máxima Potência - veja a Seção B.5) para sistemas de geração fotovoltaicos. Com o objetivo de analisar efetivamente este comando, é proposta uma nova abordagem para modelar conversores de SPMP. Esta abordagem utiliza as RPs híbridas temporizadas (Alla e David, 2004). O modelo RP do conversor é utilizado para simular e comandar o conversor e, além disso, garantir a operação ótima do sistema fotovoltaico.

Em (Sousa e Lima, 2008a) e (Sousa e Lima, 2008c) as Redes de Petri Híbridas Diferenciais (Sousa et al., 2005b; Sousa, 2005; Sousa, 2006; Sousa et al., 2007; Sousa, 2007) são aplicadas na modelagem e simulação de SMFEs. Nestes trabalhos, os SMFEs são compostos de duas fontes de energia renováveis, uma solar e a outra eólica. Além disso, um controlador de carga/descarga é utilizado para supervisionar um banco de baterias chumbo-ácido. Embora a abordagem utilizada nos dois trabalhos seja a mesma, em (Sousa e Lima, 2008a), o desempenho e o tempo de vida do banco de baterias é analisado para diferentes condições de operação. Por outro lado, em (Sousa e Lima, 2008c), somente o desempenho do banco de baterias é analisado. A dinâmica contínua é representada pelos parâmetros das fontes solar e eólica, pelos parâmetros do banco de baterias e pelos parâmetros da carga. Por sua vez, a dinâmica a eventos discretos é representada pelos estados de operação do controlador de carga/descarga, das fontes de energia, do banco de baterias e da carga.

1.5 Motivação do Estudo

Tradicionalmente, os SMFEs têm sido estudados sem levar em conta, de forma explícita, as interações entre as dinâmicas que os compõem. Em outras palavras, os SMFEs não têm sido estudados dentro do contexto de SHs. Portanto, aplicar os conceitos de SHs no estudo de SMFEs possibilita:

- Modelar a dinâmica a eventos discretos levando em conta a influência dos diversos parâmetros contínuos que um SMFE possui;

- Modelar a dinâmica contínua levando em conta os diversos eventos discretos que podem ocorrer num SMFE;
- Representar o funcionamento de um SMFE graficamente e matematicamente dentro de um novo contexto formal;
- Realizar a simulação do funcionamento de um SMFE dentro de um novo contexto de modelagem;
- Responder perguntas sobre o desempenho, o tempo de vida e a viabilidade de sistemas de armazenamento de energia de SMFEs; e
- Realizar a síntese de supervisores para SMFEs.

Nesta tese, pretende-se apresentar uma nova metodologia para o estudo de SMFEs. Desta forma, é possível projetar e dimensionar SMFEs levando em conta o impacto das condições e das estratégias de operação. Além disso, as especificações de operação podem ser implementadas e verificadas de maneira formal, o que resulta na redução do tempo de projeto, bem como da necessidade de reprojetar estes sistemas.

1.6 Objetivos da Tese

Os objetivos desta tese são:

- Caracterizar os SMFEs como uma classe de SHs;
- Apresentar um formalismo baseado em RPs para modelar e simular SHs;
- Aplicar este formalismo na modelagem e simulação de SMFEs; e
- Utilizar modelos precisos de desempenho e tempo de vida de baterias chumbo-ácido para simular o funcionamento de um sistema de armazenamento de energia em SMFEs;
- Aplicar este formalismo na síntese de supervisores de SHs, especificamente, supervisão e controle do sistema de armazenamento de energia de SMFEs.

1.7 Organização do Documento

O restante deste documento está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 apresentam-se as características e conceitos associados aos sistemas de armazenamento de energia que utilizam baterias chumbo-ácido. Além disso, são apresentados os principais fatores de estresse e mecanismos de envelhecimento, os quais afetam o desempenho e o tempo de vida destas baterias. Por fim, são apresentados os principais métodos de carga de baterias chumbo-ácido e como é realizada a supervisão e o controle de bancos de baterias.

O Capítulo 3 trata da modelagem de baterias chumbo-ácido. Para tanto, é apresentada uma revisão bibliográfica do assunto. A seguir, dois modelos são apresentados, um modelo de desempenho e um modelo de tempo de vida. Estes modelos são utilizados ao longo da tese nas simulações de desempenho e tempo de vida de bancos de baterias.

No Capítulo 4 são apresentadas as Redes de Petri Híbridas Diferenciais. Estas RPs foram criadas com o objetivo de modelar e simular SHs. Nesta tese elas são aplicadas na modelagem, simulação e supervisão de SMFEs.

No Capítulo 5 trata-se do controle supervisorio de SHs. Neste capítulo trata-se da síntese de controle supervisorio de SHs através da utilização das Redes de Petri Híbridas Diferenciais.

No Capítulo 6 apresentam-se quatro exemplos para ilustrar a modelagem, a simulação e o controle supervisorio de SMFEs com as Redes de Petri Híbridas Diferenciais.

No Capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e as perspectivas de extensão dos resultados obtidos nesta tese.

No Apêndice A são apresentados o conjunto de marcações discretas e o grafo de alcançabilidade do modelo RPHD para o SMFE estudado no Capítulo 6.

No Apêndice B são apresentadas as principais características dos subsistemas que compõem os SMFEs, com exceção para o sistema de armazenamento de energia, o qual é apresentado no Capítulo 2.

No Apêndice C são apresentadas as principais características e algoritmos do circuito integrado bq2031[©] da Texas Instruments.

No Apêndice D são relacionadas as publicações produzidas ao longo deste trabalho.

Capítulo 2

Sistema de Armazenamento de Energia

2.1 Introdução

Nos SMFEs, o sistema de armazenamento de energia, tem a função de armazenar a energia elétrica gerada pelas fontes primárias para que esta seja utilizada posteriormente, em períodos onde haja escassez de recursos energéticos. De uma maneira geral, podem ser utilizadas várias estratégias para armazenamento de energia: caixas d'água armazenam energia potencial, volantes de inércia armazenam energia cinética, baterias armazenam energia eletroquímica, dentre outras (Blasques, 2005). Além destas, também podem ser utilizadas as células a combustível e supercapacitores (Winter e Brodd, 2004). Neste trabalho, um banco de baterias é utilizado como sistema de armazenamento de energia de um SMFE.

O desempenho e tempo de vida de sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias são problemas importantes em diversos tipos de aplicações. Previsões pobres do tempo de vida de baterias podem levar a incerteza nas viabilidades técnica e econômica de SMFEs (Wenzl et al., 2005).

As baterias chumbo-ácido são as mais utilizadas para armazenamento de energia nos SMFEs devido ao seu baixo e a sua grande disponibilidade no mercado (Bindner et al., 2005). Neste capítulo são apresentadas as principais características das baterias e, de maneira mais detalhada, das baterias chumbo-ácido.

2.2 Tecnologia das Baterias

As baterias, também chamadas de acumuladores eletroquímicos, são classificadas em duas categorias: (i) baterias primárias e (ii) baterias secundárias. Baterias primárias são dispositivos eletroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem a energia elétrica, são descartadas, pois não podem ser recarregadas. Já as baterias secundárias podem ser recarregadas, ou seja, através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais pode-se reverter às reações responsáveis pela geração de energia elétrica e assim recarregar novamente a bateria (Sá Junior, 2004). Os SMFEs, normalmente utilizam baterias secundárias, ou seja, baterias que podem ser recarregadas.

Uma bateria consiste de quatro elementos básicos: um ânodo feito com material que pode contribuir com elétrons, um cátodo que deverá aceitar elétrons, o eletrólito e um separador. A disposição destes elementos é mostrada na Figura 2.1.

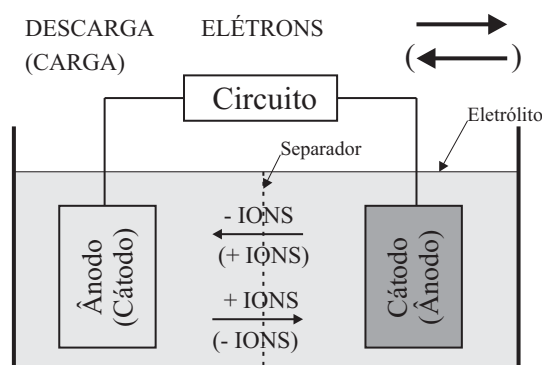


Figura 2.1: Elementos de uma célula recarregável, adaptado de (Sá Junior, 2004).

Durante a descarga da bateria, o ânodo contribui com elétrons para a oxidação, no qual gera íons positivos. Similarmente, o cátodo gera íons negativos no processo de aceitar elétrons. Um elemento chave de uma bateria é o separador entre o ânodo e o cátodo, enquanto permite o fluxo livre dos íons, o fluxo dos elétrons é forçado a trafegar pelo circuito externo, completando o circuito. Em uma célula secundária o processo é reversível, na descarga o terminal positivo é o cátodo e o terminal negativo o ânodo. Porém, durante a carga ocorre o inverso, agora o terminal positivo é o ânodo e o terminal negativo o cátodo. Tipicamente, o ânodo é feito de um metal base, enquanto o cátodo é formado de um óxido metálico, contudo isto não é uma regra generalizada (Sá Junior, 2004).

Alguns conceitos referentes às baterias são importantes para o entendimento do comportamento do sistema de armazenamento de energia que adota-se para os SMFEs estudados neste trabalho. Apresentam-se a seguir, alguns conceitos básicos (Linden e Reddy, 2002).

- Célula: é um dispositivo eletroquímico capaz de suprir, para um circuito elétrico externo, a energia resultante de uma reação química interna;
- Bateria: pode ser uma simples célula ou uma combinação de células, podendo ser em série e/ou paralelo, para obter-se a tensão e capacidade de corrente requeridas;
- Capacidade (C): é definida como a corrente máxima que uma bateria pode fornecer continuamente por uma hora, sem causar sua inutilização. A sua unidade é o ampère-hora (Ah).
- Capacidade nominal (C_n): é a quantidade de corrente, medida em Ah, possível de ser extraída da bateria num determinado período de tempo. Esta grandeza é dependente da temperatura em que o processo ocorre, da intensidade da corrente e do valor da tensão de corte estipulada. Um exemplo prático serve para reforçar este conceito: se uma bateria tem uma capacidade $C_n = 200$ Ah para um tempo de descarga de 20 h, o valor da corrente durante o teste é de 10 A;
- Tensão nominal (V_n): para baterias formadas por várias células em série, V_n é a soma das tensões de cada célula;
- Tensão de corte (V_{co}): é o limite de tensão até onde as baterias podem ser descarregadas. Deve-se observar que, ao contrário das baterias primárias, as baterias secundárias não podem ser descarregadas até 0 V pois isto leva ao final prematuro da vida da bateria;
- Estado de carga (SOC): é definido como a relação entre a capacidade da bateria em um estado qualquer e a capacidade nominal desta;
- Profundidade de descarga (DOD): a profundidade de descarga define o percentual em relação a sua de capacidade nominal que uma bateria pode fornecer sem que seja comprometida sua vida útil. $DOD = 1 - SOC$;

- Taxa de descarga (ou de carga): é a relação entre a capacidade nominal da bateria e a corrente em que se realiza a descarga (ou carga), expresso normalmente em horas. É representado na forma de um sub-índice ao lado do símbolo da corrente, por exemplo: I_{20} , representa um regime de descarga (ou carga) de 20 horas.
- Taxa C : é uma medida de corrente de carga ou descarga, em termos da capacidade em uma hora. Por exemplo, uma bateria padrão AA possui uma capacidade em uma hora de aproximadamente 500 mAh. Conseqüentemente, uma taxa de descarga de $2C$ é 1 A e uma taxa de $C/10$ é 50 mA. Normalmente, os fabricantes especificam a melhor corrente de descarga para um determinado tipo de bateria;
- O rendimento energético de uma bateria a um certo estado de carga é definido como a relação entre a energia (Wh) extraída da bateria durante um processo de descarga e a energia necessária para restabelecer a carga original;
- Densidade de energia: é definida como a quantidade de energia para um determinado volume ou peso. As unidades mais empregadas são; Watthora por quilograma (Wh/kg) e Watt-hora por litro (Wh/l).

2.2.1 Bancos de Baterias

Bancos de baterias (BBs) são montados conectando-se baterias em série, em paralelo ou em série-paralelo. A associação série é utilizada quando pretende-se aumentar a tensão total do banco. A associação paralela é utilizada quando é necessário aumentar a capacidade total do banco (Linden e Reddy, 2002). Na Figura 2.2, são mostrados os três tipos de associações. Para condições ideais de operação, ou seja, cada bateria tem a mesma tensão nominal V_{n_i} , a mesma corrente nominal I_{n_i} , a mesma capacidade nominal C_{n_i} e que NB_S e NB_P , são as quantidades de baterias ligadas em série e em paralelo, respectivamente. Portanto, tem-se:

- Associação série:

$$V_{BB} = \sum_{i=1}^{NB_S} V_{n_i} \cong NB_S V_{n_i} \text{ (V)}, \quad I_{BB} = I_{n_i} \text{ (A)} \quad \text{e} \quad C_{BB} = C_{n_i} \text{ (Ah)}$$

Quantidade de baterias no banco: NB_S

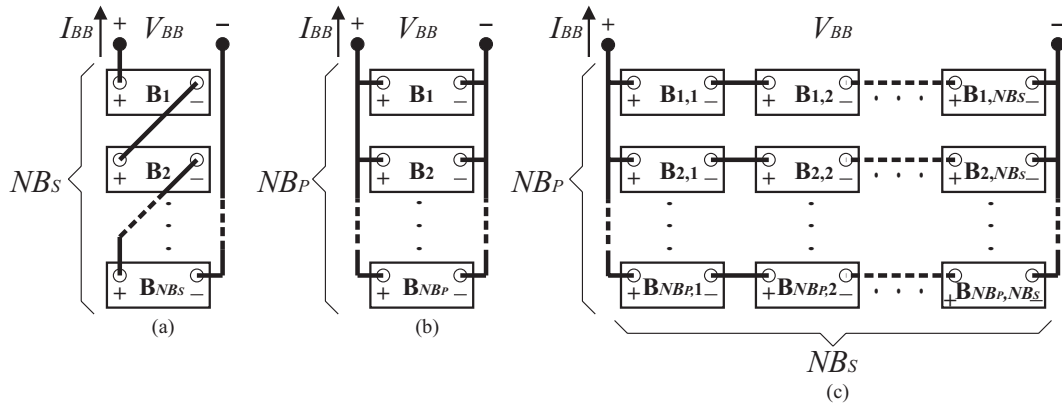


Figura 2.2: Associação de baterias: (a) série, (b) paralela e (c) série-paralela.

- Associação paralela:

$$V_{BB} = V_{n_i} \text{ (V)}, \quad I_{BB} = \sum_{i=1}^{NB_P} I_{n_i} \cong NB_P I_{n_i} \text{ (A)} \quad \text{e} \quad C_{BB} = \sum_{i=1}^{NB_P} C_{n_i} \cong NB_P C_{n_i} \text{ (Ah)}$$

Quantidade de baterias no banco: NB_P

- Associação série-paralela:

$$V_{BB} = \sum_{i=1}^{NB_S} V_{n_i} \cong NB_S V_{n_i} \text{ (V)},$$

$$I_{BB} = \sum_{i=1}^{NB_P} I_{n_i} \cong NB_P I_{n_i} \text{ (A)} \quad \text{e}$$

$$C_{BB} = \sum_{i=1}^{NB_P} C_{n_i} \cong NB_P C_{n_i} \text{ (Ah)}$$

Quantidade de baterias no banco: $NB_S NB_P$

onde, V_{BB} , I_{BB} e C_{BB} são a tensão total, a corrente total e a capacidade total do banco de baterias, respectivamente.

Dentre os vários tipos de baterias secundárias, podem ser citadas as cinco tecnologias mais utilizadas (Sá Junior, 2004): prata-zinco (AgZn), lítio-ion (Li-ion), níquel-cádmio (NiCd), níquel-metal hidreto (NiMH) e chumbo-ácido (Pb-Ácido).

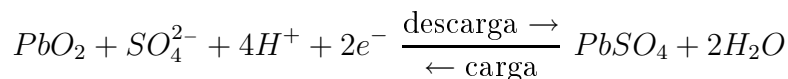
Entretanto, a disponibilidade do mercado reduz a possibilidade de escolha dos tipos a serem empregados em SMFEs. Dessa maneira, as baterias de chumbo-ácido e de níquel-cádmio tornaram-se algumas das poucas opções para os projetistas desses sistemas de energia. O preço das últimas é, para a mesma quantidade de energia, da ordem de quatro a cinco vezes

superior ao das primeiras. Em resumo, a maioria das baterias utilizadas nos SMFEs, são as baterias secundárias de chumbo-ácido (Macêdo, 2002).

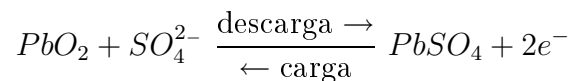
2.3 Baterias chumbo-ácido

Inventadas em 1859 pelo físico francês Gaston Planté, as baterias chumbo-ácido foram as primeiras baterias para uso comercial. Estas baterias são constituídas, em essência, por um ânodo de dióxido de chumbo, também chamado de eletrodo positivo; um catodo de chumbo, também chamado de eletrodo negativo, e um eletrólito de ácido sulfúrico diluído em água. As reações químicas que ocorrem durante o funcionamento destas baterias são as seguintes (Macêdo, 2002):

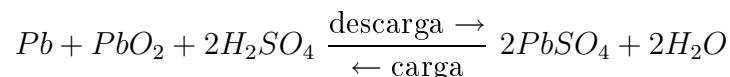
No anodo:



No catodo:



A reação global é:



Quando a bateria está carregada, o eletrodo positivo tem um depósito de dióxido de chumbo e o eletrodo negativo tem um acúmulo de chumbo. Ao descarregar-se, a reação química que ocorre faz com que tanto a placa positiva quanto a negativa tenham um depósito de sulfato de chumbo. Uma bateria chumbo-ácido é composta por elementos ou células, esses elementos são constituídos por duas placas de polaridades opostas, isoladas entre si, banhadas pelo eletrólito. Os elementos são interligados de forma conveniente no interior da bateria de forma a definir sua tensão e capacidade nominal. A tensão nominal de um elemento de uma bateria chumbo-ácido é, aproximadamente de 2 V. A estrutura de uma bateria chumbo-ácido tipo selada, ou seja, livre de manutenção é mostrada na Figura 2.3.

2.3.1 Processo de Carga-Descarga

Em princípio, o *ciclo* de carga-descarga pode ser repetido indefinidamente. Na prática, existem limitações para o seu número máximo (veja a Figura 2.4), uma vez que os eletrodos



Figura 2.3: Estrutura de uma bateria chumbo-ácido tipo selada (Baterias MOURA, 2007).

perdem parte do material a cada descarga. As sucessivas descargas traduzem-se em uma diminuição progressiva da capacidade da bateria, como consequência da perda de material ativo da mesma. Naturalmente, essa perda é tanto mais intensa quanto maior for o número de ciclos e a profundidade de descarga (Macêdo, 2002).

Numa bateria chumbo-ácido o eletrólito participa de forma ativa no processo eletroquímico, variando a proporção de ácido na solução com o estado de carga do acumulador. Quando a bateria está descarregada, a quantidade de ácido na solução diminui. Se a bateria está carregada, a quantidade de ácido na solução aumenta. Esse mecanismo tem uma

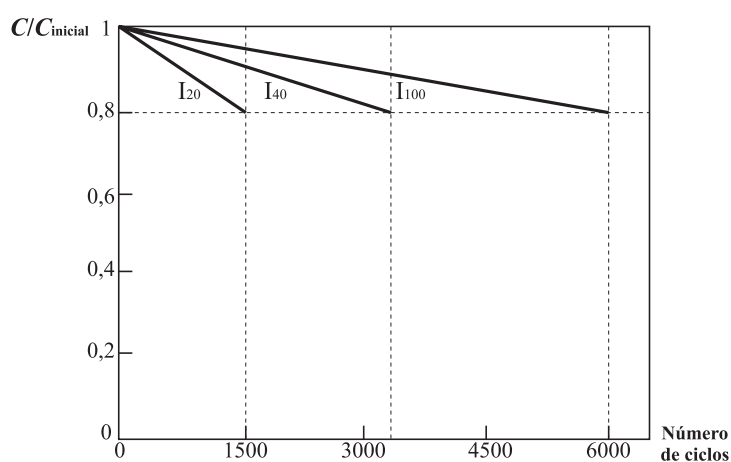


Figura 2.4: Evolução da capacidade de uma bateria em função do número de ciclos e da profundidade de descarga (Macêdo, 2002).

aplicação prática: monitorando-se a concentração do ácido pode-se determinar o estado de carga da bateria. Essa monitoração é feita por um densímetro (Macêdo, 2002).

A capacidade C de uma bateria é um valor que se obtém de um regime de descarga especificado pelo fabricante. Uma bateria, inicialmente 100% carregada, é descarregada com corrente constante, até que a energia na mesma se reduza a 20% de seu valor inicial. O valor dessa corrente de descarga multiplicado pela duração do teste (20 horas é um valor típico) é o valor em Ah dessa bateria. Um exemplo prático serve para reforçar este conceito: se uma bateria tem uma capacidade C de 200 Ah para um tempo de descarga de 20 h, o valor da corrente durante o teste é de 10 A (Macêdo, 2002).

Existe a tendência de estender esse conceito para correntes de descarga superiores ao máximo determinado pelo método de teste (10 A neste exemplo). A bateria do exemplo não pode entregar 200 A durante uma hora. O processo eletroquímico não pode ser acelerado sem que a bateria incremente sua resistência interna de forma significativa. Esse incremento diminui a tensão de saída, auto-limitando a capacidade de suprir correntes elevadas na carga.

A Figura 2.5 ilustra este fenômeno, mostrando a redução da capacidade da bateria com o aumento da corrente de descarga (Macêdo, 2002).

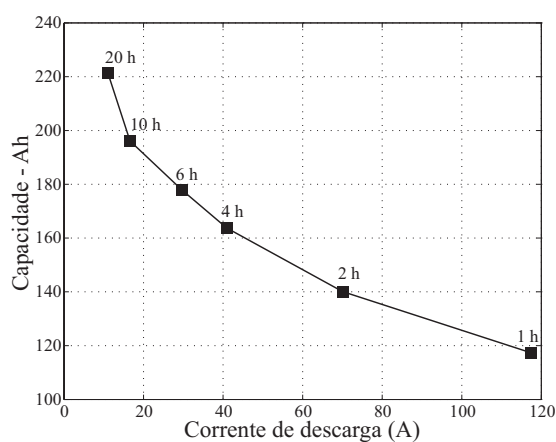


Figura 2.5: Capacidade de uma bateria chumbo-ácido ($C_{20} = 221$ Ah) em função da corrente de descarga (Baterias MOURA, 2007).

Baterias chumbo-ácido novas podem ter uma capacidade consideravelmente maior do que a sua capacidade nominal, com valores superiores a 50% (Bindner et al., 2005).

Como o comportamento das baterias não é linear, isto é, quanto maior a corrente de descarga menor será a autonomia e a capacidade, não é correto falar: uma bateria de 200

Ah. Deve-se falar, por exemplo: uma bateria de 200 Ah, padrão de descarga 20 horas, com tensão de corte 10,5 V, o que também pode ser escrito como 200 Ah, C_{20} , $V_{co} = 10,5$ V. Esta bateria permitirá descarga de $200/20 = 5$ A durante 20 horas, quando a tensão da bateria irá atingir 10,5 V (Linden e Reddy, 2002).

As baterias chumbo-ácido de 12 V, por exemplo, devem operar de 13,8 V (tensão a plena carga), até 10,5 V (tensão de corte), quando 100% de sua capacidade terá sido utilizada, e é este o tempo que deve ser medido como autonomia da bateria (Macêdo, 2002).

A Figura 2.6 ilustra a variação da tensão de uma bateria em função da corrente de descarga.

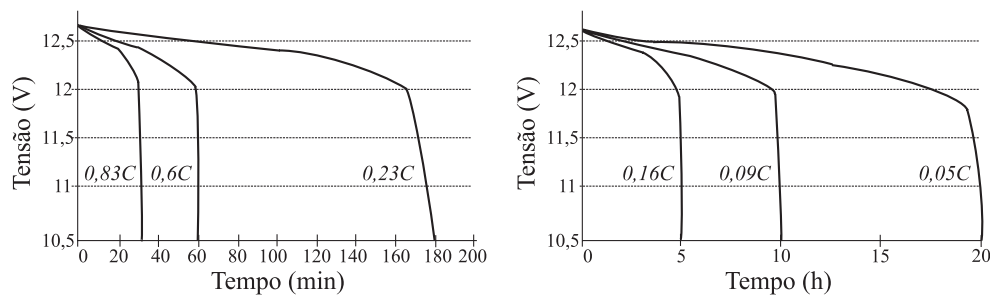


Figura 2.6: Variação da tensão de uma bateria chumbo-ácido em função da corrente de descarga. C representa a capacidade de descarga da bateria no regime de 20 h. Tensão final de descarga igual a 10,5 V (Baterias MOURA, 2007).

Outro fator importante é a temperatura de operação da bateria, pois sua capacidade e vida útil dependem dela. Usualmente as informações são fornecidas supondo $T = 25$ °C ou $T = 20$ °C, que é a temperatura ideal para maximizar a vida útil de uma bateria. Na Figura 2.7, é mostrada como a expectativa de vida de uma bateria varia com a temperatura de trabalho.

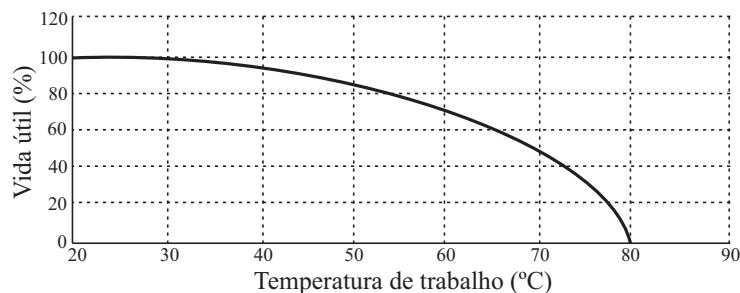


Figura 2.7: Vida útil em função da temperatura de trabalho (Baterias MOURA, 2007).

A característica das baterias chumbo-ácido que mais afetam diretamente o desempenho dos SMFEs é a dependência entre o número de ciclos de carga e descarga que a bateria poderá exercer ao longo de sua vida útil e a profundidade de descarga (*DOD*). A Figura 2.8 ilustra as faixas da relação *DOD*×Ciclos para baterias de chumbo-ácido automotivas e estacionárias (Hauschild, 2006).

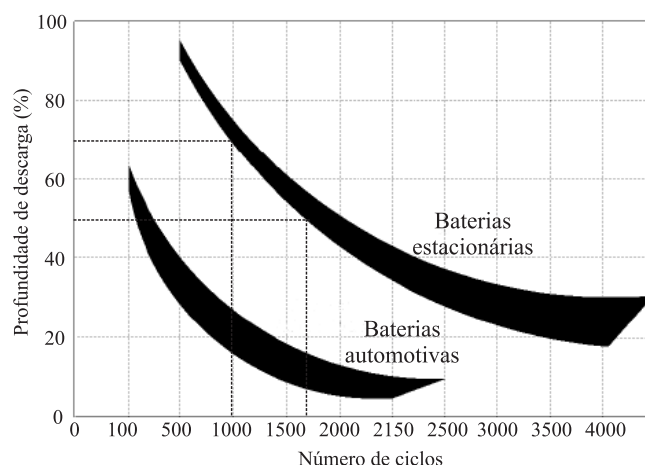


Figura 2.8: Número de ciclos em função da profundidade de descarga (Hauschild, 2006).

A partir do gráfico mostrado na Figura 2.8, pode-se ter uma estimativa de qual seria a vida útil do banco de baterias se utilizado num SMFE. No caso de se utilizarem baterias estacionárias, ter-se-ia uma vida útil de aproximadamente 2,7 anos (considerando ciclos diários) para $DOD = 70\%$, enquanto que para $DOD = 50\%$ a vida útil do banco de baterias se aproximaria dos 4,7 anos (Hauschild, 2006).

Uma bateria que está carregada e permanece inativa, independentemente de seu tipo, perde sua carga com o tempo. Esse fenômeno é conhecido como autodescarga. A rapidez da descarga depende da temperatura ambiente e do tipo de bateria. Cada modelo de bateria apresenta valores específicos de autodescarga (Macêdo, 2002).

2.3.2 Tipos de Baterias Chumbo-Ácido

Na prática, a aplicação da bateria é que determina as suas variações construtivas. Quanto a aplicação, as baterias podem ser (Sá Junior, 2004): automotivas, tracionárias, estacionárias e fotovoltaicas.

- Baterias automotivas: as baterias para aplicação automotiva são usadas principalmente para ignição ou partida em motores de automóveis. Neste caso uma elevada corrente é necessária por um curto intervalo de tempo. Baterias com esse fim possuem placas muito finas, 1 mm em média, com uma área grande, projetadas para não descarregarem mais do que 1 a 5% da capacidade total. Descargas de 80% podem levá-las a completa danificação em 30 a 50 ciclos. Como estas baterias são desenvolvidas para veículos, e o eletrólito está em constante movimentação, não são adotadas medidas para minimizar a estratificação do eletrólito. Pelas características indicadas, este tipo de bateria é descartado para uso em SMFEs, já que nesses sistemas as baterias operam estacionárias;
- Baterias tracionárias: as baterias tracionárias são projetadas de forma que possam perder até 80% da carga total várias vezes, e possuem placas internas muito mais espessas que as baterias automotivas, cerca de 4,2 mm. Como as baterias tracionárias são projetadas para ciclos profundos repetidos de carga e descarga, estas necessitam de constante manutenção. Frequentemente, deve-se adicionar água destilada para completar o eletrólito. Em geral esta bateria é utilizada somente em veículos de tração (empilhadeiras elétricas, veículos industriais, etc.). A freqüente manutenção devido a perda do seu eletrólito, a torna menos atrativa para outras aplicações. Comercialmente, só são encontradas como baterias de grande volume e tensões de no mínimo 48 V, sendo geralmente fabricadas sob encomenda;
- Baterias estacionárias: as baterias estacionárias, a um grosso modo, são um meio termo entre as anteriormente descritas. Basicamente possuem placas mais grossas do que as baterias automotivas e mais finas do que as baterias tracionárias. As principais formas de construção desta bateria são: com fluido (água ou ácido), gel ou AGM (absorbed glass mat – semelhante a uma fibra de vidro). Como esta bateria é projetada para trabalhar em local fixo e sem movimentação do eletrólito, na sua construção leva-se em conta a minimização da estratificação (Linden e Reddy, 2002). As baterias de gel contém um ácido que foi transformado em uma pasta gelatinosa, para isto adiciona-se sílica gel ao ácido. A vantagem desse tipo de meio é a impossibilidade de derramar ou respingar ácido na forma de gel, ou seja, existe uma maior segurança para o usuário.

A desvantagem deste tipo de bateria é a carga e descarga em uma taxa menor de corrente, prevenindo a formação de excesso de gás. Descargas com correntes elevadas podem danificar definitivamente este tipo de bateria. As baterias em meio sólido, ou tipo AGM, possuem os eletrodos imersos em um material semelhante a uma lâmina de vidro. Este tipo de bateria possui características semelhantes às baterias de gel, possuindo também baixas taxas de carga e recarga. As baterias com placas imersas em meio líquido possuem válvulas pequenas que podem ser removidas para reposição de eletrólito. No caso das baterias seladas, ou livres de manutenção, as válvulas não podem ser removidas e servem unicamente para regular a pressão interna das mesmas na medida em que há formação de gases durante o período de carga. Se forem recarregadas muitas vezes, essas baterias podem perder água suficiente para levá-las à inutilidade. Estas baterias reguladas a válvula (VRLA) possuem problemas associados a sua utilização em altas temperaturas. As baterias VRLA necessitam de um ambiente controlado, com temperaturas em torno dos 25 °C, uma vez que estas apresentam uma acelerada degradação em altas temperaturas. As baterias denominadas “solares” ou “fotovoltaicas”, nada mais são que uma adaptação das baterias estacionárias para aplicações fotovoltaicas; e

- Baterias fotovoltaicas: são baterias projetadas para operarem em ciclos diários de baixa intensidade, com taxas de descarga reduzidas e devem suportar descargas esporádicas de grande intensidade, por causa de uma possível ausência do recurso solar em dias nublados.

Para um estudo mais detalhado sobre baterias de uma forma geral e baterias chumbo-ácido, o leitor deve se reportar a (Linden e Reddy, 2002; Patel, 2006; Baterias MOURA, 2007).

2.4 Fatores de Estresse e Mecanismos de Envelhecimento

De uma maneira usual, a vida de uma bateria chumbo-ácido estará terminada quando a sua capacidade atual for menor que 80% da sua capacidade nominal. O desempenho de uma bateria deteriora com o tempo. Vários mecanismos estão envolvidos. Com o objetivo de sis-

tematizar o envelhecimento de baterias, os mais significativos mecanismos de envelhecimento e fatores de estresse que contribuem para estes mecanismos, devem ser identificados (Kaiser et al., 2003)

Fatores de estresse são todas as condições que diretamente ou indiretamente contribuem para a degradação irreversível da bateria, ou seja, para os mecanismos de envelhecimento. Os principais fatores de estresse são (Wenzl et al., 2005): temperatura, profundidade de descarga (*DOD*), tempo entre carga completa, taxas de carga e descarga, tempo em baixo estado de carga *SOC*, taxa de transferência de Ah, ripple de corrente e ciclagem parcial (Kaiser et al., 2003).

Os mecanismos de envelhecimento de baterias são os eventos atuais químicos e mecânicos que causam a falha das mesmas. Estas falhas podem ser processos longos de degradação ou eventos catastróficos curtos e, em algumas situações, a combinação dos dois. Existem dois tipos de mecanismos de envelhecimento: aqueles que conduzem a uma degradação lenta e perda gradual de desempenho; e aqueles nos quais nenhum impacto no desempenho é notado até que, de repente, a *morte súbita* da bateria ocorre. Por exemplo, devido a ocorrência de curto-circuito, formação de dendritos nas células ou corrosão das conexões internas (Nicoletatos e Tselepis, 2003; Wenzl et al., 2005). Todos os tipos de baterias chumbo-ácido são afetadas pelos mesmos mecanismos de envelhecimento, porém com diferentes graus de dano (Bindner et al., 2005). Os principais mecanismos de envelhecimento são (Wenzl et al., 2005; Schiffer et al., 2007):

- Corrosão da grade positiva: tem um impacto na resistência interna e na capacidade disponível. A resistência interna cresce com o aumento da camada de corrosão devido a redução da condutividade do material corroído e redução na seção da grade. A redução na capacidade é resultante da redução da conexão elétrica entre a grade e os terminais. Os principais fatores de estresse que influenciam na corrosão da grade positiva são: tensão, concentração de ácido e temperatura. De uma forma geral, valores altos desses fatores aumentam o processo de corrosão da grade positiva.
- Sulfatação irreversível: observa-se que a descarga das baterias de chumbo-ácido causa a deposição de sulfato de chumbo em ambas as placas. Normalmente, essa deposição é constituída por pequenos cristais, que se decompõem facilmente durante o processo

de carga. Quando a bateria é descarregada repetidas vezes abaixo do mínimo especificado, e não totalmente recarregada, ou quando permanece descarregada por um longo tempo, o tamanho dos cristais cresce, e só uma parte deles participa no processo de carga. Isso se traduz em uma diminuição da superfície ativa do eletrodo, diminuindo a capacidade de armazenamento. Uma carga com regime elevado de corrente pode dissolver esta formação cristalina;

- Perda de massa ativa: o material ativo do eletrodo positivo sofre fadiga mecânica. Isto se deve a constante transformação do material ativo durante os processos de carga e descarga ($\text{PbO}_2 \leftrightarrow \text{PbSO}_4$). Este processo pode ocasionar uma ruptura de pedaços do eletrodo, os quais podem cair no fundo da bateria, reduzindo a capacidade da bateria e podendo ocasionar curto-circuitos entre as placas. Estados de sobrecarga contribuem para este mecanismo de envelhecimento.
- Perda de água: é um mecanismo de envelhecimento em baterias do tipo VRLA. Perda de água também ocorre em baterias com eletrólito fluido e ventiladas, mas somente pode causar dano se a água não for reposta a tempo devido a falta de manutenção.
- Degradação da massa ativa: ou amolecimento dos eletrodos, é primeiramente uma mudança na estrutura mecânica dos eletrodos e material ativo. Isto leva a uma redução na porosidade e na área de superfície entre os eletrodos e o eletrólito. Desta forma as reações químicas tornam-se muito concentradas e a difusão do eletrólito é reduzida, o que leva a uma redução na capacidade da bateria. Esta degradação afeta principalmente o eletrodo positivo.
- Estratificação do eletrólito: estratificação ocorre em baterias com eletrólitos na forma fluida (água e ácido). A estratificação é causada por insuficiência de carga da bateria. Este fenômeno ocorre quando o ácido sulfúrico (mais pesado) deposita no fundo da bateria deixando a água quase pura (mais leve) no topo da bateria. A água quase pura não é um bom condutor de eletricidade. Por esta razão somente a parte inferior das placas da bateria ficam disponíveis para conduzir eletricidade, reduzindo a capacidade da bateria. O resultado principal é a corrosão da parte superior das placas, o qual reduz o desempenho da bateria e diminui o seu tempo de vida. Gaseificação controlada

e equalização do eletrólito podem ajudar na prevenção da estratificação.

Ao longo dos anos, os fabricantes de baterias de chumbo ácido vêm se aprimorando e gerando soluções para resolver os problemas químicos. Atualmente, ligas com prata (Ag), cálcio (Ca) ou selênio (Se), são utilizadas para minimizar o aumento da resistência elétrica provocada pela corrosão do eletrodo positivo. A prata é utilizada por ser um excelente condutor, já o cálcio e o selênio minimizam a corrosão. Contra a fadiga mecânica, ocasionada pela degradação, vários fabricantes utilizam antimônio (Sb) na construção dos eletrodos. O antimônio aumenta a resistência mecânica das placas, o que pode ser um fator importante em veículos elétricos. Empilhadeiras elétricas são geralmente equipadas com este tipo de bateria. Contudo, o aumento da vida útil da bateria é compensado pela diminuição da manutenção da carga. Este tipo de bateria deve ser carregada de tempos em tempos, evitando a sulfatação das placas e a deterioração definitiva das mesmas (Macêdo, 2002). O leitor poderá encontrar em (Kaiser et al., 2003; Jossen et al., 2004; Wenzl et al., 2005; Bindner et al., 2005; Svoboda et al., 2007) um estudo detalhado das relações entre os mecanismos de envelhecimento e os fatores de estresse.

2.5 Métodos de Carga de Baterias Chumbo-Ácido

Os métodos de carga das baterias de chumbo-ácido são diferenciados conforme a característica de corrente e tensão. De uma maneira geral existem três métodos bem definidos de carga, que se caracterizam por aplicar tensão constante, corrente constante ou potência constante. A partir desses três tipos é possível obter métodos variados, alterando durante o processo de carga a variável que se deseja controlar (tensão, corrente ou potência).

Os métodos recomendados, mesclam essas características para prolongar a vida útil das baterias. Eles possuem uma seqüência de carga dividida em etapas, nas quais são aplicadas tensões e/ou correntes constantes. Isto requer o uso de sensores de corrente, de tensão, de temperatura e de um algoritmo de carga implementado por microcontroladores ou circuitos integrados (CI) dedicados a esta função (Lazzarin, 2006). Os métodos mais comuns de carga de baterias são (Nguyen e Bushnell, 2003):

- Carga constante: o método de carga a um nível de corrente e um nível de tensão é muito usado devido à sua facilidade de implementação. Ele possui dois estados: no primeiro a corrente é mantida constante até que a tensão da bateria atinja a tensão de flutuação; no segundo, tem-se a aplicação da tensão de flutuação sobre a bateria para manter a sua carga. Porém, essa técnica não garante que a bateria esteja 100% recarregada (Lazzarin, 2006).

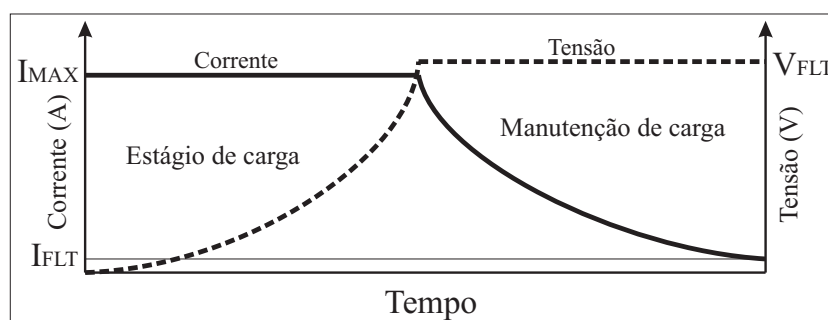


Figura 2.9: Tensão e corrente da bateria durante o processo de carga constante (Lazzarin, 2006).

Baterias chumbo-ácido são as mais utilizadas em sistemas de UPS¹. Durante longos períodos de carga em flutuação, uma carga periódica denominada *carga de equalização* é recomendada para carregar completamente as placas da bateria e prevenir a sulfatação da mesma. Porém, uma *carga de equalização* administrada de forma incorreta pode provocar perda de eletrólito devido a elevação da temperatura da bateria. Para o caso de baterias do tipo seladas ou reguladas a válvula, nas quais não é possível adicionar água, a perda de eletrólito causará danos irreversíveis. Fabricantes e usuários de baterias, normalmente se dividem sobre os benefícios da *carga de equalização* (Buchmann, 2001).

- Carga pulsada: é o método desenvolvido mais recente para a carga de baterias. Ele baseia-se na utilização de pulsos de corrente durante a carga da bateria intercalados por intervalos de tempo de descanso, ou seja, corrente praticamente nula. Um ciclo típico deste método de carga é mostrado na Figura 2.10. A idéia por trás desta técnica é permitir um tempo para que as reações químicas ocorram, desta forma a

¹Uninterruptible Power Supply

bateria é carregada de maneira mais uniforme. Isto minimiza problemas na formação da estrutura (química e física) da bateria e, conseqüentemente, reduz danos a longo prazo à bateria (Nguyen e Bushnell, 2003).

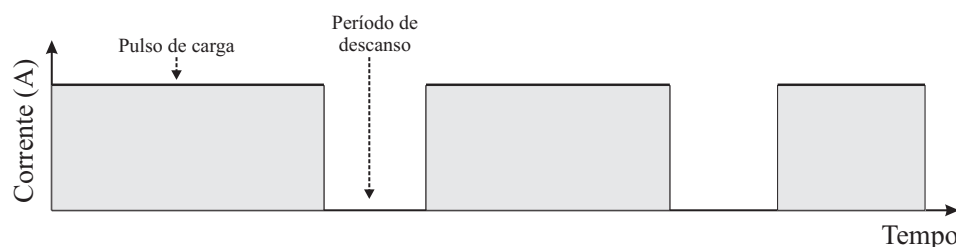


Figura 2.10: Ciclo típico de carga pulsada (Nguyen e Bushnell, 2003).

De acordo com (Lam et al., 1995), os maiores benefícios da carga pulsada de baterias chumbo-ácido são: (1) a redução do tempo de recarga de 10 horas para 1 hora, aproximadamente; e (2) o aumento do tempo de vida em ciclagem em três a quatro vezes. Carga pulsada ajuda na eliminação de falhas em baterias da seguinte maneira: (1) reduz o processo de sulfatação; (2) permite a bateria ter mais material ativo no eletrólito; e (3) previne degradação física das placas da bateria. Como resultado, a produtividade é aprimorada, são reduzidas as substituições e outros gastos relacionados. Além disso, o impacto ambiental negativo, também é evitado (Schilling, 1999).

- Carga pulsada “Burp”: é um método de carga semelhante ao método de carga pulsada. A principal diferença é a inclusão de um pulso de descarga breve dentro do ciclo de carga, conforme pode ser visto na Figura 2.11. Desta forma, gases óxidos são redirecionados das placas, prevenindo a corrosão e prolongando a capacidade da bateria e o seu tempo de vida (Nguyen e Bushnell, 2003).

A partir da literatura e dados disponíveis, conclui-se que os métodos de carga pulsada são melhores do que o método convencional de carga constante. Eles podem prolongar o tempo de vida da bateria, reduzir o processo de gaseificação e geração de calor durante a carga, o que minimiza os perigos das baterias para o ambiente (Nguyen e Bushnell, 2003)

Em (Benchetrite et al., 2005), uma nova estratégia de carga é proposta para melhorar o processo de carga de baterias chumbo-ácido em sistemas fotovoltaicos. A estratégia consiste de duas etapas, a primeira é composta de uma carga constante até que a tensão da bateria

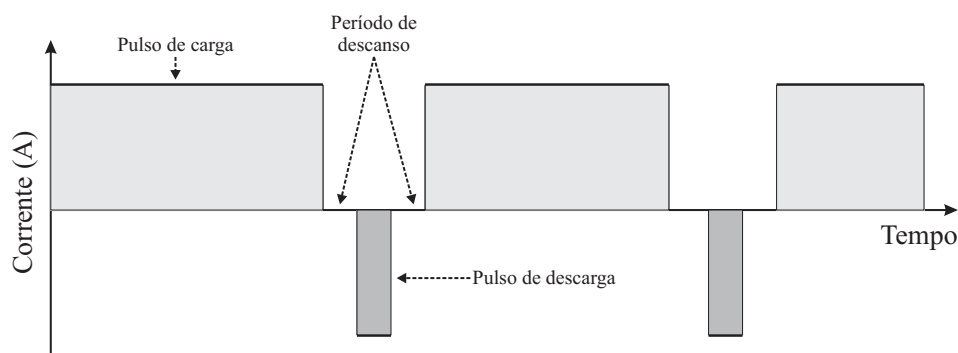


Figura 2.11: Carga pulsada “Burp” (Nguyen e Bushnell, 2003).

atinga um valor limite; por outro lado, a segunda etapa baseia-se na aplicação de carga pulsada de corrente por um tempo fixo. Esta segunda etapa reduz consideravelmente a quantidade residual de PbSO_4 (sulfato de chumbo) ao final do processo de carga.

Até o presente momento, os trabalhos apresentados mostram o eletrodo negativo como principal beneficiado pelo uso de carga pulsada, sendo que a única vantagem para o eletrodo positivo é que a carga pulsada diminui a quantidade de oxigênio gerado e com isso a formação de bolhas que quebram o material ativo da placa positiva, o que diminui a vida útil da bateria. Mas a carga pulsada também pode ser utilizada para evitar a perda de capacidade prematura da bateria, marcada por modificações na morfologia da placa positiva (Andrade, 2005).

Descarga com pulsos de corrente também é benéfica para baterias chumbo-ácido, uma vez que os períodos de descanso ajudam na dispersão das concentrações de ácido nos eletrodos (Buchmann, 2001).

2.6 Supervisão e Controle de Bancos de Baterias

Baterias em SMFEs modernos são gerenciadas por sistemas computacionais dedicados. Os parâmetros de desempenho monitorados e controlados são os seguintes (Patel, 2006):

- Tensão e corrente;
- Temperatura e pressão (se aplicável);
- Ah que entra/sai da bateria;

- Estado de carga;
- Taxa de carga e descarga;
- Profundidade de descarga; e
- Número de ciclos.

O tempo de vida de uma bateria chumbo-ácido é influenciado pelos parâmetros eletroquímicos internos e construtivos, mas também pelos parâmetros de operação. Portanto, os sistemas de gerenciamento de baterias (SGBs) têm a tarefa de operar as baterias em condições, as quais, não reduzirão o tempo de vida (Jossen et al., 2004). As tarefas dos SGB são (Jossen et al., 2004):

- Controle de carga e proteção contra sobrecarga: um parâmetro crítico dos sistemas eletroquímicos de armazenamento é a velocidade em que eles são carregados ou descarregados. No caso de baterias esta velocidade depende do estado de carga atual. O ponto mais crítico ocorre em estado de carga alto, onde a corrente de carga deve ser limitada para evitar perdas altas e/ou para evitar sobrecarga. Carga de equalização é utilizada com a aplicação de uma tensão elevada, resultando nos seguintes efeitos positivos: equalização do estado de carga de cada célula da bateria, mistura do eletrólito por gaseificação com redução na estratificação do ácido e recarga completa das células para evitar sulfatação.
- Proteção contra sobredescarga: a operação em estado de carga baixo é também crítica para alguns tipos de baterias, especialmente baterias chumbo-ácido. Para estas baterias é necessário uma limitação no valor do estado de carga entre 20% e 50% para evitar uma redução no tempo de vida. A operação de descarga deve ser interrompida se a bateria atinge o nível de tensão de corte. Se existe um sistema de reserva disponível (por exemplo, gerador diesel), este deve ser ligado para recarregar a bateria, caso contrário a carga consumidora deve ser desconectada.

Temperaturas acima de 20 °C, aceleram a corrosão, a sulfatação, a gaseificação e a autodescarga das baterias chumbo-ácido (Jossen et al., 2004).

Capítulo 3

Modelagem de Baterias Chumbo-Ácido

3.1 Introdução

Predizer o tempo de vida de baterias chumbo-ácido em SMFEs ou em sistemas autônomos de fornecimento de energia, sem testes específicos em laboratório é difícil. Contribuem para isso, diversos fatores, tais como: regime de ciclagem irregular, cargas completas são raras, regimes de carga e descarga interceptam-se frequentemente, e ocorre uma ampla faixa de correntes de carga e descarga (Schiffer et al., 2007).

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica da modelagem de baterias chumbo-ácido. Além disso, são apresentados os principais detalhes dos modelos utilizados nesta tese para a avaliação de desempenho e previsão do tempo de vida de bancos de baterias chumbo-ácido utilizados em SMFEs.

3.2 Modelagem de Baterias Chumbo-Ácido

Modelos de baterias procuram capturar as características reais de operação destas, e podem ser usados para prever os seus comportamentos sob várias condições de carga/descarga. Estes modelos são ferramentas úteis para o projeto de sistemas alimentados por baterias, porque possibilitam a análise do comportamento das mesmas sob diferentes especificações de projeto. A modelagem de baterias é um elemento importante para a simulação de SMFEs, já que as incertezas associadas ao tempo de vida destas criam incertezas quanto ao custo

da energia do sistema a ser projetado (Bindner et al., 2005).

Os modelos de baterias têm evoluído através de diferentes gerações, as quais refletem e incorporam características adicionais da tecnologia das baterias (Lahiri et al., 2002).

3.2.1 Classificação dos Modelos quanto à Complexidade

Modelos Eletroquímicos: estes modelos incorporam vários fatores incluindo propriedades cinéticas e de transporte de massa; propriedades termodinâmicas, mecânicas, térmicas, elétricas dos materiais e dimensões (Wenzl et al., 2005). Porém, estes modelos possuem algoritmos numéricos complexos e consomem muito tempo de simulação. Como exemplo, pode-se citar o modelo apresentado em (Liaw et al., 2002; Srinivasan et al., 2003).

Modelos Analíticos: são modelos matemáticos baseados na interpolação e extrapolação de dados de campo e de testes (Wenzl et al., 2005). A complexidade numérica apresentada por estes modelos é aceitável quando comparada com a dos modelos eletroquímicos. Os modelos apresentados em (Shepherd, 1965; Ross, 2001; Armenta-Deu, 2003; Guasch e Silvestre, 2003; Schiffer et al., 2007), pertencem a esta de classe de modelos.

Modelos a Circuito Elétrico Equivalente: nestes modelos, cada componente da bateria que contribui com o transporte de portadores da carga ou de geração de uma queda de tensão é representado por um componente de um diagrama de circuito equivalente: fontes de tensão e de corrente, resistores, capacitores e indutores. Os mecanismos de envelhecimento são representados pelas mudanças nos valores dos componentes do diagrama de circuito equivalente (Wenzl et al., 2005). A complexidade numérica destes modelos está relacionada com a ordem do circuito elétrico utilizado para modelar uma bateria. Os modelos apresentados em (Casacca e Salameh, 1992; Ross et al., 2000; Chan e Sutanto, 2000; Ceraolo, 2000; Zhan et al., 2003; Kaiser et al., 2003; Dürr et al., 2006; Jackey, 2007), pertencem a esta classe de modelos (Sousa e Lima, 2008b).

3.2.2 Classificação dos Modelos quanto à Finalidade

Modelos de Desempenho: o primeiro tipo de modelo, o mais comumente usado, modela o estado de carga da bateria, o qual é o principal parâmetro isolado de um sistema de baterias. O segundo tipo é o modelo de tensão, o qual modela a tensão terminal, tal que esta possa

ser utilizada no estudo detalhado dos sistemas de gerenciamento de baterias e nos cálculos mais detalhados das perdas. Os modelos apresentados em (Casacca e Salameh, 1992; Ross et al., 2000; Chan e Sutanto, 2000; Ceraolo, 2000; Guasch e Silvestre, 2003; Dürr et al., 2006), pertencem a esta classe de modelos.

Modelos de Tempo de Vida: são utilizados para estimar o impacto de um esquema particular de operação no tempo de vida esperado para uma bateria (Sousa e Lima, 2008b). Os principais tipos de modelos de tempo de vida de baterias são (Bindner et al., 2005):

1. Modelos de Processamento Posterior (Post-processing models): são modelos puros de tempos de vida, os quais não utilizam um modelo de desempenho. Eles podem ser usados para analisar dados medidos de sistemas reais. Pode-se citar o modelo UMass (Bindner et al., 2005) utilizado nas ferramentas HOMER[®] e Hybrid2[®] e o modelo apresentado em (Kaiser et al., 2003).
2. Modelos de Degradação do Desempenho (Performance degradation models): combinam um modelo de desempenho com um modelo de tempo de vida. Nestes, o modelo de desempenho é atualizado durante a simulação tal que o desempenho da bateria é reduzido, com o passar do tempo, em função das condições de operação da mesma. Para esta classe de modelos, pode-se citar os modelos FhG/Risø (Bindner et al., 2005) e Shepherd-Shiffer (Schiffer et al., 2007).

Para um estudo mais detalhado sobre modelos de baterias, o leitor deve se reportar a (Lahiri et al., 2002; Bindner et al., 2005; Wenzl et al., 2005; Andersson, 2006; Sauer e Wenzl, 2008).

Neste trabalho, o modelo de bateria chumbo-ácido Copetti-Murillo é utilizado para a avaliação de desempenho de um banco de baterias de um SMFE. A seguir, são apresentados os principais detalhes do mesmo.

3.3 Modelo de desempenho Copetti-Murillo

O modelo Copetti-Murillo para bateria chumbo-ácido é apresentado em (Murillo, 2003) e (Guasch e Silvestre, 2003), como uma extensão ao modelo de bateria apresentado em (Copetti et al., 1993).

3.3.1 Circuito Equivalente

O circuito equivalente para modelar o comportamento de uma bateria é mostrado na Figura 3.1 e na Equação 3.1. Ele consiste de uma fonte de tensão V_g e um resistor R_g . Este modelo genérico inclui as principais variáveis do sistema: o estado de carga (SOC), a corrente que flui através da bateria I , e a temperatura de trabalho T .

$$V_{bat} = V_g + IR_g \begin{cases} V_g = f(SOC) \\ R_g = f(I, SOC, T) \end{cases} \quad (3.1)$$

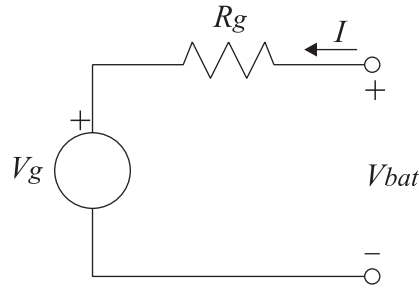


Figura 3.1: Circuito equivalente básico para uma bateria (Guasch e Silvestre, 2003).

A fonte de tensão V_g representa a tensão de circuito aberto nos terminais da bateria. Esta tensão deve-se a energia armazenada na bateria através de reações eletroquímicas. Por outro lado, R_g representa a resistência que a bateria oferece para a energia fluir. Este parâmetro inclui os efeitos de ponto de trabalho (I, SOC, T) e o estado de saúde da bateria. Uma bateria danificada apresenta um valor alto para R_g . Além disso, R_g é inversamente proporcional ao estado de carga (SOC) da bateria.

3.3.2 Estado de Carga

O SOC deve ser considerado um indicador da carga elétrica armazenada na bateria. A sua faixa de valores é $0 < SOC < 1$. Nas Equações 3.2, 3.3 e 3.4 é descrito o comportamento deste parâmetro.

$$SOC(t_i) \equiv \frac{1}{C(t_i)} \int_{-\infty}^{t_i} \eta_c(t) I(t) dt \quad (3.2)$$

$$C(t) = \frac{C_{nominal} C_{tcoef}}{1 + A_{cap} \left(\frac{|I(t)|}{I_{nominal}} \right)^{B_{cap}}} (1 + \alpha_c \Delta T(t) + \beta_c \Delta T(t)^2) \quad (3.3)$$

$$I_{nominal} = \frac{C_{nominal}}{n} \quad (3.4)$$

onde,

- $C(t)$ é a capacidade da bateria no tempo t ;
- η_c é a eficiência de carga;
- $I(t)$ é a corrente através da bateria no tempo t ;
- $C_{nominal}$ é capacidade nominal da bateria;
- $I_{nominal}$ é a corrente de descarga correspondente a $C_{nominal}$;
- n é a quantidade de horas utilizada no cálculo de $I_{nominal}$;
- C_{tcoef} , A_{cap} e B_{cap} são constantes do modelo;
- ΔT é a variação de temperatura com relação a 25 °C; e
- α_c e β_c são coeficientes de temperatura.

Note que o *SOC* deve ser entendido como uma relação entre a energia aceita pela bateria e a capacidade disponível a todo momento. Quando $SOC \cong 1$ a bateria não pode aceitar mais energia, porque a bateria está completamente carregada. Por outro lado, quando $SOC \cong 0$ a bateria não tem energia armazenada.

3.3.3 Estado de Energia

Para um uso mais intuitivo do conceito de *SOC* em aplicações de energia solar ou de SMFEs, um novo indicador é introduzido: *LOE*, o nível de energia. Este indicador mostra a quantidade de energia disponível na bateria sob condições normais de operação. Nas Equações 3.5 e 3.6 é mostrado a definição de *LOE*. *LOE* representa diretamente a energia armazenada na bateria (C_n é mantido constante).

$$LOE(t_i) \equiv \frac{1}{C_n} \int_{-\infty}^{t_i} \eta_c(t) I(t) dt \quad (3.5)$$

$$C_n = \max(C)_{|I=0, T=[-T_1, T_2]} \quad (3.6)$$

onde,

- T_1 e T_2 definem a faixa de temperatura de trabalho da bateria;
- C_n é a capacidade máxima da bateria (calculada através da Equação 3.3) para $I = 0$ e temperatura de trabalho máxima (por exemplo, $T_2 = 40$ °C).

3.3.4 Zonas de Trabalho da Bateria

Uma vez determinado o valor inicial de SOC , a evolução da tensão V_{bat} de uma bateria é avaliada como uma função da área de trabalho (saturação, sobrecarga, carga, descarga, sobredescarga ou exaustão) descrita abaixo. A Figura 3.2, ilustra a evolução da tensão de uma bateria em função da corrente que flui através dela.

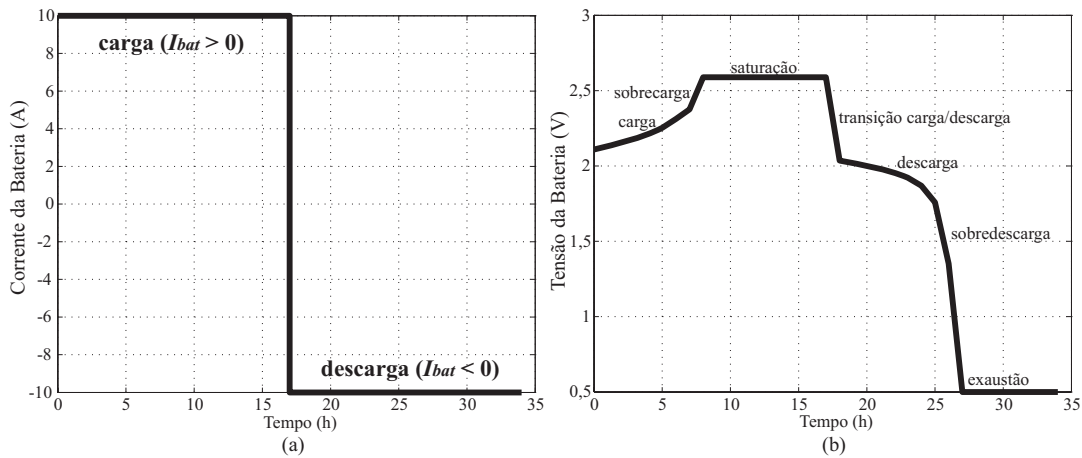


Figura 3.2: (a) corrente elétrica I_{bat} na bateria; (b) zonas de trabalho em função da tensão da bateria.

Na Tabela 3.1 são mostradas as condições usadas para identificar a tensão da bateria em cada área de trabalho possível. Novos parâmetros são incluídos: corrente da bateria I_{bat} , tensão nominal da bateria V_n , tensão de gás V_g , tensão máxima da bateria V_{ec} .

A seguir, esses termos e as equações paramétricas que governam cada área de trabalho, são apresentados.

Tabela 3.1: Condições para as zonas de trabalho de uma bateria.

V_{bat}	Zona de trabalho	Condições para a zona		
V_{sc}	saturação	$I_{bat} > 0$	$V_{bat} = V_{ec}$	$\eta_c \cong 0$
	sobrecarga		$V_{ec} \geq V_{bat} \geq V_g$	
V_c	carga	$I_{bat} \cong 0$	$V_{bat} < V_g$	$0 < \eta_c < 1$
V_{cdc}	transição carga/descarga		$V_c \geq V_{bat} \geq V_{dc}$	
V_{dc}	descarga	$I_{bat} < 0$	$V_{bat} > 0,9V_n$	
	sobredescarga		$0,9V_n \geq V_{bat} \geq 0,7V_n$	
	exaustão		$V_{bat} < 0,7V_n$	

Descarga

Nesta zona a bateria está fornecendo energia para o sistema. Junto com a área de carga, estas são as melhores zonas para a bateria trabalhar sem sofrer danos. A evolução da tensão da bateria é determinada pela Equação 3.7. Note que, nesta equação, é utilizado o valor absoluto da corrente de descarga I .

$$V_{dc}(t) = [V_{bdc} - K_{bdc}(1 - SOC(t))] - \frac{|I(t)|}{C_{10}} \left(\frac{P_{1dc}}{1 + |I(t)|^{P_{2dc}}} + \frac{P_{3dc}}{SOC(t)^{P_{4dc}}} + P_{5dc} \right) (1 - \alpha_{rdc} \Delta T(t)) \quad (3.7)$$

- Sobredescarga: A bateria trabalha nesta zona se uma quantidade excessiva de energia foi retirada dela. A tensão decresce rapidamente, devido aos efeitos não lineares das reações eletroquímicas, como indicado na Equação 3.7.

Esta é uma zona crítica para a bateria e deve ser evitada através do desligamento da bateria do sistema, ou pelo desligamento da carga. Normalmente, o controlador de carga e descarga realiza este desligamento até que a bateria tenha energia suficiente armazenada.

- Exaustão: Esta é a zona mais prejudicial e pode danificar a bateria definitivamente. Apesar do fato que a Equação 3.7 continue sendo válida, SOC não deve ser zero para evitar uma singularidade.

Carga

A bateria é colocada nesta zona quando existe energia em excesso no sistema. A absorção de energia provoca um aumento na tensão da bateria, como descreve a Equação 3.8. Como

descrito acima, junto com a zona de descarga, estas são as zonas mais seguras para a bateria operar, e o controlador de carga e descarga deve procurar garantir que a bateria opere nestas zonas. Um fator de eficiência de carga η_c , deve ser considerado para refletir que apenas uma fração da energia teórica é realmente armazenada. A Equação 3.9 é utilizada para descrever a relação entre o fator de eficiência η_c , a corrente de carga I e o SOC .

$$V_c(t) = (V_{boc} - K_{boc}SOC(t)) + \frac{I(t)}{C_{10}} \left(\frac{P_{1c}}{1 + |I(t)|^{P_{2c}}} + \frac{P_{3c}}{(1 - SOC(t))^{P_{4c}}} + P_{5c} \right) (1 - \alpha_{rc}\Delta T(t)) \quad (3.8)$$

$$\eta_c = 1 - \exp \left[\frac{a_{cmt}}{\left(\frac{I(t)}{I_{10}} + b_{cmt} \right)} \right] (SOC(t) - 1) \quad (3.9)$$

- **Sobrecarga:** Se muita energia é armazenada na bateria, ela pode começar a saturar, diminuindo a aceitação de carga devido ao *efeito de gaseificação* no eletrólito. As Equações 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 descrevem esse efeito. O modelo assume que a bateria entra nesta zona quando $V_{bat} \geq V_g$, onde V_g é a tensão de gaseificação.

Esta é uma zona também crítica, devido ao efeito de gaseificação, o qual libera hidrogênio extra para a atmosfera com o risco de perda de material ativo, incluindo explosões.

$$V_g(t) = \left[A_{gas} + B_{gas} \ln \left(1 + \frac{I(t)}{C_{10}} \right) \right] (1 - \alpha_{gas}\Delta T(t)) \quad (3.10)$$

$$V_{ec}(t) = \left[A_{fonsc} + B_{fonsc} \ln \left(1 + \frac{I(t)}{C_{10}} \right) \right] (1 - \alpha_{fc}\Delta T(t)) \quad (3.11)$$

$$V_{sc}(t) = V_g(t) + (V_{ec}(t) - V_g(t)) \left[1 - \exp \left(\frac{LOE(t)C_n - SOC_{V_g}C(t)}{I(t)\tau(t)} \right) \right] \quad (3.12)$$

$$\tau(t) = \frac{A_{\tau sc}}{1 + B_{\tau sc} \left(\frac{I(t)}{C_{10}} \right)^{C_{\tau sc}}} \quad (3.13)$$

$$SOC_{V_g} = SOC|_{V_c=V_g} \quad (3.14)$$

- **Saturação:** A bateria não pode aceitar energia indefinidamente. Assim a partir de um certo ponto, ela não pode aceitar qualquer energia a mais. Neste ponto sua tensão está maximizada. Note que ambas as Equações 3.11 e 3.12 convergem para o

mesmo valor de tensão. Esta zona pode afetar permanentemente a saúde da bateria, e normalmente, o controlador de carga e descarga desconecta as fontes de energia para forçar a descarga da bateria através de uma carga consumidora conectada.

3.3.5 Transição entre Carga/Descarga ou Descarga/Carga

Quando a corrente de uma bateria, em aplicações dinâmicas, força a transição da zona de carga para a zona descarga ou vice versa, as equações de tensão de ambas as zonas podem introduzir uma singularidade numérica.

$$V_c|_{I=0}(\text{bateria em carga}) \neq V_{dc}|_{I=0}(\text{bateria em descarga})$$

Para evitar esta descontinuidade no modelo de tensão da bateria, é definido um valor limite de corrente $|I\delta|$, para identificar a fronteira entre as áreas de operação de carga e descarga. Quando $|I| < |I\delta|$, a Equação 3.15 deve ser utilizada para evitar a referida descontinuidade.

$$V_{cdc} = \frac{V_{c|I\delta} - V_{dc|I\delta}}{2I\delta} I + \frac{V_{c|I\delta} + V_{dc|I\delta}}{2} \quad (3.15)$$

onde V_c e V_{dc} são as equações para as zonas de carga e descarga, respectivamente.

Na Tabela 3.2, são mostrados os parâmetros da bateria chumbo-ácido utilizada nas simulações de desempenho de baterias chumbo-ácido, veja o Capítulo 6. Esses parâmetros foram obtidos de (Guasch e Silvestre, 2003).

Neste trabalho, o modelo de bateria chumbo-ácido Shepherd-Schiffer é utilizado para a previsão do tempo de vida de um banco de baterias de um SMFE. A seguir, são apresentados os principais detalhes deste modelo.

3.4 Modelo de tempo de vida Shepherd-Schiffer

Em (Schiffer et al., 2007), é apresentado um modelo para baterias chumbo-ácido que permite a comparação do impacto no tempo de vida destas baterias submetidas a diferentes condições de operação, diferentes configurações de sistemas e diferentes tecnologias de baterias. Segundo os autores, trata-se de uma ferramenta para projetistas e operadores de sistemas, permitindo selecionar baterias adequadas, dimensionar baterias, geradores e cargas; e implementar uma estratégia otimizada de operação, por exemplo: tensão de fim de

Tabela 3.2: Parâmetros da bateria chumbo-ácido utilizada nas simulações de desempenho.

Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
$C_{nominal}$	54	Ah	n	10	h
C_{tcoef}	1,67		α_c	0,005	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
β_c	0	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	A_{cap}	0,67	
B_{cap}	0,9		V_{bodc}	2,085	V
K_{bodc}	0,12	V	P_{1dc}	4	VAh
P_{2dc}	1,3		P_{3dc}	0,27	Vh
P_{4dc}	1,5		P_{5dc}	0,02	Vh
a_{cmt}	20,73		b_{cmt}	0,55	
V_{boc}	2	V	K_{boc}	0,16	V
P_{1c}	6		P_{2c}	0,86	
P_{3c}	0,48	Vh	P_{4c}	1,2	
P_{5c}	0,036	Vh	A_{gas}	2,24	V
B_{gas}	1,97	Vh	α_{gas}	0,002	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
α_{fc}	0,002	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	α_{rdc}	0,007	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
α_{rc}	0,025	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	A_{fonsc}	2,45	V
B_{fonsc}	2,011	Vh	$A_{\tau sc}$	17,3	h
$B_{\tau sc}$	852	h	$C_{\tau sc}$	1,67	

carga, frequência de carga completa, períodos de gaseificação, profundidade máxima de descarga, etc. Este modelo de tempo de vida de baterias foi integrado à ferramenta IPSYS em (Andersson et al., 2007).

O modelo leva em conta dois mecanismos de envelhecimento, corrosão da grade do eletrodo positivo e degradação do material ativo. Além disso, estratificação do eletrólito, gaseificação e estrutura dos cristais de sulfato de chumbo (sulfatação), também são considerados devido os seus impactos no envelhecimento da bateria.

3.4.1 Descrição do Modelo

Um diagrama simplificado do modelo é mostrado na Figura 3.3. Para cada passo de simulação, a tensão e o estado de carga (SoC) são determinados com base nos parâmetros da bateria.

A tensão é calculada de acordo com a equação modificada de Shepherd (Shepherd, 1965). O estado de carga é calculado pela integração da diferença entre a corrente da bateria e a corrente de gás. Com base na tensão e no estado de carga, os parâmetros relacionados com corrosão e degradação são determinados e usados para: (i) modificar os parâmetros

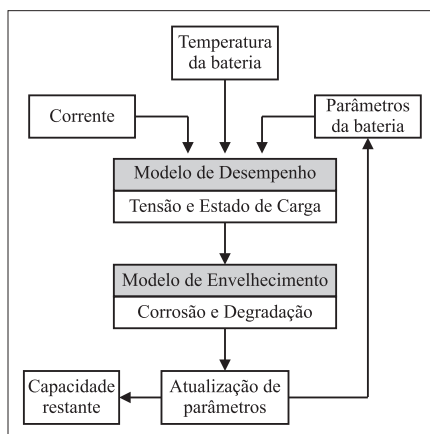


Figura 3.3: Diagrama simplificado do modelo Shepherd-Schiffer (Schiffer et al., 2007).

da bateria e (ii) para determinar a capacidade restante da bateria, principal informação fornecida pelo modelo.

Esta abordagem também é utilizada no modelo de bateria FhG/Risø (Bindner et al., 2005), cujo diagrama de fluxo do modelo é mostrado na Figura 3.4. Os modelos são semelhantes, entretanto, o modelo FhG/Risø não leva em conta um parâmetro muito importante, a temperatura da bateria. Uma nova versão do modelo FhG/Risø é apresentada em (Andersson, 2006).

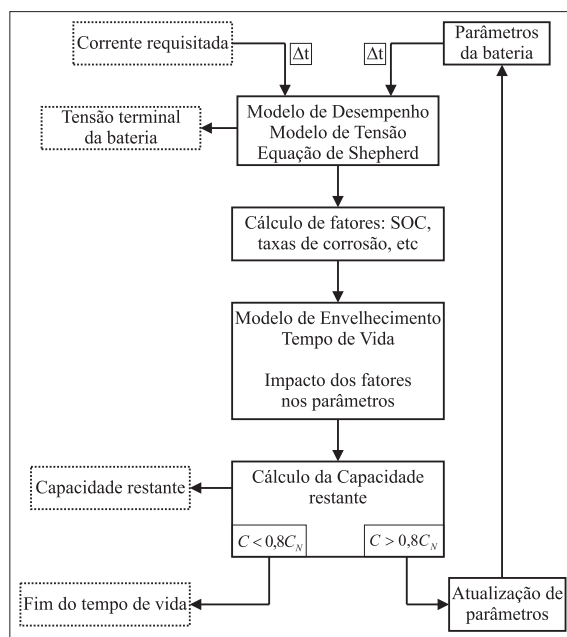


Figura 3.4: Diagrama de fluxo do modelo FhG/Risø (Bindner et al., 2005).

3.4.2 Características de Tensão e Corrente

Conforme foi dito anteriormente, a tensão de cada célula da bateria é calculada através da equação modificada de Shepherd (Shepherd, 1965). As equações de tensão para carga e descarga são apresentadas a seguir.

Carga:

$$U(t) = U_0 - gDoD(t) + \rho_c(t) \frac{I(t)}{C_N} + \rho_c M_c \frac{I(t)}{C_N} \frac{SoC(t)}{C_c - SoC(t)}, \quad \forall I(t) > 0 \quad (3.16)$$

Descarga:

$$U(t) = U_0 - gDoD(t) + \rho_d(t) \frac{I(t)}{C_N} + \rho_d M_d \frac{I(t)}{C_N} \frac{DoD(t)}{C_d - DoD(t)}, \quad \forall I(t) \leq 0 \quad (3.17)$$

onde

- U é a tensão terminal da célula, em V;
- U_0 é a tensão de circuito aberto da célula no estado completamente carregada, em V;
- SoC é o estado de carga. $SoC = 1$ para a bateria completamente carregada e $SoC = 0$ após a descarga da capacidade nominal da bateria. $SoC < 0$ também é possível¹;
- $DoD = 1 - SoC$ é a profundidade de descarga;
- ρ_c/ρ_d é resistência interna agregada de carga/descarga, em ΩAh ;
- $I(t)$ é a corrente da bateria, em A. (Carga: $I(t) > 0$; Descarga: $I(t) \leq 0$);
- C_N é a capacidade nominal da bateria, em Ah;
- M_c/M_d é o coeficiente de sobretensão de carga/descarga transferida; e
- C_c/C_d é a capacidade normalizada de carga/descarga.

A corrosão afeta, principalmente, o eletrodo positivo. Portanto, somente a tensão do eletrodo positivo é considerada para o cálculo de corrosão através da utilização da equação modificada de Shepherd:

¹Como a capacidade nominal C_N que é usada como referência no modelo é, normalmente, menor do que a capacidade atual da bateria, o SoC pode assumir valores negativos (Andersson, 2006).

Carga:

$$U_{corr}(t) = U_{corr,0} - \frac{10}{13}gDoD(t) + 0,5\rho_c(t)\frac{I(t)}{C_N} + 0,5\rho_cM_c\frac{I(t)}{C_N}\frac{SoC(t)}{C_c - SoC(t)}, \quad \forall I(t) > 0 \quad (3.18)$$

Descarga:

$$U_{corr}(t) = U_{corr,0} - \frac{10}{13}gDoD(t) + 0,5\rho_d(t)\frac{I(t)}{C_N} + 0,5\rho_dM_d\frac{I(t)}{C_N}\frac{DoD(t)}{C_d - DoD(t)}, \quad \forall I(t) \leq 0 \quad (3.19)$$

onde $U_{corr,0}$ é a tensão de corrosão para uma bateria completamente carregada e sem fluxo de corrente, a qual é função da concentração de ácido (por exemplo, 1,75 V para $\rho = 30\%$).

3.4.3 Corrente de Gaseificação e Estado de Carga

A corrente de gaseificação pode ser calculada a partir da seguinte equação, a qual é derivada de uma aproximação de Tafel:

$$I_{gas} = \frac{C_N}{100 \text{ Ah}} I_{gas,0} \exp(c_u(U - U_{gas,0}) + c_T(T - T_{gas,0})) \quad (3.20)$$

onde

- $I_{gas,0}$ é a corrente de gás normalizada para 100 Ah;
- $U_{gas,0}$ é a tensão nominal para gaseificação;
- $T_{gas,0}$ é a temperatura nominal para gaseificação;
- c_u é o coeficiente de tensão;
- c_T é o coeficiente de temperatura;
- U é a tensão da célula; e
- T é a temperatura da bateria.

O estado de carga SoC é calculado pela integração da corrente menos corrente de gás dividido pela capacidade nominal, ou seja:

$$SoC(t) = SoC(0) + \int_0^t \frac{I(\tau) - I_{gas}(\tau)}{C_N} d\tau \quad (3.21)$$

3.4.4 Corrosão da Grade Positiva

O modelo de corrosão utiliza o conceito de uma “camada” de corrosão com baixa condutividade, a qual cresce ao longo da vida da bateria. A sua resistência é adicionada à resistência da bateria nova. A espessura efetiva da camada de corrosão ΔW é calculada em cada passo de simulação, dependendo da tensão de corrosão U_{corr} :

$$(U_{corr} < 1,74) \quad \Delta W(t) = k_s x^{0,6} \quad (3.22)$$

onde

$$x = \left(\frac{\Delta W(t - \Delta t)}{k_s} \right)^{1/0,6} + \Delta t$$

$$(U_{corr} \geq 1,74) \quad \Delta W(t) = \Delta W(t - \Delta t) + k_s \Delta t \quad (3.23)$$

onde

- Δt é a duração do passo de simulação; e
- k_s é o parâmetro de velocidade de corrosão. Calculado a partir da Lei de Arrhenius:

$$k_s(U_{corr}, T) = k(U_{corr}) \exp(k_{s,T}(T - T_{corr,0})) \quad (3.24)$$

onde

- $k(U_{corr})$ é uma curva de velocidade de corrosão \times tensão de corrosão (veja (Bindner et al., 2005), página 31);
- $k_{s,T} = \ln(2)/15$ K, é o fator de temperatura. $T_{corr,0} = 298$ K;

A resistência ρ_{corr} da camada de corrosão e a perda de capacidade C_{corr} , dependem de ΔW , ou seja:

$$\rho_{corr}(t) = \rho_{corr,limit} \frac{\Delta W(t)}{\Delta W_{limit}} \quad (3.25)$$

$$C_{corr}(t) = C_{corr,limit} \frac{\Delta W(t)}{\Delta W_{limit}} \quad (3.26)$$

Todos os parâmetros com o índice “limit” são os valores que correspondem ao resultado de manter a bateria em carga de flutuação até o fim da vida (float lifetime). O cálculo dos parâmetros $\rho_{corr,limit}$ e $C_{corr,limit}$, baseia-se nas seguintes suposições: (i) o decréscimo

de 20% da capacidade no fim da vida da bateria, é causado pelo aumento da resistência interna devido a corrosão e (ii) os 80% restantes de capacidade diminuem devido a perda de material ativo pelo efeito da corrosão.

Para calcular ΔW_{limit} , o tempo de vida em flutuação L é multiplicado pelo parâmetro velocidade de corrosão $k_{s,limit}$, obtido da curva $k(U_{corr})$ para a tensão $U_{corr} = U_{float}$, ou seja:

$$\Delta W_{limit} = Lk_{s,limit} \quad (3.27)$$

3.4.5 Degradação da Massa Ativa

Degradação representa a perda de capacidade causada pela ciclos de carga/descarga da bateria. O tempo de vida em ciclagem definido pelo IEC (International Electrotechnical Commission), é fornecido em folha de dados de fabricantes e representa o estágio no qual a bateria tem uma capacidade restante igual a 80% de sua capacidade nominal.

O número efetivo de ciclos sem corrosão é definido como sendo 1,6 vezes o tempo de vida em ciclagem definido pelo IEC. O número de ciclos nominais Z_N , é calculado pela divisão da capacidade descarregada pela capacidade nominal da bateria, ou seja:

$$Z_N = \frac{1}{C_N} \int_0^t |I_{dch}(\tau)| d\tau \quad (3.28)$$

Para o cálculo da perda de capacidade devido a degradação, a taxa de transferência de Ah é sobrecarregada com o impacto do SoC , da corrente de descarga e da estratificação do ácido. O número de ciclos sobrecarregado Z_W é calculado com:

$$Z_W(t) = \frac{1}{C_N} \int_0^t |I_{dch}(\tau)| f_{SoC}(\tau) f_{Acid}(\tau) d\tau \quad (3.29)$$

onde

- f_{SoC} é o fator para a influência do SoC e o impacto da taxa corrente; e
- f_{Acid} é o fator que representa a influência da estratificação do ácido.

A Equação 3.29 é o núcleo desta abordagem de modelagem. A transferência de Ah é integrada e multiplicada pelos fatores que representam a degradação devido as condições atuais de operação. Estes fatores são descritos na próximas seções.

A perda de capacidade devido a degradação C_{deg} é calculada por:

$$C_{deg}(t) = C_{deg,limit} e^{-c_Z(1-(Z_W(t))/1,6Z_{IEC})} \quad (3.30)$$

$C_{deg,limit}$ é a capacidade no fim do tempo de vida, ou seja, 80 % de C_N . O valor do parâmetro c_Z é 5.

Impacto do Estado de Carga

A degradação aumenta com a redução do SoC da bateria. Esta influência é modelada pelo fator f_{SoC} (calculado pela Equação 3.31), o qual é definido como 1 em cada carga completa, e é incrementado com o tempo desde a última carga completa em t_0 , ou seja, $\Delta t_{SoC} = t - t_0$. SoC_{min} é o menor SoC desde a última carga completa. f_{SoC} é calculado por:

$$f_{SoC} = 1 + (c_{SoC,0} + c_{SoC,min}(1 - SoC_{min}(t)|_{t_0}^t)) \times f_I(I, n) \Delta t_{SoC}(t) \quad (3.31)$$

Os parâmetros $c_{SoC,0}$ e $c_{SoC,min}$ representam o aumento de f_{SoC} com o tempo em $SoC = 0$ e a influência do SoC_{min} . $f_I(I, n)$ é o fator de corrente, descrito na próxima seção.

Impacto da Estrutura de Cristais de Sulfato

Pequenas correntes de descarga, resultam num menor número de grandes cristais de sulfato de chumbo quando comparados com aqueles formados por grandes correntes de descarga. Cristais menores com o mesmo volume de sulfato de chumbo possuem maior superfície. Assim, durante o processo de carga esses cristais podem ser dissolvidos facilmente.

Por outro lado, em aplicações com tensão e tempos limitados de carga, esta não pode ser completada se os cristais de sulfato são grandes. Portanto, esses cristais permanecem nos eletrodos e tendem a crescer a cada ciclo. A partir de um certo tamanho, estes cristais tornam-se inativos. A dependência entre o número de cristais z e a corrente de descarga é dada pela função abaixo.

$$z = z_0 \left(\frac{I}{C_N} \right)^{1,5} \quad (3.32)$$

onde $z_0 = 2,961 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

Já que o número de cristais muda somente no início de uma descarga, ele não muda com o DoD . Portanto, z é independent de DoD . A influência da corrente está relacionada com

a superfície do cristal de de sulfato de chumbo, ou seja²:

$$f_I(I) = \frac{A_{ref}}{A(I)} = \frac{r_{ref}^2 z_{ref}}{r^2(I) z(I)} = \left(\sqrt[3]{\frac{z(I)}{z_{ref}}} \right)^2 \frac{z_{ref}}{z(I)} = \sqrt[3]{\frac{z(I)}{z_{ref}}} = \sqrt{\frac{I_{ref}}{I}} \quad (3.33)$$

Todas as variáveis com o índice “*ref*” são calculadas para uma corrente de referência I_{ref} (normalmente uma corrente para 10 h).

Para altas taxas de corrente, o tempo de vida aumenta, enquanto correntes baixas diminuem o tempo de vida em ciclagem da bateria. O número de cristais é mais influenciado pela corrente de descarga de uma bateria no estado completamente carregada. A redução no número de cristais z , com o número de ciclos ruins de recarga, n_* , pode ser calculado como segue:

$$z(n_*) = z(0) \exp\left(-\frac{n_*}{3,6}\right) \quad (3.34)$$

O fator de corrente total pode se calculado como:

$$f_I(I, n_*) = f_I(I) \sqrt[3]{\frac{z(0)}{z(n_*)}} = f_I(I) \sqrt[3]{\exp\left(+\frac{n_*}{3,6}\right)} \quad (3.35)$$

O número de ciclos de recargas ruins n_* , é incrementado a cada vez que o *SoC* alcança o estado que é definido como completamente carregada ($SoC > SoC_{limit}$).

Com o objetivo de obter uma função contínua para n_* em todos os estados de carga, a seguinte função é utilizada:

$$\Delta n_* = \frac{0,0025 - (SoC_{ref} - SoC_{max})^2}{0,0025} \quad (3.36)$$

Esta função é mostrada na Figura 3.5.

Estratificação do Ácido

O grau de estratificação do ácido é modelada pelo fator $f_{stratification}$:

$$f_{stratification} = \int (f_{plus} - f_{minus}) dt, \quad f_{stratification} \geq 0 \quad (3.37)$$

onde f_{plus} e f_{minus} representam um aumento e uma redução da estratificação do ácido, respectivamente.

²Em (Schiffer et al., 2007) não são apresentadas as definições dos parâmetros da Equação 3.33.

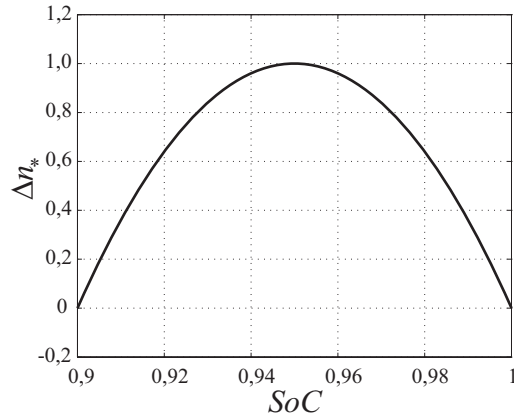


Figura 3.5: Fator de peso para a contagem de ciclos de recargas ruins (Schiffer et al., 2007).

O impacto total da estratificação do ácido na degradação do material ativo é modelado pelo fator f_{Acid} :

$$f_{Acid} = 1 + f_{stratification} \sqrt{\frac{I_{ref}}{|I|}} \quad (3.38)$$

O aumento da estratificação do ácido aumenta durante operação cíclica. f_{plus} é calculada pela seguinte equação:

$$f_{plus} = c_{plus}(1 - SoC_{min}|_{t_0}^t) \exp(-3f_{stratification}(t)) \frac{|I_{dch}(t)|}{I_{ref}} \quad (3.39)$$

Estratificação do ácido pode ser reduzida por difusão ou por gaseificação. O fator para redução total da estratificação do ácido é:

$$f_{minus} = f_{minus,gassing} + f_{minus,diffusion} \quad (3.40)$$

A redução da estratificação do ácido por gaseificação pode ser calculada como segue:

$$f_{minus,gassing} = c_{minus} \sqrt{\frac{100 \text{ Ah}}{C_N} \frac{I_{gas,0}(t)}{I_{gas,0}}} \exp(c_u(U_{cell} - U_{ref}) + c_T(T - T_{gas,0})) \quad (3.41)$$

A redução da estratificação do ácido por difusão pode ser calculada por:

$$f_{minus,diffusion} = \frac{2D}{(z_*/2)^2} f_{stratification} 2^{(T-20^\circ\text{C})/10\text{K}} = \frac{8D}{z_*^2} f_{stratification} 2^{(T-20^\circ\text{C})/10\text{K}} \quad (3.42)$$

3.4.6 Evolução no Tempo dos Parâmetros Afetados pelo Envelhecimento

No final de cada passo de simulação, os novos parâmetros de resistência e capacidade são calculados pelas seguintes equações.

$$\rho_c(t) = \rho_c(0) + \rho_{corr}(t) \quad (3.43)$$

$$\rho_d(t) = \rho_d(0) + \rho_{corr}(t) \quad (3.44)$$

A capacidade restante da bateria $C_{remaining}(t)$ é a capacidade inicial menos a perda de capacidade por corrosão e degradação, ou seja:

$$C_{remaining}(t) = C_d(t) = C_d(0) - C_{corr}(t) - C_{deg}(t) \quad (3.45)$$

Na Tabela 3.3, são mostrados os parâmetros da bateria chumbo-ácido utilizada nas simulações de tempo de vida de baterias chumbo-ácido, veja o Capítulo 6. Esses parâmetros foram obtidos de (Schiffer et al., 2007).

Tabela 3.3: Parâmetros da bateria chumbo-ácido utilizada nas simulações de tempo de vida.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
C_N	Capacidade nominal	54	Ah
Z_{IEC}	Número de ciclos sob condições normais	600	ciclos
L	Tempo de vida em flutuação	10	anos
U_0	Tensão de circuito aberto (TCA) em carga completa	2,1	V
g	Gradiente de variação da TCA com o SoC	0,076	V
ρ_c	Resistência interna efetiva de carga	0,42	ΩAh
ρ_d	Resistência interna efetiva de descarga	0,699	ΩAh
M_c	Resistência que representa o processo de transferência de carga, o qual depende do SoC durante carga	0,888	
M_d	Resistência que representa o processo de transferência de carga, o qual depende do SoC durante descarga	0,0464	
C_c	Capacidade normalizada de carga da bateria	1,001	
C_d	Capacidade normalizada de descarga da bateria	1,75	
I_{ref}	Corrente normalizada de referência	5,4	A
z_*	Altura da bateria	20	cm
$U_{corr,0}$	Tensão de corrosão para circuito aberto e carga completa	1,75	V
$I_{gas,0}$	Corrente normalizada de gás para $U_{gas,0}$ e $T_{gas,0}$	0,02	A
c_u	Coefficiente de tensão para a corrente de gás	11	V^{-1}
c_T	Coefficiente de temperatura para a corrente de gás	0,06	K^{-1}
$U_{gas,0}$	Tensão nominal para gaseificação	2,23	V
$T_{gas,0}, T_{corr,0}$	Temperatura de referência para gaseificação e corrosão	298	K
$k_{s,T}$	Coefficiente de temperatura para velocidade de corrosão	$\ln 2/15$	K^{-1}
$c_{SoC,0}$	Constante para o fator de SoC	$6,614\text{E}^{-5}$	h^{-1}
$c_{SoC,min}$	Impacto de SoC mínimo sobre o fator de SoC	$3,307\text{E}^{-3}$	h^{-1}
SoC_{limit}	Valor mínimo de SoC para cargas ruins	0,90	
SoC_{ref}	Valor de referência de SoC para cargas ruins	0,95	
c_{plus}	Fator de aumento da estratificação de ácido	1/30	
c_{minus}	Fator de redução da estratificação de ácido	0,1	
U_{ref}	Tensão de referência para redução da estratificação de ácido	2,5	V
$U_{acid,dec}$	Tensão para início de gaseificação para remover estratificação de ácido	2,3	V
D	Constante de difusão para o ácido sulfúrico	20E^{-9}	m^2s^{-1}
c_Z	Expoente para o cálculo da perda de capacidade devido a degradação	5	

Capítulo 4

Formalismo Redes de Petri Híbridas Diferenciais

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o formalismo Redes de Petri Híbridas Diferenciais. A utilização deste formalismo no estudo de SHs possibilita modelar, explorando o poder de representação das RPs, as características da dinâmica a eventos discretos, ou seja, concorrência, sincronismo, conflito, exclusão mútua, relações de precedência, não determinismo e bloqueio. Este formalismo foi apresentado em (Sousa et al., 2005b; Sousa, 2005; Sousa et al., 2005a; Sousa, 2006; Sousa et al., 2007; Sousa, 2007).

Entretanto, neste trabalho, assim como em (Sousa e Lima, 2008a) e (Sousa e Lima, 2008c), as RPHDs são aplicadas no estudo de Sistemas de Múltiplas Fontes Energia (SMFEs) como SHs. Na próxima seção, o estado da arte da aplicação de RPs na modelagem e simulação de SHs.

4.2 Modelagem e Simulação de Sistemas Híbridos com Redes de Petri

Para modelar e analisar formalmente SHs, é necessário utilizar um formalismo matemático que seja capaz de descrever suas dinâmicas e as interações entre estas (Dang, 2000).

Modelar SHs com RPs apresenta o desafio de como representar a dinâmica contínua dentro da estrutura de uma RP. Esta representação, conforme será visto a seguir, inclui: conceitos de velocidades de disparo de transições dependente da marcação para representar o processo de integração da dinâmica contínua, novos elementos gráficos para representar cada dinâmica e suas interações, sistema de equações diferenciais representado pela estrutura da RP, peso de arcos negativos, na forma de vetores ou matrizes, e variáveis contínuas negativas associadas a marcação da RP (Sousa, 2005).

A necessidade de uma extensão para atender a este desafio motivou a criação de vários modelos. O primeiro passo no sentido de incorporar dinâmicas contínuas a um modelo a eventos discretos foi realizado ao se definir as RPs Contínuas (RPCs) (David e Alla, 1987). A combinação de RPs contínuas com RPs ordinárias e RPs temporizadas deu origem ao conceito de RPs Híbridas (Le Bail et al., 1991; David e Alla, 2001; Alla e David, 2004; Ghomri e Alla, 2007). Porém, esses modelos não permitiam a representação de variáveis contínuas negativas e tornavam difícil a modelagem de sistemas com ordem maior do que um.

Diversos formalismos originaram-se a partir das RPs Híbridas. Em (Rezai et al., 1995), as RPs Globais foram propostas, onde a concepção de marcação de lugar é ampliada para vetores e a função definida para os arcos é matricial, o que resulta num modelo compacto. Drath (Drath, 1998), apresenta uma classe de RP Híbrida estendida para a modelagem de SHs. A modelagem de SHs complexos é estendida pela aplicação dos conceitos de orientação a objetos nas RPs Híbridas obtendo-se as RPs Híbridas Objeto. Estas utilizam basicamente a mesma estrutura das RPs Híbridas, mas estendem a capacidade para modelar SHs destas através da inclusão de um novo tipo de arco denominado *arco teste* na sua estrutura, e através de um novo conceito para as velocidades de disparo das transições contínuas para modelar dinâmicas contínuas não lineares.

A partir dos conceitos das RPs contínuas com velocidade máxima de disparo dependente do tempo (Dubois et al., 1994), foram definidas as RPs Diferenciais Temporizadas (Demongodin e Koussoulas, 1996). Esse formalismo permite a modelagem de variáveis contínuas negativas, entretanto, para uma dinâmica contínua de ordem elevada, a estrutura desse modelo torna-se difícil de visualizar.

Uma abordagem abrangente, que combina RPs e equações diferenciais, foi introduzida em (Daubas et al., 1994). Nesta, nenhuma restrição é imposta às equações que representam

a dinâmica contínua, e o seu cálculo é um processo implícito a cada lugar da RP. Portanto, nesta abordagem, a dinâmica a eventos discretos tem o papel de definir qual dinâmica contínua deve ser calculada de acordo com a marcação discreta da RP. Baseado nesta forma de tratar a interação entre as dinâmicas de um SH, em (Champagnat, 1998), foi introduzido o formalismo RPs Predicado/Transição Diferenciais. Este formalismo apresenta algumas semelhanças com o Autômato Híbrido (AH), já que utiliza elementos de modelagem equivalentes às funções de *guarda* e *reset* do AH. O AH é uma ferramenta poderosa para analisar SHs devido aos seus métodos de análise (Alur et al., 1995). Entretanto, a modelagem com o AH nem sempre é uma tarefa fácil, já que as regras de evolução associadas a este formalismo baseiam-se na definição prévia dos estados discretos que o modelo deve ter. Além disso, a ordem do modelo cresce consideravelmente com a complexidade do sistema modelado.

Em (Giua e Usai, 1998), os autores apresentam um modelo que provê uma representação gráfica simples para SHs com a vantagem da estrutura modular das RPs. Este formalismo é denominado RP Híbrida de Alto-Nível (RPHAN), ele utiliza os conceitos de RPs de alto nível (Jensen, 1992-1997) e RPCs (David e Alla, 1987).

RPHANs caracterizam-se pelo uso de fichas individuais com uma estrutura de dados associada. Um conjunto de *cores*, ou seja, domínios de disparo para as transições e domínios de marcação para os lugares. Esta estrutura de dados permite uma representação compacta dos sistemas modelados e é utilizada aqui para representar a dinâmica a eventos discretos. Para representar o espaço de estado da dinâmica contínua são utilizados vetores de números reais. O uso de números reais como *cores* permite modelar saltos descontínuos no espaço de estado. A evolução da dinâmica contínua é realizada pelo disparo de transições contínuas, seguindo a abordagem de (David e Alla, 1987).

Contudo, o formalismo RPHAN também utiliza velocidades de disparo dependentes da marcação para representar equações diferenciais ordinárias. Para as transições contínuas é associado um vetor de velocidades de disparo ao invés de uma velocidade somente. Neste formalismo existe a noção explícita de tempo levando em conta a presença de entradas externas contínuas e discretas. Cada transição discreta tem associado um tempo de atraso para disparo que pode depender do estado sistema e de uma entrada discreta externa. A velocidade de disparo de uma transição contínua também pode depender de entradas externas contínuas.

Aproveitando as vantagens das RPs Diferenciais Temporizadas e RPs Globais, foram propostas as RPs Diferenciais Generalizadas (RPDGs) (Wu et al., 2002). Esta extensão permite que métodos de integração numérica (e.g., Euler e Runge-Kutta) sejam utilizados para simular dinâmicas contínuas. Embora esse formalismo utilize o conceito de marcação contínua representada por um vetor (Rezai et al., 1995), ele também procura representar o sistema de equações diferenciais que representa a dinâmica contínua do SH, tal como em (Demongodin e Koussoulas, 1996).

Em (Villani, 2004), é apresentado um formalismo denominado Rede de Petri Predicado-Transição Diferencial Orientada a Objetos, para modelar e analisar sistemas supervisórios híbridos. Este formalismo incorpora os conceitos de orientação a objetos ao formalismo de (Champagnat, 1998). A principal vantagem desta incorporação é a adoção de uma estrutura modular, que permite o enfoque em apenas uma parte do sistema de cada vez, facilitando a modelagem de sistemas complexos e de grande porte.

Um formalismo para modelar e analisar circuitos analógicos e mistos (VHDL-AMS), dentro do contexto de SHs, é apresentado em (Little et al., 2007; Walter, 2007; Walter et al., 2007). O formalismo é denominado RPs Híbridas Etiquetadas (Labeled Hybrid Petri Nets) e baseia-se nas RPHs (Alla e David, 2004) e nos AHs (Alur et al., 1995). Este formalismo é uma extensão do formalismo RPs Híbridas Temporizadas (Timed Hybrid Petri Nets), desenvolvido com o mesmo objetivo e apresentado em (Little et al., 2004).

Os formalismos propostos em (Le Bail et al., 1991; Demongodin e Koussoulas, 1996; Giua e Usai, 1998; Drath, 1998; Wu et al., 2002), modelam o processo de integração numérica da equação diferencial ou do sistema de equações diferenciais, que representa a dinâmica contínua do SH estudado. Esta abordagem faz com que sistemas com ordem elevada tenham um modelo híbrido com uma estrutura muito complexa. Em (Drath, 1998), esse problema é tratado através da aplicação dos conceitos de orientação a objetos.

Por outro lado, (Daubas et al., 1994; Champagnat, 1998) procuram reduzir esta complexidade considerando o cálculo da evolução contínua como um processo implícito da semântica do modelo a eventos discretos, tal como ocorre no AH (Dang, 2000; Alur et al., 1995). Portanto, o modelo RP apresenta uma estrutura reduzida.

O formalismo apresentado neste trabalho combina as vantagens dos trabalhos desenvolvidos em (Le Bail et al., 1991), (Daubas et al., 1994), (Demongodin e Koussoulas, 1996),

(Champagnat, 1998) e (Wu et al., 2002). Com a utilização deste formalismo, pretende-se explicitar e enfatizar as interações que ocorrem entre as dinâmicas de um SH. O processo de cálculo da dinâmica contínua é realizado, de forma implícita, ao modelo que representa a dinâmica a eventos discretos.

Desta forma, espera-se que o mesmo possa contribuir para o estudo de SHs através da associação entre o poder de modelagem das RPs e os métodos de análise desenvolvidos, originalmente, para os AHs, por exemplo. O formalismo utiliza a abordagem seguida por (Daubas et al., 1994; Champagnat, 1998). Este formalismo é denominado Redes de Petri Híbridas Diferenciais (RPHDs) e é apresentado na próxima seção. Os formalismos citados nesta seção são apresentados com detalhes em (Sousa, 2005).

4.3 Redes de Petri Híbridas Diferenciais

Uma RPHD é composta de dois tipos de lugares e dois tipos transições: lugares e transições discretos, lugares e transições diferenciais. Um lugar diferencial é representado por três círculos concêntricos e uma transição diferencial por dois retângulos concêntricos, enquanto um lugar e uma transição discretos são representados por um círculo e uma barra, respectivamente. Na Figura 4.1 são mostrados os lugares e transições de uma RPHD.

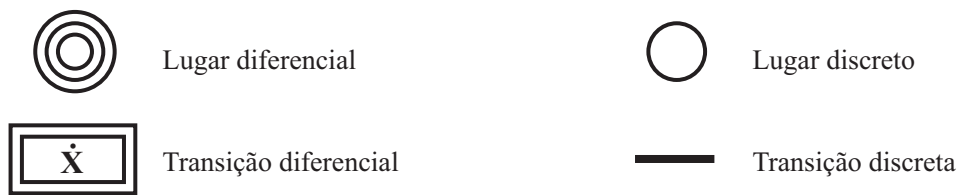


Figura 4.1: Lugares e transições de uma RPHD.

Uma RPHD possui três tipos de arcos: *arco normal*, *arco inibidor* e *arco teste*. O *arco normal* e o *arco inibidor* podem ser usados para conectar os elementos discretos da rede, com exceção para o arco que conecta um lugar diferencial e uma transição discreta, onde é usado o *arco teste*. Na Figura 4.2 são mostrados os tipos de arcos de uma RPHD. A seguir, as RPHDs são definidas formalmente.



Figura 4.2: Tipos de arcos de uma RPHD.

Definição 1 Uma Rede de Petri Híbrida Diferencial é definida como $RPHD = (P_D, T_D, P_{DF}, T_{DF}, \mathbf{X}, A_N, A_I, A_T, Pre, Pos, \mathcal{T}, H, J, M_0)$, onde

- $P_D = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ é um conjunto de lugares discretos, não vazio e finito. Onde n é a cardinalidade de P_D ;
- $T_D = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ é um conjunto de transições discretas, não vazio e finito. Onde m é a cardinalidade de T_D ;
- $P_{DF} = \{P_{n+1}, P_{n+2}, \dots, P_{n+r}\}$ é um conjunto de lugares diferenciais, não vazio e finito. Onde r é a cardinalidade de P_{DF} ;
- $T_{DF} = \{T_{m+1}, T_{m+2}, \dots, T_{m+q}\}$ é um conjunto de transições diferenciais, não vazio e finito. Onde q é a cardinalidade de T_{DF} ;
 - $P = P_D \cup P_{DF}$ e $T = T_D \cup T_{DF}$;
 - $P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$;
 - Lugares discretos ($P_i \in P_D$) modelam o estado discreto de um SH;
 - Transições discretas ($T_j \in T_D$) modelam a ocorrência de eventos discretos num SH;
 - Lugares diferenciais ($P_i \in P_{DF}$) modelam o estado contínuo de um SH;
 - Transições diferenciais ($T_j \in T_{DF}$) modelam o cálculo da evolução contínua de um SH;
- $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_l]^T$, é um vetor de estado contínuo associado a um lugar diferencial $P_i \in P_{DF}$, onde $\mathbf{X} \subset \mathbb{R}^l$ e l é a dimensão da dinâmica contínua do SH;
 - $\mathbf{X}_0 = [x_1(0), x_2(0), \dots, x_l(0)]^T$, é o vetor de estado contínuo inicial do SH;

- A evolução no tempo de \mathbf{X} é dada por $\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}, t)$. Portanto, para cada transição diferencial $T_j \in T_{DF}$, é atribuída uma condição de fluxo $\dot{\mathbf{X}}$, a qual é utilizada no cálculo da evolução contínua;
- $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_s]^T$ é o vetor de entrada do SH. Onde s é a cardinalidade de \mathbf{U} ;
- $A_N \subseteq ((P_D \times T_D) \cup (T_D \times P_D)) \cup ((P_D \times T_{DF}) \cup (T_{DF} \times P_D))$ é um conjunto de *arcos normais*;
- $A_I \subseteq (P_D \times T_D)$ é um conjunto de *arcos inibidores*;
- $A_T \subseteq (P_{DF} \times T_D) \cup (T_D \times P_{DF})$ é um conjunto de *arcos teste*;
- Pre é a incidência anterior dividida em:
 - $Pre_D(P_i, T_j)$ é uma função que define os *arcos normais* (A_N) de um lugar discreto ($P_i \in P_D$) para uma transição discreta ($T_j \in T_D$). $Pre_D(P_i, T_j)$ é um inteiro positivo;
 - $Pre_I(P_i, T_j)$ é uma função que define os *arcos inibidores* (A_I) de um lugar discreto ($P_i \in P_D$) para uma transição discreta ($T_j \in T_D$). $Pre_I(P_i, T_j)$ é um inteiro positivo;
 - $Pre_{DDF}(P_i, T_j)$ é uma função que define os *arcos normais* (A_N) de um lugar discreto ($P_i \in P_D$) para uma transição diferencial ($T_j \in P_{DF}$). $Pre_{DDF}(P_i, T_j)$ é um inteiro positivo.
- Pos é a incidência posterior dividida em:
 - $Pos_D(P_i, T_j)$ é uma função que define os *arcos normais* (A_N) de uma transição discreta ($T_j \in T_D$) para um lugar discreto ($P_i \in P_D$). $Pos_D(P_i, T_j)$ é um inteiro positivo;
 - $Pos_{DDF}(P_i, T_j)$ é uma função que define os *arcos normais* (A_N) de uma transição diferencial ($T_j \in T_{DF}$) para um lugar discreto ($P_i \in P_D$). $Pos_{DDF}(P_i, T_j)$ é um inteiro positivo;

- $Pos_{DF}(P_i, T_j)$ é uma função que define os *arcos normais* (A_N) de uma transição diferencial ($T_j \in T_{DF}$) para um lugar diferencial ($P_i \in P_{DF}$). $Pos_{DF}(P_i, T_j)$ é o vetor de estado contínuo (\mathbf{X}).
- \mathcal{T} é um mapa de temporização para as transições discretas. Diferentemente do que propõe (Wu et al., 2002) e (Demongodin e Koussoulas, 1996), numa RPHD não é necessário definir um *atraso* para as transições diferenciais;
- $H_{P_i, T_j} : P_{DF} \times T_D \rightarrow \mathbf{X}$, é uma *função de habilitação*¹ associada ao *arco teste* (A_T) que conecta um lugar diferencial de entrada ($P_i \in P_{DF}$) à transição discreta ($T_j \in T_D$). A habilitação de T_j é definida de acordo os valores das variáveis de estado x_k associadas com a marcação do lugar P_i .
- $J_{T_j, P_i} : T_D \times P_{DF} \rightarrow \mathbf{X}$, é uma *função de junção*¹ associada ao *arco teste* (A_T) que conecta uma transição discreta ($T_j \in T_D$) a um lugar diferencial de saída ($P_i \in P_{DF}$). J_{T_j, P_i} define os novos valores das variáveis de estado x_k associados com a marcação do lugar diferencial P_i após o disparo de T_j . Para os casos em que J_{T_j, P_i} não é definida, J_{T_j, P_i} é a função identidade; e
- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ ou \mathbb{R}^l , representa a marcação inicial da rede em $t = 0$. Para um lugar discreto (diferencial) $P_i \in P_D$ ($P_i \in P_{DF}$), a sua marcação e marcação inicial são representadas por $m_D(P_i)(t)$ ($m_C(P_i)(t)$) e $m_{D_0}(P_i)(t)$ ($m_{C_0}(P_i)(t)$), respectivamente.

4.3.1 Marcação de uma RPHD

A marcação de uma RPHD é representada por $m_D(P_i)(t)$ ou $m_C(P_i)(t)$, ou seja, a marcação de um lugar P_i no tempo t depende do tipo de lugar.

- Para um lugar discreto, a marcação é um inteiro não negativo, ou seja, se $P_i \in P_D$, então $m_D(P_i)(t) \in \mathbb{N}$.
- Para um lugar diferencial, a marcação é um vetor real, ou seja, se $P_i \in P_{DF}$, então $m_C(P_i)(t) = \mathbf{X}$ e $m_{C_0}(P_i)(t) = \mathbf{X}_0$. Portanto, a marcação de um lugar diferencial

¹Em (Champagnat, 1998), estas funções são associadas à transições discretas.

representa o vetor de estado contínuo do SH.

$$m_C(P_i)(t) = \mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_l]^T$$

A marcação de uma RPHD é representada na forma de um vetor coluna com a seguinte estrutura:

$$M(t) = [M_D(t) \ M_C(t)]^T = [[m_D(P_1)(t) \ \dots \ m_D(P_n)(t)]^T \ m_C(P_{n+1})(t) \ \dots \ m_C(P_r)(t)]^T$$

onde

- $M(t)$ é a marcação da rede no tempo;
- $M_D(t)$ é a marcação discreta da rede no tempo; e
- $M_C(t)$ é a marcação contínua da rede no tempo.

4.3.2 Mapa de Temporização

Para uma transição discreta: se $T_j \in T_D$, então $\mathcal{T}(T_j) = d_j \in \mathbb{R}^{\geq 0}$, onde d_j é o tempo de atraso associado a transição T_j . Se $d_j = 0$, então a transição T_j executará o seu disparo imediatamente após ser habilitada.

4.3.3 Condições Particulares para a estrutura de uma RPHD

Sejam $\bullet T_j$ ($\bullet P_i$) e T_j^\bullet (P_i^\bullet) os conjuntos de predecessores e sucessores da transição T_j (do lugar P_i), respectivamente.

Definição 2 *Se um arco normal conecta um lugar discreto a uma transição diferencial, deve existir outro arco normal conectando esta transição diferencial ao mesmo lugar discreto. Além disso, esses arcos normais devem ter o mesmo peso. Formalmente, se $P_i \in P_D$ e $T_j \in P_{DF}$ tal que $P_i \in \bullet T_j$ (resp. $P_i \in T_j^\bullet$), então $P_i \in T_j^\bullet$ (respectivamente $P_i \in \bullet T_j$) e $Pre_{DDF}(P_i, T_j) = Pos_{DDF}(P_i, T_j)$. Esta condição considera que a marcação de todos os lugares discretos é um inteiro para qualquer evolução da rede.*

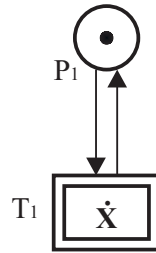


Figura 4.3: Condição particular de uma RPHD para garantir a integridade da marcação de lugares discretos conectados a transições diferenciais, neste caso a marcação de P_1 .

Esta condição pode ser observada no modelo RPHD mostrado na Figura 4.3. Neste caso, os dois arcos conectando o lugar discreto P_1 e a transição diferencial T_1 garantem a integridade da marcação de P_1 .

Definição 3 *Um arco normal pode conectar uma transição diferencial a um lugar diferencial, mas o contrário, não é permitido. Formalmente, se $P_i \in P_{DF}$ e $T_j \in P_{DF}$, então $\bullet T_j \cap P_i = \emptyset$. Esta condição, contudo, não limita a modelagem de uma dinâmica contínua porque: a) o estado de um lugar diferencial não influencia diretamente a habilitação/deshabilitação de uma transição diferencial; b) a evolução da marcação do lugar P_i é determinada pela dinâmica contínua associada à transição T_j de entrada e não pelo sentido do arco normal que os conecta.*

Esta condição é ilustrada no modelo RPHD da Figura 4.4 (a). A habilitação de T_1 não depende da marcação de P_2 , e embora exista um arco direcionado de T_1 para P_2 , isto não implica que a marcação contínua de P_2 deverá, obrigatoriamente, crescer. Para confirmar esta condição, pode-se observar a evolução da variável de estado contínuo x_1 na Figura 4.4 (b). Neste caso, é simulado a resposta natural de um SH com apenas um modo de operação. A dinâmica contínua é modelada pela equação diferencial $\dot{x} = -x$. O estado contínuo inicial é $m_{C_0}(P_2)(t) = \mathbf{X}_0 = [3]$.

Lugares de Fusão

Com a finalidade de melhorar a representação gráfica de uma RPHD, *lugares de fusão* podem ser utilizados. *Lugares de fusão* representam um mesmo lugar na estrutura da rede.

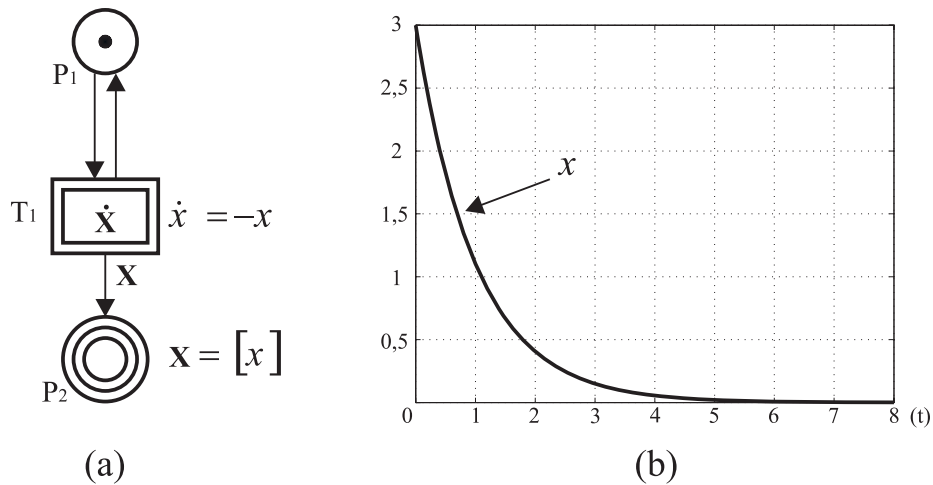


Figura 4.4: Condição particular de uma RPHD. (a) conexão entre uma transição diferencial e um lugar diferencial; (b) evolução de $m_C(P_2)(t) = \mathbf{X} = [x]$.

Portanto, eles têm marcações iguais. Tanto lugares discretos com diferenciais podem ser definidos como lugares de fusão. Os lugares de fusão são identificados de duas formas:

1. pelo rótulo F_f , onde $f \in \mathbb{N}$, e
2. pelo índice i de (P_i) , associado a cada lugar discreto ou diferencial.

Além disso, *lugares de fusão* podem ser utilizados na composição dos submodelos para formar um modelo RPHD. Na Figura 4.5, são mostrados dois exemplos de lugares de fusão.

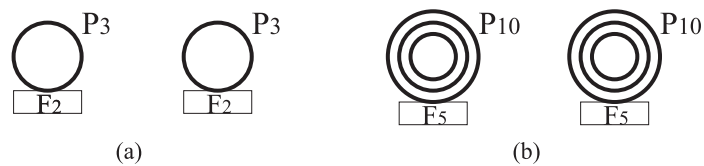


Figura 4.5: Exemplos de lugares de fusão numa RPHD: (a) discretos e (b) diferenciais.

4.3.4 Regras de Evolução

A evolução de uma RPHD é gerada pelo disparo de transições. Para cada tipo de transição, as condições de habilitação e disparo são diferentes.

Condições de Habilitação

Definição 4 *Uma transição discreta T_j está habilitada no tempo t , se e somente se, cada lugar discreto de entrada tem uma marcação pelo menos igual ao peso do arco normal correspondente, e para aqueles lugares discretos de entrada que conectam-se através de um arcos inibidores, se esses lugares têm uma marcação inferior ao peso dos arcos inibidores correspondentes. Além disso, para cada lugar diferencial de entrada, a respectiva função de habilitação H_{P_i, T_j} deve ter predicado verdadeiro. Formalmente, para $T_j \in T_D$, então T_j estará habilitada se e somente se:*

- $\forall P_i \in P_D \cap \bullet T_j, m_D(P_i)(t) \geq Pre_D(P_i, T_j);$
- $\forall P_i \in P_D \cap \bullet T_j, m_D(P_i)(t) < Pre_I(P_i, T_j);$ e
- $\forall P_i \in P_{DF} \cap \bullet T_j, H_{P_i, T_j} = Verdadeiro.$

Nota 1 *Não é permitido atribuir simultaneamente à uma transição discreta ($T_j \in T_D$) uma restrição de tempo d_j e uma função de habilitação H_{P_i, T_j} .*

Nota 2 *Uma transição discreta ($T_j \in T_D$) que não possui lugar discreto de entrada está sempre habilitada. Ela é dita uma transição discreta fonte.*

Para o modelo RPHD mostrado na Figura 4.6, a transição discreta T_1 está habilitada pela ficha presente no lugar discreto P_1 .

Definição 5 *Uma transição diferencial T_j está habilitada no tempo t , se e somente se, cada lugar discreto de entrada tem uma marcação pelo menos igual ao peso do arco normal correspondente, ou seja, se $T_j \in T_{DF}$, então $\forall P_i \in P_D \cap \bullet T_j, m_D(P_i)(t) \geq Pre_{DDF}(P_i, T_j)$.*

Veja o modelo RPHD mostrado na Figura 4.6 (a), onde o lugar discreto P_1 tem uma marcação suficiente para habilitar a transição diferencial T_2 .

Nota 3 *Uma transição diferencial ($T_j \in T_{DF}$) que não possui lugar discreto de entrada está sempre habilitada. Ela é dita uma transição diferencial fonte.*

Condições de Disparo

Definição 6 Quando uma transição discreta dispara, um número de fichas igual ao peso do arco normal que liga cada lugar discreto de entrada à transição discreta é removido do respectivo lugar discreto de entrada, enquanto um número de fichas igual ao peso do arco normal que liga à transição cada lugar discreto de saída é adicionado ao respectivo lugar discreto de saída. Formalmente,

- Se $\mathcal{T}(T_j) = d_j = 0$, então a transição $T_j \in T_D$ executa o seu disparo imediatamente após ser habilitada. Assim, $\forall P_i \in P_D \cap \bullet T_j$, $m_D(P_i)(t) = m_D(P_i)(t) - \text{Pre}_D(P_i, T_j)$ e $\forall P_i \in P_D \cap T_j^\bullet$, $m_D(P_i)(t) = m_D(P_i)(t) + \text{Pos}_D(P_i, T_j)$.
- Se $\mathcal{T}(T_j) = d_j \neq 0$, então $T_j \in T_D$ dispara no tempo $t + d_j$, $\forall P_i \in P_D \cap \bullet T_j$, $m_D(P_i)(t + d_j) = m_D(P_i)(t) - \text{Pre}_D(P_i, T_j)$ e $\forall P_i \in P_D \cap T_j^\bullet$, $m_D(P_i)(t + d_j) = m_D(P_i)(t) + \text{Pos}_D(P_i, T_j)$.

Para cada arco teste (A_T) que conecta esta transição discreta $T_j \in T_D$ a um lugar diferencial de saída, então a respectiva função de junção J_{T_j, P_i} é aplicada às variáveis de estado do lugar diferencial de saída ($P_i \in P_{DF} \cap T_j^\bullet$) após o disparo desta transição.

Definição 7 Quando uma transição diferencial dispara, a marcação de um lugar diferencial de saída é atualizada com um novo vetor de estado contínuo. Formalmente, para $P_i \in P_{DF}$, $T_j \in T_{DF}$, e T_j está habilitada no tempo t , então T_j dispara durante Δt , onde Δt é o intervalo de tempo no qual T_j permanece habilitada e τ é o passo de integração utilizado no cálculo da evolução contínua. Assim, $\forall P_i \in T_j^\bullet$, $m_C(P_i)(t + \tau) = \mathbf{X}$, onde \mathbf{X} é o novo vetor de estado contínuo calculado.

O modelo RPHDs mostrado na Figura 4.6 (a) é utilizado para ilustrar o disparo de uma transição diferencial. Neste caso, T_3 tem a seguinte condição de fluxo

$$\dot{\mathbf{X}} = S\dot{O}C_{BB}, \quad \text{usando-se a Equação 3.2.}$$

com condição inicial igual a $m_{C_0}(P_3)(t) = \mathbf{X}_0 = [50]^T$ e $\mathbf{U} = [I_{BB}]$. A marcação discreta $m_{D_0}(P_2)(t) = [1]^T$ (ficha (\bullet) no lugar discreto P_2) habilita o disparo de T_3 . Durante o disparo de T_3 ($\Delta t = 20$ h), a marcação de P_3 é atualizada de acordo com a evolução

contínua mostrada na Figura 4.6 (b) até a ocorrência do evento discreto T_2 em $t = 20$ h. Numa RPHD, a ocorrência de eventos discretos tem prioridade sobre a evolução do tempo.

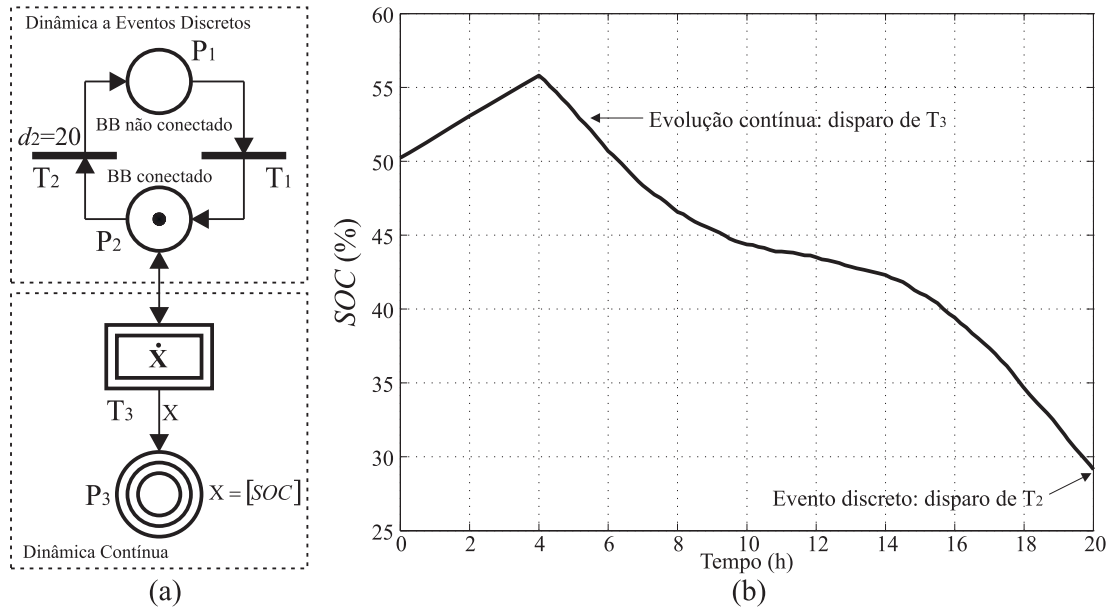


Figura 4.6: (a) Exemplo de modelo RPHDs de um BB. (b) Evolução contínua do SOC (%) resultante do disparo da transição diferencial T_3 durante 20 h.

Prioridade do disparo das transições diferenciais

Nas RPHDs a marcação discreta determina quais dinâmicas contínuas devem evoluir. Além disso, a evolução da marcação discreta é gerada pelo disparo de transições discretas. Portanto, para que ocorra uma mudança na dinâmica contínua do SH modelado, é necessário que ocorra o disparo de uma transição discreta. Esta situação é ilustrada no modelo RPHD mostrado na Figura 4.7. Neste caso, para a marcação inicial $M_0 = [[m_{D_0}(P_1) = 1 \ m_{D_0}(P_2) = 0]^T \ m_{C_0}(P_3)]^T$, as transições $T_1 \in T_D$ e $T_2 \in T_{DF}$ estão habilitadas.

O mecanismo de prioridade para o disparo das transições diferenciais numa RPHD, é o seguinte: durante um intervalo de tempo igual a τ (passo de integração), a transição diferencial T_2 executa um disparo. Durante este período de tempo, a transição discreta T_1 , não pode disparar, pois não existe ficha no lugar discreto P_1 devido a ação de $Pre_{DDF}(P_1, T_2) = 1$. O seu disparo ocorre ao final do intervalo de tempo τ , pois existe uma ficha no lugar P_1

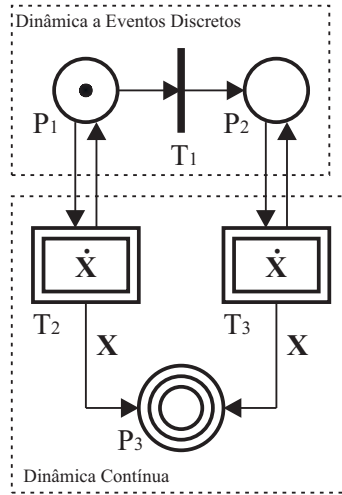


Figura 4.7: Exemplo de modelo RPHD: prioridade no disparo das transições diferenciais.

devido a ação de $Pos_{DDF}(P_1, T_2) = 1$. Após a ocorrência do disparo de T_1 , a marcação da rede muda para $M_1 = [m_D(P_1) = 0 \ m_D(P_2) = 1 \ m_{C_0}(P_3)]^T$. Nesta marcação, somente a transição diferencial T_3 está habilitada, ou seja, uma nova dinâmica contínua.

4.3.5 Representação Matricial da Dinâmica a Eventos Discretos

A dinâmica a eventos discretos de uma RPHD pode ser representada através de matrizes, tal como ocorre numa RP lugar/transição. Se a esta transição for associada uma temporização d_j , o seu disparo não será instantâneo, ele ocorrerá após decorrido o tempo d_j . As condições de habilitação e disparo foram definidas na Seção 4.3.4.

As funções $Pre_D(P_i, T_j)$ e $Pos_D(P_i, T_j)$ podem ser utilizadas na definição das matrizes $Pre_{D_{n \times m}}$ (matriz de *incidência anterior*) e $Pos_{D_{n \times m}}$ (matriz de *incidência posterior*), respectivamente. Nestas, o número de linhas é igual ao número de lugares discretos e o número de colunas é igual ao número de transições discretas. A seguir, a estrutura genérica para cada uma destas matrizes é mostrada.

$$Pre_D = [Pre_D(P_i, T_j)] = \begin{bmatrix} Pre_D(P_1, T_1) & \cdots & Pre_D(P_1, T_m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Pre_D(P_n, T_1) & \cdots & Pre_D(P_n, T_m) \end{bmatrix}_{n \times m}$$

$$Pos_D = [Pos_D(P_i, T_j)] = \begin{bmatrix} Pos_D(P_1, T_1) & \cdots & Pos_D(P_1, T_m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Pos_D(P_n, T_1) & \cdots & Pos_D(P_n, T_m) \end{bmatrix}_{n \times m}$$

Desta forma, a evolução da dinâmica a eventos discretos pode ser determinada pela equação:

$$M'_D(t) = M_D(t) - Pre_D(., T_j) + Pos_D(., T_j) \quad (4.1)$$

onde

- $M'_D(t)$ é a marcação discreta após o disparo de T_j ;
- $M_D(t)$ é a marcação discreta atual da rede; e
- T_j é transição discreta habilitada que executa o disparo. As condições de habilitação da transição T_j foram definidas na Seção 4.3.4.
- $Pre_D(., T_j)$ e $Pos_D(., T_j)$ são os vetores coluna referentes à transição T_j nas matrizes Pre_D e Pos_D , respectivamente.

Utilizando-se a Equação 4.1 é possível determinar as marcações discretas de uma RPHD e, por sua vez, determinar quais as transições diferenciais estão habilitadas em cada marcação discreta $M_D(t)$.

4.3.6 Conjunto de Tempo Híbrido

Para caracterizar a evolução do estado de um SH é necessário admitir um conjunto de tempos que contenha *intervalos contínuos* (sobre os quais evoluções contínuas são realizadas) e *pontos discretos* no tempo (para representar a ocorrência de eventos discretos instantâneos). Tal conjunto de tempo é denominado conjunto de tempo híbrido (Lygeros, 2004).

Definição 8 *Um conjunto de tempo híbrido é uma seqüência de intervalos $\theta = \{I_0, I_1, \dots, I_N\} = \{I_k\}_{k=0}^N$, finito ou infinito (ou seja, $N = \infty$) tal que*

- $I_k = [\theta_k, \theta'_k] \forall k < N$;
- Se $N < \infty$ então tanto $I_N = [\theta_N, \theta'_N]$ ou $I_N = [\theta_N, \theta'_N)$; e

- $\theta_k \leq \theta'_k = \theta_{k+1} \quad \forall k$.

Um exemplo de tempo híbrido é mostrado na Figura 4.8, onde t representa o tempo absoluto. Enquanto que θ_k e θ'_k representam os instantes de tempo inicial e final de um intervalo I_k , respectivamente. A diferença entre θ'_k e θ_k é a duração do intervalo I_k . Por exemplo, $I_2 = \theta'_2 - \theta_2 = t_4 - t_2$ e $I_4 = \theta'_4 - \theta_4 = t_6 - t_2$.

Note que o ponto extremo direito θ'_k , do intervalo I_k coincide com o ponto extremo esquerdo θ_{k+1} do intervalo I_{k+1} (conforme os instantes de tempo t_2, t_4 e t_6 na Figura 4.8). Esta é a situação para os instantes de tempo em que ocorrem disparos de transições discretas. θ'_k e θ_{k+1} correspondem aos instantes de tempo imediatamente anterior e imediatamente posterior ao disparo de uma transição discreta, respectivamente. Disparos de transições discretas são assumidos como instantâneos, portanto $\theta'_k = \theta_{k+1}$. A vantagem desta convenção é que ela permite a modelagem de situações onde múltiplas transições discretas devem ocorrer uma após a outra num mesmo instante de tempo, neste caso $\theta'_{k-1} = \theta_k = \theta'_k = \theta_{k+1}$ (como os intervalos $I_1 = [\theta_1, \theta'_1]$ e $I_3 = [\theta_3, \theta'_3]$ na Figura 4.8).

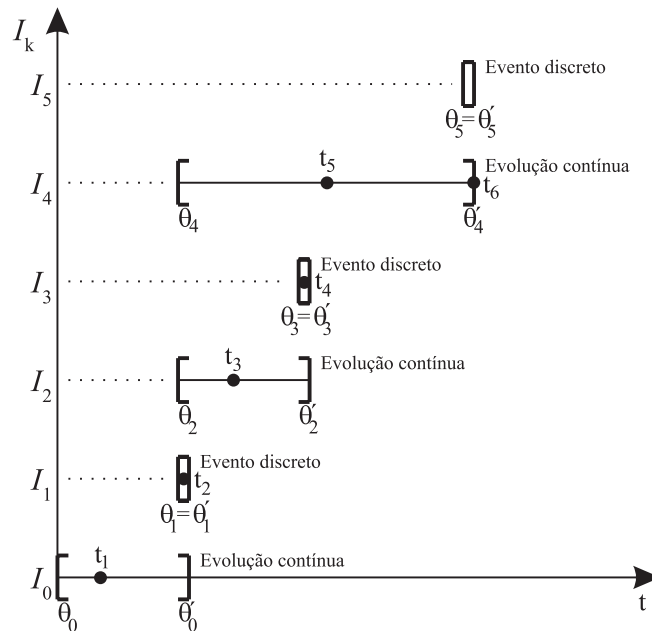


Figura 4.8: Exemplo de conjunto de tempo híbrido $\theta = \{[\theta_k, \theta'_k]\}_{k=0}^5$.

Para o caso de uma RPHD, a duração de um intervalo I_i no qual é calculada uma evolução contínua, é determinada:

- pelo atraso d_j de uma transição discreta, neste caso $d_j = \theta'_i - \theta_i$. Após d_j ocorre o disparo de T_j , o qual desabilita a transição diferencial que calculava esta evolução contínua. Na Figura 4.8, o intervalo I_0 com duração $(\theta'_0 = t_2) - (\theta_0 = 0) = t_2 = d_j$ e o intervalo I_2 com duração $(\theta'_2 = t_4) - (\theta_2 = t_2) = d_j$ representam esta condição; ou
- em função do tempo necessário para que o predicado da respectiva função H_{P_i, T_j} torne-se verdadeiro e ocorra o disparo da transição discreta T_j em θ'_i . Este disparo, por sua vez, desabilita a transição diferencial que calculava a evolução contínua. Na Figura 4.8, o intervalo I_4 com duração $(\theta'_4 = t_6) - (\theta_4 = t_2) = \Delta t$ (de acordo com a Definição 4) representa esta condição. No instante de tempo absoluto t_6 o cálculo da respectiva evolução contínua é encerrado.

Por outro lado, a ocorrência do disparo de uma transição discreta $T_j \in T_D$ é representada por um intervalo I_i de largura nula pois, como $\theta'_{i-1} = \theta_i = \theta'_i = \theta_{i+1}$, $\theta'_i - \theta_i = 0$. Na Figura 4.8, os intervalos I_1 , I_3 e I_5 representam a ocorrência de disparos de transições discretas.

Note que o exemplo de conjunto de tempo híbrido mostrado na Figura 4.8, também ilustra concorrência. Neste caso, os intervalos I_2 e I_4 são iniciados como resultado do evento discreto I_1 em t_2 . Estes intervalos evoluem de modo concomitante até o instante da ocorrência do evento discreto I_3 em t_4 , o que provoca a finalização de I_2 . O intervalo I_4 , por sua vez, evolui até o instante de tempo t_6 .

Desta forma, numa RPHD a evolução do estado híbrido é uma combinação (*seqüencial* e/ou *concorrente*) de intervalos de tempo que representam a evolução das dinâmicas a eventos discretos e contínua.

4.4 Modelando SHs com RPHDs

A concepção de modelos para SHs exige do projetista uma visão clara das dinâmicas envolvidas e da forma como elas interagem. No caso das RPHDs, a modelagem de SHs, consiste das seguintes etapas:

1. *Modelagem da dinâmica a eventos discretos*: segue a mesma lógica utilizada para modelar Sistemas a Eventos Discretos (SEDs), ou seja, devem ser definidas as atividades

e eventos discretos que caracterizam a dinâmica a eventos discretos do SH. O modelo a eventos discretos pode ser construído respeitando-se as relações de dependência entre atividades e eventos. Além disso, restrições de tempo podem ser incluídas para caracterizar as durações de atividades. Na Figura 4.9 é mostrado um exemplo de modelagem da dinâmica a eventos discretos;

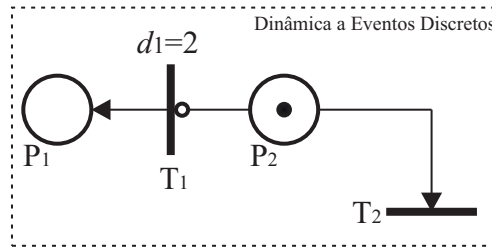


Figura 4.9: Exemplo de modelagem da dinâmica a eventos discretos de uma RPHD.

2. *Modelagem da dinâmica contínua:* numa RPHD, o par formado por um lugar diferencial e uma transição diferencial, é suficiente para representar uma dinâmica contínua. Cada uma das dinâmicas contínuas pode ser representada por uma equação diferencial ordinária, ou por um sistema de equações diferenciais ordinárias. O cálculo da evolução contínua está associado a uma transição diferencial. Esse cálculo é realizado durante a habilitação e disparo da referida transição diferencial. Caso o SH modelado possua várias dinâmicas contínuas, então deverá ser associado um par transição/lugar diferenciais para cada dinâmica contínua. Na Figura 4.10 é mostrado um exemplo de modelagem de uma dinâmica contínua;

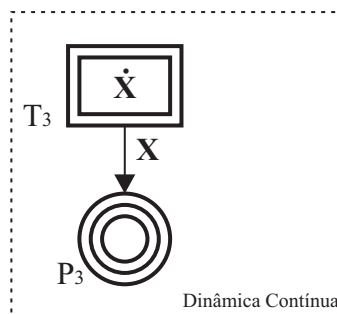


Figura 4.10: Exemplo de modelagem de uma dinâmica contínua de uma RPHD.

3. *Modelagem da interação entre as dinâmicas*: após a construção dos modelos para as duas dinâmicas, é necessário definir a forma como as mesmas interagem. Essa interação depende fundamentalmente do comportamento híbrido do sistema em questão. A interface entre as dinâmicas de um SH em uma RPHD é realizada de duas formas:

- (a) Através de *arcos normais* (dinâmica a eventos discretos \longrightarrow dinâmica contínua): esses arcos conectam lugares discretos à transições diferenciais. São responsáveis pelas condições de habilitação das mesmas e devem atender às condições definidas na Seção 4.3.3. Na Figura 4.11 (a) é ilustrado a influência da dinâmica a eventos discretos sobre a dinâmica contínua. Note que esta influência é conseguida através da utilização de *arcos normais* conectando lugares discretos e transições diferenciais; e
- (b) Através de *arcos teste* (dinâmica contínua \longleftrightarrow dinâmica a eventos discretos): esses arcos conectam lugares diferenciais à transições discretas. Nesses arcos são definidas as funções H_{P_i, T_j} e J_{T_j, P_i} , de acordo com a Definição 1. Na Figura 4.11 (b) é ilustrado a inclusão de dois *arcos teste* entre uma transição discreta e um lugar diferencial, bem como as respectivas funções H_{P_3, T_2} e J_{T_2, P_3} . Note que para modelos mais complexos, uma quantidade maior de *arcos teste* pode ser utilizada.

O modelo RPHD resultante e mostrado na Figura 4.11 (b) é detalhado a seguir. Neste caso, a dinâmica contínua é modelada pelo par T_3 - P_3 e a dinâmica a eventos discretos é modelada pelos elementos P_1 - P_2 - T_1 - T_2 . A transição diferencial T_3 permanece habilitada enquanto existir uma ficha no lugar P_2 . Isso caracteriza a influência da dinâmica a eventos discretos sobre a dinâmica contínua. Note que a habilitação da transição discreta T_2 depende: (i) da presença de uma ficha no lugar P_2 ; e (ii) do predicado da função H_{P_3, T_2} ser verdadeiro, o que representa a influência da dinâmica contínua sobre dinâmica a eventos discretos. O disparo desta transição produz a desabilitação da transição T_3 (retirada da ficha do lugar P_2), e alteração nos valores do vetor de estado contínuo $m_C(P_3)$ através da função J_{T_2, P_3} . O disparo de T_2 também resulta na habilitação da transição T_1 , pois $m_D(P_2)(t) < PreI(P_2, T_1 = 1)$. Após um intervalo de tempo $d_j = 2$, a transição T_1 dispara e uma nova marcação discreta é obtida. O modelo RPHDs mostrado na Figura 4.11 (b) é definido, formalmente, assim:

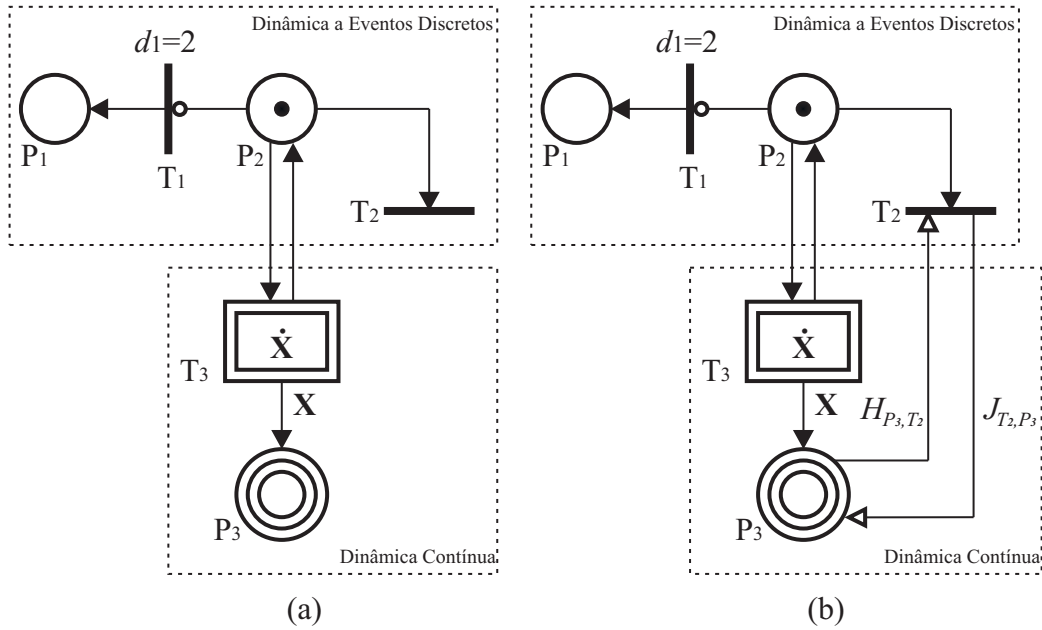


Figura 4.11: Exemplo de modelagem da interação entre as dinâmicas de uma RPHD. (a) Inclusão de arcos normais; e (b) Inclusão de arcos teste.

- $P_D = \{P_1, P_2\}$;
- $T_D = \{T_1, T_2\}$;
- $P_{DF} = \{P_3\}$;
- $T_{DF} = \{T_3\}$;
- $Pre_D(P_1, T_1) = 0$, $Pre_D(P_1, T_2) = 0$, $Pre_D(P_2, T_1) = 0$, $Pre_D(P_2, T_2) = 1$;
- $Pos_D(P_1, T_1) = 1$, $Pos_D(P_1, T_2) = 0$, $Pos_D(P_2, T_1) = 0$, $Pos_D(P_2, T_2) = 0$;
- $Pre_I(P_1, T_1) = 0$, $Pre_I(P_1, T_2) = 0$, $Pre_I(P_2, T_1) = 1$, $Pre_I(P_2, T_2) = 0$;
- $\mathcal{T}(T_1) = d_1 = 2$, $\mathcal{T}(T_2) = 0$;
- $Pre_{DDF}(P_2, T_3) = 1$;
- $Pos_{DDF}(P_2, T_3) = 1$;
- $Pos_{DF}(P_3, T_3) = \mathbf{X}$;
- $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2]^T$

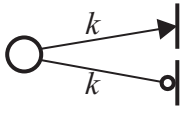

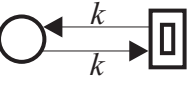
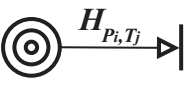


- $\dot{\mathbf{X}}\{T_3\} = \dot{\mathbf{X}}$;
- $H_{P_3, T_2} : x_1 \geq 100,00$ (por exemplo);
- $J_{T_2, P_3} : x_1 = 0$ (por exemplo); e
- $M_0(t) = [[m_{D_0}(P_1) = 0 \ m_{D_0}(P_2) = 1]^T \ m_{C_0}(P_3)]^T$. Onde $m_{C_0}(P_3)$ é o estado contínuo inicial do SH modelado.

Suas matrizes, são:

$$Pre_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{n \times m} \quad \text{e} \quad Pos_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{n \times m}$$

Na Tabela 4.1, são mostradas as conexões possíveis para o formalismo RPHDs, bem como as suas características para o processo de modelagem de SHs.

Tabela 4.1: Conexões possíveis para modelar SHs com as RPHDs.

Conexão	Possível	Operação	Domínio
	Sim	Dinâmica a eventos discretos	$k \in \mathbb{N}$
	Sim	Dinâmica a eventos discretos	$k \in \mathbb{N}$
	Sim	Interação (dinâmica a eventos discretos \Rightarrow dinâmica contínua)	$k \in \mathbb{N}$
	Sim	Interação (dinâmica contínua \Rightarrow dinâmica a eventos discretos)	$H_{P_i, T_j} \in \mathbf{X}$
	Sim	Interação (dinâmica a eventos discretos \Rightarrow dinâmica contínua)	$J_{T_j, P_i} \in \mathbf{X}$
	Sim	Dinâmica contínua	$\mathbf{X} \in \mathbb{R}^l$

4.4.1 Modelando Comportamentos Híbridos Básicos

O objetivo desta seção é mostrar como as RPHDs podem modelar comportamentos híbridos básicos tais como *switches* e *jumps* (também chamados de *impulsos*) (Branicky, 1995). Switches e jumps são fenômenos discretos que surgem no estudo de SHs, e podem ser *autônomos* ou *controlados*. Seja a dinâmica contínua dada por um sistema de equações diferenciais $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$. Onde \mathbf{x} é o vetor de estado contínuo que toma seus valores em algum subconjunto do espaço Euclidiano, e $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ é o vetor de campo controlado que depende de \mathbf{x} , da entrada de controle \mathbf{u} e dos fenômenos acima.

Switches

Um *switch* é um evento discreto que corresponde a uma mudança de dinâmica contínua num SH. Seja o sistema de equações diferenciais $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ que representa uma dinâmica contínua do sistema. Se o *switch* entre \mathbf{f}_i e \mathbf{f}_j , com $i \neq j$, no instante de tempo t , é devido a evolução do estado, ou seja, $\mathbf{x}(t^-) \in X_i$ e $\mathbf{x}(t^+) \in X_j$, então ele é definido como autônomo. Analogamente se ele ocorre devido ao efeito de uma entrada de controle, contínua ou discreta, ele é definido como controlado.

Na Figura 4.12(a) é mostrado um modelo RPHD para um *switch* autônomo. Inicialmente, o sistema tem a sua dinâmica contínua definida pela equação diferencial $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$, pois a transição diferencial T_1 está habilitada pela marcação $m_D(P_1)(t) = 1$. Se durante esta evolução contínua, \mathbf{x} assume um valor que torna a função de habilitação H_{P_3, T_3} verdadeira, então a transição discreta T_2 fica habilitada e o seu disparo modifica a marcação discreta. Esta modificação desabilita a transição diferencial T_1 , pois $m_D(P_1) = 0$ e habilita a transição diferencial T_2 , já que $m_D(P_2) = 1$. Assim, o sistema passa a ter a sua dinâmica contínua definida pela equação diferencial $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$.

Na Figura 4.12(b) é mostrado um modelo RPHD para um *switch* controlado. Neste caso, independente do valor de \mathbf{x} , o controle discreto $m_D(P_1) = 1$ habilita a transição discreta T_3 e o seu disparo ocorre após um atraso d_3 . Este disparo modifica a dinâmica contínua do sistema através da desabilitação de T_1 e habilitação de T_2 . Note que, nos dois modelos, também ocorre uma evolução discreta.

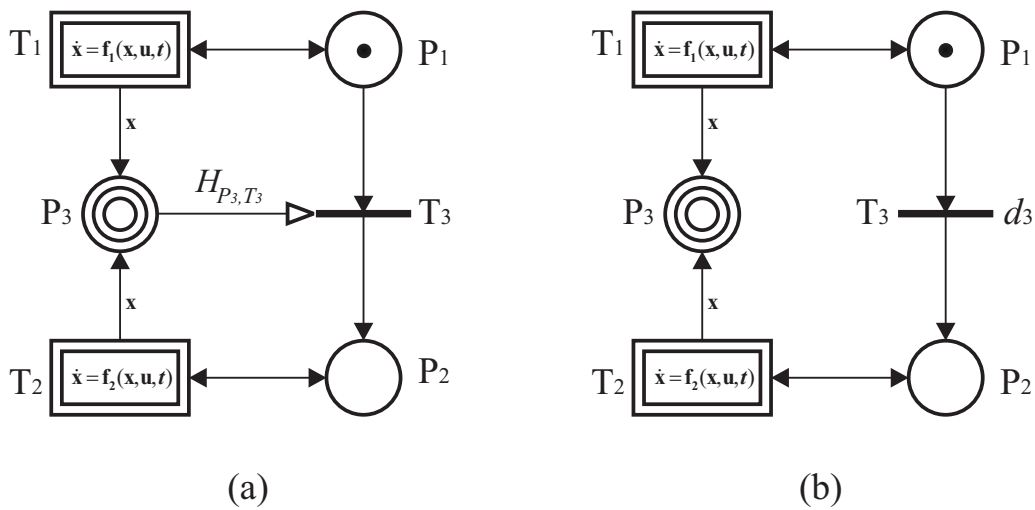


Figura 4.12: Modelo RPHD para um *Switch*. (a) Autônomo. (b) Controlado.

Jumps

Um *jump* é um evento discreto que corresponde a uma descontinuidade no estado contínuo de $\mathbf{x}(t^-)$ para $\mathbf{x}(t^+)$. Um *jump* representa um evento físico cuja variação de estado $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}(t^+) - \mathbf{x}(t^-)$ pode depender dos valores de $\mathbf{x}(t^-)$. Esta descontinuidade pode ser representada pela habilitação e disparo de uma transição discreta, a qual através de inscrições de arco, muda a marcação de lugares diferenciais conectados a mesma.

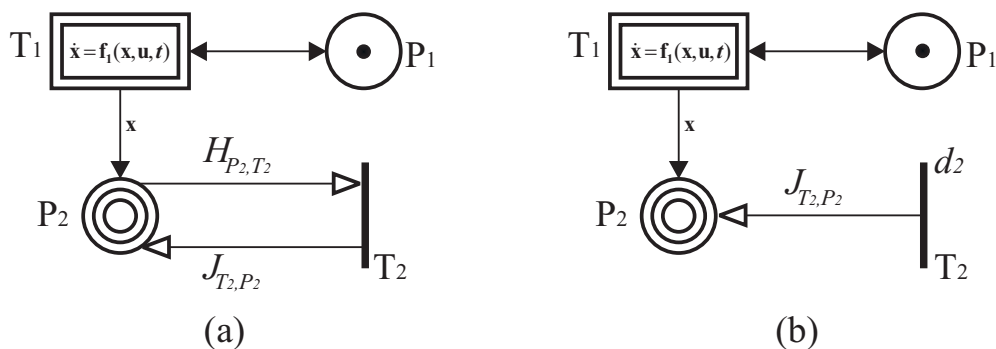


Figura 4.13: Um modelo RPHD para um *Jump*. a) Autônomo. b) Controlado.

Na Figura 4.13(a) é mostrado um modelo RPHD para um *jump* autônomo. Se $\mathbf{x}(t)$ assume um valor que torna a função de habilitação H verdadeira, então a transição discreta T_2 fica habilitada e após o seu disparo a função de junção J modifica o valor de \mathbf{x} instantaneamente. Na Figura 4.13(b) é mostrado um modelo RPHD para um *jump* controlado.

Neste caso, o disparo da transição discreta T_2 depende de um controle discreto, o atraso d_2 . Decorrido o intervalo de tempo d_2 , a função de junção é executada.

Para finalizar, num *switch*, a dinâmica contínua é modificada (mudança na função $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$) devido a uma evolução no estado discreto. Enquanto que num *jump*, a dinâmica contínua é modificada (mudança no valor de \mathbf{x}) sem que ocorra uma evolução discreta.

4.4.2 Estruturas Particulares de Modelagem

Nesta seção, são apresentadas estruturas particulares de modelagem que os SHs podem ter. Cada uma dessas estruturas é modelada com as RPHDs. Cada estrutura é uma combinação de estruturas clássicas a eventos discretos. O objetivo é discutir as características de cada estrutura e suas implicações no processo de modelagem e simulação. Note que é praticamente impossível apresentar e discutir o detalhes de todas as estruturas de modelagem. Portanto, optou-se por apresentar as estruturas básicas, pois as demais normalmente baseiam-se nestas.

Seqüência:

Na Figura 4.14 é mostrado um modelo RPHD para um SH com comportamento seqüencial.

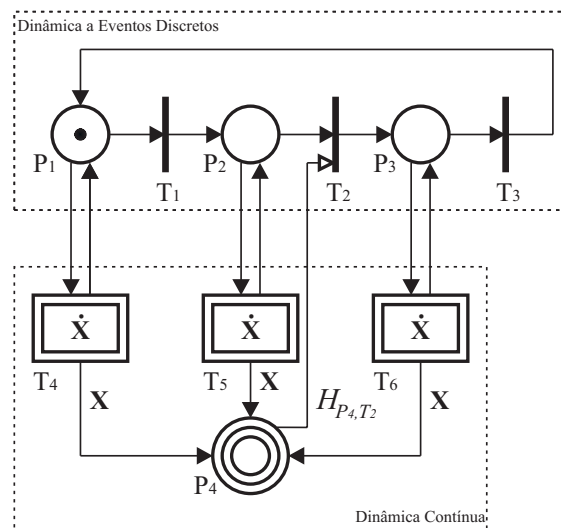


Figura 4.14: Modelo RPHD para um SH seqüencial.

Note que o modelo híbrido exibe um comportamento seqüencial nas duas dinâmicas. Para cada marcação discreta somente uma transição diferencial está habilitada (influência da dinâmica a eventos discretos na dinâmica contínua). Portanto, as transições diferenciais T_4 , T_5 e T_6 são habilitadas seqüencialmente e não de forma simultânea. Porém, este modelo híbrido também ilustra a influência da dinâmica contínua na dinâmica a eventos discretos através da função de habilitação H_{P_4,T_2} . Desta forma, a habilitação da transição discreta T_2 não depende somente da marcação do lugar discreto de entrada P_2 , mas também da condição verdadeira para a função H_{P_4,T_2} .

Concorrência e Sincronização:

Na Figura 4.15 é mostrado um modelo RPHD para um SH com comportamento concorrente e com sincronização.

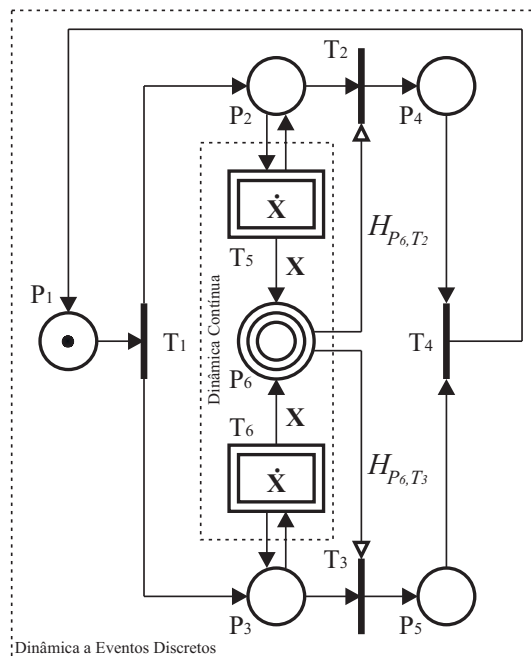


Figura 4.15: Modelo RPHD para um SH com concorrência e sincronização.

Novamente o modelo híbrido exibe um comportamento concorrente e sincronizado nas duas dinâmicas. Na dinâmica a eventos discretos este comportamento é representado pelos lugares discretos P_2 e P_3 . Por outro lado, o comportamento concorrente é representado na dinâmica contínua pelas transições diferenciais T_5 e T_6 (habilitadas pelos lugares P_2 e P_3 ,

respectivamente), as quais realizam o cálculo de duas evoluções contínuas paralelamente. A finalização de cada um destes processos é independente, assim, o disparo das transições discretas T_2 e T_3 é realizado de forma independente e pode depender das funções de habilitação H_{P_6,T_2} e H_{P_6,T_3} (influência da dinâmica contínua na dinâmica a eventos discretos). A sincronização é representada pela condição de habilitação da transição discreta T_4 , a qual necessita de uma ficha em cada um dos lugares discretos P_4 e P_5 .

Conflito e Prioridade:

Na Figura 4.16 é mostrado um modelo RPHD para um SH com conflito. Neste caso, para a marcação inicial do lugar P_1 igual a $m_{D_0}(P_1) = 1$, somente uma das dinâmicas contínuas poderá evoluir no tempo.

Diante desta situação de conflito, um mecanismo para definir prioridade no disparo das transições discretas T_1 e T_2 , pode ser a utilização das funções de habilitação H_{P_6,T_1} e H_{P_6,T_2} . Desta forma, a prioridade seria determinada pelo estado inicial contínuo. Outros mecanismos para definir regras de prioridade também podem ser utilizados, tais como restrições de tempo e arcos inibidores.

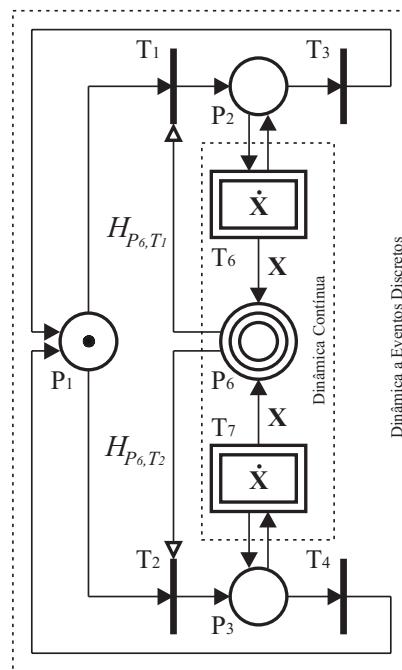


Figura 4.16: Modelo RPHD para um SH com conflito e prioridade.

4.4.3 Composição de Modelos RPHDs

O processo de criação de modelos para sistemas compostos de vários subsistemas, normalmente, exige do projetista a necessidade de realizar a composição dos modelos dos subsistemas, tal que, tanto o comportamento independente de cada subsistema, como as suas interações sejam explicitadas no modelo global.

RPHDs podem ser compostas para formar modelos globais a partir dos modelos RPHDs dos vários subsistemas. O objetivo da composição dos vários modelos RPHD é permitir que os mesmos compartilhem informações sobre os seus estados, condições de habilitação e atuem de forma conjunta, ou seja, formando um modelo global do SH. Para tal, o formalismo RPHD permite a utilização de arcos (normais, de teste e inibidores), conectando os elementos (lugares e transições) dos vários subsistemas. Além disso, *lugares de fusão* podem ser utilizados, o que deve reduzir a quantidade de arcos e melhorar a visualização do modelo.

Para ilustrar o processo de composição de modelos RPHDs, considere o exemplo com três modelos RPHDs mostrados na Figura 4.17. Neste exemplo, os modelos RPHDs 1, 2 e 3 são compostos para formar um modelo global. Os modelos RPHDs 1 e 3 são controlados pelo modelo RPHDs 2. Conforme o estado discreto do modelo RPHDs 2 evolui, são definidos os estados discretos e, conseqüentemente, as dinâmicas contínuas que devem evoluir no modelo global.

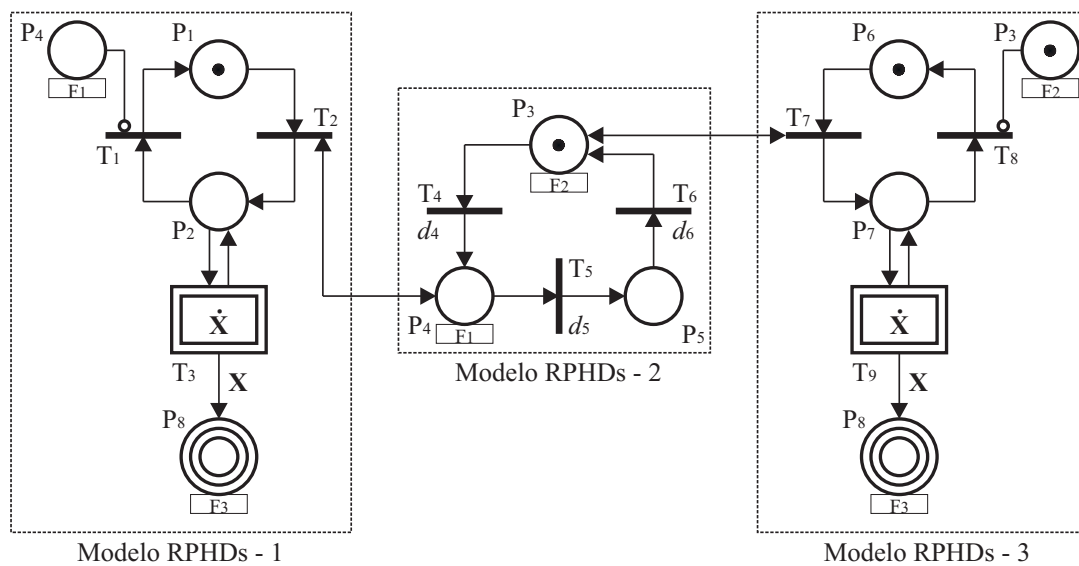


Figura 4.17: Exemplo de composição de modelos RPHDs.

A composição entre os modelos RPHDs 1 e 2 (2 e 3), é realizada através dos arcos normais que conectam a transição discreta T_2 (T_7) e o lugar discreto P_4 (P_3); e dos os lugares de fusão P_4 (P_3). Os modelos RPHDs 1 e 3 compartilham o mesmo lugar diferencial P_8 , que é um lugar de fusão.

Capítulo 5

Controle Supervisório de Sistemas Híbridos

5.1 Introdução

Sistemas supervisórios híbridos podem ser definidos como sistemas de controle cujos estados são representados por variáveis discretas e contínuas, e cuja dinâmica é determinada em função do tempo e da ocorrência de eventos discretos (Villani, 2004).

Para que um SH satisfaça a determinados critérios ou tenha um comportamento adequado, é necessário supervisioná-lo, pois sem essa supervisão, não existe a garantia de que um SH atenda às especificações desejadas. O controle supervisório de SHs é usado, portanto, para assegurar que o comportamento destes sistemas não viole um conjunto de restrições impostas à sua operação (Koutsoukos et al., 2000).

Neste capítulo trata-se da síntese de controle supervisório de sistemas híbridos (SHs) através da utilização das Redes de Petri Híbridas Diferenciais (RPHDs).

Para ilustrar o processo de síntese de supervisores SHs com as RPHDs, é utilizado como exemplo, o controle de recarga de uma bateria chumbo-ácido utilizando-se o circuito integrado bq2031[©] da Texas Instruments.

5.2 Controle Supervisório de Sistemas Híbridos

A necessidade de uma abordagem genérica que sistematize o desenvolvimento de sistemas supervisórios híbridos tem sido apontada por diversos autores (Lemmon et al., 1999). Muitos trabalhos desenvolvidos nesta área consideram os sistemas supervisórios como tendo um comportamento exclusivamente discreto, enquanto a planta ou sistema a ser controlado pode ser puramente contínuo ou híbrido (Villani, 2004).

Inspirados na estrutura utilizada para o controle digital, (Koutsoukos et al., 2000) propuseram uma estrutura análoga para o controle supervisório de sistemas híbridos, na qual a comunicação entre a planta e o supervisor é feita por uma interface formada por conversores A/D e D/A generalizados, conforme ilustrado na Figura 5.1.

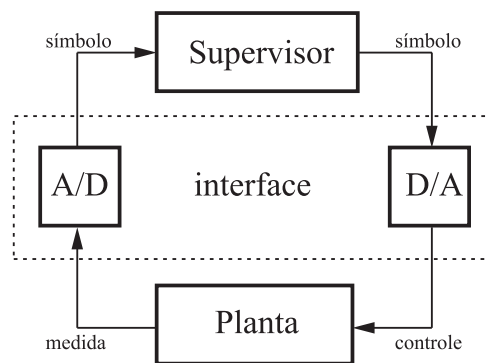


Figura 5.1: Estrutura genérica para controle supervisório (Leal, 2005).

Nesta estrutura, a planta evolui ao longo do tempo até que uma variável de seu espaço de estados contínuo cruza determinado limite e então a interface sinaliza a ocorrência de um evento para o supervisor. Este, por sua vez, atualiza seu estado discreto e, de acordo com o estado atual, envia um sinal (também discreto) para a interface, a qual transforma este num sinal contínuo a ser aplicado na planta (Leal, 2005).

Uma outra alternativa consiste em obter primeiro um modelo discreto da planta tomada em conjunto com a interface, para então realizar o projeto do controlador no domínio discreto. A analogia feita no contexto de controle supervisório de SHs consiste em, ao invés de obter um modelo discreto, obter um modelo de eventos discretos da planta em conjunto com a interface, conforme pode ser visto na Figura 5.2, utilizando autômatos ou RPs.

Portanto, na perspectiva do supervisor, o conjunto planta-interface é um sistema a even-

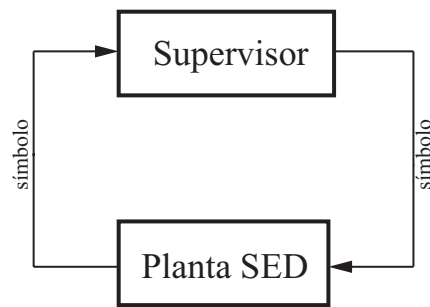


Figura 5.2: Comportamento do conjunto planta-interface como um SED (Leal, 2005).

tos discretos, pois recebe e envia apenas sinais discretos e então o controlador é projetado usando as metodologias de controle supervisório de SEDs apresentadas em (Ramadge e Wonham, 1989) (Leal, 2005).

Em (Koutsoukos et al., 1998) e (Koutsoukos e Antsaklis, 1999), as RPs temporizadas programáveis são utilizadas na modelagem e controle supervisório de SHs. Em particular, é assumido que a política de controle do supervisor discreto é embutida na estrutura da RP.

Outra abordagem de síntese de supervisores de SHs utilizando RPs é apresentada em (Villani, 2004). Neste caso, uma RP predicado-transição diferencial orientada a objetos é utilizada para modelar e analisar estes sistemas.

Uma abordagem modular de controle supervisório de SHs é apresentada em (Leal, 2005). Nesta abordagem projeta-se um controlador individual para atender cada um dos componentes da especificação global, e os supervisores modulares são implementados de forma concorrente com o objetivo de que a ação conjunta destes garanta o cumprimento da especificação global.

Os SHs considerados neste trabalho possuem dinâmicas contínuas e a eventos discretos, sendo que a dinâmica a eventos discretos é definida por eventos gerados quando variáveis do espaço de estado contínuo alcançam uma superfície de limiar ou devido à restrições de tempo, forçando então transições no estado discreto; a dinâmica contínua é determinada em função do estado discreto atual do sistema. Não apenas o sistema pode ter uma característica híbrida, mas a especificação do comportamento desejado para o mesmo também pode ser híbrida.

5.3 Controle Supervisório de SHs com as RPHDs

Neste trabalho o supervisor é um sistema de dinâmica puramente a eventos discretos que observa o estado híbrido do SH supervisionado e, em resposta, determina o novo estado discreto para restringir o seu comportamento.

O problema tratado aqui considera que o sistema a ser controlado possui natureza híbrida, podendo ser considerado como uma generalização do problema considerado em (Koutsoukos et al., 2000), nos quais a natureza híbrida é caracterizada pela utilização de um supervisor puramente discreto para controlar um sistema puramente contínuo.

5.3.1 Estrutura do SH/Supervisor

A estrutura de controle supervisório utilizando as RPHDs é mostrada na Figura 5.3 e é descrita a seguir.

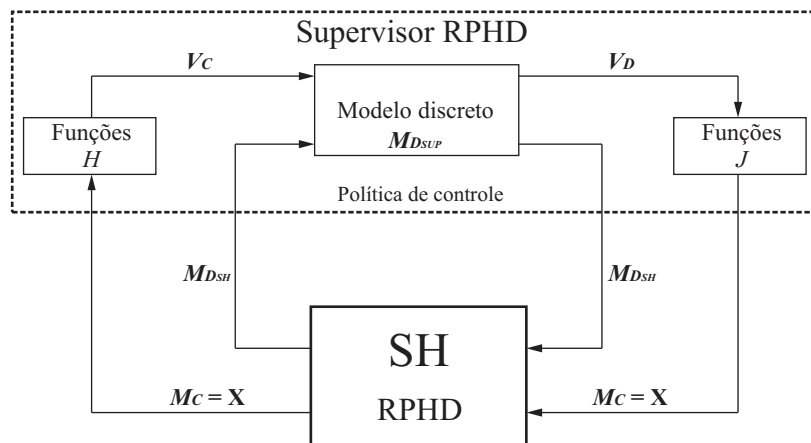


Figura 5.3: Estrutura de controle supervisório utilizando as RPHDs.

A estrutura é composta de dois blocos principais:

- SH: é o sistema híbrido a ser supervisionado e controlado. Ele é modelado com as RPHDs;
- Supervisor: é o responsável pela supervisão e controle do SH. Este bloco também é modelado com as RPHDs e é composto de três sub-blocos:

- Funções H : este sub-bloco recebe informação sobre o estado atual contínuo ($M_C = \mathbf{X}$) do SH. Em função dos valores das variáveis de estado contínuo ($x_k \in \mathbf{X}$), este sub-bloco define o vetor de controle das transições discretas (V_C) e o envia para o sub-bloco modelo discreto. Este sub-bloco faz a interface entre a dinâmicas contínua e a dinâmica a eventos discretos.

V_C é um vetor binário que informa quais transições discretas no modelo discreto devem disparar dependendo das funções de habilitação H associadas, veja a Seção 4.3.4. Se a condição de uma função de habilitação H é verdadeira, é atribuído o valor 1 (transição discreta deve disparar) para o respectivo elemento do vetor V_C , caso contrário, é atribuído o valor 0 (transição discreta não deve disparar);

- Funções J : este sub-bloco recebe o vetor das transições discretas disparadas (V_D). Este sub-bloco é responsável pela interface entre a dinâmica a eventos discretos e a dinâmica contínua.

V_D é um vetor binário que informa quais transições foram disparadas no sub-bloco modelo discreto e têm funções de junção J associadas para serem executadas, veja as Seções 4.3 e 4.4.1. A execução das funções de junção resulta num novo estado contínuo ($M_C = \mathbf{X}$) de SH;

- Modelo discreto: é um modelo RPHDs composto somente de elementos discretos. Ele é responsável por:

- * Receber informações do estado discreto atual do SH ($M_{D_{SH}}$);
- * Receber o vetor (V_C);
- * Atualizar o seu estado discreto $M_{D_{SUP}}$;
- * Enviar o vetor (V_D);
- * Enviar o novo estado discreto ($M_{D_{SH}}$) do SH.

O estado discreto global do SH/Supervisor é dado por:

$$M_D = M_{D_{SUP}} \cup M_{D_{SH}}$$

Nota 4 Num SH/Supervisor modelado com as RPHDs e que não possui funções de habilitação H , as transições discretas são habilitadas pelas condições da estrutura da rede e por condições de temporização.

Nota 5 Num SH/Supervisor modelado com as RPHDs e que não possui funções de junção J , o seu estado contínuo não sofre saltos, veja as Seções 4.3 e 4.4.1.

5.3.2 Vetores V_C e V_D

O vetor de controle das transições discretas V_C é construído da seguinte maneira. Para uma RPHD com m transições discretas, o número de funções de habilitação H_{T_j} é no máximo igual a m . Portanto, a cardinalidade de V_C pode ser $0 \leq |V_C| \leq m$. Formalmente,

$$V_C = [\lambda_{T_1}, \lambda_{T_2}, \dots, \lambda_{T_m}] \text{ ou } V_C = \emptyset$$

onde

- λ_{T_j} é o operador de habilitação da transição discreta T_j . O valor binário de λ_{T_j} é definido da seguinte maneira:
 - Se a condição de H_{T_j} é verdadeira então $\lambda_{T_j} = 1$, ou seja, a respectiva transição discreta deve disparar, ou
 - Se a condição de H_{T_j} é falsa então $\lambda_{T_j} = 0$, ou seja, a respectiva transição discreta não deve disparar.

Nota 6 Numa RPHD, não é permitido associar mais de uma função de habilitação a uma mesma transição discreta.

O vetor das transições disparadas V_D é construído da seguinte maneira. Para uma RPHD com m transições discretas, o número de funções de junção J_{T_j} é no máximo igual a m . Portanto, a cardinalidade de V_D pode ser $0 \leq |V_D| \leq m$. Formalmente,

$$V_D = [\rho_{T_1}, \rho_{T_2}, \dots, \rho_{T_m}] \text{ ou } V_D = \emptyset$$

onde

- ρ_{T_j} é o operador de execução da função de junção J_{T_j} associada a uma transição discreta T_j . O valor binário de ρ_{T_j} é definido da seguinte maneira:
 - Se $\rho_{T_j} = 1$ a respectiva função de junção J_{T_j} deve ser executada, ou
 - Se $\rho_{T_j} = 0$ a respectiva função de junção J_{T_j} não deve ser executada.

Nota 7 *Numa RPHD, não é permitido associar mais de uma função de junção a uma mesma transição discreta.*

Os vetores V_C e V_D são atualizados a cada passo de simulação.

5.3.3 Metodologia de Construção do Supervisor

Neste trabalho, o supervisor e as ações de controle são incluídas na estrutura do modelo RPHD. A metodologia de construção do supervisor com as RPHDs é composta das seguintes etapas:

1. Concepção do modelo RPHD sem controle do SH.
2. Concepção do modelo RPHD discreto do supervisor.
 - (a) Concepção do modelo RPHD discreto sem controle do supervisor.
 - (b) Para cada especificação de operação para o SH a ser controlado, incluir na estrutura do modelo do supervisor os elementos necessários para garantir que a especificação seja atendida.
 - (c) Para cada transição discreta do modelo do supervisor, que tem o seu disparo controlado pela dinâmica contínua, definir o arco teste e a respectivas função de habilitação.
 - (d) Para cada transição discreta do modelo do supervisor, que após o seu provoca um salto no estado contínuo, definir o arco teste e a respectivas funções de junção.
 - (e) Para cada transição discreta do modelo do supervisor, em que é necessário atribuir uma restrição de tempo, definir um tempo de atraso d_j .

Tanto o modelo RPHD para o supervisor como o modelo RPHD para o SH a ser controlado podem ser formados por composição de vários sub-modelos RPHD.

5.4 Exemplo: Supervisão da Recarga de uma Bateria Chumbo-Ácido

Para ilustrar a metodologia de síntese de supervisores híbridos apresentada neste trabalho, será utilizado um exemplo baseado nas especificações do circuito integrado controlador de carga de baterias bq2031[©], veja o Apêndice C.

Construção do Modelo RPHD para o SH/Supervisor

1. Neste exemplo, a dinâmica contínua do SH é composta de quatro modos de evolução:

- Regulação de tensão: modelado pelos elementos P_6 , T_{23} e P_{16} .
- Regulação de corrente: modelado pelos elementos P_7 , T_{24} e P_{16} .
- Carga rápida principal: modelado pelos elementos P_8 , T_{25} e P_{16} .
- Carga rápida manutenção: modelado pelos elementos P_9 , T_{26} e P_{16} .

O modelo RPHD do SH é mostrado na Figura 5.4 (b).

2. O modelo RPHD do supervisor é mostrado na Figura 5.4 (a).

(a) A estrutura principal modelo discreto do supervisor é formada pelos elementos

$P_1, T_1, P_2, P_3, T_2, P_4, T_3, P_5, T_5, P_6, T_7, P_7, T_8, P_8, T_9$ e P_9 .

(b) Especificações de controle:

- A primeira especificação de controle é a verificação de temperatura inicial da bateria, a qual é modelada pelas transições T_3 e T_4 . Neste ponto é necessário incluir no modelo o lugar P_{11} para representar a condição de carga pendente por temperatura da bateria fora de faixa.
- A segunda especificação de controle é a verificação da condição da bateria, a qual é modelada pelas transições T_5 e T_6 . Para representar o estado de defeito da bateria durante o processo de carga é incluído o lugar P_{10} no modelo.

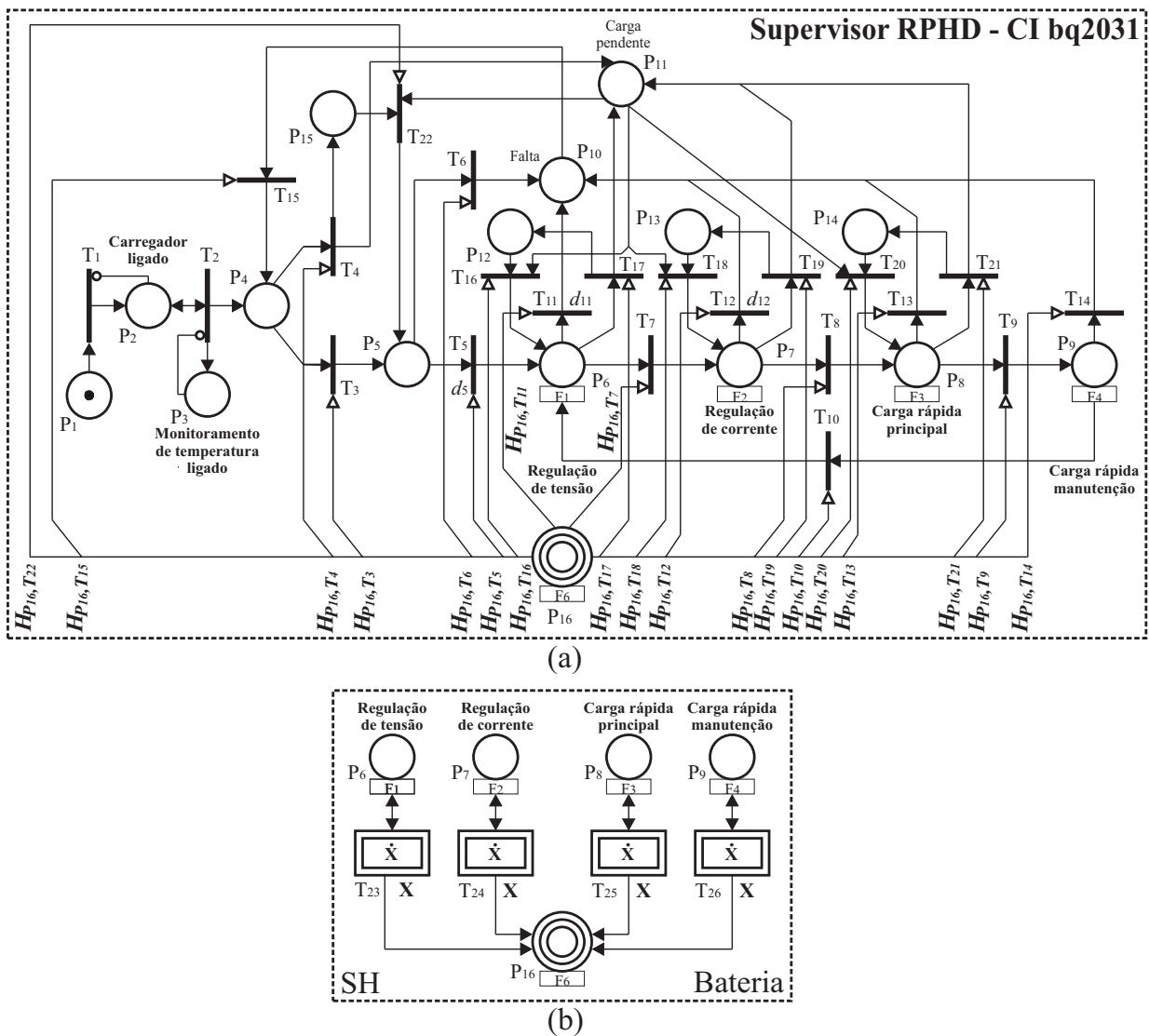


Figura 5.4: Modelos RPHDs: (a) supervisor de carga da bateria e (b) bateria.

- Cada uma das etapas de carga da bateria é representada pelos lugares P_6 , P_7 , P_8 e P_9 . Para cada etapa a bateria deve ser verificada com relação à temperatura e condição de tensão. Portanto, é necessário incluir no modelo os elementos necessários para representar estas verificações. Para simplificar a descrição desta inclusão serão descritos apenas as verificações relacionadas com o estado “carga rápida principal”, o qual é representado pelo lugar P_8 . Neste caso, é incluída a transição T_{13} para representar o evento bateria entra no estado de defeito (lugar P_{10}). Por outro lado, a verificação de temperatura é representada pela transição T_{21} , bateria fora da faixa de temperatura, e pela

transição T_{20} , bateria dentro da faixa de temperatura. O disparo da transição T_{21} leva o sistema para o estado de carga pendente (lugar P_{11}), enquanto que o disparo de T_{20} retorna o sistema para o estado anterior, neste caso, o lugar P_8). O lugar de controle P_{14} é utilizado para garantir este retorno.

- O sistema deixa o estado de defeito (lugar P_{10}) pelo disparo da transição T_{15} . Este evento representa a substituição da bateria e reinício do processo de carga.

(c) As transições discretas T_3 a T_{22} têm a sua habilitação definida não somente pela marcação dos respectivos lugares discretos de entrada, mas também, pelos valores das variáveis de estado contínuo do SH. Neste caso, é necessário conectar arcos teste à estas transições e associar as respectivas funções de habilitação H_{T_j} . Para simplificar a descrição da inclusão dos arcos teste serão descritos apenas os processos para as transições discretas T_3 e T_4 .

- A transição T_3 é habilitada se a condição da função de habilitação $H_{P_{16},T_3} : (T \geq T_{MIN}) \wedge (T \leq T_{MAX})$ for verdadeira. Esta condição significa que a temperatura da bateria está dentro da faixa permitida para o processo de carga.
- A transição T_4 é habilitada se a condição da função de habilitação $H_{P_{16},T_4} : (T < T_{MIN}) \vee (T > T_{MAX})$ for verdadeira. Esta condição significa que a temperatura da bateria está fora da faixa permitida para o processo de carga.

(d) Neste exemplo não existe a necessidade de incluir funções de junção J_{T_j} .

(e) As seguintes transições têm restrições de tempo atribuídas aos seus disparos:

- T_5 com um atraso $d_5 = 500$ ms. Representa o intervalo de tempo antes de iniciar os testes de qualificação da bateria para carga.
- T_{11} com um atraso $d_{11} = t_{QT1}$ s. Representa o limite de tempo permitido para o teste de qualificação 1.
- T_{12} com um atraso $d_{12} = t_{QT2}$ s. Representa o limite de tempo permitido para o teste de qualificação 2.

Caso o tempo de cada teste de qualificação atinja o respectivo limite de tempo, o sistema é levado para o estado de falta. Neste caso, a bateria deve ser substituída.

Os modelos RPHDs mostrados na Figura 5.4 são definidos, formalmente, a seguir.

- $P_D = \{P_1, P_2, \dots, P_{15}\}; T_D = \{T_1, T_2, \dots, T_{22}\};$
- $P_{DF} = \{P_{16}\}; T_{DF} = \{T_{23}, T_{24}, T_{25}, T_{26}\};$
- $Pre_D(P_1, T_1) = 1, Pre_D(P_2, T_2) = 1, Pre_D(P_4, T_3) = 1, Pre_D(P_4, T_4) = 1,$
 $Pre_D(P_5, T_5) = 1, Pre_D(P_5, T_6) = 1, Pre_D(P_6, T_7) = 1, Pre_D(P_6, T_{11}) = 1,$
 $Pre_D(P_6, T_{17}) = 1, Pre_D(P_7, T_8) = 1, Pre_D(P_7, T_{12}) = 1, Pre_D(P_7, T_{19}) = 1,$
 $Pre_D(P_8, T_9) = 1, Pre_D(P_8, T_{13}) = 1, Pre_D(P_8, T_{21}) = 1, Pre_D(P_9, T_{10}) = 1,$
 $Pre_D(P_9, T_{14}) = 1, Pre_D(P_{10}, T_{15}) = 1, Pre_D(P_{11}, T_{16}) = 1, Pre_D(P_{11}, T_{18}) = 1,$
 $Pre_D(P_{11}, T_{20}) = 1, Pre_D(P_{11}, T_{22}) = 1, Pre_D(P_{12}, T_{16}) = 1, Pre_D(P_{13}, T_{18}) = 1,$
 $Pre_D(P_{14}, T_{20}) = 1, Pre_D(P_{15}, T_{22}) = 1;$
- $Pos_D(P_2, T_1) = 1, Pos_D(P_2, T_2) = 1, Pos_D(P_3, T_2) = 1, Pos_D(P_4, T_2) = 1,$
 $Pos_D(P_4, T_{15}) = 1, Pos_D(P_5, T_3) = 1, Pos_D(P_5, T_{22}) = 1, Pos_D(P_6, T_5) = 1,$
 $Pos_D(P_6, T_{16}) = 1, Pos_D(P_7, T_7) = 1, Pos_D(P_7, T_{18}) = 1, Pos_D(P_8, T_8) = 1,$
 $Pos_D(P_8, T_{20}) = 1, Pos_D(P_9, T_9) = 1, Pos_D(P_{10}, T_6) = 1, Pos_D(P_{10}, T_{11}) = 1,$
 $Pos_D(P_{10}, T_{12}) = 1, Pos_D(P_{10}, T_{13}) = 1, Pos_D(P_{10}, T_{14}) = 1, Pos_D(P_{11}, T_4) = 1,$
 $Pos_D(P_{11}, T_{17}) = 1, Pos_D(P_{11}, T_{19}) = 1, Pos_D(P_{11}, T_{21}) = 1, Pos_D(P_{12}, T_{17}) = 1,$
 $Pos_D(P_{13}, T_{19}) = 1, Pos_D(P_{14}, T_{21}) = 1, Pos_D(P_{15}, T_4) = 1;$
- $Pre_I(P_2, T_1) = 1, Pre_I(P_3, T_2) = 1;$
- $\mathcal{T}(T_5) = d_5, \mathcal{T}(T_{11}) = d_{11} = t_{QT1}, \mathcal{T}(T_{12}) = d_{12} = t_{QT2};$
- $Pre_{DDF}(P_6, T_{23}) = 1, Pre_{DDF}(P_7, T_{24}) = 1, Pre_{DDF}(P_8, T_{25}) = 1,$
 $Pre_{DDF}(P_9, T_{26}) = 1;$
- $Pos_{DDF}(P_6, T_{23}) = 1, Pos_{DDF}(P_7, T_{24}) = 1, Pos_{DDF}(P_8, T_{25}) = 1,$
 $Pos_{DDF}(P_9, T_{26}) = 1;$

- $Pos_{DF}(P_{16}, T_{23}) = \mathbf{X}$, $Pos_{DF}(P_{16}, T_{24}) = \mathbf{X}$, $Pos_{DF}(P_{16}, T_{25}) = \mathbf{X}$,
 $Pos_{DF}(P_{16}, T_{26}) = \mathbf{X}$;
- $\mathbf{X} = [V_{CELL} \ SOC \ T]^T$;
- $\mathbf{U} = [I_{SNS}]^T$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{23}\} = \dot{V}_{CELL}, \dot{SOC}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{24}\} = \dot{V}_{CELL}, \dot{SOC}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{25}\} = \dot{V}_{CELL}, \dot{SOC}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{26}\} = \dot{V}_{CELL}, \dot{SOC}$;
- $H_{P_{16}, T_3} : (T \geq T_{MIN}) \wedge (T \leq T_{MAX})$; $H_{P_{16}, T_4} : (T < T_{MIN}) \vee (T > T_{MAX})$;
- $H_{P_{16}, T_5} : (V_{CELL} > V_{LCO}) \wedge (V_{CELL} < V_{HCO})$; $H_{P_{16}, T_6} : (V_{CELL} < V_{LCO}) \vee (V_{CELL} > V_{HCO})$;
- $H_{P_{16}, T_7} : I_{SNS} \geq I_{COND}$; $H_{P_{16}, T_8} : V_{CELL} \geq V_{MIN}$; $H_{P_{16}, T_8} : V_{CELL} \geq V_{BLK}$;
- $H_{P_{16}, T_{10}} : V_{CELL} < V_{MIN}$; $H_{P_{16}, T_{11}} : (t = d_{11}) \vee (V_{CELL} < V_{LCO}) \vee (V_{CELL} > V_{HCO})$;
- $H_{P_{16}, T_{12}} : (t = d_{12}) \vee (V_{CELL} < V_{LCO}) \vee (V_{CELL} > V_{HCO})$; $H_{P_{16}, T_{13}} : (V_{CELL} < V_{LCO}) \vee (V_{CELL} > V_{HCO})$;
- $H_{P_{16}, T_{14}} : (V_{CELL} < V_{LCO}) \vee (V_{CELL} > V_{HCO})$; $H_{P_{16}, T_{15}} : (V_{CELL} \geq V_{LCO}) \vee (V_{CELL} \leq V_{HCO})$;
- $H_{P_{16}, T_{16}} : (T \geq T_{MIN}) \wedge (T \leq T_{MAX})$; $H_{P_{16}, T_{17}} : (T < T_{MIN}) \vee (T > T_{MAX})$;
- $H_{P_{16}, T_{18}} : (T \geq T_{MIN}) \wedge (T \leq T_{MAX})$; $H_{P_{16}, T_{19}} : (T < T_{MIN}) \vee (T > T_{MAX})$;
- $H_{P_{16}, T_{20}} : (T \geq T_{MIN}) \wedge (T \leq T_{MAX})$; $H_{P_{16}, T_{21}} : (T < T_{MIN}) \vee (T > T_{MAX})$;
- $H_{P_{16}, T_{22}} : (T \geq T_{MIN}) \wedge (T \leq T_{MAX})$;
- Este modelo não contém funções de junção.

- $M_0 = [[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]^T \mathbf{X}_0]^T$. Onde, $\mathbf{X}_0 = [V_{CELL_0} SOC_0 T_0]^T$ é o estado contínuo inicial do SH.

Os predicados associados aos lugares (discretos e diferenciais) e transições (discretas e diferenciais), são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

Tabela 5.1: Lugares do modelo RPHDs da Figura 5.4.

Lugar	Tipo	Predicado
P_1	D	Carregador desligado
P_2	D	Carregador ligado
P_3	D	Monitoramento de temperatura ligado
P_4	D	Verificar temperatura inicial
P_5	D	Temperatura da bateria na faixa
P_6	D	Regulação de tensão
P_7	D	Regulação de corrente
P_8	D	Carga rápida principal
P_9	D	Carga rápida manutenção
P_{10}	D	Estado de falta
P_{11}	D	Carga pendente
P_{12}	D	Lugar de controle
P_{13}	D	Lugar de controle
P_{14}	D	Lugar de controle
P_{15}	D	Lugar de controle
P_{16}	DF	$\mathbf{X} = [V_{CELL} SOC T]^T$

Resultados de Simulação

A seguir, são apresentados os resultados de simulação do modelo RPHD do SH/Supervisor. O modelo de bateria utilizado neste exemplo foi o modelo de desempenho Copetti-Murillo, o qual é apresentado na Seção 3.3. As simulações foram realizadas com a ferramenta computacional Matlab^{©1}.

De acordo com o grafo de alcançabilidade mostrado na Figura 5.5, o SH/Supervisor possui 12 estados discretos e 22 transições entre esses estados. Neste grafo, os estados representados por uma elipse dupla representam os estados do processo de carga. Além disso, eles representam no grafo os estados que devem ser alcançados pelo sistema e na seqüência desejada. O número máximo de transições discretas que podem ocorrer depende das condições iniciais e do estado contínuo do SH ao longo de uma simulação.

¹Matlab é um produto da MathWorks, Inc.

Tabela 5.2: Transições do modelo RPHDs da Figura 5.4.

Transição	Tipo	Predicado
T_1	D	Liga o carregador
T_2	D	Liga o monitoramento de temperatura
T_3	D	Carregador entra no estado temperatura da bateria na faixa
T_4	D	Carregador entra no estado temperatura da bateria fora da faixa
T_5	D	Carregador entra no estado de regulação de tensão
T_6	D	Carregador entra no estado de falta
T_7	D	Carregador entra no estado de regulação de corrente
T_8	D	Carregador entra no estado de carga rápida principal
T_9	D	Carregador entra no estado de carga rápida manutenção
T_{10}	D	Carregador retorna ao estado de regulação de tensão
T_{11}	D	Carregador entra no estado de falta
T_{12}	D	Carregador entra no estado de falta
T_{13}	D	Carregador entra no estado de falta
T_{14}	D	Carregador entra no estado de falta
T_{15}	D	Carregador sai do estado de falta
T_{16}	D	Carregador sai do estado de carga pendente
T_{17}	D	Carregador entra no estado de carga pendente
T_{18}	D	Carregador sai do estado de carga pendente
T_{19}	D	Carregador entra no estado de carga pendente
T_{20}	D	Carregador sai do estado de carga pendente
T_{21}	D	Carregador entra no estado de carga pendente
T_{22}	D	Carregador retorna ao estado temperatura da bateria na faixa
T_{23}	DF	E. contínua de $(V_{CELL}$ e $SOC) \in \mathbf{X}$: Equações da Seção 3.3
T_{24}	DF	E. contínua de $(V_{CELL}$ e $SOC) \in \mathbf{X}$: Equações da Seção 3.3
T_{25}	DF	E. contínua de $(V_{CELL}$ e $SOC) \in \mathbf{X}$: Equações da Seção 3.3
T_{26}	DF	E. contínua de $(V_{CELL}$ e $SOC) \in \mathbf{X}$: Equações da Seção 3.3

Neste exemplo as seguintes considerações e condições iniciais foram admitidas:

1. A temperatura da bateria, durante a simulação, permaneceu dentro da faixa permitida, ou seja, $(T \geq T_{MIN}) \wedge (T \leq T_{MAX})$. Portanto, as transições discretas T_4 , T_{22} , T_{16} , T_{17} , T_{18} , T_{19} , T_{20} e T_{21} são desabilitadas pela ação do supervisor com base nos valores do vetor V_C .
2. Na fase inicial da simulação a tensão da bateria ficou dentro da faixa permitida, ou seja, $(V_{CELL} > V_{LCO}) \wedge (V_{CELL} < V_{HCO})$. Portanto, a transição discreta T_6 também é desabilitada pela ação do supervisor.
3. A partir deste ponto e até o final da simulação a tensão da bateria atingiu os valores adequados de acordo com o processo de carga, ou seja, $(V_{CELL} > V_{LCO}) \wedge (V_{CELL} < V_{HCO})$ e $V_{CELL} > V_{MIN}$. Assim, as transições discretas T_{10} , T_{11} , T_{12} , T_{13} , T_{14} e T_{15}

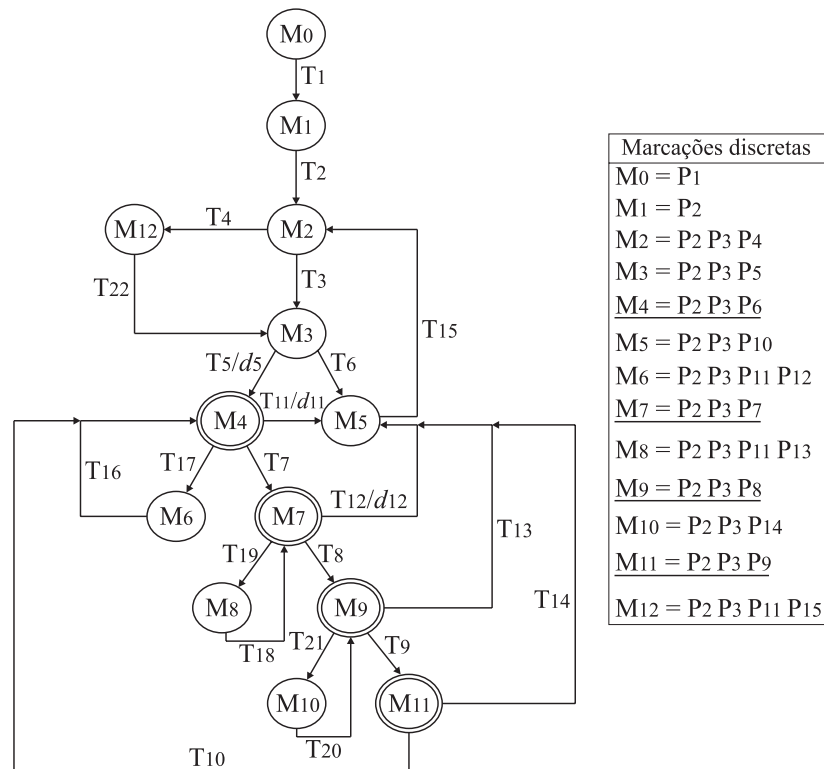


Figura 5.5: Gráfico de alcançabilidade das marcações discretas (estados discretos) do modelo RPHD do SH/Supervisor mostrado na Figura 5.4.

também são desabilitadas pela ação do supervisor.

Desta forma, a dinâmica do contínuo do SH tem as suas evoluções determinada pela marcação discreta $M_{D_{SH}}$ definida pelo supervisor. Na Figura 5.6 é mostrado o gráfico de alcançabilidade resultante da ação do supervisor. Neste gráfico de alcançabilidade pode-se observar que os estados discretos M_5 , M_6 , M_8 , M_{10} e M_{12} foram retirados do espaço de estado discreto máximo (veja a Figura 5.5) devido a ação do supervisor.

Note que o estado discreto final M_{11} , mostrado no gráfico da Figura 5.6, representa o final do processo de carga da bateria. Embora este estado seja um estado de bloqueio, ele está de acordo com as especificações do CI bq2031, que definem que a bateria deve permanecer em carga de manutenção por tempo indefinido. Para reinicializar o sistema é necessário desligar o carregador, verificar as condições da bateria que foi carregada, inserir um outra bateria e religar o carregador. Desta forma, o sistema SH/Supervisor retornará ao estado inicial.

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9, são mostradas as evoluções contínuas no tempo da corrente,

da tensão e do estado de carga da bateria, respectivamente.

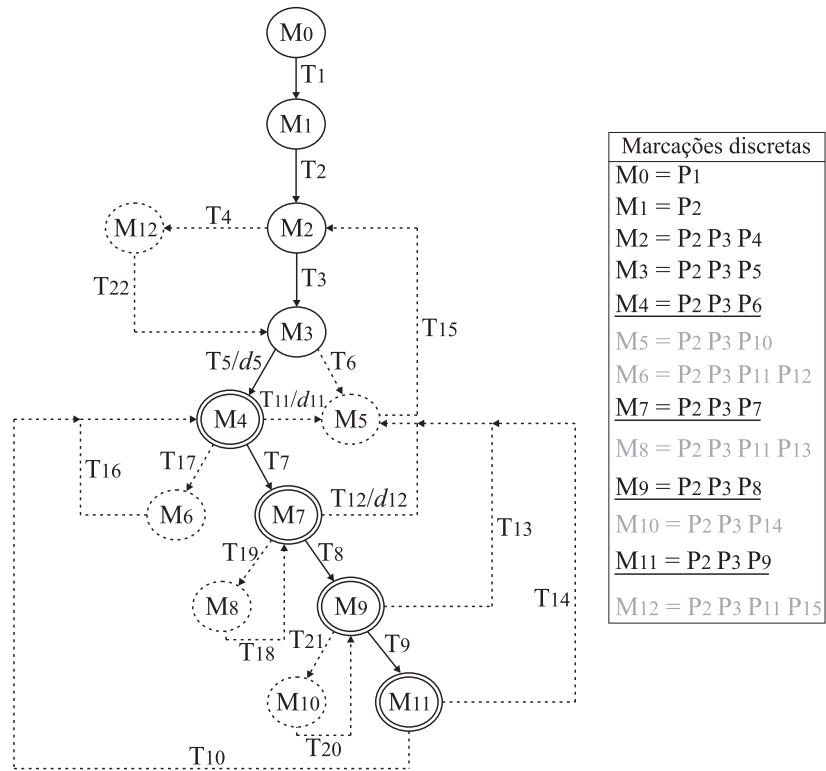


Figura 5.6: Grafo de alcançabilidade das marcações discretas (estados discretos) resultante da ação supervisor RPHD mostrado na Figura 5.4 (a).

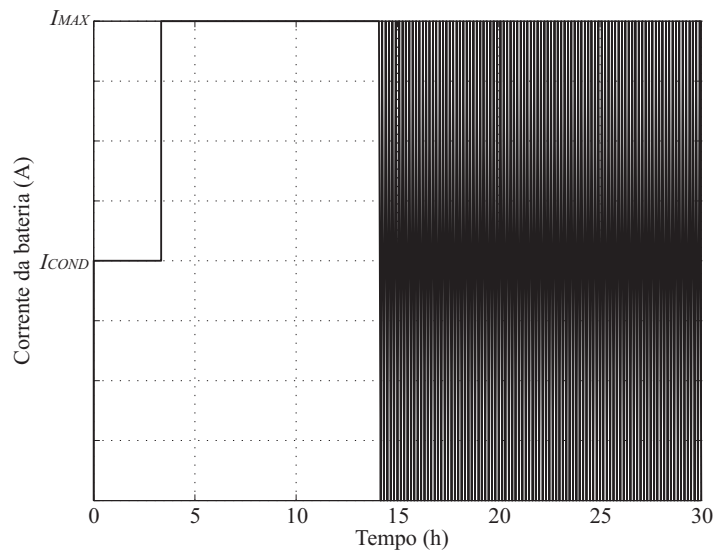


Figura 5.7: Simulação do modelo RPHD mostrado na Figura 5.4: corrente da bateria.

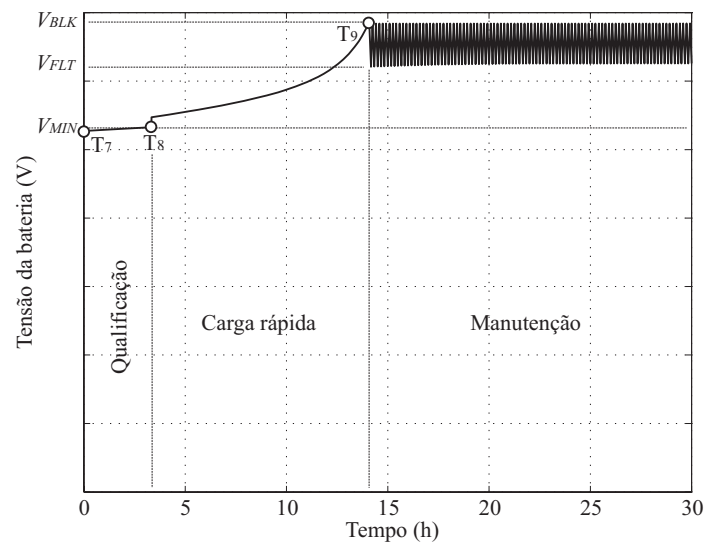


Figura 5.8: Simulação do modelo RPHD mostrado na Figura 5.4: tensão da bateria.

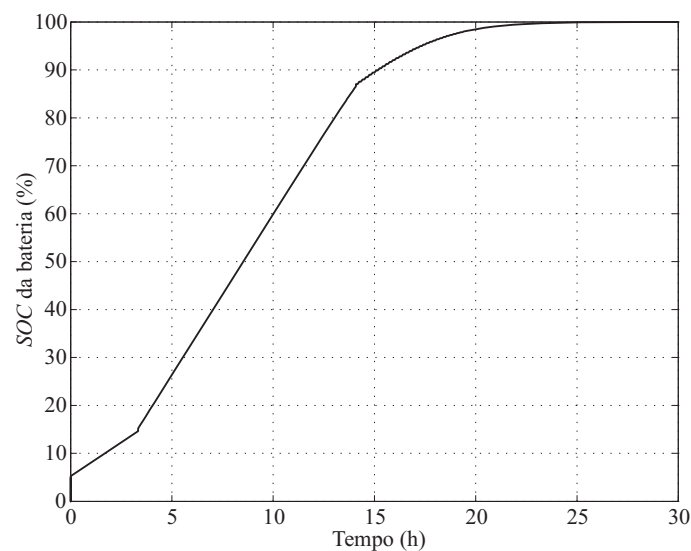


Figura 5.9: Simulação do modelo RPHD mostrado na Figura 5.4: SOC da bateria.

Finalizando, para uma outra bateria, com condições de operação e recarga diferentes, o comportamento do sistema SH/Supervisor deverá ser diferente.

Capítulo 6

Modelagem, Simulação e Supervisão de SMFEs utilizando as RPHDs

6.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados quatro exemplos de simulação para ilustrar a aplicação do formalismo RPHDs na modelagem, simulação e supervisão do BB de um SMFE isolado. Os exemplos são os seguintes:

- Exemplo 1: simulação da operação do SMFE;
- Exemplo 2: simulação de desempenho do BB;
- Exemplo 3: simulação de tempo de vida do BB;
- Exemplo 4: simulação de supervisão do BB

Todas as simulações foram realizadas utilizando a ferramenta computacional Matlab^{©1}. Neste trabalho, não são estudados os SMFEs conectados.

A estrutura deste capítulo está dividida da seguinte forma: na próxima seção apresenta-se o dimensionamento do SMFE estudado; Na Seção 6.2 é apresentado o dimensionamento do SMFE estudado; Na Seção 6.3, as especificações gerais do SMFE são apresentadas; A seguir, na Seção 6.4 são apresentados os modelos RPHDs para cada subsistema do SMFE;

¹Matlab é um produto da MathWorks, Inc.

Na Seção 6.5 apresenta-se o modelo RPHDs do SMFE estudado; Para finalizar, os quatro exemplos acima são apresentados na Seção 6.6.

6.2 Dimensionamento do SMFE isolado

A estrutura básica do SMFE isolado estudado neste trabalho é mostrada na Figura 6.1.

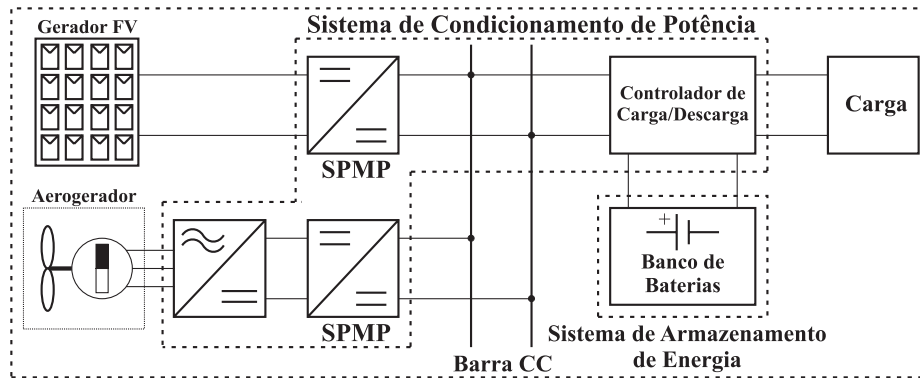


Figura 6.1: Estrutura básica do SMFE isolado estudado neste trabalho.

O SMFE estudado é composto dos seguintes subsistemas: 1 gerador FV, 1 aerogerador, 1 banco de baterias, 1 controlador de carga/descarga, 1 conversor estático CA-CC, 2 conversores estáticos CC-CC, e 1 carga. A seguir, cada um desses subsistemas é dimensionado.

- Gerador FV: composto de um painel de 14 módulos FV (2 conjuntos ligados em série ($NM_S = 2$) e cada conjunto com 7 módulos em paralelo ($NM_P = 7$)). Cada módulo tem as seguintes características: $P_{max} = 110$ W, $V_n = 16,8$ V e $I_n = 6,67$ A;
- Aerogerador: é composto de 1 turbina eólica de 3 pás, diâmetro de 3 m, montada numa torre com 40 m de altura, $P_{max} = 1500$ W para velocidade de vento de 12 m/s; e 1 gerador trifásico de ímãs permanentes com frequência variável e $V_n = 24$ Vca;
- Banco de baterias (BB): é composto de 52 baterias (2 conjuntos ligados em série ($NB_S = 2$) e cada conjunto com 26 baterias em paralelo ($NB_P = 26$)). Cada bateria tem as seguintes características: tipo estacionária, $V_n = 12$ Vcc, $C_{nominal} = 54$ Ah. O banco de baterias tem uma tensão total $V_T = 24$ Vcc e capacidade total $C_T = 1400$ Ah para uma profundidade máxima de descarga de aproximadamente 50%;

- Controlador de Carga/Descarga (CCD): os valores limites que o controlador de Carga/Descarga do BB utiliza são os seguintes: $R_T= 27$ V, $R_{RT}= 26$ V, $DBT= 22$ V e $R_{BT}= 24$ V, veja a Seção B.4.
- Conversor CA-CC: potência nominal de 1500 W e rendimento de 90%;
- Conversores CC-CC: potência nominal de 1500 W e rendimento de 90%;
- Carga: pode ter potência constante e variável. Para cada cenário estudado adiante, será admitido um valor de potência dentro da faixa de 1000 a 2000 W.

6.3 Especificações Gerais de Operação do SMFE isolado

As especificações de operação do SMFE isolado, são as seguintes:

1. O CCD opera em três estados: *BB-Normal*, *BB-Regulação de Tensão* e *BB-Baixa tensão*;
2. Cada um desses estados é alcançado em função dos valores que a tensão do BB atinge durante os processos de *carga* e *descarga*. Para isso são utilizados quatro valores limites (veja a Seção B.4): R_T e R_{RT} para o processo de carga; e DBT e R_{BT} para o processo de descarga;
3. O gerador FV e o aerogerador devem ser desconectados quando o CCD estiver no estado *BB-Regulação de Tensão*;
4. O gerador FV e o aerogerador devem ser conectados quando o CCD estiver nos estados *BB-Normal* ou *BB-Baixa tensão*;
5. A carga deve ser desligada quando o CCD estiver no estado *BB-Baixa tensão*, e somente pode ser religada quando o mesmo estiver nos estados *BB-Normal* ou *BB-Regulação de Tensão*;
6. O BB opera em dois estados possíveis:

- (a) *BB Carga*: o BB recebe energia gerada pelas fontes FV e eólica. Se a Carga está desligada, o BB recebe toda a energia gerada. Se a Carga está ligada e a energia consumida por esta é inferior a energia gerada, o BB recebe a energia excedente;
- (b) *BB Descarga*: o BB fornece energia para a Carga com potência superior à gerada pelas fontes. Se uma ou ambas as fontes estiverem ativas, o BB fornece o complemento de energia. Caso contrário, o BB fornece toda a energia para a Carga;

7. A Carga possui dois estados de operação: *Carga Desligada* e *Carga Ligada*. A mudança do estado *Carga Desligada* para *Carga Ligada* e vice-versa pode ser realizada de forma temporizada. Entretanto, estando a carga no estado *Carga Ligada*, é necessário um mecanismo que permita o desligamento imediato da mesma devido uma condição externa e não temporizada.

6.4 Modelos RPHDs dos Subistemas do SMFE Isolado

Nesta seção, são apresentados os modelos RPHDs para cada um dos subsistemas do SMFE estudado neste trabalho. Na descrição dos elementos de cada modelo, são utilizadas as siglas D e DF para representar elementos discretos e diferenciais, respectivamente.

6.4.1 Gerador FV e Aerogerador

Os modelos RPHDs para o gerador FV e o aerogerador são mostrados na Figura 6.2. Cada um dos modelos procura ilustrar as interações entre as dinâmicas contínuas e a eventos discretos que ocorrem durante a operação dos geradores. Os predicados associados aos lugares (discretos e diferenciais) e transições (discretas e diferenciais), são apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente.

A influência da dinâmica a eventos discretos sobre a dinâmica contínua é caracterizada pela marcação dos lugares discretos P_2 e P_4 . A presença de fichas nestes lugares permite a habilitação das transições diferenciais T_{14} e T_{15} .

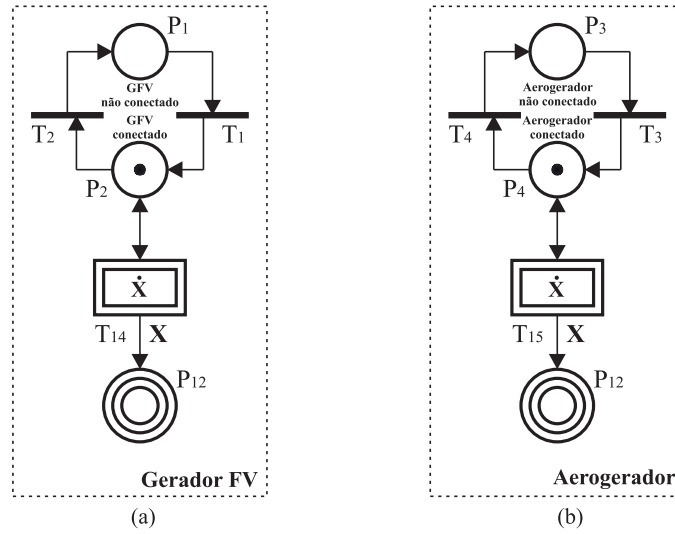


Figura 6.2: Modelos RPHDs: (a) Gerador FV e (b) Aerogerador.

Tabela 6.1: Lugares dos modelos RPHDs da Figura 6.2.

Lugar	Tipo	Predicado
P_1	D	Gerador FV não está conectado ao SMFE
P_2	D	Gerador FV está conectado ao SMFE
P_3	D	Aerogerador não está conectado ao SMFE
P_4	D	Aerogerador está conectado ao SMFE
P_{12}	DF	$\mathbf{X} = [P_{FV} \ P_{GE} \ V_{BB} \ SOC_{BB} \ P_c \ I_c]^T$

Tabela 6.2: Transições dos modelos RPHDs da Figura 6.2..

Transição	Tipo	Predicado
T_1	D	Gerador FV é conectado ao SMFE
T_2	D	Gerador FV é desconectado do SMFE
T_3	D	Aerogerador é conectado ao SMFE
T_4	D	Aerogerador é desconectado do SMFE
T_{14}	DF	Evolução contínua de $(x_1 = P_{FV}) \in \mathbf{X}$: Equações B.1 a B.7
T_{15}	DF	Evolução contínua de $(x_2 = P_{GE}) \in \mathbf{X}$: Equações B.14 a B.22

6.4.2 Banco de Baterias e Controlador de Carga/Descarga

Na Figura 6.3, são mostrados os modelos RPHDs para o BB e CCD. Os predicados associados aos lugares (discretos e diferenciais) e transições (discretas e diferenciais), são apresentados nas Tabelas 6.3 e 6.4, respectivamente.

Nestes modelos RPHDs, a influência da dinâmica contínua sobre a dinâmica a eventos discretos caracteriza-se através das seguintes funções de habilitação:

- H_{P_{12}, T_9} : $(P_{FV} + P_{GE} < P_c)$: condição que determina o início do processo de descarga

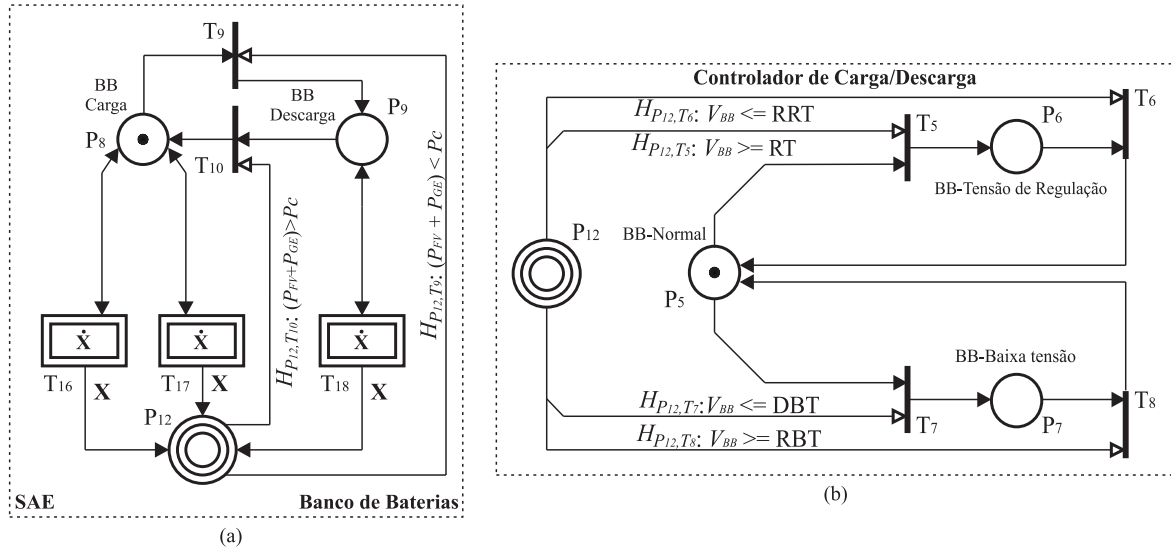


Figura 6.3: Modelos RPHDs: (a) Banco de baterias e (b) Controlador de Carga/Descarga.

Tabela 6.3: Lugares dos modelos RPHDs da Figura 6.3.

Lugar	Tipo	Predicado
P_5	D	BB em estado normal
P_6	D	BB em estado de regulação de tensão
P_7	D	BB em estado de baixa tensão
P_8	D	BB em estado de carga
P_9	D	BB em estado de descarga
P_{12}	DF	$\mathbf{X} = [P_{FV} \ P_{GE} \ V_{BB} \ SOC_{BB} \ P_c \ I_c]^T$

Tabela 6.4: Transições dos modelos RPHDs da Figura 6.3.

Transição	Tipo	Predicado
T_5	D	BB entra no estado de regulação de tensão
T_6	D	BB retorna ao estado normal de operação
T_7	D	BB entra no estado de baixa tensão
T_8	D	BB retorna ao estado normal de operação
T_9	D	BB entra em estado de descarga
T_{10}	D	BB retorna ao estado de carga
T_{16}	DF	E. contínua de $(x_3 = V_{BB} \text{ e } x_4 = SOC_{BB}) \in \mathbf{X}$
T_{17}	DF	E. contínua de $(x_3 = V_{BB} \text{ e } x_4 = SOC_{BB}) \in \mathbf{X}$
T_{18}	DF	E. contínua de $(x_3 = V_{BB} \text{ e } x_4 = SOC_{BB}) \in \mathbf{X}$

do BB. O BB deve fornecer energia para a *carga* se a potência fornecida pelas fontes FV e Eólica for insuficiente;

- $H_{P_{12},T_{10}}$: $(V_{BB} \leq DBT) \vee (P_{FV} + P_{GE}) > P_c$: condição que determina o retorno ao processo de carga do BB. Se a potência fornecida pelas fontes FV e Eólica for maior

do que a potência da carga, não é necessário descarregar o BB;

- H_{P_{12},T_5} : $V_{BB} \geq RT$: verifica se a tensão do BB atingiu o valor máximo tensão de regulação RT. Se verdadeira, o BB entra no estado de regulação de tensão;
- H_{P_{12},T_6} : $V_{BB} \leq RRT$: verifica se a tensão do BB atingiu o limite RRT. Se verdadeira, o BB retorna ao estado normal de operação ;
- H_{P_{12},T_7} : $V_{BB} \leq DBT$: verifica se a tensão do BB atingiu o limite de baixa tensão DBT. Se verdadeira, o BB entra no estado de baixa tensão;
- H_{P_{12},T_8} : $V_{BB} \geq RBT$: verifica se a tensão do BB atingiu o limite RBT. Se verdadeira, o BB retorna ao estado normal de operação.

6.4.3 Carga

O modelo RPHDs para a carga consumidora é mostrado na Figura 6.4. Os predicados associados aos lugares (discretos e diferenciais) e transições (discretas e diferenciais), são apresentados nas Tabelas 6.5 e 6.6, respectivamente.

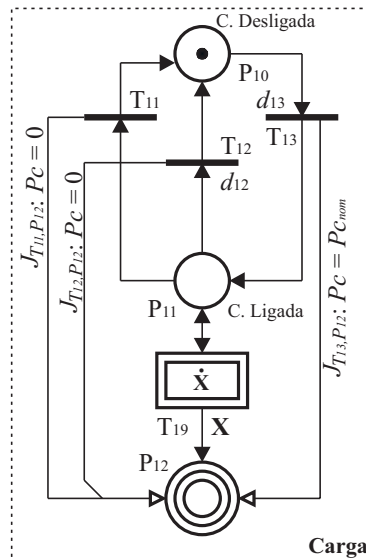


Figura 6.4: Modelos RPHDs para a carga principal.

Tabela 6.5: Lugares dos modelos RPHDs da Figura 6.4.

Lugar	Tipo	Predicado
P_{10}	D	Carga desligada
P_{11}	D	Carga ligada
P_{12}	DF	$\mathbf{X} = [P_{FV} P_{GE} V_{BB} SOC_{BB} P_c I_c]^T$

Tabela 6.6: Transições dos modelos RPHDs da Figura 6.4.

Transição	Predicado
T_{11}	A carga é desligada sem temporização (por outra condição)
T_{12}	A carga é desligada após intervalo de tempo d_{12}
T_{13}	A carga é ligada após intervalo de tempo d_{13}
T_{19}	E. contínua de $(x_5 = P_c \text{ e } x_6 = I_c) \in \mathbf{X}$: equações para carga constante ou variável

Neste modelo RPHDs é apresentada a influência da dinâmica a eventos discretos sobre a dinâmica contínua através das seguintes funções de junção:

- $J_{T_{11}, P_{12}}$: $P_c = 0$: define a potência da carga como sendo zero;
- $J_{T_{12}, P_{12}}$: $P_c = 0$: define a potência da carga como sendo zero;
- $J_{T_{13}, P_{12}}$: $P_c = P_{c_{nom}}$: define a potência da carga como sendo $P_{c_{nom}}$.

Para as transições discretas T_{13} e T_{12} , são associados intervalos de temporização para modelar os atrasos de tempo na ligação (d_{13}) e no desligamento (d_{12}) da carga.

6.5 Modelo RPHDs do SMFE isolado

O modelo RPHDs para um SMFE isolado é mostrado na Figura 6.5. Este modelo é resultado da composição, utilizando a abordagem de modelagem *bottom-up*, dos modelos RPHDs dos vários subsistemas do SMFE estudado. Esta composição foi realizada levando-se em conta as interações necessárias entre estes subsistemas para que as especificações de operação do SMFE sejam atendidas.

Para ilustrar como o processo de composição foi realizado, pode-se considerar os subsistemas CCD e Carga mostrados na Figura 6.5. Conforme foi mencionado na Seção 6.3, quando o BB está no estado *BB-Baixa tensão*, a carga deve ser desligada e não pode ser ligada enquanto o BB permanecer esta condição. Portanto, é necessário que o modelo RPHDs

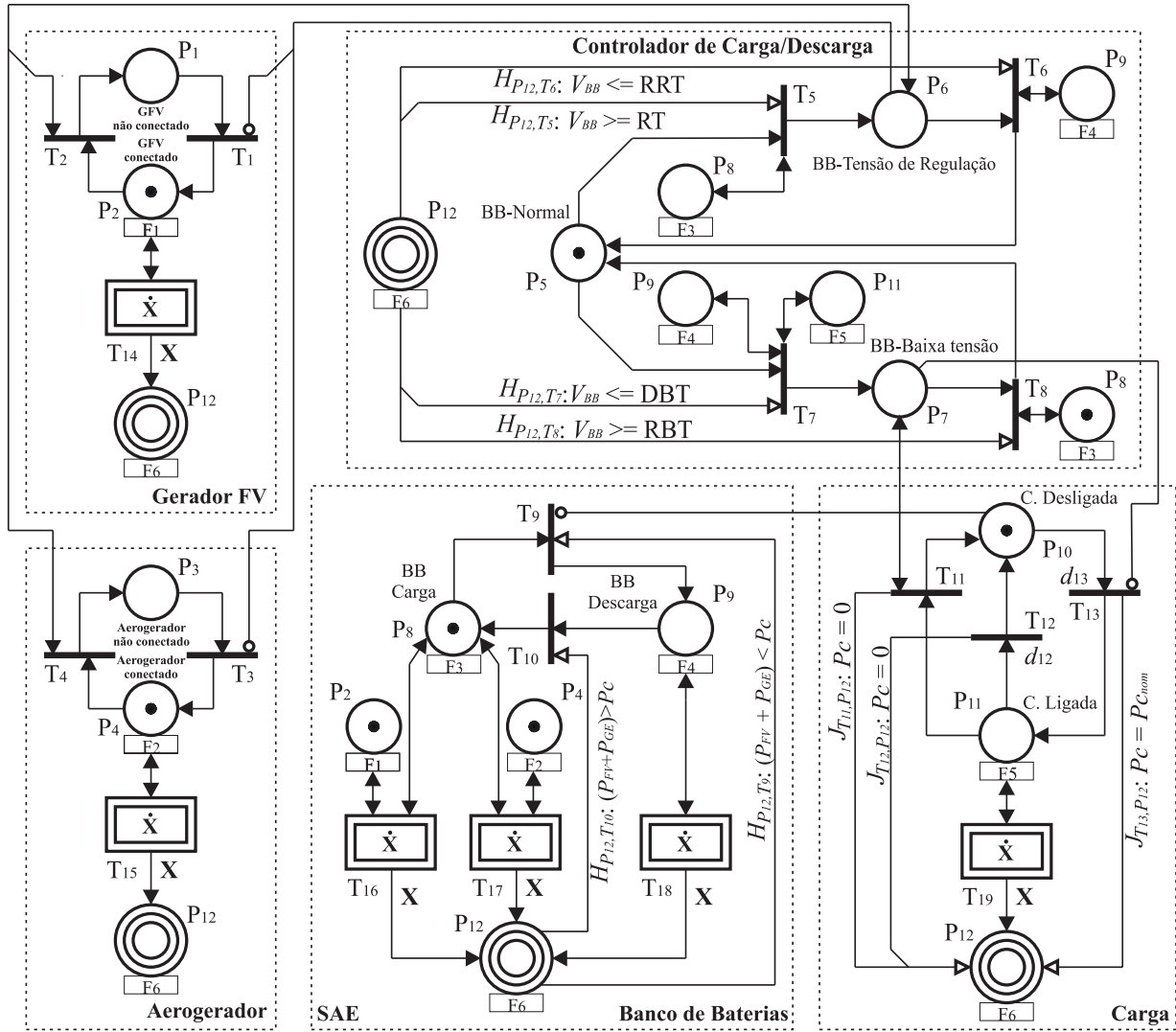


Figura 6.5: Modelo RPHDs de um SMFE isolado composto de cinco subsistemas.

da Carga receba esta pré-condição fornecida pelo modelo RPHDs do CCD. Assim, os elementos utilizados para atender a estas especificações são: (i) os arcos normais que conectam o lugar discreto P_7 (pré-condição) e a transição discreta T_{11} (evento desligar a carga), ou seja, para as marcações $m_D(P_7) = 1$ e $m_D(P_{11}) = 1$, a transição T_{11} está habilitada e o seu disparo representa o desligamento da carga; e (ii) o arco inibidor que conecta o lugar discreto P_7 (pré-condição) a transição discreta T_{13} (evento ligar a carga), ou seja, enquanto $m_D(P_7) = 1$ a transição T_{13} não pode disparar, o que representa o bloqueio a ligação da carga.

Com relação a utilização de *lugares de fusão*, pode-se citar a necessidade dos vários

subsistemas de conhecer o estado contínuo do SMFE a cada instante de tempo. Portanto, o lugar diferencial P_{12} pode ser utilizado em cada um dos modelos RPHDs dos subsistemas. Desta forma, cada uma das variáveis de estado pode ser atualizada ou utilizada para habilitar os eventos discretos de cada subsistema.

O modelo RPHDs mostrado na Figura 6.5 é definido, formalmente, da seguinte forma.

- $P_D = \{P_1, P_2, \dots, P_{11}\}; T_D = \{T_1, T_2, \dots, T_{13}\};$
- $P_{DF} = \{P_{12}\}; T_{DF} = \{T_{14}, T_{15}, \dots, T_{19}\};$
- $Pre_D(P_1, T_1) = 1, Pre_D(P_2, T_2) = 1, Pre_D(P_3, T_3) = 1, Pre_D(P_4, T_4) = 1,$
 $Pre_D(P_5, T_5) = 1, Pre_D(P_5, T_7) = 1, Pre_D(P_6, T_6) = 1, Pre_D(P_6, T_2) = 1,$
 $Pre_D(P_6, T_4) = 1, Pre_D(P_7, T_8) = 1, Pre_D(P_7, T_{11}) = 1, Pre_D(P_8, T_5) = 1,$
 $Pre_D(P_8, T_8) = 1, Pre_D(P_8, T_9) = 1, Pre_D(P_9, T_6) = 1, Pre_D(P_9, T_7) = 1,$
 $Pre_D(P_9, T_{10}) = 1, Pre_D(P_{10}, T_{13}) = 1, Pre_D(P_{11}, T_{11}) = 1, Pre_D(P_{11}, T_{12}) = 1,$
 $Pre_D(P_{11}, T_7) = 1;$
- $Pos_D(P_1, T_2) = 1, Pos_D(P_2, T_1) = 1, Pos_D(P_3, T_4) = 1, Pos_D(P_4, T_3) = 1,$
 $Pos_D(P_5, T_6) = 1, Pos_D(P_5, T_7) = 1, Pos_D(P_6, T_5) = 1, Pos_D(P_6, T_2) = 1,$
 $Pos_D(P_6, T_4) = 1, Pos_D(P_7, T_7) = 1, Pos_D(P_7, T_{11}) = 1, Pos_D(P_8, T_5) = 1,$
 $Pos_D(P_8, T_8) = 1, Pos_D(P_8, T_{10}) = 1, Pos_D(P_9, T_6) = 1, Pos_D(P_9, T_7) = 1,$
 $Pos_D(P_9, T_9) = 1, Pos_D(P_{10}, T_{11}) = 1, Pos_D(P_{10}, T_{12}) = 1, Pos_D(P_{11}, T_7) = 1,$
 $Pos_D(P_{11}, T_{13}) = 1;$
- $Pre_I(P_6, T_1) = 1, Pre_I(P_6, T_3) = 1, Pre_I(P_7, T_{13}) = 1, Pre_I(P_{10}, T_9) = 1;$
- $\mathcal{T}(T_{13}) = d_{13}, \mathcal{T}(T_{12}) = d_{12};$
- $Pre_{DDF}(P_2, T_{14}) = 1, Pre_{DDF}(P_2, T_{16}) = 1, Pre_{DDF}(P_4, T_{15}) = 1,$
 $Pre_{DDF}(P_4, T_{17}) = 1, Pre_{DDF}(P_8, T_{16}) = 1, Pre_{DDF}(P_8, T_{17}) = 1,$
 $Pre_{DDF}(P_9, T_{18}) = 1, Pre_{DDF}(P_{11}, T_{19}) = 1;$
- $Pos_{DDF}(P_2, T_{14}) = 1, Pos_{DDF}(P_2, T_{16}) = 1, Pos_{DDF}(P_4, T_{15}) = 1,$
 $Pos_{DDF}(P_4, T_{17}) = 1, Pos_{DDF}(P_8, T_{16}) = 1, Pos_{DDF}(P_8, T_{17}) = 1,$
 $Pos_{DDF}(P_9, T_{18}) = 1, Pos_{DDF}(P_{11}, T_{19}) = 1;$

- $Pos_{DF}(P_{12}, T_{14}) = \mathbf{X}$, $Pos_{DF}(P_{12}, T_{15}) = \mathbf{X}$, $Pos_{DF}(P_{12}, T_{16}) = \mathbf{X}$,
 $Pos_{DF}(P_{12}, T_{17}) = \mathbf{X}$, $Pos_{DF}(P_{12}, T_{18}) = \mathbf{X}$, $Pos_{DF}(P_{12}, T_{19}) = \mathbf{X}$;
- $\mathbf{X} = [P_{FV} \ P_{GE} \ V_{BB} \ SOC_{BB} \ P_c \ I_c]^T$;
- $\mathbf{U} = [G, T_{amb}, V_v, I_{BB}]^T$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{14}\} = \dot{P}_{FV}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{15}\} = \dot{P}_{GE}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{16}\} = \dot{V}_{BB}, \dot{SOC}_{BB}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{17}\} = \dot{V}_{BB}, \dot{SOC}_{BB}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{18}\} = \dot{V}_{BB}, \dot{SOC}_{BB}$;
- $\dot{\mathbf{X}}\{T_{19}\} = \dot{P}_c, \dot{I}_c$;
- $H_{P_{12}, T_5} : V_{BB} \geq RT$; $H_{P_{12}, T_6} : V_{BB} \leq RRT$;
- $H_{P_{12}, T_7} : V_{BB} \leq DBT$; $H_{P_{12}, T_8} : V_{BB} \geq RBT$;
- $H_{P_{12}, T_9} : (P_{FV} + P_{GE} < P_c)$; $H_{P_{12}, T_{10}} : (P_{FV} + P_{GE}) > P_c$;
- $J_{T_{11}, P_{12}} : P_c = 0$; $J_{T_{12}, P_{12}} : P_c = 0$; $J_{T_{13}, P_{12}} : P_c = P_{c_{nom}}$;
- $M_0 = [[0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]^T \ \mathbf{X}_0]^T$.

Onde, $\mathbf{X}_0 = [P_{FV_0} \ P_{GE_0} \ V_{BB_0} \ SOC_{BB_0} \ P_{c_0} \ I_{c_0}]^T$ é o estado contínuo inicial do SH.

Pode-se observar no modelo mostrado na Figura 6.5 uma separação clara entre a dinâmica a eventos discretos e a dinâmica contínua. As interações entre estas dinâmicas são representadas no modelo RPHDs da seguinte forma:

- Interação Dinâmica a eventos discretos \rightarrow Dinâmica contínua: cada estado (marcação discreta numa RPHD) da dinâmica a eventos discretos define a respectiva dinâmica contínua que deve evoluir enquanto o sistema estiver naquele estado. Essa definição dá-se através da habilitação das transições diferenciais. Uma vez habilitada, cada transição diferencial realiza o cálculo da respectiva evolução contínua; e

- Interação Dinâmica contínua \rightarrow Dinâmica a eventos discretos: a medida que o estado contínuo evolui no tempo, os valores das variáveis de estado contínuo podem ser utilizados para habilitar os eventos discretos que podem ocorrer e, conseqüentemente, gerar um novo estado discreto.

Neste trabalho, o balanço de potências entre os vários subsistemas de um SMFE é calculado de acordo como a metodologia apresentada em (Yang et al., 2007).

Com relação ao modelo RPHDs mostrado na Figura 6.5, no Apêndice A são apresentados: (a) o conjunto de marcações discretas, veja a Tabela A.1; e (b) o grafo de alcançabilidade discreto, veja a Tabela A.2.

6.6 Exemplos de simulação

Nesta seção, quatro exemplos são apresentados com o objetivo de demonstrar como a modelagem e simulação de SMFEs com as RPHDs podem ser úteis no estudo destes sistemas.

Para cada exemplo são definidos: as condições iniciais de operação de cada subsistema do SMFE, parâmetros do BB, os limites de atuação do CCD, a potência nominal da carga, intervalos de tempo que a carga permanece desligada e ligada, etc.

6.6.1 Exemplo de Simulação da Operação do SMFE

Para demonstrar a operação do SMFE com base no modelo RPHDs mostrado na Figura 6.5, a seguinte marcação inicial $M_0 = [M_{D_0} M_{C_0}]^T$ é considerada. Onde

$$M_{D_0} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]^T \text{ e}$$

$$M_{C_0} = \mathbf{X}_0 = [P_{FV_0} = 0 \ P_{GE_0} = 698,80 \ V_{BB_0} = 25,67 \ SOC_{BB_0} = 50 \ P_{c_0} = 0 \ I_{c_0} = 0]^T$$

Esta marcação representa o estado inicial de operação do SMFE, ou seja:

- Os geradores FV e eólico estão conectados ao SMFE;
- O CCD está no estado BB-Normal;
- O BB está no estado de carga; e
- A carga está desligada.

A evolução no tempo da variável de estado contínuo V_{BB} , para um período de funcionamento igual a 6 horas, é apresentada na Figura 6.6. A descrição desta evolução é apresentada a seguir.

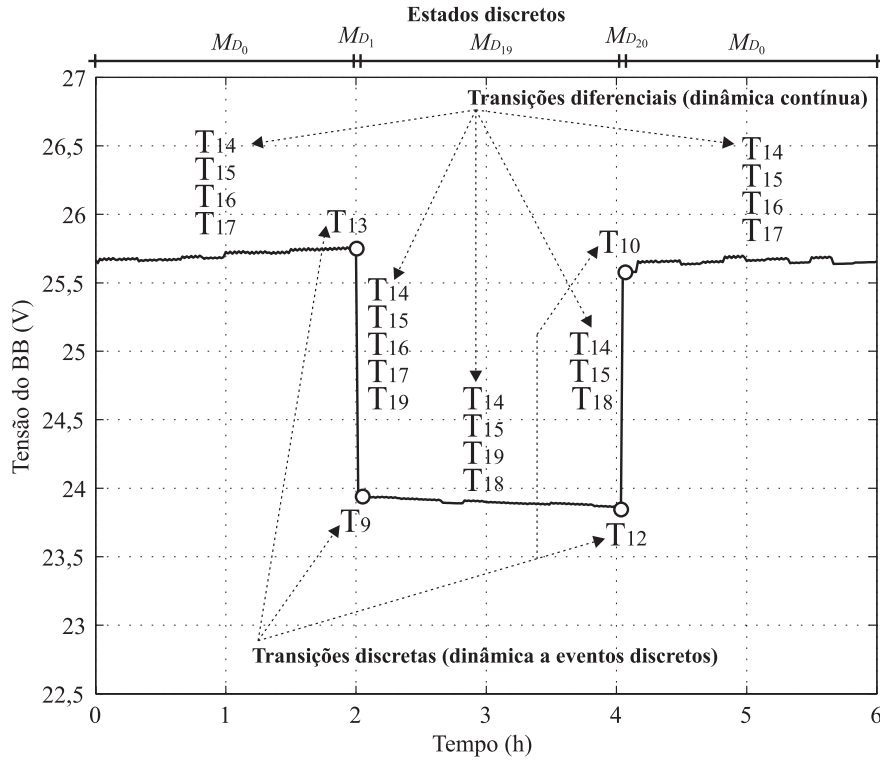


Figura 6.6: Exemplo de evolução no tempo da variável de estado V_{BB} conforme o modelo RPHDs mostrado na Figura 6.5.

Durante o estado discreto inicial M_{D_0} , o BB está sendo carregado pelas fontes FV e eólica. Este comportamento contínuo é representado pela habilitação e disparo das transições diferenciais: T_{14} para a energia FV, T_{15} para a energia eólica e (T_{16} e T_{17}) para o BB em carga, veja a Figura 6.5. O cálculo destas evoluções contínuas é realizado utilizando os modelos matemáticos apresentados nas Seções B.2 e B.3. O sistema permanece neste estado até que um dos eventos discretos ocorra: (i) disparo da transição discreta T_{13} (ligar a carga) após um intervalo de tempo de duas horas, já que, $d_{13} = 2$ h; ou (ii) disparo da transição discreta T_5 , a qual modela a entrada do BB no estado de regulação de tensão. Entretanto, como a função de habilitação $H_{P_{12}, T_5} : V_{BB} \geq RT$ não se torna verdadeira, a transição T_5 não está habilitada. Portanto, a transição T_{13} dispara em $t = 2$ h.

O disparo de T_{13} leva o sistema para o estado discreto $M_{D_1} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$.

Neste estado, as fontes FV e eólica estão fornecendo energia para o BB e para a carga. Este comportamento contínuo é representado pela habilitação e disparo das transições diferenciais: T_{14} para a energia FV, T_{15} para a energia eólica, (T_{16} e T_{17}) para o BB em carga e T_{19} para a carga, veja a Figura 6.5. O sistema permanece neste estado discreto até que um dos seguintes eventos discretos ocorra: (i) disparo da transição discreta T_{12} (desligar a carga) após um intervalo de tempo de 2 horas, já que, $d_{12} = 2$ h; (ii) disparo da transição discreta T_5 , a qual modela a entrada do BB no estado de regulação de tensão; ou (iii) disparo da transição discreta T_9 , a qual modela a mudança de estado do BB de carga para descarga, ou seja, a utilização do BB para complementar alimentação da carga. Neste estado, a potência total gerada ($P_{FV} + P_{GE}$) é inferior a potência da carga (P_c). Esta condição torna verdadeira a função de habilitação $H_{P_{12},T_9} : (P_{FV} + P_{GE} < P_c)$, o que habilita o disparo da transição discreta T_9 .

O sistema entra no estado discreto $M_{D_{19}} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$, no qual o BB é utilizado para complementar o fornecimento de energia para a carga. Uma nova configuração de transições diferenciais habilitadas é obtida: T_{14} para a energia FV, T_{15} para a energia eólica, T_{18} para o BB em descarga e T_{19} para a carga, veja a Figura 6.5. O sistema permanece neste estado discreto até que um dos eventos discretos ocorra: (i) disparo da transição discreta T_{10} , a qual modela a interrupção da descarga do BB caso a função $H_{P_{12},T_{10}} : (P_{FV} + P_{GE}) > P_c$ seja verdadeira; (ii) disparo de T_{12} (desligar a carga) após $d_{12} = 2$ h; ou (iii) disparo de T_7 (BB com baixa tensão), o qual depende da função de habilitação $H_{P_{12},T_7} : V_{BB} \leq DBT$. Para as condições atuais do BB, a transição T_{12} dispara após 2 horas, ou seja, $t = 4$ h.

O disparo de T_{12} leva o sistema para o estado discreto $M_{D_{20}} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]^T$, no qual o BB encontra-se no estado de descarga e a carga está desligada. Neste estado, naturalmente, as fontes passam a fornecer energia para o BB devido a ausência da carga. A nova configuração de transições diferenciais habilitadas obtida é: T_{14} para a energia FV, T_{15} para a energia eólica e T_{18} para o BB em descarga, veja a Figura 6.5. Dois eventos discretos podem ocorrer: (i) disparo da transição discreta T_{10} (BB vai para o estado de carga) caso a função $H_{P_{12},T_{10}} : (P_{FV} + P_{GE}) > P_c$ seja verdadeira; ou (ii) disparo da transição discreta T_{13} (ligar a carga) após um intervalo de tempo de 2 horas. A transição T_{10} dispara, pois a função $H_{P_{12},T_{10}}$ é verdadeira por conta de $(P_{FV} + P_{GE}) > P_c$, levando o BB para o estado

de carga.

O disparo de T_{10} leva o sistema para o estado discreto $M_{D_0} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$, no qual ele permanece até o instante $t = 6$ h.

6.6.2 Exemplo de Simulação de Desempenho do BB

O objetivo deste exemplo é verificar o desempenho do BB durante a simulação em função da potência gerada pelos geradores FV e eólico e do comportamento da carga. Por exemplo, as condições do BB, ou seja, a sua tensão (V_{BB}) e o seu estado de carga (SOC_{BB}). Para tanto, é utilizado o modelo de desempenho de baterias chumbo-ácido apresentado na Seção 3.3.

Neste exemplo, a marcação inicial M_0 do modelo RPHDs é a mesma utilizada no exemplo apresentado na Seção 6.6.1, página 111. Os valores limites para o CCD são os seguintes: RT= 27 V, RRT= 26 V, DBT= 22 V e RBT= 24 V. O tempo de simulação deste exemplo é de 72 horas.

As condições meteorológicas de irradiância G , temperatura ambiente T_{amb} e velocidade do vento V_v juntamente com a corrente do banco de baterias I_{BB} , são as entradas do sistema, ou seja, $\mathbf{U} = [G, T_{amb}, V_v, I_{BB}]^T$.

A evolução de \mathbf{U} no tempo é mostrada nas Figuras 6.7 e 6.8 (d). A temperatura de trabalho do BB é 35°C.

A potência da carga é variável, ou seja, $P_c = [1600 - 2000]$ W. A carga permanece desligada durante 4 h ($d_{13} = 4$), e ligada, durante 20 h ($d_{12} = 20$). Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6.8.

Durante a simulação deste cenário, o SMFE alcança 37 estados discretos através do disparo de 36 transições discretas.

Note que, devido a potência solicitada pela carga e as condição do BB, neste cenário os geradores não são desconectados, ou seja, não ocorrem os eventos discretos T_2 e T_4 . Contudo, mesmo com a presença constante dos geradores FV e eólico, o BB é solicitado durante toda a simulação, conforme é mostrado na Figura 6.8 (c).

A evolução da tensão do BB (V_{BB}) é mostrada na Figura 6.8 (f) e caracteriza-se por descargas de grande intensidade do BB. Além disso, pode-se observar as ocorrências dos eventos discretos T_9 (BB entra no estado de descarga) e T_{10} (BB retorna ao estado de

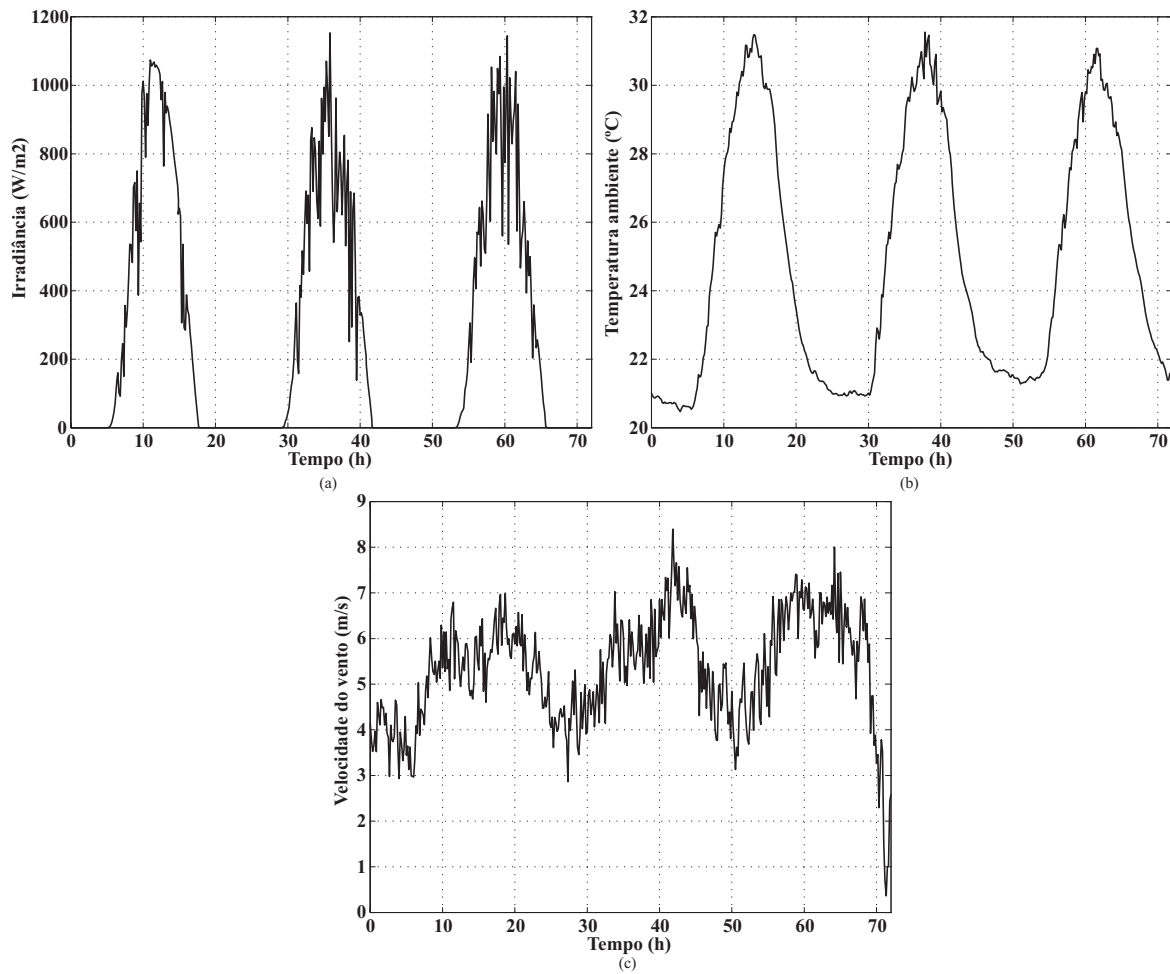


Figura 6.7: Evolução no tempo de: (a) G , (b) T_{amb} e (c) V_v .

carga).

No instante $t = 34,17$ h, o CCD detecta a condição $V_{BB} \leq DBT$, o que habilita a ocorrência do evento discreto T_7 . A ocorrência de T_7 leva o CCD para o estado *BB-Baixa tensão*, o que força o CCD a desconectar a carga, através do evento discreto T_{11} , para evitar uma condição de sobrecarga do BB, veja a Figura 6.8 (b). A seguir, devido a ausência da carga, ocorre o evento discreto T_{10} (BB retorna ao estado de carga).

A medida que o BB é carregado, o CCD detecta a condição $V_{BB} \geq RBT$ no instante $t = 34,50$ h, que resulta no disparo de T_8 . O CCD está agora no estado *BB-Normal* e a carga pode ser ligada no instante $t = 38,50$ h.

Este exemplo ilustra uma condição crítica para o BB, veja a Figura 6.8 (c), um baixo *SOC*. Se o perfil da carga não mudar (menor tempo ligada ou maior tempo desligada), a

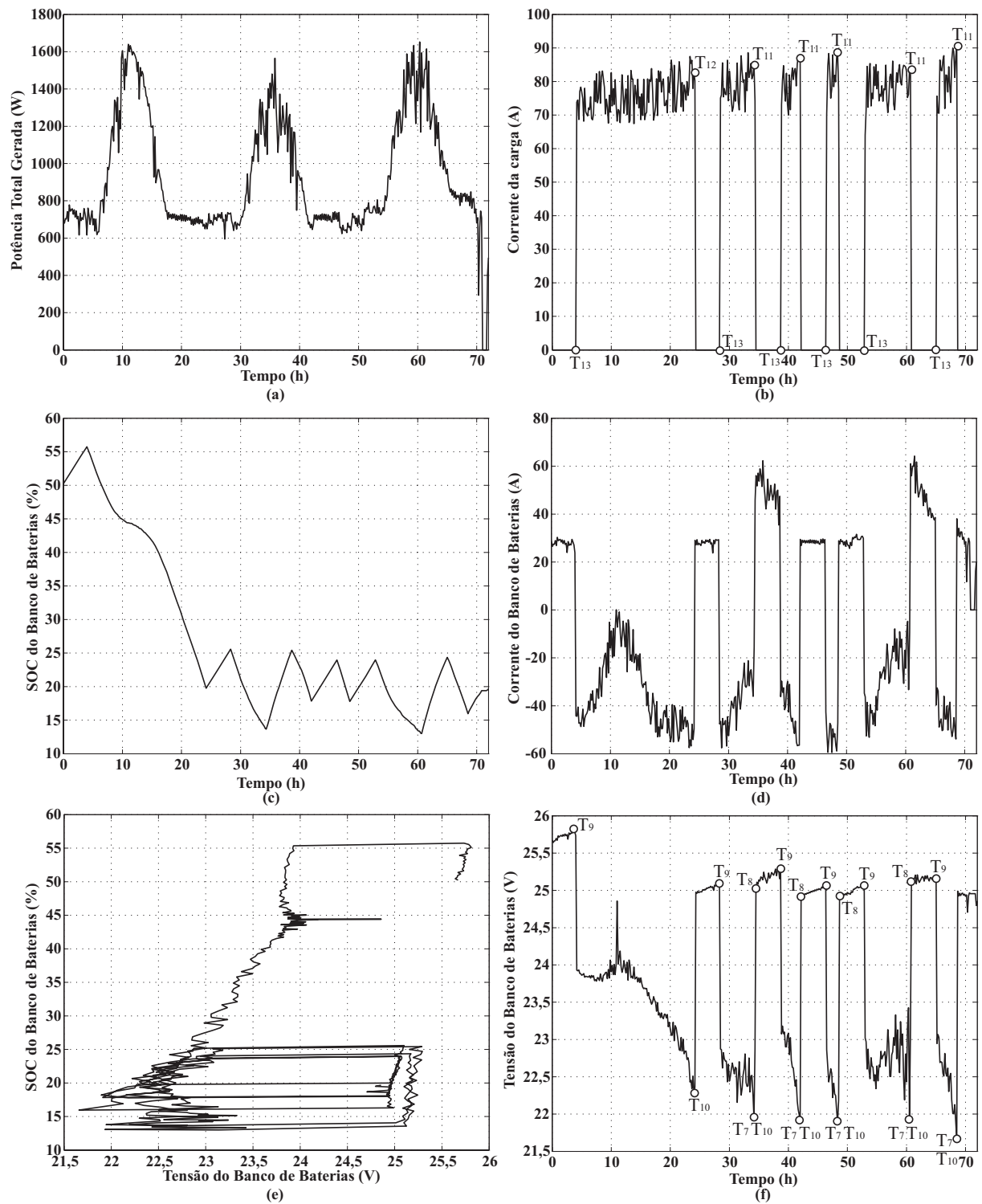


Figura 6.8: Resultados de simulação: (a) Potência total gerada ($P_{FV} + P_{GE}$), (b) Corrente da carga, (c). Estado de carga do BB, (d) Corrente do BB, (e) $V_{BB} \times SOC_{BB}$ e (f) Tensão do BB. Cada (o) indica a ocorrência de um, ou mais, eventos discretos.

carga deverá ser desconectada até que o BB esteja em condições normais de operação.

Entretanto, os modelos de desempenho de baterias chumbo-ácido não levam em conta a degradação que ocorre numa bateria ao longo de sua vida útil. Portanto, existe a necessidade de utilizar-se um modelo que considere os diversos fatores de estresse e mecanismos de envelhecimento a que uma bateria chumbo-ácido é submetida durante a sua vida útil.

Os dois exemplos apresentados a seguir utilizam o modelo de tempo de vida apresentado na Seção 3.4. Desta forma, pretende-se mostrar que a utilização deste tipo de modelo possibilita estudar, de maneira mais realista, o comportamento de um BB num SMFE em função das condições e estratégias de operação.

6.6.3 Exemplo de Simulação do Tempo de Vida do BB

Neste exemplo o tempo de vida do BB de um SMFE é verificado através de simulação do modelo RPHDs mostrado na Figura 6.5. Para tanto é utilizado o modelo de tempo de vida de baterias chumbo-ácido apresentado na Seção 3.4.

Além dos parâmetros de desempenho de uma bateria (tensão e estado de carga), este modelo de baterias possibilita observar, durante as simulações, as evoluções dos principais parâmetros relacionados com o tempo de vida de cada bateria que compõe o BB. Estes parâmetros são: resistência interna (ρ_c e ρ_d), quantidade de ciclos nominais Z_N e sobrecarregados Z_W ; perda de capacidade por corrosão C_{corr} e por degradação C_{deg} ; e capacidade restante C_d .

A finalização de cada simulação é determinada pela condição $C_d(t) \leq 80\%$ de $C_d(0)$, ou seja, quando a capacidade descarga da bateria é menor ou igual a 80% do seu valor inicial.

Para demonstrar como as condições de operação influenciam o tempo de vida do BB, três cenários são admitidos para o SMFE:

Cenário 1: A potência da carga é constante, ou seja, $P_c = 2000$ W. A carga permanece desligada durante 4 h ($d_{13} = 4$), e ligada, durante 4 h ($d_{12} = 4$). Cada bateria do BB tem $SoC(0) = 100\%$.

Cenário 2: A potência da carga é variável, ou seja, $P_c = [1600 - 2000]$ W. A carga permanece ligada durante toda a simulação, ou seja, ($d_{13} = 0$) e ($d_{12} = \infty$). Cada bateria do BB tem $SoC(0) = 100\%$.

Cenário 3: A potência da carga é constante, ou seja, $P_c = 1200$ W. A carga permanece desligada durante 4 h ($d_{13} = 4$), e ligada, durante 2 h ($d_{12} = 2$). Cada bateria do BB tem $SoC(0) = 100\%$.

As condições de operação são caracterizadas pelas variações nas correntes de carga e descarga do BB e pela temperatura de operação, neste caso, 35°C . Os valores limites para o CCD são os seguintes: $RT = 27$ V, $RRT = 26$ V, $DBT = 23$ V e $RBT = 25$ V.

Na Tabela 6.7, são mostrados os valores finais dos principais parâmetros de cada bateria do BB para cada cenário. Os tempos de vida do BB são mostrados na última coluna.

Tabela 6.7: Resultados de simulação: valores finais dos parâmetros de cada bateria do BB.

Cenário	$U(V)$	$SoC(\%)$	$\rho_c(\Omega\text{Ah})$	$\rho_d(\Omega\text{Ah})$	$Z_N(\text{ciclos})$	$Z_W(\text{ciclos})$	C_{corr}	C_{deg}	C_d	T. Vida (h)
1	23,90	-7,48	0,5516	0,8306	67,40	862,39	0,1316	0,8188	0,7996	4614
2	23,47	-79,72	0,6585	0,9375	40,92	830,43	0,2385	0,7117	0,7998	3109
3	25,13	100,00	1,3586	1,6376	36,15	36,15	0,9386	0,0114	0,8000	13139

Nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 são mostrados os resultados de simulação para cada cenário. Neste caso, as evoluções da corrente do BB e do parâmetro C_d de cada bateria do BB.

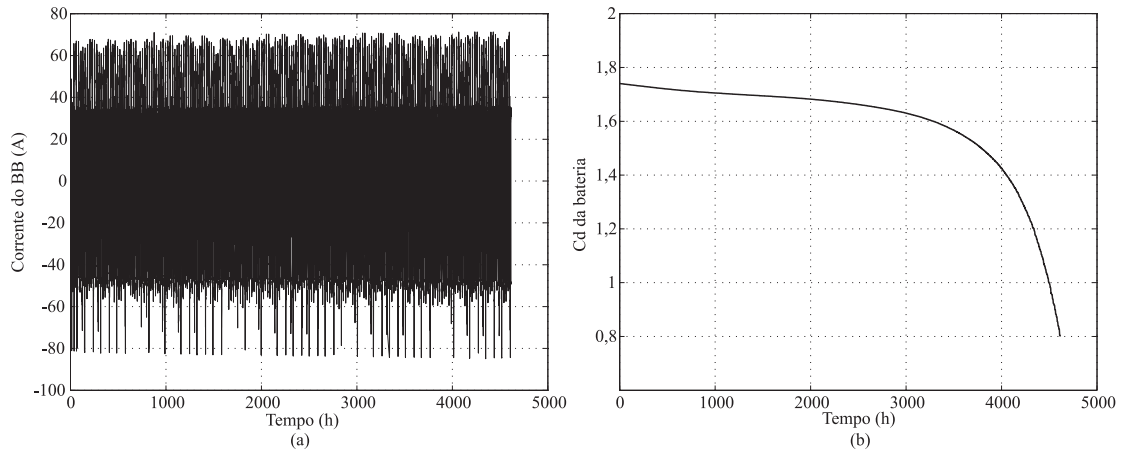


Figura 6.9: Cenário 1, evoluções no tempo de: (a) I_{BB} e (b) C_d por bateria.

Os resultados mostrados na Tabela 6.7 e nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 permitem concluir o seguinte:

Para o cenário 1, a vida útil do BB é influenciada, principalmente, pela quantidade de ciclos executados. Esta condição é caracterizada pelo maior valor do parâmetro C_{deg} em comparação com o valor de C_{corr} .

O comportamento do cenário 2 é um pouco diferente do cenário 1. O BB apresenta uma maior perda de capacidade por corrosão (C_{corr}). Esta característica deve-se aos intervalos de tempo em que o BB fica em flutuação, ou seja, sem carga, veja a Figura 6.10 (a). Embora a condição de operação deste cenário fosse carga ligada durante toda a simulação, entretanto, o CCD atuou desligando esta para evitar sobrecarga do BB.

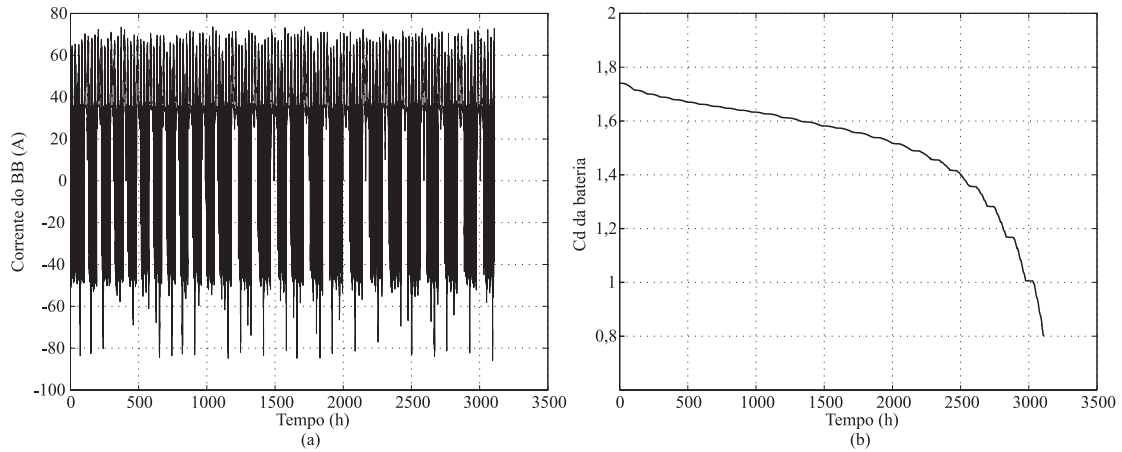


Figura 6.10: Cenário 2, evoluções no tempo de: (a) I_{BB} e (b) C_d por bateria.

No caso do cenário 3, tem-se uma situação semelhante aos sistemas de UPS. Neste caso, a carga permanece a maior parte do tempo desligada, levando o BB a um estado de flutuação. Esta condição pode ser verificada por: valor baixo de Z_W , valor baixo de C_{deg} e valores altos de C_{corr} , ρ_c e ρ_d . Neste cenário o BB é danificado de forma lenta devido à corrosão das placas das baterias.

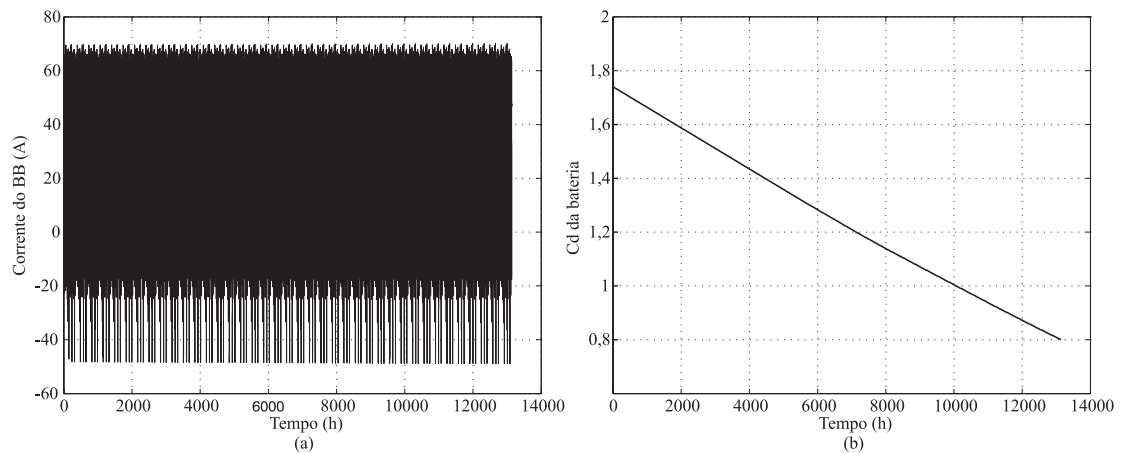


Figura 6.11: Cenário 3, evoluções no tempo de: (a) I_{BB} e (b) C_d por bateria.

Nas simulações de cada cenário foi observado o seguinte:

- Cenário 1: com 2233 estados discretos e ocorrência de 2332 eventos discretos.
- Cenário 2: com 3275 estados discretos e ocorrência de 3274 eventos discretas.
- Cenário 3: com 8441 estados discretos e ocorrência de 8440 eventos discretas.

A utilização de um modelo de tempo de vida de baterias permite fazer a previsão do tempo de vida do BB, bem como entender de que forma as condições de operação influenciam o envelhecimento do BB.

6.6.4 Exemplo de Simulação de Supervisão do BB

Neste exemplo o modelo RPHDs mostrado na Figura 6.5 será tratado como um sistema composto pela integração entre um SH e um Supervisor conforme foi apresentado no Capítulo 5. Neste caso, o CCD é o supervisor e os demais subsistemas do SMFE são considerados o SH a ser supervisionado e controlado. O modelo RPHDs para o SH/Supervisor é mostrado na Figura 6.12. As condições de operação do SMFE para este exemplo são as seguintes:

- A potência da carga é constante, ou seja, $P_c = 2000$ W. A carga permanece desligada durante 1 h ($d_{13} = 1$), e ligada, durante 7 h ($d_{12} = 7$).
- A temperatura de trabalho do BB é 35°C .

Conforme foi visto no Capítulo 5, o supervisor observa o estado contínuo ($M_C = \mathbf{X}$) do SH através das funções de habilitação:

- $H_{P_{12}, T_5} : V_{BB} \geq RT$;
- $H_{P_{12}, T_6} : V_{BB} \leq RRT$;
- $H_{P_{12}, T_7} : V_{BB} \leq DBT$; e
- $H_{P_{12}, T_8} : V_{BB} \geq RBT$.

As ações de controle do supervisor são realizadas através da marcação discreta do SH ($M_{D_{SH}}$), ou seja, em função da dinâmica contínua do SH (funções H) o supervisor determina a marcação discreta do SH para atender a especificação desejada.

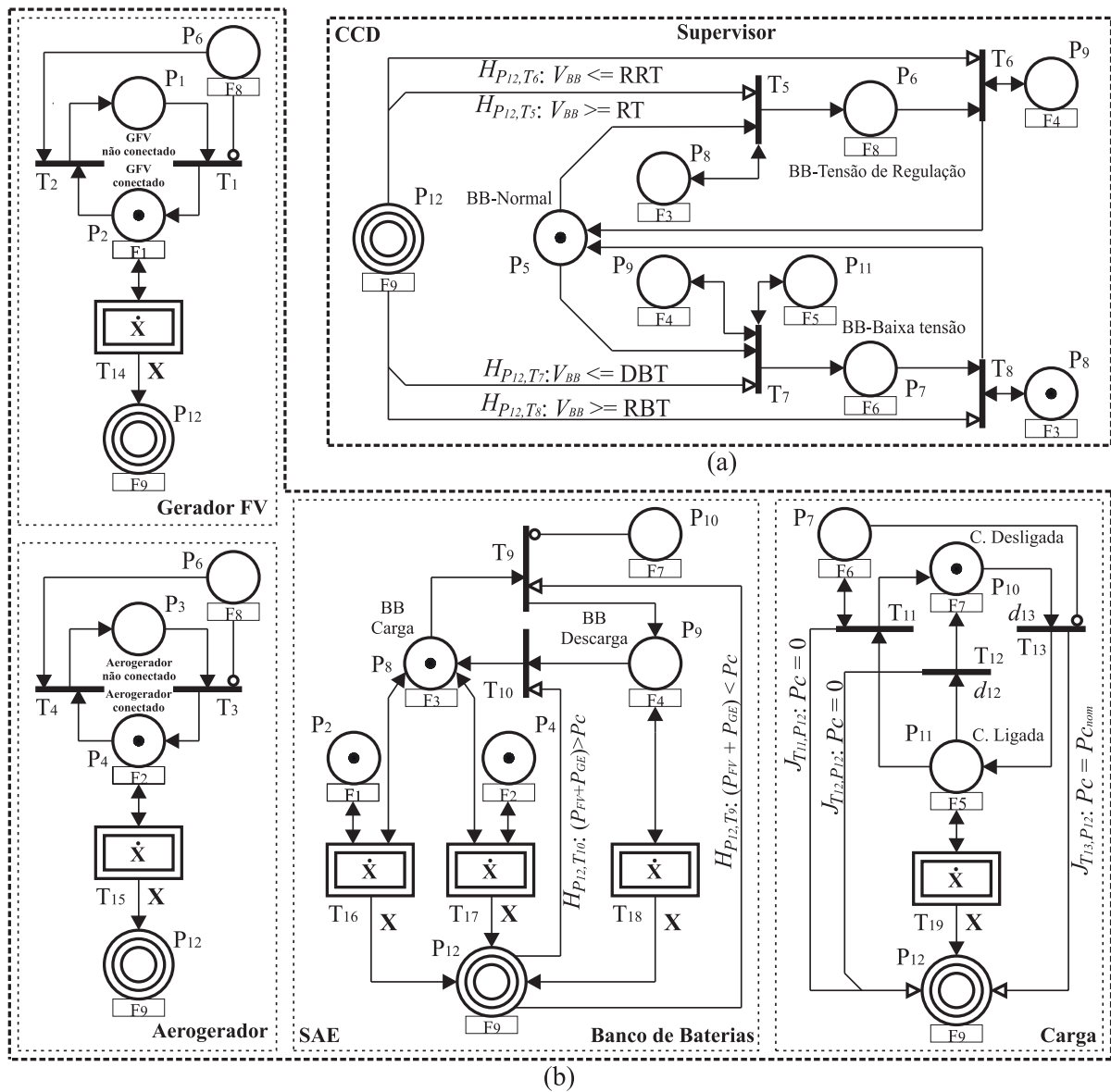


Figura 6.12: Modelos RPHDs: (a) Supervisor de carga/descarga do BB e (b) SH supervisionado e controlado.

Neste exemplo pretende-se mostrar que as estratégias de operação de um SMFE podem ser traduzidas como especificações de controle supervisorio de um SH, neste caso o SMFE.

Para demonstrar como as estratégias de operação influenciam o tempo de vida do BB, dois cenários são admitidos para o SMFE.

Cenário 1: os valores limites para o CCD são os seguintes: $RT= 27$ V, $RRT= 26$ V, $DBT= 22$ V e $RBT= 24$ V.

Cenário 2: os valores limites para o CCD são os seguintes: $RT= 27$ V, $RRT= 26$ V, $DBT= 24$ V e $RBT= 25$ V.

A diferença entre os dois cenários deve-se aos diferentes valores de tensão para os limites do CCD para: desconexão por baixa tensão (DBT) e reconexão por baixa tensão (RBT). O supervisor leva em conta quatro limites de tensão: RT, RRT, DBT e RBT. Os limites RT e RBT são utilizados para supervisionar a elevação do valor da tensão do BB (V_{BB}), enquanto que os limites DBT e RRT, são utilizados para supervisionar a redução do valor de V_{BB} . Entretanto, devido as características de operação da carga deste exemplo, os limites RT e RRT não são utilizados pelo supervisor.

Nas Figuras 6.13 e 6.14 são mostrados os resultados de simulação para os dois cenários, neste caso, as variáveis contínuas corrente e tensão do BB.

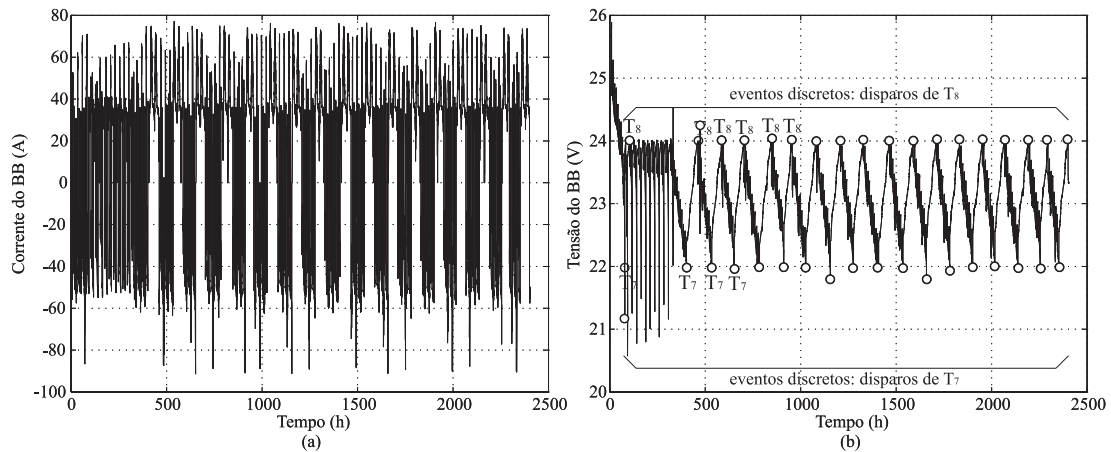


Figura 6.13: Resultados de simulação: evoluções no tempo de I_{BB} e V_{BB} . (a) e (b) para o cenário 1; e (c) e (d) para o cenário 2. Cada (o) indica a ocorrência de um, ou mais, eventos discretos.

Com relação às Figuras 6.13 (b) e 6.14 (b) e considerando um estado discreto em que o valor de V_{BB} está diminuindo, a ocorrência do evento discreto T_7 depende da função de habilitação $H_{P_{12}, T_7} : V_{BB} \leq DBT$ ser verdadeira, o que resulta na marcação $M_{D_{SH}} = [\dots, (P_7) = 1, \dots]^T$. A partir desta marcação discreta a dinâmica contínua do SH é modificada, neste caso o desligamento da carga através da ocorrência do evento discreto T_{11} . Além disso, com o desligamento da carga, ocorre também o evento discreto T_{10} , o BB entra no estado de carga. A nova dinâmica contínua do SH passa a ser: carga desligada e

BB em carga (transições diferenciais T_{16} e T_{17} habilitadas). Esta nova dinâmica contínua é representada graficamente através da elevação do valor de V_{BB} .

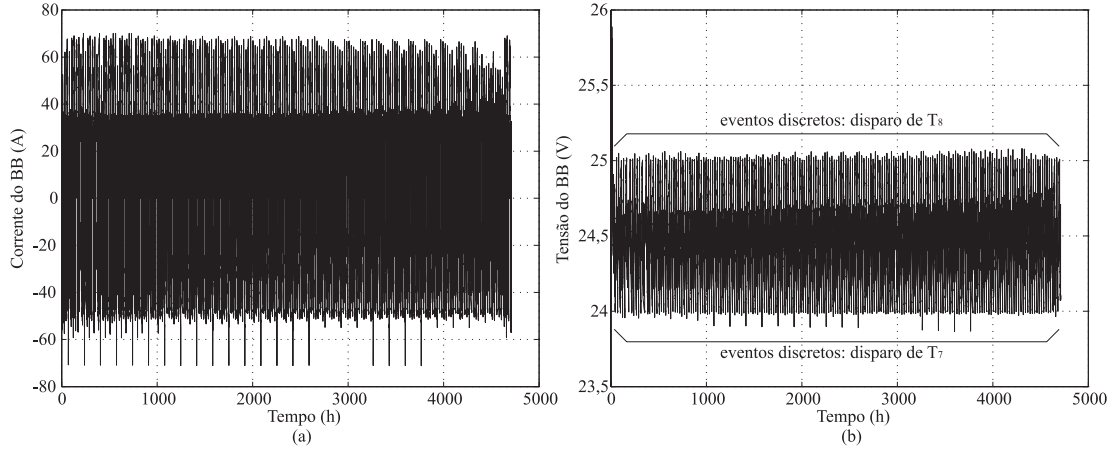


Figura 6.14: Resultados de simulação: evoluções no tempo de I_{BB} e V_{BB} . (a) e (b) para o cenário 1; e (c) e (d) para o cenário 2. Cada (o) indica a ocorrência de um, ou mais, eventos discretos.

Por outro lado, quando o valor de V_{BB} está aumentando, a ocorrência do evento discreto T_8 depende da função de habilitação $H_{P_{12}, T_8} : V_{BB} \geq \text{RBT}$ ser verdadeira, o que resulta na marcação $M_{D_{SH}} = [\dots, (P_7) = 0, \dots]^T$. Com esta marcação discreta a dinâmica contínua do SH é modificada, o que resulta na ligação da carga através da ocorrência do evento discreto T_{13} . Além disso, com a ligação da carga, e dependendo da potência gerada pelas fontes FV e eólica, pode ocorrer o evento T_9 e o BB entra no estado de descarga. A nova dinâmica contínua do SH passa a ser: carga ligada e BB em descarga (transições diferenciais T_{18} e T_{19} habilitadas). Esta nova dinâmica contínua é representada graficamente através da redução do valor de V_{BB} .

Na simulação de cada cenário foi observado o seguinte:

- Cenário 1: com 777 estados discretos e ocorrência de 776 eventos discretos.
- Cenário 2: com 1983 estados discretos e ocorrência de 1982 eventos discretos.

Na Tabela 6.8, são mostrados os valores finais dos principais parâmetros de cada bateria do BB para cada cenário. Os tempos de vida do BB são mostrados na última coluna.

Os resultados mostrados na Tabela 6.8 e nas Figuras 6.13 e 6.14 permitem concluir o seguinte: para o cenário 1, como a faixa de tensão determinada pelos limites DBT e RBT

Tabela 6.8: Resultados de simulação: valores finais dos parâmetros de cada bateria do BB.

Cenário	$U(V)$	$SoC(\%)$	$\rho_c(\Omega Ah)$	$\rho_d(\Omega Ah)$	$Z_N(\text{ciclos})$	$Z_W(\text{ciclos})$	C_{corr}	C_{deg}	C_d	T. Vida (h)
1	23,32	-60,57	0,7554	1,0344	36,52	802,26	0,3354	0,6152	0,7994	2404
2	24,11	18,75	0,5542	0,8332	63,03	856,50	0,1342	0,8158	0,8000	4710

é de 2 V, o tempo de desligamento da carga e, conseqüentemente, o tempo em flutuação do BB é maior do que para o cenário 2, no qual a faixa de tensão é de 1 V. Portanto, esse tempo em flutuação provoca uma perda maior de capacidade por corrosão e um tempo de vida menor. Os parâmetros Z_N e Z_W também confirmam esta condição. No cenário 2, a quantidade de ciclos executada é maior do que no cenário 1.

Na Figura 6.15 são mostrados os resultados de simulação para os dois cenários, neste caso, as evoluções no tempo de C_d para cada bateria do BB.

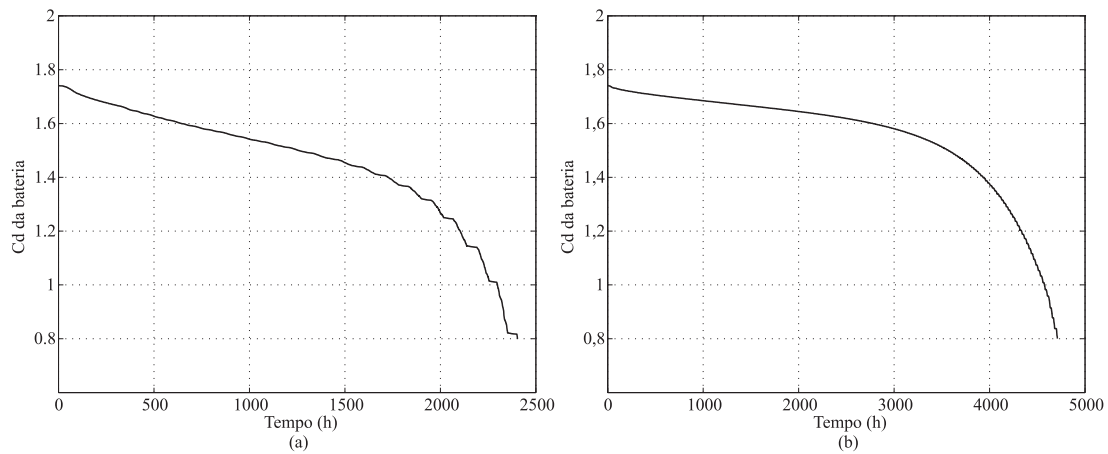


Figura 6.15: Resultados de simulação: evoluções no tempo de C_d . (a) para o cenário 1 e (b) para o cenário 2.

Os resultados obtidos neste exemplo demonstram que, a utilização das RPHDs como ferramenta de modelagem e de supervisão de um SMFE modelado como um SH, permite analisar o desempenho e, principalmente, avaliar o tempo de vida de BBs utilizados nestes sistemas. Além disso, outros cenários representativos podem ser utilizados. Para tanto, não é necessário modificar todo o modelo RPHDs. As modificações podem ser feitas com relação a cada uma das dinâmicas do SH. Para definir uma nova especificação para o supervisor (perfil de operação), é necessário alterar a estrutura ou os parâmetros do modelo RPHDs.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo descrevem-se brevemente os pontos abordados e as principais contribuições desta tese. Além disso, apresentam-se algumas perspectivas de extensão dos resultados obtidos neste trabalho.

7.1 Conclusões e Contribuições

Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia (SMFEs), normalmente por razões econômicas, utilizam sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias chumbo-ácido. Entretanto, baterias chumbo-ácido têm o desempenho e o tempo de vida diretamente relacionado com o número de ciclos de carga e descarga a que elas são submetidas, temperatura de operação, tempo com baixo estado de carga, carga incompleta, sulfatação e estratificação do eletrólito.

Além disso, bancos de baterias chumbo-ácido apresentam custo elevado e tempo de vida reduzido quando comparados com os outros componentes de um SMFE. Portanto, prever o tempo de vida destes bancos de baterias permite avaliar a viabilidade técnica e econômica de SMFEs.

Esta tese tratou da aplicação dos conceitos de Sistemas Híbridos (SHs) no estudo de SMFEs. Os SMFEs exibem interações entre as dinâmicas contínua e a eventos discretos. Estas interações são fundamentais durante as etapas de projeto e operação desses sistemas. Portanto, SEs são uma classe de SHs.

Para modelar, supervisionar e simular os SMFEs no contexto de SHs, foram apresentadas as Redes de Petri Híbridas Diferenciais. A utilização destas RPs, possibilita explicitar e enfatizar as interações entre as dinâmicas de um SH. O processo de cálculo da dinâmica contínua é realizado, de forma implícita, ao modelo que representa a dinâmica a eventos discretos.

Os resultados obtidos indicam que o estudo dos SMFEs, no contexto dos SHs possibilita:

- Modelar a dinâmica a eventos discretos levando em conta a influência dos diversos parâmetros contínuos de um SMFE;
- Modelar a dinâmica contínua levando em conta os diversos eventos discretos que podem ocorrer num SMFE;
- Representar o funcionamento de um SMFE graficamente e matematicamente dentro de um novo contexto formal;
- Realizar a simulação de um SMFE dentro de um novo contexto de modelagem;
- Realizar a síntese de supervisores para estes sistemas.

Portanto, pretende-se estudar os SMFEs através da utilização de métodos que levam em conta as interações entre suas dinâmicas, auxiliando os projetistas destes sistemas durante as fases de especificação, desenvolvimento e projeto. Em resumo, SMFEs com perfis de operação diferentes, dependendo da complexidade do sistema e da estratégia de operação, podem ser analisados com respeito ao desempenho e tempo de vida do sistema de armazenamento de energia.

Desta forma, é possível projetar e dimensionar SMFEs levando em conta o impacto das condições e das estratégias de operação. Além disso, as especificações de operação podem ser implementadas e verificadas de maneira formal, o que resulta na redução do tempo de projeto, bem como da necessidade de reprojeter estes sistemas.

De forma breve, pode-se dizer que as principais contribuições desta tese são:

- A caracterização dos SMFEs com uma classe de SHs;
- A apresentação de um formalismo para modelar, supervisionar e simular SHs;

- A aplicação deste formalismo na modelagem e simulação de SMFEs;
- A aplicação deste formalismo na síntese de supervisores de SHs, especificamente, supervisão e controle do sistema de armazenamento de energia de SMFEs; e
- A apresentação de uma metodologia para projetar, dimensionar e especificar os SMFEs de maneira formal.

Além disso, durante a realização deste trabalho, participou-se ativamente do estudo de gerenciamento dinâmico de energia em rede de sensores sem fio, especificamente na definição do modelo de baterias a ser utilizado para representar a dinâmica contínua de um nó sensor. Por outro lado, os estados de operação de um nó sensor representam a dinâmica a eventos discretos. Para tanto, as Redes de Petri Híbridas Diferenciais foram aplicadas na modelagem e simulação do consumo de energia de nós sensores sem fio.

Estas contribuições foram apresentadas à comunidade científica através das publicações relacionadas no Apêndice D.

7.2 Trabalhos Futuros

De uma forma geral, o estágio atual do trabalho exige os seguintes trabalhos futuros:

- Pretende-se pesquisar e utilizar um modelo dinâmico de baterias que leve em conta o aumento e a redução da sulfatação em baterias chumbo-ácido. Assim, a utilização de métodos de carga pulsada como alternativa para melhorar a recarga de BBs em SMFEs poderá ser estudada. Existe também a possibilidade integrar este tipo de modelo ao modelo de tempo de vida utilizado nesta tese;
- Pretende-se estender os resultados obtidos nesta tese através da utilização de modelos RPHDs de SMFEs com outras configurações. Estas podem incluir uma diversidade maior de fontes de energia, vários tipos de sistemas de armazenamento de energia e outras estratégias de controle para os controladores de carga/descarga de BBs;
- Realizar a análise de desempenho e de tempo de vida de sistemas de armazenamento de energia de um SMFE através de verificação formal. Para isso, é necessário resolver, por

exemplo, o problema de como verificar formalmente SHs não lineares e com dinâmica contínua de ordem elevada;

- Existe também a perspectiva de pesquisar métodos de conversão dos modelos RPHDs de supervisão e controle de SMFEs, em códigos para implementação em microcontroladores ou em CLPs. Espera-se desta forma contribuir para a melhoria dos projetos de equipamentos de supervisão e controle destes sistemas.

Apêndice A

Complemento do modelo RPHDs

Neste Apêndice, são apresentados o conjunto de marcações discretas (veja Tabela A.1) e o grafo de alcançabilidade (veja Tabela A.2) discreto do modelo RPHD para o SMFE estudado no Capítulo 6. Note que o modelo discreto da RPHD é limitado (seguro) e vivo (ausência de bloqueios). Na representação do grafo de alcançabilidade é utilizada a seguinte notação:

$$\text{Estado}_{\text{atual}} \rightarrow \text{Transição}_j / \text{Estado}_{\text{sucessor}_1}, \text{Transição}_j[\text{Atraso}_j] / \text{Estado}_{\text{sucessor}_2}, \dots$$

A.1 Conjunto de Marcações Discretas do modelo RPHD utilizado no Capítulo 6

Tabela A.1: Conjunto de marcações discretas do modelo RPHD estudado no Capítulo 6.

$M_{D_0} = [0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{24}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$
$M_{D_1} = [0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{25}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$
$M_{D_2} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{26}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$
$M_{D_3} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{27}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$
$M_{D_4} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{28}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$
$M_{D_5} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{29}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$
$M_{D_6} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{30}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$
$M_{D_7} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{31}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$
$M_{D_8} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{32}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$
$M_{D_9} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{33}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{10}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{34}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$
$M_{D_{11}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{35}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{12}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{36}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{13}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{37}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$
$M_{D_{14}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{38}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$
$M_{D_{15}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{39}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{16}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{40}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{17}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{41}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{18}} = [0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{42}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$
$M_{D_{19}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{43}} = [1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$
$M_{D_{20}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{44}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{21}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{45}} = [1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$
$M_{D_{22}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]^T$	$M_{D_{46}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]^T$
$M_{D_{23}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0]^T$	$M_{D_{47}} = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0]^T$

A.2 Grafo de Alcançabilidade Discreto do modelo RPHD utilizado no Capítulo 6

Tabela A.2: Grafo de alcançabilidade discreto do modelo RPHD estudado no Capítulo 6.

$M_{D_0} \rightarrow T_{13}[d_{13}]/1, T_5/3$	$M_{D_{24}} \rightarrow T_{10}/23$
$M_{D_1} \rightarrow T_{12}[d_{12}]/0, T_5/2, T_9/19$	$M_{D_{25}} \rightarrow T_{10}/26, T_{11}/28, T_{12}[d_{12}]/28, T_3/21$
$M_{D_2} \rightarrow T_{12}[d_{12}]/3, T_2/5, T_4/14, T_9/46$	$M_{D_{26}} \rightarrow T_{11}/27, T_{12}[d_{12}]/27, T_3/22, T_8/13, T_9/25$
$M_{D_3} \rightarrow T_{13}[d_{13}]/2, T_2/4, T_4/15$	$M_{D_{27}} \rightarrow T_3/23, T_8/12$
$M_{D_4} \rightarrow T_{13}[d_{13}]/5, T_4/7$	$M_{D_{28}} \rightarrow T_{10}/27, T_3/24$
$M_{D_5} \rightarrow T_{12}[d_{12}]/4, T_4/6, T_9/44$	$M_{D_{29}} \rightarrow T_1/12, T_{13}[d_{13}]/30, T_3/32, T_5/7$
$M_{D_6} \rightarrow T_{12}[d_{12}]/7, T_9/8$	$M_{D_{30}} \rightarrow T_1/13, T_{12}[d_{12}]/29, T_3/31, T_5/6, T_9/39$
$M_{D_7} \rightarrow T_{13}[d_{13}]/6$	$M_{D_{31}} \rightarrow T_1/1, T_{12}[d_{12}]/32, T_5/5, T_9/33$
$M_{D_8} \rightarrow T_{10}/6, T_{12}[d_{12}]/9, T_6/39$	$M_{D_{32}} \rightarrow T_1/0, T_{13}[d_{13}]/31, T_5/4$
$M_{D_9} \rightarrow T_{10}/7, T_{13}[d_{13}]/8, T_6/10$	$M_{D_{33}} \rightarrow T_1/19, T_{10}/31, T_{12}[d_{12}]/34, T_7/35$
$M_{D_{10}} \rightarrow T_1/11, T_{10}/29, T_{13}[d_{13}]/39, T_3/34$	$M_{D_{34}} \rightarrow T_1/20, T_{10}/32, T_{13}[d_{13}]/33$
$M_{D_{11}} \rightarrow T_{10}/12, T_{13}[d_{13}]/18, T_3/20$	$M_{D_{35}} \rightarrow T_1/21, T_{10}/36, T_{11}/38, T_{12}[d_{12}]/38$
$M_{D_{12}} \rightarrow T_{13}[d_{13}]/13, T_3/0, T_5/15$	$M_{D_{36}} \rightarrow T_1/22, T_{11}/37, T_{12}[d_{12}]/37, T_8/31, T_9/35$
$M_{D_{13}} \rightarrow T_{12}[d_{12}]/12, T_3/1, T_5/14, T_9/18$	$M_{D_{37}} \rightarrow T_1/23, T_8/32$
$M_{D_{14}} \rightarrow T_{12}/15, T_2/6, T_9/16$	$M_{D_{38}} \rightarrow T_1/24, T_{10}/37$
$M_{D_{15}} \rightarrow T_{13}[d_{13}]/14, T_2/7$	$M_{D_{39}} \rightarrow T_1/18, T_{10}/30, T_{12}[d_{12}]/10, T_3/33, T_7/40$
$M_{D_{16}} \rightarrow T_{10}/14, T_{12}[d_{12}]/17, T_2/8, T_6/18$	$M_{D_{40}} \rightarrow T_1/25, T_{10}/41, T_{11}/43, T_{12}[d_{12}]/43, T_3/35$
$M_{D_{17}} \rightarrow T_{10}/15, T_{13}[d_{13}]/16, T_2/9, T_6/11$	$M_{D_{41}} \rightarrow T_1/26, T_{11}/42, T_{12}[d_{12}]/42, T_3/36, T_8/30, T_9/40$
$M_{D_{18}} \rightarrow T_{10}/13, T_{12}[d_{12}]/11, T_3/19, T_7/25$	$M_{D_{42}} \rightarrow T_1/27, T_3/37, T_8/29$
$M_{D_{19}} \rightarrow T_{10}/1, T_{12}[d_{12}]/20, T_7/21$	$M_{D_{43}} \rightarrow T_1/28, T_{10}/42, T_3/38$
$M_{D_{20}} \rightarrow T_{10}/0, T_{13}[d_{13}]/19$	$M_{D_{44}} \rightarrow T_{10}/5, T_{12}[d_{12}]/45, T_4/8, T_6/33$
$M_{D_{21}} \rightarrow T_{10}/22, T_{11}/24, T_{12}[d_{12}]/24$	$M_{D_{45}} \rightarrow T_{10}/4, T_{13}[d_{13}]/44, T_4/9, T_6/34$
$M_{D_{22}} \rightarrow T_{11}/23, T_{12}[d_{12}]/23, T_8/1, T_9/21$	$M_{D_{46}} \rightarrow T_{10}/2, T_{12}[d_{12}]/47, T_2/44, T_4/16, T_6/19$
$M_{D_{23}} \rightarrow T_8/0$	$M_{D_{47}} \rightarrow T_{10}/3, T_{13}[d_{13}]/46, T_2/45, T_4/17, T_6/20$

Apêndice B

Componentes de SMFEs

B.1 Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico da indústria de eletrônica de potência nas últimas décadas e com a diminuição no custo dos equipamentos utilizados para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, os SMFEs tornaram-se uma alternativa atrativa tanto do ponto de vista técnico como econômico. Tendo em vista este cenário, surge a necessidade de se aprofundar os estudos relacionados à operação destes sistemas, a fim de se determinar quais as melhores estratégias para torná-los tecnicamente mais confiáveis e economicamente mais atrativos (Blasques, 2005).

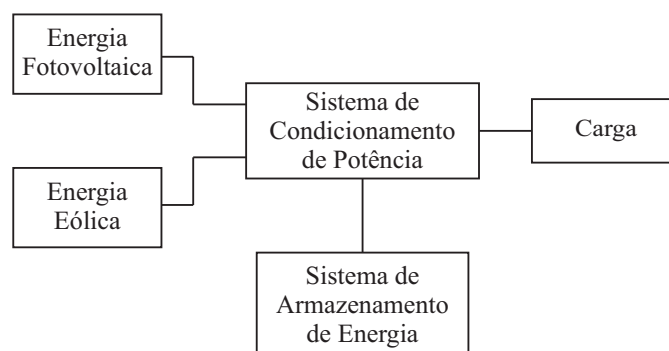


Figura B.1: Estrutura básica de um SMFE isolado.

Neste apêndice são apresentadas as principais características dos subsistemas que compõem os SMFEs. É importante ressaltar que, neste trabalho, não são discutidos detalhes

relativos a levantamento e a análise estatística dos recursos renováveis de fontes fotovoltaica e eólica.

B.2 Energia Fotovoltaica

O aproveitamento da energia solar para produção direta de eletricidade teve início há pouco mais de 160 anos quando, em 1839, o cientista francês Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico (FV) ao observar, num experimento com uma célula eletrolítica (dois eletrodos metálicos dispostos em uma solução condutora), que a geração de eletricidade aumentava quando a célula era exposta à luz. A partir daí, foram estudados os comportamentos de diversos materiais expostos à luz até que, no ano de 1954, Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson desenvolverem a primeira célula FV de silício, com eficiência de 6%, capaz de converter energia solar em eletricidade suficiente para alimentar equipamentos elétricos. No ano de 1958, iniciou-se a utilização de células FV em aplicações espaciais, e até hoje essa fonte é reconhecida como a mais adequada para estas aplicações (Blasques, 2005).

Ao penetrar na atmosfera, uma parte da radiação solar atinge diretamente a superfície coletora, sem sofrer qualquer influência, sendo chamada de *radiação direta*. Outra parte é absorvida e/ou espalhada por partículas em suspensão, como moléculas de ar e gotículas de água. Da parcela espalhada, a que atinge a superfície coletora é chamada de *radiação difusa*. Finalmente, a última parcela da radiação passível de aproveitamento é aquela que incide na superfície após ser refletida pelo solo, chamada de *albedo*. Na Figura B.2, são mostradas as diversas formas de decomposição da radiação emitida pelo Sol. A soma das parcelas direta e difusa da radiação e o albedo, é denominada de *radiação global* (Blasques, 2005).

Geralmente, define-se como potência por unidade de área o termo *irradiância solar* (W/m^2) e como energia por unidade área o termo *irradiação solar* (Wh/m^2). Uma outra forma de representar a radiação incidente no intervalo de um dia é através do conceito de horas de sol pleno (HSP), o qual representa a energia total fornecida durante um dia, normalizada em relação ao valor de irradiância de $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$. Como exemplo, caso um determinado local apresente irradiação diária total de $6.000 \text{ Wh}/\text{m}^2$, o número de horas de sol pleno é obtido dividindo-se esse valor por $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$, resultando em $\text{HSP} = 6 \text{ h}$ (Blasques, 2005).

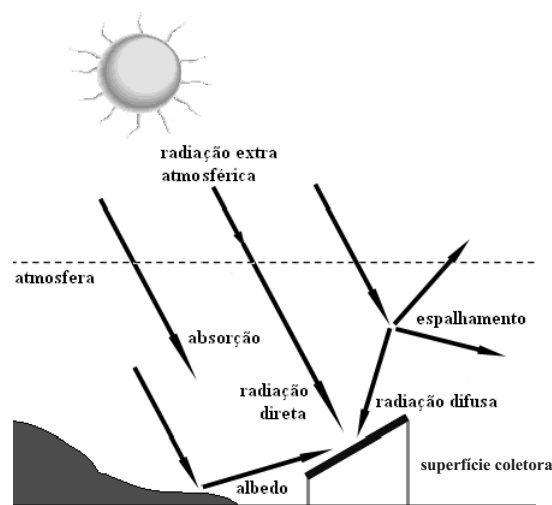


Figura B.2: Decomposição da radiação solar (Blasques, 2005).

Atualmente utiliza-se a energia FV nas mais diversas áreas com o objetivo de geração de energia elétrica aliada as seguintes vantagens: simplicidade de instalação, facilidade de expansão, elevado grau de confiabilidade do sistema, redução das perdas por transmissão de energia devido à proximidade entre geração e consumidores, e pouca necessidade de manutenção. Além disso, os sistemas FV são fontes silenciosas e não poluentes de geração de energia elétrica (Blasques, 2005).

Célula Fotovoltaica

O dispositivo responsável pela conversão da luz incidente em eletricidade é denominado de célula FV. Os materiais empregados na sua construção são elementos semicondutores, sendo, em escala comercial, a maioria fabricada de silício (Si), devido a três fatores principais: o silício não é tóxico, é o segundo elemento mais abundante na natureza (o primeiro é o oxigênio (O)), e possui uma tecnologia consolidada devido à sua utilização predominante no ramo da microeletrônica.

Os átomos de silício caracterizam-se por possuírem quatro elétrons na camada de valência, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons na camada de valência, como o fósforo ou arsênio, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará fracamente ligado a seu átomo de origem. Portanto, com pouca energia térmica (0,02 eV), este elétron pode ir para a banda de condução. Diz-

se assim, que o fósforo é um elemento dopante doador de elétrons ou um dopante tipo n (Macêdo, 2002).

Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons na camada de valência, como é o caso do boro ou índio, haverá a falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada *buraco* ou *lacuna* e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um átomo vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante tipo p .

Numa placa, com um filme fino de silício puro, dopa-se metade com boro (B) e a outra metade com fósforo (P), formando o que se conhece por junção pn . Nesta, elétrons livres do lado n passam para o lado p , onde são capturados por lacunas. Isso gera um acúmulo de elétrons no lado p , tornando-o carregado negativamente e uma redução de elétrons do lado n , tornando-o carregado positivamente. Estas cargas geram um campo elétrico permanente que serve de barreira à passagem de mais elétrons do lado n para o lado p . O processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico é capaz de barrar todos os elétrons restantes do lado n . A tensão total desta junção é em torno de 0,7 V e é chamada tensão de difusão. Na Figura B.3, é mostrado um esquema simplificado de uma célula FV.

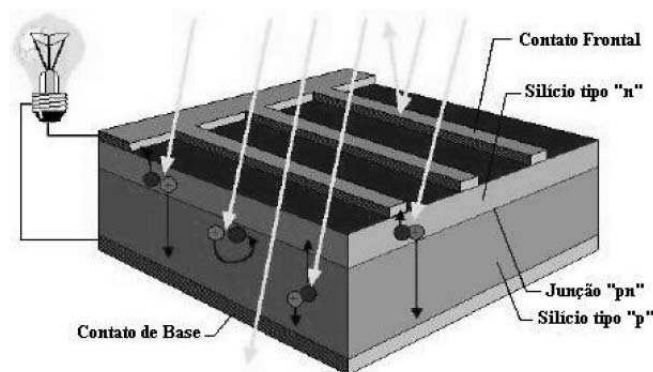


Figura B.3: Esquema simplificado de uma célula FV (Macêdo, 2002).

Quando uma junção pn é exposta à luz solar ocorre a absorção de fótons, fazendo com que os elétrons se desloquem da banda de valência para a banda de condução, ou seja, pares *elétron-lacuna* são gerados, acelerando as cargas e dando origem a uma corrente elétrica pela junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial e é chamado

efeito fotovoltaico, o qual é a base para o funcionamento dos painéis FV.

Tipos de Células

As células FV são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

O silício monocristalino não é o único material usado em células FV. O silício policristalino também é usado na tentativa de cortar os custos de fabricação, embora as células resultantes não sejam tão eficazes como o silício monocristalino. Silício amorfo, que não tem a estrutura cristalina, também é usado, novamente na tentativa de reduzir os custos de produção. Outros materiais usados incluem arsenieto de gálio, di-seleneto de cobre e índio, e telureto de cádmio (Castro, 2007).

Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica

Existem vários modelos para células FV, dentre os quais pode-se citar: o *modelo com um diodo* (Castro, 2007; Gergaud et al., 2002), o *modelo com dois diodos* (Gergaud et al., 2002) e o *modelo polinomial* (Gergaud et al., 2002). Neste trabalho, é utilizado o *modelo com um diodo* para modelar uma célula FV. Este modelo é apresentado a seguir.

O modelo elétrico de uma célula FV pode ser representado como ilustra a Figura B.4. A fonte de corrente I_s representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa incidente sobre a superfície ativa da célula; esta corrente unidirecional é constante para uma dada radiação incidente. Como a célula é composta por silício, a célula se comportará como um diodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_d , que depende da tensão V nos terminais da célula. Sendo R_s a resistência série resultante dos metais de contato com a carga (fingers) e R_p é a resistência paralela inerentes à própria junção pn que constitui a célula FV.

A corrente I é dada por:

$$I = I_s - I_d - I_p \quad (\text{B.1})$$

onde

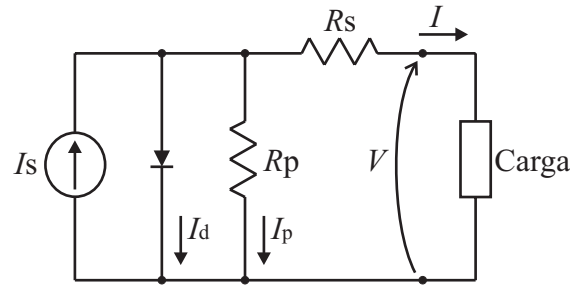


Figura B.4: Modelo elétrico de uma célula FV (Castro, 2007).

- I_s é a corrente FV gerada. Calculada a partir de

$$I_s = I_{sr} \frac{G}{G^r}$$

onde

- I_{sr} é a corrente elétrica gerada pela célula FV nas condições de referência;
- G é a irradiância incidente sobre a célula FV; e
- G^r é a irradiância de referência, $G^r = 1000 \text{ W/m}^2$;

- I_d é a corrente que passa pelo diodo; e
- I_p é a corrente que passa pela resistência paralela.

A corrente que passa através do diodo é dada por:

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V + R_s I}{m V_t}} - 1 \right) \quad (\text{B.2})$$

onde

- I_o é a corrente reversa máxima de saturação do diodo;
- V é a tensão nos terminais da célula FV;
- m é o fator de idealidade do diodo;
- V_t é o potencial térmico, dado por

$$V_t = \frac{k T_C}{q}$$

onde

- k é a constante de Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/°K);
- T_C é a temperatura da célula em °K;
- q é a carga do elétron ($q = 1,6 \times 10^{-19}$ C).
- R_s é a resistência parasita série.

A corrente que passa através da resistência parasita paralela R_p é dada por:

$$I_p = \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{B.3}$$

Com as equações mostradas anteriormente, pode-se formar a equação que descreve a corrente que uma célula FV fornece a uma carga, substituindo as Equações B.2 e B.3 na Equação B.1. Tem-se

$$I = I_s - I_o \left(e^{\frac{V + R_s I}{m V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{B.4}$$

A Equação B.4 é uma equação transcendental, implícita em I , a qual deve ser resolvida através de um método iterativo. A potência elétrica fornecida por uma célula FV é dada por

$$P_C = VI \tag{B.5}$$

Na Figura B.5 é mostrado a curva I-V e a curva P-V de uma célula que possui as seguintes especificações do fabricante: $V_{max}^I = 0,4667$ V; $I_{max}^I = 4,7500$ A; $V_{ca}^I = 0,5833$ V; $I_{cc}^I = 5,1700$ A. Os valores de R_s e R_p foram obtidos experimentalmente e têm os seguintes valores: $R_s = 0,012 \Omega$ e $R_p = 40 \Omega$.

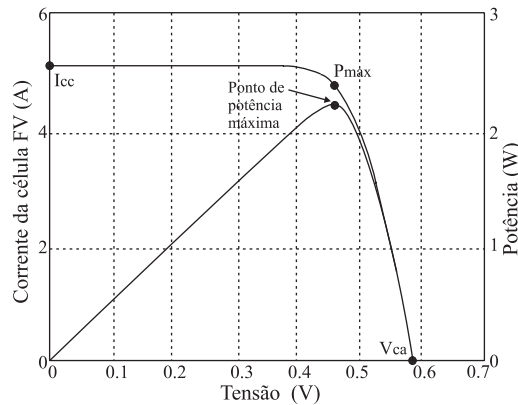


Figura B.5: Curva I-V e P-V de uma célula FV (Castro, 2007).

Influência da irradiância solar e da temperatura

A variação de temperatura numa célula FV produz o seguinte:

- A potência de saída decresce com o aumento da temperatura;
- A tensão de circuito aberto decresce com a temperatura (aproximadamente $2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$);
- A corrente de curto-circuito varia muito pouco com a temperatura, sendo esta variação, normalmente, desprezada nos cálculos.

No que diz respeito à variação da irradiância solar incidente sobre a célula, observa-se é o seguinte:

- A potência de saída aumenta com o aumento da irradiância solar incidente;
- A corrente de curto-circuito varia linearmente com a irradiância solar incidente;
- A tensão de circuito aberto varia pouco com a irradiância solar incidente, sendo esta variação, no entanto, mais importante para valores baixos de radiação solar incidente.

Módulos e Painéis Fotovoltaicos

Devido a baixa tensão e corrente de saída que uma célula FV pode fornecer, é necessário agrupar várias células formando um módulo. O arranjo das células num módulo pode ser feito conectando-as em série e/ou em paralelo (Castro, 2007). Por exemplo, o módulo FV mostrado na Figura B.6, é composto de NC_P ramos em paralelo, cada ramo com NC_S células em série.

A quantidade de energia produzida por um módulo FV e fornecida à carga depende de diversos fatores, sendo que os mais importantes são a irradiância solar (G) e a temperatura de operação das células (T). Outros fatores como o acoplamento entre o módulo e a carga, perdas por dispersão e a massa de ar atmosférico (AM) que absorve parte do espectro solar¹ também são fatores que devem ser considerados (Oliveira, 2005).

¹Causado pela presença de poeira suspensa no ar, poluição e vapor d'água. Esses agentes impedem que a massa de ar ideal na superfície terrestre seja alcançada, ou seja, igual a $AM=1$.

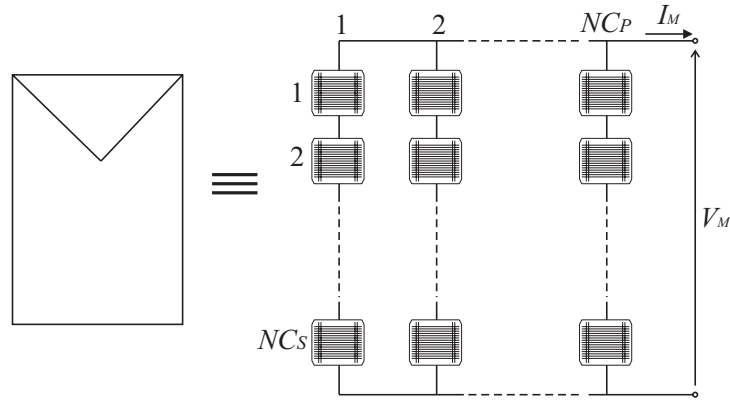


Figura B.6: Estrutura básica de um módulo FV composto de $NC_P \times NC_S$ células.

Por conta da variação da irradiância solar ao longo do dia e devido ao movimento de nuvens e período do dia, algoritmos são utilizados para maximizar a potência gerada por um painel FV. Estes algoritmos são denominados *Seguidores do Ponto de Máxima Potência - SPMP* e são apresentados na Seção B.5. No caso de uma célula FV estar total ou parcialmente com sombra, circula por ela uma menor quantidade de corrente elétrica. Através da ligação em série no painel, a célula FV com sombra aquece, podendo danificar-se. Os *diodos bypass* são utilizados para proteger estas células FV.

Além de compor a associação de células, o módulo FV tem ainda a função de proteger as células das intempéries, isolá-la eletricamente de contatos exteriores e fornecer rigidez mecânica ao conjunto.

Geralmente, o módulo FV é composto, além das células, por pequenas tiras metálicas responsáveis por interligar as células e por fornecer contatos externos de saída; por um material encapsulante disposto diretamente sobre as células, normalmente um polímero transparente e isolante (EVA-Etileno Vinil Acetato); por um vidro temperado e anti-reflexivo para a cobertura frontal; uma cobertura posterior, normalmente feita em polifluoreto de vinila; uma caixa de conexões localizada na parte posterior do módulo; e uma estrutura metálica que sustenta todo o equipamento (Blasques, 2005). A potência elétrica fornecida por um módulo FV é dada por

$$P_M = V_M I_M = (NC_S \times V)(NC_P \times I) \quad (\text{B.6})$$

Com o objetivo de obter um valor maior de potência, os módulos em sistemas FV são, normalmente, conectados na forma de um painel. A Figura B.7 ilustra o caso de um painel

com NM_P ramos em paralelo, cada ramo com NM_S módulos em série.

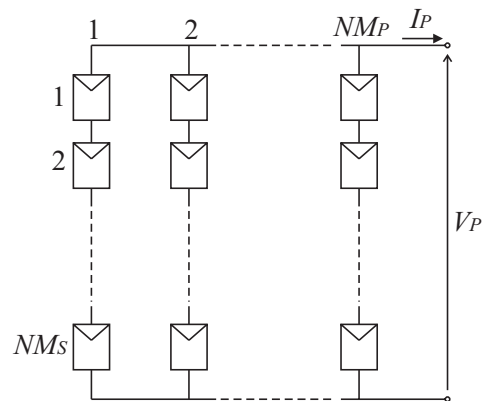


Figura B.7: Estrutura básica de um painel FV composto de $NM_P \times NM_S$ módulos.

A potência elétrica fornecida por um painel FV é dada por

$$P_P = V_P I_P = (NM_S \times V_M)(NM_P \times I_M) \quad (\text{B.7})$$

Na Figura B.8 é mostrado um painel FV em operação.



Figura B.8: Painel FV em operação.

O leitor poderá encontrar mais detalhes sobre sistemas FV de energia em (Hansen et al., 2000; Murillo, 2003; Roseback, 2004; Oliveira, 2005; Messenger e Ventre, 2005; Castro, 2007).

B.3 Energia Eólica

O vento é o resultado do movimento de massas de ar ao redor da superfície da Terra, provocado por diferenças de temperatura e pressão. A energia mecânica dessas massas de ar constitui uma imensa fonte de energia natural, que pode ser transformada em energia elétrica através dos geradores eólicos ou turbinas eólicas. Semelhante à tecnologia FV, a tecnologia eólica pode ser usada para qualquer aplicação elétrica em áreas que tenham bons regimes de vento, seja de maneira isolada ou conectada à rede elétrica local. No cenário mundial, a tecnologia eólica atingiu um estágio de maturidade que a coloca como participante da matriz energética em vários países onde o recurso natural é disponível, com previsão de vir a ter participação expressiva na matriz mundial nas próximas décadas (Macêdo, 2002).

Aplicações de energia eólica são verificadas no mundo há milhares de anos, em moinhos de vento para moagem de grãos e bombeamento de água, embarcações à vela, etc. Mais recentemente, no fim do século XIX, surgiu a primeira aplicação de energia eólica para produção direta de eletricidade, através do advento da primeira turbina eólica, também conhecida como aerogerador. Após um período de pouco interesse, já no século XX, a crise do petróleo nos anos 70 despertou um maior interesse pela energia eólica, sendo introduzidas melhorias significativas nos sistemas, principalmente na aerodinâmica das pás, nos geradores elétricos e nos sistemas de comando e controle (Blasques, 2005).

O aerogerador é o componente do sistema responsável por transformar a energia cinética dos ventos em energia elétrica. As pás aerodinâmicas da turbina eólica *captam* o vento, fazendo seu eixo girar, transformando a energia cinética do vento em energia mecânica. O eixo está acoplado a um gerador elétrico, que transforma a energia mecânica em energia elétrica (Hauschild, 2006).

Turbina Eólica

Do ponto de vista formal, uma turbina eólica é constituída unicamente pelo rotor, pás e respectiva ligação mecânica de um sistema de conversão de energia do vento em energia elétrica. No entanto, a denominação anglo-saxônica “wind turbines” associa não só este componente básico, mas todo o sistema de conversão, desde as pás até à saída do gerador elétrico, incluindo mesmo os sistemas de conversão de frequência, quando existentes. Deste

modo as turbinas eólicas são as unidades fundamentais de uma central eólica e podem ser associadas à noção de *grupo gerador* de uma central convencional. Cada unidade (turbina eólica) é composta, basicamente, por um gerador elétrico ligado ao rotor da turbina (o qual converte a energia cinética do vento em energia mecânica), um sistema de transmissão, um multiplicador de velocidades em sistemas convencionais, um sistema de controle, um sistema local de compensação de energia reativa, um transformador elevador e um sistema de proteção elétrica (Rosas e Estanqueiro, 2003).

Existem duas formas fundamentais de conexão elétrica de turbinas eólicas: conexão direta e conexão através de conversores estáticos. Conexão direta caracteriza-se atualmente pelo uso de geradores assíncronos (máquinas de indução), multiplicador de velocidade e bancos de capacitores para excitação básica da máquina. As conexões com conversores estáticos, permitem uma ampla variação da velocidade no rotor, bem como uma regulação do fator de potência, podendo o gerador ser assíncrono ou síncrono. Conexão direta se caracteriza como uma conexão rígida com a rede elétrica, pois somente uma variação pequena na velocidade de rotação do eixo mecânico é permitida. Nesta forma de conexão, grande parte das flutuações do vento no rotor é transmitida à rede elétrica (Rosas e Estanqueiro, 2003).

Conexões através de conversores estáticos de potência, ou usualmente chamados de conversores de frequência, permitem uma maior flexibilidade ao sistema mecânico, diferencial esse que permite a aceleração do conjunto rotor/gerador permitindo, assim, a absorção dos picos de potência e variações bruscas de torque, que caso contrário seriam diretamente transmitidas à rede elétrica. Em contrapartida, esses conversores são fontes de emissão de componentes de harmônicas de corrente (Rosas e Estanqueiro, 2003).

Turbinas eólicas podem também ser classificadas em turbinas de eixo horizontal e de eixo vertical. Turbinas de eixo horizontal são mais comuns e, atualmente, mais desenvolvidas que as turbinas de eixo vertical. Na Figura B.9, são mostrados três tipos de aerogeradores.

Um importante parâmetro a ser analisado em uma turbina eólica é sua curva de potência, que indica a potência fornecida pela turbina em função da velocidade de vento disponível. Normalmente são considerados quatro parâmetros de importância referentes a velocidades de vento para conversão de energia eólica em eletricidade. Esses quatro parâmetros podem ser definidos através da análise da curva mostrada na Figura B.10, obtida de uma turbina de 850 kW de potência nominal (Blasques, 2005).

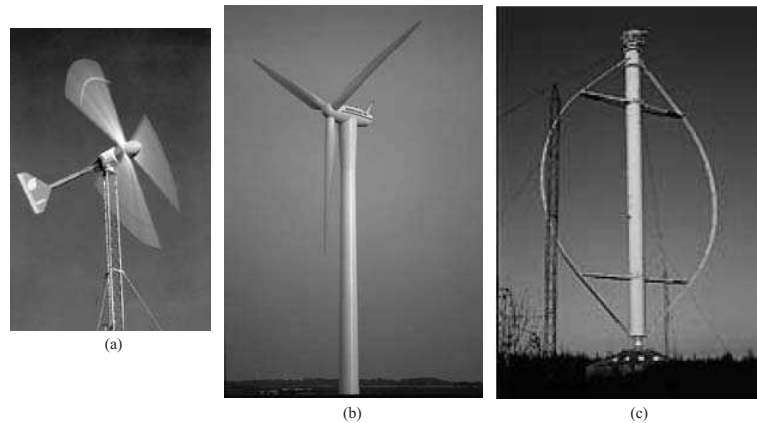


Figura B.9: Aerogeradores do tipo: (a) Eixo horizontal de 10 kW, (b) Eixo Horizontal de 1,5 MW e (c) Eixo vertical.

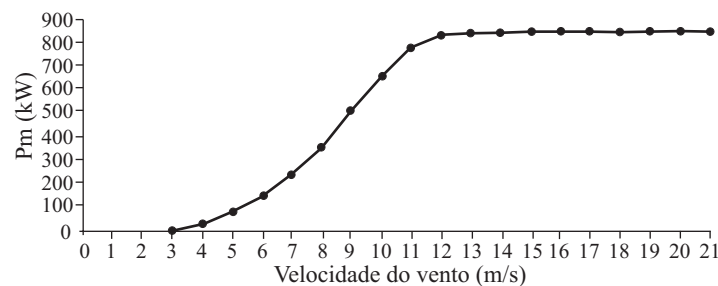


Figura B.10: Curva de potência de uma turbina eólica de 850 kW (Blasques, 2005).

A velocidade de partida (*cut-in*, $V_{v_{ci}}$) é a velocidade de vento mínima para que o rotor saia de seu estado de repouso inicial, produzindo torque mecânico e iniciando o movimento das pás e conseqüente geração de energia (3 m/s na Figura B.10); a velocidade mínima de geração é o valor mínimo de velocidade de vento no qual a geração de energia ainda é possível, sendo determinada pelas perdas na transmissão. Normalmente, é um valor de velocidade levemente inferior ao de partida; a velocidade nominal é a velocidade de vento na qual a potência nominal da turbina pode ser extraída (aproximadamente 14 m/s na Figura B.10); e a velocidade de corte (*cut-out*, $V_{v_{co}}$) é o valor de velocidade no qual a regulação atua para interromper o movimento do rotor eólico, protegendo-o contra cargas excessivamente altas e danos estruturais (21 m/s na Figura B.10).

Modelo Matemático da Turbina Eólica

A potência mecânica capturada pela turbina eólica, P_m , é dada pela seguinte equação (Tafticht, Agbossou, Chériti e Doumbia, 2006)

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A V_v^3}{2} \quad (\text{B.8})$$

onde

- C_p é o coeficiente de potência da turbina;
- ρ é densidade do ar (kg/m^3);
- A é a área de varredura da turbina (m^2);
- V_v é a velocidade do vento (m/s);
- λ (*tip speed ratio*-TSR) é razão entre a velocidade da ponta das pás e a do vento. λ é dado por

$$\lambda = \frac{r\Omega}{V_v} \quad (\text{B.9})$$

onde r é o comprimento da pá (m) e Ω é a velocidade angular do eixo (rad/s);

- β é o ângulo de ataque da pá ($^\circ$).

Uma relação típica entre C_p , λ e β é mostrada na Figura B.11. O valor máximo de C_p ($C_{p_{max}} = 0,48$) é obtido para $\beta = 0^\circ$ e $\lambda = 8,1$. Este valor particular de λ é definido como λ_{nom} . Portanto, a velocidade angular do eixo em função da velocidade do vento é dada por

$$\Omega = \frac{\lambda_{nom} V_v}{r} \quad (\text{B.10})$$

A Figura B.12 ilustra a variação da potência mecânica produzida pela turbina eólica P_m em função da velocidade do rotor da turbina Ω para diversas velocidades do vento V_v . Para cada velocidade do vento, corresponde somente um ponto de máxima potência.

A potência mecânica produzida pela turbina é dada por

$$P_m = T_m \Omega = T_m P \omega \quad (\text{B.11})$$

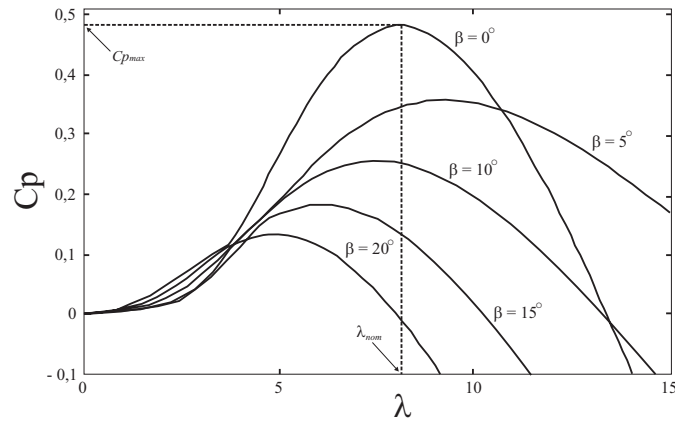


Figura B.11: C_p em função de $λ$ e $β$. $C_{p_{max}}$ ocorre quando $λ = λ_{nom}$ (Tafticht, Agbossou, Chériti e Doumbia, 2006).

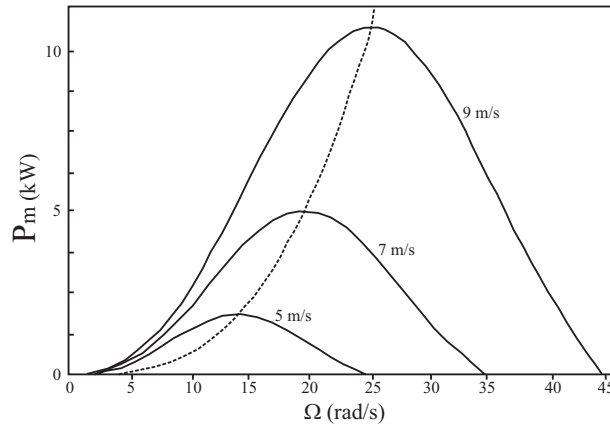


Figura B.12: P_m em função de $Ω$ e V_v (Tafticht, Agbossou, Chériti e Doumbia, 2006).

onde, T_m é o torque mecânico no lado da turbina, $ω$ é a frequência angular elétrica e P é o número de pólos do gerador elétrico. As características mecânicas da turbina eólica podem ser descritas pelas Equações B.12 e B.13 (a fricção do rotor da turbina é ignorado)

$$T_m - T_g = J \frac{dΩ}{dt} \quad (B.12)$$

$$P_m - P_g = Ω J \frac{dΩ}{dt} \quad (B.13)$$

onde, T_g é o torque da carga, J é o momento de inércia da turbina e P_g é a potência da carga.

Neste trabalho, a turbina eólica funciona em velocidade variável. Desta forma, é possível

maximizar a potência gerada pela mesma.

Modelagem Matemática do Gerador Elétrico

O sistema de geração eólica utiliza um Gerador Síncrono de Ímã Permanente (GSIP) trifásico. Este gerador é conectado ao barramento CC através de um retificador trifásico, conforme é mostrado na Figura B.13.

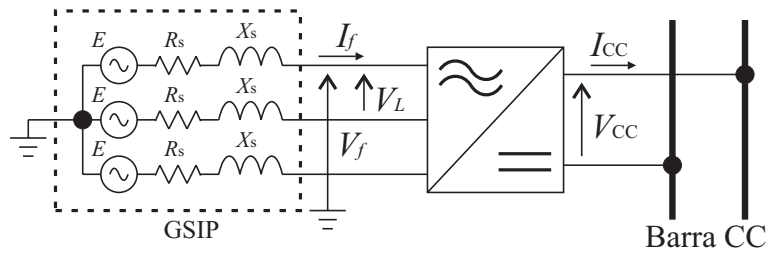


Figura B.13: Conexão entre o GSIP e o barramento CC através de um retificador trifásico.

A força eletromotriz gerada por fase E do GSIP é dada por

$$E = k\Omega = kP\omega \quad (\text{B.14})$$

onde, k é a amplitude do enlace de fluxo em (Vs) estabelecido nas bobinas de fase do gerador.

Desprezando a resistência de estator R_s , a equação da tensão por fase do GSIP é dada por

$$E^2 = V_f^2 + (\omega L_s I_f)^2 \quad (\text{B.15})$$

onde, V_f e I_f são a tensão de saída e a corrente de fase, respectivamente, a L_s é a reatância síncrona do gerador. Substituindo a Equação B.14 na Equação B.15 e reescrevendo esta última, obtém-se

$$I_f = \frac{P \sqrt{(k\Omega)^2 - V_f^2}}{L_s \Omega} \quad (\text{B.16})$$

É assumido que a potência gerada pelo GSIP é convertida em potência CC através do conversor CA-CC trifásico com fator de potência unitário e que a corrente da carga é contínua. Esta potência é dada por

$$P_t = 3V_f I_f = V_{cc} I_{cc} \quad (\text{B.17})$$

onde, V_{cc} e I_{cc} são a tensão e a corrente na saída do conversor CA-CC trifásico, respectivamente.

O valor médio de V_{cc} é dado por

$$V_{cc} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} V_{Lmax} \cos \theta d\theta = \frac{3}{\pi} V_{Lmax} \quad (\text{B.18})$$

A partir desta equação, as relações entre V_{cc} , a tensão de linha V_L e a tensão de fase V_f , são dadas como segue

$$V_{cc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_L \quad (\text{B.19})$$

$$V_{cc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \sqrt{3} V_f = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} V_f \quad (\text{B.20})$$

Das Equações B.17 e B.20, obtém-se a relação entre I_{cc} e I_f

$$I_{cc} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_f \quad (\text{B.21})$$

Substituindo as Equações B.16 e B.20 na Equação B.17, obtém-se a equação para a potência elétrica gerada

$$P_t = \frac{\pi P V_{cc}}{\sqrt{6} L_s \Omega} \sqrt{(k\Omega)^2 - \left(\frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{cc}\right)^2} \quad (\text{B.22})$$

O leitor poderá encontrar mais detalhes sobre sistemas de energia eólica em (Patel, 2006; Rosas e Estanqueiro, 2003).

B.4 Sistema de Condicionamento de Potência

Sistemas de condicionamento de potência possuem funções mais amplas; em aplicações isoladas atuam de forma a coordenar a operação do sistema e fornecer eletricidade adequada ao uso, e em aplicações conectadas são empregados para garantir interconexão ótima com a rede elétrica, minimizando impactos que porventura venham a ser causados pelas fontes renováveis (Blasques, 2005).

Os Sistemas de Condicionamento de Potência (SCPs) são compostos por equipamentos cuja função principal é otimizar o controle geração/consumo visando ao aproveitamento ótimo dos recursos, aliado à qualidade e continuidade na entrega da energia ao usuário.

São normalmente equipamentos eletrônicos, tais como: controladores de carga e descarga de baterias, conversores estáticos, entre outros. Nesta Seção, são apresentadas as principais características de cada um desses equipamentos.

Controlador de Carga/Descarga

O controlador de carga/descarga (CCD) de bateria é o equipamento designado para o controle do processo de carga e descarga do banco de baterias dentro de um SMFE, garantido um melhor aproveitamento da energia gerada e maior vida útil para as baterias. Assim, durante o processo de carga, o CCD deve adequar o fluxo de energia entregue a bateria de forma a garantir um carregamento completo observando os limites de tensão, de corrente e de temperatura da bateria. Por outro lado, durante o processo de descarga, o CCD deve evitar que a bateria seja descarregada além da sua capacidade de fornecimento de energia (Roseback, 2004).

Situações de sobrecarga e descarga de grande intensidade contribuem fortemente para a redução da vida útil da bateria. Portanto, o CCD deve atuar desconectando a geração quando a bateria atingir um nível máximo pré-determinado de tensão, e desconectando a carga quando a bateria atingir um nível mínimo de tensão. Alguns modelos de CCDs são utilizados também para fornecer informações sobre o desempenho do sistema ao usuário, tais como potência gerada e consumida, etc.

Em algumas aplicações, aerogeradores que geram em corrente alternada são equipadas com um conversor de tensão CA-CC (retificador), para que a energia gerada possa ser injetada no banco de baterias. Nos SMFEs, apesar de ser possível a utilização de um CCD independente para cada fonte, é preferível que seja utilizado um único CCD para todo o sistema (Blasques, 2005).

Na prática, existem dois tipos de chaveamento utilizados por CCDs. O chaveamento *série* interrompe a conexão entre a geração e a bateria, enquanto que o chaveamento *shunt* (paralelo) curto-circuita a geração (Blasques, 2005). A Figura B.14 ilustra os dois métodos.

Como estratégias de controle, apesar das diversas variações existentes, são aqui citados dois métodos: o método de interrupção (liga/desliga) e o método de tensão constante. O primeiro atua como uma chave, permitindo completa injeção de corrente gerada na bateria

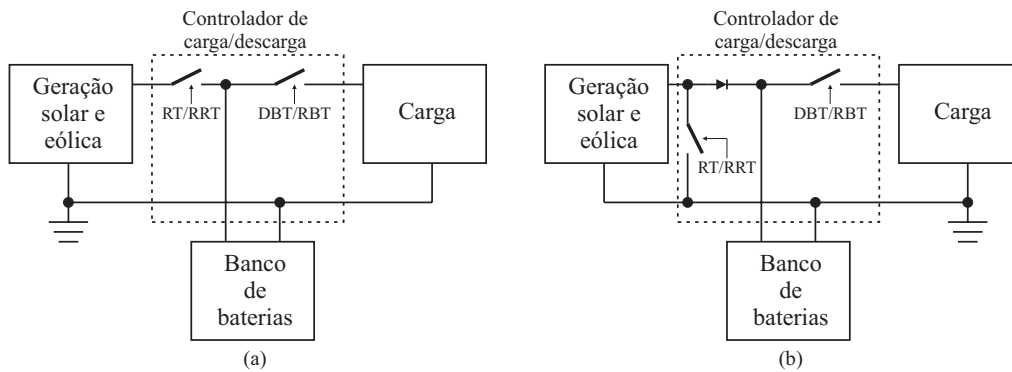


Figura B.14: Tipos de chaveamento utilizados pelos CCDs: (a) série e (b) shunt (Blasques, 2005).

até esta atingir um nível máximo, chamado de regulação de tensão (RT). A geração continua interrompida até a bateria atingir o nível de reconexão por regulação de tensão (RRT), inferior ao valor de RT. No método de tensão constante, a corrente injetada na bateria é regulada até que a bateria atinja seu valor de regulação de tensão. Com relação à desconexão da carga, o controle atua por meio de dois valores, o de desconexão por baixa tensão (DBT) e o de reconexão por baixa tensão (RBT) (Woodworth et al., 1994).

Para ilustrar esses quatro valores, de extrema importância no processo de monitoramento de uma bateria, no gráfico da Figura B.15 é mostrado o comportamento das curvas de carga e descarga de uma bateria controlada pelo método liga/desliga.

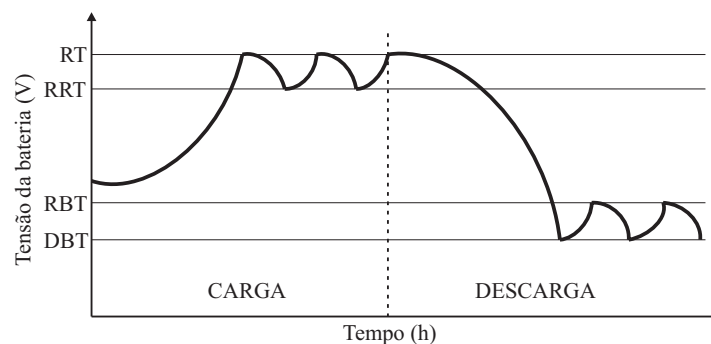


Figura B.15: Curvas de carga e descarga de uma bateria controlada pelo método liga/desliga (Glavin e Hurley, 2006).

A definição dos valores ótimos de conexão e desconexão (RT, RRT, DBT e RBT), chamados de *setpoints* do CCD, depende de diversos fatores e não é tarefa das mais simples.

O tipo de bateria utilizada, as estratégias de operação adotadas pelo SMFE, entre outros, são fatores a serem considerados na definição dos mesmos (Blasques, 2005).

Conversores Estáticos

Os conversores estáticos são utilizados para adequar a potência elétrica disponível em determinados pontos do sistema para uma outra forma estável desejada. Através de uma estratégia de comando para abertura e fechamento de suas chaves semicondutoras de potência os conversores estáticos são capazes de elevar ou abaixar um determinado nível de tensão ou corrente contínua, transformar uma tensão alternada em contínua ou uma tensão contínua em alternada com a amplitude e frequência desejadas (Rosemback, 2004).

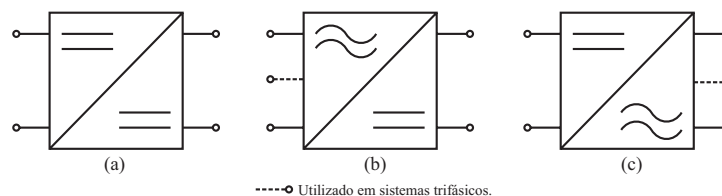


Figura B.16: Simbologia utilizada para representar os tipos de conversores estáticos: (a) CC-CC, (b) CA-CC e (c) CC-CA.

A Figura B.16 ilustra a simbologia utilizada para os conversores estáticos utilizados neste trabalho. Os conversores estáticos são modelados como elementos de eficiência constante, com a finalidade de diminuir a complexidade dos modelos para simulação.

Conversores CC-CC

Os conversores estáticos CC-CC são dispositivos que recebem um nível de tensão ou de corrente contínua nos seus terminais de entrada e ajustam para um outro valor de tensão ou de corrente contínua nos terminais de saída de acordo com as exigências do sistema (Rosemback, 2004).

Os conversores estáticos CC-CC num SMFE são utilizados na ligação dos geradores (FV e eólico) ao barramento de corrente contínua onde serão conectadas as cargas corrente contínua. Os conversores podem exercer dupla função no sistema, a principal é adequar o nível de tensão gerado nos terminais do painel nível de tensão desejado no barramento

CC, possibilitando com isso padronizar tensão dos equipamentos que serão conectados ao barramento CC. A outra função que pode ser incorporada aos conversores estáticos CC-CC é a função de seguidor de ponto de máxima potência (SPMP), denominada pela sigla MPPT (do inglês, Maximum Power Point Tracker).

Neste trabalho, os SMFES podem utilizar os conversores CC-CC dos seguintes tipos:

- Buck (abaixador): $V_{saida} = DV_{entrada}$
- Boost (elevador): $V_{saida} = V_{entrada}/(1-D)$
- Buck-Boost (abaixador-elevador): $V_{saida} = -D/(1-D)$

onde D é a razão cíclica ($0 \leq D \leq 1$).

Conversores CA-CC

Os conversores CA-CC, ou retificadores, são utilizados para transformar sinais CA em CC. Normalmente estão associados à turbinas eólicas e grupos geradores, quando objetiva-se que essas fontes injetem corrente no barramento CC e banco de baterias.

Conversores CC-CA

Conversores CC-CA ou inversores de tensão, são utilizados em sistemas de geração em corrente contínua cuja carga a ser atendida é composta por equipamentos que operam em corrente alternada. Essa conversão é realizada a partir de técnicas de modulação, sendo uma das mais utilizadas a modulação por largura de pulsos (PWM - Pulse-Width Modulation). Existe uma grande variedade de topologias de conversores CC-CA os quais podem ser monofásicos ou trifásicos. Uma das características principais de inversores é a forma de onda de tensão fornecida em sua saída. Geralmente, elas podem ser de três tipos: senoidal, quadrada e quadrada modificada. Para um estudo detalhado sobre conversores estáticos, o leitor deve se reportar a (Mohan et al., 1995).

Outros Dispositivos

Para finalizar, podem ser citados como componentes do subsistema de condicionamento de potência os diodos de bloqueio e by-pass. Os diodos de bloqueio são conectados entre os

módulos FV e o sistema de armazenamento para impedir que aqueles atuem como carga para as baterias em períodos onde não haja geração de energia (à noite e dias completamente nublados, por exemplo). Os diodos de bloqueio impedem, também, que, em um painel FV, módulos operando em condições normais injetem correntes elevadas em grupos de módulos em condições de funcionamento anormais, o que poderia causar danos a esses equipamentos (Blasques, 2005).

Os diodos de by-pass são conectados em paralelo com os módulos para impedir que, numa associação série, o mau funcionamento de um dos módulos (devido a defeitos de fabricação ou condições de sombreamento) influencie negativamente no desempenho de todo o arranjo.

B.5 Seguidor de Ponto de Máxima Potência

Para maximizar a potência gerada pelas fontes de um SMFE, devem ser utilizados algoritmos de procura do ponto de máxima potência (MPPT- Maximum Power Point Tracking) de cada uma das fontes.

SPMP Solar

Seguidores de Ponto de Máxima Potência (SPMP) são conversores CC-CC cuja função é fazer com que o painel FV opere o mais próximo possível do seu Ponto de Máxima Potência (PMP). O esquema típico de um sistema FV com SPMP é mostrado na Figura B.17. Os SPMP funcionam basicamente da seguinte forma, os terminais do arranjo FV são conectados à entrada do conversor. Através de um algoritmo de controle que atua modificando a *razão cíclica* (D) do conversor, varia-se o valor da tensão de entrada, conseqüentemente a corrente de entrada também varia, até que o produto da tensão pela corrente na entrada do conversor seja máximo. Esse controle é feito continuamente pelo algoritmo, para que se possa extrair sempre a máxima potência que pode ser gerada pelos painéis sob determinadas condições de irradiância e temperatura (Roseback, 2004).

Várias estratégias de controle, tais como *perturbe e observe* (P&O) e *incremento da condutância*, podem ser utilizadas para calcular o ponto de máxima potência ideal para uma determinada situação. O primeiro algoritmo baseia-se no cálculo do ponto de operação

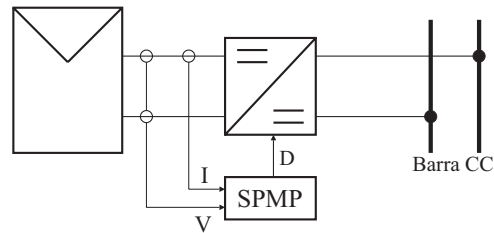


Figura B.17: Diagrama do sistema de geração solar.

do painel FV, que é periodicamente deslocado em direção ao PMP, com o incremento ou decremento da tensão do módulo, veja a Figura B.18. O segundo rastreia o ponto de máxima potência, mediante a comparação feita entre o incremento da condutância do módulo e seu valor instantâneo. Pesquisas realizadas demonstram que a última estratégia, apesar de ser um pouco mais lenta, possui uma precisão maior em relação a P&O, sendo que ambas atuam mais próximas do PMP, em comparação a outros algoritmos de controle convencionais (Oliveira, 2005).

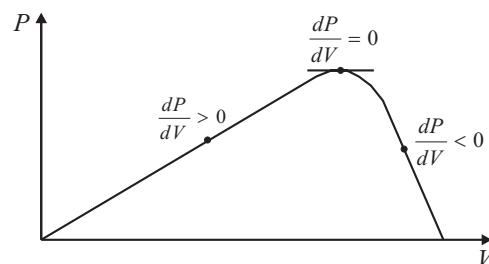


Figura B.18: Variação da potência de um painel FV com a tensão.

Neste trabalho, é utilizada a estratégia *incremento da condutância* (Hussein et al., 1995). Na Figura B.19 é apresentado o fluxograma do algoritmo desta estratégia.

O algoritmo é composto dos seguintes passos: primeiro, os valores no instante k da tensão $V(k)$ e da corrente $I(k)$ são lidos na entrada do conversor, em seguida, calcula os desvios dV e dI , subtraindo a leitura atual pelos valores de tensão $V(k-1)$ e corrente $I(k-1)$ obtidos na leitura anterior, respectivamente. Se dV e dI forem iguais a zero tem-se que o painel está operando no ponto de máxima potência do painel e o algoritmo retorna ao início. Caso dV seja igual a zero e $dI > 0$, o algoritmo soma ao valor de tensão de referência V_{REF} um incremento de tensão ΔV , mas se $dI < 0$, o algoritmo subtrai de V_{REF} o incremento ΔV .

Se dV for diferente de zero, o algoritmo compara a razão dI/dV com $-I(k)/V(k)$. Neste caso, se dI/dV for igual a $-I(k)/V(k)$ o algoritmo retorna ao início, pois o conversor está no ponto de máxima potência. Por outro lado, se dI/dV for maior que $-I(k)/V(k)$ o algoritmo somará a V_{REF} o incremento ΔV e se dI/dV for menor que $-I(k)/V(k)$ o algoritmo subtrai de V_{REF} o incremento ΔV . Na Figura B.20, são mostrados duas curvas de potência fornecida por um painel FV, com e sem SPMP.

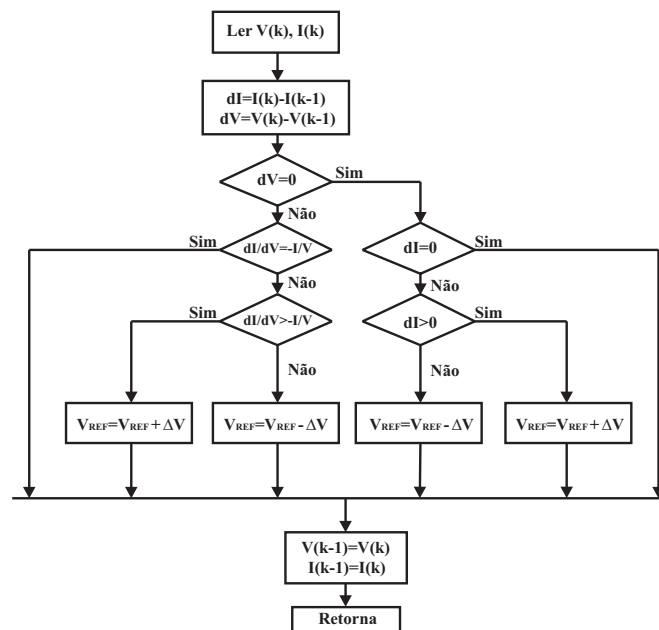


Figura B.19: SPMP Solar - Fluxograma do algoritmo incremento de condutância.

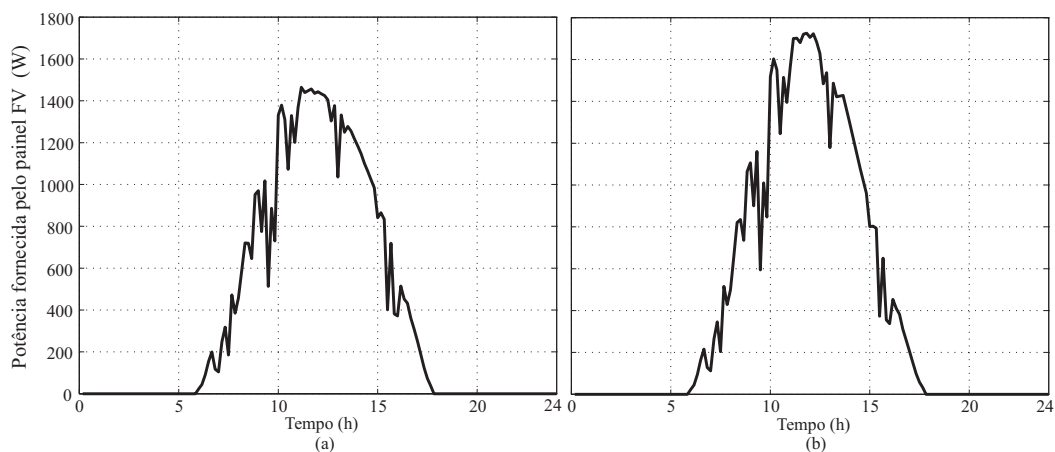


Figura B.20: Potência fornecida por um painel FV para um período de 24 h: (a) sem SPMP e (b) com SPMP.

SPMP Eólico

O SPMP para sistemas de geração eólicos também utiliza conversores estáticos para maximizar a potência gerada. Neste caso, um conversor estático é inserido entre o retificador trifásico e o barramento CC, veja a Figura B.21. Neste trabalho, é utilizada uma estratégia de SPMP que baseia-se nos trabalhos de (Koutroulis e Kalaitzakis, 2006; Tafticht, Agbossou, Chériti e Doumbia, 2006; Tafticht, Agbossou e Chériti, 2006).

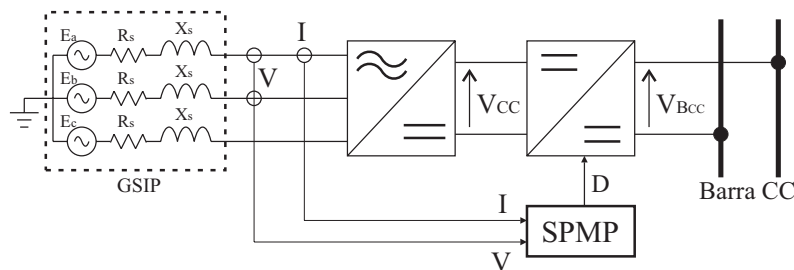


Figura B.21: Diagrama do sistema de geração eólica.

O processo de maximização da potência gerada por um aerogerador é mostrado na Figura B.22 e funciona da seguinte maneira:

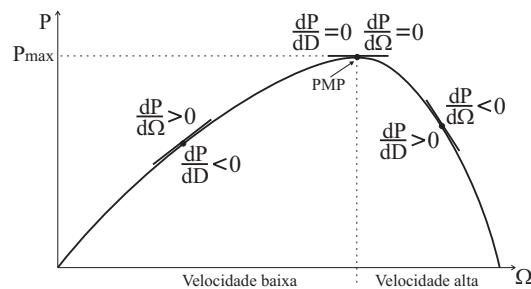


Figura B.22: Variação da potência de uma turbina eólica com a velocidade.

- Se o aerogerador está trabalhando no lado de velocidade alta, a razão cíclica D do conversor estático é incrementada para reduzir a velocidade do rotor do gerador elétrico. Portanto, o aumento de D provoca uma redução em V_{cc} ($dD/dV_{cc} < 0$), que por sua vez aumenta a corrente I no gerador elétrico (B.16), resultando na redução da velocidade do rotor do gerador elétrico e aumento na potência gerada;

- Por outro lado, se o aerogerador está trabalhando no lado de velocidade baixa, a razão cíclica D é reduzida para aumentar a velocidade do rotor do gerador elétrico. Desta forma, a redução de D provoca um aumento em V_{cc} ($dD/dV_{cc} < 0$), o qual diminui a corrente I no gerador elétrico (B.16), resultando no aumento da velocidade do rotor do gerador elétrico e aumento na potência gerada.

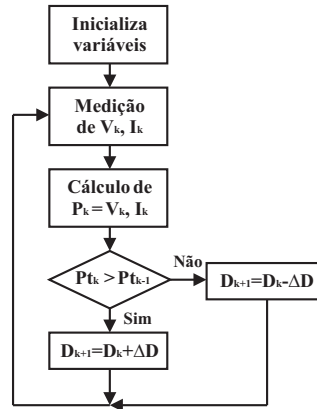


Figura B.23: Fluxograma do algoritmo de SPMP eólico.

Este método pode ser utilizado com diversas configurações de conversores CC-CC. Neste caso, foi utilizado um conversor CC-CC tipo Buck-Boost. O fluxograma do algoritmo é mostrado na Figura B.23. Os resultados obtidos para ilustrar a aplicação do SPMP são mostrados na Figura B.24.

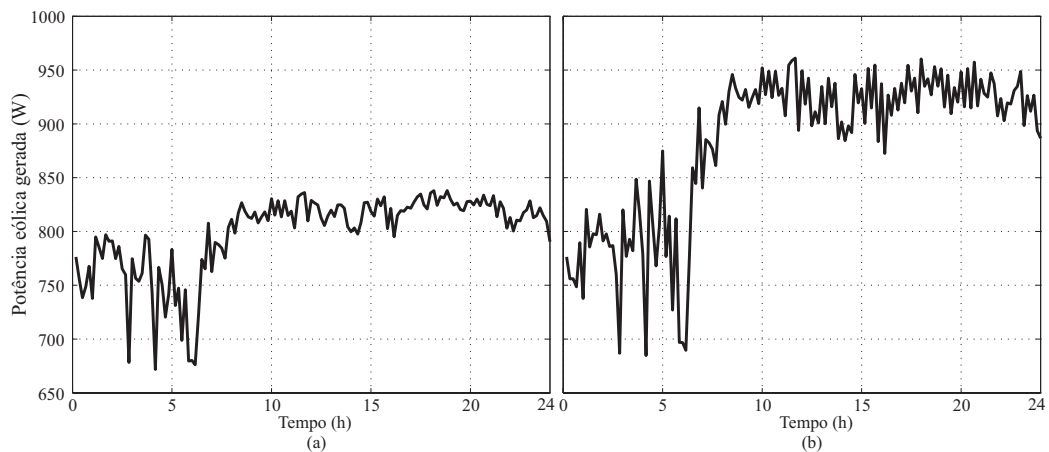


Figura B.24: Potência fornecida por um aerogerador para um período de 24 h: (a) sem SPMP e (b) com SPMP.

B.6 Configurações

Os SMFEs, basicamente, têm duas configurações: (i) SMFEs isolados e (ii) SMFEs conectados. Na Figura B.25, são mostradas essas configurações típicas de SMFEs.

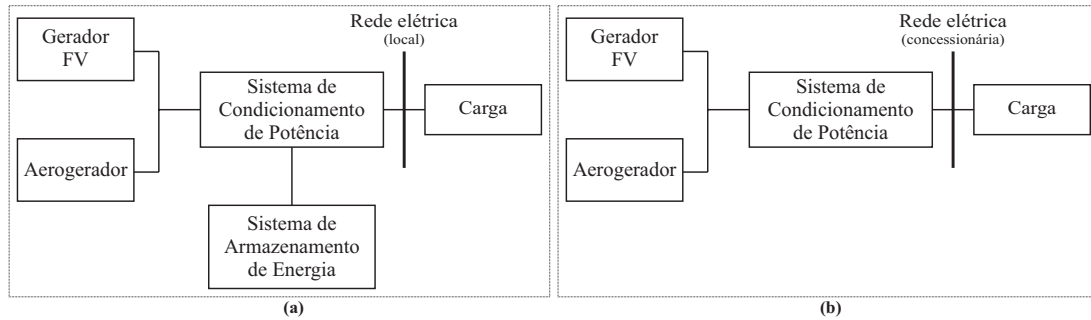


Figura B.25: Configurações utilizadas em SMFEs: (a) isolada e (b) conectada à rede.

Além disso, em função da aplicação, tipos de cargas e justificativa econômica, os SMFEs podem ter cada uma dessas configurações implementadas de duas formas:

- com o acoplamento dos geradores a um barramento de corrente contínua (CC); e
- com o acoplamento dos geradores a um barramento de corrente alternada (CA).

Neste trabalho, o enfoque é dado para SMFEs isolados cujas fontes de geração são dos tipos FV e eólica.

SMFEs Isolados

SMFEs isolados podem ser conceituados como sistemas cuja geração é entregue diretamente a uma carga específica ou a uma rede elétrica não conectada ao sistema interligado. Normalmente, SMFEs isolados, são implementados em regiões remotas e pouco povoadas, onde a rede de alimentação de energia das concessionárias não alcança e sua expansão tem um custo inviável. A principal característica de SMFEs isolados é a necessidade do sistema de armazenamento de energia, para suprir a carga em períodos onde não haja disponibilidade de recursos renováveis.

A utilização de SMFEs para o atendimento de locais isolados, onde não existe perspectiva de suprimento através da rede de uma concessionária, vem se tornando uma alternativa cada vez mais considerada com o passar do tempo. Na maioria desses casos, a

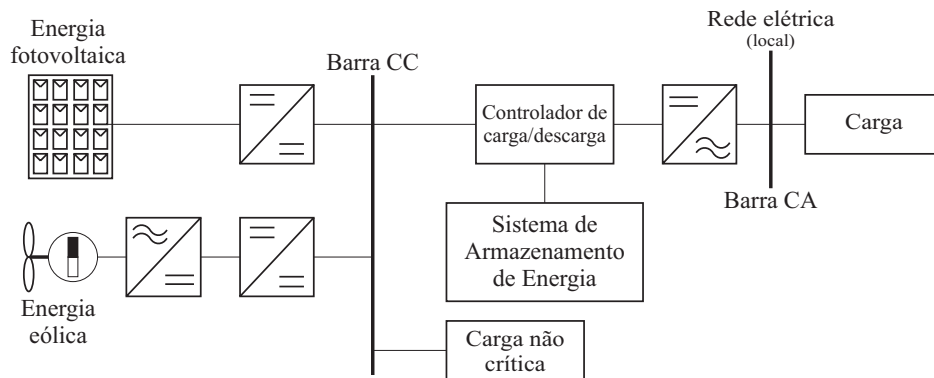


Figura B.26: Digrama de um SMFE isolado.

única opção vinha sendo a utilização de grupos geradores, apresentando diversos problemas ambientais e relacionados à sua operação e manutenção (Blasques, 2005). Neste trabalho não são considerados SMFEs com grupos geradores a diesel. Na Figura B.26 é mostrado um diagrama mais detalhado de um SMFE isolado.

A carga não crítica (*dump load*), conectada à barra CC, é uma carga alternativa que pode ser alimentada quando a energia gerada é maior que a consumida e o banco de baterias está em plena carga.

SMFEs Conectados

SMFEs conectados à rede são aqueles instalados de forma a complementar a geração de uma outra fonte, que já entrega sua energia gerada a uma rede elétrica de pequeno, médio ou grande porte. Essa forma de geração é conhecida como geração distribuída (Blasques, 2005).

Existem duas configurações típicas para sistemas conectados: sistemas que somente injetam energia na rede, e sistemas que realizam intercâmbio de energia com a rede. Em ambas as configurações, especial atenção deve ser dada à qualidade da energia no ponto de entrega.

Neste sentido, componentes eletrônicos de potência devem ser utilizados para, juntamente com o inversor de tensão, garantir que a geração a partir de múltiplas fontes não cause qualquer tipo de prejuízo à rede elétrica já existente, em condições normais de operação, ou em condições extremas (faltas na rede, perda de geração, entre outras). O estudo completo da qualidade da energia injetada na rede por SMFEs foge ao escopo deste trabalho,

e não será abordado de forma profunda. Diversos estudos já vêm sendo desenvolvidos no sentido de garantir interconexões ótimas entre fontes renováveis e redes elétricas contendo outras fontes de geração primárias (Blasques, 2005).

Normalmente, esses sistemas não utilizam sistemas de armazenamento de energia, pois toda a energia gerada é instantaneamente utilizada ou transferida ao sistema elétrico. Pode-se dividi-los basicamente em dois grupos: sistemas residenciais e sistemas de grande potência (Roseback, 2004).

B.7 Estratégias de Operação

SMFEs isolados constituídos somente por fontes primárias de energia renováveis apresentam como principal estratégia de operação a definição dos pontos ótimos de carga e descarga das baterias, ou seja, quando a geração deve ser desconectada devido a uma situação de carga plena e quando a carga deve ser desconectada devido a uma situação de máxima profundidade de descarga verificada (Blasques, 2005). Esse controle é normalmente realizado por CCDs, como já comentado anteriormente. Com relação à energia efetivamente gerada, não há estratégia, dada a dificuldade de previsão em curto prazo do comportamento dos recursos solar e eólico.

O principal compromisso do controle nesse tipo de sistema deve ser o de otimizar os seus pontos de operação para que possam ser obtidos, conjuntamente, o menor índice possível de interrupção no fornecimento de energia à carga, e a menor depreciação possível do banco de baterias (Blasques, 2005).

B.8 Ferramentas de Projeto e Simulação de SMFEs

Existe uma grande variedade de ferramentas computacionais para o projeto e simulação de SMFEs. Projetistas de sistemas e instaladores utilizam ferramentas de cálculo de viabilidade e dimensionamento. Por outro lado, cientistas e engenheiros, com o objetivo de otimizar o desempenho de SMFEs, utilizam ferramentas de simulação. Nesta seção, são apresentadas as principais características de algumas ferramentas.

Ferramentas de Cálculo de Viabilidade

Neste tipo de ferramenta, os cálculos que requerem pouca interação com o usuário são automatizados. Tratam-se de ferramentas que podem ser utilizadas, normalmente, por vendedores, promotores e consultores de sistemas de energia.

- FATE2-P: é um programa de análise financeira criado por NREL (National Renewable Energy Laboratory) e pelo departamento de investigação econômica de Princeton. Este programa calcula o custo e o tempo de amortização de um sistema FV;
- RETScreen: criado pelo CEDRL (CANMET Energy Diversification Research Laboratory). O núcleo desta ferramenta consiste na integração e padronização da análise de um projeto de energia renovável baseado no Microsoft Excel. A ferramenta disponibiliza um assistente para determinar a produção de energia e o custo do ciclo de vida do sistema, e suporta diferentes tipos de energia renováveis;
- AVES-H (Análise de Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade) (Blasques, 2005): com base numa interface amigável e na facilidade de manipulação dos dados de entrada, o programa AVES-H busca fornecer ao usuário uma ferramenta confiável e prática para o auxílio no projeto de SMFEs, considerando os principais aspectos pertinentes a sistemas de diversas configurações e finalidades.

Ferramentas de Dimensionamento

Este tipo de ferramenta permite dimensionar SMFEs. A partir dos requisitos energéticos, é determinado o tamanho ótimo de cada componente do sistema. Além disso, fornece informação detalhada sobre o balanço de energia dos componentes, indicando os períodos críticos de perda de energia ao longo do ano. As ferramentas de dimensionamento, normalmente são pequenos pacotes de software com um editor para desenho e, na maioria das vezes, são fornecidas pelos fabricantes de componentes.

- HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable): criada pelo NREL, esta ferramenta fornece ao usuário um ambiente poderoso com múltiplas variáveis para

abter uma análise detalhada do sistema. Permite realizar diferentes simulações simultâneas para comparar os resultados de diferentes configurações e dimensionamento de componentes. HOMER permite o dimensionamento de SMFE isolados e conectados. HOMER utiliza um modelo de bateria que baseia-se na contagem dos Ah que entram e saem de uma bateria;

- Hybrid Designer: desenvolvido pelo Energy & Development Research Center of Cape Town University of South Africa, permite a avaliação de diferentes cenários para determinar que tipo de configuração do sistema proporciona uma resposta melhor e uma viabilidade aceitável para o custo do ciclo de vida. Além disso, incorpora análise de sensibilidade para indicar pontos críticos do sistema.

Ferramentas de Simulação

As ferramentas de simulação apresentam uma visão oposta às ferramentas de projeto. O usuário especifica a natureza e dimensões de cada componente e a ferramenta fornece uma análise detalhada das características do sistema. A precisão dos cálculos e o tempo de simulação necessário dependem do nível de detalhes necessário e do tipo de dados fornecidos. Estas ferramentas são utilizadas para verificar o dimensionamento do sistema, investigar o impacto de mudanças futuras na carga, analisar o funcionamento sob condições extremas, investigar a sensibilidade do projeto com respeito a determinados parâmetros e analisar o impacto que causaria um defeito ou deterioração de componentes.

- Hybrid2 (Manwell et al., 2005): ferramenta desenvolvida pelo NREL e pela University of Massachusetts, permite uma análise de desempenho a longo prazo de SMFEs. Hybrid2 utiliza um modelo de bateria que permite analisar o desempenho de baterias sob os seguintes aspectos: capacidade, tensão, transferência de carga, perdas de energia e tempo de vida;
- IPSYS (Bindner et al., 2004): ferramenta desenvolvida no Risø National Laboratory - Technical University of Denmark - DTU, é um ambiente flexível de simulação para sistemas integrados de energia com múltiplas formas de energia e estruturas complexas de controle. Ele foi desenvolvido com o propósito de simular o desempenho

de sistemas, particularmente, envolvendo grandes quantidades de energias renováveis. Em (Andersson et al., 2007), a ferramenta IPSYS passou a incluir um modelo de tempo de vida de baterias chumbo-ácido;

- SOMES: criado pela Universidade de Utrecht da Holanda, permite simular as características de sistemas FV, Eólicos, diesel ou SMFEs, tanto isolados como conectados. A ferramenta fornece informações sobre o balanço energético do sistema, assim como análise econômica, técnica e de viabilidade;
- RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator' Power Supply Simulator): desenvolvido pela Murdoch University Energy Research Institute (MUERI) da Austrália, é um programa de modelagem designado para simular sistemas FV, Eólicos, diesel e SMFEs.

Apêndice C

Circuito Integrado bq2031

O CI bq2031[®] da Texas Instruments é designado para otimizar a carga de baterias chumbo-ácido. Este CI possui um regulador PWM flexível, o qual permite controlar processos de carga dos tipos: tensão constante, corrente constante ou pulsos de corrente (Unitrode, 1999).

O CI bq2031 utiliza os seguintes parâmetros para controlar a carga de uma bateria:

- V_{BAT} é a tensão da bateria;
- V_{CELL} é a tensão de célula da bateria;
- V_{LCO} é o limite de baixa tensão de corte;
- V_{HCO} é o limite de alta tensão de corte;
- V_{MIN} é a tensão mínima para início da carga da bateria;
- V_{BLK} é a tensão de equalização da bateria;
- V_{FLT} é a tensão de flutuação da bateria;
- I_{SNS} é a corrente de carga da bateria;
- I_{COND} é a corrente de pré-carga da bateria;
- I_{MAX} é a corrente máxima de carga da bateria;
- I_{MIN} é a corrente mínima de retenção de carga da bateria;
- I_{FLT} é a corrente de carga de flutuação da bateria;
- T_{MIN} é temperatura mínima para carga da bateria;
- T_{MAX} é temperatura máxima para carga da bateria;
- t_{QT1} é tempo limite para o teste de qualificação 1;
- t_{QT2} é tempo limite para o teste de qualificação 2.

Um monitoramento térmico é utilizado continuamente durante o ciclo de carga. Caso a temperatura da bateria esteja fora de faixa ($T < T_{MIN}$ ou $T > T_{MAX}$) ou não existe um termistor, o controlador entra no estado de carga pendente, excetuando-se quando o controlador estiver no estado de falta. No estado de carga pendente os temporizadores são suspensos, mas não zerados. Quando a temperatura retorna a faixa exigida ($T_{MIN} \leq T \leq T_{MAX}$), o controlador retorna ao ponto do ciclo (estado) em que estava quando a temperatura fora de faixa foi detectada.

Após verificar a temperatura inicial da bateria, o CI bq2031 verifica a presença da bateria. Se a condição $V_{LCO} < V_{CELL} < V_{HCO}$ for verdadeira, a bateria é considerada como presente e o CI bq2031 inicia a pré-carga de qualificação da bateria após 500 ms. Caso contrário, o controlador entra no estado de falta e permanece neste estado até que uma nova bateria seja conectada.

Testes de qualificação da bateria

Antes de iniciar o carga principal de uma bateria, o CI bq2031 realiza dois testes de qualificação da bateria a ser carregada.

- Teste 1 - regulação de tensão: o CI bq2031 aplica uma tensão igual a $V_{FLT} + 0,25$ V sobre a bateria. Ele monitora o tempo necessário para I_{SNS} subir para $I_{COND} = I_{MAX}/5$. Se I_{SNS} não atinge este nível num tempo inferior a t_{QT1} , o controlador entra no estado de falta, ou seja, a bateria deve estar numa condição de circuito aberto e deve ser substituída. Caso contrário ($I_{SNS} \geq I_{COND}$), o controlador avança para o teste de qualificação 2.
- Teste 2 - regulação de corrente: o CI bq2031 aplica a corrente $I_{SNS} = I_{COND}$ na bateria. Ele monitora o tempo necessário para V_{CELL} ser maior ou igual a V_{MIN} . Se V_{CELL} não atinge este nível num tempo inferior a t_{QT2} , o controlador entra no estado de falta, ou seja, a bateria deve estar numa condição de curto-circuito e deve ser substituída. Caso contrário ($V_{CELL} \geq I_{MIN}$), o controlador inicia a etapa de carga rápida.

Algoritmos de Carga

O usuário pode configurar o bq2031 para um dos três algoritmos de carga rápida e manutenção a seguir.

- Duplo nível de tensão: este algoritmo consiste de três etapas. Na Figura C.1 é mostrado da comportamento da tensão e da corrente na bateria em função do tempo em cada etapa de carga.
 - Carga rápida - fase 1: a corrente de carga é limitada em I_{MAX} até que $V_{CELL} \geq V_{BLK}$.
 - Carga rápida - fase 2: a tensão de carga é regulada em V_{BLK} até que $I_{SNS} \leq I_{MIN}$.
 - Fase de manutenção: a tensão de carga é regulada em V_{FLT} para uma corrente de carga igual a I_{FLT} .

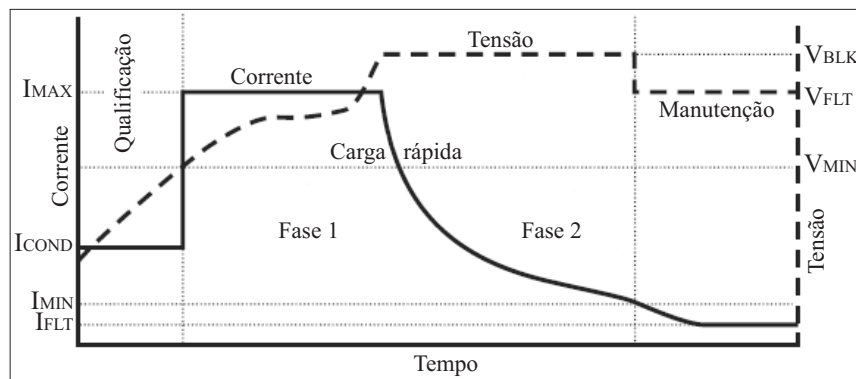


Figura C.1: CI bq2031 - Algoritmo de carga 1 (Unitrode, 1999).

- Duplo nível de corrente: este algoritmo consiste de duas etapas. Na Figura C.2 é mostrado da comportamento da tensão e da corrente na bateria em função do tempo em cada etapa de carga.
 - Fase de carga rápida: a corrente de carga é regulada em I_{MAX} até que $V_{CELL} = V_{BLK}$ ou $\Delta V < -8$ mV. Onde ΔV é denominado segunda diferença. ΔV é o acúmulo de diferenças entre sucessivas amostras de V_{BAT} . V_{BAT} é a tensão da bateria.

- Fase de manutenção: pulsos de largura fixa e amplitude igual a I_{COND} são modulados em frequência para obter um valor médio de I_{MIN} .

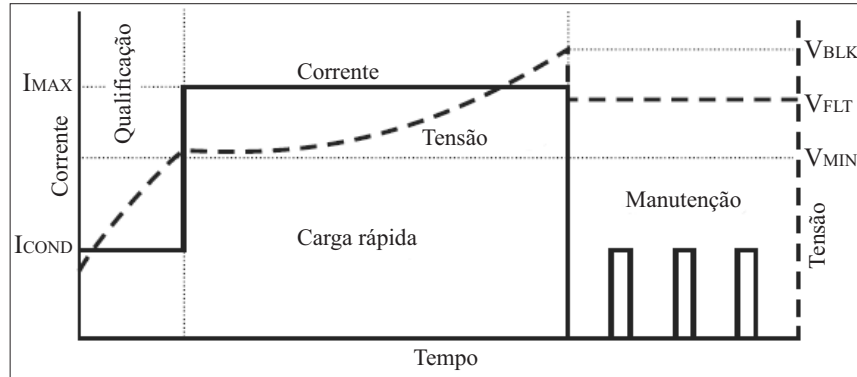


Figura C.2: CI bq2031 - Algoritmo de carga 2 (Unitrode, 1999).

- Corrente pulsada: este algoritmo é composto de duas etapas. Na Figura C.3 é mostrado da comportamento da tensão e da corrente na bateria em função do tempo em cada etapa de carga.

- Fase de carga rápida: a corrente de carga é regulada em I_{MAX} até que $V_{CELL} = V_{BLK}$.
- Fase de manutenção: a corrente de carga é removida ($I_{SNS} = 0$) até que $V_{CELL} \leq V_{FLT}$; então a corrente de carga é restaurada e regulada em I_{MAX} até que $V_{CELL} \geq V_{BLK}$. Este ciclo é repetido indefinidamente.

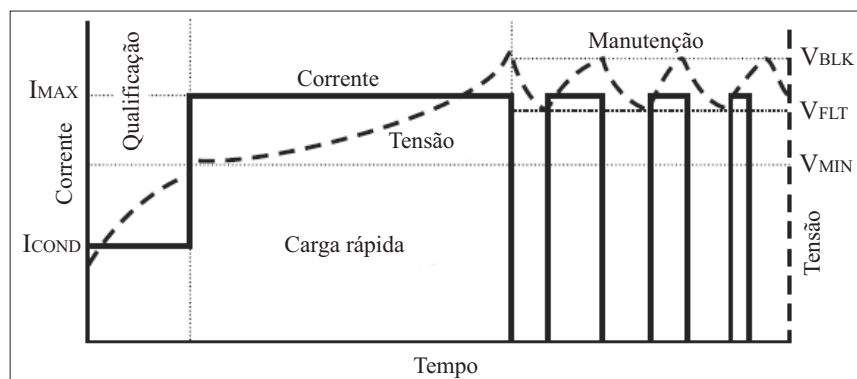


Figura C.3: CI bq2031 - Algoritmo de carga 3 (Unitrode, 1999).

Apêndice D

Publicações Produzidas

1. *Modeling and Analyzing Power Consumption in Sensor Networks Nodes based on Differential Hybrid Petri nets*, J.R.B. Sousa, A.M.N. Lima e A. Perkusich, IEEE - IECON 2005, Raleigh, North Carolina, USA, November 6 - 10, 2005, p. 389-394.
2. *Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem do Consumo de Energia de um Nó Sensor Sem Fio*, J.R.B. Sousa, A.M.N. Lima e A. Perkusich, SBAI 2005, São Luis, MA, Brasil, 21 a 23 de setembro de 2005, p. 1-8.
3. *Modelagem do Consumo de Energia de Um Nó Sensor Utilizando Redes de Petri Híbridas Diferenciais*, J.R.B. Sousa, P.S. Sausen, A.M.N. Lima e A. Perkusich, CBA 2006, Salvador, BA, Brasil, 03 a 06 de outubro de 2006, p. 1109-1114.
4. *Exploring the Switching Energy Effect in a Dynamic Power Management Technique for Wireless Sensor Networks*, P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, M. A. Spohn, A. Perkusich and A. M. N. Lima, IEEE - IECON 2007, Taipei, Taiwan, November 5-8, p. 1-7, 2007.
5. *Dynamic Power Management with Scheduled Switching Modes in Wireless Sensor Networks*, P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, M. A. Spohn, A. Perkusich and A. M. N. Lima, IEEE - MASCOTS, October 24-26, Istanbul, Turkey, p. 1-8, 2007.

6. *Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem e no Gerenciamento Dinâmico de Energia de Redes de Sensores Sem Fio*, J. R. B. Sousa, P. S. Sausen, A. M. N. Lima e A. Perkusich, *Revista Controle & Automação, Sociedade Brasileira de Automática*, Vol. 18, N^o. 3, p. 278-291, 2007.
7. *Modeling and Simulation of Systems of Multiple Sources of Energy by Differential Hybrid Petri Nets*, J. R. B. Sousa e A. M. N. Lima, *IEEE - ISIE 2008*, 30 June - 2 July, 2008, Cambridge, UK, p. 1861-1866.
8. *Modelagem e Simulação de Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia com Redes de Petri Híbridas Diferenciais*, J. R. B. Sousa e A. M. N. Lima, *SBSE 2008*, B. Horizonte, MG, Brasil, 27-30 de abril de 2008, p. 1-6.
9. *Simulation of Mobile Ad Hoc Networks Based on a Realistic Battery Model*, M. A. Spohn, P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, A. Perkusich, A. M. N. Lima. In: Alvin C. Harper; Raymond V. Bures. (Org.). *Mobile Telephones: Networks, Applications, and Performance*. Nova Science Publishers, 2008, p. 211-229.
10. *Dynamic Power Management with Scheduled Switching Modes*, P. S. Sausen, J. R. B. Sousa, M. A. Spohn, A. Perkusich e A. M. N. Lima, *Computer Communications - The International Journal for the Computer and Telecommunications Industry*, No prelo, p. 1-32, 2008.
11. *Modelagem e Simulação do Tempo de Vida de Bancos de Baterias Chumbo-ácido Utilizados em Sistemas de Múltiplas Fontes de Energia*, J. R. B. Sousa e A. M. N. Lima, *CBA 2008*, Juiz de Fora, MG, Brasil, 14 a 17 de setembro de 2008, No prelo, p. 1-6.

Referências Bibliográficas

- Alla, H. e David, R. (2004). *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*, Springer-Verlag, GmbH & Co. K, Berlin and Heidelberg.
- Alur, R., Courcoubetis, C., Halbwachs, N., Henzinger, T., Ho, P.-H., Nicollin, X., Olivero, A., Sifakis, J. e Yovine, S. (1995). The algorithmic analysis of hybrid systems, *Theoretical Computer Science* **138**: 3–34.
- Andersson, A. (2006). Battery lifetime modelling. Technical report. Department of Applied Physics and Electronics - Umeå University - Sweden/Risø National Laboratory - Roskilde - Denmark.
- Andersson, A., Bindner, H., Cronin, T., Gehrke, O. e Kowal, J. (2007). Lifetime simulations of lead acid batteries in power systems with high penetration of renewable energy, such as solar and wind, *IREC II* pp. 1–8.
- Andrade, J. (2005). *Estudo do mecanismo da carga pulsada em eletrodos planos de pb e em eletrodos porosos de baterias chumbo Ácido*, Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia - Universidade Federal do Paraná.
- Armenta-Deu, C. (2003). Prediction of battery behaviour in SAPV applications, *Renewable Energy* **28**: 1671–1684.
- Baterias MOURA (2007). Catálogo técnico - MOURA clean. Famílias MF e MC.
- Beccuti, A. G., Geyer, T. e Morari, M. (2005). A Hybrid System Approach to Power Systems Voltage Control, *Proc. of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*, pp. 6774–6779.

- Bemporad, A. e Morari, M. (1999). Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints, *Automatica* **35**(3): 407–427.
- Benchetrite, D., Le Gall, M., Bach, O., Perrin, M. e Mattera, F. (2005). Optimization of charge parameters for lead-acid batteries used in photovoltaic systems, *Journal of Power Sources* **144**(2): 346–351.
- Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Manwell, J. F., Abdulwahid, U. e Baring-Gould, I. (2005). Lifetime modelling of lead acid batteries, *Technical report*, Risø National Laboratory, Roskilde, Roskilde - Denmark.
- Bindner, H., Gehrke, O., Lundsager, P., Hansen, J. C. e Cronin, T. (2004). IPSYS - a simulation tool for performance assessment and controller development of integrated power system distributed renewable energy generated and storage, *European Wind Energy Conference and Exhibition* pp. 128–133.
- Blasques, L. C. M. (2005). *Estudo da viabilidade técnico-econômica de sistemas híbridos para geração de eletricidade*, Master's thesis, Universidade Federal do Pará - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Bona, F. S. e Ruppert Filho, E. (2004). As Microturbinas e a Geração Distribuída, *AGRE-NER GD 2004* pp. 1–10.
- Branicky, M. S. (1995). *Studies in hybrid systems: Modeling, analysis, and control*, PhD thesis, Department of Electric Engineering and Computer Science - Massachusetts Institute of Technology - Cambridge.
- Buchmann, I. (2001). *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, 2 edn, Cadex Electronics Inc.
- Casacca, M. A. e Salameh, Z. M. (1992). Determination of lead-acid battery capacity via mathematical modeling techniques, *IEEE Transaction on Energy Conversion* **7**(3): 442–446.
- Castro, R. M. G. (2007). *Introdução à Energia Fotovoltaica*, 2ª edição edn, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa - Portugal.

- Ceraolo, M. (2000). New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries, *IEEE Transactions on Power Systems* **15**(4): 1184–1190.
- Champagnat, R. (1998). *Supervision des Systèmes Discontinus: Definition d'un Modèle Hybride et Pilotage en Temps réel*, PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Chan, H. L. e Sutanto, D. (2000). A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems, *IEEE - Power Engineering Society Winter Meeting* **1**: 470–475.
- Copetti, J. B., Lorenzo, E. e Chenlo, F. (1993). A general battery model for PV system simulation, *Progress in photovoltaics: research and applications* **1**: 283–292.
- Dang, T. (2000). *Verification and Synthesis of Hybrid Systems*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - VERIMAG, France.
- Daubas, B., Pagès, A. e Pingaud, H. (1994). Combined simulation of hybrid processes, *Proceedings of IEEE-SMC* pp. 320–325.
- David, R. e Alla, H. (1987). Continuous Petri Nets, *8th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets* pp. 275–294.
- David, R. e Alla, H. (2001). On Hybrid Petri Nets, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers - Boston - USA. **11**: 137–162.
- Demongodin, I. e Koussoulas, N. T. (1996). Modeling Dynamic Systems through Petri Nets, *Proceedings of the IEEE - Systems, Man and Cybernetics CESA '96 (Computational Engineering in Systems Applications) IMACS Multiconference (Symposium on Discrete Events and Manufacturing Systems)*, Lille - France pp. 279–284.
- Dorf, R. C. (2001). *The Electric Power Engineering - Handbook*, A CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press, Florida - USA.
- Drath, R. (1998). Hybrid object nets: An object oriented concept for modelling complex hybrid systems, *3rd International Conference on Automation of Mixed Processes: Dynamical Hybrid Systems (ADPM)*, Reims pp. 436–442.

- Dubois, E., Alla, H. e David, R. (1994). Continuous petri nets with maximal speeds depending on time, *Proc. 15th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Zaragoza, Spain* pp. 32–39.
- Dürr, M., Cruden, A., Gair, S. e McDonald, J. R. (2006). Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system, *Journal of Power Sources* **161**: 1400–1411.
- Elmqvist, H., Mattsson, S. E. e Otter, M. (1999). Modelica - A Language for Physical System Modeling, Visualization and Interaction, *IEEE Symposium on Computer-Aided Control System Design, CACSD'99, Hawaii, August 22-27*, pp. 1–10.
- Engell, S. (1998). Modelling and analysis of hybrid systems, *Mathematics and Computers in Simulation* **46**(5-6): 445–464.
- Ferrari-Trecate, G., Gallestey, E., Letizia, P., Spedicato, M., Morari, M. e Antoine, M. (2002). Modeling and Control of Co-generation Power Plants: A Hybrid System Approach, *Hybrid Systems: Computation and Control, Lecture Notes in Computer Science - Springer-Verlag*, **2289**: 209–224.
- Ferrarini, L., Ambrosi, L. e Ciapessoni, E. (2006). Safety and Reliability Analysis of Protection Systems for Power Systems, *2nd IFAC Conf. on Analysis and Design of Hybrid Systems, Alghero, Italy*, pp. 383–388.
- Fourlas, G. K. (2005). Modeling of an Electrical Power Transmission System using Hybrid Systems, *Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Canada, August 28-31, 2005*, pp. 1516–1521.
- Fourlas, G. K., Kyriakopoulos, K. J. e Krikelis, N. J. (2001). A Framework for Fault Detection of Hybrid Systems, *Proceedings of the 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Dubrovnik, Croatia* pp. 1–6.
- Fourlas, G. K., Kyriakopoulos, K. J. e Krikelis, N. J. (2004). A Theoretical Diagnosis Approach Applied to a Power Transmission System, *43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, December 14-17, 2004*, **5**: 4788–4793.

- Fourlas, G. K., Kyriakopoulos, K. J. e Krikelis, N. J. (2005). Fault Diagnosis of Hybrid Systems, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, Limassol, Cyprus, June 27-29, 2005*, pp. 832–837.
- Fourlas, G. K., Kyriakopoulos, K. J. e Vournas, C. D. (2004). Hybrid Systems Modeling for Power Systems, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, **4**(3): 16–23.
- Gergaud, O., Multon, B. e Ben Ahmed, H. (2002). Analysis and experimental validation of various photovoltaic system models, *7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal* pp. 1–6.
- Ghomri, L. e Alla, H. (2007). Modeling and analysis using hybrid petri nets, *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems* **1**(2): 141–153.
- Giua, A. e Usai, E. (1998). Modeling hybrid systems by high-level petri nets, *APII - JESA Special Issue on Automation of mixed processes and hybrid dynamical systems*, **32**(9-10/98): 1209–1231.
- Glavin, M. e Hurley, W. G. (2006). Battery management system for solar energy applications, *UPEC* **1**: 79–83.
- Guasch, D. e Silvestre, S. (2003). Dynamic battery model for photovoltaic applications, *Progress In Photovoltaics: Research and Applications* **11**(3): 193–206.
- Hansen, A. D., Sørensen, P., Hansen, L. H. e Bindner, H. (2000). Models for a stand-alone pv system. Risø National Laboratory, Roskilde.
- Hauschild, L. (2006). *Avaliação de estratégias de operação de sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel*, Master's thesis, Universidade de São Paulo.
- Hiskens, I. A. (2004). Power System Modeling for Inverse Problems, *IEEE Transactions on Circuits and Systems, March*, **51**(3): 539–551.
- Hiskens, I. A. e Pai, M. A. (2000). Hybrid Systems View of Power System Modelling, *Proceedings of the ISCAS 2000. The 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Geneva, 28-31 May, 2000* **2**: 228–231.

- Hiskens, I. A. e Sokolowski, P. J. (2001). Systematic Modeling and Symbolically Assisted Simulation of Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, **16**(2): 229–234.
- Hong-Shan, Z., Zeng-Qiang, M., Hui, R. e Hai-Ping, W. (2004). Hybrid Modeling Method of Digital Protection System, *Power System Technology - POWERCON 2004, Singapore, 21-24 November* **1**: 602–607.
- Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T. e Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution* **142**(1): 59–64.
- Jackey, R. A. (2007). A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection, *The MathWorks to Showcase Model-Based Design*, pp. 1–9.
- Jensen, K. (1992-1997). *Coloured Petri Nets. Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Volumes 1-3*, Springer-Verlag (Monographs in Theoretical Computer Science).
- Jossen, A., Garcke, J. e Sauer, D. U. (2004). Operation conditions of batteries in PV applications, *Solar Energy* **76**(6): 759–769.
- Kaiser, R., Wenzl, H., Baring-Gould, I., Wilmot, N., Mattera, F., Tselepis, S., Nieuwenhout, F., Rodrigues, C., Perujo, A., Ruddell, A., Lundsager, P., Bindner, H. e Svoboda, V. (2003). Development of battery lifetime models for energy storage systems in renewable energy systems (RES), *STORE*, pp. 1–6.
- Koutsoukos, X. D., Antsaklis, P. J., Stiver, J. A. e Lemmon, M. D. (2000). Supervisory Control of Hybrid Systems, *IEEE, Special Issue on Hybrid Systems*, **88**(7): 1026–1049.
- Koutroulis, E. e Kalaitzakis, K. (2006). Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **53**(2): 486–494.
- Koutsoukos, X. D. e Antsaklis, P. J. (1999). Hybrid control systems using timed petri nets: Supervisory control design based on invariant properties, *Lecture Notes In Computer Science, Hybrid Systems V, Springer-Verlag*, **1567**: 142–162.

- Koutsoukos, X. D., He, K. X. e Antsaklis, M. D. L. P. J. (1998). Timed petri nets in hybrid systems: Stability and supervisory control, *Discrete Event Dynamic Systems* **8**(2): 137–173.
- Lahiri, K., Raghunathan, A., Dey, S. e Panigrahi, D. (2002). Battery-driven system design: a new frontier in low power design, *IEEE Comp. Society - VLSID*, pp. 1–7.
- Lam, L., Orgun, H., Lim, O., Hamilton, J., Vu, L., Vella, D. e Rand, D. (1995). Pulsed-current charging of lead-acid batteries – a possible means for overcoming premature capacity loss?, *Journal of Power Sources* **53**(2): 215–228.
- Lazzarin, T. B. (2006). *Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma técnica de avaliação de sua vida útil*, Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Le Bail, J., Alla, H. e David, R. (1991). Hybrid Petri Nets, *Proc. 1st European Control Conference, Grenoble, France* pp. 187–191.
- Leal, A. B. (2005). *Controle Supervisório Modular de Sistemas Híbridos*, PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Lemmon, M. D., He, K. X. e Markovsky, I. (1999). Supervisory Hybrid Systems, *IEEE Control Systems*, pp. 42–55.
- Liaw, B. Y., Bethune, K. P. e Yang, X. G. (2002). Advanced integrated battery testing and simulation, *Journal of Power Sources* **110**(2): 330–340.
- Lin, Z., Wen, F., Chung, C. e Wong, K. P. (2006). A survey on the applications of petri net theory in power systems, *Proceeding of the IEEE*, pp. 1–7.
- Linden, D. e Reddy, T. B. (2002). *Handbook of Batteries*, third Edition edn, McGrawHill, New York - USA.
- Little, S., Seegmiller, N., Walter, D., Myers, C. e Yoneda, T. (2007). Verification of analog/mixed-signal circuits using labeled hybrid petri nets, *International Conference on Computer-Aided Design*.

- Little, S., Walter, D., Seegmiller, N., Myers, C. e Yoneda, T. (2004). Verification of Analog and Mixed-Signal Circuits Using Timed Hybrid Petri Nets, *2nd International Symposium on Automated Technology for Verification and Analysis - ATVA 2004* .
- Lygeros, J. (2004). Lecture Notes on Hybrid Systems. Department of Electrical and Computer Engineering - University of Patras, Greece.
- Lynch, N., Segala, R. e Vaandrager, F. (2003). Hybrid I/O Automata. Massachusetts Institute of Technology - MIT.
- Macêdo, W. N. (2002). *Estudo de sistemas de geração de eletricidade utilizando as energias solar fotovoltaica e eólica*, Master's thesis, Universidade Federal do Pará - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Manwell, J. F., Rogers, A., Hayman, G., Avelar, C. T., McGowan, J. G., Wu, K. e Abdulwahid, U. (2005). *HYBRID2 - A HYBRID SYSTEM SIMULATION MODEL - THEORY MANUAL*, Renewable Energy Research Laboratory & Department of Mechanical Engineering University of Massachusetts, Amherst - MA - USA.
- Marsan, M. A., Balbo, G., Conte, G., Donatelli, S. e Franceschinis, G. (1995). *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*, Wiley Series in Parallel Computing - John Wiley and Sons, New Jersey - USA.
- Messenger, R. A. e Ventre, J. (2005). *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press, Florida - USA.
- Mohan, N., Undeland, T. M. e Robbins, W. P. (1995). *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 2nd edn, Ed. John Wiley & Sons.
- Munoz-Hernandez, G. A., Jones, D. I. e Fuentes-Goiz, S. I. (2005). Modelling and Simulation of a hydroelectric power station using MLD, *IEEE Computer Society - CONIELECOMP* pp. 1-6.
- Murillo, D. G. (2003). *Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos*, PhD thesis, Universitat Politecnica de Catalunya - Departament D'Enginyeria Electronica.

- Nguyen, T. e Bushnell, L. (2003). Advanced battery charging techniques: Pulse-charging in large-scale applications - design of divide and conquer technique for high-capacity batteries, *UWEE Technical Report Series, Seattle, USA* pp. 1–6.
- Nickoletatos, J. e Tselepis, S. (2003). Evaluation of literature search and results of survey about lifetime expectancy of components, in particular the energy storage systems in existing res applications. Technical report. Center for Renewable Energy Sources (CRES), Greece.
- Oliveira, L. G. M. (2005). *Estratégias de controle de carga e descarga em sistemas fotovoltaicos domiciliares*, Master's thesis, Universidade de São Paulo - USP.
- Paruchuri, V. K., Davari, A. e Feliachi, A. (2005). Hybrid Modeling of Power System using Hybrid Petri nets, *SSST '05* pp. 221–224.
- Patel, M. R. (2006). *Wind and Solar Power Systems - Design, Analysis, and Operation*, 2nd edition edn, CRC Press, New York - USA.
- Ramadge, P. e Wonham, W. (1989). The control of discrete event systems, *Proceedings of the IEEE*, **77**(1): 81–89.
- Rezai, M., Ito, M. R. e Lawrence, P. D. (1995). Modeling and simulation of hybrid control systems by global petri nets, *IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems, ISCAS '95* pp. 908–911.
- Rosas, P. A. C. e Estanqueiro, A. I. (2003). Guia de projeto elétrico de centrais eólicas - projeto elétrico e impacto de centrais eólicas na rede elétrica - vol. i, *Technical report*, Centro Brasileiro de Energia Eólica CBEE, Recife.
- Rosembach, R. H. (2004). *Conversor cc-cc bidirecional buck-boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico*, Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Ross, J. N., Markvart, T. e He, W. (2000). Modelling battery-charge regulation for a stand-alone photovoltaic system, *Solar Energy* **69**(3): 181–190.

- Ross, M. M. D. (2001). A simple but comprehensive lead-acid battery model for hybrid system simulation, *PV Horizon: Workshop on Photovoltaic Hybrid Systems, Montreal* pp. 1–12.
- Sá Junior, E. M. (2004). *Sistema fotovoltaico para iluminação pública em horário de ponta*, Master's thesis, Universidade Federal do Ceará - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Sauer, D. U. e Wenzl, H. (2008). Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems - using lead-acid batteries as example, *Journal of Power Sources* **176**(2): 534–546.
- Schiffer, J., Sauer, D. U., Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P. e Kaiser, R. (2007). Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems, *Journal of Power Sources* **168**(1): 66–78.
- Schilling, S. (1999). Ensuring lead-acid battery performance with pulse technology, *IEEE - Battery Conference on Applications and Advances* pp. 247–252.
- Shepherd, C. M. (1965). Design of primary and secondary cells ii. an equation describing battery discharge, *Journal of Electrochemical Society* **112**(7): 657–664.
- Sousa, J. R. B. (2005). Verificação de Propriedades de Sistemas Híbridos Modelados com Redes de Petri. Relatório Técnico. Universidade Federal de Campina Grande.
- Sousa, J. R. B. (2006). Um Formalismo Baseado em Redes de Petri para Estudar Sistemas Híbridos. Relatório Técnico. Universidade Federal de Campina Grande.
- Sousa, J. R. B. (2007). Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação em Sistemas Elétricos. Relatório Técnico. Universidade Federal de Campina Grande.
- Sousa, J. R. B. e Lima, A. M. N. (2008a). Modelagem e simulação de sistemas de múltiplas fontes de energia com redes de petri híbridas diferenciais, *SBSE 2008* pp. 1–6.

- Sousa, J. R. B. e Lima, A. M. N. (2008b). Modelagem e simulação do tempo de vida de bancos de baterias chumbo-ácido utilizados em sistemas de múltiplas fontes de energia, *CBA 2008, no prelo*, pp. 1–6.
- Sousa, J. R. B. e Lima, A. M. N. (2008c). Modeling and simulation of systems of multiple sources of energy by differential hybrid petri nets, *IEEE - ISIE 2008*, pp. 1861–1866.
- Sousa, J. R. B., Lima, A. M. N. e Perkusich, A. (2005a). Modeling and analyzing power consumption in sensor networks nodes based on differential hybrid petri nets, *The 31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON*, pp. 389–394.
- Sousa, J. R. B., Lima, A. M. N. e Perkusich, A. (2005b). Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem do Consumo de Energia de um Nó Sensor Sem Fio, *SBAI 2005 - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Luis, MA, Brasil, 21 a 23 de setembro de 2005*, pp. 1–8.
- Sousa, J. R. B., Sausen, P. S., Lima, A. M. N. e Perkusich, A. (2007). Redes de Petri Híbridas Diferenciais: Aplicação na Modelagem e no Gerenciamento Dinâmico de Energia de Redes de Sensores Sem Fio, *Sociedade Brasileira de Automática - Revista Controle & Automação* **18**(3): 278–291.
- Srinivasan, V., Wang, G. Q. e Wang, C. Y. (2003). Mathematical modeling of current–interrupt and pulse operation of valve-regulated lead acid cells, *Journal of The Electrochemical Society* **150**(3): A316–A325.
- Stevenson, W. D. (1986). *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, 2ª edição edn, McGraw-Hill, São Paulo - Brasil.
- Svoboda, V., Wenzl, H., Kaiser, R., Jossen, A., Baring-Gold, I., Manwell, J., Lundsager, P., Bindner, H., Cronin, T., Nørgård, P., Ruddell, A., Perujo, A., Douglas, K., Rodrigues, C., Joyce, A., Tselepis, S., van der Borg, N., Nieuwenhout, F., Wilmot, N., Mattera, F. e Sauer, D. U. (2007). Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems, *Solar Energy* **81**(11): 1409–1425.

- Tafticht, T., Agbossou, K. e Chériti, A. (2006). Dc bus control of variable speed wind turbine using a buck-boost converter, *IEEE - Power Engineering Society General Meeting* pp. 1–5.
- Tafticht, T., Agbossou, K., Chériti, A. e Doumbia, M. L. (2006). Output power maximization of a permanent magnet synchronous generator based stand-alone wind turbine, *IEEE - ISIE* pp. 2412–2416.
- Tafticht, T., Atif, K. e Agbossou, K. (2003). Utilisation des Réseaux de Pétri pour la Modélisation du Convertisseur MPPT d’un Système Photovoltaïque, *IEEE - CCECE* **1**(4-7): 543–546.
- Taylor, J. H. (1995). Rigorous handling of state events in matlab, *Proceedings of 4th IEEE Conference on Control Applications, Albany, NY*, pp. 156–161.
- Unitrode (1999). *U–510 Using the bq2031 to charge Lead-Acid Batteries*, Unitrode.
- Villani, E. (2004). *Modelagem e Análise de Sistemas Supervisórios Híbridos*, PhD thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.
- Walter, D. C. (2007). *Verification of Analog and Mixed-Signal Circuits Using Symbolic Methods*, PhD thesis, University of Utah - School of Computing.
- Walter, D., Little, S., Seegmiller, N., Myers, C. J. e Yoneda, T. (2007). Symbolic model checking of analog/mixed-signal circuits, *Design Automation Conference, 2007. ASP-DAC '07. Asia and South Pacific* pp. 316–323.
- Wang, W., Bai, X., Zhao, W., Ding, J. e Fang, Z. (2005). Hybrid Power System Model and the Method for Faults Diagnosis, *Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China*, pp. 1–5.
- Wenzl, H., Baring-Gould, I., Kaiser, R., Liaw, B. Y., Lundsager, P., Manwell, J., Rudell, A. e Svoboda, V. (2005). Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery, *Journal of Power Sources* **144**(2): 373–384.

- Winter, M. e Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?, *American Chemical Society* **35**(50).
- Woodworth, J. R., Thomas, M. G., Stevens, J. W., Harrington, S. R., Dunlop, J. P., Swamy, M. R. e Demetrius, L. (1994). Evaluation of the batteries and charge controllers in small stand-alone photovoltaics systems, *IEEE Photovoltaic Specialists Conference* pp. 1–13.
- Wu, Y., Wu, W., Zeng, J., Sun, G., Su, H. e Chu, J. (2002). Modeling and simulation of hybrid dynamical systems with generalized differential petri nets, *Proceedings of the IEEE - International Symposium on Intelligent Control, Vancouver, Canadá* pp. 789–794.
- Yang, H., Lu, L. e Zhou, W. (2007). A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system, *Solar Energy* **81**(1): 76–84.
- Zhan, C.-J., Wu, X., Kromlidis, S., Ramachandaramurthy, V., Barnes, M., Jenkins, N. e Ruddell, A. (2003). Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer, *IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution* **150**(2): 175–182.