

TESE DE DOUTORADO Nº 119

**UMA ABORDAGEM PARA A MODELAGEM
DA CONSCIÊNCIA DE DISPONIBILIDADE
ENERGÉTICA EM NÓS SENSORES
DE REDE DE SENSORES SEM FIO**

Adriano Borges da Cunha

DATA DA DEFESA: 22/12/2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Uma Abordagem para a Modelagem da Consciência de
Disponibilidade Energética em Nós Sensores de Rede
de Sensores Sem Fio**

Adriano Borges da Cunha

Orientador: Prof. Diógenes Cecílio da Silva Jr., PhD.

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas de Computação e de Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Microeletrônica e Microssistemas

**Belo Horizonte
Dezembro de 2010**

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**UMA ABORDAGEM PARA A MODELAGEM DA CONSCIÊNCIA
DE DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA EM NÓS SENSORES DE
REDE DE SENSORES SEM FIO**

Adriano Borges da Cunha

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Diógenes Cecílio da Silva Júnior

Belo Horizonte - MG

Dezembro de 2010

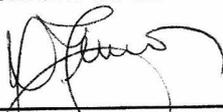
**"Uma Abordagem Para A Modelagem da Consciência de
Disponibilidade Energética Em Nós Sensores de Rede de
Sensores Sem Fio"**

Adriano Borges da Cunha

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de dezembro de 2010.

Por:



Prof. Dr. Diógenes Cecílio da Silva Júnior
DEE (UFMG) - Orientador



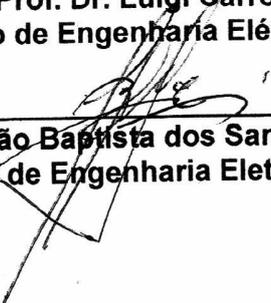
Prof. Dr. Antônio Otávio Fernandes
DCC (UFMG)



Prof. Dr. Carlos Augusto Paiva da Silva Martins
DCC (PUC-MG)



Prof. Dr. Luigi Carro
Departamento de Engenharia Elétrica (UFRGS)



Prof. Dr. João Baptista dos Santos Martins
Departamento de Engenharia Eletrônica (UFSM)

À minha esposa Ana
Lúcia e à minha filha
Luana, em reconheci-
mento aos muitos mo-
mentos roubados do
nosso convívio durante
a realização deste tra-
balho.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a modelagem da consciência de disponibilidade energética (CODE) em nós sensores de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). Esta técnica consiste em prover a informação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor, em qualquer instante de tempo, de modo a viabilizar a manutenção, implementação de técnicas de auto-gerenciamento, planejamento de métricas de qualidade de serviço (QoS) e viabilidade operacional de RSSF. Para tal é necessária a modelagem da unidade de suprimento de energia dos nós sensores da RSSF. Portanto, a implementação da CODE consiste em modelar pilhas, baterias e dispositivos de captura de energia ambiental. No caso de RSSF sem a capacidade de captura de energia do ambiente, ela é composta apenas por pilhas ou baterias. Em RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente, o problema de estimação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor consiste em modelar e gerenciar eficientemente as múltiplas fontes de energia da unidade de suprimento de energia dos nós sensores. O trabalho está dividido em duas fases: a primeira fase consiste em elaborar, a partir de uma abordagem qualitativa e quantitativa, a primeira geração de modelos de bateria para RSSF, baseados no método de sistema de escrituração, que incorporem a taxa de descarga, a retenção de capacidade, o efeito de relaxação, a vida de ciclo e a eficiência de recarga. Os resultados mostram que os modelos propostos para as baterias alcalinas e de íons de lítio tiveram erro médio máximo inferior a 3,6%. A

segunda fase consiste na modelagem e projeto de uma unidade de suprimento de energia simples e de baixo custo para nós sensores de uma RSSF com a capacidade de captura de energia solar, com a implementação da CODE e o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (RPMP). Resultados mostram que a eficiência global diverge do ponto ótimo de operação de menos de 7%, confirmando que é possível também ajustar o ponto de máxima potência de acordo com a demanda de carga. A caracterização do sistema composto por um mini-painel solar e supercapacitores, resultou em uma nova abordagem energeticamente eficiente, que habilita o nó sensor a receber energia de três fontes possíveis: supercapacitores, bateria de reserva e o mini-painel solar.

Abstract

This work aims at modelling the Awareness of Available Energy (CODE in portuguese) in Wireless Sensor Network (WSN) nodes. This technique consists in providing the information of the amount of available energy in each sensor node at any time, making it possible to maintain, implement self-management techniques, plan quality of service (QoS) metrics and operational viability of WSN. In order to accomplish this it is necessary to model the energy supply unit of WSN nodes. Thus, the implementation of CODE consists of the modelling of batteries and environment energy harvest devices. In case of a WSN with no energy harvesting capability, this supply is based only on batteries. In case of a Energy-Harvesting WSN, the problem of estimating the amount of available energy consists of modelling and efficiently managing multiple sources of energy. This work is divided in two phases. The first phase is the elaboration, from a qualitative and quantitative approach, the first-generation of battery models for WSN, based on a book-keeping system method, that include the effects of discharge rate, relaxation, capacity retention, cycle life and recharging efficiency. The results show that models proposed for alkaline and lithium-ion batteries had maximum average error of less than 3,6%. The second phase is the modelling and project of a simple and low cost energy supply unit with a solar energy harvest device, implementing CODE and maximum-power-point tracking (MPPT). Experiments show that the global efficiency diverges from the optimal operating

set point by less than 7%, confirming that it is also possible to adjust the maximum-power-point according to load demands. Characterization of an unit composed of a mini solar panel and supercapacitors, resulted in a new energy-efficient approach, that enables WSN nodes to obtain energy from three different sources: supercapacitors, back-up battery and a solar panel.

Agradecimentos

A Deus por sempre iluminar meu caminho, me dar coragem para enfrentar os desafios da vida e permitir que minha filha permanecesse entre nós.

Aos grandes amores de minha vida: minha esposa Ana Lúcia e minha filha Luana pelo apoio, carinho e compreensão.

Aos meus grandes e verdadeiros heróis: meus pais, Francisco e Maria por me ensinar a humildade, a dignidade e a honra.

Aos meus irmãos pelo apoio e amizade em todos os momentos de dificuldades.

Ao meu orientador, Prof. Diógenes pelo apoio, incentivo, confiança e compreensão. Espero sempre poder atender as expectativas e contar com sua amizade e apoio.

Ao brilhante jovem de Valadares, que responde pelo nome de Breno R. de Almeida, e atual "comandante" da Petrobrás em Santos. Agradeço pelas dicas e contribuições valorosas. Conte comigo sempre.

Ao mais novo doutorando da *Brown University*, Marcelo Henrique T. Martins. Agradeço pelas contribuições valorosas e disponibilidade. Pode contar comigo até mesmo do outro lado do mundo!

Ao grande especialista no EAGLE, Daniel Flor, pelos *layouts* profissionais.

Ao Prof. Alberto de F. Gontijo (Coltec) pelo apoio, conselhos, amizade e compreensão.

Ao Prof. Guilherme A. S. Pereira por ter investido tempo e paciência para fazer este modelo.

Ao CNPq, Capes e Fapemig pelo suporte financeiro para difundir a UFMG no mundo.

Enfim, a todas aquelas pessoas que, direta ou indiretamente, apoiaram este trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Principais Contribuições da Tese	6
1.4 Organização do texto	7
2 Consciência de Disponibilidade Energética em RSSF	9
2.1 Introdução	9
2.2 Fases de Otimização de Energia em RSSF	10
2.3 Modelagem de Pilhas e Baterias	16
2.3.1 Fundamentos de Baterias	16
2.3.2 Terminologia em Baterias	21
2.3.3 Fatores que Afetam a Capacidade da Bateria	24
2.3.4 Modelos de Bateria	27
2.3.5 Parâmetros Utilizados na Estimaco da Capacidade Residual	36
2.3.6 Características das Pilhas Alcalinas utilizadas nos Experimentos	39
2.3.7 Características das Baterias de Íons de Lítio utilizadas nos Experimentos	42
2.3.8 Proposio	47
2.4 Modelagem e Projeto de um Mdulo de Captura de Energia do Ambiente	48
2.4.1 Introduo	48
2.4.2 Modelagem de Mini-Painéis Solares	52
2.4.3 Modelagem de Supercapacitores	58
2.4.4 Proposio	61

3	Estimação da Capacidade Residual de Baterias em Nós Sensores de RSSF	65
3.1	Estimação da Capacidade Residual de Pilhas Alcalinas de Alta Capacidade	66
3.1.1	Plataforma de Medição	67
3.1.2	Solução Proposta	70
3.1.3	Bancada de Testes	76
3.1.4	Resultados	79
3.1.5	Discussão	82
3.1.6	Conclusão	83
3.2	Estimação da Capacidade Residual de Pilhas Alcalinas de Baixa Capacidade	84
3.2.1	Requisitos	84
3.2.2	Plataforma de Medição	84
3.2.3	Resultados	86
3.2.4	Primeira Geração de Modelo de Baterias Alcalinas para RSSF baseados no Sistema de Escrita- turação	98
3.2.5	Validação do Modelo Comportamental da Bateria Al- calina (MCBA)	103
3.3	Estimação da Capacidade Residual de Baterias de Íons de Lítio	120
3.3.1	Requisitos	120
3.3.2	Plataforma de Medição	121
3.3.3	Resultados	121
3.3.4	Primeira Geração de Modelo de Baterias de Íons de Lítio para RSSF baseados no Sistema de Escrita- turação	133
3.3.5	Validação do Modelo Comportamental da Bateria de Íons de Lítio (MCBIL)	138
3.4	Discussão	156
3.5	Conclusão	158
4	Modelagem e Projeto de um Módulo de Captura de Energia Solar Simples e de Baixo Custo, com RPMP e CODE	161
4.1	Caracterização de Mini-Painéis Solares pa- ra RSSF	162
4.2	Caracterização de Supercapacitores para RSSF	163
4.2.1	Validação do Modelo Comportamental do Supercapa- citor (MCS)	173
4.3	Caracterização do Sistema Composto pelo Mini-painel Solar e os Supercapacitores	178
4.3.1	Solução de Hardware Proposta e Implementação	178
4.3.2	Resultados e Discussão	180
4.3.3	Conclusão	185

4.3.4	Melhorando e Implementando uma Nova Solução de Hardware	185
4.3.5	Resultados e Discussão	187
5	Conclusões	193
5.1	Síntese das Conclusões	193
5.2	Trabalhos Futuros	195
	Referências Bibliográficas	196
A	Tabelas de Capacidade Efetiva das Pilhas Utilizadas nos Experimentos	205
B	INTI: Unidade Integrada de Captura de Energia Solar	209
B.1	Requisitos e Solução Proposta	209
B.2	Implementação da Solução Proposta	211
C	Diagrama Esquemático da INTI	215

Lista de Figuras

1.1	Proposta de trabalho para a modelagem da CODE para RSSF.	5
2.1	Solução proposta por David Culler [Jiang et al., 2007].	13
2.2	Diagrama atualizado das fases de otimização de energia.	15
2.3	Características de descarga com corrente constante para a bateria alcalina Duracell MN1604, retirado de [Duracell, 2008a].	25
2.4	Efeito de relaxação [Park et al., 2001].	26
2.5	Efeito da temperatura e da carga para a pilha alcalina Duracell MN1500, retirado de [Duracell, 2008b].	27
2.6	Circuito para testar o efeito de relaxação [Rao et al., 2005].	29
2.7	Princípio do Método de Medições Diretas.	31
2.8	Princípio do método de Contagem de Coulomb.	32
2.9	Princípio do Sistema de Escrituração.	32
2.10	Arquitetura geral de um sistema de indicação de <i>SoC</i> .	37
2.11	Efeito da temperatura sobre a retenção de capacidade para vários tipos de pilhas, retirado de [Duracell, 2008b].	40
2.12	Características de descarga com corrente constante para a pilha alcalina Duracell MN1500, retirado de [Duracell, 2008b].	41
2.13	Exemplo de Bateria alcalina Duracell MN1604 desmontada.	41
2.14	Características de descarga com corrente constante para a bateria alcalina Duracell MN1604, retirado de [Duracell, 2008b].	42
2.15	Características de descarga da bateria LIR2450 para três níveis de corrente diferentes [AA Portable Power Corp., 2009].	44
2.16	Efeito da temperatura sobre as características de descarga da bateria LIR2450 [AA Portable Power Corp., 2009].	45
2.17	Efeito da temperatura sobre a retenção de capacidade da bateria LIR2450 [AA Portable Power Corp., 2009].	46
2.18	Efeito da vida de ciclo na capacidade da bateria LIR2450 [AA Portable Power Corp., 2009].	47
2.19	Técnicas utilizadas na captura da energia solar.	50

2.20	Técnica proposta para a gestão eficiente da energia solar capturada.	52
2.21	Circuito equivalente para o mini-painel solar [Soto et al., 2006].	53
2.22	Curva V-I do mini-painel solar SCC3766 [Solarbotics Ltda, 2008].	57
2.23	Modelo de circuito equivalente proposto por Zubieta.	59
2.24	Diagrama de blocos da unidade de suprimento de energia.	62
3.1	Diagrama esquemático do MICA2 [Crossbow, 2006].	68
3.2	<i>Sensorboard</i> MTS101.	69
3.3	Diagrama de blocos da DMC.	71
3.4	Diagrama elétrico da DMC.	72
3.5	Placa de circuito impresso da DMC.	72
3.6	Circuito de emulação do MICA2.	73
3.7	DMC soldada na área de prototipagem da MTS101.	74
3.8	Diagrama elétrico da MTS101.	74
3.9	MICA2 adaptado.	77
3.10	Diagrama esquemático do experimento.	78
3.11	Linha do tempo das medições do experimento.	79
3.12	Resultados dos diferentes métodos de estimação da capacidade residual da bateria.	80
3.13	Diagrama esquemático do experimento.	85
3.14	Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 100%.	86
3.15	Perfil de descarga das três baterias alcalinas de baixa capacidade, descarregadas com c.t. de 100%.	87
3.16	Perfil de descarga de corrente da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 100%.	88
3.17	Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 50%.	91
3.18	Perfil de descarga das três baterias alcalinas de baixa capacidade, descarregadas com c.t. de 50%.	92
3.19	Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 20%.	93
3.20	Perfil de descarga das três baterias alcalinas de baixa capacidade, descarregadas com c.t. de 20%.	94
3.21	Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 5%.	96
3.22	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 100%.	105
3.23	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 100%.	106
3.24	Capacidade residual para a bateria 3, descarregada com c.t. de 100%.	107

3.25	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 50%.	109
3.26	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 50%.	110
3.27	Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 50%.	111
3.28	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 20%.	113
3.29	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 20%.	114
3.30	Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 20%.	115
3.31	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 5%.	117
3.32	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 5%.	118
3.33	Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 5%.	119
3.34	Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 100%.	122
3.35	Perfil de descarga de doze baterias de íons de lítio, descar- regadas com c.t. de 100%.	123
3.36	Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 50%.	125
3.37	Perfil de descarga das três baterias de íons de lítio, descar- regadas com c.t. de 50%.	126
3.38	Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 20%.	128
3.39	Perfil de descarga das três baterias de íons de lítio, descar- regadas com c.t. de 20%.	129
3.40	Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 5%.	131
3.41	Perfil de descarga das três baterias de íons de lítio, descar- regadas com c.t. de 5%.	132
3.42	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 100%.	139
3.43	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 100%.	140
3.44	Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 100%.	141
3.45	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 50%.	144
3.46	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 50%.	145
3.47	Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 50%.	146
3.48	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 20%.	148
3.49	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 20%.	149
3.50	Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 20%.	150
3.51	Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 5%.	152
3.52	Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 5%.	153
3.53	Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 5%.	154
4.1	Carga e descarga de supercapacitor de 22 F com corrente cons- tante de 1 A.	165

4.2	Modelo simplificado para os supercapacitores de aerogel de carbono para aplicações de RSSF.	166
4.3	Circuito de carga do supercapacitor sob teste.	167
4.4	Tensão de carga do supercapacitor sob teste.	168
4.5	Corrente de carga do supercapacitor sob teste.	169
4.6	tensão de descarga do supercapacitor com carga resistiva de 150 Ω	174
4.7	Curvas obtidas com os dados experimentais e as Equações dos modelos MCS e RCS, para a descarga do supercapacitor com carga resistiva de 150 Ω	175
4.8	Diagrama elétrico da implementação em hardware.	179
4.9	Curva V-I para a carga dos supercapacitores sem regulação de tensão.	181
4.10	Curvas características do mini-painel com regulação de tensão.	182
4.11	Tensão nos supercapacitores - carga chaveada com c.t. de 1%.	183
4.12	Tensão no supercapacitores - carga constante (resistor de 100 Ω) e carga chaveada com c.t. de 1% conectadas.	184
4.13	Diagrama elétrico da nova solução de hardware.	186
4.14	Curvas características do mini-painel com regulação de tensão.	187
4.15	Potência do mini-painel solar e as respectivas correntes.	188
4.16	Tensão nos supercapacitores para as cargas constantes da Tabela 4.3 e carga chaveada com c.t. de 1% conectadas.	190
B.1	Diagrama de blocos da unidade de suprimento de energia.	210
B.2	Camadas inferior e superior da PCI da Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI).	214
C.1	Diagrama esquemático da Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI).	216

Lista de Tabelas

2.1	Ciclos de trabalho utilizado no trabalho de Rao [Rao et al., 2005].	30
3.1	Valores finais estimados para a capacidade residual da bateria.	81
3.2	Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com c.t. de 100%.	89
3.3	Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com c.t. de 50%.	92
3.4	Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com c.t. de 20%.	95
3.5	Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com c.t. de 5%.	97
3.6	Síntese dos resultados da contagem de Coulomb dos arquivos de corrente das baterias alcalinas sob teste.	97
3.7	Capacidade recuperada devido ao efeito de relaxação.	100
3.8	Síntese dos resultados da nova contagem de Coulomb das baterias alcalinas com tensão final de 1,6 V.	104
3.9	Capacidade recuperada devido ao efeito de relaxação.	104
3.10	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, com c.t. de 100%.	108
3.11	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 50%.	112
3.12	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 20%.	116
3.13	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 5%.	120
3.14	Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com c.t. de 100%.	124
3.15	Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com c.t. de 50%.	127
3.16	Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com c.t. de 20%.	130

3.17	Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com c.t. de 5%.	133
3.18	Síntese dos resultados da contagem de Coulomb dos arquivos de corrente das baterias de íons de lítio sob teste.	133
3.19	Retenção de capacidade para cada um dos c.t.'s utilizados nos experimentos das baterias de íons de lítio.	135
3.20	Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 100%.	139
3.21	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 100%.	142
3.22	Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 50%.	143
3.23	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 50%.	147
3.24	Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 20%.	147
3.25	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 20%.	151
3.26	Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 5%.	151
3.27	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 5%.	155
3.28	Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 5%.	156
4.1	Valores dos parâmetros calculados a partir dos dados obtidos nos experimentos dos supercapacitores sob teste.	171
4.2	Valores dos parâmetros calculados, conforme instruções do fabricante, a partir dos dados obtidos nos experimentos dos supercapacitores sob teste.	172
4.3	Valor da carga constante para cada uma das correntes de teste.	189
4.4	Eficiência do sistema sob várias correntes.	191
A.1	Capacidade Efetiva de 1 em 1 mA para a pilha alcalina Duracell MN1500, considerando-se tensão de corte de 0,8 V.	206
A.2	Capacidade Efetiva de 1 em 1 mA para a bateria alcalina Duracell MN1604, considerando-se tensão de corte de 4,8 V.	207
A.3	Capacidade Efetiva de 1 em 1 mA para a bateria de íons de lítio LIR2450, considerando-se tensão de corte de 2,75 V.	208

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são redes compostas por pequenos dispositivos eletrônicos autônomos, denominados nós sensores, que possuem recursos limitados, tais como pouca capacidade computacional, pouca memória, capacidade de comunicação limitada e pouca reserva de energia. Esses nós sensores coletam dados do ambiente monitorado, realizam ou não processamento local e disseminam os dados para um ponto de acesso podendo usar, por exemplo, comunicação multi-saltos. As RSSF possuem um grande número de elementos distribuídos, operam sem intervenção humana direta, possuem restrições severas de energia e devem possuir mecanismos para autogerenciamento (auto-configuração, auto-manutenção e auto-organização). Este último se torna necessário devido à deposição (lançamento) dos nós sensores em áreas remotas, à pouca capacidade individual de cada um deles e à topologia dinâmica. Além disso, os nós sensores de uma RSSF podem ser descartados, perdidos ou saírem de serviço por diferentes motivos, tais como:

falta de energia, problemas na deposição, falhas nos componentes e falha de comunicação. Uma descrição completa para o projeto de nós sensores, incluindo suas características, requisitos e componentes funcionais, pode ser encontrada em Vieira e outros [Vieira et al., 2006].

Em muitas aplicações, as RSSF terão grandes quantidades de nós sensores distribuídos em áreas remotas ou mesmo inóspitas e, por isso, terão como principal fonte de alimentação as baterias. Como o tempo de vida da rede depende da quantidade de energia disponível, cada nó sensor deve balancear seus limitados recursos com o objetivo de aumentar o tempo de vida da RSSF. Esta necessidade de gerenciar os recursos da rede, de uma maneira inteligente e autônoma, faz com que o conhecimento da quantidade de energia disponível se torne um importante requisito para a manutenção, implementação de técnicas de auto-gerenciamento, planejamento de métricas de qualidade de serviço (QoS) [Chen Varshney, 2004] e viabilidade da RSSF.

Apesar da importância do conhecimento da quantidade de energia disponível, trabalhos recentes sobre o desenvolvimento de algoritmos e protocolos em RSSF ainda utilizam modelos de energia ideais, pois esses modelos são as únicas alternativas disponíveis em simuladores para RSSF [Jevtic et al., 2009]. Isto foi constatado no trabalho de Dimic e outros [Jevtic et al., 2009], que realizou uma avaliação e comparação dos simuladores existentes para RSSF e concluiu que uma das principais desvantagens dos simuladores existentes, tais como Castalia [NICTA: National ICT Australia, 2009], NS-2 [NS Proj., 2009] e TOSSIM [Levis et al., 2004, Perla et al., 2008, TinyOS Project, 2009], é a disponibilidade de modelos de energia ideais. O problema é que esses modelos de energia ideais estão muito longe do comportamento real de baterias e, portanto, podem resultar em erros significativos da estimação de energia desses dispositivos. Além disso, técnicas tradicionais para a estimação da

capacidade residual de baterias não se ajustam às características das RSSF e novas alternativas devem ser estudadas e analisadas. É por isso que a pesquisa sobre a estimação da capacidade residual ou *State-of-Charge (SoC)* de baterias para RSSF é de importância chave [da Cunha da Silva Jr., 2009] e é uma das grandes motivações para a realização deste trabalho.

Novas tecnologias para a captura de energia do ambiente estão sendo propostas para resolver o problema de escassez de energia em Rede de Sensores Sem Fio [Niyato et al., 2007, Raghunathan et al., 2005]. Dentre as fontes alternativas de energia existentes, a energia solar é a mais promissora, pois, além de ser renovável, oferece a maior densidade de potência [Raghunathan et al., 2005, Roundy et al., 2004]. Neste novo contexto, o problema de estimação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor, assim como no caso de baterias, continua sendo de importância chave e se torna mais desafiador, pois, conforme a composição do sistema de captura de energia solar (painel solar, supercapacitores e baterias recarregáveis, por exemplo), poderão haver múltiplas fontes de energia para alimentar o nó sensor. Desse modo, para se obter a quantidade de energia disponível total do sistema, essas múltiplas fontes deverão ser modeladas. Além disso, elas deverão ser gerenciadas eficientemente, de modo a otimizar o uso de energia baseado no comportamento do dispositivo de captura de energia solar. Portanto, a extensão do conhecimento da quantidade de energia disponível em RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente é a outra grande motivação para a realização deste trabalho.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a modelagem da Consciência de Disponibilidade Energética (CODE) em nós sensores de RSSF. Esta técnica consiste em prover a informação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor, em qualquer instante de tempo, de modo a viabilizar a manutenção, implementação de técnicas de auto-gerenciamento, planejamento de métricas de qualidade de serviço (QoS) e viabilidade operacional de RSSF. Para tal é necessária a modelagem da unidade de suprimento de energia dos nós sensores da RSSF. No caso de RSSF sem a capacidade de captura de energia do ambiente, ela é composta apenas por pilhas ou baterias. Portanto, a implementação da CODE consiste em modelar pilhas e baterias. Em RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente, o problema de estimação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor consiste em modelar e gerenciar eficientemente as múltiplas fontes de energia da unidade de suprimento de energia dos nós sensores. O trabalho está dividido em duas fases, conforme ilustrado na Fig. 1.1.

A primeira fase consiste em elaborar, a partir de uma abordagem quantitativa e qualitativa, a primeira geração de modelos de baterias alcalinas e de íons de lítio para RSSF, que incorporem a taxa de descarga, a retenção de capacidade e o efeito de relaxação. Além desses efeitos, os modelos elaborados para as baterias de íons de lítio também devem incorporar o efeito da vida de ciclo e da eficiência de recarga. A abordagem deve ser quantitativa, para que os modelos se aproximem do comportamento real das baterias. Além disso, a abordagem também deve ser qualitativa, tendo em vista que modelos de baterias complexos não se adequam às limitações computacionais e energéticas das RSSF.

A segunda fase consiste na modelagem e no projeto de uma unidade de

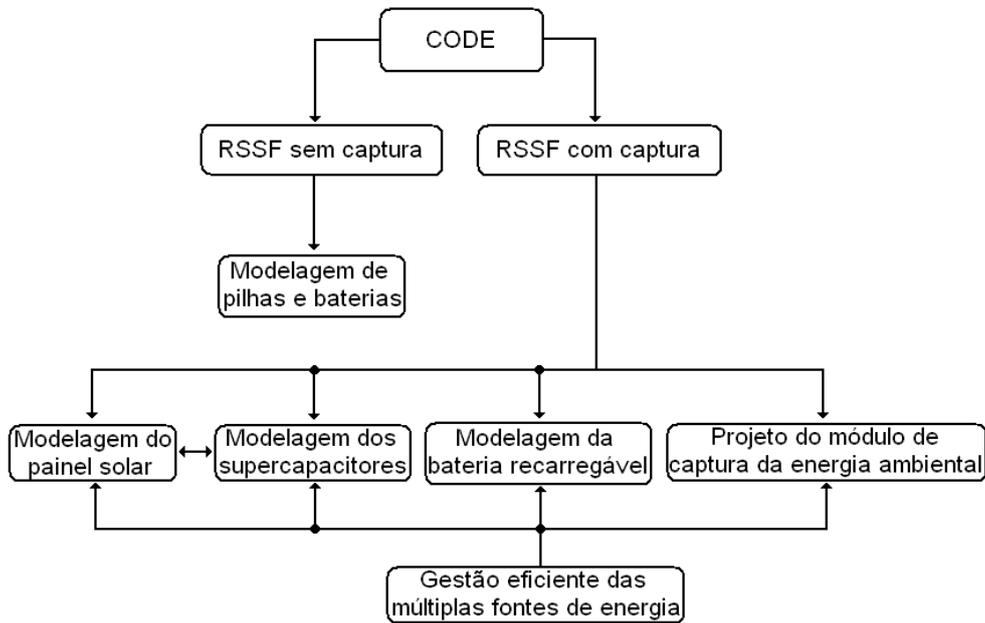


Figura 1.1: Proposta de trabalho para a modelagem da CODE para RSSF.

suprimento de energia simples e de baixo custo para nós sensores de uma RSSF com a capacidade de captura de energia solar, habilitada com a Consciência de Disponibilidade Energética (CODE) e o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (RPMP). Para a obtenção da quantidade de energia disponível total do sistema, as múltiplas fontes que compõem a unidade de suprimento de energia devem ser modeladas. Contudo, a abordagem adotada para a modelagem também deve ser quantitativa, de modo que os modelos para os dispositivos que compõem a unidade de suprimento de energia se aproximem dos seus comportamentos reais, e também qualitativa, de modo que os modelos sejam computacionalmente e energeticamente eficientes. Adicionalmente, tanto a modelagem quanto o projeto da unidade de suprimento de energia devem ser elaborados tendo sempre em vista a gestão eficiente das múltiplas fontes de energia.

1.3 Principais Contribuições da Tese

As principais contribuições alcançadas com o desenvolvimento deste trabalho são as seguintes:

- **Primeira geração de modelos de baterias alcalinas para RSSF, baseada no método de sistema de escrituração.** A partir de uma abordagem quantitativa e qualitativa, foi elaborada a primeira geração de modelos de baterias alcalinas para RSSF, que levam em conta o efeito da taxa de descarga, o efeito de relaxação e a retenção de capacidade. Estes modelos irão substituir os modelos ideais utilizados em simuladores de RSSF;
- **Primeira geração de modelos de baterias de íons de lítio para RSSF, baseada no método de sistema de escrituração.** A partir de uma abordagem quantitativa e qualitativa, foi elaborada a primeira geração de modelos de baterias de íons de lítio para RSSF, que levam em conta o efeito da taxa de descarga, o efeito de relaxação, retenção de capacidade, a vida de ciclo e a eficiência de recarga. Estes modelos, juntamente com os modelos do painel solar e dos supercapacitores, poderão ser incorporados em simuladores de RSSF, para viabilizar a simulação de RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente (solar);
- **Modelo de painel solar adequado às limitações das RSSF.** Foi elaborado um modelo de painel solar simplificado que elimina a complexidade dos modelos tradicionais e possibilita o rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP), obtida a partir de uma nova abordagem, que ajusta o PMP de acordo com a demanda da carga;

- **Modelo de supercapacitores mais realístico.** Foi elaborado um modelo que se aproxima do comportamento real de supercapacitores, diferentemente dos modelos RC simples utilizados em RSSF;
- **Projeto de uma unidade integrada de captura de energia solar simples e de baixo custo, habilitada com a CODE e o RPMP.** Apesar de ainda não haver resultados disponíveis, foi elaborado o projeto de uma unidade integrada de captura de energia solar simples e de baixo custo, que estará habilitada com a CODE e o RPMP.

1.4 Organização do texto

Este texto está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta o conceito da consciência de disponibilidade energética (CODE), a revisão bibliográfica relacionada à modelagem de pilhas e baterias e à modelagem e projeto de módulos de captura de energia do ambiente. O capítulo 3 descreve a metodologia e os resultados obtidos para a estimação da capacidade residual de baterias alcalinas e de íons de lítio em nós sensores de RSSF. O capítulo 4 descreve a metodologia e os resultados obtidos para a modelagem do painel solar e dos supercapacitores que, juntamente com a bateria de íons de lítio modelada no capítulo 3, constituem o módulo de captura de energia solar. O capítulo 5 apresenta as conclusões finais e os trabalhos futuros. O apêndice A apresenta as tabelas de capacidade efetiva elaboradas para as baterias alcalinas e de íons de lítio utilizadas nos experimentos. O apêndice B apresenta o projeto da unidade de suprimento de energia de uma RSSF com a capacidade de captura de energia solar. O apêndice C encerra este trabalho apresentado o diagrama esquemático da unidade de suprimento de energia solar projetada.

Capítulo 2

Consciência de Disponibilidade Energética em RSSF

2.1 Introdução

Consciência de disponibilidade energética (CODE) em RSSF consiste em prover a informação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor, em qualquer instante de tempo, de modo a viabilizar o planejamento operacional de uma RSSF. Assim como acontece na consciência energética, a consciência de disponibilidade energética pode ser estendida para toda a RSSF, podendo ser implementada no nível do nó, enlace e rede. De acordo com a informação de disponibilidade de energia, a CODE pode viabilizar o provisionamento e seleção de tarefas do nó sensor, tais como ajuste dinâmico da potência de transmissão, escalonamento do ciclo de trabalho (DCS, em inglês), suporte a esquemas de correção de erros adaptativos, distribuição de tráfego e controle de topologia, além de notificar o gerente da RSSF para

efetuar a atualização do mapa de energia da rede e o provisionamento de novos lançamentos de nós sensores. A implementação dessa funcionalidade requer a modelagem da unidade de suprimento de energia dos nós sensores. No caso de RSSF sem a capacidade de captura de energia do ambiente, a unidade de suprimento de energia dos nós é composta apenas por pilhas ou baterias. Portanto, a implementação da consciência de disponibilidade energética consiste em modelar pilhas e baterias.

Em RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente (solar, no caso deste trabalho), o problema de estimação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor se torna mais desafiador, pois, conforme a composição do sistema de captura de energia (mini-painel solar, supercapacitores e baterias recarregáveis, por exemplo), poderá haver múltiplas fontes de suprimento de energia. Desse modo, para se obter a quantidade de energia disponível, essas múltiplas fontes deverão ser modeladas. Além disso, há o surgimento de um novo problema, que tem importância chave na eficiência do sistema: a gestão eficiente dessas múltiplas fontes de energia, de modo a otimizar o uso de energia baseado no comportamento do dispositivo de captura de energia solar.

2.2 Fases de Otimização de Energia em RSSF

A compreensão das características de consumo de energia de nós sensores individuais e a extensão do tempo de vida de uma RSSF são uma área ativa de pesquisa [Ganesan et al., 2003]. Assim, a progressão natural das técnicas de otimização de energia em RSSF se iniciou com o projeto *low-power* dos componentes, evoluiu para o projeto consciente de energia, que, em seguida, foi complementado pelo projeto consciente de bateria e, recentemente, há o

projeto consciente de captura de energia do ambiente.

O projeto *low-power* investigou técnicas para a redução do consumo de energia em circuitos digitais CMOS [Chandrakasan et al., 1992]. O resultado dessas técnicas pode ser visto, por exemplo, nos microcontroladores atuais, que possuem baixíssima dissipação de potência devido ao baixo nível de tensão de operação e aos modos de gerenciamento de energia disponíveis. Tais modos possibilitam o desligamento, via software, de algumas partes do microcontrolador, tais como periféricos, interfaces, relógio e até mesmo a CPU.

O projeto consciente de energia investigou várias técnicas de gerenciamento e de otimização de energia nos seguintes níveis: nó sensor, enlace e rede [Raghunathan et al., 2002], tendo em vista que a otimização de energia em RSSF é muito mais complexa, pois envolve, não somente a redução do consumo de energia de um único nó sensor, mas também o aumento do tempo de vida da rede inteira. Alguns exemplos dessas técnicas são o escalonamento dinâmico de tensão (DVS, em inglês) para a unidade de processamento, o processamento de sinais escalável para a unidade de sensores e o escalonamento dinâmico de modulação para a unidade de comunicação. Em um trabalho nosso realizado anteriormente [da Cunha da Silva Jr., 2006] foi demonstrado que o ajuste dinâmico da potência de transmissão do nó sensor, de acordo com o indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI, em inglês) e o número de pacotes descartados, reduziu o consumo de energia do nó sensor em, aproximadamente, 40%.

O projeto consciente da bateria inclui um conjunto de tecnologias que auxiliam na exploração das características da bateria, de modo a alcançar extensões do tempo de vida da RSSF, além daqueles alcançados pelos projetos *low-power* e consciente de energia isoladamente. Para muitos sistemas

eletrônicos, o tempo de vida alcançado pela bateria depende, não somente da energia consumida pelo sistema, mas também da maneira pela qual o sistema drena a carga da bateria e das características específicas da bateria. Por exemplo, um modelo de energia baseado em medição para o MICA2 [Crossbow, 2006] foi descrito em Shnayder e outros [Shnayder et al., 2004] para uso em ambientes de simulação de RSSF. Contudo, a maioria dos trabalhos em RSSF encontrados na literatura não consideravam o impacto das características da bateria e da temperatura do ambiente na estimação do tempo de vida dos nós sensores, pois eram baseados somente em simulação de modelos genéricos de baterias e não se baseavam em conclusões quantitativas decorrentes do uso de plataformas de RSSF e baterias reais. Este problema foi constatado por Polastre e outros [Szewczyk et al., 2004], que realizaram experimentos em campo e verificaram que o tempo de vida de cada um dos nós sensores utilizados no experimento era muito menor do que o esperado, devido à exaustão prematura das baterias.

O trabalho de Srivastava e outros [Park et al., 2001] foi o primeiro que, experimentalmente, examinou as características de descarga da bateria em nós sensores. Eles conduziram os experimentos utilizando uma bateria primária de lítio comercial (CR2354) e analisaram o impacto das características de descarga da bateria em relação ao perfil de carga de um nó sensor similar ao MICA. Contudo, os autores consideraram somente um conjunto limitado de parâmetros de uma RSSF. Por exemplo, eles utilizaram a potência de transmissão fixa, não consideraram o efeito da temperatura do ambiente sobre a bateria e não avaliaram o impacto das características de descarga da bateria no nível da rede. Uma de suas principais descobertas mostrou que a capacidade da bateria era significativamente degradada pelo conversor DC-DC utilizado para alimentar o nó sensor do experimento. Uma conclusão similar

foi também relatada no trabalho de Polastre e outros [Szewczyk et al., 2004].

Park e outros [Park et al., 2005] realizaram um trabalho similar ao trabalho do Srivastava, mas investigaram parâmetros que não foram contemplados por eles, tais como níveis de potência de transmissão, ciclos de trabalho do nó sensor e variação da temperatura do ambiente. Os ciclos de trabalho utilizados nos experimentos foram de 0,25%, 0,40%, 0,50% e 0,80%, com valores do tempo no qual o nó sensor está ligado (t_{on}) de 100, 200 e 400 ms. Eles concluíram que tais parâmetros afetam significativamente a capacidade da bateria. Por exemplo, uma potência de transmissão de 10 dBm reduz o tempo de vida da bateria em 45%, quando comparada a 0 dBm. Além disso, foi observado que a potência de transmissão se degradava ao longo do tempo, devido à redução da tensão da bateria.

David Culler e outros [Jiang et al., 2007] propuseram uma solução completa de hardware e software, denominada SPOT (*a scalable power observation tool*), para o monitoramento de energia em nós sensores, mas, além da complexidade, custos energético e econômico, a solução final possui uma área de placa de circuito impresso (PCI) equivalente a uma placa de sensores da família Mica Motes, conforme ilustrado na Fig. 2.1.

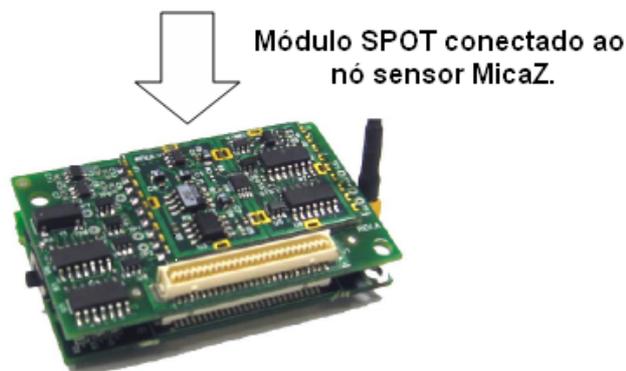


Figura 2.1: Solução proposta por David Culler [Jiang et al., 2007].

Além disso, como o principal propósito é o monitoramento (observação)

do consumo de energia, o módulo faz medidas de tensão, corrente e tempo para computar o consumo de energia do nó sensor, mas não há nenhuma consideração quanto à estimação da capacidade residual da bateria, ou mesmo dos fatores que afetam sua capacidade.

Portanto, pode-se observar que os trabalhos até então realizados ou propuseram a medição do consumo de energia do nó sensor, ou somente verificaram a necessidade de se fazer o projeto consciente de bateria, ou seja, demonstraram que existem fatores que afetam a capacidade da bateria e, por isso, o projeto deve ser concebido de modo a extrair o máximo de energia da bateria, mas nada é implementado experimentalmente para se conceber a consciência de disponibilidade energética (CODE) dos nós sensores e sua extensão para a RSSF.

O projeto consciente de captura consiste na utilização de fontes de energia ambientais alternativas em RSSF. A lentidão da evolução da tecnologia de baterias e o surgimento de novas tecnologias para a captura de energia do ambiente têm propiciado o desenvolvimento de RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente, cujo principal objetivo é resolver o problema de escassez de energia em RSSF [Niyato et al., 2007, Raghunathan et al., 2005]. Dentre as fontes alternativas de energia ambientais existentes, a energia solar é a que oferece a maior densidade de potência [Raghunathan et al., 2005, Roundy et al., 2004, Seah et al., 2009].

A Fig. 2.2 ilustra a progressão das fases de otimização de energia em RSSF e suas principais características. De acordo com a figura, pode-se observar que não existe nenhum mecanismo de comprovação da eficácia das técnicas de otimização e redução do consumo de energia propostas nos projetos consciente de energia e consciente de captura. Portanto, existe uma lacuna entre as fases do projeto consciente de bateria e do projeto consciente

de captura, conforme ilustrado na Fig. 2.2, pois somente com a informação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor da RSSF, disponível em qualquer instante de tempo, a manutenção e a operação eficiente da rede, a implementação de técnicas de auto-gerenciamento para tornar a RSSF inteligente e autônoma e a implementação de técnicas do projeto consciente de energia e do projeto consciente de captura, serão bem sucedidas.

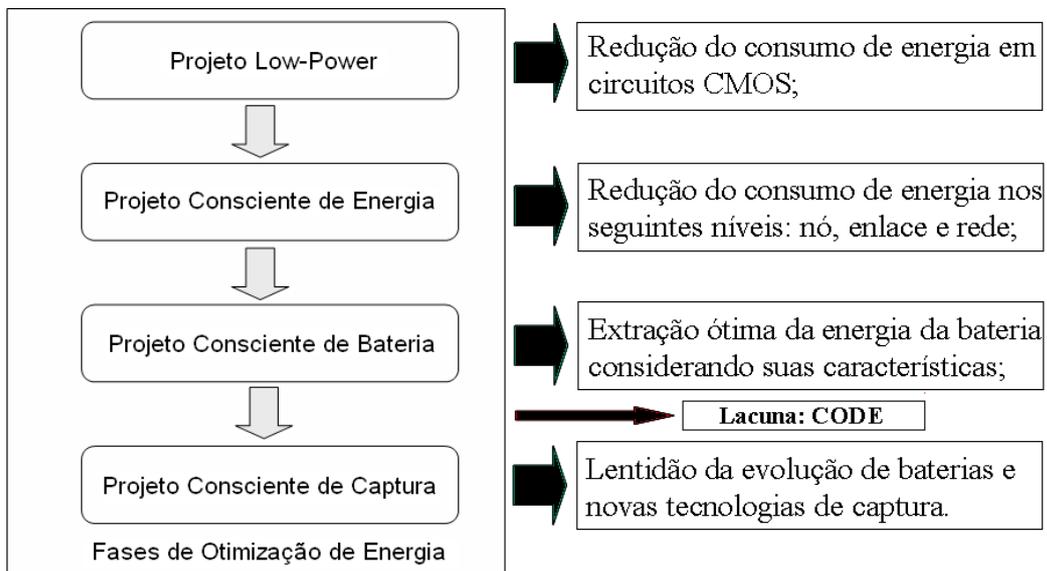


Figura 2.2: Diagrama atualizado das fases de otimização de energia.

A consequência da existência desta lacuna também resultou no problema observado por Dimic e outros [Jevtic et al., 2009]: todos os simuladores analisados em seu estudo, publicado em 2009, contêm somente modelos de energia ideais. Além disso, o surgimento de áreas de pesquisa, tais como otimização *cross-layer*, que investiga a utilização do cruzamento de informações entre camadas da pilha de protocolos da RSSF para otimizar o consumo de energia nos níveis de enlace e de rede [Melodia et al., 2005, Zhang Cheng, 2003], e o suporte à qualidade de serviço (QoS) em RSSF [Chen Varshney, 2004], também tornam a informação de quantidade de energia disponível um requi-

sito fundamental.

2.3 Modelagem de Pilhas e Baterias

2.3.1 Fundamentos de Baterias

Baterias e pilhas são sistemas eletroquímicos fechados que convertem energia química em energia elétrica e vice-versa. No cotidiano, os dois termos, baterias e pilhas, são utilizados indistintamente, mas há uma diferença entre eles. Pilha refere-se ao dispositivo constituído unicamente de dois eletrodos, denominados de anodo (pólo negativo) e catodo (pólo positivo), e um eletrólito, dispostos de maneira a converter energia química em energia elétrica. O eletrólito pode ser líquido, sólido ou pastoso, tendo como exigência mínima a necessidade de ser um condutor iônico, para viabilizar a troca de elétrons entre os eletrodos. Assim, quando os eletrodos são conectados a um dispositivo eletroeletrônico, fluirá uma corrente elétrica pelo circuito, pois o material de um dos eletrodos se oxida espontaneamente liberando elétrons (anodo ou pólo negativo), enquanto o material do outro eletrodo (catodo ou pólo positivo) se reduz usando esses elétrons. O termo bateria refere-se a um conjunto de pilhas associadas em série ou em paralelo, dependendo da necessidade de maior tensão ou corrente, respectivamente. Uma vez elucidada a diferença, serão utilizados ao longo do restante do texto os termos bateria e pilha indistintamente, pois o termo bateria é utilizado na literatura para uma única célula ou para duas ou mais células conectadas em série ou paralelo.

As baterias também são divididas em duas classes: as primárias e as secundárias. As baterias primárias (ou não recarregáveis) são utilizadas somente uma vez e substituídas, pois a reação química que ocorre internamente é irreversível. As baterias secundárias (ou recarregáveis), por outro lado, são

constituídas por sistemas eletroquímicos, nos quais não ocorre a dissolução dos materiais ativos no eletrólito, permitindo que essas baterias possam ser recarregadas e reutilizadas. Elas também são conhecidas como baterias recarregáveis. Em seguida, serão apresentadas as principais baterias primárias e secundárias que podem ser utilizadas em plataformas comerciais de RSSF. Tais baterias são referenciadas pelos fabricantes de acordo com a composição química de seus eletrodos.

Baterias Primárias podem ser distintas das demais por serem essencialmente não recarregáveis. Como alguns exemplos, podem-se citar os seguintes tipos: zinco-dióxido de manganês (pilha comum), zinco-dióxido de manganês (pilha alcalina), zinco-óxido de prata e lítio-dióxido de manganês (pilha de lítio).

Pilha Comum (Zinco-Dióxido de Manganês): a pilha zinco-dióxido de manganês é a mais comum das baterias primárias. Seu anodo é de zinco metálico, utilizado normalmente na forma de chapa para constituir a caixa externa da pilha. O catodo é um bastão de grafite, rodeado por uma mistura em pó de dióxido de manganês e grafite. O eletrólito é uma pasta formada pela mistura de cloreto de zinco e cloreto de amônio [Pop et al., 2005]. Uma pilha comum fornece tensão nominal de 1,5 V à temperatura ambiente. Além disso, um grande problema observado neste tipo de pilha são as reações paralelas, também conhecidas como reações de prateleira. Essas reações ocorrem durante o armazenamento das pilhas (antes de serem usadas) e durante o período em que permanecem em repouso entre descargas distintas, podendo provocar vazamentos.

Pilha Alcalina (Zinco-Dióxido de Manganês): os eletrodos são os mesmos utilizados na pilha comum, mas o eletrólito é uma solução aquosa de hidróxido de potássio concentrada, contendo uma dada quantidade de óxido

de zinco, o que justifica a denominação alcalina para a pilha em questão [Pop et al., 2005]. Além disso, o seu recipiente externo é produzido em chapa de aço para garantir melhor vedação e prevenir, portanto, o risco de vazamento de eletrólito altamente cáustico. A pilha alcalina fornece tensão nominal de 1,5 V (à temperatura ambiente) e seu desempenho é muito superior ao da pilha comum. Além disso, as pilhas alcalinas não apresentam as reações de prateleira e, conseqüentemente, os vazamentos observados nas pilhas comuns. Por isso, podem ser armazenadas por longos períodos de tempo, mantendo mais de 80% da sua capacidade inicial [Duracell, 2008b].

Pilha de Lítio (Lítio-Dióxido de Manganês): as pilhas de lítio são conhecidas pelo fato de não apresentarem reações de prateleira, além de apresentarem excelente desempenho para uma ampla faixa de temperatura de operação e alta densidade de energia. A diferença básica em relação às anteriores está no fato de o anodo ser constituído por lítio. Outra característica importante é o fato de sua tensão nominal apresentar-se praticamente constante ao longo de sua vida útil, característica esta muito útil para cargas que não admitem grandes variações da tensão de alimentação. Além disso, dependendo do projeto, pode-se optar pelo uso dessas baterias em vez de se utilizar conversores DC-DC. Uma pilha de lítio pode fornecer tensão nominal de 1,5 V ou 3 V, à temperatura ambiente.

Baterias Secundárias são também conhecidas como baterias recarregáveis e podem ser reutilizadas muitas vezes pelos usuários (centenas de vezes). Como regra geral, um sistema eletroquímico é considerado secundário quando é capaz de suportar 300 ciclos completos de carga e descarga com 80% da sua capacidade [Brodd, 1999]. Como alguns exemplos, podem-se citar os seguintes tipos: níquel-cádmio (NiCd), chumbo-ácido, níquel-metal-hidreto (NiMH) e íons lítio ou lítio-polímero.

Bateria Chumbo-Ácido (Chumbo/Óxido de Chumbo): apresenta a característica peculiar de possuir os eletrodos constituídos pelo mesmo elemento químico, o chumbo. A tensão nominal fornecida por este tipo de bateria, para um único par de eletrodos, é de 2 V à temperatura ambiente.

Bateria Níquel-Cádmio (Cádmio/Óxido de Níquel): consiste de um anodo formado por uma liga de cádmio e ferro e um catodo de óxido de níquel imersos em uma solução aquosa de hidróxido de potássio [Brodd, 1999]. Um único par de eletrodos das baterias de níquel-cádmio (NiCd), que podem ser dispostos de maneira idêntica aos das baterias alcalinas ou chumbo-ácido, fornece tensão nominal de 1,2 V à temperatura ambiente. As baterias de níquel-cádmio possuem características, tais como correntes elétricas relativamente altas (centenas de miliampères), tensão plana ao longo da sua descarga, capacidade de operar em baixas temperaturas e vida útil longa. Podem ser armazenadas por longos períodos de tempo, mas apresentam reações de prateleira significativas e baixa densidade de energia. Além disso, elas apresentam o “efeito memória”, fenômeno no qual a bateria perde capacidade se for repetidamente recarregada antes de ter sido completamente descarregada [Pop et al., 2005]. Uma maneira de se evitar tal efeito é assegurar que a bateria esteja completamente descarregada antes da recarga.

Bateria Níquel-Metal-Hidreto (Hidreto Metálico/ Óxido de Níquel): as baterias de NiCd empregam o cádmio em sua composição e, por isso, são consideradas as de maior impacto ambiental. Devido a esse fato e ao recente avanço tecnológico em armazenamento de hidrogênio, há uma tendência mundial em substituí-las pelas baterias de níquel-metal-hidreto (NiMH), cujas características de operação são muito semelhantes. A principal diferença está na composição do anodo, cujo material ativo é hidrogênio absorvido na forma de hidreto metálico, em vez de cádmio [Pop et al., 2005].

Apresentam desempenho superior ao da bateria de NiCd, fornecendo também tensão nominal de 1,2 V à temperatura ambiente. Além disso, possuem maior densidade de energia (duas vezes maior), que implica em capacidade de carga 40% a 50% superior [Brodd, 1999]. Uma desvantagem das baterias de NiMH é a sua auto-descarga relativamente alta comparada às outras baterias secundárias.

Bateria de Íons de Lítio ou Lítio-Polímero: em vez de lítio metálico, utiliza íons de lítio no eletrólito na forma de sais de lítio dissolvidos em solventes não aquosos [Pop et al., 2005]. No caso das baterias de lítio-polímero é utilizado um polímero no lugar do eletrólito pastoso, que resulta em baterias mais compactas e leves. Comparadas às baterias de NiCd e NiMH, as baterias de íons lítio apresentam maior tensão nominal (três vezes maior), maior densidade de energia, perfil de tensão de descarga extremamente plana e não apresentam o efeito memória observado nas baterias de NiCd. Um único par de eletrodos fornece tensão nominal de 3,6 V (íons de lítio) ou 3,7 V (lítio-polímero) à temperatura ambiente. Além disso, o fato de empregarem materiais de baixa densidade permite que sejam projetadas para terem menor massa, tamanho e custo. Os riscos ambientais também são muitos menores que os apresentados pelas baterias de NiCd. Contudo, precisam de circuitos eletrônicos de proteção para evitar sobretensão, sobrecorrente, curto-circuito e temperatura excessiva, cuja consequência é a redução do tempo de vida da bateria ou, até mesmo, a ocorrência de explosões. Também precisam ser protegidas contra subtensão para não haver degradação do seu tempo de vida.

2.3.2 Terminologia em Baterias

Com intuito de discutir mais eficientemente os métodos de indicação de *SoC* (*State-of-Charge*), alguns termos técnicos comumente utilizados pelos fabricantes de bateria serão definidos.

A capacidade de uma bateria pode ser expressa de quatro formas e utiliza como unidade o Ampère-hora (Ah) ou miliampère-hora (mAh), que é uma medida para carga elétrica definida como a integral do produto entre a corrente e o tempo (em horas) [Pop et al., 2005]:

- A capacidade teórica ou máxima (C_{MAX}) representa a quantidade de energia que está armazenada em uma bateria primária nova ou em uma bateria secundária completamente carregada [Pedram Wu, 1999];
- A capacidade padrão (C_p) é a energia que pode ser extraída quando a bateria é descarregada por uma carga padrão especificada pelo fabricante [Lahiri et al., 2002]. Por exemplo, uma bateria de íons de lítio pode ter capacidade padrão de 500 mAh quando descarregada com uma corrente constante de 125 mA e à temperatura de 25°C;
- A capacidade entregue ou efetiva (C_{eff}) é a quantidade de energia entregue a uma determinada carga e sob determinado ambiente de operação. Vários efeitos eletroquímicos fazem com que a capacidade efetiva seja sensível às características do perfil de descarga e do ambiente. Portanto, na prática, a capacidade efetiva pode diferir significativamente da capacidade padrão [Lahiri et al., 2002]. Assim, para uma bateria de 1.000 mAh não poderia ser inferido que a mesma pudesse fornecer uma corrente de 1.000 mA por uma hora ou, de outra forma, uma corrente de 1 mA por 1.000 horas, pois, infelizmente a situação não é tão simples assim: as baterias tendem a se recuperar entre períodos

de uso e, além disso, apresentam diferentes capacidades para diferentes correntes de descarga;

- A capacidade residual se refere à quantidade de energia ainda disponível na bateria depois de determinado tempo de uso [Lahiri et al., 2002].

A vida de ciclo é o número de ciclos que uma célula ou bateria secundária pode ser recarregada ou descarregada sob condições específicas, antes que a capacidade disponível caia abaixo de determinado valor da capacidade padrão, que geralmente é estabelecido em 80% dessa capacidade [Pop et al., 2005].

A tensão de corte (V_{cut}) é a menor tensão de operação de uma bateria, a partir da qual ela é considerada descarregada e, portanto, não tem mais condições de fornecer corrente para a carga. É também referida na literatura como tensão de fim de descarga ou tensão final [Pop et al., 2005]. A tensão de “circuito aberto” (V_{oc}) é a diferença de potencial de uma bateria secundária completamente carregada ou de uma bateria primária nova medida sem carga, ou seja, é a tensão entre os terminais da bateria com a carga desconectada [Pop et al., 2005]. Por outro lado, a tensão dos terminais (V_t) é a tensão entre os terminais da bateria com a carga conectada [Pop et al., 2005]. Finalmente, a tensão nominal (V_n) é a tensão de referência da bateria [Pop et al., 2005].

O *SoC* é uma porcentagem da carga máxima possível que está presente dentro da bateria. O método de medição do *SoC* e o modelo computacional baseado na definição correta do *SoC* deve ser simples, conveniente, prático e confiável [Pop et al., 2005].

O tempo de serviço residual ou tempo de vida residual da bateria é o tempo estimado que a bateria pode alimentar uma dada carga sob condições válidas de descarga antes que ela pare de funcionar [Pop et al., 2005]. O

tempo de serviço residual pode ser deduzido através da capacidade residual da bateria pela Eq. 2.1 [Park et al., 2001]:

$$T_{res} = \frac{C_{res}}{I}, \quad (2.1)$$

onde T_{res} é o tempo de serviço residual da bateria, C_{res} é a capacidade residual da bateria e I é a corrente de descarga.

Qualquer bateria perde gradualmente sua carga, a qual se torna aparente quando a bateria não é utilizada por algum período de tempo. Esse fenômeno é conhecido como **auto-descarga** da bateria e é fortemente dependente da temperatura, bem como do *SoC* [Pop et al., 2005]. É importante observar que um contador de Coulomb, circuito responsável pela contagem de cargas elétricas que entram e saem da bateria, não é capaz de medir essa carga, pois nenhuma corrente fluirá pelos terminais da bateria.

A capacidade máxima possível da bateria diminui à medida que ela envelhece. Esse fenômeno é conhecido como **perda de capacidade** e depende de muitos fatores [Pop et al., 2005]. Em geral, quanto mais a bateria for mal utilizada, como por exemplo, sobrecarga e sobredescarga regulares, maior será a perda de capacidade. Sistemas comerciais de indicação de *SoC* utilizam medidas de tensão para atualizar a capacidade máxima da bateria [Pop et al., 2005].

O tempo de prateleira ou retenção de carga indica o tempo que determinada bateria pode ficar armazenada (antes de serem utilizadas), mantendo uma capacidade mínima satisfatória [Pop et al., 2005].

2.3.3 Fatores que Afetam a Capacidade da Bateria

Alguns dos parâmetros citados no item anterior, tais como perda de capacidade, retenção de carga, auto-descarga, também afetam a capacidade residual e, portanto, o tempo de vida da bateria, mas não representam um papel tão significativo quanto a taxa de descarga, o efeito de relaxação e a temperatura [Lahiri et al., 2002].

O tempo de vida da bateria depende fortemente da disponibilidade de regiões ativas (regiões que podem ocorrer redução) do catodo. Durante períodos de descarga, em que a taxa de descarga é baixa (a corrente drenada da bateria é pequena), a distribuição de regiões inativas ao longo do material do catodo é razoavelmente uniforme. Contudo, se a taxa de descarga é alta (a corrente drenada da bateria é grande), as reduções ocorrerão somente na superfície exterior do catodo, que será coberta por um composto insolúvel e se tornará uma região inativa. Essa região impedirá o acesso às regiões ativas internas do catodo. Conseqüentemente, a bateria parecerá descarregada, embora muitas regiões ativas do catodo permaneçam inutilizadas, efetivamente diminuindo a capacidade total da bateria. A consequência desse fenômeno, conhecido como **efeito da taxa de descarga**, é a dependência entre a capacidade da bateria e a taxa na qual ela é descarregada [Lahiri et al., 2002].

A taxa de descarga ou curva de descarga é apresentada na forma de gráficos em manuais de baterias comerciais, que mostram como a tensão decresce com o uso, assim como a variação da capacidade em função da corrente de descarga. O gráfico da Fig. 2.3 ilustra as características de descarga com corrente constante para a bateria alcalina Duracell MN1604 [Duracell, 2008a].

Algumas baterias apresentam uma taxa de descarga plana, como é o caso das baterias de níquel-cádmio, níquel-metal-hidreto e íons de lítio. Outras

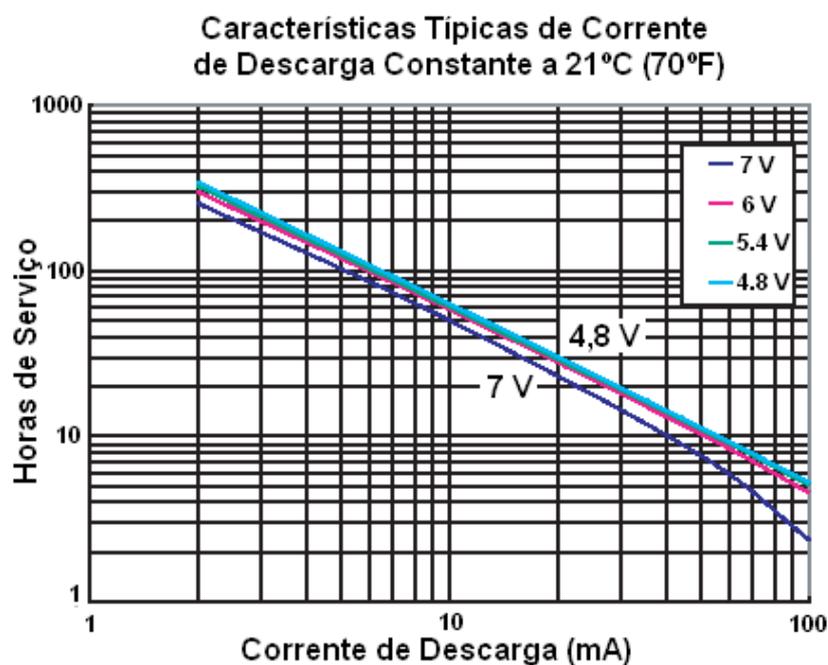


Figura 2.3: Características de descarga com corrente constante para a bateria alcalina Duracell MN1604, retirado de [Duracell, 2008a].

baterias, como as comuns e as alcalinas, podem apresentar curvas que decaem rapidamente para valores de corrente acima de 500 mA [Duracell, 2008b].

Quando a corrente é drenada da bateria, íons positivamente carregados são consumidos na interface catodo-eletrólito, que são substituídos por novos íons do anodo que difundem através do eletrólito. Quando a corrente drenada é suficientemente grande, a taxa de difusão não consegue acompanhar a taxa na qual os íons são consumidos no catodo. Consequentemente, a concentração de íons positivamente carregados diminui próximo ao catodo e aumenta próximo ao anodo, degradando a tensão de saída da bateria. Contudo, se a corrente drenada for suficientemente reduzida ou a bateria for colocada em repouso (corrente próxima de zero) por um período de tempo, a concentração de íons próximo ao anodo diminui (devido à difusão), levando a uma

recuperação de carga. Como resultado, a capacidade e, portanto, o tempo de vida da bateria aumenta. Esse fenômeno é conhecido como **efeito de relaxação ou de recuperação** [Lahiri et al., 2002] e está ilustrado na Fig. 2.4.

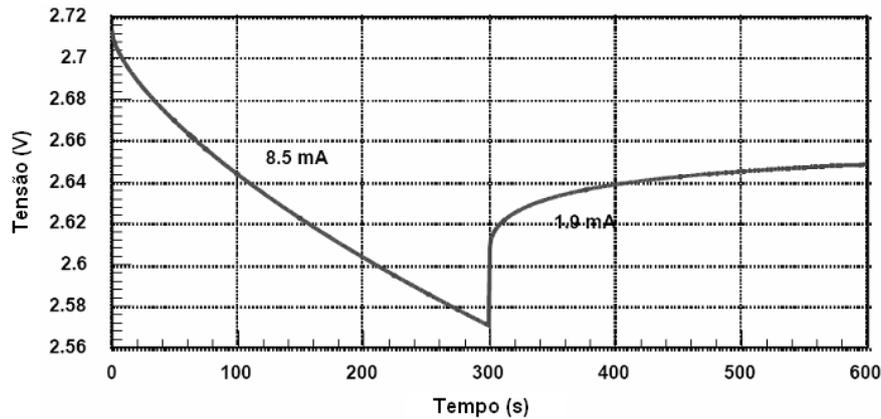


Figura 2.4: Efeito de relaxação [Park et al., 2001].

O efeito da temperatura do ambiente na eficiência da bateria depende fortemente da química da bateria a ser considerada [Lahiri et al., 2002]. A maioria das baterias funcionam adequadamente à temperatura ambiente, mas em temperaturas superiores, há uma maior mobilidade dos materiais do eletrólito, que resulta em redução da resistência interna da bateria. Isso tem como efeito o aumento de sua capacidade efetiva. Contudo, a exposição contínua da bateria a altas temperaturas tem efeitos indesejados, tais como a redução da vida de ciclo e o aumento da auto-descarga. Por outro lado, em baixas temperaturas, há um aumento da resistência interna da bateria, o que leva a uma redução de sua capacidade. O gráfico da Fig. 2.5 ilustra o efeito da temperatura sobre a capacidade de uma pilha alcalina comercialmente disponível [Duracell, 2008b].

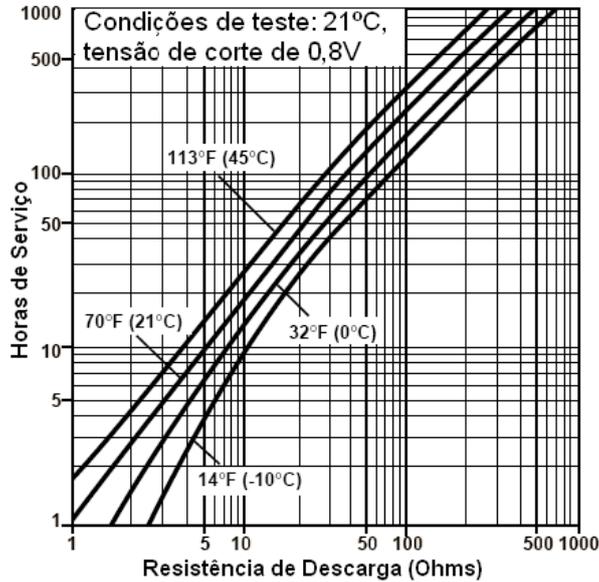


Figura 2.5: Efeito da temperatura e da carga para a pilha alcalina Duracell MN1500, retirado de [Duracell, 2008b].

2.3.4 Modelos de Bateria

Novos modelos de bateria podem estimar o tempo de vida (ou capacidade residual) da bateria com maior exatidão, mas, infelizmente, em muitos casos as técnicas utilizadas são muito específicas e, portanto, são focadas em determinada tecnologia de bateria. Além disso, podem requerer medidas difíceis ou com a carga desconectada, o que pode dificultar a utilização desses modelos em aplicações práticas, ou são complexos demais para serem implementados em dispositivos de capacidade reduzida, tais como nós sensores.

Existem vários fatores que caracterizam os modelos de bateria, cada um dos quais pode servir como base para a classificação. Por exemplo, eles podem ser classificados em função dos tipos de carga (constante ou variável), tecnologia da bateria (íons de lítio, NiMH e NiCd), conjunto de efeitos da bateria capturados pelo modelo ou eficiência computacional [Lahiri et al., 2002].

Lahiri e outros [Lahiri et al., 2002] classificaram os modelos em analíticos, baseados em circuitos elétricos, estocásticos e eletroquímicos.

Os modelos analíticos consistem em formular expressões algébricas para calcular a capacidade residual da bateria, usando os valores de corrente de descarga, características do ambiente de operação e propriedades físicas da bateria como parâmetros. P. Rong e M. Pedram [Rong Pedram, 2003] constataram que um erro de 30% na previsão da capacidade da bateria podia resultar em uma degradação de 20% do desempenho de algoritmos de escalonamento dinâmico de tensão e frequência (DVS e DFS, em inglês). Para resolver o problema, eles propuseram um modelo analítico para uma bateria de lítio-polímero, baseado em medidas de tensão, corrente e parâmetros físicos da bateria, que levasse em conta os efeitos da temperatura e da vida de ciclo. Dentre as desvantagens estão a necessidade de configuração de mais de 15 parâmetros físicos para obtenção da bateria equivalente e o fato de que o modelo assume que a corrente de carga seja constante [Rao et al., 2003]. Finalmente, o modelo proposto apresentou um erro máximo de 5% entre simulação e dados experimentais.

Os modelos baseados em circuitos elétricos modelam a descarga da bateria usando circuitos elétricos equivalentes. Gold e outros [Hageman Gold, 1997] propuseram circuitos PSpice compostos por componentes passivos lineares, fontes de tensão e tabelas de parâmetros físicos para modelar baterias de NiMH e de íons de lítio, que levassem em conta os efeitos da temperatura e da vida de ciclo. Dentre as desvantagens estão a necessidade e a dificuldade de configuração de mais de 15 parâmetros físicos para obtenção da circuito equivalente da bateria e o longo tempo de simulação do modelo [Rao et al., 2003]. o modelo proposto apresentou um erro máximo de 12% entre simulação e dados experimentais. Bergveld e outros [Bergveld et al., 1999] também pro-

puseram um modelo baseado em circuitos elétricos para baterias de NiCd, mas que levava em conta somente o efeito da temperatura. As desvantagens são as mesmas constatadas no modelo de Gold, exceto pela quantidade de parâmetros físicos utilizados, que é superior a 30 parâmetros [Rao et al., 2003].

Os modelos estocásticos modelam o comportamento da bateria como um processo de Markov com probabilidades em função de parâmetros relacionados às características físicas da bateria. V. Rao e outros [Rao et al., 2005] propuseram um modelo estocástico para uma pilha de NiMH a partir de experimentos que exploravam o efeito de relaxação. O circuito utilizado nos experimentos é ilustrado na Fig. 2.6.

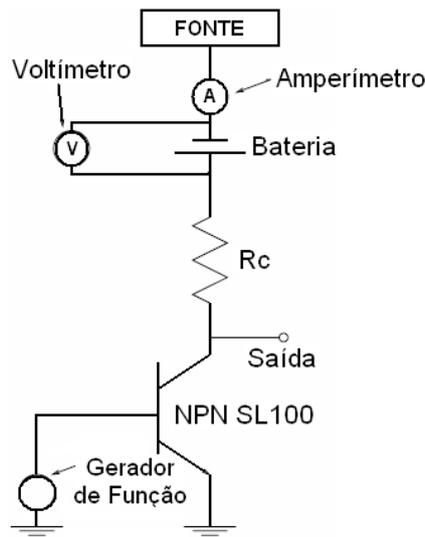


Figura 2.6: Circuito para testar o efeito de relaxação [Rao et al., 2005].

Um transistor bipolar foi configurado para operar como chave e sua base acionada por um gerador de função, que gerava ondas quadradas de diferentes frequências. O resistor do coletor (R_c) foi calculado de modo que a corrente drenada da bateria e da fonte de alimentação fosse de 960 mA. A fonte de alimentação foi conectada em série com a bateria porque 1,2 V não era suficiente para acionar o transistor em saturação.

Na primeira etapa de experimentos o ciclo de trabalho (c.t.) foi mantido constante em 50% e a frequência do gerador de função foi configurada da seguinte forma: contínua, 1.000 Hz, 1 Hz e 0,2 Hz. Como conclusão, foi observado que a energia entregue pela bateria foi diferente para as diferentes frequências, apesar do ciclo de trabalho ser mantido em 50%. Essa observação demonstrou que existe uma dependência entre a carga recuperada e a duração do tempo de repouso (t_{off}). Em seguida, foram feitos experimentos com *c.t.* variável, conforme mostrado na Tabela 2.1.

c.t. (%)	t_{on} (s)	t_{off} (s)
100	2	0
80	2	0,5
73	2	0,75
66,7	2	1
50	2	2
44	2	2,5
36	2	3,5

Tabela 2.1: Ciclos de trabalho utilizado no trabalho de Rao [Rao et al., 2005].

Como o efeito de relaxação dependia somente da duração do tempo de repouso (t_{off}), o tempo t_{on} foi mantido em 2 segundos. Da mesma forma que o experimento anterior, foi observado que a energia entregue pela bateria foi diferente para os diferentes c.t.'s. Como resultado final, o modelo proposto apresentou um erro máximo de 2,65% entre simulação e dados experimentais.

Os modelos eletroquímicos consideram processos eletroquímicos, termodinâmicos e a construção física para modelar a descarga da bateria. Newman e Doyle [Doyle, 1995, Newman, 2004, Newman Doyle, 1997] apresentaram um modelo que leva em conta a vida de ciclo e o efeito da temperatura, mas

contêm mais de 50 parâmetros físicos e eletroquímicos como entrada, os quais devem ser medidos separadamente para baterias de diferentes tipos e envolve cálculos matemáticos complexos [Arora et al., 2002, Gomadam et al., 2002]. Além disso, requerem longo tempo de simulação e grande dificuldade de configuração dos parâmetros físicos e eletroquímicos [Rao et al., 2003].

Pop e outros [Pop et al., 2005], por outro lado, descreveram modelos que são empregados pelos fabricantes de circuitos integrados de indicação de *SoC*. Vários métodos para a estimação do *SoC* são conhecidos, alguns são antigos e muito baratos, pois simplesmente medem a tensão da bateria. Contudo, essa tensão da bateria é uma indicação muito inexata da capacidade da bateria, cujo valor muda com a temperatura, taxa de descarga e idade da bateria [Dallas Semiconductor, 2006, Pop et al., 2005]. Outro método de *SoC* envolve medições de impedância, cujos valores são comparados com curvas de referência previamente geradas. Também há o método de estimação de *SoC* baseado na resposta da bateria a pulsos de tensão e corrente. Esses pulsos também são utilizados para determinar se a bateria ainda está operacional. Esse primeiro grupo foi classificado de métodos de medições diretas e seu princípio está ilustrado na Fig. 2.7.

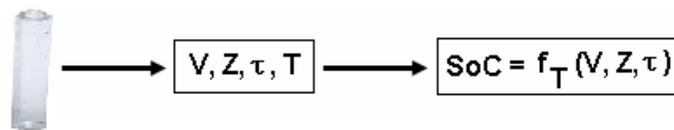


Figura 2.7: Princípio do Método de Medições Diretas.

Onde V é tensão, Z é impedância, τ é a duração do pulso de tensão ou corrente e T é temperatura.

Há também o método de estimação do *SoC* que mede a corrente que está fluindo para dentro e para fora da bateria e integra essa corrente em função do tempo, de modo a estimar a sua capacidade. Este é o método utilizado

no simulador Castália [Jevtic et al., 2009] e será utilizado para comparação com os modelos que serão propostos neste trabalho. A utilização desses integradores requer a correção do SoC obtido, pois fatores relacionados à bateria, tais como temperatura, tempo de uso, eficiência de carga e descarga e vida de ciclo, afetam a exatidão dessa estimativa. A integração da corrente é referida na literatura como **Contagem de Coulomb**. A Fig. 2.8 ilustra o princípio desse método.

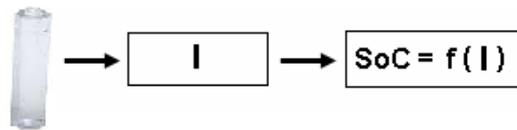


Figura 2.8: Princípio do método de Contagem de Coulomb.

Quando esse método é compensado pela eficiência de descarga, auto-descarga e perda de capacidade, por exemplo, ele é conhecido como sistema de escrituração (*book-keeping system*) [Pop et al., 2005], conforme ilustrado na Fig. 2.9.

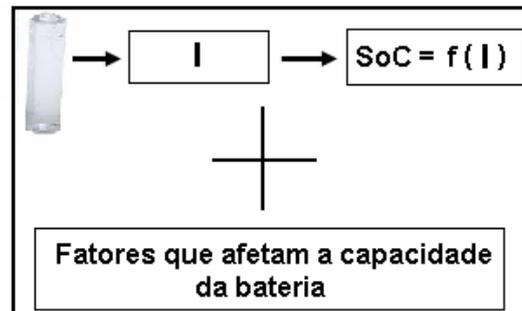


Figura 2.9: Princípio do Sistema de Escrituração.

O principal problema no projeto de um sistema de indicação de SoC exato é a imprevisibilidade tanto da bateria como do comportamento do usuário. Nesse caso, um sistema adaptativo deve ser usado, tendo como base o método de medição direta, de escrituração ou a combinação de ambos.

De modo geral, os modelos de bateria variam desde um modelo linear a um modelo complexo que tenta incorporar o efeito de relaxação. Embora o modelo de relaxação seja o que mais se aproxima do comportamento de baterias reais, há considerável dificuldade em sua implementação, visto que o efeito de relaxação envolve muitas propriedades físicas e eletroquímicas da bateria. Em função dessa complexidade, são considerados difíceis de serem usados para a modelagem de qualquer bateria e são computacionalmente intensivos. Eles são direcionados principalmente para projetistas e fabricantes de baterias, pois fazem uso de muitos parâmetros proprietários, que tipicamente não estão disponíveis para projetistas de sistemas. Como complexidade computacional implica em maior consumo de energia e desempenho da unidade de processamento, esses modelos são inadequados para plataformas de RSSF.

O modelo linear assume que a bateria é uma fonte de tensão linear e, portanto, o efeito da taxa de descarga sobre a capacidade máxima da bateria não é considerado [Dallas Semiconductor, 2006]. A técnica de estimação baseada na tensão depende da química da bateria utilizada. Cada química mostra um comportamento específico para a tensão de saída sob uma corrente fixa. O Modelo Linear baseado na Tensão (MLT) incorpora este comportamento e é descrito pela Equação 2.2 [Dallas Semiconductor, 2006].

$$C_{res} = a \times V_{batt} - b, \quad (2.2)$$

onde C_{res} é a capacidade residual da bateria, V_{batt} é a tensão da bateria e b é a tensão inicial da bateria nova ou completamente recarregada.

Os parâmetros a e b podem ser obtidos pelos seguintes pontos de reta: (tensão inicial, capacidade máxima da bateria) e (tensão de corte, 0), respectivamente.

Srivastava e outros [Park et al., 2001] propuseram alguns modelos baseados na contagem de Coulomb. Nessa técnica de estimação baseada na corrente, aqui chamado de Modelo Linear baseado na Corrente (MLC), a capacidade residual da bateria pode ser estimada pela Eq. 2.3:

$$C_{res} = C_a - \int_{t=t_0}^{t=t_0+t_d} I(t)dt, \quad (2.3)$$

onde C_a é a capacidade anterior da bateria, $I(t)$ é a corrente instantânea consumida pela carga (nó sensor, por exemplo) e t_d é a duração do tempo.

O MLC assume que $I(t)$ permanecerá a mesma pelo período de tempo t_d , caso o modo de operação da carga não mude no referido período. Com base nessas afirmações a Eq. 2.3 poderá ser simplificada para:

$$C_{res} = C_a - \int_{t=t_0}^{t=t_0+t_d} I(t)dt = C_a - I \times t_d, \quad (2.4)$$

Sabendo-se que o valor inicial de C_a para o modelo linear é a capacidade máxima da bateria e que teremos amostras de corrente, o MLC (Equação 2.3) pode ser discretizado como:

$$C_{res} = C_{MAX} - \sum_{t=0}^{t=t_n} I(n)\Delta t, \quad (2.5)$$

onde C_{MAX} é a capacidade máxima da bateria (fornecida pelo fabricante), $I(n)$ é a amostra de corrente, t_n é o enésimo intervalo de tempo da enésima amostra de corrente e Δt é o período de amostragem.

Uma evolução dos modelos lineares é um modelo que considere o efeito da taxa de descarga, mas não o efeito de relaxação. Para isso, um fator k é introduzido para representar a eficiência da capacidade da bateria, que é determinada pela taxa de descarga [Park et al., 2001]:

$$k = \frac{C_{eff}}{C_{MAX}}, \quad (2.6)$$

onde C_{eff} é a capacidade efetiva da bateria e C_{MAX} é a capacidade máxima da bateria.

C_{eff} é a capacidade efetiva para uma dada bateria sob uma condição específica de trabalho, ou seja, quando a corrente de carga tende a zero, C_{eff} tende a C_{MAX} , caso contrário, C_{eff} depende da corrente de carga. Dito de outra forma, o fator de eficiência k varia com a corrente (I) e se aproxima de 1 (um) quando a taxa de descarga é baixa. No entanto, quando a taxa de descarga se torna alta, o fator k se aproxima de 0 (zero).

Um modelo mais realista, que leve em conta a taxa de descarga e chamado de Modelo Dependente da Taxa de Descarga (MDTD), foi construído a partir do MLC, mas que incorpora a eficiência da capacidade da bateria, determinada pela taxa de descarga. O MDTD é definido pela Equação 2.7 [Park et al., 2001]:

$$C_{res} = k \times C_a - \int_{t=t_0}^{t=t_0+t_d} I(t)dt \quad (2.7)$$

As mesmas simplificações mostradas no modelo linear podem ser aplicadas, caso a corrente $I(t)$ seja constante no período de tempo t_d . Além disso, para o caso de amostras de corrente, a Eq. 2.7 discretizada ficará da seguinte forma:

$$C_{res} = k \times C_a - \sum_{t=t_0}^{t=t_n} I(t)\Delta t \quad (2.8)$$

O fator k pode ser obtido do manual do fabricante, onde a capacidade efetiva (C_{eff}) está em função da corrente de descarga.

Uma verificação mais cuidadosa da Eq. 2.8 revela que o fator k é aplicado

em todos os intervalos de amostragem, caso a corrente oscile entre dois ou mais níveis distintos, por exemplo. Conseqüentemente, ele tem forte impacto na capacidade residual armazenada (até mesmo quando ele se aproxima de 1). No modelo dependente da taxa de descarga, apesar de levar em conta a capacidade efetiva (C_{eff}) para uma dada carga, o fator k fatora a capacidade máxima e essa fração é subtraída da capacidade residual armazenada, removendo muito mais energia do que a quantidade que foi realmente utilizada.

2.3.5 Parâmetros Utilizados na Estimação da Capacidade Residual

A estimação da capacidade residual requer a medição de parâmetros, tais como tensão, corrente, impedância e temperatura. A utilização de algumas (ou todas) essas medidas, juntamente com os modelos de bateria previamente estabelecidos (ou elaborados) possibilitam a estimação da capacidade residual da bateria. Em se tratando de casos práticos de RSSF, serão considerados e avaliados somente parâmetros que podem ser medidos.

A arquitetura geral de um sistema de indicação de SoC prático é apresentada na Fig. 2.10. A bateria pode ser composta por uma ou mais células conectadas em série. O sistema também inclui um estágio de aquisição de sinais analógicos, cuja função é adequar os sinais analógicos às entradas do conversor A/D. A queda de tensão sobre o resistor *shunt*, que dividida pelo seu valor resulta na corrente (I), a tensão (V) e a temperatura (T) da bateria, depois de condicionadas, são convertidas em sinais digitais pelo conversor A/D. Um microprocessador/microcontrolador (no qual o algoritmo de SoC está armazenado) estima o SoC da bateria baseado nos sinais medidos. Os dados básicos da bateria, tais como a auto-descarga em função da tempera-

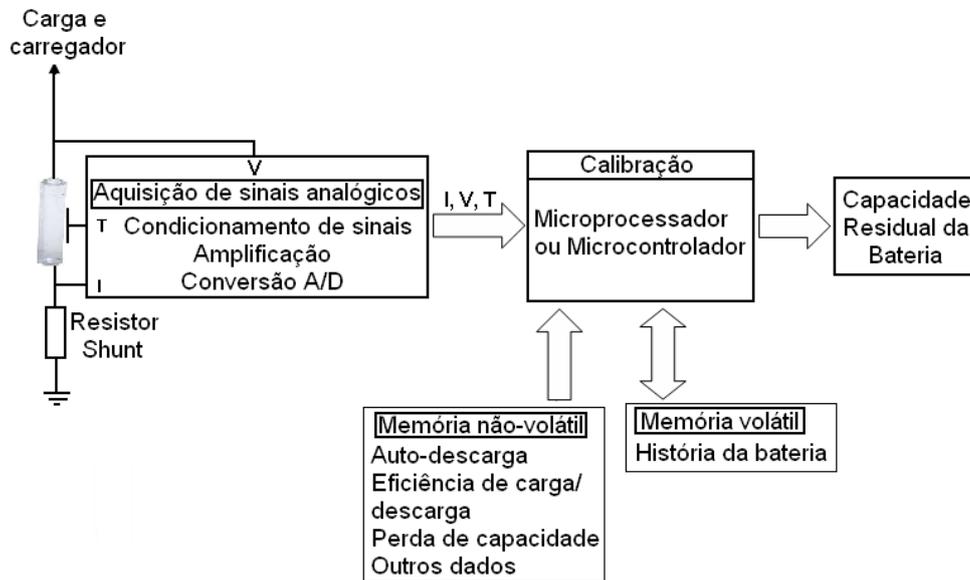


Figura 2.10: Arquitetura geral de um sistema de indicação de *SoC*.

tura, a eficiência de descarga em função da corrente e da temperatura são lidos da memória não-volátil. A memória volátil é utilizada para armazenar a história de uso da bateria, ou seja, o número de ciclos de carga e descarga, que pode ser usado para atualizar a capacidade máxima da bateria. Cada parte desse sistema influenciará na exatidão final da indicação do *SoC*, principalmente erros de medição de V , I e T . Esses erros podem ser corrigidos pela calibração do *SoC*. Por exemplo, se o algoritmo do *SoC* for baseado na medição e integração da corrente, os erros das medidas de corrente se acumularão ao longo do tempo.

A estimação baseada na impedância implica em calcular a impedância complexa da célula eletroquímica utilizando espectroscopia da impedância AC. No entanto, medidas de impedância da bateria em função da frequência não são práticas para a estimação da capacidade residual em nós sensores, visto que um sinal de corrente alternada precisa ser aplicado para obtê-las

[Pop et al., 2005]. É por isso que somente as estimações baseadas na tensão e na corrente são viáveis em RSSF.

A estimação baseada na tensão consiste em monitorar a tensão da bateria com a carga em operação. Embora o nível de tensão da bateria decresça continuamente durante a descarga e sua medição seja economicamente e computacionalmente mais barata que a contagem de Coulomb, a relação entre o nível de tensão e a capacidade residual varia amplamente, principalmente devido à taxa de descarga [Dallas Semiconductor, 2006, Duracell, 2006]. Contudo, o erro da estimação baseada na tensão pode ser corrigido pelo sistema de indicação de *SoC* se a dependência da tensão em relação à temperatura e à taxa de descarga da bateria for conhecida [Pop et al., 2005]. Finalmente, a simplicidade de hardware e o baixo custo tornam esse método a escolha adequada para dispositivos simples, que não exigem exatidão na indicação de *SoC*. Alguns conversores DC-DC implementam esse método, tais como o TPS6100x da Texas Instruments [Texas, 2006], que permite configurar um limiar de tensão, abaixo da qual o sistema acionará um alarme.

A estimação baseada na corrente, conhecida como contagem de Coulomb, oferece mais exatidão que a estimação baseada na tensão, mas uma intervenção de hardware é necessária para medir a corrente. Além disso, a solução de hardware deve consumir o mínimo de energia possível e não deve ter o custo econômico equiparável ao de um nó sensor. Finalmente, o método de medição deve, idealmente, utilizar o hardware já existente no nó sensor, tais como microcontrolador, conversor A/D e amplificadores operacionais. Tendo em vista esses requisitos e considerando-se o fato de que a arquitetura geral de um sistema de indicação de *SoC*, apresentada na Fig. 2.10, está quase que totalmente contida no hardware de nós sensores típicos (com exceção do resistor *shunt*), o total reuso desse hardware disponível pode ser uma alternativa

para a implementação de indicação de *SoC* em RSSF [Casas Casas, 2005].

Alguns soluções comerciais de *SoC* utilizam circuitos integrados dedicados a químicas específicas de baterias recarregáveis. BQ2010 da Texas [Texas, 2006], MAX1660, DS2745 e DS2438 da Maxim [Dallas, 2006] são alguns exemplos. Eles oferecem soluções de alta exatidão, mas apresentam faixa de tensão de operação dependente da química utilizada, os algoritmos de processamento do *SoC* são proprietários e requerem área adicional na placa de circuito impresso (PCI). Além disso, essas soluções somente serão mais econômicas quando um alto nível de exatidão for necessário e forem utilizados com tipos específicos de químicas de bateria para os quais são indicados.

2.3.6 Características das Pilhas Alcalinas utilizadas nos Experimentos

Foram utilizadas nos experimentos as pilhas alcalinas MN1500 e MN1604 da Duracell [Duracell, 2006, Duracell, 2008a] devido a características, tais como tempo de serviço até 10 vezes superior ao das pilhas comuns, baixa resistência interna, longo tempo de prateleira, auto-descarga muito baixa e excelente faixa de temperatura de operação, conforme ilustrado nos gráficos das Figs. 2.5 e 2.11.

As MN1500 são pilhas alcalinas de tamanho AA, fornecem tensão nominal de 1,5 V, à temperatura ambiente, e capacidade padrão de 2.850 mAh.

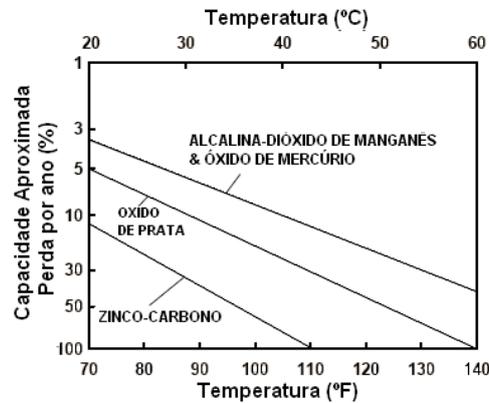


Figura 2.11: Efeito da temperatura sobre a retenção de capacidade para vários tipos de pilhas, retirado de [Duracell, 2008b].

A capacidade efetiva usada na Equação 2.6 foi extraída do gráfico da Fig. 2.12, obtido do manual do fabricante [Duracell, 2008b]. A partir desse gráfico, foi construída a Tabela A.1, para a faixa de 5 mA a 60 mA e com resolução de 1 mA, utilizando interpolação linear. Os valores de horas de serviço (ordenada do gráfico) foram obtidos a partir de equações de retas formadas por duas coordenadas consecutivas do gráfico, a partir do valor de 5 mA. O produto do valor de horas de serviço obtido e sua respectiva corrente de descarga resulta no valor da capacidade efetiva (em mAh). Essa tabela foi utilizada no nó MICA2 para calcular a capacidade residual da bateria para os modelos baseados na capacidade efetiva.

Devido aos baixos ciclos de trabalho utilizados nos experimentos e, conseqüentemente, à grande massa de dados gerada com as pilhas MN1500, os novos experimentos deveriam ser realizados com pilhas de menor capacidade. Com esse intuito, abrimos a bateria MN1604, cuja tensão nominal é de 9 V e a capacidade padrão é de 580 mAh, e constatamos que ela era composta por 6 células de 1,5 V associadas em série, conforme pode ser observado na Fig. 2.13.

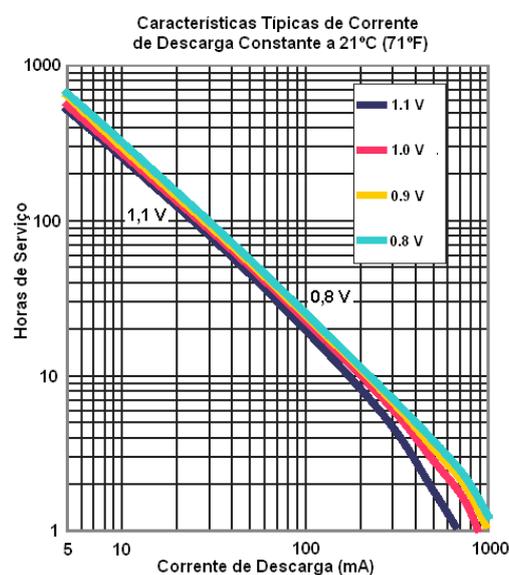


Figura 2.12: Características de descarga com corrente constante para a pilha alcalina Duracell MN1500, retirado de [Duracell, 2008b].

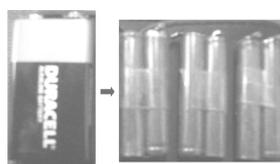


Figura 2.13: Exemplo de Bateria alcalina Duracell MN1604 desmontada.

Como a tensão de alimentação típica de nós sensores é de 3 V, foram montados três pares de células por bateria para uso nos experimentos, conforme também ilustrado na Fig. 2.13.

Similarmente às pilhas MN1500, a capacidade efetiva foi extraída do gráfico da Fig. 2.14, obtido em seu manual [Duracell, 2008b]. A partir desse gráfico, também foi construída a Tabela A.2, na faixa de 5 mA a 60 mA e com re-solução de 1 mA, utilizando interpolação linear. Essa tabela foi utilizada nos experimentos para calcular a capacidade residual da bateria para os modelos baseados na capacidade efetiva.

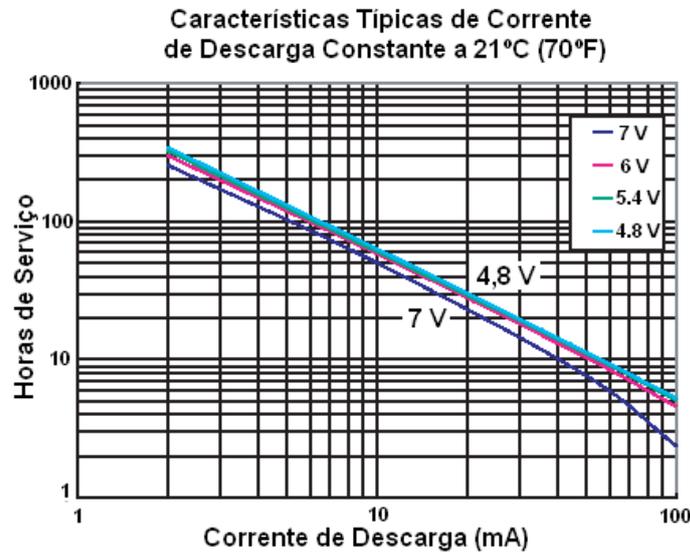


Figura 2.14: Características de descarga com corrente constante para a bateria alcalina Duracell MN1604, retirado de [Duracell, 2008b].

2.3.7 Características das Baterias de Íons de Lítio utilizadas nos Experimentos

Foram utilizadas nos experimentos as pilhas de íons de lítio LIR2450 da AA Portable Power Corp. [AA Portable Power Corp., 2009]. A sua escolha se deve principalmente a características, tais como alta densidade de energia; tensão de uma única célula ser três vezes superior à bateria de NiMH, ou seja, de 3,6 V; e o fato dessas baterias serem muito compactas e já conterem circuitos eletrônicos embutidos na própria bateria para proteção contra sobrecarga, subdescarga e curto-circuito. A tensão nominal da LIR2450 é de 3,6 V, a capacidade padrão é de 120 mA, a vida de ciclo é de 500 vezes e o seu tamanho é do tipo botão, com 24,5 mm de diâmetro. Além disso, a sua tensão final é de 2,75 V, ou seja, descargas abaixo desse nível de tensão implicam em degradação da bateria.

A escolha dessa bateria foi definida tomando-se como base as seguintes premissas: tendo em vista que a recarga da bateria será feita por um módulo de captura de energia solar, que será projetado neste trabalho e que possui capacidade limitada de fornecimento de corrente, a capacidade da bateria foi especificada de modo que seu tempo de recarga fosse inferior a 10 horas; além disso, foi levado em conta a disponibilidade comercial das baterias. Como base de cálculo foi estabelecido que a corrente de recarga seria de 35 mA e o tempo de recarga seria de 3,5 horas, resultando em uma capacidade padrão de 122,5 mAh.

Conforme descrito em seu manual, existem dois métodos de recarga da bateria LIR2450: o método de recarga padrão e o método de recarga rápido. No primeiro caso, a bateria deve ser recarregada com uma corrente constante de $0,5 C_{mA}$, onde C é o valor numérico da capacidade padrão (neste caso, 120), até que a tensão atinja 4,2 V, momento em que a recarga passa a ser com tensão constante de 4,2 V, até que a corrente atinja 0,8 mA, valor considerado como fim de recarga. No segundo caso, a diferença é que a corrente de recarga é de $1 C_{mA}$, ou seja, de 120 mA. Em ambos os casos, a temperatura de recarga recomendada é de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ e a tensão de recarga é de $4,20 \text{ V} \pm 0,05 \text{ V}$ por célula [AA Portable Power Corp., 2009, Maxim Integrated Products, 2009].

O gráfico da Fig. 2.15 ilustra as características de descarga da bateria LIR2450 para os seguintes níveis de corrente: $0,2 C_{mA}$ (24 mA), $0,5 C_{mA}$ (60 mA) e $1 C_{mA}$ (120 mA).

Devido ao efeito da taxa de descarga, as curvas estão deslocadas entre si. Apesar disso, pode ser observado que o perfil delas é muito parecido, principalmente das curvas de 24 mA e 60 mA. Ainda considerando essas duas curvas, também pode ser observado que, na faixa correspondente a

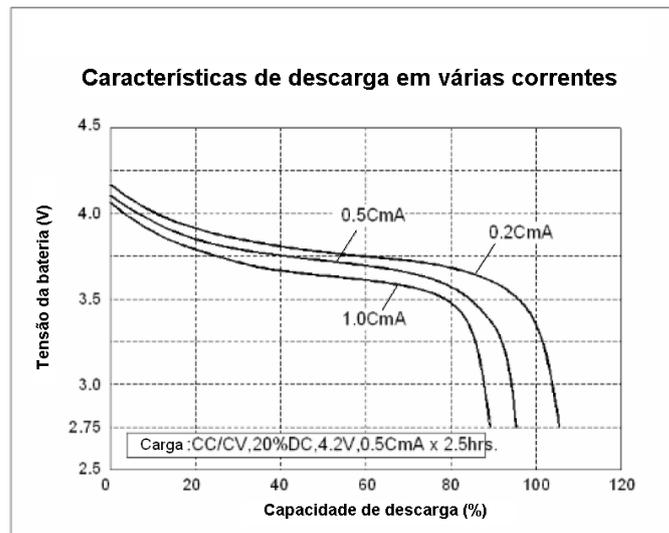


Figura 2.15: Características de descarga da bateria LIR2450 para três níveis de corrente diferentes [AA Portable Power Corp., 2009].

tensão inicial e a tensão de 3,7 V (aproximadamente), o deslocamento entre elas é fixo e pequeno. A partir desse gráfico, similarmente às pilhas alcalinas, também foi construída a Tabela A.3, na faixa de 19 mA a 60 mA e com resolução de 1 mA, utilizando interpolação linear. Essa tabela foi utilizada nos experimentos para calcular a capacidade residual da bateria para os modelos baseados na capacidade efetiva.

O efeito da temperatura sobre as características de descarga é ilustrado na Fig. 2.16. Assim como observado nas características de descarga, as curvas para as temperaturas de 20°C e de 60°C têm o mesmo perfil e o deslocamento entre elas é fixo e muito pequeno, na faixa de tensão correspondente a tensão inicial e 3,6 V.

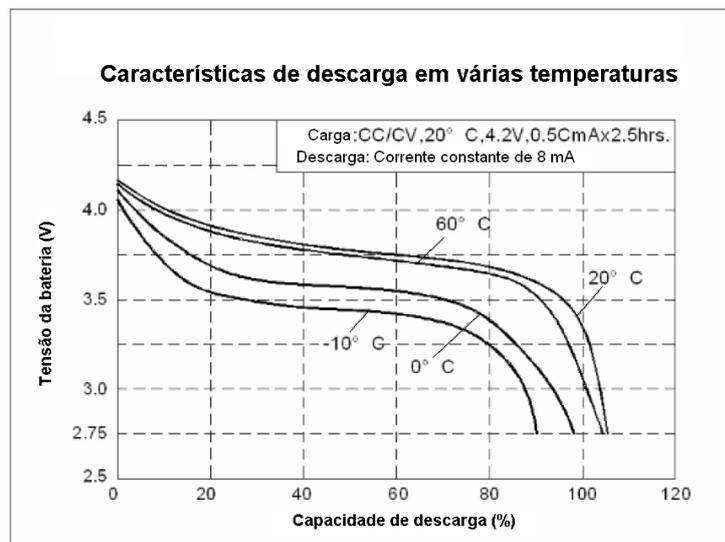


Figura 2.16: Efeito da temperatura sobre as características de descarga da bateria LIR2450 [AA Portable Power Corp., 2009].

A temperatura também tem efeito sobre a retenção de carga da bateria, conforme ilustrado na Fig. 2.17. O gráfico mostra que, quanto maior a temperatura, menor será a retenção de capacidade da bateria, que é a relação entre a capacidade residual depois da estocagem da bateria e a capacidade inicial de descarga. Por exemplo, à temperatura de 40°C, a retenção de capacidade da bateria cai para 75% de seu valor inicial, transcorridos 1,5 meses.

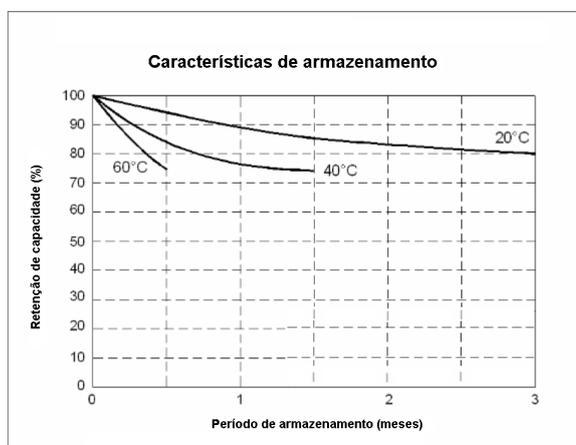


Figura 2.17: Efeito da temperatura sobre a retenção de capacidade da bateria LIR2450 [AA Portable Power Corp., 2009].

A Fig. 2.18 ilustra o efeito da vida de ciclo na capacidade da bateria. O gráfico mostra que a capacidade da bateria tende a diminuir à medida que o número de recargas aumenta. Contudo, o fabricante garante que, até 500 ciclos de recarga, a capacidade da bateria será de, no mínimo, 80% [AA Portable Power Corp., 2009, Maxim Integrated Products, 2009].

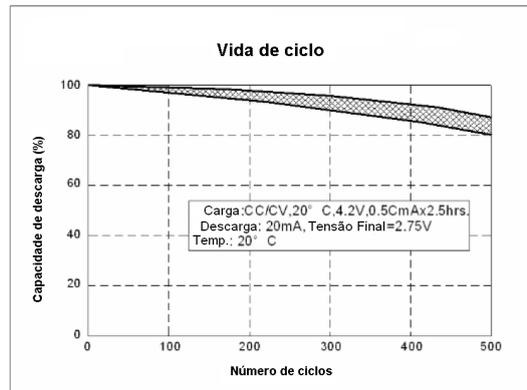


Figura 2.18: Efeito da vida de ciclo na capacidade da bateria LIR2450 [AA Portable Power Corp., 2009].

2.3.8 Proposição

A proposta deste trabalho consiste em elaborar a primeira geração de modelos de bateria para RSSF, baseados no método de sistema de escrituração, que contemplem, pelo menos, os efeitos da taxa de descarga e de relaxação. Conforme mencionado anteriormente, o efeito da taxa de descarga depende somente do nível de corrente drenado da bateria. Já o efeito de relaxação depende das características construtivas e da química da bateria, da taxa de descarga e do tempo que o sistema fica em repouso (t_{off}) [Rao et al., 2005]. A ideia é que esses efeitos sejam extraídos de experimentos de perfis de descarga variados. Desse modo, as baterias foram descarregadas com um perfil de descarga simplificado típico de nó sensores com os seguintes ciclos de trabalho: 100%, 50%, 20% e 5%. A simplificação do perfil de descarga se deve à complexidade dos efeitos mencionados, principalmente do efeito de relaxação, e para facilitar a obtenção das características dos dois efeitos. Considerando-se o fato que o efeito de relaxação não depende de t_{on} (mas de t_{off}) e como os valores de t_{on} utilizados na literatura variaram desde 20

ms [Jiang et al., 2007]; 100, 200 e 400 ms [Lahiri et al., 2002]; e 2 segundos [Rao et al., 2005], em todos os experimentos realizados neste trabalho, o período do perfil de descarga será constituído de um t_{on} de 1 segundo e nível de corrente entre 20 e 30 mA (valores típicos de nós sensores); e um t_{off} com nível de corrente próximo de zero. Esse perfil foi obtido com um transistor bipolar operando como chave, com uma carga resistiva de 150 Ω , conectada em série à bateria sob teste, em seu coletor. Inicialmente foram feitos experimentos com pilhas alcalinas de alta capacidade para verificar os modelos propostos na literatura.

Para evitar a geração de uma grande massa de dados e viabilizar maior diversidade de ciclos de trabalho (*c.t.'s*), pilhas alcalinas de baixa capacidade foram utilizadas. O mesmo perfil de descarga e *c.t.'s* utilizados nas pilhas alcalinas também foram aplicados aos experimentos das pilhas de íons de lítio.

2.4 Modelagem e Projeto de um Módulo de Captura de Energia do Ambiente

2.4.1 Introdução

A lentidão da evolução da tecnologia de baterias e o surgimento de novas tecnologias para a captura de energia do ambiente têm propiciado o desenvolvimento de RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente, cujo principal objetivo é resolver o problema de escassez de energia em RSSF [Niyato et al., 2007, Raghunathan et al., 2005]. Dentre as fontes alternativas de energia existentes, a captura de energia solar, utilizando mini-painéis solares constituídos de células fotovoltaicas em associação série-paralelo, ofer-

ece a maior densidade de potência (15 mW/cm^2) [Raghunathan et al., 2005, Roundy et al., 2004, Seah et al., 2009]. Além disso, em RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente, o problema de estimação da quantidade de energia disponível em cada nó sensor consiste em modelar e gerenciar eficientemente as múltiplas fontes de energia da unidade de suprimento de energia da RSSF.

Os módulos de captura de energia solar inicialmente propostos na literatura [Jiang et al., 2005, Raghunathan et al., 2005] são constituídos de um mini-painel solar e um dispositivo de armazenamento de energia primário [Raghunathan et al., 2005] ou um mini-painel solar, um dispositivo de armazenamento primário e um secundário [Jiang et al., 2005].

Srivastava e Raghunathan [Raghunathan et al., 2005] e Corke e outros [Corke et al., 2007] propuseram a utilização de pilhas de NiMH como dispositivos de armazenamento primário e como elementos de estabelecimento do ponto de operação do mini-painel solar. No entanto, essa configuração faz com que as pilhas permaneçam em ciclos de recarga diários e, conseqüentemente, tenham seus tempos de vida degradados e limitados a menos de dois anos [Jiang et al., 2005]. O problema dessa limitação do tempo de vida é que somente dois anos não está tão distante do tempo de vida obtido utilizando-se somente pilhas primárias e, portanto, o prolongamento do tempo de vida da RSSF não é alcançado e, conseqüentemente, o projeto do módulo de captura de energia perde seu maior objetivo.

Por outro lado, Polastre e outros [Jiang et al., 2005] propuseram a utilização de supercapacitores no lugar das pilhas de NiMH e uma bateria recarregável de íons de lítio como dispositivo de armazenamento secundário. No entanto, os supercapacitores estabelecem um ponto de operação do mini-painel, onde ele não fornecerá corrente suficiente para alimentar autono-

mente o nó sensor. Além disso, o fato de os ciclos de trabalho de nós sensores reais estarem entre 0,1% e 1% [Park et al., 2005] faz com que os supercapacitores permaneçam em processo de recarga e, conseqüentemente, suas tensões ultrapassem a tensão máxima de operação recomendada pelo fabricante. Isso reduz drasticamente o tempo de vida dos supercapacitores. A Fig. 2.19 mostra as técnicas utilizadas na literatura.

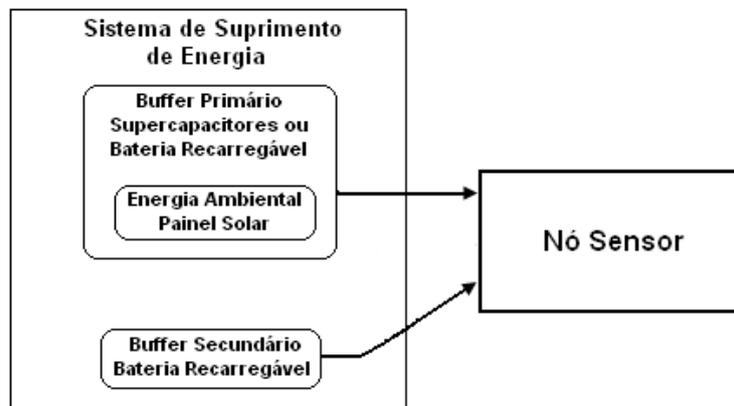


Figura 2.19: Técnicas utilizadas na captura da energia solar.

Soluções mais recentes propõem a eliminação do dispositivo de armazenamento secundário, composto por baterias recarregáveis, devido às limitações de tempo de vida e às necessidades de recargas ou substituições, de modo a se alcançar autonomia de operação e o prolongamento do tempo de vida da RSSF. Assim, as pesquisas se voltaram para a busca de soluções que façam com que o mini-painel solar opere próximo do seu ponto de máxima potência (PMP), ou seja, através do rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP). Benini e outros [Brunelli et al., 2009a, Brunelli et al., 2009b] propuseram um circuito de captura de energia solar composto por três unidades principais: o rastreador do PMP, baseado em uma célula solar piloto; um estágio de entrada com conversor DC-DC para manter a tensão do mini-painel solar próxima ao PMP, durante a carga do dispositivo de armazena-

mento (supercapacitores); e um estágio de saída com conversor DC-DC para prover um nível de tensão estável para o nó sensor. Pai Chou e outros [Chen Chou, 2010, Simjee Chou, 2008, Simjee et al., 2005] propuseram uma solução altamente complexa, que contém, inclusive, um microcontrolador de 8 bits. Essas soluções apresentaram resultados de estimação do PMP, que divergem do ponto de operação ideal (PMP) de menos de 10%, mas apresentam circuitos de maior complexidade, que ocupam maior área de PCI e maior custo energético e econômico. E, particularmente no caso da solução final de Pai Chou [Chen Chou, 2010], ela é equiparável, em complexidade, em custos energético e econômico, ao próprio nó sensor. Finalmente, essas soluções, assim como no trabalho do Polastre, também não apresentaram nenhuma solução para evitar que a tensão máxima de operação dos supercapacitores seja ultrapassada.

Portanto, a caracterização do sistema de energia constituído de mini-painéis solares e dispositivos de armazenamento primário (baterias recarregáveis ou supercapacitores), encontrada na literatura, oferece baixa eficiência e/ou alto nível de degradação dos elementos de armazenamento. Assim, como parte inicial do projeto do módulo de captura de energia solar, será implementada a caracterização do sistema composto pelo mini-painel solar e os supercapacitores, cujo resultado é uma nova abordagem energeticamente eficiente, que habilita o nó sensor a receber energia de três fontes possíveis: supercapacitores como *buffer* primário, bateria recarregável como *buffer* secundário e o mini-painel solar. A nova abordagem é ilustrada na Fig. 2.20.

As próximas seções irão apresentar a descrição, a análise, a especificação e a modelagem de mini-painéis solares e de supercapacitores, de modo que o hardware necessário para a realização dos experimentos de caracterização do sistema composto pelo mini-painel solar e os supercapacitores seja es-

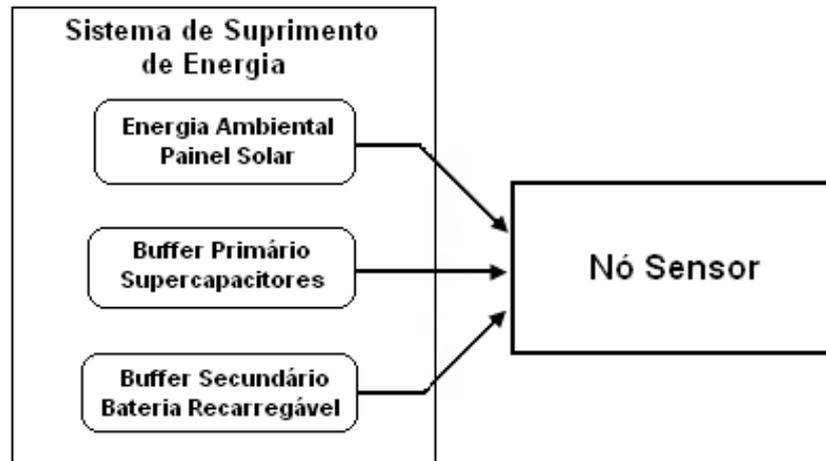


Figura 2.20: Técnica proposta para a gestão eficiente da energia solar capturada.

pecificado e uma nova unidade integrada de suprimento de energia, com a capacidade de captura de energia solar, seja modelada e projetada.

2.4.2 Modelagem de Mini-Painéis Solares

A energia solar é a mais abundante e acessível dentre as fontes de energia ambientais disponíveis. Uma importante característica de células fotovoltaicas, utilizadas para converter energia solar em energia elétrica, é sua baixa eficiência de conversão de energia solar para elétrica, que atualmente está em torno de 18% para soluções comerciais. Contudo, desenvolvimentos recentes têm melhorado a eficiência de conversão e valores em torno de 40% têm sido alcançados [Semiconductor Today, 2008]. É por isso que a energia solar tem se estabelecido como uma fonte de energia ambiental muito atrativa para RSSF.

A potência elétrica entregue por um mini-painel solar depende da radiação solar incidente, temperatura das células fotovoltaicas que compõem o mini-

painel, ângulo de incidência solar e resistência de carga [Brunelli et al., 2009a]. Mini-painéis solares são fabricados usando diferentes tecnologias, tais como silício monocristalino, policristalino e amorfo, que exibem diferentes características de corrente-tensão.

A potência elétrica disponível de um mini-painel solar pode ser modelada com o circuito equivalente mostrado na Fig. 2.21, proposto por De Soto e outros [Soto et al., 2006] e utilizado para sistemas de energia solar.

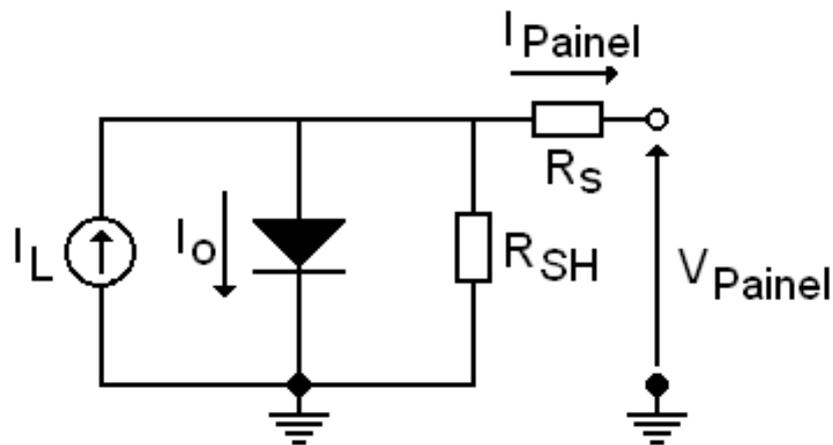


Figura 2.21: Circuito equivalente para o mini-painel solar [Soto et al., 2006].

Esse circuito contém uma fonte de corrente que emula a corrente gerada pela luz solar (I_L), um diodo para levar em conta o “joelho” típico da relação corrente-tensão da corrente de saturação reversa (I_O), um resistor série (R_S) e um resistor *shunt* (R_{SH}), que emulam as perdas intrínsecas referentes às conexões série e paralelo das células fotovoltaicas que compõem o mini-painel solar. De modo a reproduzir o comportamento elétrico do mini-painel, esse circuito equivalente requer alguns parâmetros específicos que relacionam os valores dos componentes às suas características. A relação corrente-tensão, considerando a temperatura das células e a radiação solar fixas, para o cir-

cuito da Fig. 2.21 é expressa pela Eq. 2.9:

$$I_{\text{painel}} = I_L - I_O \times \left[e^{\frac{V_{\text{painel}} + I_{\text{painel}} \times R_S}{a}} - 1 \right] - \frac{V_{\text{painel}} + I_{\text{painel}} \times R_S}{R_{SH}}. \quad (2.9)$$

$$a \equiv \frac{N_S \times \eta \times k \times T_C}{q}. \quad (2.10)$$

Onde a é o fator ideal do mini-painel modificado definido pela Eq. 2.10, q é a carga do elétron, k é a constante de Boltzmann, η é o fator ideal de uma única célula fotovoltaica, N_S é o número de células fotovoltaicas em série e T_C é a temperatura do mini-painel.

Os parâmetros I_L , I_O , R_S e R_{SH} devem ser computados de modo a se determinar o ponto de operação do mini-painel e a potência entregue à carga. Tais parâmetros geralmente são expressos em função da radiação solar incidente no mini-painel e de sua temperatura.

Em função da dependência dos diversos fatores relacionados anteriormente, da complexidade do modelo e das limitações computacionais e energéticas das RSSF, uma nova abordagem deve ser elaborada, de modo a simplificar o gerenciamento de energia do sistema e o rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP) do mini-painel solar. Tendo em vista que a fonte de corrente do mini-painel solar (I_L) é dependente da intensidade da luz solar e que o resistor *shunt* tende a ser muito grande e a corrente de saturação reversa tende a ser muito pequena, pode-se reescrever a Eq. 2.9 da seguinte forma:

$$\lim_{R_{SH} \rightarrow \infty} I_L - I_O \times \left[e^{\frac{V_{\text{painel}} + I_{\text{painel}} \times R_S}{a}} - 1 \right] - \frac{V_{\text{painel}} + I_{\text{painel}} \times R_S}{R_{SH}}. \quad (2.11)$$

Cujo resultado é:

$$I_{p\grave{a}nel} = I_L - I_O \times \left[e^{\frac{V_{p\grave{a}nel} + I_{p\grave{a}nel} \times R_S}{a}} - 1 \right]. \quad (2.12)$$

Considerando-se que a corrente de saturação reversa tende a ser muito pequena, temos:

$$\lim_{I_O \rightarrow 0} I_L - I_O \times \left[e^{\frac{V_{p\grave{a}nel} + I_{p\grave{a}nel} \times R_S}{a}} - 1 \right]. \quad (2.13)$$

Finalmente, podendo chegar à seguinte aproximação:

$$I_{p\grave{a}nel} \approx I_L. \quad (2.14)$$

Esse resultado indica que a medição da corrente do mini-painel solar ($I_{p\grave{a}nel}$) é uma alternativa aos cálculos complexos apresentados anteriormente. Para melhor indicar o desempenho do mini-painel solar ao longo de sua vida útil, propõe-se um novo parâmetro, denominado eficiência de corrente η_i , definida como a relação entre a corrente do mini-painel medida ($I_{p\grave{a}nel}$) e a corrente de curto-circuito do mini-painel solar (I_{SC}), conforme mostrado na Eq. 2.15. Quando η_i se aproximar de 1, a corrente fornecida pelo mini-painel estará próxima à corrente de curto-circuito (I_{SC}). Como a fonte de corrente do mini-painel solar (I_L) é dependente da intensidade da luz solar, isto quer dizer, indiretamente, que há uma alta intensidade de luz solar incidindo sobre o mini-painel solar no momento da medição.

$$\eta_i = \frac{I_{p\grave{a}nel}}{I_{SC}}. \quad (2.15)$$

A Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI¹), proposta

¹INTI significa Sol em Inca: uma homenagem à essa grande civilização que tinha

adiante, tem como solução de modelagem do mini-painel solar a medição da corrente do mini-painel solar e o cálculo do parâmetro proposto (η_i), de modo a efetuar o gerenciamento de energia da unidade e o rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP) do mini-painel solar.

Dentre as opções disponíveis, o mini-painel solar SCC3766 da Solarbotics [Solarbotics Ltda, 2008] foi escolhido devido à sua disponibilidade comercial, baixo custo e fornecimento de corrente dentro da faixa de corrente dos nós sensores (entre 20 e 30 mA). O SCC3766 é composto por uma associação série-paralelo de 14 células solares monocristalinas compactas, montadas em PCI e encapsuladas em *epoxy*, que protege as células e torna o mini-painel uma solução muito robusta, totalizando uma área de 24,42 cm² (37 x 66 mm). A tensão e corrente nominais estão especificadas em 6,7 V e 30 mA, respectivamente. Além disso, testes efetuados sob luz solar direta (solstício de verão do hemisfério norte) [Solarbotics Ltda, 2008] apresentaram tensão de “circuito aberto” (V_{OC}) de 8 V e corrente de “curto-circuito” (I_{SC}) de 44 mA.

A curva V-I do mini-painel solar SCC3766 é apresentada na Fig. 2.22 e mostra que ele se comporta como uma fonte de corrente controlada por tensão (FCCT).

Pode ser observado que a corrente a ser fornecida pelo mini-painel é definida pelo projetista, de acordo com a escolha do ponto de operação do sistema. Esse comportamento de fonte de corrente desabilita a alimentação direta da carga (nó sensor, por exemplo), visto que a tensão se torna dependente da variação da impedância de carga. Isso impõe a utilização de um dispositivo de armazenamento primário, cuja função é armazenar a energia capturada pelo mini-painel solar e fornecer um nível de tensão estável

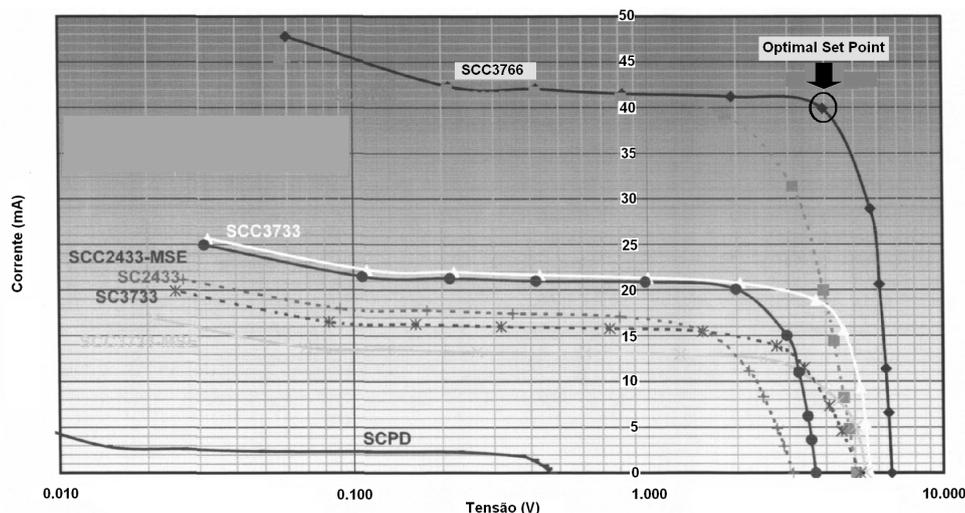


Figura 2.22: Curva V-I do mini-painel solar SCC3766 [Solarbotics Ltda, 2008].

para a carga. Portanto, existe um ponto ótimo de operação, onde a energia fornecida pelo mini-painel é maximizada. Esse ponto deve ser baseado no dispositivo de armazenamento primário utilizado (supercapacitores, no caso deste trabalho) e a corrente demandada pela carga, composta pelo nó sensor e a bateria recarregável de *back-up* (no processo de recarga). Visto que a energia armazenada nos supercapacitores depende do nível de tensão e a corrente típica do nó sensor está entre 20 e 30 mA, o ponto ótimo de operação (ponto de máxima potência) é encontrado, obtendo-se no gráfico da Fig. 2.22 a coordenada composta pelo maior nível de tensão possível (para armazenar o máximo de energia nos supercapacitores) e a maior corrente, que atenda aos requisitos de corrente de carga. Outra forma de determinar o ponto de máxima potência (PMP) do mini-painel solar é traçar suas curvas características e calcular a máxima potência que pode ser entregue à carga para cada uma das correntes que constam nessas curvas.

2.4.3 Modelagem de Supercapacitores

Supercapacitores, também conhecidos como ultracapacitores, são dispositivos emergentes utilizados para o armazenamento de energia, cuja densidade de potência é maior que a densidade de baterias e 10 a 20 vezes maior que a densidade de capacitores eletrolíticos comuns [Zubieta Bonert, 1998]. Supercapacitores podem ser carregados e descarregados continuamente sem degradação e são ideais para aplicações pulsantes, tais como aplicações típicas de RSSF. Suas principais desvantagens em relação às baterias são a alta corrente de fuga, o tamanho e o custo.

Baterias recarregáveis são especificadas para algumas centenas de ciclos de recarga. Por exemplo, baterias de íons de lítio e NiMH atuais são especificadas para 500 ciclos de recarga. Quando submetidas a ciclos de recarga frequentes, como é o caso da solução proposta por Srivastava [Raghunathan et al., 2005] e Corke [Corke et al., 2007], em que as duas pilhas de NiMH utilizadas no módulo de captura de energia estão conectadas diretamente ao mini-painel solar, o tempo de vida dessas pilhas é significativamente degradado e, conseqüentemente, o módulo de captura de energia não poderá fornecer energia ao nó sensor por muitos anos, conforme esperado e especificado no projeto.

Além da especificação adequada, torna-se necessária a modelagem dos supercapacitores, de modo a viabilizar a implementação da CODE em uma RSSF com a capacidade de captura de energia solar. Contudo, seu comportamento difere completamente daquele observado em baterias. Apesar de oferecerem um jeito mais simples de estimar a energia armazenada que as baterias, a tensão medida sobre os supercapacitores pode levar a erros de estimação se ciclos de carga e descarga não forem levados em conta [Brunelli et al., 2009a].

Zubieta e outros [Zubieta Bonert, 1998] propuseram um modelo de cir-

cuito equivalente de supercapacitores para aplicações de Eletrônica de Potência relacionadas a sistemas de *back-up* de energia. Esse modelo deveria atender a requisitos, tais como: estrutura (do modelo) relacionada com as características físicas e simples para uso como ferramenta prática de projeto; o modelo deveria descrever o comportamento dos supercapacitores sobre uma faixa de 30 minutos com exatidão; e deveria ser possível determinar os parâmetros do modelo proposto a partir de medições nos supercapacitores. Além disso, Zubieta observou em experimentos que ocorria uma redistribuição interna de cargas entre diferentes capacitores equivalentes internos. Com base nessa observação e nos requisitos, Zubieta concluiu que um modelo de circuito equivalente RC simples não seria suficiente para caracterizar o comportamento de seus terminais. Foram utilizados supercapacitores de carbono ativado de 1.500 F e 470 F nos experimentos e o resultado final foi um modelo de circuito equivalente que consistia de três ramos RC e um ramo resistivo, sendo que um deles com a capacitância dependente da tensão, conforme ilustrado na Fig. 2.23.

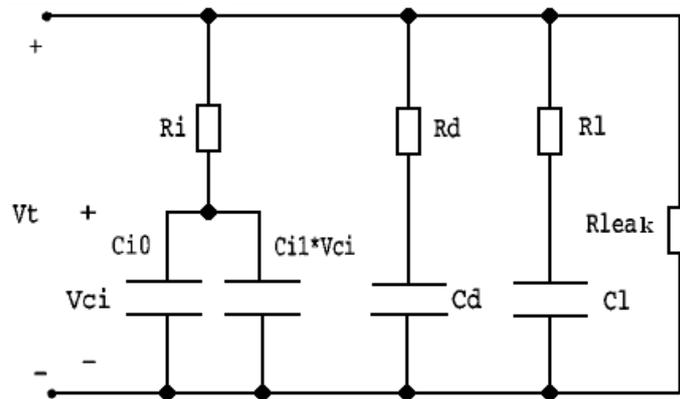


Figura 2.23: Modelo de circuito equivalente proposto por Zubieta.

Com exceção do ramo resistivo, cada um dos outros três ramos tem uma

constante de tempo distinta, que difere das outras de mais de uma ordem de grandeza, o que resulta em um modelo de fácil obtenção. O primeiro ramo ou ramo imediato, composto pelos elementos R_i , C_{i0} e o capacitor dependente da tensão C_{i1} (em F/V), domina o comportamento imediato do supercapacitor na faixa de tempo de segundos, em resposta à uma ação de carga. O segundo ramo, composto pelos elementos R_d e C_d , domina o comportamento na faixa de tempo de minutos. O terceiro ramo, composto pelos elementos R_l e C_l , domina o comportamento para tempos superiores a 10 minutos. Finalmente, o quarto ramo, composto pela resistência de fuga (R_{leak}), representa a fuga de corrente do supercapacitor.

Esse comportamento não-linear da capacitância imediata do supercapacitor faz com que mais energia seja armazenada, se comparada à capacitância de um capacitor linear constante. Conforme deduzido por Zubieta [Zubieta Bonert, 1998], a energia armazenada no ramo imediato é dada por:

$$E_{cap} = \frac{1}{2} \times C_{i0} \times V^2 + \frac{1}{3} \times C_{i1} \times V^3. \quad (2.16)$$

Dentro do contexto de RSSF, alguns trabalhos foram realizados. Merrett e outros [Merrett et al., 2008] propuseram um modelo simples de energia empírico para nós sensores alimentados por supercapacitores, direcionado para o uso em simuladores, que considerou a variedade e o comportamento dos componentes que consomem energia em um nó sensor. Renner e outros [Renner et al., 2009] também propuseram um modelo de descarga analítico para a predição do tempo de vida para nós sensores alimentados por supercapacitores, que considerou os efeitos do conversor DC-DC de saída, acoplado entre os supercapacitores e o nó sensor. Contudo, esses modelos utilizaram como base a fórmula clássica $E_{cap} = \frac{1}{2} \times C \times V^2$ que, conforme mostrado na Eq. 2.16, precisa de uma revisão.

A solução proposta por Zubieta [Zubieta Bonert, 1998] tinha como foco o uso em sistemas de *back-up* de energia, onde os supercapacitores seriam responsáveis em manter a carga durante 30 minutos ininterruptos, na ausência da rede elétrica. Por outro lado, em aplicações de RSSF, os supercapacitores poderão suprir energia para o nó sensor desde alguns minutos até várias horas (todo o período da noite). No entanto, devido aos baixos ciclos de trabalho utilizados em RSSF, independentemente do período total de fornecimento de energia, os nós sensores que compõem a rede somente ligarão durante intervalos de tempos da ordem de segundos ou milisegundos (t_{on}) e, portanto, permanecerão “dormindo” a maior parte do tempo. De acordo com o modelo de Zubieta, o ramo RC que domina o comportamento do supercapacitor na faixa de tempo de segundos, em resposta à uma ação de carga, é o ramo imediato. Desse modo, pode-se simplificar o modelo proposto por Zubieta para utilização em RSSF. Assim, propõe-se a utilização de um modelo mais simplificado, mas que contenha somente o ramo imediato, de modo a simplificar a implementação da CODE. Desse modo, medidas realizadas em supercapacitores de aerogel de carbono para aplicações em RSSF serão apresentadas, analisadas e a resposta do circuito equivalente proposto será comparada com os resultados experimentais obtidos.

2.4.4 Proposição

Em RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente, a proposta deste trabalho consiste na modelagem e projeto de uma unidade de suprimento de energia para o nó sensor de uma RSSF com a capacidade de captura de energia solar, composta por um mini-painel solar, supercapacitores, uma bateria recarregável (*back-up*) e um agente de gerenciamento de energia, que será responsável pela gestão eficiente das múltiplas fontes de

energia da unidade. Os principais requisitos de projeto são: simplicidade, baixo custo, rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP) e consciência de disponibilidade energética (CODE). A fig. 2.24 ilustra a unidade de suprimento de energia proposta.

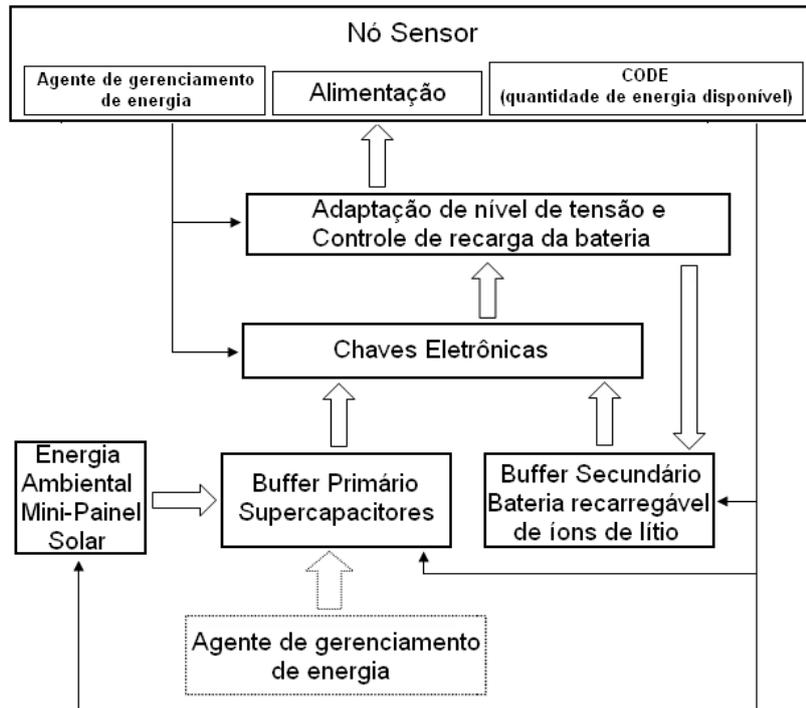


Figura 2.24: Diagrama de blocos da unidade de suprimento de energia.

O bloco de energia ambiental é composto pelo mini-painel solar e tem como função a captura da energia solar. O *buffer* primário é composto pelos supercapacitores e tem a função de armazenar a energia capturada. O *buffer* secundário é composto por uma bateria recarregável e tem a função de fornecer energia em situações de indisponibilidade do *buffer* primário. Para a unidade de suprimento de energia proposta, a química a ser utilizada é a de íons de lítio. A escolha desta química se deve principalmente a características, tais como alta densidade de energia, tensão de uma única célula

de 3,6 V e o fato das baterias de íons de lítio comerciais atuais serem muito compactas e já conterem circuitos eletrônicos embutidos na própria bateria para proteção contra sobrecarga e curto-circuito. O agente de gerenciamento de energia, que está dentro do nó sensor, é um algoritmo que atuará nas chaves eletrônicas, de modo a selecionar a fonte de energia mais adequada para o nó sensor, de acordo com as informações de disponibilidade energética fornecidas pela CODE. A outra função desse agente de gerenciamento é efetuar o controle de recarga da bateria recarregável. A CODE dispõe de um algoritmo que tem a função de processar as medidas de temperatura da bateria e de energia das múltiplas fontes disponíveis (*buffer* primário, *buffer* secundário e energia ambiental) e disponibilizar as informações obtidas para o agente de gerenciamento de energia. O agente de gerenciamento de energia, que se encontra abaixo do *buffer* primário, é uma solução de hardware que tem a função de atuar no processo de carga dos supercapacitores, com o intuito de evitar sobretensão sobre eles e fazer com que o mini-painel solar atue autonomamente. Finalmente, o bloco de adaptação de nível de tensão e controle de recarga da bateria tem duas funções: adaptar o nível da tensão fornecida pelos *buffers* primário e secundário ao nível de tensão de operação do nó sensor e recarregar a bateria recarregável a partir do sinal de controle fornecido pelo agente de gerenciamento de energia do nó sensor.

Capítulo 3

Estimação da Capacidade

Residual de Baterias em Nós

Sensores de RSSF

A implementação da consciência de disponibilidade energética (CODE) em RSSF, que utilizam baterias como fonte de suprimento de energia, requer a elaboração de modelos que possam prover a estimação da capacidade residual dessas baterias. Este capítulo tem por objetivo apresentar uma abordagem quantitativa e qualitativa para a elaboração da primeira geração de modelos para a estimação da capacidade residual de baterias.

Na primeira e segunda seções são apresentados os testes de validação do modelo de estimação da capacidade residual das pilhas alcalinas. São apresentados dois modelos, o Modelo baseado na Taxa de Descarga Efetiva (MTDE) e o Modelo Comportamental da Bateria Alcalina (MCBA). Na

primeira seção, o MTDE foi obtido utilizando-se baterias alcalinas de alta capacidade e é baseado no método de contagem de Coulomb.

Na segunda seção, o MCBA, que é baseado no método de sistema de escrituração, é apresentado e validado utilizando-se baterias alcalinas de baixa capacidade, de modo a permitir um número maior de experimentos para a extração do modelo.

Na terceira seção, é apresentado e validado um modelo para baterias de íons de lítio, chamado de Modelo Comportamental da Bateria de Íons de Lítio (MCBIL), e também baseado no método de sistema de escrituração.

3.1 Estimação da Capacidade Residual de Pilhas Alcalinas de Alta Capacidade

Esta seção tem por objetivo apresentar os requisitos para testar os modelos de baterias da literatura apresentados na seção 2.3.4, usando pilhas alcalinas de alta capacidade. Para isso foram utilizadas a plataforma Mica Motes e a placa de aquisição NI USB-6009.

Foram utilizadas duas pilhas novas MN1500 da Duracell. Conforme seu manual [Duracell, 2006] e medidas efetuadas antes do experimento, os valores dos parâmetros a e b do MLT (Equação 2.2) foram obtidos considerando-se os seguintes pontos: (3,154 V, 3.500 mAh) e (1,6 V, 0 mAh). Assim, a Equação 2.2 é reescrita como:

$$C_{res} = 2.252,25 \times V_{batt} - 3.603,6. \quad (3.1)$$

Ao serem testados os modelos da literatura, estes apresentaram resultados pífios, o que ensejou uma análise rigorosa dos dados obtidos, levando à proposição de um modelo mais realista. Dessa forma, um novo modelo é pro-

posto, denominado Modelo baseado na Taxa de Descarga Efetiva (MTDE), e definido pela Equação 3.2:

$$C_{res} = C_{eff}(I(t)) - \sum_{t_0}^{t_d} I(t)\Delta t, \quad (3.2)$$

Em vez de fatorar a capacidade efetiva para uma dada carga em relação à capacidade máxima (conforme a Equação 2.8) ou utilizar somente a capacidade máxima fornecida pelo manual do fabricante (conforme Equação 2.4), a capacidade efetiva atual (C_{eff}) sob uma dada carga é utilizada. O consumo da carga é acumulado e subtraído da capacidade efetiva (C_{eff}), dando a capacidade residual (C_{res}). Isso significa que o MTDE estima o tempo de vida da bateria baseado na carga atual menos o consumo de energia passado. Essa é uma abordagem mais realista que a Equação 2.3, visto que ela contabiliza a C_{eff} real e não a C_{MAX} do manual do fabricante, e que a Equação 2.4, visto que essa última não contabiliza a carga real.

Para a estimação da capacidade residual das pilhas alcalinas, foi montado um experimento onde se obtêm os valores de tensão de alimentação e de corrente de um nó sensor em operação. Para tal foi projetado um circuito para a aquisição desses valores, que foi interconectado entre as pilhas e o nó sensor. Este circuito obtêm amostras dos sinais utilizando o CAD do próprio nó sensor. Um circuito de aquisição de dados externo é usado como referência de medição.

3.1.1 Plataforma de Medição

O MICA2 é um nó sensor da plataforma Mica Motes, uma das mais utilizadas para projetos de RSSF. Ele é composto por um microcontrolador ATMEGA128L [Atmel Corporation, 2008], uma memória externa de 512

KB (AT45DB041B) [Atmel Corporation,], um transceptor de rádio digital (CC1000) [Texas Instruments, 2008], um conector de 51 pinos para conexão de placas de sensores (denominadas de *sensorboards*) e três LED's para depuração, conforme pode ser visto na Fig. 3.1 [Crossbow, 2006].

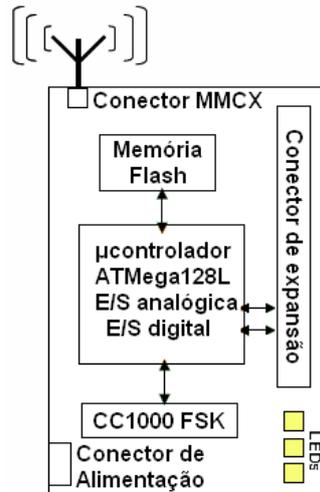


Figura 3.1: Diagrama esquemático do MICA2 [Crossbow, 2006].

O ATMEGA128L é um microcontrolador de 8 bits, com 128 KB de memória flash, 4KB de SRAM, 4 KB de EEPROM e um conversor analógico/digital (ADC) de aproximações sucessivas de 10 bits.

Também foi utilizada a placa de aquisição NI USB-6009 da National Instruments [National,] e o software LabView 7.1 [National,] para efetuar a aquisição simultânea de corrente e tensão do nó sensor e servir como referência de medição. O uso da placa de aquisição possibilitou a sincronização do tempo de aquisição dessas medidas (corrente e tensão) com as medidas efetuadas pelo nó sensor. A NI USB-6009 é uma placa de aquisição de dados de 14 bits de resolução e taxa máxima de amostragem de 48 kSamples/s. Seu conversor A/D é de aproximações sucessivas e a faixa de tensão de entrada utilizada foi de -4 V a +4 V.

A estimação baseada na tensão pode ser facilmente obtida, pois a tensão da bateria pode ser lida no canal 7 do conversor A/D do microcontrolador utilizado no MICA2 [Crossbow Technology, 2007]. Por isso, não há necessidade de nenhuma intervenção de hardware. A estimação baseada na corrente oferece maior exatidão, porém implica em uma intervenção no hardware do nó sensor. Considerando-se que o objetivo é inserir um sensor de corrente (conversor corrente-tensão) entre a bateria e o circuito do MICA2, a melhor solução encontrada foi utilizar uma placa de sensores da plataforma. Dentre as placas de sensores disponíveis, a MTS101 (MoTe Sensorboard) é a única que permite a inserção de novos sensores, disponibilizando o acesso aos canais analógicos 3 a 7 do conversor A/D do MICA2 e uma área para prototipagem [Crossbow Technology, 2007].

A Fig. 3.2 mostra a MTS101.

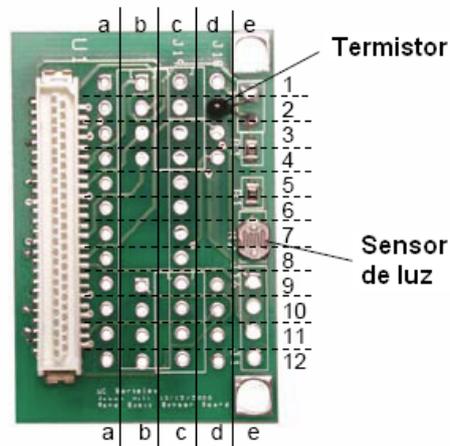


Figura 3.2: *Sensorboard* MTS101.

Existem duas possibilidades para se efetuar a medição: utilizar uma solução comercialmente disponível para monitoramento de baterias ou projetar um hardware dedicado. O problema das soluções comerciais, tais como

BQ2010 da Texas [Texas, 2006], MAX1660, DS2745 e DS2438 da Maxim [Dallas, 2006] é que elas são dedicadas a baterias recarregáveis. Portanto, elas possuem e operam dentro da faixa de tensão dessas químicas. Por exemplo, o DS2745 é especificado para uma pilha de íons de lítio e sua tensão de alimentação mínima é de 2,5 V. Como a tensão de corte de duas pilhas alcalinas em série (caso do MICA2) é de 1,6 V, haveria desperdício de energia referente à diferença de tensão, ou seja, 0,9 V. Como os nós sensores de uma RSSF devem extrair o máximo de energia da bateria, um desperdício dessa magnitude seria inadmissível. Além disso, o algoritmo proprietário conteria parâmetros específicos de baterias secundárias, que não se adequariam às pilhas alcalinas. Finalmente, a maioria das soluções comerciais utilizam contagem de Coulomb, ou seja, medem a quantidade de carga que está fluindo para dentro (recarga) e para fora (descarga) da bateria, que são armazenadas em registradores específicos. A diferença entre eles é justamente a indicação da capacidade residual. O problema é que as pilhas alcalinas não são recarregáveis e, portanto, não haveria a contagem de cargas do processo de recarga. Conseqüentemente, a indicação da capacidade residual seria inconsistente.

3.1.2 Solução Proposta

Diante do exposto acima, a escolha pelo desenvolvimento de um hardware dedicado se mostrou mais adequada. Assim, foi projetada uma placa de condicionamento de sinais, denominada DMC (Dispositivo de Medição de Corrente), com o intuito de adequar as medidas do sensor de corrente à entrada analógica do conversor A/D, cujo diagrama de blocos é apresentado na Fig. 3.3.

O diagrama elétrico correspondente pode ser visualizado na Fig. 3.4.

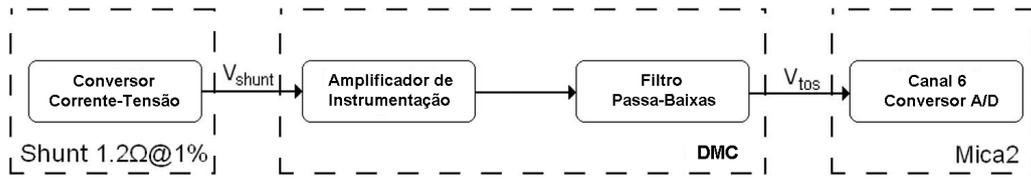


Figura 3.3: Diagrama de blocos da DMC.

O sensor de corrente (resistor de $1,2 \Omega$) tem tolerância de $\approx 1\%$ e tem o objetivo de converter a corrente em tensão. Como esta tensão é da ordem de milivolts (0 a 50 mV), torna-se necessária a sua amplificação para que a mesma possa ser lida pelo conversor A/D do MICA2, cuja faixa de tensão da entrada analógica é de 0 a 2,56 V. Para isso, foi utilizado o amplificador de instrumentação INA327 da Texas [Texas Instruments, 2006] que, dentre as opções disponíveis, possuía alto ganho de rejeição de modo comum, consumo em modo ativo na faixa de 1,5 mA e modo *shutdown* de baixo consumo (2 μ A). Esse modo pode ser selecionado pelo pino de *Enable*, conforme ilustra na Fig. 3.4.

O ganho do amplificador foi estipulado em $G=50$ e os resistores foram calculados seguindo as orientações das notas de aplicação do manual do amplificador [Texas Instruments, 2006]. O ganho é dado pela Eq. 3.3.

$$G = 2 \times \frac{R_2}{R_1}, \quad (3.3)$$

onde G é o ganho do amplificador de instrumentação, R_2 é o resistor de 200 k Ω e R_1 é o resistor de 8 k Ω .

Conforme *datasheet* do INA327, o filtro passa-baixas formado pelo resistor de 100 Ω e o capacitor de 1 μ F, é necessário para minimizar o ruído do circuito de auto-correção interno ao amplificador. A Fig. 3.5 ilustra a placa de condicionamento de sinais DMC.

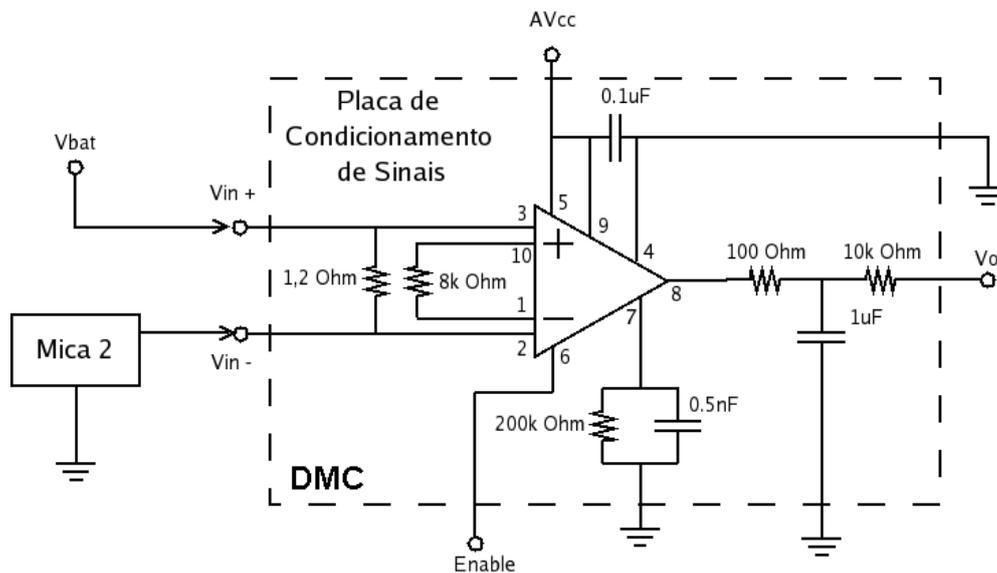


Figura 3.4: Diagrama elétrico da DMC.

Foram montados três protótipos da DMC. Para testar os protótipos e determinar o ganho real do amplificador de instrumentação, foi montado o circuito da Fig. 3.6 em *protoboard* para emular a faixa de corrente de operação do MICA2.

As medidas foram executadas utilizando o multímetro digital Agilent 3458A de 8,5 dígitos do Laboratório de Sistemas de Medição da Escola de



Figura 3.5: Placa de circuito impresso da DMC.

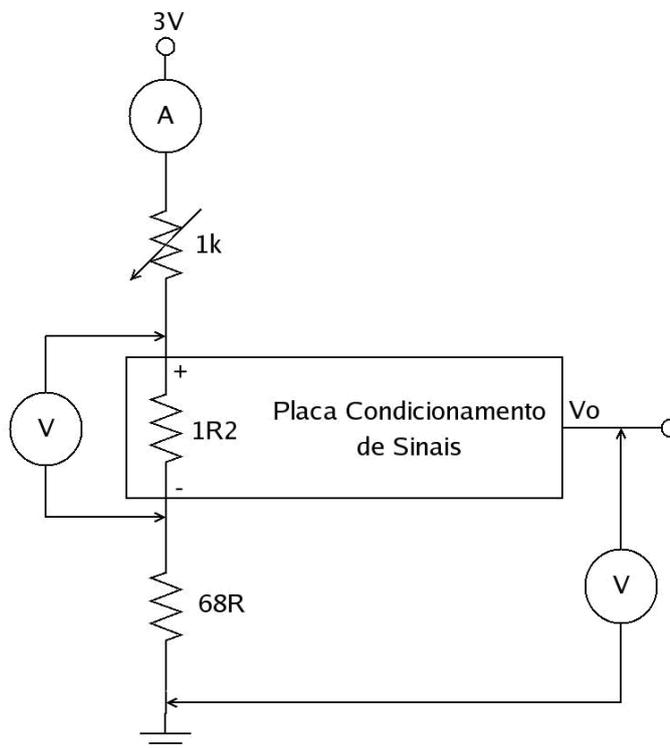


Figura 3.6: Circuito de emulação do MICA2.

Engenharia da UFMG, que foi conectado ao resistor *shunt* e à saída do DMC. O potenciômetro de $1\text{ k}\Omega$ foi ajustado desde seu valor mínimo ($0\ \Omega$) até seu valor máximo ($1\text{ k}\Omega$), de modo que a corrente variasse em passos de 1 mA . A cada novo ajuste, o ganho era calculado e registrado. Depois do término de todas as medidas, o valor do ganho médio (truncado para quatro casas decimais) calculado foi de **46,1832**.

A placa DMC foi soldada na área de prototipagem da MTS101, conforme pode ser observado na Fig. 3.7.

As placas MTS101 utilizadas na prototipagem têm um sensor de luz (LDR) conectado ao canal analógico 6 do ADC, conforme pode ser observado na Fig. 3.8. PW1 é o sinal de controle que é enviado pelo microcontrolador

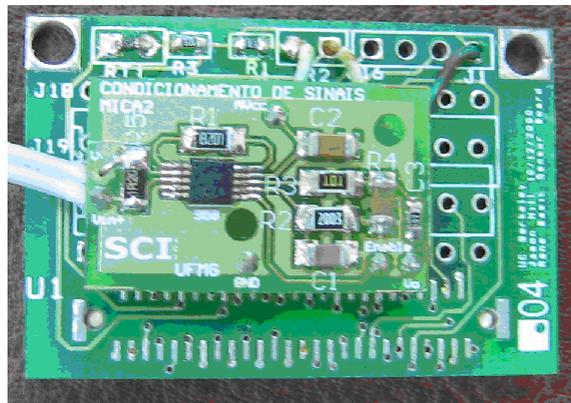


Figura 3.7: DMC soldada na área de prototipagem da MTS101.

do MICA2.

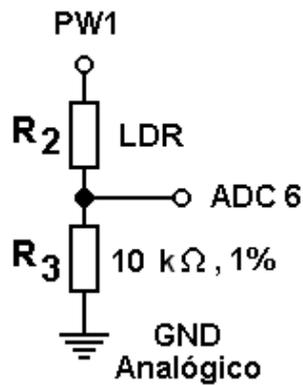


Figura 3.8: Diagrama elétrico da MTS101.

O LDR foi retirado e a saída da placa DMC foi conectada ao resistor R_3 . Além disso, o sinal de controle (PW1) foi conectado ao pino *Enable* do amplificador de instrumentação INA327, para habilitá-lo ou desabilitá-lo (*shutdown*). Isso foi feito para se obter o mínimo de intervenção de hardware e reusar o software embutido.

A equação da corrente que flui pelo resistor *shunt* pode ser determinada a partir das seguintes derivações:

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}}; V_{sh} = \frac{V_o}{G}; V_o = \frac{V_{R_3} \times (R_2 + R_3)}{R_3}, \quad (3.4)$$

onde I_{sh} é a corrente que flui pelo resistor *shunt* (R_{sh}), V_{sh} é a tensão sobre R_{sh} , G é o ganho do amplificador de instrumentação, V_o é a tensão de saída do amplificador e V_{R_3} é a tensão sobre o resistor R_3 .

Considerando-se que os valores de R_2 e R_3 são iguais (10 k Ω) e substituindo-se V_o em V_{sh} e, em seguida, V_{sh} em I_{sh} , temos:

$$I_{sh} = 2 \times \frac{V_{R_3}}{G \times R_{sh}}. \quad (3.5)$$

No entanto, V_{R_3} também é a tensão da entrada analógica do ADC, que será convertida para um valor digital, e pode ser calculada de seguinte forma:

$$V_{R_3} = \frac{ADCCounts}{ADC_FS} \times V_{REF}, \quad (3.6)$$

onde $ADCCounts$ é o valor digital de saída do ADC, ADC_FS é o fundo de escala digital do ADC (1024) e V_{REF} é a tensão de referência interna do ADC (configurada para 2,56 V).

Finalmente, substituindo a Eq. 3.6 em 3.5, temos:

$$I_{sh} = \frac{2 \times ADC}{G \times R_{sh} \times ADC_FS} \times V_{REF}. \quad (3.7)$$

Como o MICA2 utiliza um microcontrolador de 8 bits e de ponto fixo, os valores de ADC_FS , V_{REF} , G e R_{sh} foram substituídos e a Eq. 3.7 foi simplificada, resultando na Eq. 3.8:

$$I_{sh}(mA) = \frac{ADC}{11}. \quad (3.8)$$

Medidas feitas em laboratório utilizando a Eq. 3.8 e o multímetro digital Agilent 3458A conectado diretamente ao resistor *shunt*, quando comparadas, indicaram um erro médio inferior a 2%.

A tensão da bateria (V_{batt}) já está disponível no canal 7 do ADC do MICA2 e, Conforme manual do MICA2, pode ser determinada pela seguinte equação:

$$V_{batt} = \frac{ADC_FS}{ADCCounts} \times V_{ref}, \quad (3.9)$$

onde V_{ref} é a tensão de referência externa ao ADC, gerada pelo circuito integrado LM4041 (1,223V), ADC_FS é valor de fundo de escala digital do ADC (1024) e $ADCCounts$ é o valor lido na saída digital do ADC.

A única intervenção de hardware necessária no MICA2 foi a inserção de um conector em série com as pilhas, conforme mostrado na Fig. 3.9.

3.1.3 Bancada de Testes

A Fig. 3.10 mostra o diagrama esquemático do experimento, onde a DMC foi conectada ao nó sensor MICA2 e uma placa de aquisição de dados analógica externa (DAQ) foi utilizada como sistema de medição de referência.

O MICA2 e a DAQ foram programados para medir uma amostra a cada segundo. O nó sensor também foi programado para medir a tensão da bateria (V_{mica}) e a tensão de saída da DMC (V_{tos}), que foi utilizada para calcular a

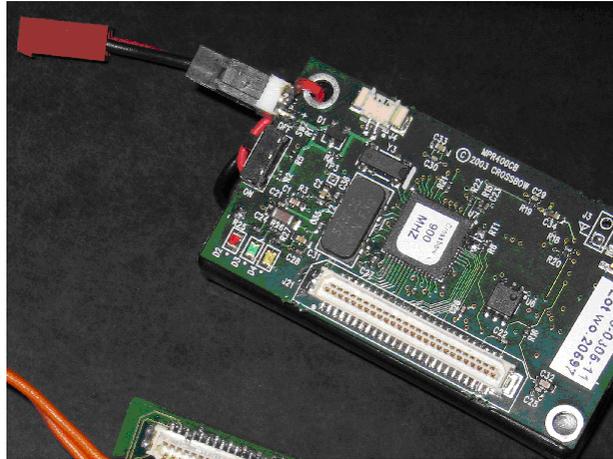


Figura 3.9: MICA2 adaptado.

corrente do nó sensor através da Eq. 3.8. Visto que a transmissão representa o maior custo de energia em nós sensores, pois a energia consumida para transmitir um bit seria suficiente para executar 1.000 instruções de 32 bits [Barr Asanović, 2006, Tang et al., 2005], todas as medidas foram processadas, de modo a reduzir o número de bits a serem transmitidos pelo nó sensor e enviadas pelo seu transceptor para a estação base. A fim de avaliar os modelos de bateria em um cenário crítico (pior caso), reduzir a duração do experimento e enfatizar o efeito de relaxação (não contemplados pelos modelos baseados em corrente), o nó sensor foi programado para operar continuamente. Para atender esses requisitos, os três LED's do nó sensor foram configurados para piscar a cada um segundo. Como resultado, a corrente do nó sensor chaveou entre 18 mA e 25 mA continuamente, provendo as condições para observar o efeito de relaxação em todos os experimentos. A DAQ também foi programada para medir a tensão da bateria (V_{batt}) e a tensão do resistor *shunt* (V_{shunt}), de modo a calcular a capacidade residual da bateria de acordo com as equações 3.1, 2.5 e 3.2.

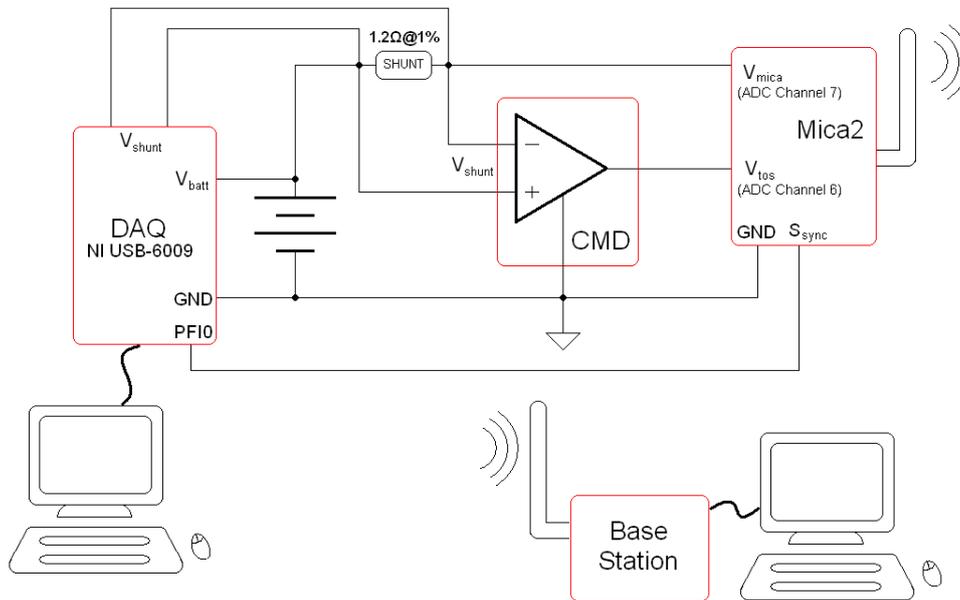


Figura 3.10: Diagrama esquemático do experimento.

O sincronismo entre os dois sistemas de medição (DAQ e DMC) foi obtido utilizando-se um sinal de “trigger” externo (PFI 0) configurado na DAQ. Assim, antes que o nó sensor inicie as medições, ele gera o sinal S_{sync} (conectado a PFI 0), que dispara a medição de V_{batt} e V_{shunt} pela DAQ. Imediatamente após a geração do sinal S_{sync} o nó sensor também inicia as medições dos sinais V_{tos} e V_{mica} .

A Fig. 3.11 ilustra o sistema de sincronismo utilizado no experimento.

Visto que S_{sync} é um sinal digital gerado pelo microcontrolador do nó sensor, os dois sistemas de medição (MICA2 e DAQ) amostram no mesmo instante de tempo, o primeiro como uma rotina interna e o último com o sinal de “trigger”.

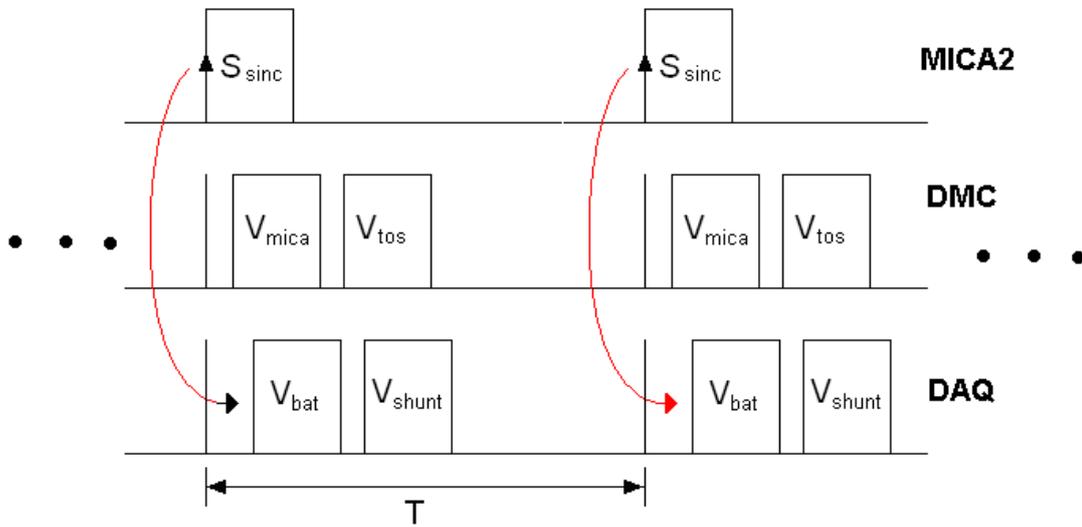


Figura 3.11: Linha do tempo das medições do experimento.

3.1.4 Resultados

Utilizando-se os dados do experimento, todos os modelos de bateria descritos no capítulo 2 foram comparados. No entanto, o Modelo Dependente da Taxa de Descarga (MDTD) proposto na literatura estimou uma descarga da bateria muito rápida, que não corresponde à realidade (conforme explicado no capítulo 2). A curva do MDTD não foi mostrada, pois ele estimou que a bateria estava completamente descarregada em $t=250$ s, enquanto que a bateria real se exauriu em $t=513.824$ s.

A Fig. 3.12 mostra os diferentes métodos de estimação da capacidade residual da bateria em função do tempo, para os modelos MLT, MLC e o MTDE, para os dois sistemas de medição (DAQ e DMC).

Os resultados do MLT, para ambos sistemas de medição (DAQ e DMC), apresentaram valores finais muito próximos. A justificativa para a diferença observada está no fato de que os valores das amostras de tensão da DMC (V_{mica}) não contêm a queda de tensão referente ao conversor corrente-tensão.

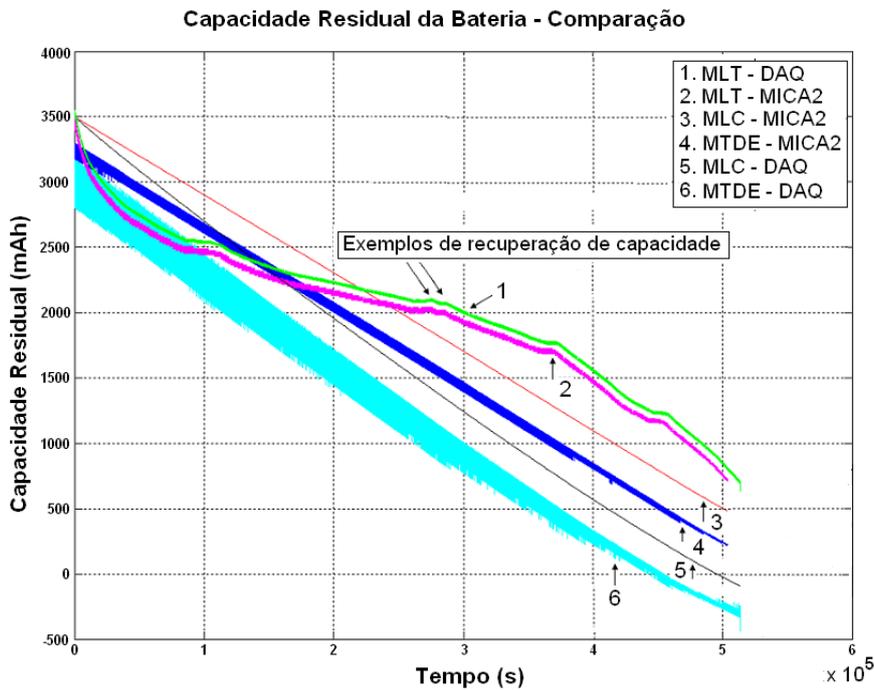


Figura 3.12: Resultados dos diferentes métodos de estimativa da capacidade residual da bateria.

A linha reta esperada para esse modelo não se efetivou, embora ele seja linear. A razão para tal comportamento se deve ao efeito de relaxação, que propiciou a recuperação de alguma capacidade (refletida nas amostras de tensão) nos momentos em que a corrente do MICA2 ia para seu nível mais baixo (18 mA).

O MLC não contempla o efeito de relaxação e da taxa de descarga e, por isso, as curvas são lineares. As diferenças entre as curvas dos sistemas de medição se devem, principalmente, ao truncamento das amostras de corrente que foram processadas no MICA2, uma vez que seu microcontrolador possui uma “ALU” de ponto fixo de 8 bits e nenhuma mudança foi realizada no software embutido para eliminar o truncamento. Além disso, o fato de a tensão mínima de operação do MICA2 ser de 2,7 V e a referência interna

	MLT (mAh)	MLC (mAh)	MTDE (mAh)
Capacidade residual - DMC (504,000 s)	711	483	217
Capacidade residual - DAQ (513,824 s)	700	-91	-320

Tabela 3.1: Valores finais estimados para a capacidade residual da bateria.

de seu ADC ser de 2,56 V, também contribuíram para a diferença entre as curvas, pois as medidas de corrente abaixo desses valores foram degradadas.

No MTDE as variações da taxa de descarga foram consideradas, mas não o efeito de relaxação. Além disso, as mesmas considerações acima sobre a diferença entre as curvas dos sistemas de medição também se aplicam aqui.

A tabela 3.1 apresenta os resultados para a estimação da capacidade residual para os modelos MLT, MLC e MTDE. A primeira linha representa os valores finais estimados para o sistema DMC em 504.000 segundos. Eles são considerados finais para o nó sensor, uma vez que sua transmissão havia parado. Isto ocorreu quando a tensão da bateria atingiu um valor inferior à tensão de operação mínima do transceptor do nó sensor. A segunda linha, em 513.824 segundos, representa a capacidade residual real estimada usando as amostras do sistema DAQ, quando não havia mais corrente fluindo.

3.1.5 Discussão

Os valores finais da capacidade residual para o MICA2 são positivos para todos os modelos, indicando, coerentemente, que ainda havia energia disponível na bateria. Para o caso da placa de aquisição (DAQ), a capacidade residual foi estimada com os dados obtidos até o momento em que a bateria estava completamente descarregada (513.824 s). O valor final da capacidade residual para o MLT confirma a falta de exatidão na estimação, indicando que ainda havia considerável quantidade de energia disponível (700 mAh) para uso pelo nó sensor e, portanto, produzindo um resultado falso positivo. Considerando-se como referência a capacidade máxima da bateria, que é 3.500 mAh para as baterias MN1500, tem-se um erro de 20%. Em um cenário real de RSSF, o mapa de energia da rede indicaria disponibilidade de energia, enquanto, na verdade, a rede já estaria desativada (considerando uma RSSF composta por nós sensores com o perfil de consumo de energia apresentado).

O valor final da capacidade residual para o MLC apresentou, aparentemente, a melhor exatidão, pois seu valor é o mais próximo de zero, que é o valor esperado para uma bateria completamente descarregada. Contudo, esse excelente resultado não é real, uma vez que o modelo não considera o efeito da taxa de descarga.

Finalmente, o MTDE indica um valor final de capacidade residual mais distante de zero (-320 mAh) que o modelo linear baseado na corrente (-91 mAh). Contudo, pode ser observado que ambos os modelos sofrem o mesmo impacto do efeito de relaxação, ou seja, não consideram a recuperação de capacidade. No entanto, o MLC também não considera o efeito da taxa de descarga e isso incorreu em um resultado mais próximo de zero. A consequência direta dos resultados negativos de capacidade residual para esses

modelos é a indicação de quantidade de energia disponível no nó sensor abaixo da quantidade real, mas isso não prejudicaria as tomadas de decisões de gerenciamento da RSSF. Por outro lado, o MLT forneceu um falso positivo, onde não havia energia residual, o que levaria a erros de gerenciamento e indisponibilidade da RSSF.

3.1.6 Conclusão

O fator mais limitante para a estimação da capacidade residual das pilhas alcalinas utilizadas é o alto valor da capacidade padrão, pois, dependendo das configurações utilizadas (níveis de corrente e ciclos de trabalho, por exemplo), os experimentos se tornariam inviáveis devido à grande massa de dados que poderia ser gerada e ao longo tempo de duração. Em função disso, os experimentos realizados foram configurados com ciclo de trabalho (*c.t.*) de 100% e semiciclos com níveis de corrente diferentes. Isto produz os efeitos de relaxação e da taxa de descarga, mas, sem haver experimentos com *c.t.*'s diferentes de 100%, não há como avaliar o impacto de cada um deles na capacidade residual da bateria. Além disso, apesar de utilizar uma plataforma comercial de RSSF, o *c.t.* utilizado não corresponde ao esperado em aplicações reais de RSSF. Outro problema observado é a falta de controle do perfil de corrente gerado em plataformas comerciais de RSSF, o que também dificulta o discernimento dos efeitos da taxa de descarga e de relaxação. Desse modo, a exemplo do trabalho de Rao [Rao et al., 2005], o hardware utilizado em novos experimentos deve ser simples, de modo a viabilizar o controle do perfil de corrente gerado pela carga e a identificação dos impactos provocados pelos efeitos da taxa de descarga e de relaxação, isoladamente.

3.2 Estimação da Capacidade Residual de Pilhas Alcalinas de Baixa Capacidade

Apesar do MTDE apresentar um resultado falso negativo, que é muito melhor que o falso positivo apresentado pelo MLT, este resultado ainda é pouco realista. Utilizando-se baterias alcalinas de baixa capacidade e, conseqüentemente, um maior número de experimentos, um modelo de maior exatidão foi buscado.

3.2.1 Requisitos

Devido à necessidade de implementação de baixos ciclos de trabalho, para melhor observação e análise dos efeitos da taxa de descarga e de relaxação em aplicações reais de RSSF, e às limitações observadas nos experimentos com pilhas alcalinas de alta capacidade, novos experimentos foram realizados com pilhas alcalinas de menor capacidade, obtidas a partir de baterias de 9 V. Como a tensão de alimentação típica de nós sensores é de 3 V, foram montados três pares de células por bateria para uso nos experimentos, conforme ilustrado na Fig. 2.13. Desse modo, foram obtidas baterias de 3 V e capacidade padrão de 580 mAh.

3.2.2 Plataforma de Medição

O circuito da Fig. 3.13 apresenta a implementação de hardware para a realização dos experimentos para a descarga e caracterização das pilhas alcalinas de baixa capacidade.

Os transistores bipolares (BC337) foram configurados para operarem como chave, de modo a emular a operação de nós sensores típicos. O LM35

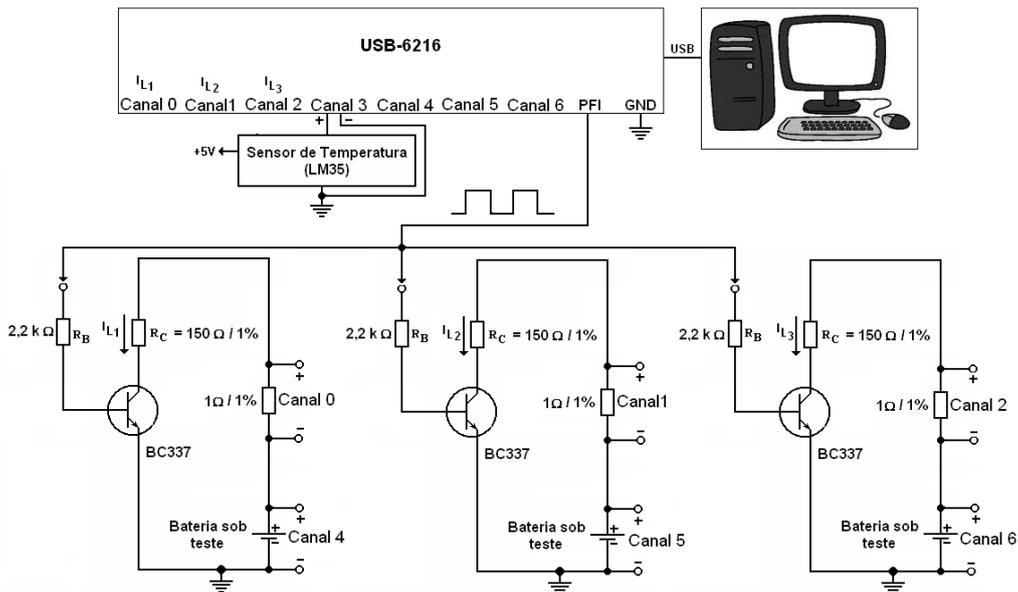


Figura 3.13: Diagrama esquemático do experimento.

[National Semiconductor Corporation, 2009] é um sensor de temperatura em graus centígrados de precisão, cuja tensão de saída é linearmente proporcional à temperatura em graus Celsius. Ele foi utilizado para medir a temperatura do ambiente. Também foi utilizada a placa de aquisição (DAQ) NI USB-6216 da National Instruments [National, 2010], que possui resolução de 16 bits e taxa de amostragem de 400 kSamples/s, e o software LabView SignalExpress 2009 [National Instruments, 2010]. A DAQ foi conectada ao PC via USB. Ela foi programada para coletar 10 amostras por segundo das tensões das baterias sob teste, das correntes de cada um dos circuitos e da temperatura, que foram salvas em arquivo de texto (txt) para posterior processamento, conforme indicado na Fig. 3.13. A interface de função programável (PFI) foi configurada para gerar uma onda quadrada com ciclo de trabalho programável. Os ciclos de trabalho foram configurados para 100%, 50%, 20% e 5%, com o tempo no qual o transistor fica ligado (t_{on}) fixo em 1 segundo.

Para cada um dos ciclos de trabalho foram descarregadas três baterias simultaneamente.

3.2.3 Resultados

A partir do arquivo de amostras de tensão da bateria obtido com o sistema de aquisição (USB-6216 e LabView SignalExpress), foi gerada a Fig. 3.14, que ilustra o perfil de descarga (tensão - tempo de serviço da bateria) de uma das três baterias descarregadas no circuito da Fig. 3.13 com c.t. de 100%.

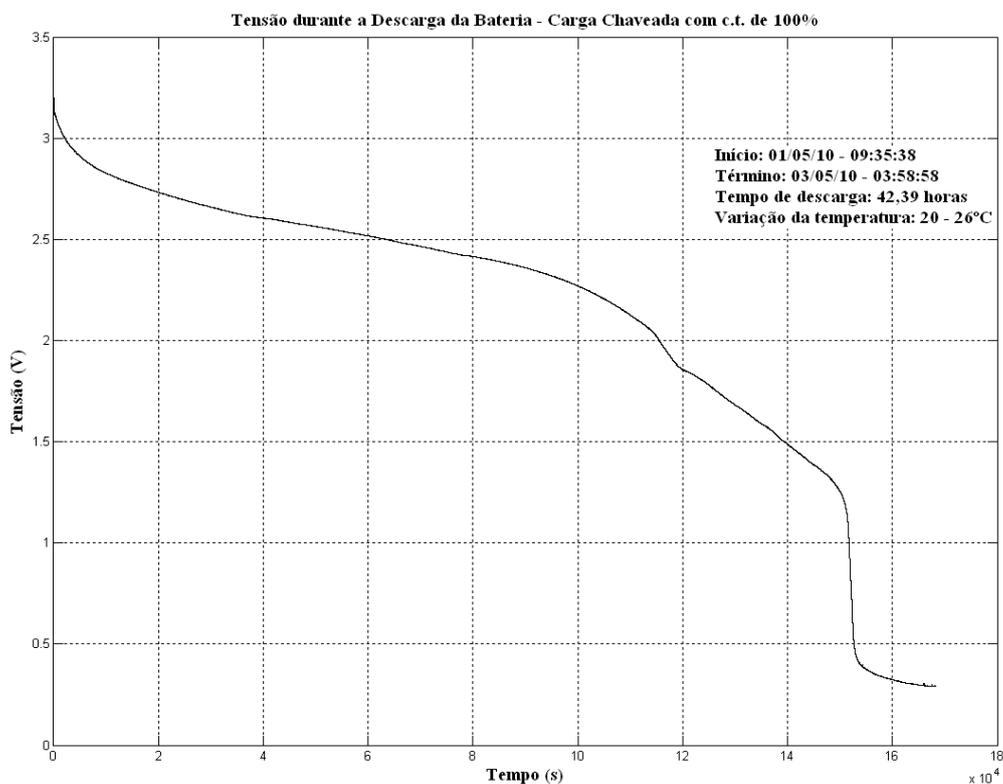


Figura 3.14: Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 100%.

Pode-se observar que a curva tem dois trechos distintos: um perfil de descarga até aproximadamente 1,8 V e outro perfil entre 1,8 V e 1,25 V. Neste último

valor de tensão há um joelho na curva e a tensão cai abruptamente para próximo de zero. Apesar do fabricante considerar a tensão de corte de 1,8 V (0,9 V por pilha), o experimento mostra que a tensão de corte é, na verdade, de 1,25 V, pois até esse valor a bateria ainda fornecia energia para a carga.

A Fig. 3.15 ilustra o perfil de descarga das três baterias descarregadas com c.t. de 100%, incluindo a curva mostrada na Fig. 3.14. As curvas apresentaram os mesmos perfis descritos na Fig. 3.14, havendo apenas uma variação da tensão (entre 1,8 V e 2 V) entre o final do primeiro trecho e o início do segundo trecho de cada uma das curvas, o que demonstra que as baterias têm perfis de descarga equivalentes para um mesmo c.t.

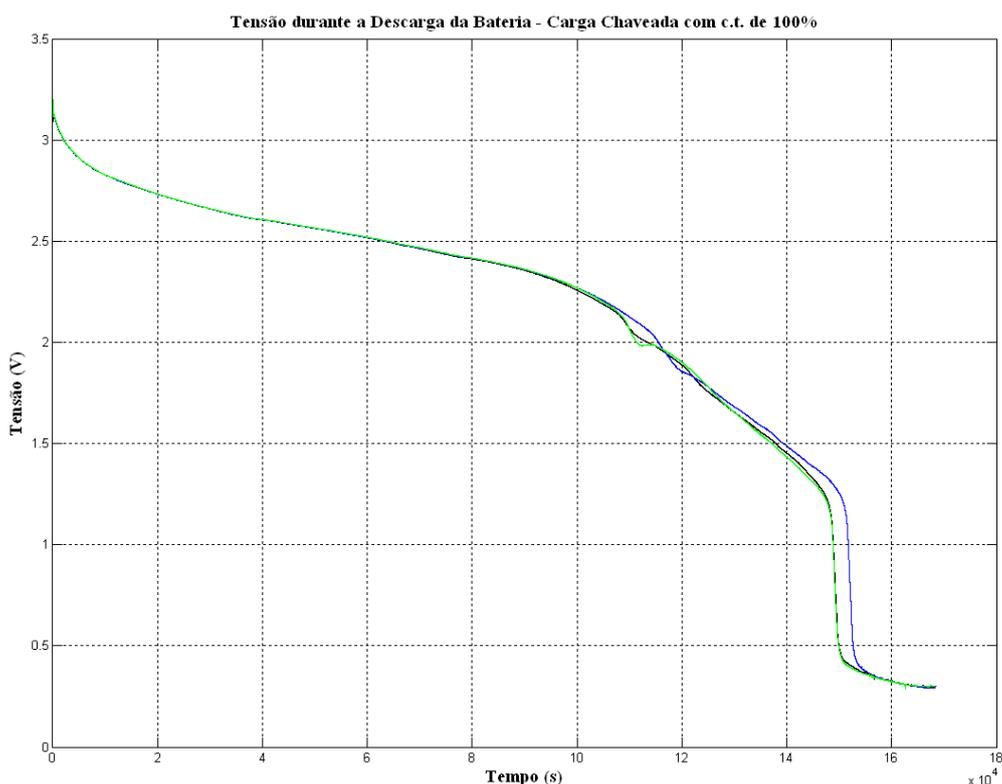


Figura 3.15: Perfil de descarga das três baterias alcalinas de baixa capacidade, descarregadas com c.t. de 100%.

Como a carga é resistiva, a corrente apresenta o perfil idêntico ao da tensão, conforme ilustrado na Fig. 3.16.

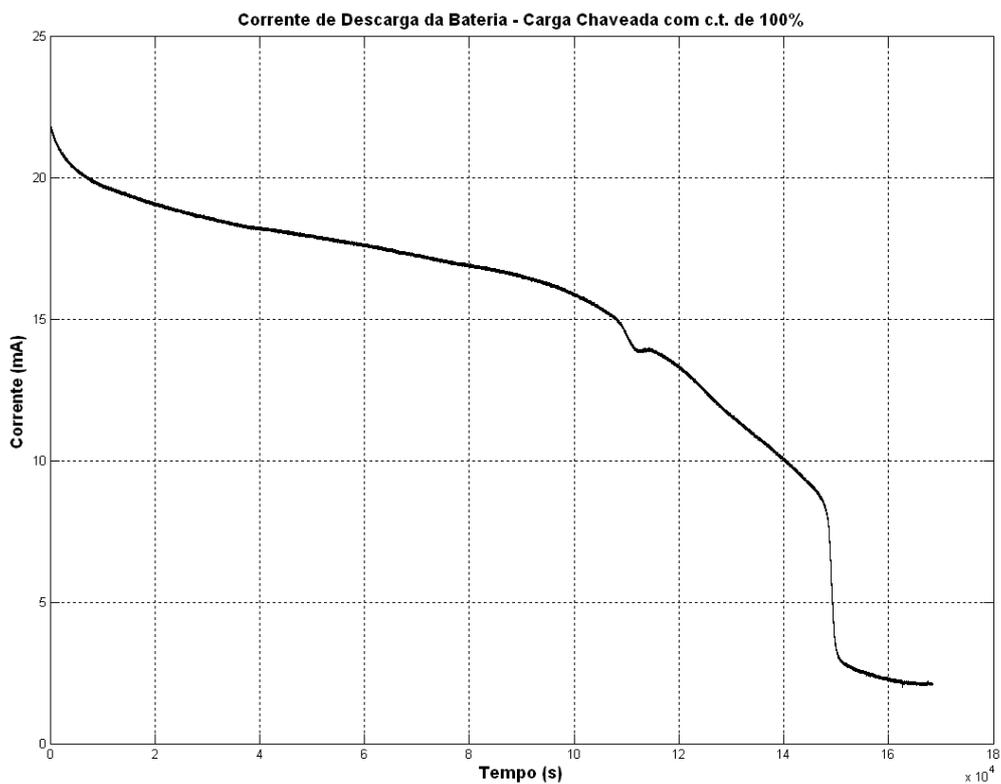


Figura 3.16: Perfil de descarga de corrente da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 100%.

Para cada um dos arquivos de corrente foi efetuada a contagem de Coulomb, conforme Equação 3.10 [Park et al., 2001]:

$$C_{eff} = \frac{1}{3600} \times \sum_{k=1}^n I_k \times \Delta t, \quad (3.10)$$

onde C_{eff} é a capacidade efetiva (mAh), Δt é o tempo de amostragem e equivale a 0,1 s; I_k é o valor da amostra de corrente (mA) e n é o número da n ésima amostra de corrente.

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	3,195	21,8	682,2
Bateria 2	3,198	20,8	657,1
Bateria 3	3,197	21,1	662,2

Tabela 3.2: Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com c.t. de 100%.

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.2. Como a carga não está sendo chaveada, não existe o efeito de relaxação, somente o efeito da taxa de descarga, que é contemplado pela determinação da capacidade efetiva. Portanto, a capacidade das baterias equivale à capacidade efetiva, que pode ser consultada diretamente da Tabela A.2. De acordo com essa Tabela, os valores de capacidade efetiva para os níveis de corrente de 21 e 22 mA são, respectivamente, 609 e 616 mAh. A diferença observada entre esses valores e os apresentados na Tabela 3.2 se deve ao fato de que a Tabela A.2 foi elaborada para capacidades efetivas até a tensão de 1,6 V, enquanto os valores da Tabela 3.2 foram calculados para tensão de corte próxima de zero. Para fins de confirmação, foi efetuada a contagem de Coulomb para os arquivos de corrente das baterias até 1,6 V e o resultado foi 606 mAh, valor muito

próximo ao consultado na Tabela A.2 (609 mAh). Portanto, todos os modelos de baterias elaborados neste trabalho, terão a capacidade efetiva determinada pela corrente inicial, medida assim que a carga for ligada. Com o valor da corrente média obtida a partir das amostras da corrente inicial, a capacidade efetiva é consultada na Tabela A.2.

A Fig. 3.17 ilustra o perfil de descarga de uma das três baterias descarregadas com *c.t.* de 50%. Assim como observado nas curvas com *c.t.* de 100%, pode-se observar que a curva tem dois trechos distintos: um perfil de descarga até aproximadamente 1,8 V e outro perfil entre 1,8 V e aproximadamente 1,25 V.

Apesar de também haver dois trechos distintos, elas se diferenciam das curvas de 100% no formato e na espessura, que se alargou em função do chaveamento.

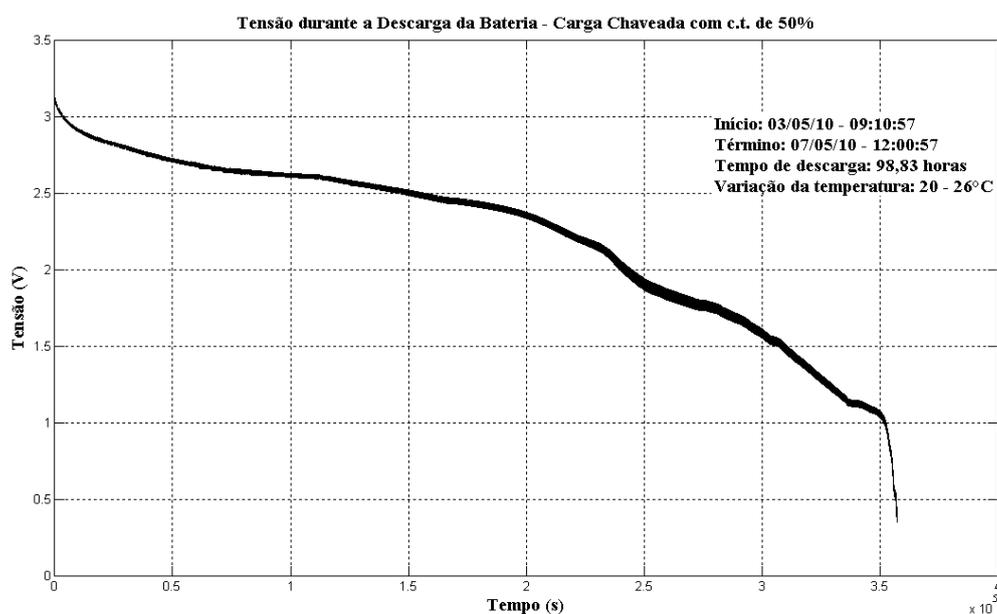


Figura 3.17: Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 50%.

A Fig. 3.18 ilustra o perfil de descarga das três baterias descarregadas com c.t. de 50%, incluindo a curva mostrada na Fig. 3.17. As curvas apresentaram os mesmos perfis descritos na Fig. 3.17, o que também demonstra que as baterias têm perfis de descarga equivalentes para o mesmo c.t. Diferentemente das curvas de 100%, a tensão de corte apresentou uma variação entre 1 V e 1,25 V.

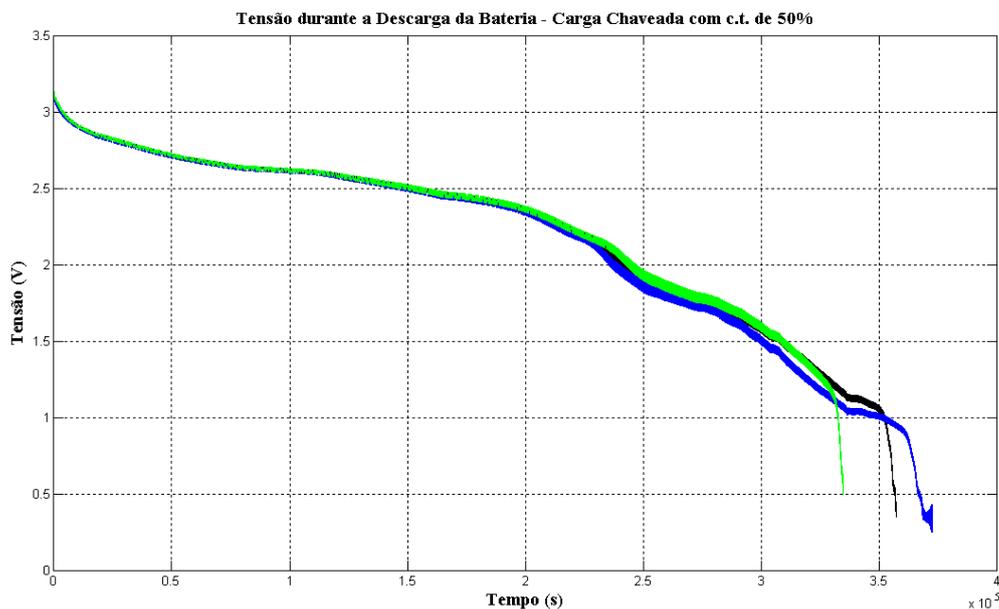


Figura 3.18: Perfil de descarga das três baterias alcalinas de baixa capacidade, descarregadas com c.t. de 50%.

Efetuando-se a contagem de Coulomb com a Equação 3.10, dos arquivos de corrente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.3. Desta vez a carga está sendo chaveada e, portanto, existe o efeito de relaxação e da taxa de descarga.

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	3,105	21,7	783,8
Bateria 2	3,093	20,8	734,7
Bateria 3	3,085	21,1	760,7

Tabela 3.3: Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com c.t. de 50%.

A Fig. 3.19 ilustra o perfil de descarga de uma das três baterias descar-

regadas com *c.t.* de 20%. Assim como observado nas curvas com *c.t.* de 50%, pode-se observar a presença de dois trechos distintos da curva, mas houve uma alteração da tensão no final do primeiro trecho, que passou de 1,8 V para 1,75 V. Também houve uma alteração na tensão de corte, que passou de 1,25 V para 1 V. Além disso, em função do chaveamento e um t_{off} de 4 segundos, o segundo trecho apresenta três pontos de inflexão, que indicam uma possível recuperação de carga pela bateria.

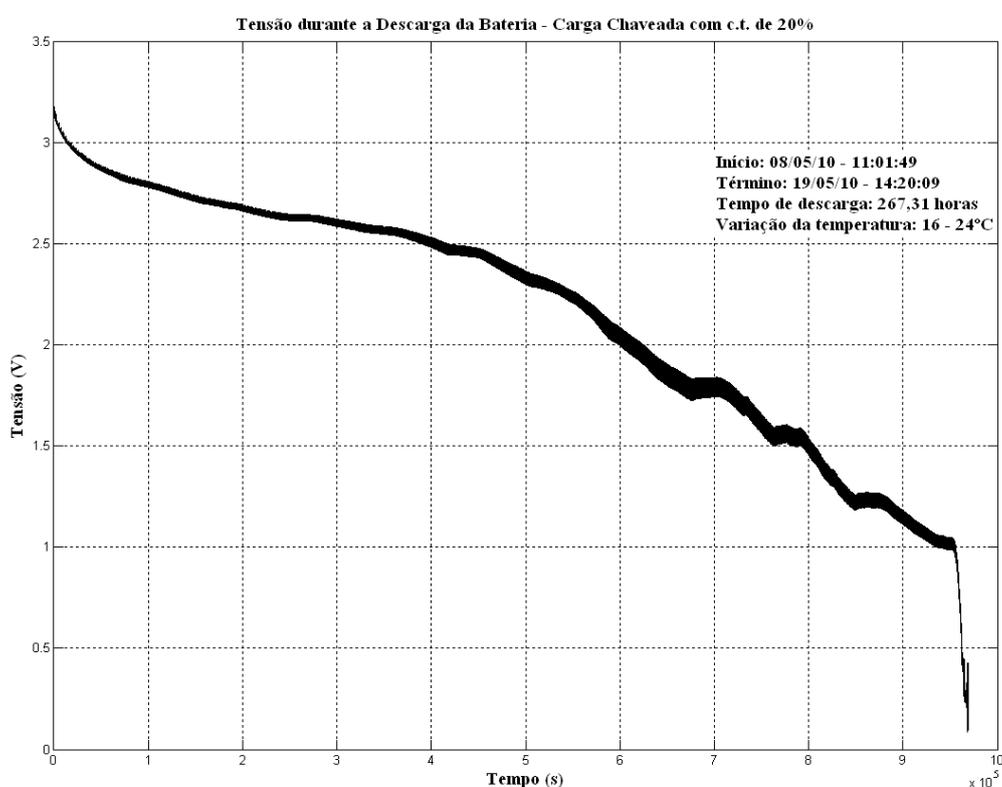


Figura 3.19: Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com *c.t.* de 20%.

A Fig. 3.20 ilustra o perfil de descarga das três baterias descarregadas com *c.t.* de 20%, incluindo a curva mostrada na Fig. 3.19. As curvas apresentaram os mesmos perfis descritos na Fig. 3.19, o que também demonstra

que as baterias têm perfis de descarga equivalentes para o mesmo *c.t.*

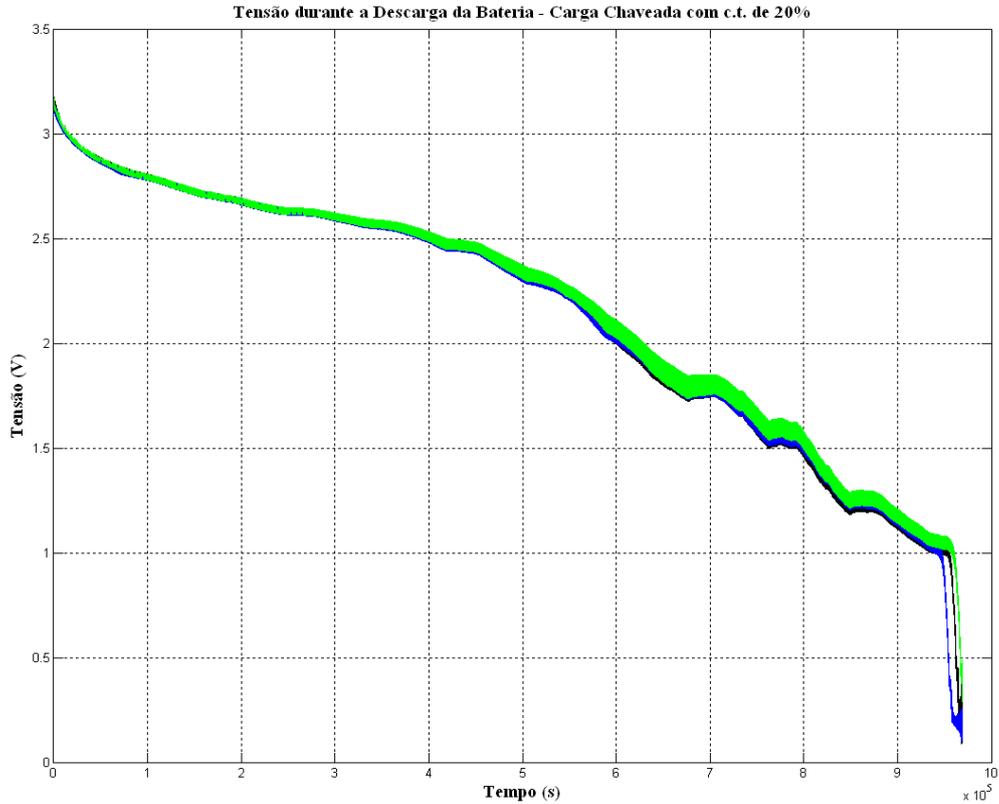


Figura 3.20: Perfil de descarga das três baterias alcalinas de baixa capacidade, descarregadas com c.t. de 20%.

Efetuada-se a contagem de Coulomb com a Equação 3.10, dos arquivos de corrente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.4. A carga está sendo chaveada e, portanto, também existe o efeito de relaxação e da taxa de descarga.

Pode-se observar na Tabela 3.4 que, devido às diferenças entre tensões e correntes iniciais, a bateria 3 apresentou uma contagem de Coulomb superior às baterias 1 e 2.

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	3,131	20,9	772,8
Bateria 2	3,111	21,1	780,6
Bateria 3	3,130	21,3	826,0

Tabela 3.4: Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com *c.t.* de 20%.

A Fig. 3.21 ilustra o perfil de descarga de uma das três baterias descarregadas com *c.t.* de 5%. Assim como observado nas curvas com *c.t.* de 20%, pode-se observar a presença de dois trechos distintos da curva, mas a tensão no final do primeiro trecho passou para aproximadamente 1,9 V e a tensão de corte passou para aproximadamente 1,2 V. Com o aumento de t_{off} para 19 segundos, ambos os trechos apresentaram ondulações, que indicam uma possível recuperação de carga pela bateria. Os perfis de descarga das baterias 2 e 3 descarregadas com *c.t.* de 5% também tiveram perfis de descarga similares ao da Fig. 3.21.

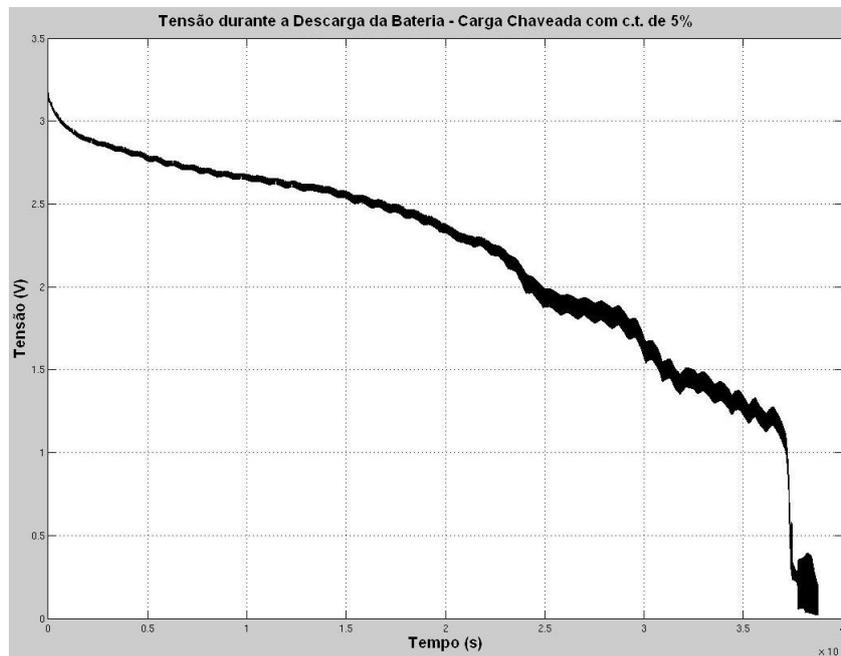


Figura 3.21: Perfil de descarga da bateria alcalina de baixa capacidade, descarregada com c.t. de 5%.

Efetuada-se a contagem de Coulomb, com a Equação 3.10, dos arquivos de corrente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.5. Assim como nos *c.t.*'s de 50% e 20%, a carga continua sendo chaveada e, portanto, também existe o efeito de relaxação e da taxa de descarga.

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	3,121	20,7	795,6
Bateria 2	3,084	20,3	772,2
Bateria 3	3,081	19,7	747,8

Tabela 3.5: Contagem de Coulomb para as baterias alcalinas sob teste, com *c.t.* de 5%.

A Tabela 3.6 sintetiza os resultados da contagem de Coulomb para todas as baterias alcalinas sob teste. Assim como ocorrido nos experimentos de 20%, pode-se observar na Tabela 3.5 que, devido às diferenças entre tensões e correntes iniciais, a bateria 3 apresentou uma contagem de Coulomb inferior às baterias 1 e 2.

<i>c.t.</i> (%)	100	50	20	5
Bateria 1	682,2 mAh	783,8 mAh	772,8 mAh	795,6 mAh
Bateria 2	657,1 mAh	734,7 mAh	780,6 mAh	772,2 mAh
Bateria 3	662,2 mAh	760,7 mAh	826,0 mAh	747,8 mAh
Média	667,2 mAh	759,7 mAh	793,1 mAh	771,9 mAh

Tabela 3.6: Síntese dos resultados da contagem de Coulomb dos arquivos de corrente das baterias alcalinas sob teste.

Pode-se observar que, devido aos diferentes valores das tensões iniciais das baterias e às diferenças entre os componentes que compõem os circuitos de descarga (tensão de saturação dos transistores e tolerância dos resistores *shunt* e de carga), houve diferença nos resultados da contagem de Coulomb para as três baterias em um mesmo *c.t.* O caso mais crítico foi o da bateria 3, que apresentou uma capacidade para o *c.t.* de 20% muito superior ao *c.t.* de

5%. Isto se deve à diferença de 1,6 mA existente entre os níveis de correntes envolvidos nos respectivos *c.t.*'s.

3.2.4 Primeira Geração de Modelo de Baterias Alcalinas para RSSF baseados no Sistema de Escrita

O efeito da taxa de descarga ocorre somente quando há circulação de corrente pela carga, pois ele está relacionado com a disponibilidade de regiões que podem ocorrer redução no catodo. Como a corrente no t_{off} dos experimentos realizados é a corrente de fuga dos transistores, que está especificada em 100 nA pelo fabricante, ela será considerada de valor zero. Desse modo, o efeito da taxa de descarga somente ocorrerá no t_{on} , que está contemplado na determinação da capacidade efetiva das baterias.

A temperatura média durante a realização dos experimentos foi de 21,5°C. Como a tabela de capacidade efetiva das baterias (Tabela A.1) foi elaborada a partir de experimentos realizados à temperatura de 21°C, o efeito da temperatura será considerado desprezível.

Conforme gráfico da Fig. 2.11, a perda de capacidade para temperatura de 21,5°C é inferior a 4% por ano. A maior temperatura ocorrida durante a realização dos experimentos foi de 26°C, que pode ser considerado o pior caso. A perda de capacidade para essa temperatura é inferior 5% por ano. Portanto, o efeito de perda de capacidade também será considerado desprezível.

Contudo, para que o efeito de perda de capacidade seja contemplado no modelo, considerando-se que a temperatura média da bateria será igual ou inferior a 40°C e os pontos $P_1(20^\circ\text{C}; 3,57\%/ano)$ e $P_2(40^\circ\text{C}; 10\%/ano)$ da Fig. 2.11, este parâmetro pode ser obtido pela análise das curvas do fabricante e

pode ser expresso pela Equação 3.11:

$$P_c = (0,0032 \times T - 0,028) \times n_a, \quad (3.11)$$

onde P_c é a perda de capacidade, T é a temperatura em graus Celsius e n_a é o número de anos que a bateria está em uso.

Como a perda de capacidade será um valor entre 0 e 1, a retenção de capacidade pode ser definida pela Equação 3.12:

$$R_{c-a} = 1 - P_c, \quad (3.12)$$

onde R_{c-a} é a retenção de capacidade para a pilha alcalina.

Portanto, pode-se incluir o efeito da retenção de capacidade, que tem impacto direto na capacidade efetiva da bateria, conforme mostrado na Equação 3.13:

$$C_{eff-f-a} = R_{c-a} \times C_{eff}(I_m), \quad (3.13)$$

onde C_{effa} é a capacidade efetiva final para a pilha alcalina (mAh), I_m é a média das amostras de corrente no momento que o nó sensor é ligado e ocorrer um t_{on} do nó sensor (mA) e $C_{eff}(I_m)$ é a capacidade efetiva para a média de amostras de corrente (mAh), obtida na Tabela A.2.

Como a taxa de descarga é fixa e os impactos da retenção de capacidade e da temperatura são desprezíveis, pode-se concluir que a diferença da média de capacidades observada entre os *c.t.*'s de 50%, 20% e 5%, em relação ao *c.t.* de 100%, da Tabela 3.6, se deve, exclusivamente, ao efeito de relaxação, visto que não há chaveamento no *c.t.* de 100% e, portanto, não há ocorrência desse efeito. A Tabela 3.7 mostra a capacidade total recuperada devido ao efeito de relaxação.

c.t. (%)	50	20	5
t_{off} por período (s)	1	4	19
Capacidade total recuperada (mAh)	92,5	125,9	104,7
Capacidade recuperada por período ($\mu\text{Ah}/T$)	0,496	0,648	0,540

Tabela 3.7: Capacidade recuperada devido ao efeito de relaxação.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 3.7, observa-se um aumento da capacidade recuperada quando t_{off} aumenta de 1 segundo para 4 segundos. No entanto, quando t_{off} aumenta de 4 segundos para 19 segundos há uma redução da capacidade recuperada entre esses dois tempos, indicando uma tendência de saturação da relaxação. O número total de períodos (N_T) para cada *c.t.* pode ser obtido pela relação entre o tempo de serviço da bateria (T_s), obtido a partir dos gráficos dos dados experimentais, e o período (T), conforme Equação 3.14.

$$N_T = \frac{T_s}{T}. \quad (3.14)$$

Desse modo, a capacidade recuperada por período (C_{rT}) foi obtida pela relação entre a capacidade total recuperada (C_r) e o número total de períodos (N_T), conforme Equação 3.15.

$$C_{rT} = \frac{C_r}{N_T}. \quad (3.15)$$

Para fins de modelagem do efeito de relaxação será feita uma aproximação linear para a capacidade recuperada por período entre 1 e 4 segundos, considerando-se como pontos da reta as seguintes ordenadas: $P_1(1 \text{ s}, 0,496 \mu\text{Ah}/T)$ e $P_2(4 \text{ s}, 0,648 \mu\text{Ah}/T)$. Acima de 4 segundos, a relaxação

será considerada saturada e, portanto, a capacidade recuperada por período será fixada em $0,540 \mu\text{Ah}/\text{T}$. Abaixo de 1 segundo, não será considerado que houve recuperação de capacidade. O resultado final é a Equação 3.16, que representa a capacidade recuperada por período em $\mu\text{Ah}/\text{T}$.

$$C_{rT} = \begin{cases} 0 & \text{se } t_{off} < 1 \\ 0,051 \times t_{off} + 0,445 & \text{se } 1 \leq t_{off} \leq 4 \\ 0,540 & \text{se } t_{off} > 4 \end{cases} \quad (3.16)$$

Uma vez determinada a capacidade recuperada por período, podemos modelar a capacidade residual da bateria (C_{res}), conforme mostrado na Equação 3.17.

$$C_{res} = C_{eff-f-a} - \left[\frac{1}{3600} \times \sum_{k=1}^n (I_k \times \Delta t) \right] + \left[\frac{1}{1000} \times \sum_{n_T=1}^m (C_{rT} \times n_T) \right], \quad (3.17)$$

onde C_{res} é a capacidade residual da bateria (mAh), n é o número da n ésima amostra de corrente, Δt é o tempo de amostragem (s), n_T é o número de períodos, m é o número do n ésimo período e C_{rT} é a capacidade recuperada por período ($\mu\text{Ah}/\text{T}$), dada pela Equação 3.16.

O primeiro termo da Equação 3.17 representa o quanto de energia pode ser extraída da bateria para uma determinada corrente inicial, ou seja, é a capacidade efetiva da bateria e leva em conta o efeito da taxa de descarga e da retenção de capacidade. O segundo termo representa o quanto de energia está sendo extraída da bateria e o terceiro termo indica o quanto de energia está sendo recuperada devido ao efeito de relaxação. Desse modo, temos uma primeira geração de modelo de baterias alcalinas para RSSF baseado no método de sistema de escrituração, que será denominado como Modelo Com-

portamental da Bateria - MCB (BBM, em inglês), composto pela contagem de Coulomb (segundo termo), efeito da taxa de descarga e da retenção de capacidade (primeiro termo) e efeito de relaxação (terceiro termo).

Em nós sensores reais a corrente de fuga, que é drenada quando eles estão “dormindo” (no intervalo de tempo t_{off}) equivale a algumas dezenas de microampères. Em função disso e considerando-se que correntes nesses níveis não alteram o efeito da taxa de descarga e que os nós sensores ficarão grande parte de seus tempos de vida “dormindo”, o modelo da Equação 3.17 pode ser melhorado, de modo que o contador de Coulomb também contabilize essa energia. Além disso, para evitar consumo de energia, o valor da corrente no modo “dormindo” será considerado fixo. Para baterias alcalinas, o modelo proposto será chamado de **Modelo Comportamental da Bateria Alcalina (MCBA)**, que é definido pela equação 3.18.

$$C_{res} = C_{eff-f-a} - \frac{1}{3600} \times \left[\sum_{k=1}^n (I_k \times \Delta t) + \frac{1}{1000} \times \sum_{n_T=1}^m (I_f \times t_{off} \times n_T) \right] + \frac{1}{1000} \times \left[\sum_{n_T=1}^m (C_{rT} \times n_T) \right], \quad (3.18)$$

onde I_f é a corrente no modo “dormindo” (μA) e t_{off} é o intervalo de tempo no qual o nó sensor está “dormindo” (s).

Em algumas aplicações críticas de RSSF pode ser necessária a simplificação do modelo, a fim de reduzir o consumo de energia. Assim, uma alternativa é apresentada na Equação 3.19.

$$C_{res} = C_{eff-f-a} - \frac{1}{3600} \times \left[\sum_{k=1}^n (I_k \times \Delta t) + \frac{1}{1000} \times \sum_{n_T=1}^m (I_f \times t_{off} \times n_T) \right], \quad (3.19)$$

Contudo, nesse caso haveria desperdício da energia recuperada devido ao efeito de relaxação, apesar de não haver falso positivo na indicação de *SoC*.

3.2.5 Validação do Modelo Comportamental da Bateria Alcalina (MCBA)

Para a validação do modelo proposto, o MCBA será comparado com o modelo atualmente utilizado no simulador Castália, que se baseia no método de contagem de Coulomb [Pop et al., 2005] e utiliza como capacidade efetiva a capacidade padrão da bateria (que neste caso é de 580 mAh), e os dados experimentais obtidos para os *c.t.*'s de 100%, 50%, 20% e 5%. Como a Tabela A.2 foi obtida para tensão de corte de 1,6 V, a contagem de Coulomb dos arquivos de corrente de todos os experimentos será refeita para este nível de tensão.

A Tabela 3.8 sintetiza os resultados para a nova contagem de Coulomb de todas as baterias alcalinas sob teste, cujos arquivos de corrente foram processados até o nível de tensão de 1,6 V.

Como a taxa de descarga é fixa e os impactos da retenção de capacidade e da temperatura são desprezíveis, pode-se concluir que a diferença da média de capacidades observada entre os *c.t.*'s de 50%, 20% e 5%, em relação ao *c.t.* de 100%, da Tabela 3.8, se deve, exclusivamente, ao efeito de relaxação, visto que não há chaveamento no *c.t.* de 100% e, portanto, não há ocorrência desse efeito. A Tabela 3.9 mostra a capacidade total recuperada devido ao efeito de relaxação.

c.t. (%)	100	50	20	5
Bateria 1	625,0 mAh	737,8 mAh	691,7 mAh	702,1 mAh
Bateria 2	600,8 mAh	657,5 mAh	700,7 mAh	683,3 mAh
Bateria 3	605,6 mAh	717,5 mAh	743,8 mAh	688,2 mAh
Média	610,5 mAh	704,3 mAh	712,1 mAh	691,2 mAh

Tabela 3.8: Síntese dos resultados da nova contagem de Coulomb das baterias alcalinas com tensão final de 1,6 V.

c.t. (%)	50	20	5
t_{off} por período (s)	1	4	19
Capacidade total recuperada (mAh)	93,8	101,6	80,7
Capacidade recuperada por período ($\mu\text{Ah}/T$)	0,503	0,645	0,540

Tabela 3.9: Capacidade recuperada devido ao efeito de relaxação.

Com os novos valores de capacidade recuperada por período, pode-se determinar a capacidade residual de cada uma das baterias utilizadas nos experimentos e realizar as comparações entre os modelos e os dados experimentais.

A seguir serão apresentados os resultados dos modelos do Castália e do MCBA aplicados aos dados experimentais e comparados com o valor da contagem de Coulomb (referência) para cada um dos *c.t.*'s utilizados, a saber 100%, 50%, 20% e 5%.

A Fig. 3.22 ilustra a capacidade residual da bateria 1 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 100%.

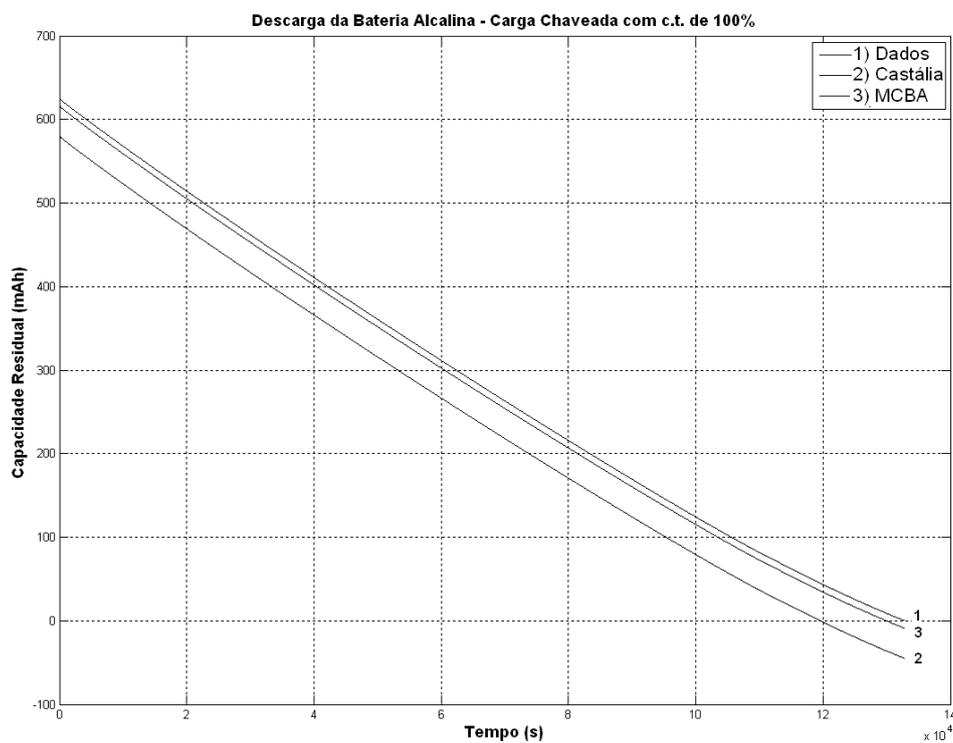


Figura 3.22: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 100%.

A Fig. 3.23 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 100%.

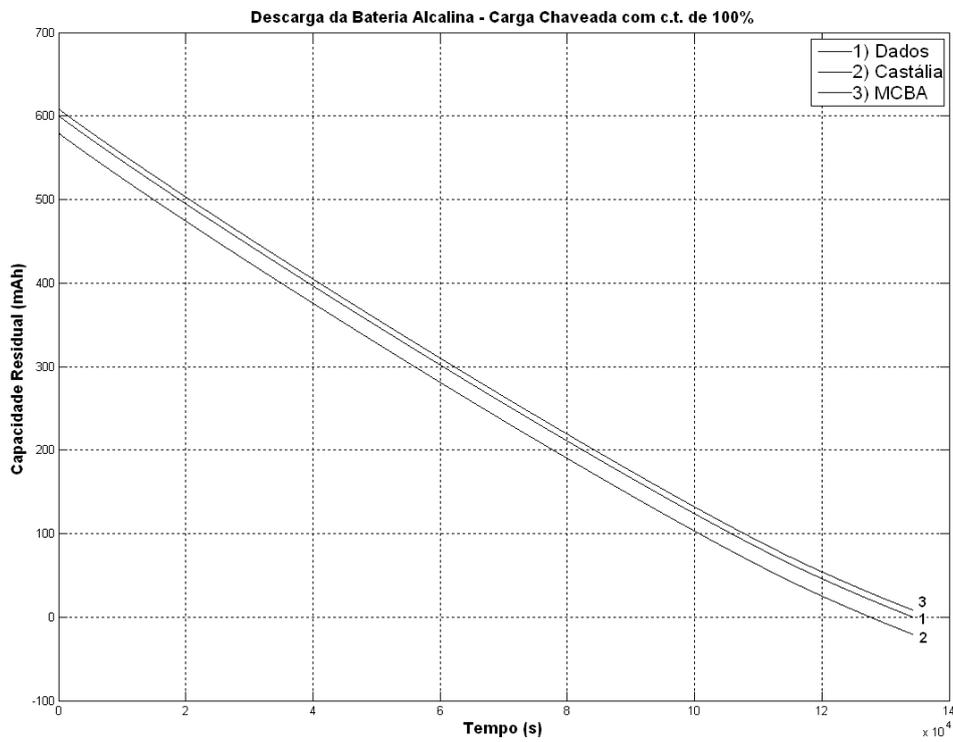


Figura 3.23: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 100%.

A Fig. 3.24 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 100%.

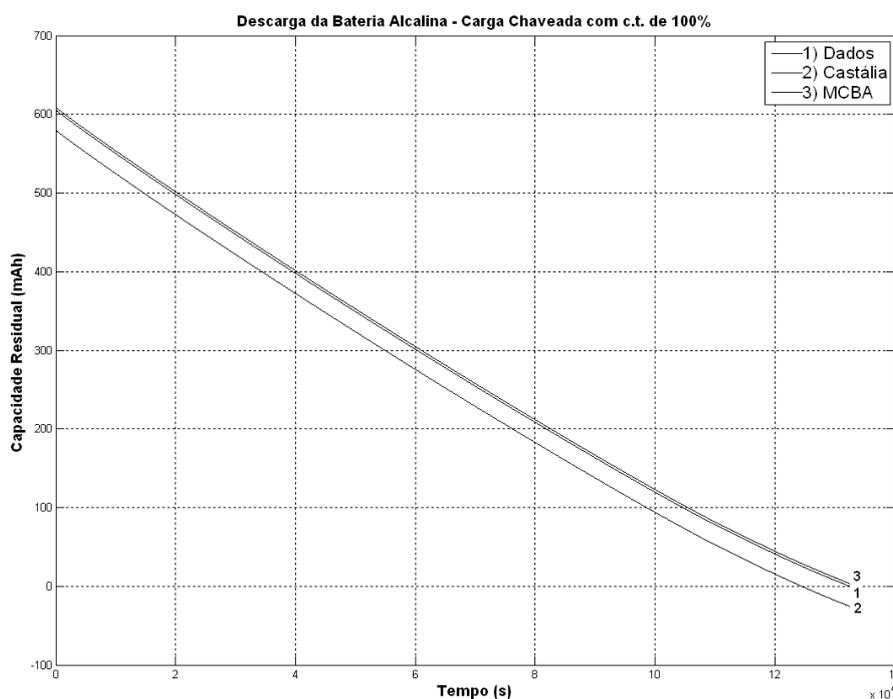


Figura 3.24: Capacidade residual para a bateria 3, descarregada com c.t. de 100%.

Pode-se observar que o desempenho do MCBA foi superior ao Castália, tendo em vista que, para as três baterias, a curva do MCBA foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais.

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBA e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.10. Conforme pode ser observado na Tabela 3.10, o erro máximo para o MCBA foi de 1,13%, valor muito inferior ao erro do Castália, que foi superior a 5%.

Bateria	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBA (%)
Bateria 1	7,77	1,47
Bateria 2	3,59	-1,35
Bateria 3	4,41	-0,56
Média	5,26	1,13

Tabela 3.10: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, com *c.t.* de 100%.

A Fig. 3.25 ilustra a capacidade residual da bateria 1 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 50%.

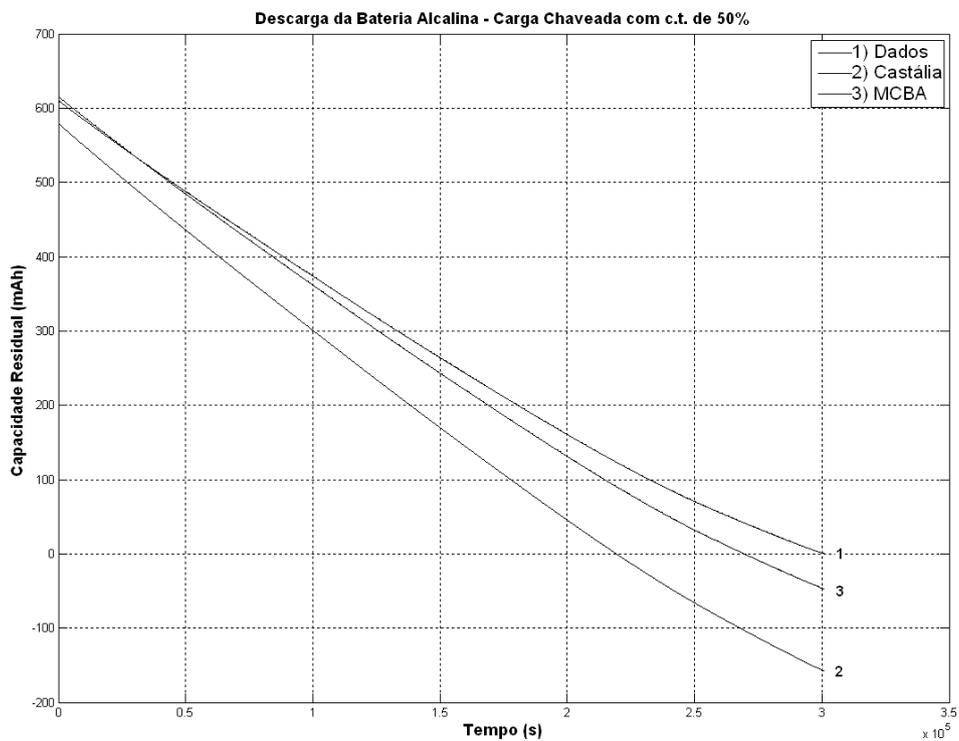


Figura 3.25: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 50%.

A Fig. 3.26 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 50%.

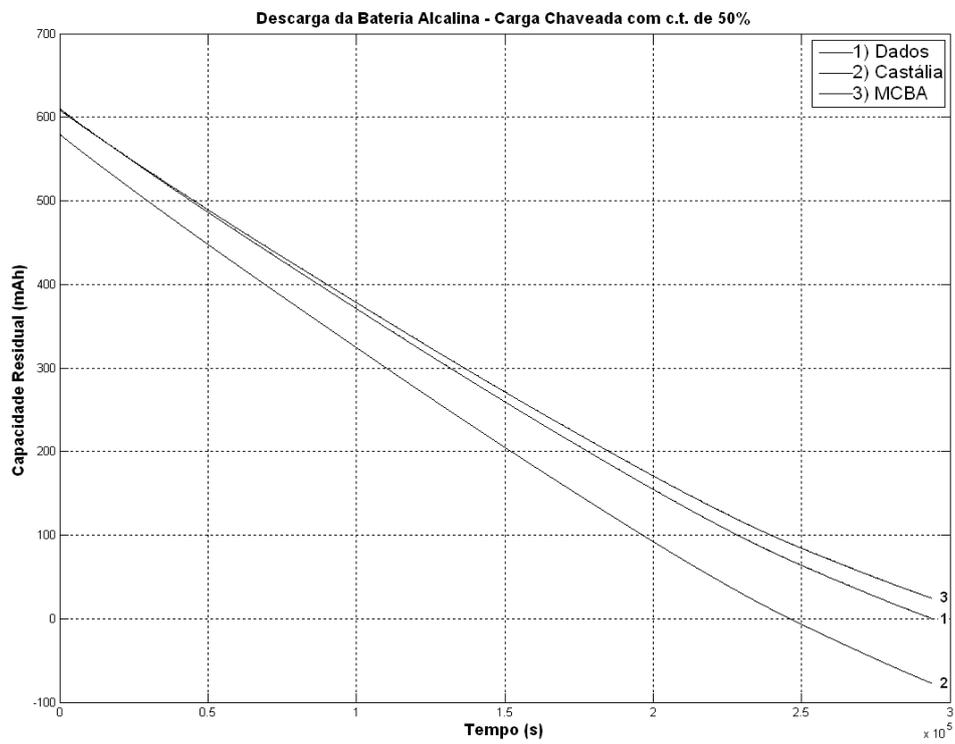


Figura 3.26: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 50%.

A Fig. 3.27 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 50%.

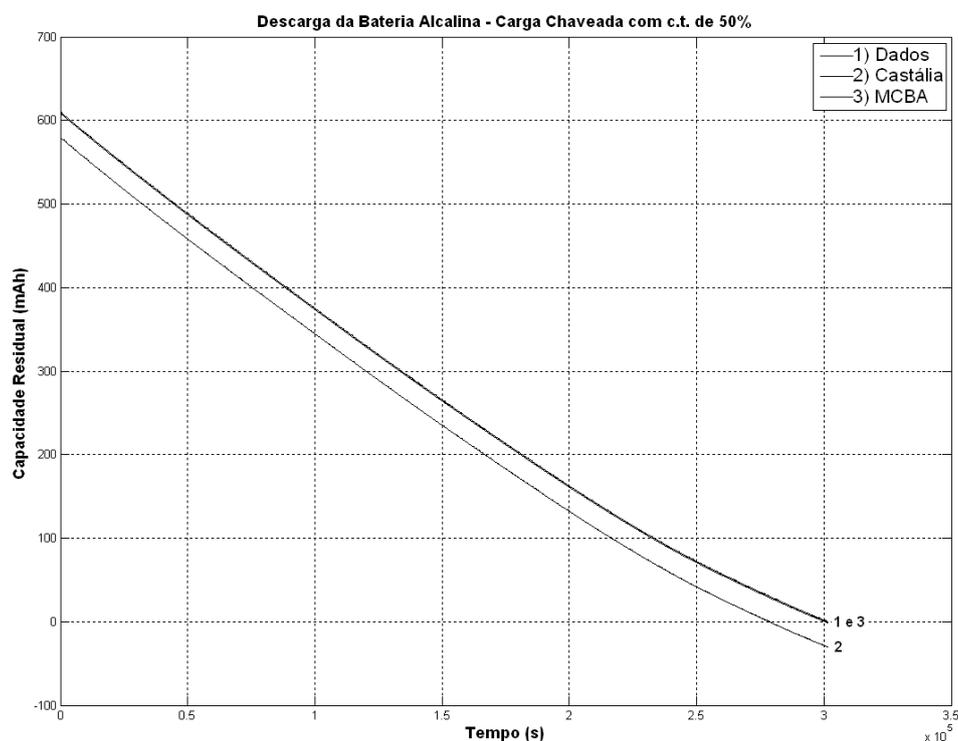


Figura 3.27: Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 50%.

Pode-se observar que o desempenho do MCBA foi superior ao Castália, tendo em vista que, para as três baterias, a curva do MCBA foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais.

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBA e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.11. Conforme pode ser observado na Tabela 3.11, o erro máximo para o MCBA foi de 3,99%, valor muito inferior ao erro do Castália, que foi superior a 14%.

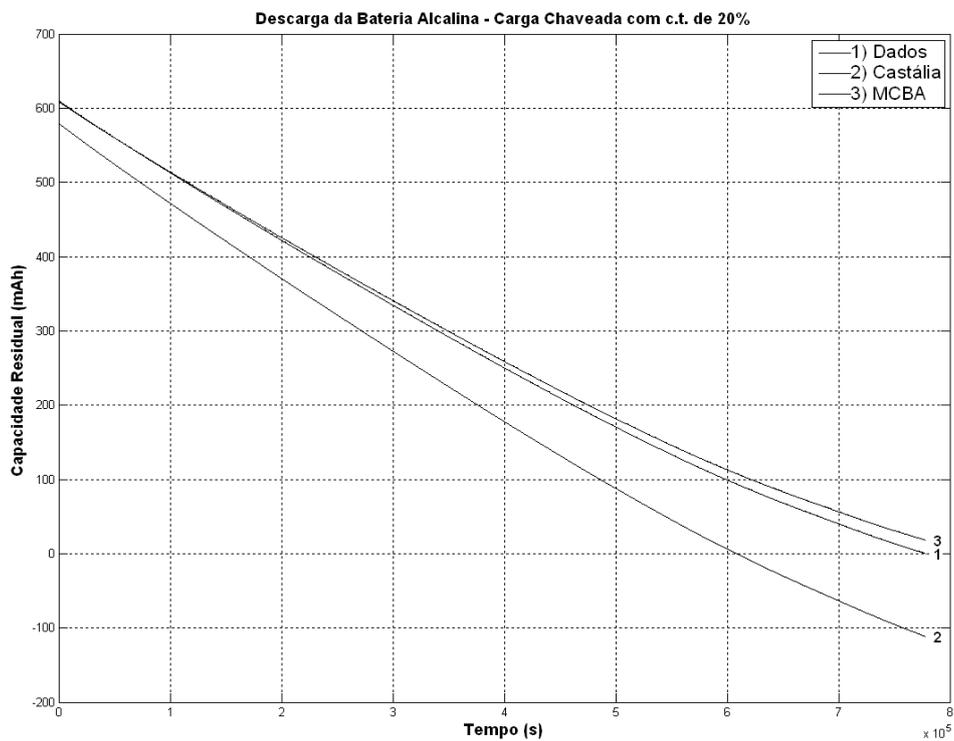


Figura 3.28: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 20%.

A Fig. 3.29 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 20%.

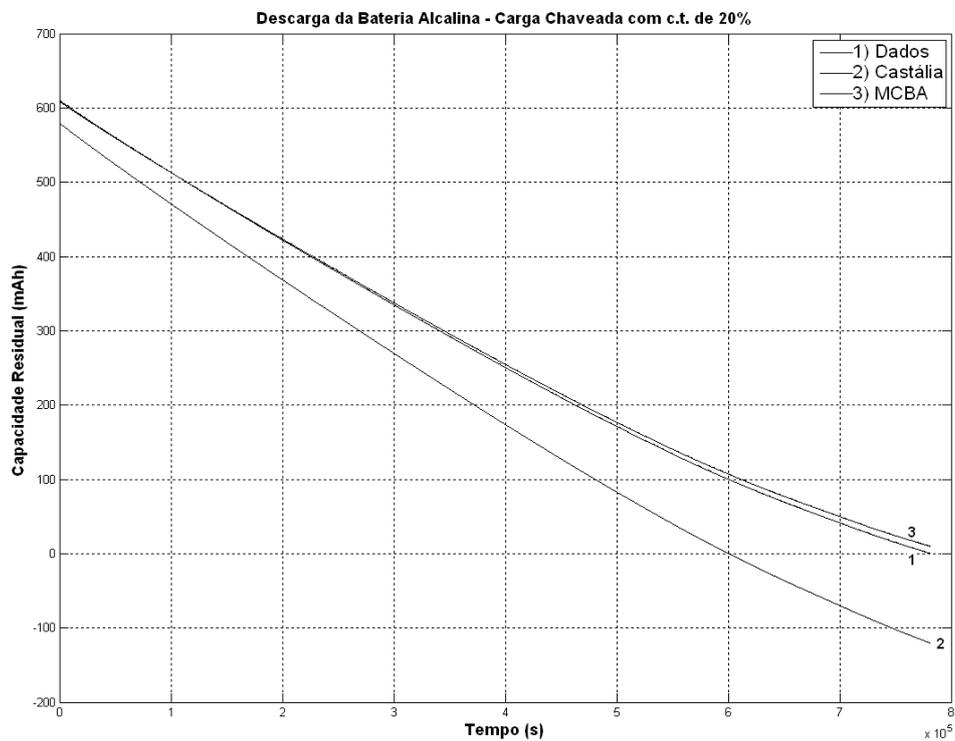


Figura 3.29: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 20%.

A Fig. 3.30 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 20%.

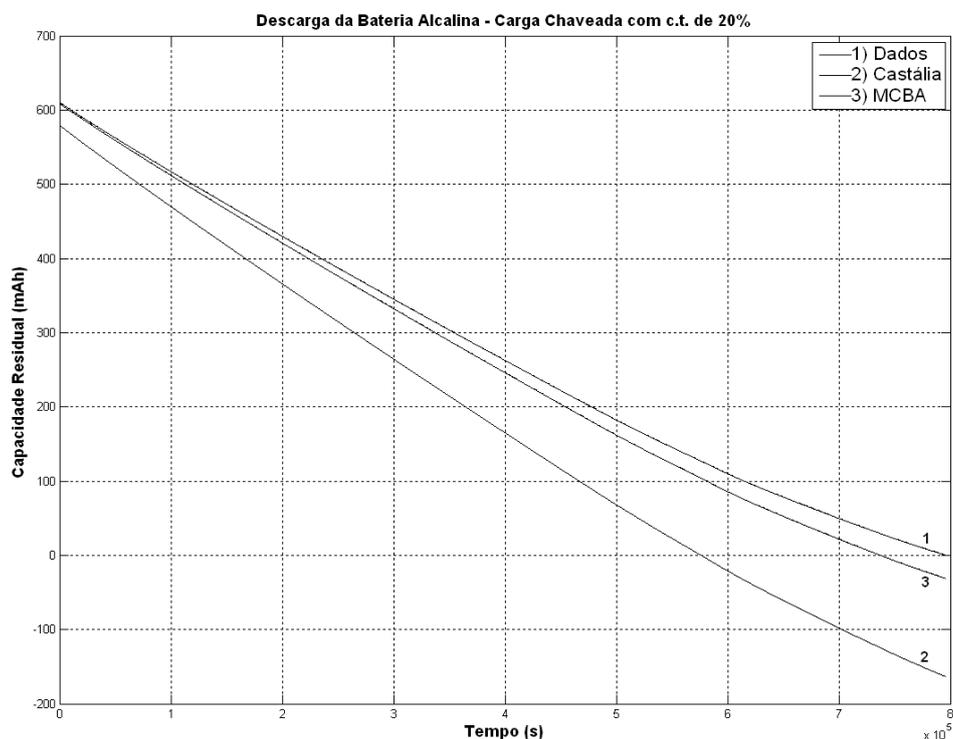


Figura 3.30: Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 20%.

Pode-se observar que o desempenho do MCBA foi superior ao Castália, tendo em vista que, para as três baterias, a curva do MCBA foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais.

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBA e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.12. Conforme pode ser observado na Tabela 3.12, o erro máximo para o MCBA foi de 3,24%, valor muito inferior ao erro do Castália, que foi superior a 20%.

Bateria	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBA (%)
Bateria 1	-18,29	2,99
Bateria 2	-19,78	1,57
Bateria 3	-26,83	-5,16
Média	21,63	3,24

Tabela 3.12: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com *c.t.* de 20%.

A Fig. 3.31 ilustra a capacidade residual da bateria 1 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 5%.

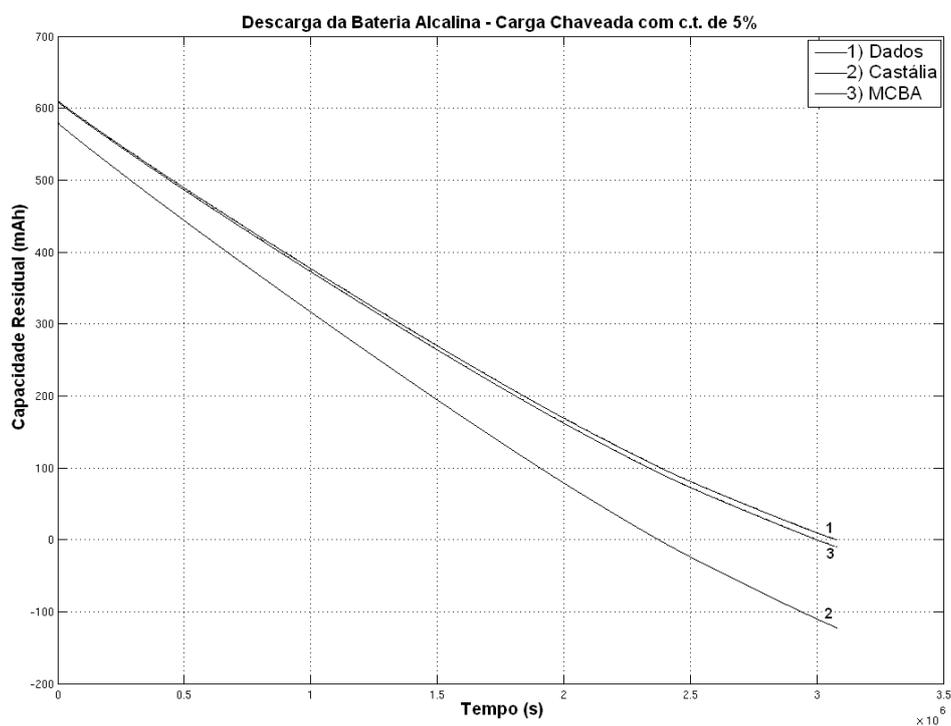


Figura 3.31: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 5%.

A Fig. 3.32 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 5%.

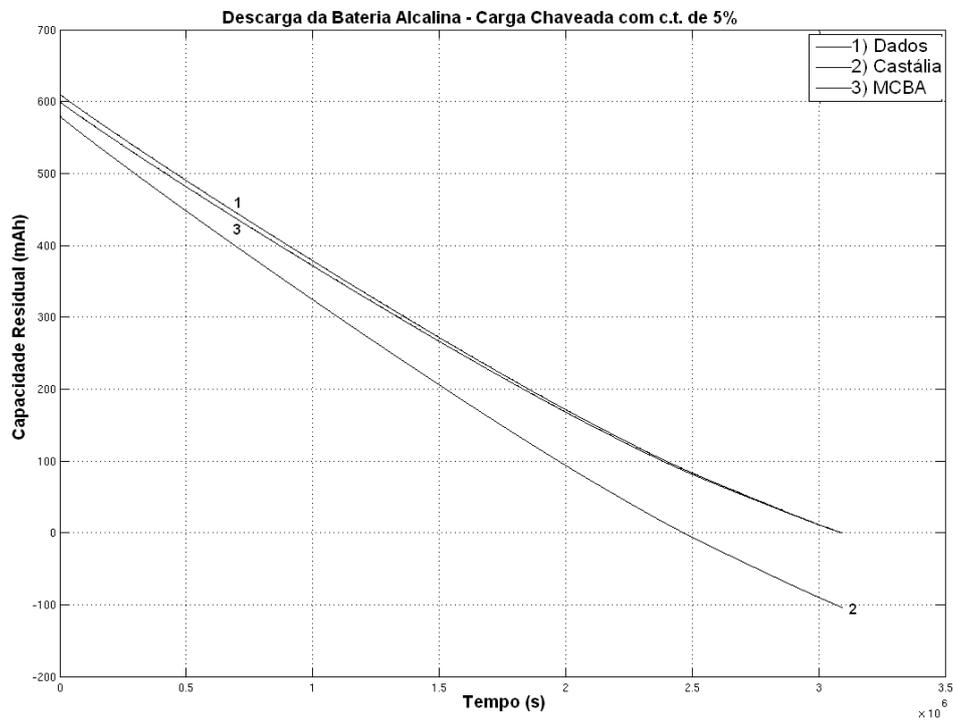


Figura 3.32: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 5%.

A Fig. 3.33 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 5%.

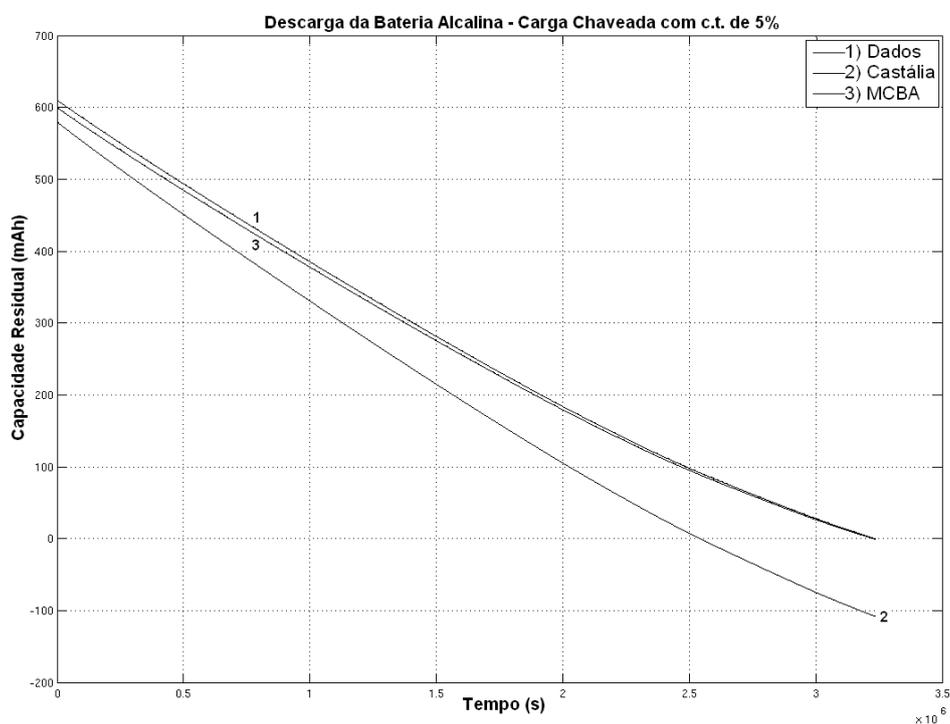


Figura 3.33: Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 5%.

Pode-se observar que o desempenho do MCBA foi superior ao Castália, tendo em vista que, para as três baterias, a curva do MCBA foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais.

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBA e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.13. Conforme pode ser observado na Tabela 3.13, o erro máximo para o MCBA foi de 0,60%, valor muito inferior ao erro do Castália, que foi superior a 18%.

Os resultados da validação do modelo proposto demonstram que o erro médio máximo para o MCBA foi inferior a 4%, índice inferior ao modelo utilizado no simulador Castália, que foi superior a 21%.

Bateria	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBA (%)
Bateria 1	-20,00	-1,63
Bateria 2	-16,92	0,03
Bateria 3	-17,72	-0,13
Média	18,21	0,60

Tabela 3.13: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 5%.

3.3 Estimação da Capacidade Residual de Baterias de Íons de Lítio

Além das pilhas alcalinas, também foram utilizadas nos experimentos as pilhas de íons de lítio LIR2450 [AA Portable Power Corp., 2009]. Para essas baterias os modelos elaborados para as pilhas alcalinas precisam ser revistos e estendidos, tendo em vista que, além da química diferente, há também características adicionais, tais como o processo de recarga, a vida de ciclo e a retenção de capacidade mais crítica que nas pilhas alcalinas.

3.3.1 Requisitos

Tendo em vista que a recarga da bateria será feita pelo módulo de captura de energia solar, que possui capacidade limitada de fornecimento de corrente, a capacidade da bateria foi especificada de modo que seu tempo de recarga fosse inferior a 10 horas. Além disso, também foi levado em conta a disponibilidade comercial de baterias que fossem muito compactas e já contivessem circuitos eletrônicos embutidos na própria bateria para proteção contra sobre-

carga, subdescarga e curto-circuito. Como base de cálculo, foi estabelecido que a corrente de recarga seria de 35 mA, corrente média obtida em experimentos com o mini-painel solar durante horário de grande incidência de energia solar, e o tempo de recarga seria de 3,5 horas, resultando em uma capacidade padrão de 122,5 mAh.

3.3.2 Plataforma de Medição

O circuito utilizado para a caracterização dessas pilhas foi o mesmo utilizado para as pilhas alcalinas de baixa capacidade e apresentado na Fig. 3.13. O delineamento experimental também foi o mesmo utilizado para as pilhas alcalinas de baixa capacidade. Para todos os ciclos de trabalho, o t_{on} também foi fixado em 1 segundo. Além disso, para cada um dos ciclos de trabalho, foram descarregadas três baterias simultaneamente e cada uma delas teve o seu número de recargas limitado em três. Isto foi necessário para evitar o impacto da vida de ciclo (Fig. 2.18) na capacidade das baterias e a consequente descaracterização do modelo da bateria.

3.3.3 Resultados

A Fig. 3.34 ilustra o perfil de descarga (tensão - tempo de serviço da bateria) de uma das três baterias descarregadas no circuito da Fig. 3.13 com *c.t.* de 100%.

Diferentemente das pilhas alcalinas de baixa capacidade, há apenas um perfil de descarga com uma tensão de “joelho” em 3,6 V, onde a curva cai abruptamente para a tensão de corte de 2,75 V.

A Fig. 3.35 ilustra o perfil de descarga de doze baterias descarregadas com *c.t.* de 100%, incluindo a curva mostrada na Fig. 3.34.



Figura 3.34: Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 100%.

As curvas apresentaram o mesmo perfil descrito na Fig. 3.34, o que demonstra que as baterias têm perfis de descarga equivalentes para um mesmo *c.t.* Além disso, as curvas que tiveram tensões iniciais de valores muito próximos, obtidos no processo de recarga, também apresentaram tempos de serviço de valores praticamente idênticos. Como a carga é resistiva, a corrente apresenta o perfil idêntico ao da tensão.

Foram selecionadas três baterias de valores iniciais próximos e para cada um dos arquivos de corrente foi efetuada a contagem de Coulomb, conforme Equação 3.10.

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.14. Como a carga não está sendo chaveada, não existe o efeito de relaxação, somente o efeito da taxa de descarga, que é contemplado pela determinação da capacidade efetiva. Portanto, a capacidade das baterias equivale à capacidade efetiva, que pode

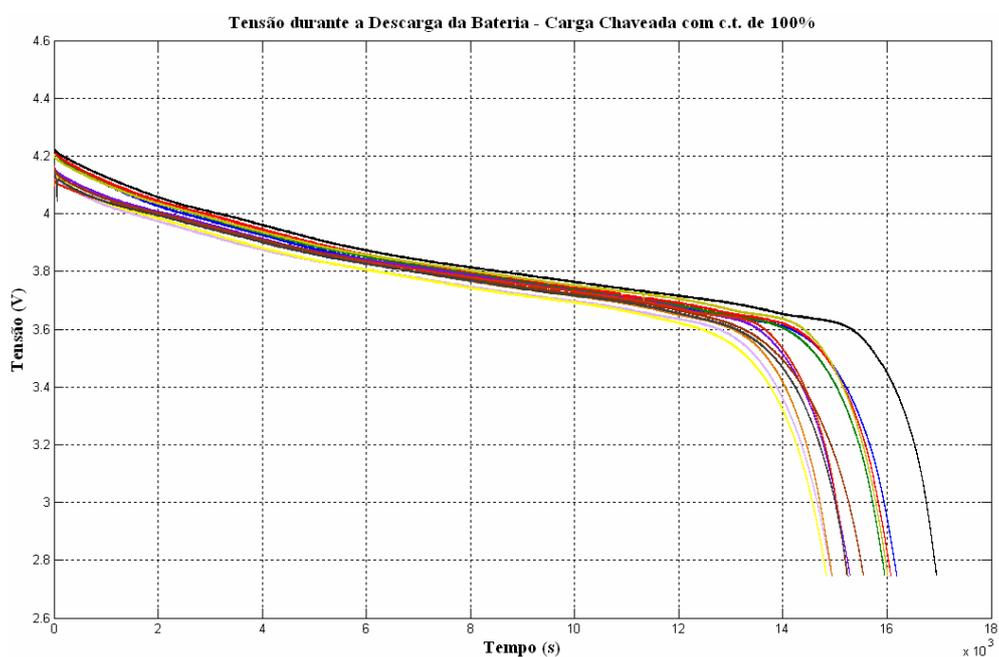


Figura 3.35: Perfil de descarga de doze baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 100%.

ser consultada diretamente da Tabela A.3. De acordo com essa tabela, o valor de capacidade efetiva para o nível de corrente de 30 mA é 124,5 mAh. A diferença observada entre esse valor e os apresentados na Tabela 3.14 pode ser explicada por possíveis diferenças na recarga das baterias e variações na tensão de corte, que determina o término da descarga das baterias. Outra possibilidade é a existência de diferença entre os lotes de baterias utilizados nos experimentos e aqueles utilizados para a geração do gráfico do manual do fabricante [AA Portable Power Corp., 2009].

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	4,210	30,1	118,3
Bateria 2	4,219	30,4	121,7
Bateria 3	4,228	30,4	122,3

Tabela 3.14: Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com *c.t.* de 100%.

A Fig. 3.36 ilustra o perfil de descarga de uma das três baterias descarregadas com *c.t.* de 50%. Assim como observado nas curvas com *c.t.* de 100%, pode-se observar que a curva tem um único perfil e “joelho” em 3,6 V. Elas se diferenciam das curvas de 100% na espessura, que se alargou em função do chaveamento.

A Fig. 3.37 ilustra o perfil de descarga das três baterias descarregadas com *c.t.* de 50%, incluindo a curva mostrada na Fig. 3.36. As curvas apresentaram os mesmos perfis descritos na Fig. 3.36, o que também demonstra que as baterias têm perfis de descarga equivalentes para o mesmo *c.t.*

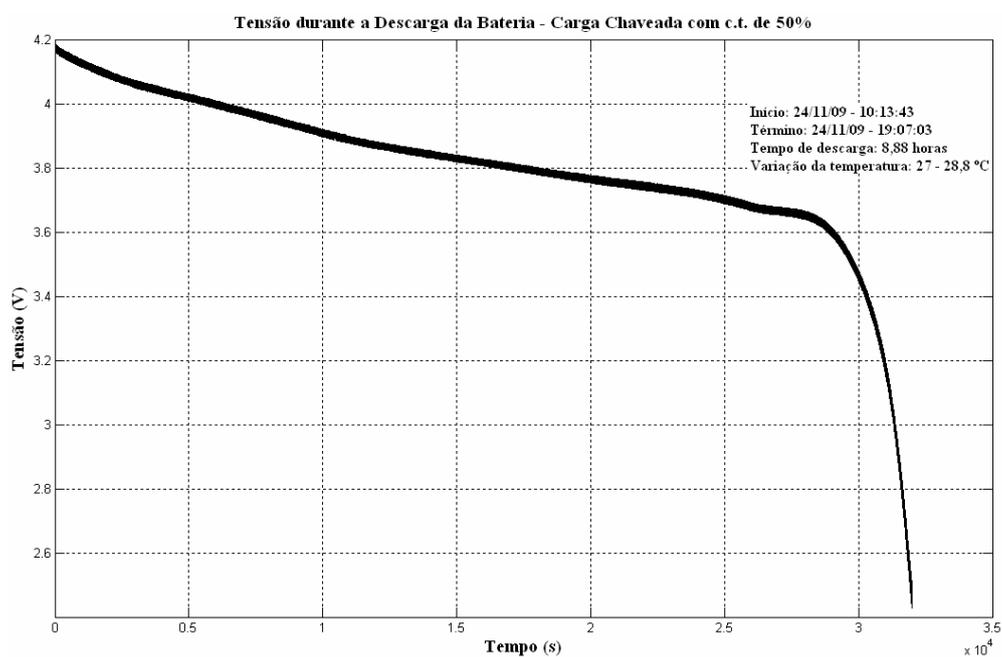


Figura 3.36: Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 50%.

Efetuando-se a contagem de Coulomb, com a Equação 3.10, dos arquivos de corrente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.15. Desta vez a carga está sendo chaveada e, portanto, existe o efeito de relaxação e da taxa de descarga.

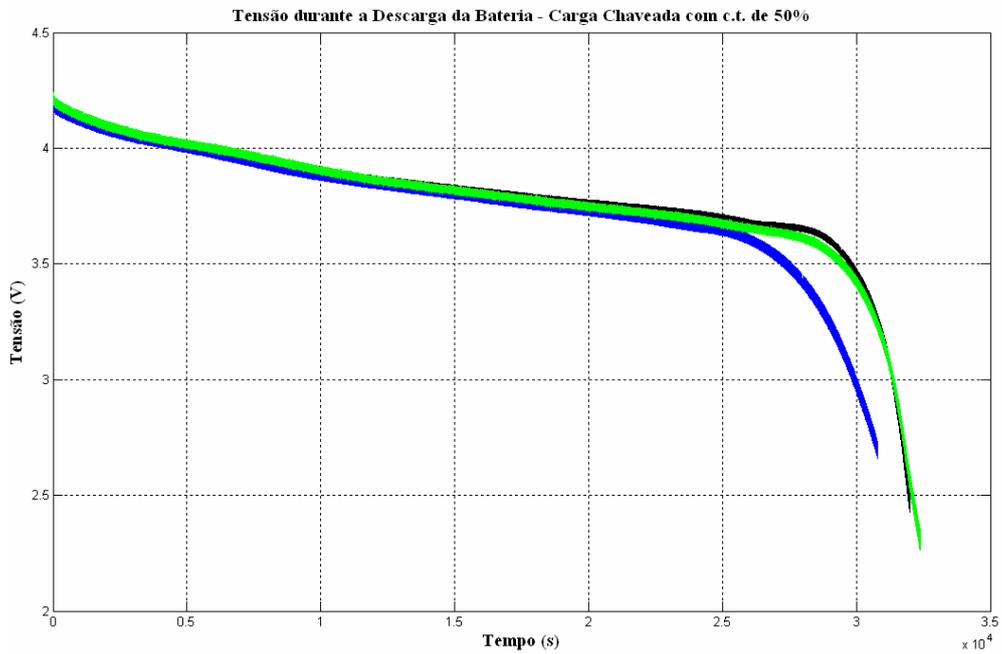


Figura 3.37: Perfil de descarga das três baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 50%.

A Fig. 3.38 ilustra o perfil de descarga de uma das três baterias descarregadas com *c.t.* de 20%. Assim como observado nas curvas com *c.t.* de 50%, pode-se observar a presença de um único perfil e a tensão de “joelho” também se manteve em 3,6 V. Elas se diferenciam das curvas de 50% na espessura, que se alargou em função do chaveamento.

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	4,170	30,6	122,4
Bateria 2	4,164	29,8	114,6
Bateria 3	4,203	30,1	119,8

Tabela 3.15: Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com *c.t.* de 50%.

A Fig. 3.39 ilustra o perfil de descarga das três baterias descarregadas com *c.t.* de 20%, incluindo a curva mostrada na Fig. 3.38. As curvas apresentaram os mesmos perfis descritos na Fig. 3.38, o que também demonstra que as baterias têm perfis de descarga equivalentes para o mesmo *c.t.*

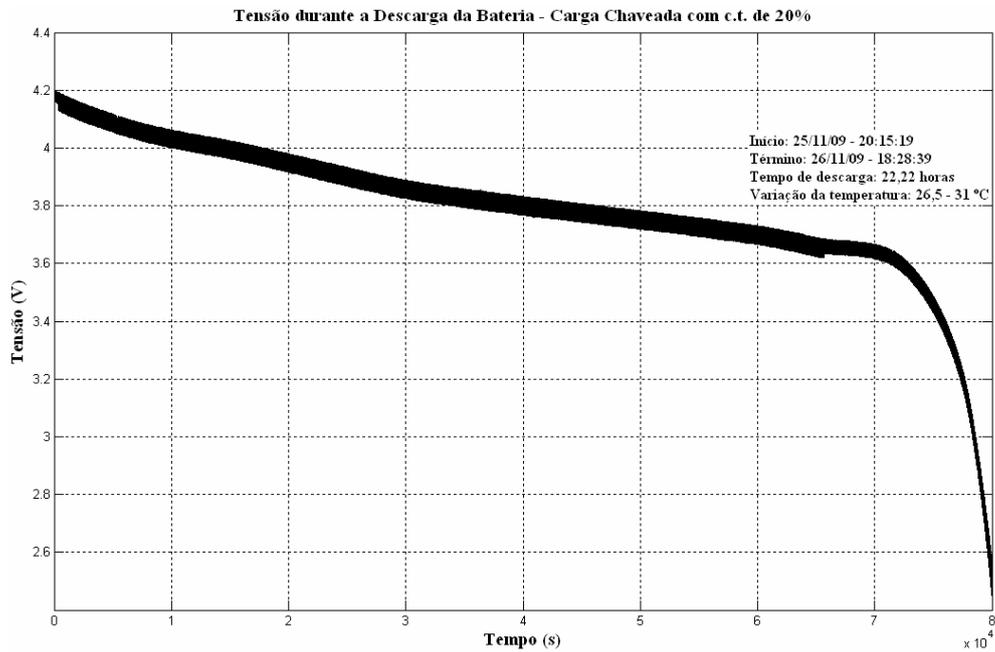


Figura 3.38: Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 20%.

Efetuando-se a contagem de Coulomb, com a Equação 3.10, dos arquivos de corrente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.16. A carga está sendo chaveada e, portanto, também existe o efeito de relaxação e da taxa de descarga.

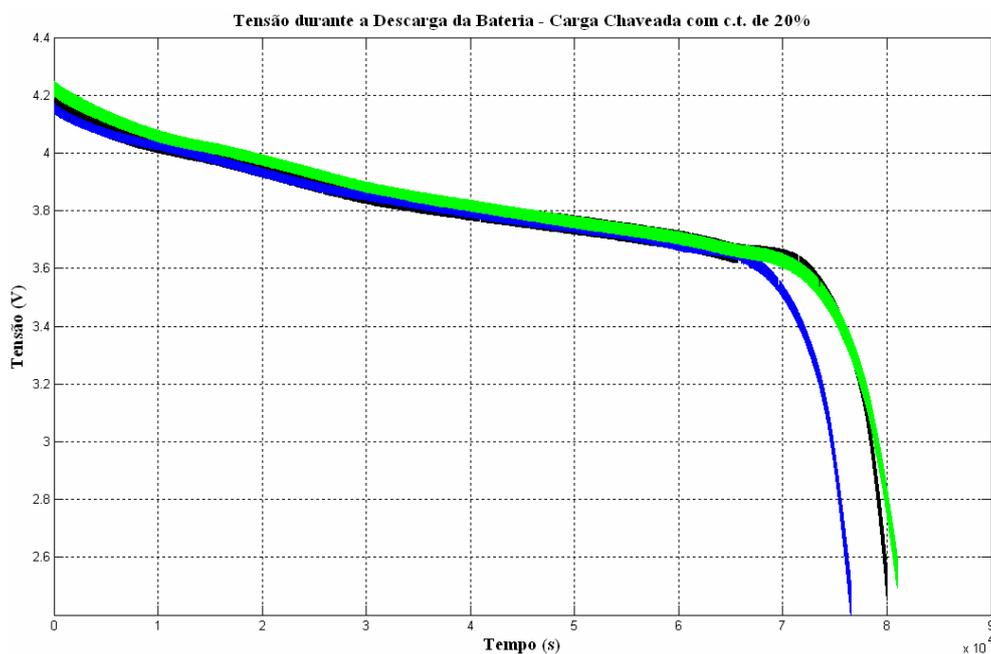


Figura 3.39: Perfil de descarga das três baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 20%.

A Fig. 3.40 ilustra o perfil de descarga de uma das três baterias descarregadas com *c.t.* de 5%. Assim como observado nas curvas com *c.t.* de 20%, pode-se observar a presença de um único perfil e tensão de “joelho” em 3,6 V. Elas se diferenciam das curvas de 20% na espessura, que se alargou em função do chaveamento.

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	4,168	29,9	119,6
Bateria 2	4,149	29,9	114,2
Bateria 3	4,201	30,3	121,9

Tabela 3.16: Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com *c.t.* de 20%.

A Fig. 3.41 ilustra os perfis de descarga das três baterias descarregadas com *c.t.* de 5%. As curvas apresentaram os mesmos perfis descritos na Fig. 3.40, demonstrando mais uma vez que as baterias têm perfis de descarga equivalentes para o mesmo *c.t.*

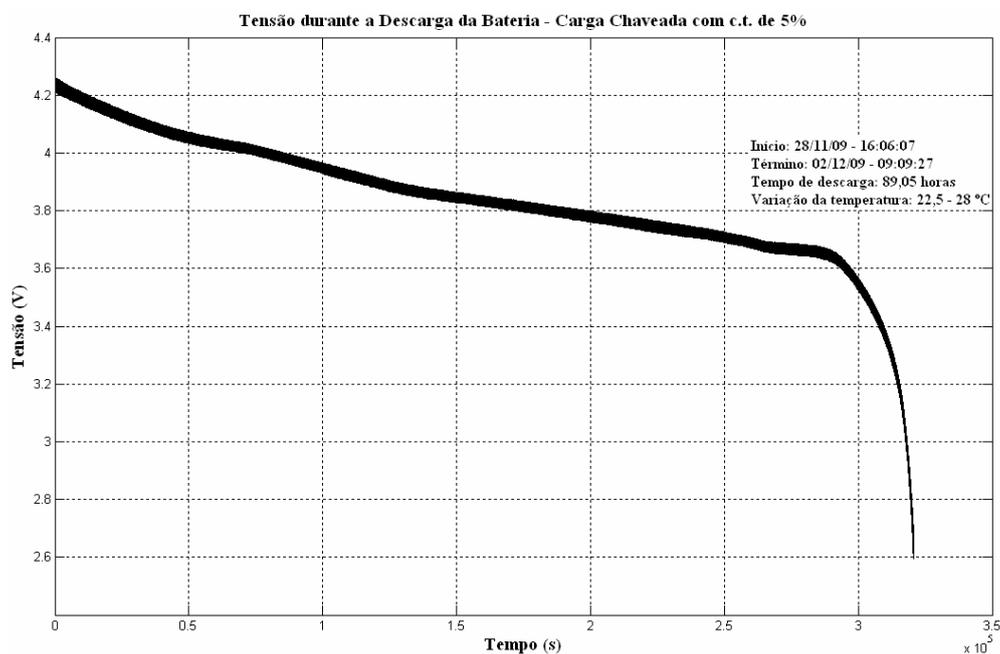


Figura 3.40: Perfil de descarga da bateria de íons de lítio, descarregada com c.t. de 5%.

Efetuando-se a contagem de Coulomb, com a Equação 3.10, dos arquivos de corrente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.17. Assim como nos *c.t.*'s de 50% e 20%, a carga continua sendo chaveada e, portanto, também existe o efeito de relaxação e da taxa de descarga.

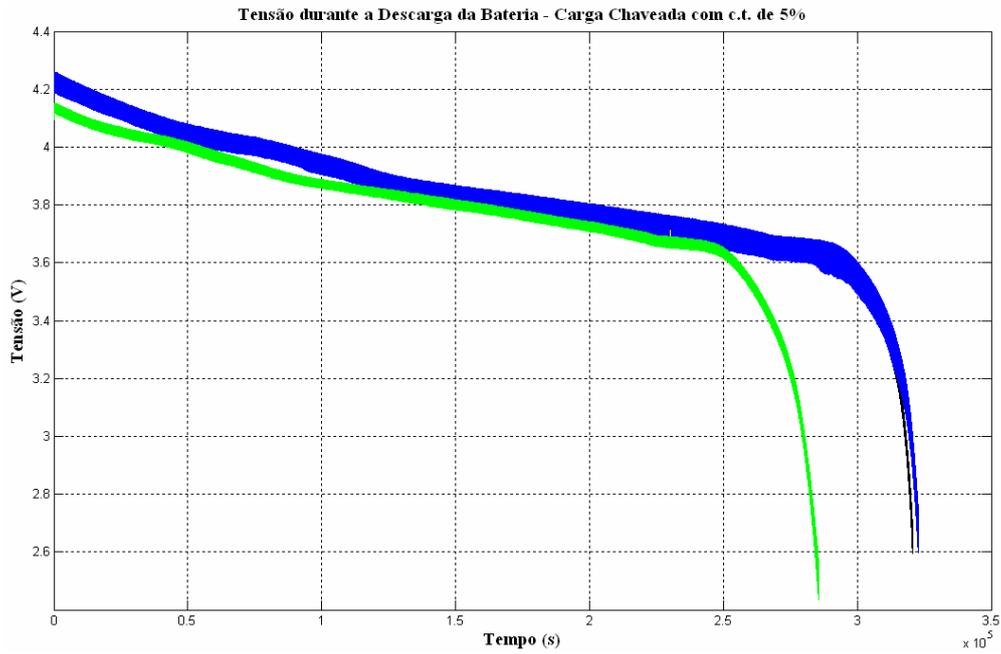


Figura 3.41: Perfil de descarga das três baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 5%.

A Tabela 3.18 sintetiza os resultados da contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste.

Pode-se observar que, devido aos diferentes valores das tensões iniciais das baterias (devido ao processo de recarga) e às diferenças entre os componentes que compõem os circuitos de descarga (tensão de saturação dos transistores e tolerância dos resistores *shunt* e de carga), houve diferença nos resultados da contagem de Coulomb para as três baterias em um mesmo ciclo de trabalho.

Bateria	Tensão inicial (V)	Corrente inicial (mA)	Contagem de Coulomb (mAh)
Bateria 1	4,224	30,3	122,4
Bateria 2	4,207	26,6	107,1
Bateria 3	4,097	25,9	93,9

Tabela 3.17: Contagem de Coulomb para as baterias de íons de lítio sob teste, com c.t. de 5%.

c.t.(%)	100	50	20	5
Bateria 1	118,3 mAh	122,4 mAh	119,6 mAh	122,4 mAh
Bateria 2	121,7 mAh	114,6 mAh	114,2 mAh	107,1 mAh
Bateria 3	122,3 mAh	119,8 mAh	121,9 mAh	93,9 mAh
Média	120,8 mAh	118,9 mAh	118,6 mAh	107,8 mAh

Tabela 3.18: Síntese dos resultados da contagem de Coulomb dos arquivos de corrente das baterias de íons de lítio sob teste.

3.3.4 Primeira Geração de Modelo de Baterias de Íons de Lítio para RSSF baseados no Sistema de Escrituração

Levando em conta as mesmas considerações feitas para as pilhas alcalinas de baixa capacidade em relação ao efeito da taxa de descarga, ele somente ocorrerá durante o t_{on} , que está contemplado na determinação da capacidade efetiva das baterias.

A temperatura média durante a realização dos experimentos foi de 26,3°C. Devido à grande proximidade entre a curva de 20°C e a de 60°C do gráfico da Fig. 2.16, o impacto da temperatura sobre a capacidade das baterias será considerado desprezível.

Diferentemente das pilhas alcalinas, a retenção de capacidade para as baterias de íons de lítio utilizadas nos experimentos é mais crítica, conforme pode ser observado na Fig. 2.17. Por exemplo, à temperatura de 60°C há uma redução de 25% na capacidade da bateria. Desse modo, será necessário avaliar o impacto da retenção de capacidade para todos os ciclos de trabalho, principalmente para aqueles inferiores a 20%. Para isso, será obtida, através de aproximação linear, a curva de retenção de capacidade para a temperatura de 30°C (pior caso), que foi a maior temperatura alcançada durante a realização dos experimentos. Considerando-se os pontos $P_3(0 \text{ meses}, 100\%)$ e $P_4(0,5 \text{ meses}, 90\%)$, pode-se obter a Equação 3.20:

$$R_c = -0,2 \times n_m + 1, \quad (3.20)$$

onde R_c é a retenção de capacidade e n_m é o tempo de duração do experimento em meses.

De acordo com a Equação 3.20 e o tempo de duração dos experimentos, foi obtida a Tabela 3.19. Os resultados apresentados na Tabela 3.19 mostram que não houve impacto significativo na retenção de capacidade para os *c.t.*'s de 100%, 50% e 20%. Além disso, como pode ser observado na Tabela 3.18, também não houve recuperação significativa de capacidade, tendo em vista que a média de capacidade para os *c.t.*'s de 50% e 20% ficaram próximas da média de capacidade para o *c.t.* de 100%. Portanto, para esses *c.t.*'s, o impacto do efeito de relaxação será considerado desprezível. Por outro lado, o *c.t.* de 5% sofreu perda de capacidade e, portanto, o efeito não poderá ser desprezado. Com o valor da média de capacidade de 107,8 mAh e o índice de retenção de capacidade de 0,975, pode-se determinar o valor da capacidade antes do efeito da retenção de capacidade: 110,6 mAh. Como este valor ficou inferior à capacidade média do *c.t.* de 100%, o efeito de relaxação também

será considerado desprezível.

c.t.(%)	Tempo de duração (horas)	Retenção de capacidade
100	5,5	0,998
50	8,8	0,997
20	22,1	0,994
5	89,1	0,975

Tabela 3.19: Retenção de capacidade para cada um dos c.t.'s utilizados nos experimentos das baterias de íons de lítio.

Tendo em vista que os efeitos da temperatura, da vida de ciclo e da perda de capacidade (exceto para o *c.t.* de 5%) foram desprezíveis e que foram observadas diferenças entre as tensões iniciais dos experimentos, que resultaram em diferentes valores para a contagem de Coulomb das baterias (Tabelas 3.14 a 3.17), a diferença existente entre esses valores e os respectivos valores de capacidade efetiva obtidos na Tabela A.3 somente pode ser explicada pelo único fator que ainda não foi considerado: o processo de recarga das baterias. Para resolver esse problema, propõe-se a criação de um parâmetro, denominado de eficiência de recarga (γ), definido como a relação entre a corrente inicial (I_i) e a corrente de referência (I_r), cujo valor corresponde à maior corrente observada nos experimentos para uma determinada carga, conforme Equação 3.21.

$$\gamma = \frac{I_i}{I_r}. \quad (3.21)$$

Observando-se os valores de correntes iniciais das Tabelas 3.14 a 3.17, o valor de I_r é 30,6 mA.

Foi observado nos experimentos a necessidade de se incluir a retenção de capacidade na modelagem da capacidade residual. Além disso, por se tratar de baterias recarregáveis, também é necessário a inclusão da vida de ciclo, conforme ilustrado no gráfico da Fig. 2.18. Fazendo-se a aproximação linear a partir dos pontos $P_5(0 \text{ ciclos de recarga}, 100\%)$ e $P_6(500 \text{ ciclos de recarga}, 80\%)$, obtém-se a Equação 3.22:

$$V_c = -0,0004 \times n_c + 1, \quad (3.22)$$

onde V_c é a vida de ciclo e n_c é o número de ciclos de recarga.

Para a retenção de capacidade, será considerado que a temperatura média de operação da bateria será de 30°C . Para outros valores de temperatura, novas equações deverão ser extraídas do gráfico da Fig. 2.17.

Os efeitos da eficiência de recarga, da retenção de capacidade e vida de ciclo afetam diretamente a capacidade efetiva da bateria, cujo resultado é a capacidade efetiva final ($C_{eff-f-l}$):

$$C_{eff-f-l} = \gamma \times V_c \times R_c \times C_{eff}(I_m). \quad (3.23)$$

Substituindo-se V_c e R_c , temos:

$$C_{eff-f-l} = \gamma \times (-0,0004 \times n_c + 1) \times (-0,2 \times n_m + 1) \times C_{eff}(I_m). \quad (3.24)$$

Uma vez determinada o efeito da eficiência de recarga, da retenção de capacidade e da vida de ciclo, pode-se modelar a capacidade residual da bateria (C_{res}), conforme mostrado na Equação 3.25.

$$C_{res} = C_{eff-f-l} - \left[\frac{1}{3600} \times \sum_{k=1}^n (I_k \times \Delta t) \right], \quad (3.25)$$

onde C_{res} é a capacidade residual da bateria (mAh), $C_{eff-f-l}$ é a capacidade efetiva final (dada pela Equação 3.24), n é o número da n -ésima amostra de corrente e Δt é o tempo de amostragem (s).

O primeiro termo da Equação 3.25 representa a capacidade efetiva final da bateria e leva em conta o efeito da taxa de descarga, a retenção de capacidade e a vida de ciclo. O segundo termo representa o quanto de energia está sendo extraída da bateria. Desse modo, temos uma primeira geração inédita de modelo de baterias de íons de lítio para RSSF baseado no método de sistema de escrituração, que também será denominado como Modelo Comportamental da Bateria de íons de lítio - MCB (BBM, em inglês), composto pela contagem de Coulomb (segundo termo), o efeito da taxa de descarga, a retenção de capacidade e a vida de ciclo (primeiro termo).

Em nós sensores reais a corrente de fuga, que é drenada quando eles estão “dormindo”, equivale a algumas dezenas de microampères. Em função disso e considerando-se que correntes nesses níveis não alteram o efeito da taxa de descarga e que os nós sensores ficarão grande parte de seus tempos de vida “dormindo”, o modelo da Equação 3.25 pode ser melhorado, de modo que o contador de Coulomb também contabilize essa energia. Além disso, para evitar consumo de energia, o valor da corrente no modo “dormindo” será considerado fixo. A equação 3.26 mostra a versão melhorada.

$$C_{res} = C_{eff-f-l} - \frac{1}{3600} \times \left[\sum_{k=1}^n (I_k \times \Delta t) + \frac{1}{1000} \times \sum_{n_T=1}^m (I_f \times t_{off} \times n_T) \right], \quad (3.26)$$

onde I_f é a corrente no modo “dormindo” (μA) e t_{off} é o intervalo de tempo

no qual o nó sensor está “dormindo”(s).

3.3.5 Validação do Modelo Comportamental da Bateria de Íons de Lítio (MCBIL)

Similarmente às baterias alcalinas, para a validação do modelo proposto, o MCBIL e o modelo atualmente utilizado no simulador Castália, que se baseia no método de contagem de Coulomb [Pop et al., 2005] e utiliza como capacidade efetiva a capacidade padrão da bateria (que neste caso é de 120 mAh), devem ser comparados com os dados experimentais obtidos para os *c.t.*'s de 100%, 50%, 20% e 5%. Diferentemente das baterias alcalinas, não haverá necessidade de se refazer a contagem de Coulomb para os arquivos de corrente das baterias de íons de lítio sob teste, pois elas foram descarregadas somente até a tensão de corte, ou seja, 2,75 V, mesmo valor utilizado pelo fabricante da bateria para a obtenção das características de descarga e de onde a Tabela A.3 foi extraída. Por outro lado, os valores da capacidade efetiva final devem ser calculados, tendo em vista o impacto do processo de recarga observado em todos os experimentos. De posse da capacidade efetiva final ($C_{eff-f-l}$), pode-se determinar a capacidade residual de cada uma das baterias utilizadas nos experimentos e realizar as comparações entre os modelos e os dados experimentais.

A Tabela 3.20 mostra a capacidade efetiva final ($C_{eff-f-l}$) para as baterias de íons de lítio, descarregadas com *c.t.* de 100%.

Bateria	Capacidade Efetiva (mAh)	Eficiência de Recarga (γ)	Capacidade Efetiva Final (mAh)
Bateria 1	124,5	0,98	122,0
Bateria 2	124,5	0,99	123,3
Bateria 3	124,5	0,99	123,3

Tabela 3.20: Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 100%.

A Fig. 3.42 ilustra a capacidade residual da bateria 1 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 100%.

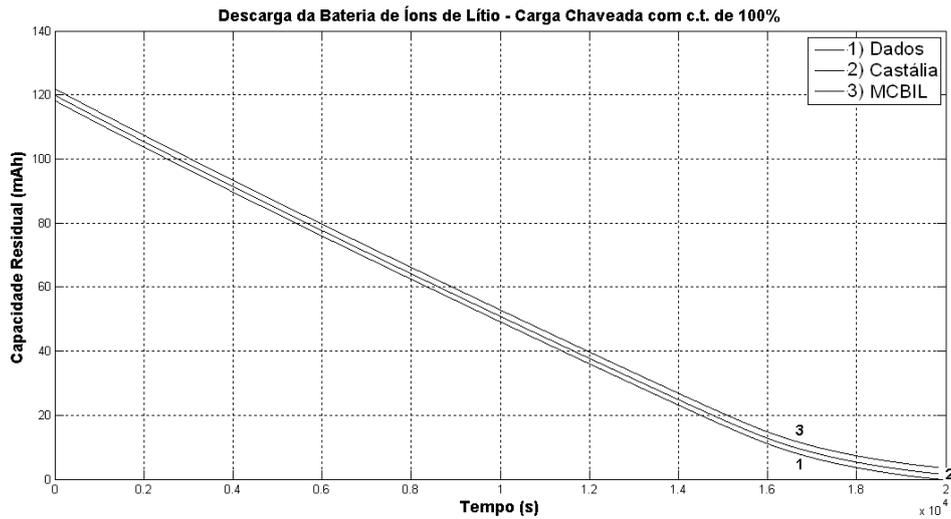


Figura 3.42: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 100%.

A Fig. 3.43 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 100%.

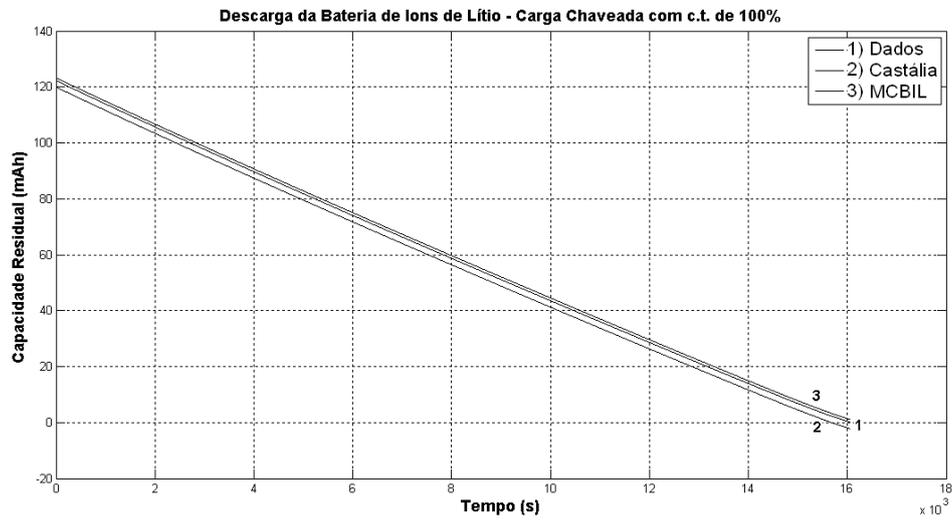


Figura 3.43: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 100%.

A Fig. 3.44 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 100%.

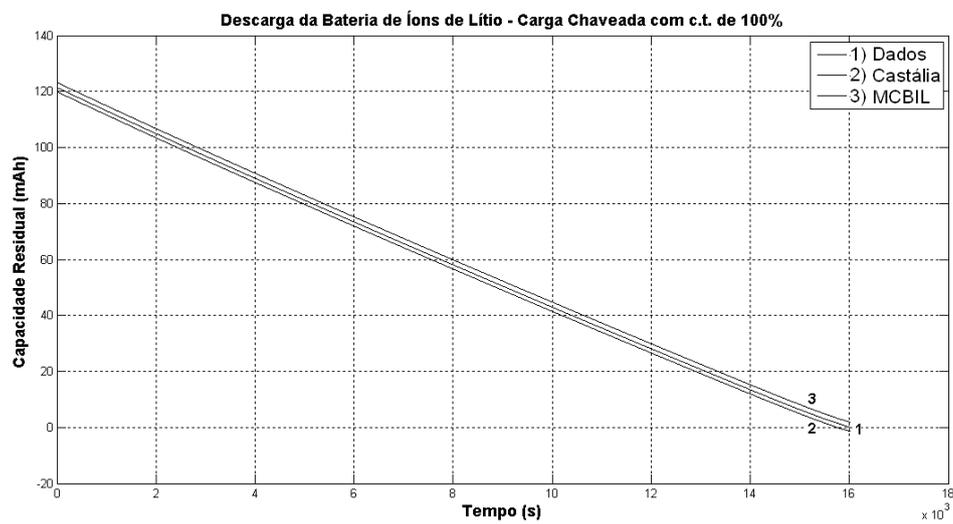


Figura 3.44: Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 100%.

Pode-se observar que o desempenho do MCBIL foi parecido com o do Castália, tendo em vista que, para a bateria 1, a curva do Castália foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais, mas para a bateria 3 houve uma inversão, ou seja, a curva do MCBIL foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais.

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBIL e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.21.

Bateria	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBIL (%)
Bateria 1	1,41	3,06
Bateria 2	-1,25	1,49
Bateria 3	-1,88	0,85
Média	1,51	1,80

Tabela 3.21: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com *c.t.* de 100%.

Conforme pode ser observado na Tabela 3.21 e considerando-se o fato de não ter havido recuperação de capacidade significativa, o erro máximo para o MCBIL foi de 1,80%, valor próximo ao erro do Castália e, portanto, mostra que os dois modelos têm desempenhos similares para o *c.t.* de 100

A Tabela 3.22 mostra a capacidade efetiva final ($C_{eff-f-l}$) para as baterias de íons de lítio, descarregadas com *c.t.* de 50%.

Bateria	Capacidade Efetiva (mAh)	Eficiência de Recarga (γ)	Capacidade Efetiva Final (mAh)
Bateria 1	124,1	1	124,1
Bateria 2	124,5	0,97	120,8
Bateria 3	124,5	0,98	122,0

Tabela 3.22: Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com *c.t.* de 50%.

A Fig. 3.45 ilustra a capacidade residual da bateria 1 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 50%.

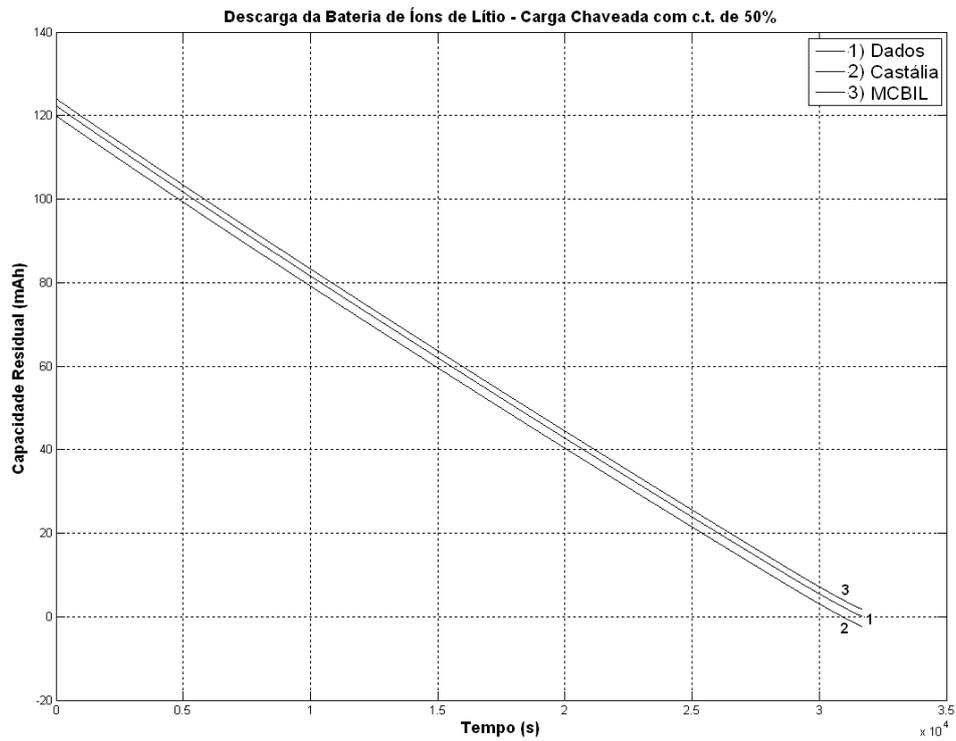


Figura 3.45: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 50%.

A Fig. 3.46 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 50%.

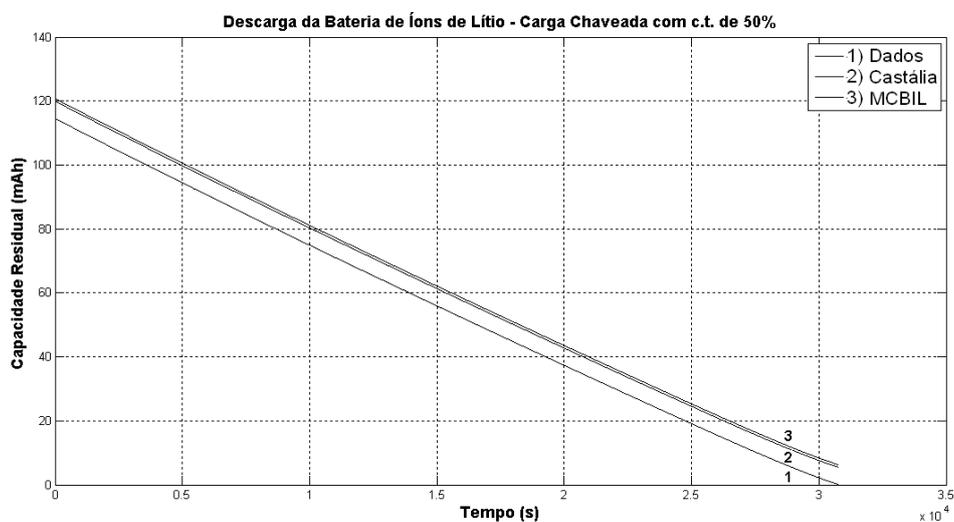


Figura 3.46: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 50%.

A Fig. 3.47 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 50%.

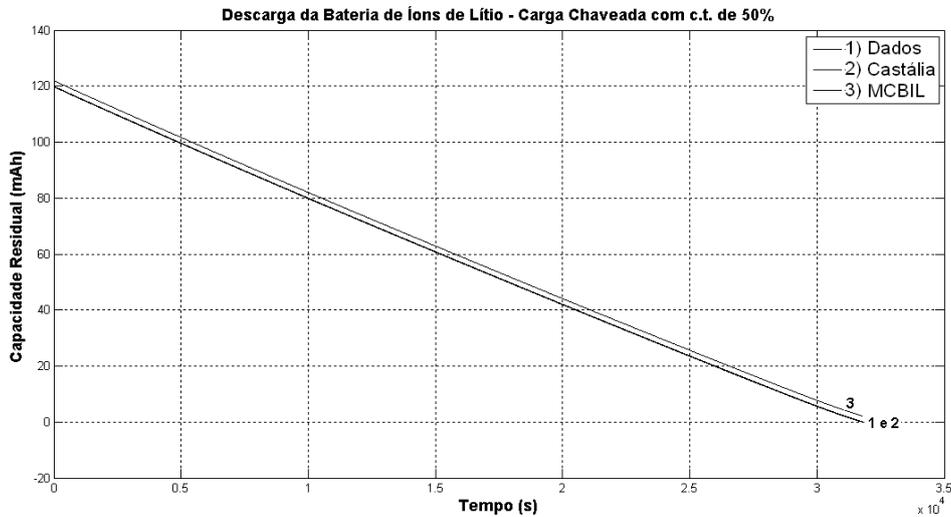


Figura 3.47: Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 50%.

Assim como observado com o *c.t.* de 100%, o desempenho do MCBIL foi parecido com o do Castália, tendo em vista que, para a bateria 3, a curva do Castália foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais, mas para a bateria 1 houve uma inversão, ou seja, a curva do MCBIL foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais.

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBIL e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.23.

Similarmente à análise feita para o *c.t.* de 100%, pode ser observado na Tabela 3.23 que o erro máximo para o MCBIL foi inferior a 3%, mas próximo ao erro do Castália, o que mostra que os dois modelos têm desempenhos similares também para o *c.t.* de 50%.

A Tabela 3.24 mostra a capacidade efetiva final ($C_{eff-f-l}$) para as baterias de íons de lítio, descarregadas com *c.t.* de 20%.

Bateria	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBIL (%)
Bateria 1	-1,98	1,41
Bateria 2	4,48	5,15
Bateria 3	0,14	1,79
Média	2,20	2,78

Tabela 3.23: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 50%.

Bateria	Capacidade Efetiva (mAh)	Eficiência de Recarga (γ)	Capacidade Efetiva Final (mAh)
Bateria 1	124,5	0,977	121,6
Bateria 2	124,5	0,977	121,6
Bateria 3	124,5	0,99	123,3

Tabela 3.24: Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 20%.

A Fig. 3.48 ilustra a capacidade residual da bateria 1 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com c.t. de 20%.

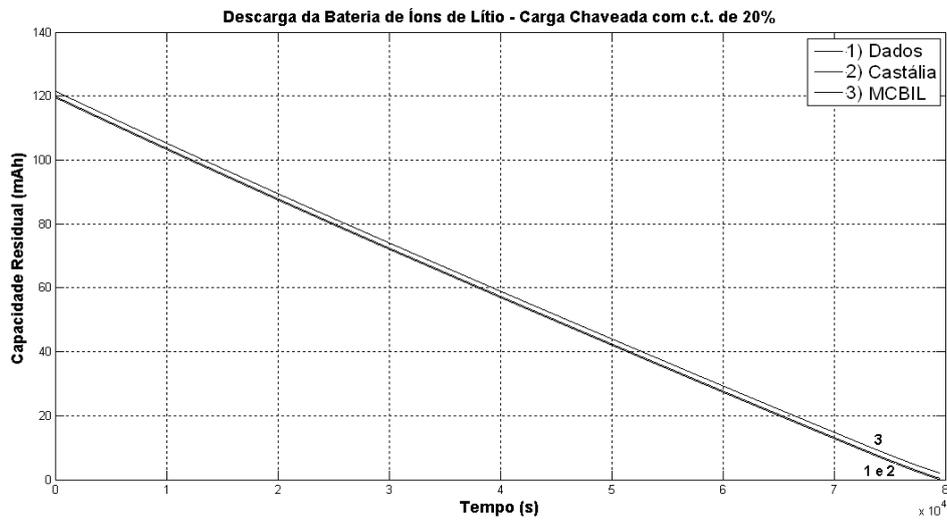


Figura 3.48: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 20%.

A Fig. 3.49 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 20%.

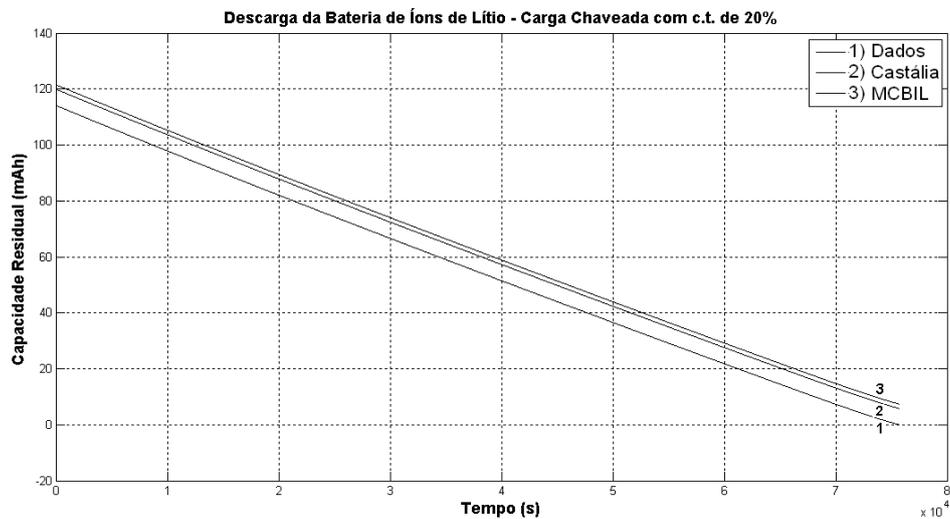


Figura 3.49: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 20%.

A Fig. 3.50 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 20%.

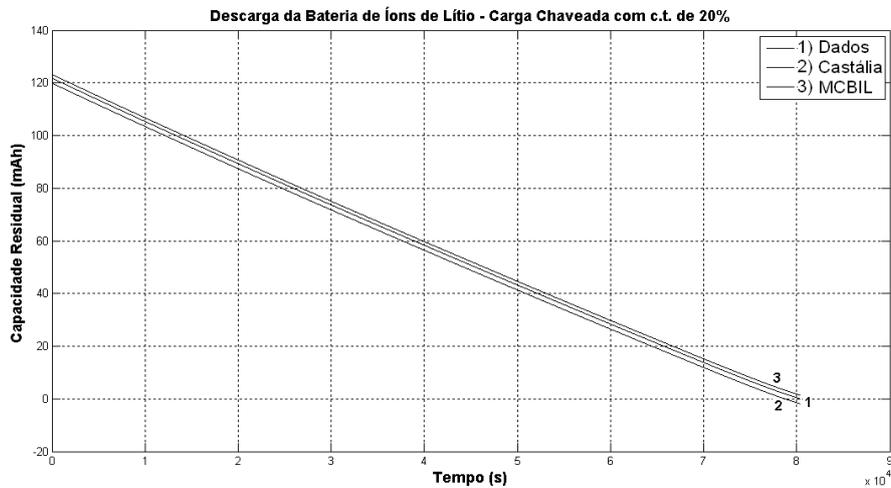


Figura 3.50: Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 20%.

Assim como observado com o *c.t.* de 100%, o desempenho do MCBIL foi parecido com o do Castália, tendo em vista que, para a bateria 1, a curva do Castália foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais, mas para a bateria 3 houve uma inversão, ou seja, a curva do MCBIL foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais.

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBIL e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.25.

Similarmente à análise feita para o *c.t.* de 50%, pode ser observado na Tabela 3.25 que o erro máximo para o MCBIL foi inferior a 3%, mas próximo ao erro do Castália, o que mostra que os dois modelos têm desempenhos similares também para o *c.t.* de 20%.

A Tabela 3.26 mostra a capacidade efetiva final ($C_{eff-f-l}$) para as baterias de íons de lítio, descarregadas com *c.t.* de 5%. O valor da capacidade efetiva apresentada na tabela, neste caso, refere-se ao resultado da aplicação do fator de impacto da retenção de capacidade (Tabela 3.19) à capacidade

Bateria	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBIL (%)
Bateria 1	0,35	1,67
Bateria 2	4,78	6,10
Bateria 3	-1,56	1,17
Média	2,23	2,98

Tabela 3.25: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 20%.

efetiva extraída da Tabela A.3.

Bateria	Capacidade Efetiva (mAh)	Eficiência de Recarga (γ)	Capacidade Efetiva Final (mAh)
Bateria 1	121,4	0,990	120,2
Bateria 2	122,3	0,870	106,4
Bateria 3	122,7	0,846	103,8

Tabela 3.26: Capacidade efetiva final para as baterias de íons de lítio, descarregadas com c.t. de 5%.

A Fig. 3.51 ilustra a capacidade residual da bateria 1 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 5%.

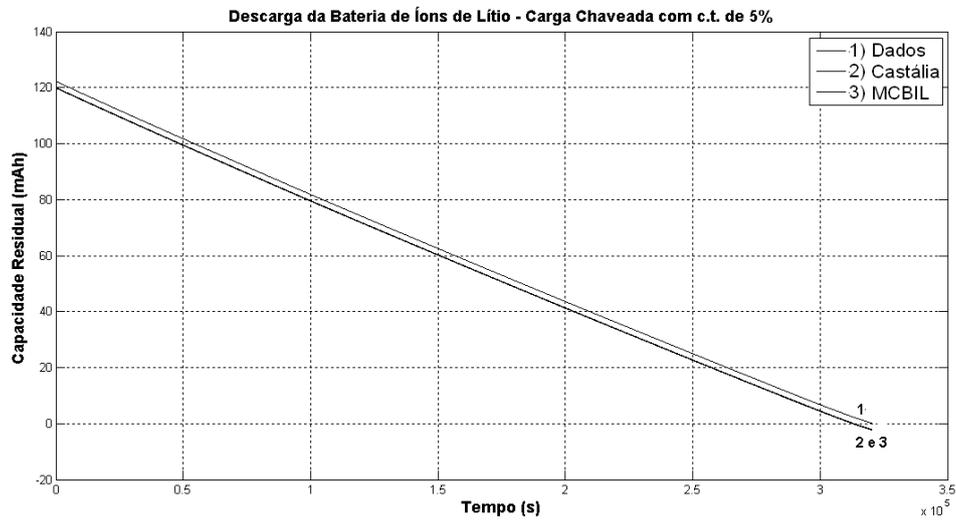


Figura 3.51: Capacidade residual da bateria 1, com c.t. de 5%.

A Fig. 3.52 ilustra a capacidade residual da bateria 2 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 5%.

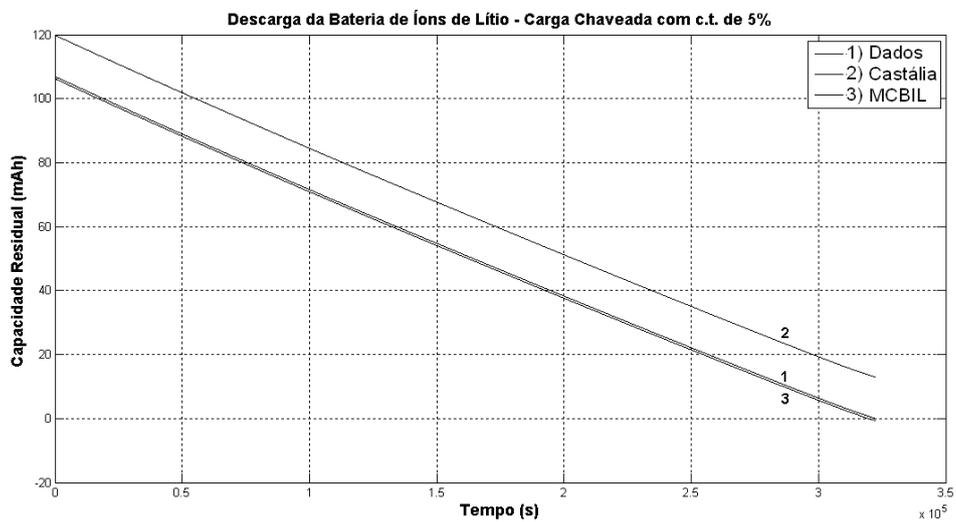


Figura 3.52: Capacidade residual para a bateria 2, com c.t. de 5%.

A Fig. 3.53 ilustra a capacidade residual da bateria 3 para os modelos e os dados experimentais, descarregada com *c.t.* de 5%.

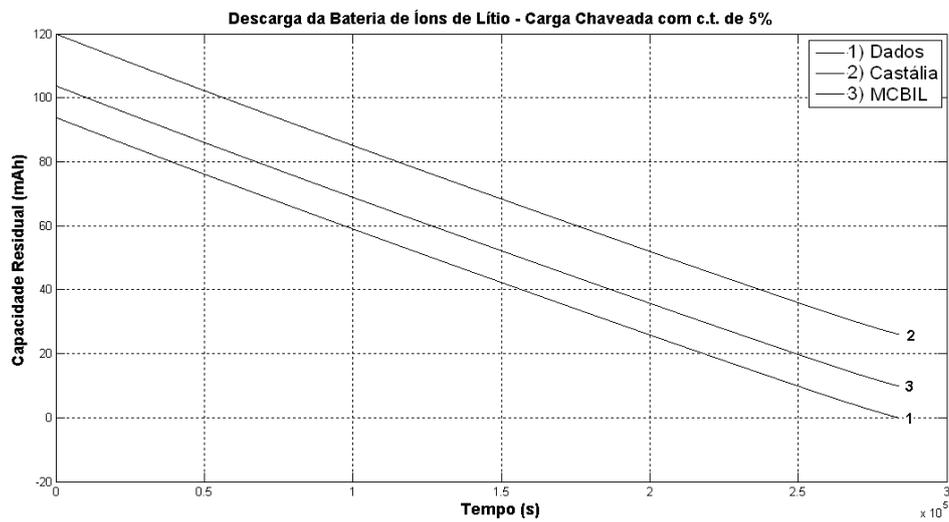


Figura 3.53: Capacidade residual para a bateria 3, com c.t. de 5%.

O desempenho do MCBIL foi parecido com o do Castália somente para a bateria 1. Para as baterias 2 e 3, a curva do MCBIL foi a que mais se aproximou da curva dos dados experimentais, tendo em vista que o impacto da eficiência de recarga foi significativo para este *c.t.*

Tomando-se como referência os dados experimentais e os gráficos obtidos, pode-se calcular o erro médio máximo para o MCBIL e o Castália, conforme apresentado na Tabela 3.27.

Bateria	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBIL (%)
Bateria 1	-1,95	-1,78
Bateria 2	10,67	0,59
Bateria 3	21,56	8,15
Média	11,40	3,51

Tabela 3.27: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com *c.t.* de 5%.

Conforme pode ser observado na Tabela 3.13, o erro máximo para o MCBIL foi de 3,51%, valor muito inferior ao erro do Castália, que foi superior a 10%.

A Tabela 3.28 sintetiza os resultados para os erros médios máximos obtidos para todos os *c.t.*'s. De acordo com essa tabela, os resultados da validação do modelo proposto demonstram que os erros médios máximos do MCBIL para os *c.t.*'s de 100%, 50% e 20% foram similares aos erros do Castália, mas ainda assim um pouco maiores (diferença inferior a 0,75%). Contudo, para o *c.t.* de 5% o erro médio máximo foi inferior a 3,6%, índice inferior ao modelo utilizado no simulador Castália, que foi superior a 10%. Além disso, o erro médio máximo de 3,6% foi o maior índice obtido dentre todos os *c.t.*'s, que

é inferior aos índices obtidos nos modelos propostos na literatura.

C.t. (%)	Erro Médio Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o Castália (%)	Erro Médio Máximo da Estimação da Capacidade Residual para o MCBIL (%)
100	1,51	1,80
50	2,20	2,78
20	2,23	2,98
5	11,40	3,51

Tabela 3.28: Erro máximo para a estimação da capacidade residual das baterias sob teste, descarregadas com c.t. de 5%.

Dois fatores contribuíram para que o modelo do Castália tivesse um desempenho um pouco melhor que o MCBIL para a maioria dos *c.t.*'s, exceto para o *c.t.* de 5%. O primeiro, é o fato de a capacidade efetiva obtida nos experimentos com *c.t.* de 100% (Tabela 3.14) teve média igual a 120,8 mAh, valor muito mais próximo daquele utilizado pelo Castália (120 mAh) que o valor obtido na Tabela A.3 (124,5 mAh) e utilizado no MCBIL. O segundo, é o fato de não ter havido recuperação de capacidade significativa, assim como houve nas baterias alcalinas, o que também favoreceu o modelo do Castália. De qualquer forma, novos experimentos serão realizados nos trabalhos futuros para melhor identificar o ocorrido.

3.4 Discussão

Diferentemente dos modelos baseados em tensão, os modelos baseados em corrente apresentados podem indicar exaustão das baterias antes do tempo, mas não indicam falso positivo, ou seja, disponibilidade de energia após a bateria estar exaurida. Foi verificado nos experimentos que variações de 0,1

V e 0,01 V nas medidas de tensão da bateria poderiam incorrer em grandes erros de estimação do seu tempo de serviço. Por exemplo, um erro de 0,1 V na medida da tensão implicaria em um erro de estimação do seu tempo de serviço de, aproximadamente, 5 horas para o *c.t.* de 20%. Ainda para esse mesmo *c.t.*, um erro de 0,01 V resultaria em um erro de estimação do tempo de serviço de 27 minutos. Portanto, mais uma vez, os modelos baseados em tensão se mostraram inadequados para uma indicação de *SoC* confiável.

Devido às limitações computacionais e energéticas em RSSF, os modelos de bateria baseados no sistema de escrituração foram elaborados para serem computacionalmente simples e energeticamente eficientes. Visando à eficiência energética, as medidas de corrente e temperatura devem ser feitas durante o intervalo de tempo t_{on} , juntamente com as medidas dos sensores. Desse modo, o consumo de energia será mínimo, pois os periféricos (conversor A/D, temporizadores, etc) já estariam sendo utilizados pelos sensores. Isto quer dizer que nenhum periférico seria ligado, exclusivamente, para fazer as medidas utilizadas no modelo. Também haveria o consumo de energia referente às instruções para a execução do modelo, que são instruções de baixo consumo. Outra fonte de consumo de energia seria o resistor *shunt* e, se for o caso, do amplificador de instrumentação, utilizado para condicionar a medida de tensão do resistor *shunt* à entrada do conversor A/D. Os amplificadores de instrumentação atuais consomem poucas dezenas de microampères e, neste caso, somente seriam ligados no intervalo de tempo t_{on} . O custo de memória seria devido às variáveis utilizadas no modelo e à tabela de capacidade efetiva, que poderia ser bastante reduzida, caso exista uma estimativa do nível de corrente do nó sensor.

A principal limitação dos modelos de baterias alcalinas e de íons de lítio para RSSF baseados no sistema de escrituração é o fato de eles não contem-

plarem o efeito da temperatura, mas que será tratado nas próximas gerações desses modelos.

3.5 Conclusão

A partir de uma abordagem quantitativa e qualitativa, ausente até o momento na literatura de RSSF, foi elaborada a primeira geração de modelos de baterias alcalinas e de íons de lítio para RSSF baseados no método de sistema de escrituração que, além da clássica contagem de Coulomb, também incorporam a taxa de descarga, a retenção de capacidade e o efeito de relaxação. Além desses efeitos, os modelos elaborados para as baterias de íons de lítio também incorporam o efeito da vida de ciclo e da eficiência de recarga. Esses modelos são a chave para habilitação bem sucedida da CODE em nós sensores alimentados por baterias alcalinas (sem a capacidade de captura de energia do ambiente) e RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente.

Os resultados de validação mostraram que o MCBA teve erro médio máximo inferior a 2%, enquanto que no modelo utilizado no Castália o erro foi superior a 21%. Tendo em vista que as aplicações reais de RSSF operam com *c.t.* abaixo de 5%, os resultados, neste caso, demonstraram que o MCBA teve um erro médio máximo inferior a 0,6%, muito inferior ao erro do modelo do Castália, que foi superior a 18%.

Ainda considerando o contexto de aplicações reais de RSSF, os resultados de validação também demonstraram que o MCBIL teve erro médio máximo inferior a 3,6% (*c.t.* de 5%), que foi inferior ao erro do modelo do Castália (10%) e dos modelos analíticos encontrados na literatura (5%). Apesar deste bom desempenho, os resultados para os demais *c.t.*'s, embora um pouco

acima (maior diferença inferior a 0,75%), foram similares aos resultados do modelo do Castália. Portanto, novos experimentos serão realizados nos trabalhos futuros para melhor identificação do ocorrido.

Apesar de não terem a exatidão dos modelos eletroquímicos, que apresentam erro próximo de zero, o MCBA e o MCBIL são muito mais eficientes computacionalmente e energeticamente, pois não apresentam a dificuldade de obtenção, configuração e cálculos complexos da grande quantidade de parâmetros físicos e eletroquímicos (mais de 50), indispensáveis para implementação de tais modelos.

Capítulo 4

Modelagem e Projeto de um Módulo de Captura de Energia Solar Simples e de Baixo Custo, com RPMP e CODE

Este capítulo tem por objetivo apresentar a modelagem e o projeto de um módulo de captura de energia solar simples e de baixo custo, com RPMP e CODE. Na modelagem serão elaborados modelos de cada um dos dispositivos que compõem o módulo de captura de energia solar: mini-painel solar, supercapacitores e bateria recarregável, que já foi modelada no capítulo anterior. O principal objetivo é o desenvolvimento de modelos práticos, que se aproximem do comportamento real de tais dispositivos. Na etapa de projeto

o principal objetivo será o desenvolvimento de uma solução, quanto comparada à literatura, simples e barata e que possa rastrear o ponto de máxima potência (RPMP) e prover a informação da quantidade de energia disponível (CODE) das múltiplas fontes de energia.

4.1 Caracterização de Mini-Painéis Solares para RSSF

Conforme explicitado no capítulo 2, a relação corrente-tensão do circuito da Fig. 2.21, dada pela Eq. 2.9, foi deduzida considerando-se a temperatura das células e a radiação solar fixas, o que não se aplicaria às aplicações reais de RSSF. Outro problema é que os componentes que compõem o circuito também dependem da temperatura das células e da radiação solar, além de vários outros parâmetros. Em função dessa complexidade do modelo do mini-painel solar e das limitações computacionais e energéticas das RSSF, foi elaborada uma nova abordagem para a caracterização do mini-painel solar, de modo a simplificar o gerenciamento de energia do sistema e o rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP) do mini-painel solar. Essa abordagem consiste na simplificação do modelo, visto que o modelo proposto na literatura não se aplica às aplicações típicas de RSSF (temperatura e radiação solar variáveis), apresentada na Equação 4.1.

$$I_{\text{painel}} \approx I_L. \quad (4.1)$$

Este resultado indica que a medição da corrente do mini-painel solar (I_{painel}) é uma alternativa aos cálculos complexos apresentados no capítulo 2. Para melhor indicar o desempenho do mini-painel solar ao longo de sua vida útil, será utilizada a eficiência de corrente (η_i), conforme mostrado na

Equação 4.2.

$$\eta_i = \frac{I_{p\grave{a}nel}}{I_{SC}}. \quad (4.2)$$

Quando η_i se aproximar de 1, a corrente fornecida pelo mini-painel estará próxima à corrente de curto-circuito (I_{SC}). Como a fonte de corrente do mini-painel solar (I_L) é dependente da intensidade da luz solar, isto quer dizer, indiretamente, que há uma alta intensidade de luz solar incidindo sobre o mini-painel solar no momento da medição.

A Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI), proposta adiante, tem como solução de modelagem do mini-painel solar a medição da corrente do mini-painel solar e o cálculo da eficiência de corrente (η_i), de modo a prover a CODE e o rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP) do mini-painel solar.

4.2 Caracterização de Supercapacitores para RSSF

Antes do processo de caracterização propriamente dito, deve-se executar a adequada especificação dos supercapacitores que serão utilizados nos experimentos e no projeto do módulo de captura de energia solar. Para que a especificação se adeque às características de aplicações típicas de RSSF, os seguintes dados devem ser considerados: ciclo de trabalho (c.t.) típico para RSSF de 1%, corrente do nó sensor no modo ativo de 20 mA e no modo “dormindo” de 5 μ A. Portanto, a corrente média do nó sensor é de $0,01 \times 20 \text{ mA} + 0,99 \times 5 \mu\text{A} = 0,205 \text{ mA}$. Além disso, a tensão de operação do nó sensor é de 3,6 V e os supercapacitores terão que fornecer energia ao nó sensor por 10 horas (período

estimado por dia, sem incidência de luz solar). Preenchendo a planilha de cálculo fornecida pelo fabricante [PowerStor, 2008a] com esses dados e utilizando a estimativa de corrente de fuga fornecida em [Jiang et al., 2005], serão necessários dois supercapacitores de 22 F / 2,5 V, ligados em série, de modo que possam fornecer a tensão de 3,6 V e minimizar a corrente de fuga.

Foram escolhidos os supercapacitores de aerogel de carbono da PowerStor [PowerStor, 2008b], que apresentam alta densidade de energia, 100 vezes maior que a densidade de capacitores eletrolíticos comuns, e alta densidade de potência, 10 a 100 vezes maior que a densidade de baterias [PowerStor, 2008b]. Também possuem outras características, tais como baixa resistência série equivalente (ESR, em inglês); corrente de fuga extremamente baixa, quando comparadas aos supercapacitores de carbono ativado; ampla faixa de temperatura de operação; e podem ser recarregados centenas de milhares de vezes.

A Fig. 4.1 mostra a carga e descarga de um supercapacitor de aerogel de carbono de 22 F. Ele foi carregado até a sua tensão nominal de 2,5 V com uma corrente constante de 1 A e, depois de um certo intervalo de tempo mantido desconectado da fonte de corrente, descarregado com a mesma magnitude de corrente constante.

Pode-se observar na Fig. 4.1 que logo depois de ser desconectado da fonte de corrente, o supercapacitor começou a exibir uma diminuição de sua tensão. Essa diminuição de tensão não pode ser explicada pela corrente de fuga, tendo em vista que seu valor é de algumas dezenas de microampères, ou seja, extremamente baixa. A única explicação é um processo interno de redistribuição de carga entre diferentes capacitores internos equivalentes, que também foi observado por Zubieta [Zubieta Bonert, 1998].

Contudo, a solução proposta por Zubieta [Zubieta Bonert, 1998] tinha como foco o uso em sistemas de *back-up* de energia, onde os supercapacitores

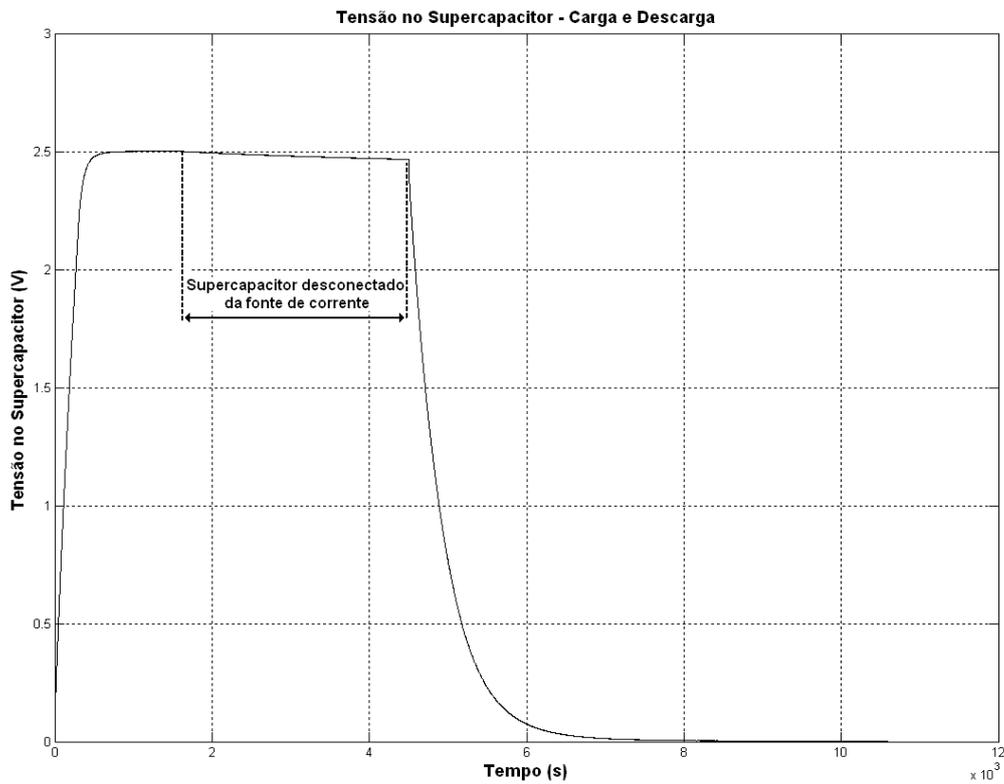


Figura 4.1: Carga e descarga de supercapacitor de 22 F com corrente constante de 1 A.

seriam responsáveis em manter a carga durante 30 minutos ininterruptos, na ausência da rede elétrica. Por outro lado, em aplicações de RSSF, os supercapacitores poderão suprir energia para o nó sensor desde alguns minutos até várias horas (todo o período da noite). No entanto, devido aos baixos ciclos de trabalho utilizados em RSSF, independentemente do período total de fornecimento de energia, os nós sensores que compõem a rede somente ligarão durante intervalos de tempos da ordem de segundos ou milisegundos (t_{on}) e, portanto, permanecerão “dormindo” a maior parte do tempo. De acordo com o modelo de Zubietta, o ramo RC que domina o comportamento do supercapacitor na faixa de tempo de segundos, em resposta à uma ação de

carga, é o ramo imediato. Desse modo, pode-se simplificar o modelo proposto por Zubieta para utilização em RSSF. Portanto, a modelagem dos supercapacitores consistirá em utilizar um modelo mais simplificado, mas que contenha apenas o ramo imediato, composto pelos elementos R_i , C_{i0} e o capacitor dependente da tensão C_{i1} (em F/V), de modo a simplificar a implementação da CODE. O modelo simplificado é ilustrado na Fig. 4.2.

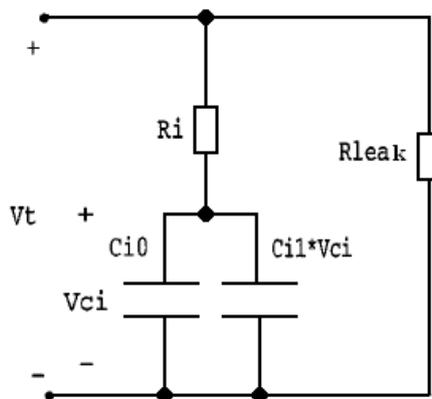


Figura 4.2: Modelo simplificado para os supercapacitores de aerogel de carbono para aplicações de RSSF.

Os experimentos para a obtenção dos parâmetros do circuito da Fig. 4.2 foram realizados com 11 (onze) supercapacitores de aerogel de carbono novos e seguiram os procedimentos de cálculos e medição adotados em Zubieta [Zubieta Bonert, 1998]. Cada um dos supercapacitores foi carregado com uma fonte de corrente de 1 A até sua tensão máxima de operação (2,5 V), conforme ilustrado na Fig. 4.3.

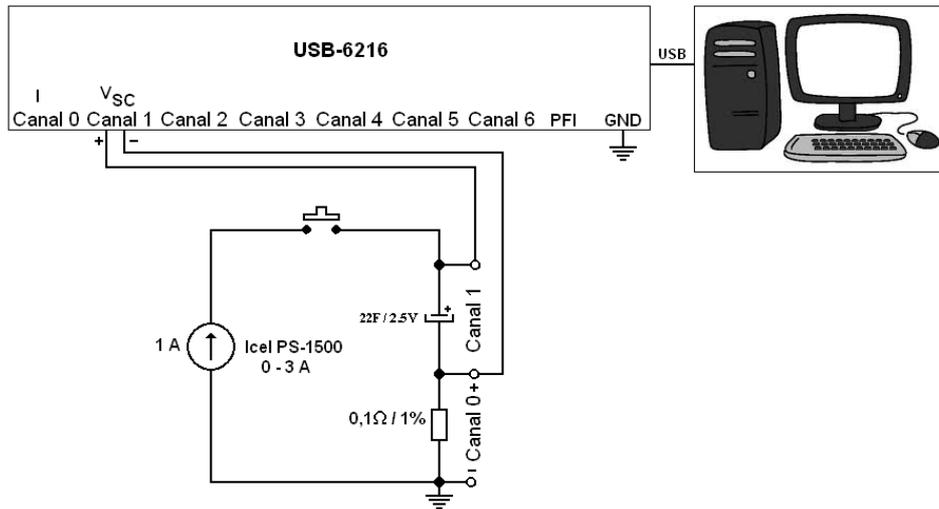


Figura 4.3: Circuito de carga do supercapacitor sob teste.

Ao atingir 2,5 V a fonte de corrente era desconectada. Para a aquisição de medidas, também foi utilizada a placa de aquisição NI USB-6216 e o software LabView SignalExpress 2009, que foram programados para coletar 100 amostras por segundo da tensão e da corrente do supercapacitor sob teste. Esses procedimentos de medição foram realizados para cada um dos supercapacitores utilizados no experimento. As Figs. 4.4 e 4.5 mostram os gráficos de tensão e corrente de um dos supercapacitores sob teste.

Como a constante de tempo do ramo imediato é considerada pequena (na faixa de tempo de segundos), quando comparada com as constantes de tempo dos outros dois ramos mostrados no circuito equivalente da Fig. 2.23, será considerado que toda a carga é inicialmente armazenada no ramo imediato.

O valor da resistência interna do ramo imediato (R_i) é calculada através da relação entre a tensão correspondente à variação de 0 V a uma tensão V_1 , quando a fonte de corrente é ligada e a sua corrente varia de 0 a 1 A, conforme mostrado na Equação 4.3 [Zubieta Bonert, 1998]. O tempo que a

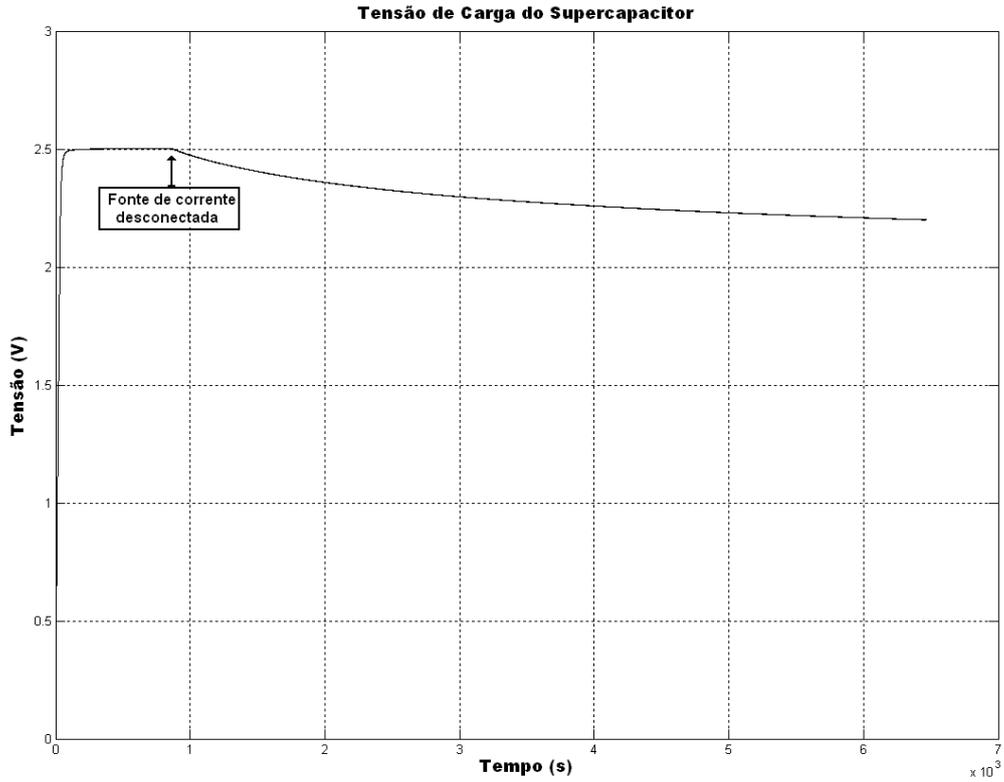


Figura 4.4: Tensão de carga do supercapacitor sob teste.

corrente leva para ir de 0 A a 1 A tem seu valor considerado inferior a 20 ms (t_1). Depois do tempo t_1 , a tensão sobre o supercapacitor é determinada pela queda de tensão em R_i .

$$R_i = \frac{V_1}{I}. \quad (4.3)$$

Logo depois que a fonte de corrente é ligada, a tensão V_{ci} é aproximadamente zero. Portanto, o valor de C_{i0} pode ser encontrado por meio da Equação 4.4 [Zubieta Bonert, 1998].

$$C_{i0} = I \times \frac{\Delta t}{\Delta V}, \quad (4.4)$$

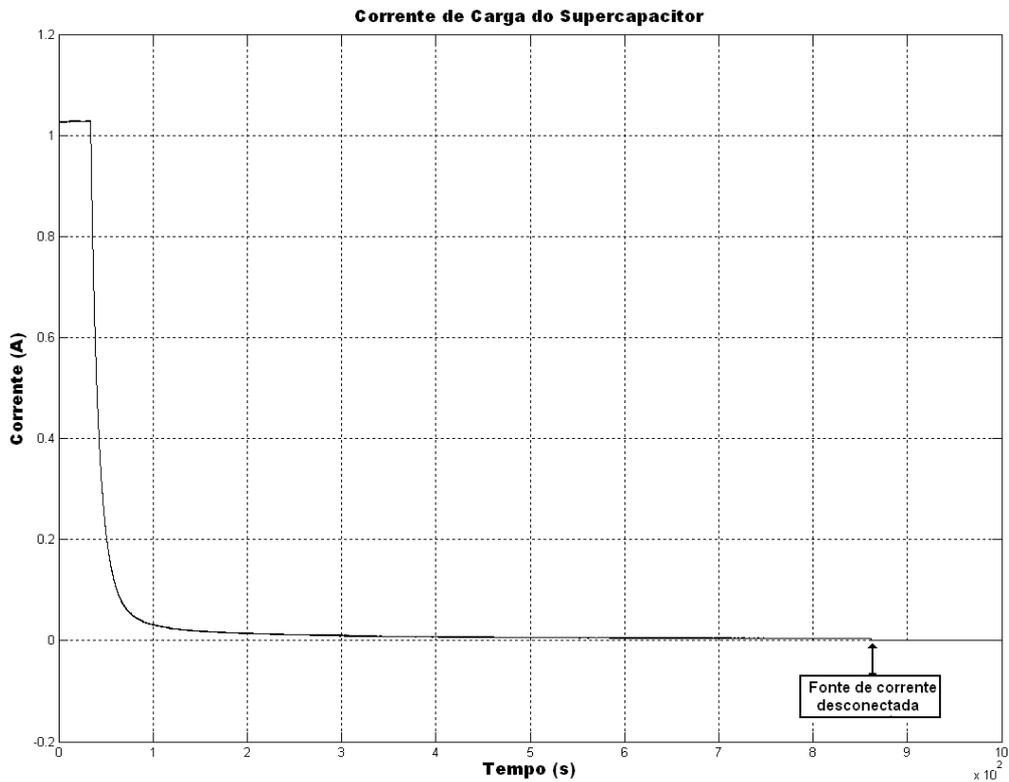


Figura 4.5: Corrente de carga do supercapacitor sob teste.

Quando a tensão do supercapacitor atinge 2,5 V, a fonte de corrente é desconectada. O tempo que a corrente leva para ir de 1 A a 0 A tem seu valor considerado inferior a 20 ms (t_2). A carga total fornecida ao supercapacitor (Q_{tot}) é:

$$Q_{tot} = I \times (t_2 - t_1); Q_{tot} = C_q \times V_2 \therefore C_q = \frac{I \times (t_2 - t_1)}{V_2}, \quad (4.5)$$

onde V_2 é a tensão medida no supercapacitor logo depois de t_2 e C_q é a capacitância equivalente dada pela Equação 4.6 [Zubieta Bonert, 1998].

$$C_q = C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V_2. \quad (4.6)$$

Rearranjando a Equação 4.6 e substituindo o valor de C_q (Equação 4.5), o valor de C_{i1} será dado pela Equação 4.7 [Zubieta Bonert, 1998].

$$C_{i1} = \frac{2}{V_2} \times \left(\frac{I \times (t_2 - t_1)}{V_2} - C_{i0} \right), \quad (4.7)$$

Conforme descrito em Zubieta [Zubieta Bonert, 1998], a resistência de fuga (R_{leak}) é determinada pela medição da tensão sobre o supercapacitor em um período de 24 horas. Depois que os supercapacitores utilizados nos experimentos foram desconectados da fonte de corrente e, transcorrido um tempo suficiente para a tensão em cada um deles cair para aproximadamente 2 V, foi utilizada novamente a placa de aquisição NI USB-6216 e o software Lab-View SignalExpress 2009, que foram programados para coletar 10 amostras por segundo da tensão dos supercapacitores sob teste. Essa normalização em 2 V é necessária para garantir que todas as capacitâncias do modelo estejam carregadas com o mesmo nível de tensão e a diminuição de tensão em função do tempo possa ser atribuída, exclusivamente, à resistência de fuga. O valor de R_{leak} pode ser determinado pela Equação 4.8 [Zubieta Bonert, 1998].

$$R_{leak} = \frac{V_O \times \Delta t}{\Delta V_c \times C_q}, \quad (4.8)$$

onde V_O é 2 V, Δt é igual a 24 horas e ΔV_c é a variação de tensão após 24 horas.

A Tabela 4.1 apresenta os valores dos parâmetros calculados a partir dos dados obtidos nos experimentos dos supercapacitores sob teste. Em função da quantidade limitada de supercapacitores disponíveis para os experimentos e tendo em vista que, após a utilização, os supercapacitores devem permanecer se descarregando durante, pelo menos, 15 dias e, somente depois desse prazo, eles poderiam ser utilizados novamente para a obtenção da resistência de

fuga (R_{leak}), foram realizados seis experimentos para a sua obtenção.

Parâmetro:	C_{i0} (F)	C_{i1} (F/V)	R_i (m Ω)	R_{leak} (k Ω)
Supercapacitor 1	11,7	7,7	53,2	42,7
Supercapacitor 2	11,7	7,4	55,3	43,8
Supercapacitor 3	10,9	6,6	49,5	35,9
Supercapacitor 4	11,1	6,4	52,3	39,0
Supercapacitor 5	11,1	6,3	60,6	49,8
Supercapacitor 6	11,9	7,8	68,9	42,5
Supercapacitor 7	11,3	6,4	59,3	-
Supercapacitor 8	10,9	6,7	62,1	-
Supercapacitor 9	11,3	6,3	54,1	-
Supercapacitor 10	11,2	7,8	52,9	-
Supercapacitor 11	14,7	3,8	54,9	-
Média	11,6	6,6	56,6	39,7

Tabela 4.1: Valores dos parâmetros calculados a partir dos dados obtidos nos experimentos dos supercapacitores sob teste.

Considerando-se que $R_i \ll R_L$ e que $R_{leak} \gg R_L$, o impacto dessas resistências será considerado desprezível. Portanto, a Equação da tensão do supercapacitor (v_c) para o modelo simplificado, que será denominado de **Modelo Comportamental do Supercapacitor (MCS)**, da Fig. 4.2 é:

$$v_c = V \times e^{\frac{-t}{R_L \times C_q}}, \quad (4.9)$$

onde C_q é a capacitância equivalente dada pela Equação 4.6.

Substituindo C_q na Equação 4.9, temos:

$$v_c = V \times e^{\frac{-t}{R_L \times (C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V)}}, \quad (4.10)$$

onde V é a tensão do supercapacitor completamente carregado.

Como base de comparação e análise, os parâmetros também foram calculados de acordo com as notas de aplicação e as instruções do fabricante dos supercapacitores [PowerStor, 2009]. A principal diferença é o fato de o fabricante considerar uma única capacitância. Portanto, para o cálculo dos parâmetros de acordo com o fabricante, as equações são as mesmas apresentadas anteriormente. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros. No caso da resistência de fuga (R_{leak}), foram realizados seis experimentos para a sua obtenção.

Parâmetro:	C(F)	R_i (m Ω)	R_{leak} (k Ω)
Supercapacitor 1	18,75	53,2	38,2
Supercapacitor 2	18,75	55,3	38,2
Supercapacitor 3	17,44	49,5	38,8
Supercapacitor 4	17,35	52,3	37,6
Supercapacitor 5	17,30	60,6	37,1
Supercapacitor 6	19,30	68,9	31,6
Supercapacitor 7	17,72	59,3	-
Supercapacitor 8	17,45	62,1	-
Supercapacitor 9	17,84	54,1	-
Supercapacitor 10	17,93	52,9	-
Supercapacitor 11	18,66	54,9	-
Média	18,04	56,6	36,9

Tabela 4.2: Valores dos parâmetros calculados, conforme instruções do fabricante, a partir dos dados obtidos nos experimentos dos supercapacitores sob teste.

Assim como no modelo da Fig. 4.2, o impacto das resistências R_i e R_{leak} também será considerado desprezível. Consequentemente, a Equação

da tensão do supercapacitor (v_c) para o modelo RC simples (RCS) é:

$$v_c = V \times e^{\frac{-t}{R_L \times C}}. \quad (4.11)$$

4.2.1 Validação do Modelo Comportamental do Supercapacitor (MCS)

Para a validação do modelo proposto e verificação dos parâmetros obtidos, o MCS e o modelo atualmente utilizado na literatura (modelo RCS) serão comparados com os dados experimentais obtidos. Com este intuito, um supercapacitor foi carregado até 2,5 V e, em seguida, descarregado com uma carga resistiva de 150 Ω , conforme ilustrado na Fig 4.6.

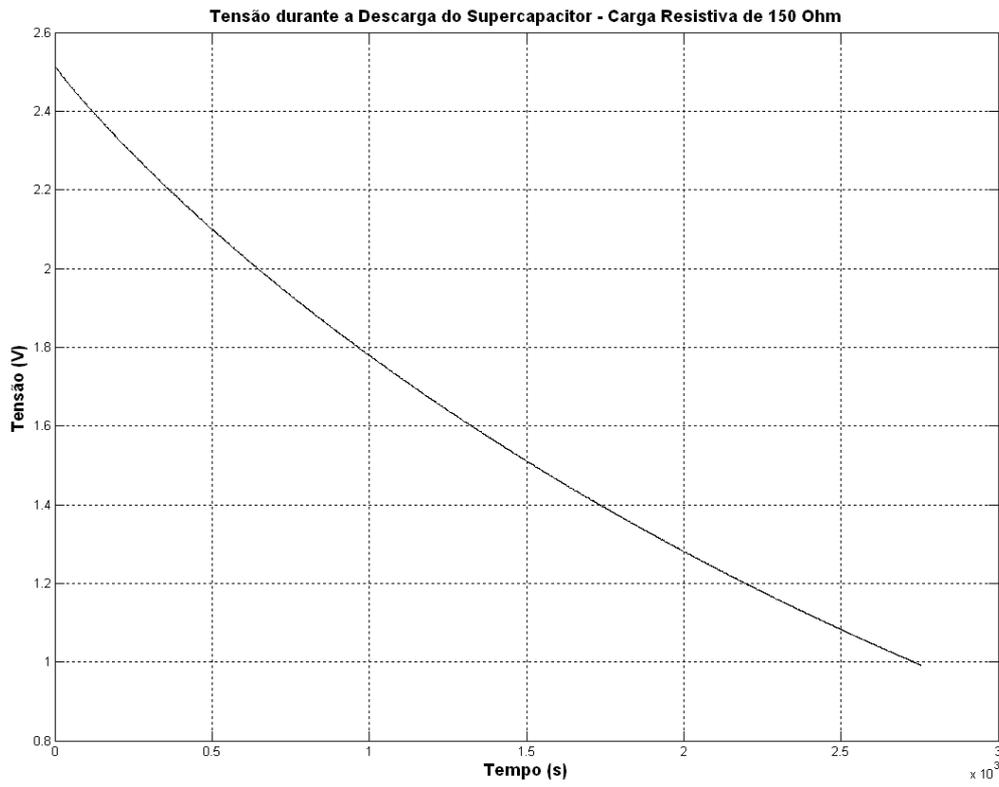


Figura 4.6: tensão de descarga do supercapacitor com carga resistiva de 150 Ω .

Com os dados experimentais e as Equações 4.10 e 4.11, foi traçado o gráfico ilustrado na Fig. 4.7.

Conforme pode ser observado, o modelo simplificado (MCS) foi o que mais se aproximou dos dados experimentais, demonstrando que a aplicação do modelo RC simples e, principalmente, da fórmula clássica $E_{cap} = \frac{1}{2} \times C \times V^2$, para a modelagem de supercapacitores não é apropriada e pode resultar em erros significativos da estimação de energia desses dispositivos. De acordo com os resultados, o MCS apresentou erro máximo inferior a 0,5%, muito inferior ao erro do modelo RC simples, que foi de 4,8%. Portanto, todos os trabalhos encontrados na literatura [Merrett et al., 2008, Renner et al., 2009]

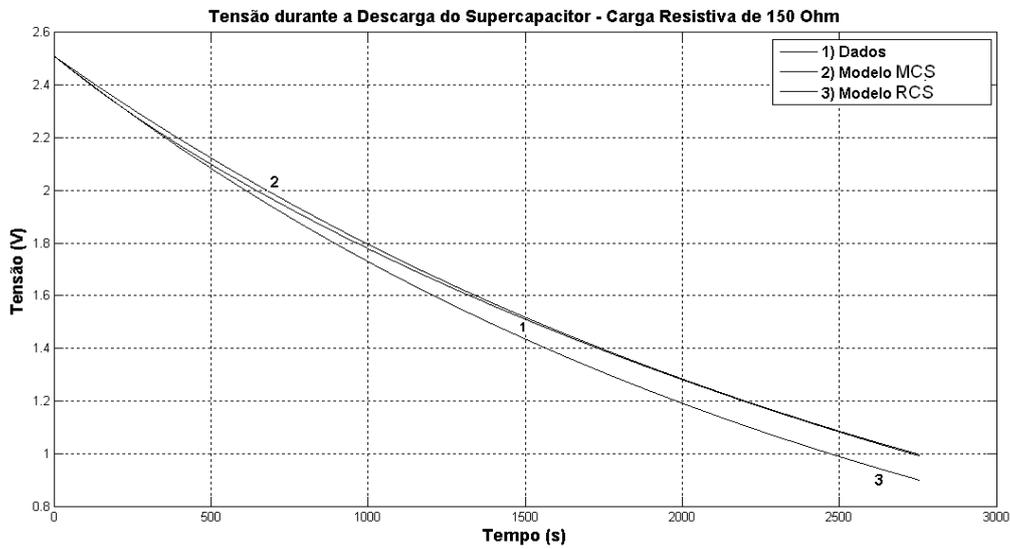


Figura 4.7: Curvas obtidas com os dados experimentais e as Equações dos modelos MCS e RCS, para a descarga do supercapacitor com carga resistiva de 150Ω .

que utilizaram como base a fórmula clássica de energia, devem ser revisados.

Para a implementação da CODE, o parâmetro importante é o intervalo de tempo (t) que o supercapacitor é capaz de manter a carga (nó sensor) durante os momentos de indisponibilidade de luz solar, principalmente durante o período da noite. Rearranjando a Equação 4.10 para isolar o termo (t), temos:

$$t = -R_L \times \left(C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V \right) \times \ln \frac{v_c}{V}. \quad (4.12)$$

A Equação 4.12 considera somente o intervalo de tempo no qual o nó sensor está ligado (t_{on}), sendo necessário também incluir o intervalo de tempo no qual o nó sensor está “dormindo”. Para determinar o tempo total que o nó sensor ficará “dormindo”, é preciso determinar o número total de períodos, conforme a Equação 4.13.

$$n_T = \frac{-R_L \times (C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V) \times \ln \frac{v_c}{V}}{t_{on}}. \quad (4.13)$$

Na verdade, o valor de n_T representa o número total de t_{on} 's, que também pode ser utilizado para indicar o número total de períodos (T). Considerando-se que a corrente de fuga dos supercapacitores é desprezível, o tempo de serviço total (em minutos) para o nó sensor é:

$$t_{tot} = \frac{1}{60} \times [-R_L \times (C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V) \times \ln \frac{v_c}{V} + n_T \times t_{off}]. \quad (4.14)$$

Como o numerador da Equação 4.13 é idêntico ao valor de t da Equação 4.12, a Equação 4.14 pode ser reescrita colocando-se esse termo em evidência, conforme Equação 4.15.

$$t_{tot} = \frac{1}{60} \times [-R_L \times (C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V) \times \ln \frac{v_c}{V}] \times (\frac{t_{on} + t_{off}}{t_{on}}). \quad (4.15)$$

Contudo, o termo $\frac{t_{on} + t_{off}}{t_{on}}$ equivale a $\frac{1}{c.t.}$, de modo que a Equação 4.15 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$t_{tot} = \frac{1}{60} \times \frac{[-R_L \times (C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V) \times \ln \frac{v_c}{V}]}{c.t.}. \quad (4.16)$$

Considerando-se que a tensão final de operação do nó sensor seja de 1,8 V e que a tensão inicial do supercapacitor seja de 5 V, o tempo de serviço residual (em minutos) será dado pela Equação 4.17.

$$t_{sr} = \frac{50,7}{c.t.} - \frac{1}{60} \times \frac{[-R_L \times (C_{i0} + \frac{C_{i1}}{2} \times V) \times \ln \frac{v_c}{V}]}{c.t.}. \quad (4.17)$$

A Equação 4.17 é a primeira geração de modelo de supercapacitores para

RSSF, que leva em conta os parâmetros apropriados para sua modelagem. Esse modelo viabilizará a obtenção de resultados mais próximos do real na simulação de aplicações de RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente. Os resultados mostraram que o erro máximo do MCS foi inferior a 0,5%, enquanto que o erro do modelo RC simples foi superior a 4,5%. Além disso, o modelo considerou que, tanto a corrente de fuga dos supercapacitores quanto a corrente de fuga do nó sensor eram desprezíveis. Caso elas não sejam desprezíveis, as futuras gerações do modelo deverão ser revisadas e atualizadas.

4.3 Caracterização do Sistema Composto pelo Mini-painel Solar e os Supercapacitores

Antes de apresentar a solução completa em hardware para a Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI), é necessário executar a caracterização do sistema composto pelo mini-painel solar e supercapacitores, de modo a otimizar o uso das múltiplas fontes de energia disponíveis. Os resultados demonstram que, além de proteger os dispositivos de armazenamento primário e/ou secundário, também é possível implementar uma abordagem energeticamente eficiente, que habilita o nó sensor a receber energia de três fontes possíveis: supercapacitores, bateria de *back-up* e o mini-painel solar. A questão chave para obter tais resultados consiste em implementar um agente de gerenciamento de energia que, simultaneamente, garanta o estabelecimento de um ponto de operação ótimo para o mini-painel e preserve a integridade dos dispositivos de armazenamento.

4.3.1 Solução de Hardware Proposta e Implementação

O circuito da Fig. 4.8 apresenta a implementação em hardware para a realização do experimento de caracterização do sistema composto pelo mini-painel solar e os supercapacitores, teste e validação do agente de gerenciamento de energia.

No meio do diagrama existe um resistor de 100Ω conectado a um amperímetro utilizado para emular a recarga da bateria, mas que também pode ser utilizado para emular um aumento de consumo de energia ocasionado, por exemplo, pelo aumento da potência de transmissão. Para emular o nó sensor, um outro resistor, localizado do lado direito do diagrama, é conectado a um transistor bipolar que fornece um chaveamento liga-desliga desse resis-

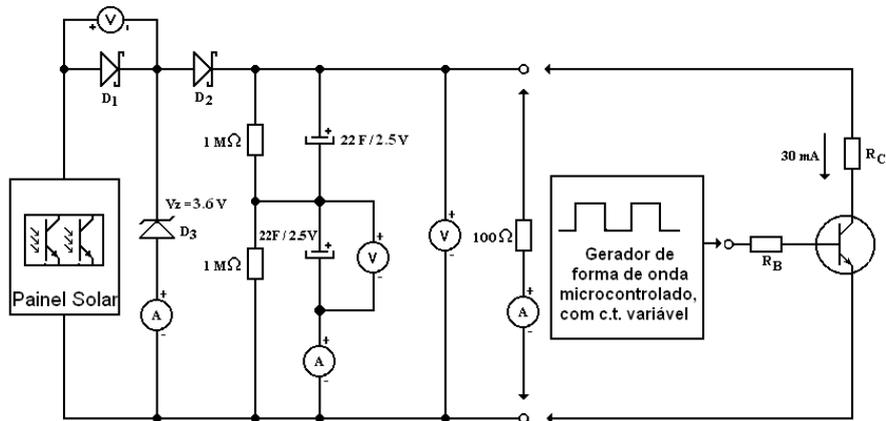


Figura 4.8: Diagrama elétrico da implementação em hardware.

tor. A base do transistor é conectada a um microcontrolador, que sintetiza uma onda quadrada para criar um ciclo de trabalho programável.

Do lado esquerdo do diagrama, estão localizados o mini-painel solar e os supercapacitores e, entre eles, estão os componentes utilizados para configurar o ponto de operação do mini-painel solar. Os supercapacitores estão conectados em paralelo aos resistores de $1\text{ M}\Omega$ e esses dois em paralelo com a saída do mini-painel solar. Esses resistores agem como um divisor de tensão, reduzindo a tensão admissível sobre cada supercapacitor (supercap). Eles também equalizam a tensão sobre cada supercap, visto que eles podem ter diferentes capacitâncias e a tensão sobre cada um deles não pode exceder a tensão de operação (2,5 V). Esse procedimento é necessário, pois esses supercaps exibem capacitâncias com tolerância de $\pm 20\%$. Para evitar a degradação, devido à passagem de corrente reversa pelo mini-painel solar, um diodo *schottky* (D_1), com queda de tensão direta de 0,25 V, é usado em série com o mini-painel. Para configurar o ponto ótimo de operação do mini-painel, garantindo eficiência de energia e tempo de vida, um diodo zener (D_3) de 3,6 V é utilizado e se torna um elemento chave nesse circuito.

Sob condições críticas de operação, tais como um dia nublado, os supercaps fornecem energia ao nó sensor. O diodo *schottky* (D_2) evita que o diodo zener atue como carga para os supercaps e desvie corrente do nó sensor. Apesar do consumo de energia no diodo zener, será mostrado que esse consumo é compensado pela autenticidade da abordagem proposta. Dada as limitações de compatibilidade das especificações de tensão entre o mini-painel solar e os supercaps, o diodo zener e os resistores de equalização, de uma maneira autônoma e livre de controle de software, garantem que a tensão de operação de cada um dos supercaps nunca será excedida. Dito de outra forma, eles representam o agente de gerenciamento de energia proposto.

4.3.2 Resultados e Discussão

A fim de verificar o comportamento e caracterizar o sistema mini-painel/supercapacitores, vários experimentos foram realizados. No primeiro experimento o circuito foi montado sem os diodos D_3 e D_2 , e sem carga. Portanto, sem qualquer tipo de regulação de tensão. A Fig. 4.9 mostra os valores medidos de tensão e corrente nos supercapacitores.

Estes resultados demonstram a ineficiência dos supercapacitores em estabelecer o ponto ótimo de operação do sistema. Além disso, pode-se observar os altos riscos de degradação dos supercapacitores, pois enquanto havia incidência de luz solar sobre o mini-painel solar, eles estavam sendo continuamente carregados e, conseqüentemente, a tensão total sobre eles ultrapassou o limiar de tensão de operação (5 V). Neste momento o experimento foi interrompido. As especificações e as curvas de teste do mini-painel, que constam no manual do fabricante, indicam que a sua tensão nominal é de 6,7 V. Assim, os supercapacitores se carregariam até esse valor de tensão, momento em que a corrente chegaria a zero e o processo de carga pararia. Contudo, nesse nível

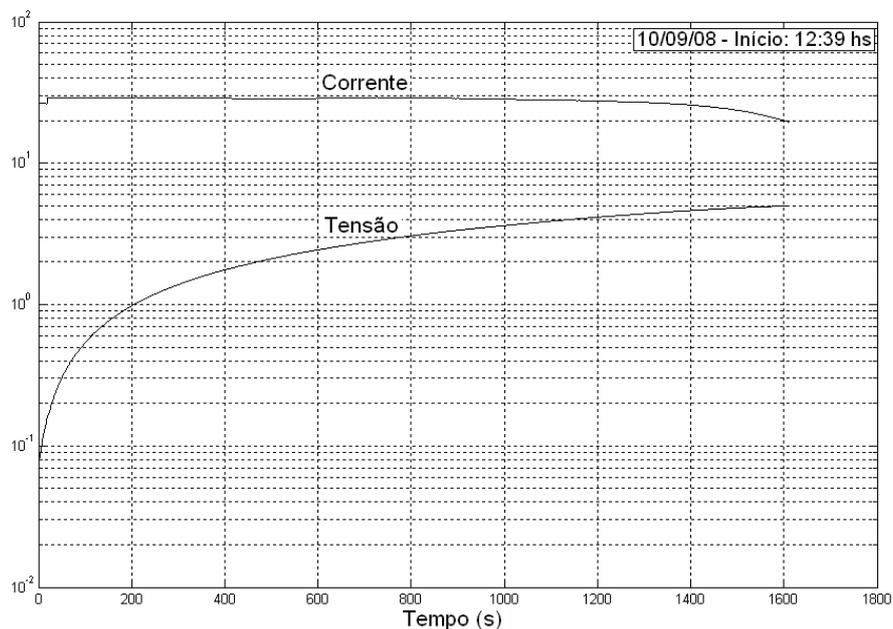


Figura 4.9: Curva V-I para a carga dos supercapacitores sem regulação de tensão.

de tensão os supercapacitores rapidamente se degradariam ou poderiam até mesmo explodir.

No segundo experimento o diodo zener (D_3) foi conectado ao circuito, mas a carga ainda permaneceu desconectada. A fim de verificar o desempenho da solução de hardware proposta sob diferentes níveis de intensidade de luz solar, uma lâmpada de 100 W, com distância ajustável em relação ao mini-painel, foi utilizada. A lâmpada foi posicionada em diferentes distâncias de modo a fornecer correntes que variam com passos de 5 mA, iniciando com 5 mA e finalizando com 44 mA (limite máximo do mini-painel). Desta forma, foi possível obter as curvas características, conforme mostrado na Fig. 4.10.

Pode-se observar que, para cada valor de corrente ajustada, os supercapacitores são inicialmente carregados com toda a corrente fornecida pelo mini-painel. A partir de determinado nível de tensão, o diodo zener conduz e começa a desviar parte da corrente do supercapacitor, e até mesmo toda a

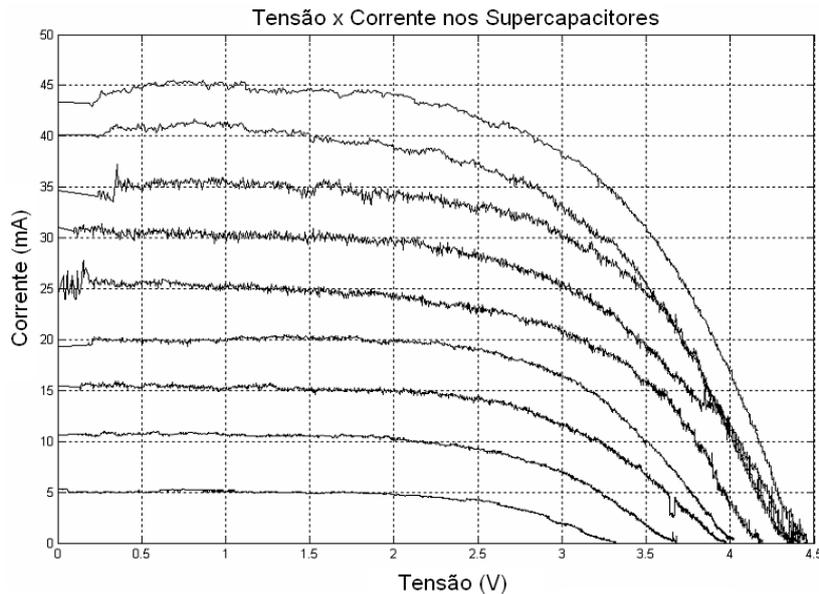


Figura 4.10: Curvas características do mini-painel com regulação de tensão.

corrente, quando a tensão sobre os supercapacitores for igual à tensão zener e não houver carga conectada ao sistema ou cargas com ciclos de trabalho muito reduzidos. Uma vez que esse experimento cobriu toda a faixa operacional do mini-painel, pode-se afirmar que a tensão sobre os supercapacitores jamais excederá o nível de 5 V. Melhor ainda, o ponto de operação sempre estará na faixa ótima de 3,3 V - 4,0 V (Fig. 2.22) e será ajustado automaticamente sem a intervenção da unidade de processamento do nó sensor.

No terceiro experimento, a lâmpada foi posicionada em uma distância de modo que o mini-painel fornecesse uma corrente média constante de 35 mA. Após a recarga dos supercapacitores, uma carga chaveada foi conectada ao sistema. Esta carga é composta por um transistor bipolar operando como chave, cuja a base é acionada por uma onda quadrada de ciclo de trabalho ajustável. Os seguintes ciclos de trabalho foram utilizados no experimento: 100%, 50%, 20%, 5% e 1%. Em todos eles o tempo ligado (t_{on}) foi configurado para 1 segundo. A Fig. 4.11 mostra o resultado para *c.t.* igual a 1%, valor

típico em aplicações de RSSF.

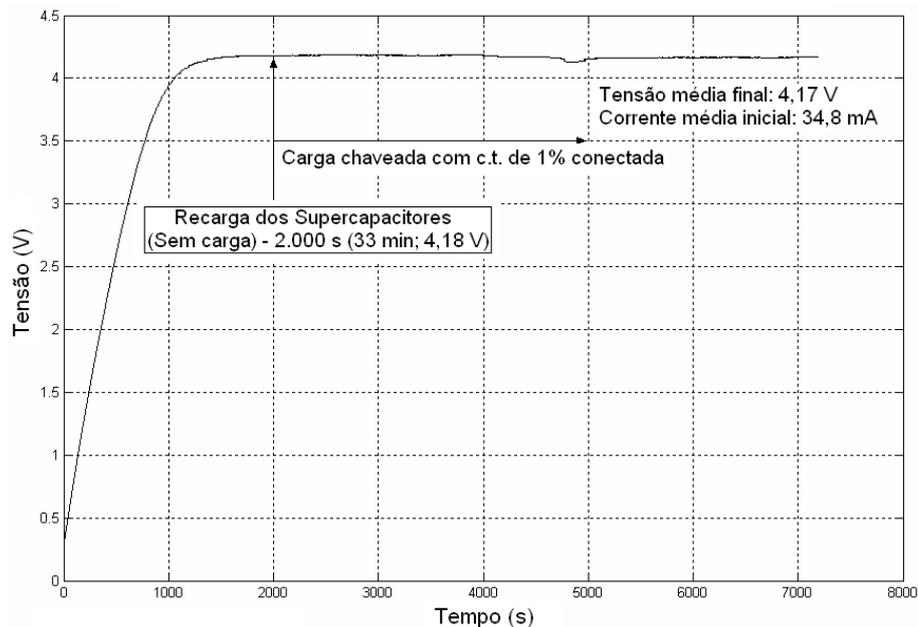


Figura 4.11: Tensão nos supercapacitores - carga chaveada com c.t. de 1%.

Nesse experimento, até tempo = 2.000 segundos a carga estava desconectada. Assim, os supercapacitores se carregaram até 4,18 V com uma corrente média de carga de 34,8 mA, fornecida pelo mini-painel. Quando a carga foi conectada ao sistema, após 2.000 segundos, a tensão sobre os supercapacitores se estabilizou em 4,17 V, em outras palavras, o mini-painel solar começou a operar autonomamente, provendo alimentação para a carga e mantendo a tensão dos supercapacitores. Contudo, para uma carga com *c.t.* de 1%, grande parte da corrente fornecida pelo mini-painel ($\simeq 30$ mA) foi desviada pelo diodo zener, mantendo a tensão dos supercapacitores abaixo do nível de tensão de operação (5 V). Embora essa energia capturada seja consumida, a operação adequada e, conseqüentemente, a integridade dos supercapacitores é preservada. Além disso, essa energia extra poderia ser utilizada para outras finalidades, tais como: recarga da bateria de *backup*, aumento

da potência de transmissão, aumento do *c.t.* do nó sensor ou para ajustar parâmetros que tornem possível a implementação de RSSF consciente de energia [Raghunathan et al., 2002] e forneçam dados para melhorar a análise e o planejamento de métricas de QoS em RSSF [Chen Varshney, 2004].

Os experimentos com ciclos de trabalho de 100%, 50%, 20% e 5% apresentaram resultados muito similares, com variações do nível de tensão final entre 4,13 V e 4,17 V.

Finalmente, o último experimento verificou o comportamento do sistema sob carga crítica, ou seja, uma carga composta por um fluxo de corrente constante, que emula uma recarga de bateria (obtida pela conexão de um resistor de 100 Ω ao sistema), e a uma carga chaveada com *c.t.* de 1% (que emula o nó sensor). Elas foram conectadas ao sistema depois que os supercapacitores estavam completamente carregados. A Fig. 4.12 apresenta os resultados.

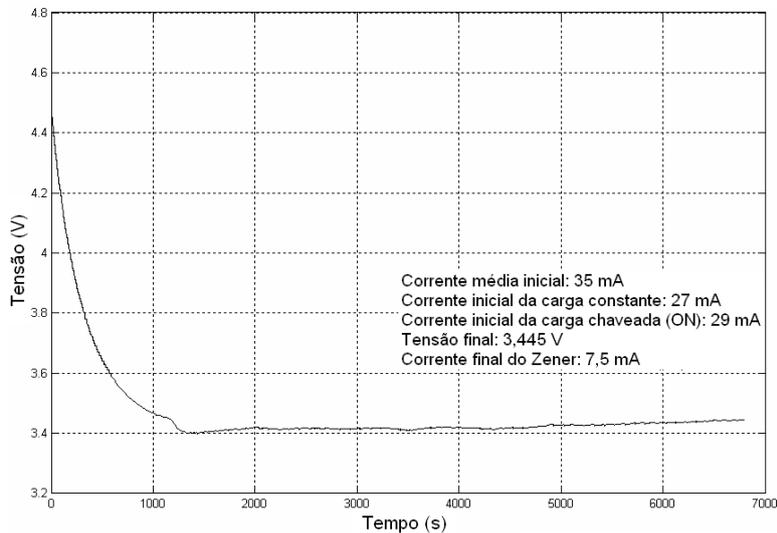


Figura 4.12: Tensão no supercapacitores - carga constante (resistor de 100 Ω) e carga chaveada com *c.t.* de 1% conectadas.

A tensão sobre os supercapacitores se estabilizou em aproximadamente

3,445 V, um nível ainda suficiente para alimentar as cargas. Inicialmente, a maior parte da corrente flui através do diodo zener (cargas não conectadas), mas quando as duas cargas (carga constante e carga chaveada com *c.t.* de 1%) são conectadas ao sistema, a corrente passa a fluir por elas, confirmando que é possível usar a energia extra obtida durante o período de alta incidência de luz solar para alimentar o nó sensor através da operação autônoma do mini-painel solar. De outra forma, enquanto houver energia solar incidindo sobre o mini-painel suficiente para alimentar, pelo menos, o nó sensor, a energia resultante é composta pelas seguintes componentes: energia fornecida pelo mini-painel solar, energia armazenada nos supercapacitores e energia armazenada na bateria de *backup*.

4.3.3 Conclusão

Apesar de todas as vantagens da solução apresentada acima, pode-se observar no gráfico da Fig. 4.12 que a corrente final do diodo zener (D_3) ficou em torno de 7,5 mA, que também poderia ser entregue à carga. Assim, para tornar o circuito mais eficiente do ponto de vista energético e habilitá-lo com o rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP), uma nova solução foi proposta.

4.3.4 Melhorando e Implementando uma Nova Solução de Hardware

A Fig. 4.13 ilustra a nova solução de hardware proposta. Os voltímetros, amperímetros e o sistema microcontrolado para geração de onda quadrada com ciclo de trabalho programável foram substituídos por uma placa de aquisição (DAQ), que foi conectada ao PC via USB. A placa de aquisição NI

USB-6216 [National, 2010] possui resolução de 16 bits e taxa de amostragem de 400 kSamples/s. Ela foi programada para coletar 10 amostras por segundo. A interface de função programável (PFI) foi configurada para gerar uma onda quadrada com ciclo de trabalho programável.

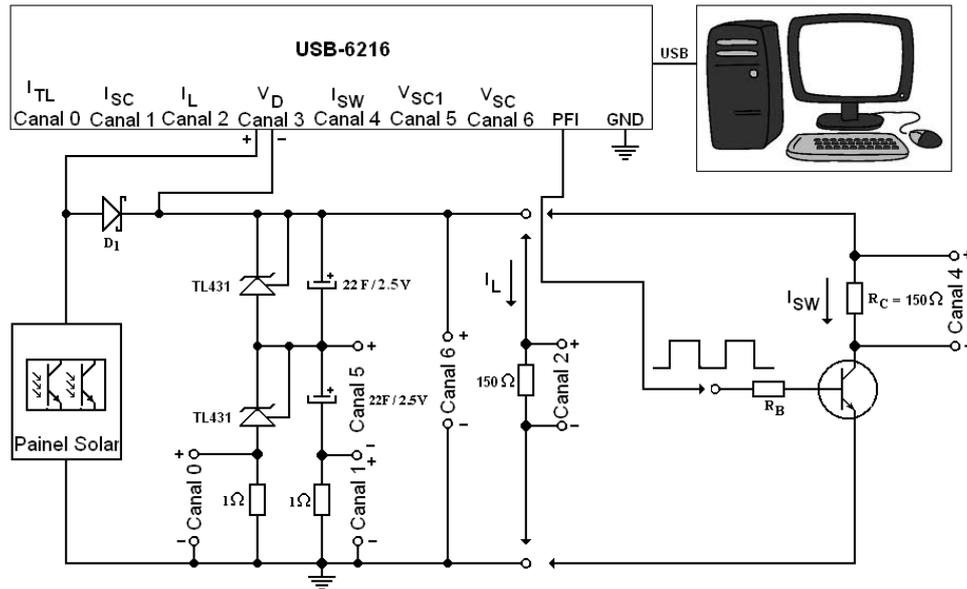


Figura 4.13: Diagrama elétrico da nova solução de hardware.

Os resistores de equalização de 1 MΩ, o diodo *schottky* (D_2) e o diodo zener (D_3) da Fig. 4.8 foram substituídos por dois TL431, que foram colocados em paralelo com os supercaps, conforme ilustrado na Fig. 4.13. O TL431 [Fairchild Semiconductor Corporation, 2009] é um circuito de tensão de referência programável, cuja tensão de saída pode ser programada entre 2,5 V e 36 V. Na configuração mostrada na Fig. 4.13, os TL431 conduzirão toda vez que a tensão em cada supercap atingir 2,5 V, desviando para eles toda a corrente que está fluindo pelos supercaps, caso nenhuma carga esteja ligada no momento. Dada as limitações de compatibilidade entre as especificações de tensão entre mini-painéis solares e supercaps, os TL431, de uma

maneira autônoma e livre de controle de software, garantem que a tensão dos supercaps jamais será excedida.

4.3.5 Resultados e Discussão

Nas mesmas condições experimentais da proposta anterior (primeiro experimento), as curvas características foram novamente obtidas, conforme ilustrado na Fig. 4.14.

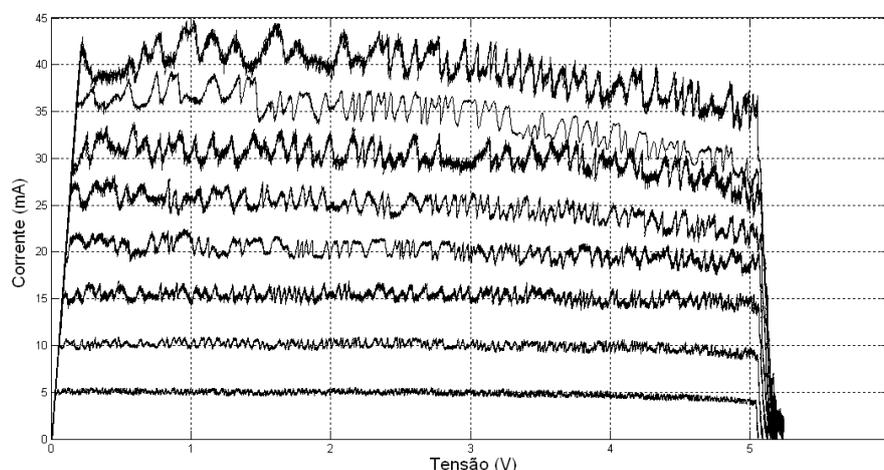


Figura 4.14: Curvas características do mini-painel com regulação de tensão.

Conforme pode ser observado, para cada corrente fornecida pelo mini-painel, os supercaps são carregados e os TL431 conduzem e começam a drenar parte da corrente dos supercaps, e até mesmo toda a corrente, quando a tensão em cada um deles for igual a 2,5 V (com uma tolerância admitida de 1%). Visto que esse experimento também cobriu toda a faixa de operação do mini-painel, pode-se afirmar que a tensão sobre os dois supercaps nunca excederá o nível de $5\text{ V} \pm 1\%$. Com os dados obtidos, pode-se calcular a potência entregue pelo mini-painel solar, conforme ilustrado na Fig. 4.15. A máxima potência para cada corrente fornecida também foi calculada para, posteriormente, a eficiência do sistema ser determinada.

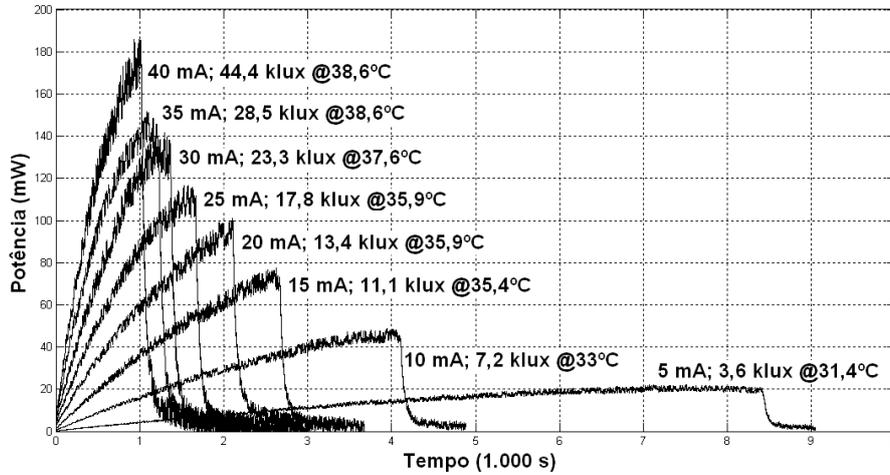


Figura 4.15: Potência do mini-painel solar e as respectivas correntes.

Além disso, de acordo com as curvas características, a máxima potência foi alcançada com a tensão sobre os supercaps em torno de 4,9 V. No segundo experimento, a fim de verificar o comportamento da solução sob condições críticas de carga, uma carga constante e uma carga chaveada com *c.t.* de 1% foram conectadas ao circuito, quando os supercaps já estavam completamente carregados (depois de 2.000 segundos). Em todos os experimentos realizados, o t_{on} da carga chaveada foi configurado para 1 segundo. Com um *c.t.* de apenas 1%, assim como no caso do diodo zener (D_3), grande parte da corrente fornecida pelo mini-painel foi drenada pelos TL431 para proteger os supercaps de sobretensão. Para demonstrar que é possível direcionar essa energia extra para a carga e, como ganho adicional, fazer com que o sistema opere próximo ao ponto de máxima potência (PMP), o resistor da carga constante, que foi conectado ao circuito, foi trocado para cada uma das correntes de teste, conforme a Tabela 4.3. Os valores foram obtidos pela Lei de Ohm, considerando-se o valor da tensão inicial de 4,9 V.

Para avaliar o desempenho da solução proposta, propõe-se a eficiência do processo de captura da energia solar (ζ), definida como a relação entre a

Corrente do Mini-Painel Solar (mA)	Carga Constante (Ω)
40	120
35	150
30	150
25	220
20	270
15	330
10	470
5	1.000

Tabela 4.3: Valor da carga constante para cada uma das correntes de teste.

potência entregue à carga (P_L) e a potência no PMP do mini-painel (P_{PMP}), conforme Equação 4.18.

$$\zeta = \frac{P_L}{P_{PMP}}, \quad (4.18)$$

onde P_{PMP} é a potência no PMP do mini-painel solar e P_L é a potência entregue à carga.

A Fig. 4.16 mostra os resultados. Para cada uma das correntes ajustadas, a tensão sobre os supercaps se estabilizou em um nível ainda suficiente para alimentar as cargas. Depois da estabilização da tensão, as respectivas potências foram determinadas. As correntes nos TL431 também foram verificadas e seus valores ficaram inferiores a $500 \mu\text{A}$.

Inicialmente, a maior parte da corrente flui pelos TL431 (antes de 2.000 segundos), mas quando a carga constante e a carga chaveada são conectadas, a corrente passa a fluir pelas cargas e apenas uma pequena corrente (inferior a $500 \mu\text{A}$) flui pelos TL431, confirmando que é possível utilizar a energia

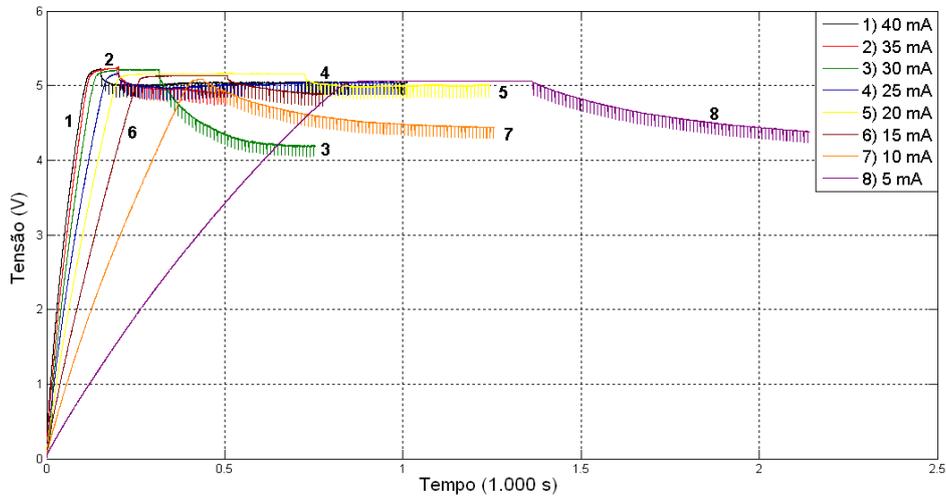


Figura 4.16: Tensão nos supercapacitores para as cargas constantes da Tabela 4.3 e carga chaveada com c.t. de 1% conectadas.

extra obtida durante uma maior incidência de luz solar, além da obtenção da operação autônoma do mini-painel solar. Enquanto houver incidência de luz solar sobre o mini-painel suficiente para alimentar, pelo menos, o nó sensor, a energia resultante é composta pelas seguintes componentes: energia fornecida pelo mini-painel solar, energia armazenada nos supercaps e energia armazenada na bateria de reserva.

Corrente do Mini-Painel Solar (mA)	Potência da Carga (mW)	Potência Máxima (mW)	Eficiência (%)
40	170	179	95
35	147	150	98
30	121	130	93
25	114	115	99
20	94	95	99
15	69	70	98
10	43	45	95
5	19	20	95

Tabela 4.4: Eficiência do sistema sob várias correntes.

Com os valores de potência obtidos nos experimentos das Figs. 4.14 e 4.16, foi calculada a eficiência do processo de captura da energia solar (ζ), como mostrado na Tabela 4.4. De acordo com os resultados, foi obtida uma eficiência global maior que 93%, confirmando que é possível também ajustar o PMP de acordo com a demanda de carga.

Finalmente, as soluções de hardware propostas na literatura para o circuito de captura de energia solar necessitavam de componentes eletrônicos adicionais para implementar o RPMP, enquanto que, na solução proposta neste trabalho, foi necessário somente a inclusão de dois TL431, o que a torna uma solução muito mais barata do que aquelas propostas na literatura.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Síntese das Conclusões

Foi desenvolvido, a partir de uma abordagem quantitativa e qualitativa, a primeira geração de modelos de baterias alcalinas e de íons de lítio para RSSF, baseados no método de sistema de escrituração que, além da clássica contagem de Coulomb, também incorporam a taxa de descarga, a retenção de capacidade e o efeito de relaxação. Além desses efeitos, os modelos elaborados para as baterias de íons de lítio também incorporam o efeito da vida de ciclo e da eficiência de recarga. Os modelos ainda não contemplam o efeito da temperatura, que deverá ser tratado nas próximas gerações de modelos. Apesar disso, eles representam uma grande evolução, quando comparados aos modelos ideais utilizados em simuladores e plataformas de RSSF.

Os resultados mostraram que o Modelo Comportamental da Bateria Alcalina (MCBA) teve erro médio máximo inferior a 2%, enquanto que no modelo utilizado no Castália o erro foi superior a 21%. Tendo em vista que as aplicações reais de RSSF operam com *c.t.* abaixo de 5%, os resultados,

neste caso, demonstraram que o MCBA teve um erro médio máximo inferior a 0,6%, muito inferior ao erro do modelo do Castália, que foi superior a 18%.

Ainda considerando o contexto de aplicações reais de RSSF, os resultados de validação também demonstraram que o MCBIL teve erro médio máximo inferior a 3,6% (c.t. de 5%), que foi inferior ao erro do modelo do Castália (10%) e dos modelos analíticos encontrados na literatura (5%). Apesar deste bom desempenho, os resultados para os demais *c.t.*'s, embora um pouco acima (maior diferença inferior a 0,75%), foram similares aos resultados do modelo do Castália. Portanto, novos experimentos serão realizados nos trabalhos futuros para melhor identificação do ocorrido.

Apesar de não terem a exatidão dos modelos eletroquímicos, que apresentam erro próximo de zero, o MCBA e o MCBIL são muito mais eficientes computacionalmente e energeticamente, pois não apresentam a dificuldade de obtenção, configuração e cálculos complexos da grande quantidade de parâmetros físicos e eletroquímicos (mais de 50), indispensáveis para implementação de tais modelos.

Como solução de modelagem do mini-painel solar, foi adotada uma abordagem mais prática, que minimiza o impacto da complexidade dos cálculos de modelos tradicionais de painéis solares, e possibilita a indicação do desempenho do mini-painel solar ao longo de sua vida útil. A abordagem consiste na medição da corrente do mini-painel solar e o cálculo da eficiência de corrente (η_i), que é utilizada como parâmetro de indicação de disponibilidade energética (CODE). A corrente é o parâmetro utilizado no RPMP e os resultados mostraram que a eficiência global diverge do ponto ótimo de operação de menos de 7%, confirmando que é possível também ajustar o ponto de máxima potência de acordo com a demanda de carga.

A modelagem dos supercapacitores para RSSF mostrou que a utilização

de modelos RC simples e, principalmente, da fórmula clássica $E_{cap} = \frac{1}{2} \times C \times V^2$, para a modelagem de supercapacitores não é apropriada e pode resultar em erros significativos da estimação de energia desses dispositivos. Resultados experimentais mostraram que o erro máximo do MCS foi inferior a 0,5%, enquanto que o erro do modelo RC simples foi superior a 4,5%.

A caracterização do sistema composto por um mini-painel solar e supercapacitores, resultou em uma nova abordagem energeticamente eficiente, que habilita o nó sensor a receber energia de três fontes possíveis: supercapacitores, bateria de *back-up* e o mini-painel solar.

Foi modelada e proposta a Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI) para nós sensores de uma RSSF com a capacidade de captura de energia do ambiente, composta por um mini-painel solar, dois supercapacitores, uma bateria de íons de lítio e um agente de gerenciamento de energia, responsável pela gestão eficiente das múltiplas fontes de energia da unidade. As vantagens da INTI, quando comparada às soluções apresentadas na literatura, são a simplicidade, o baixo custo econômico e energético, pois foi necessário somente a inclusão de dois TL431, o que a torna uma solução muito mais barata do que aquelas propostas na literatura, a capacidade de RPMP e a CODE. Contudo, como ainda não foi testada, não existem resultados que demonstrem que a proposta seja adequada.

5.2 Trabalhos Futuros

Os modelos obtidos neste trabalho representam uma primeira de geração e podem ser melhorados, de modo a criar gerações mais robustas e otimizadas computacionalmente e energeticamente. Além disso, a INTI está em fase final de montagem e necessita de experimentos para validação e testes de campo.

Assim, como continuação deste trabalho, propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

1. Realizar a modelagem do impacto da temperatura do ambiente na capacidade efetiva final das baterias alcalinas e de íons de lítio e incorporá-lo aos modelos de primeira geração (MCBA e MCBIL);
2. Realizar a otimização dos modelos de baterias propostos com foco no aumento da robustez e na redução dos custos computacional e energético;
3. Realizar experimentos com ciclo de trabalho de 1% para análise e identificação de outros fatores não observados na primeira geração de modelos;
4. Implementar os modelos de baterias alcalinas e de íons de lítio em simuladores de aplicações de RSSF, tais como Castalia, NS-2 e TOSSIM;
5. Desenvolver o software embutido para a CODE e o agente de gerenciamento de energia da INTI para uso em plataformas de nós sensores;
6. Executar testes para a verificação e análise da solução final de hardware e software, principalmente do impacto do conversor DC-DC sobre as múltiplas fontes de energia;
7. Executar um conjunto de testes para verificação de funcionamento e validação da INTI;
8. Executar testes exaustivos em campo com a INTI.

Referências Bibliográficas

- [AA Portable Power Corp., 2009] AA Portable Power Corp. (2009). Rechargeable Li-ion button battery LIR2450 datasheet. Available on: <http://www.batteryspace.com/>.
- [Arora et al., 2002] Arora, P. Doyle, M. Newman, J. et al. (2002). Comparison between computer simulations and experimental data for high-rate discharges of plastic lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 88:219–231.
- [Atmel Corporation ,] Atmel Corporation . Flash Memory. Available on: <http://www.atmel.com>, note = , year=2008.
- [Atmel Corporation , 2008] Atmel Corporation (2008). ATmega128L datasheet. Available on: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf.
- [Barr Asanović, 2006] Barr, K. C. Asanović, K. (2006). Energy-Aware Lossless Data Compression. *ACM Trans. Comput. Syst.*, 24:250–291.
- [Bergveld et al., 1999] Bergveld, H. Kruijt, W. Notten, P. (1999). Electronic-Network Modeling of Rechargeable NiCd Cells and its Application to the Design of Battery Management Systems. *J. Power Sources*, volume 77, 143–158.
- [Brodd, 1999] Brodd, R. J. (1999). Recent Developments in Batteries for Portable Consumer Electronics applications. *The Electrochemical Society Interface*, 20–23.
- [Brunelli et al., 2009a] Brunelli, D. Dondi, D. Bertacchini, A. Larcher, L. Pavan, P. Benini, L. (2009a). Photovoltaic Scavenging Systems: Modeling and Optimization. *Microelectron. J.*, 40(9):1337–1344.
- [Brunelli et al., 2009b] Brunelli, D. Moser, C. Thiele, L. Benini, L. (2009b). Design of a Solar-Harvesting Circuit for Batteryless Embedded Systems. *Trans. Cir. Sys. Part I*, 56(11):2519–2528.

- [Casas Casas, 2005] Casas, R. Casas, O. (2005). Battery Sensing for Energy-Aware System Design. *Computer*, 38(11):48–54.
- [Chandrakasan et al., 1992] Chandrakasan, A. P. Sheng, S. Brodersen, R. W. (1992). Low-power CMOS Digital Design. *Journal of Solid State Circuits*, 27:473–484.
- [Chen Chou, 2010] Chen, C.-Y. Chou, P. H. (2010). Duracap: A Supercapacitor-Based, Power-Bootstrapping, Maximum Power Point Tracking Energy-Harvesting System. *ISLPED '10: Proceedings of the 16th ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design*, 313–318, New York, NY, USA. ACM.
- [Chen Varshney, 2004] Chen, D. Varshney, P. K. (2004). QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey. *Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004)*, Las Vegas, Nevada, USA.
- [Corke et al., 2007] Corke, P. Valencia, P. Sikka, P. Wark, T. Overs, L. (2007). Long-Duration Solar-Powered Wireless Sensor Networks. *EmNets '07: Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*, 33–37, New York, NY, USA. ACM.
- [Crossbow, 2006] Crossbow (2006). MPR/MIB Users Manual. Available on: <http://www.xbow.com>.
- [Crossbow Technology, 2007] Crossbow Technology (2007). MTS/MDA Sensor Board Users Manual. Available on: <http://www.xbow.com>.
- [da Cunha da Silva Jr., 2006] da Cunha, A. B. da Silva Jr., D. C. (2006). An Approach for the Reduction of Power Consumption in Sensor Nodes of Wireless Sensor Networks: Case Analysis of Mica2. *SAMOS VI, LNCS*, 4017:131–140.
- [da Cunha da Silva Jr., 2009] da Cunha, A. B. da Silva Jr., D. C. (2009). Remaining Capacity Measurement and Analysis of Alkaline Batteries for Wireless Sensor Nodes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(6):1816–1822.
- [Dallas, 2006] Dallas (2006). Power supplies and power management. Available on: <http://www.maximic.com>.
- [Dallas Semiconductor, 2006] Dallas Semiconductor (2006). AN121: Inaccuracies of Estimating Remaining Cell Capacity with Voltage Measurements Alone. Available on: <http://www.dalsemi.com>.

- [Doyle, 1995] Doyle, M. (1995). Design and Simulation of Lithium Rechargeable Batteries. PhD thesis, University of California at Berkeley.
- [Duracell, 2006] Duracell (2006). Discharge characteristics of MN1500 duracell battery. Available on: <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/ATB-full.pdf>.
- [Duracell, 2008a] Duracell (2008a). Discharge characteristics of MN1604 duracell battery. Available on: <http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/ATB-full.pdf>.
- [Duracell, 2008b] Duracell (2008b). Duracell Alkaline-Manganese Dioxide Datasheet. Available on: http://www.duracell.com/oem/Pdf/others/1500_US_CT.pdf.
- [Fairchild Semiconductor Corporation, 2009] Fairchild Semiconductor Corporation (2009). TL431 Datasheet. Available on: <http://www.fairchildsemi.com/ds/TL/TL431A.pdf>.
- [Ganesan et al., 2003] Ganesan, D. Cerpa, A. Yu, Y. Estrin, D. Ye, W. Zhao, J. (2003). Networking Issues in Wireless Sensor Networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64:799–814.
- [Gomadam et al., 2002] Gomadam, P. M. Weidner, J. W. Dougal, R. A. White, R. E. (2002). Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems. *Journal of Power Sources*, 110:267–284(18).
- [Hageman Gold, 1997] Hageman, S. C. Gold, S. (1997). A PSPICE Macro-model for Lithium-Ion Batteries. *Proc. 12th Ann. Battery Conf. Applications and Advances*, 215–222.
- [Jevtic et al., 2009] Jevtic, M. Zogovic, N. Dimic, G. (2009). Evaluation of Wireless Sensor Network Simulators. *Proceedings of the 17th Telecommunications forum (TELFOR 2009)*, 1303–1306.
- [Jiang et al., 2007] Jiang, X. Dutta, P. Culler, D. Stoica, I. (2007). Micro Power Meter for Energy Monitoring of Wireless Sensor Networks at Scale. *IPSN '07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, 186–195, New York, NY, USA. ACM.
- [Jiang et al., 2005] Jiang, X. Polastre, J. Culler, D. (2005). Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks. *IPSN '05: Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 463–468.

- [Lahiri et al., 2002] Lahiri, K. Raghunathan, A. Dey, S. Panigrahi, D. (2002). Battery-driven system design: A new frontier in low power design.
- [Levis et al., 2004] Levis, P. Madden, S. Polastre, J. Szewczyk, R. Woo, A. Gay, D. Hill, J. Welsh, M. Brewer, E. Culler, D. (2004). Tinyos: An operating system for sensor networks. in *Ambient Intelligence*. Springer Verlag.
- [Maxim Integrated Products, 2009] Maxim Integrated Products (2009). AN3501 - Rechargeable Batteries: Basics, Pitfalls, and Safe Recharging Practices. Available on: <http://www.maxim-ic.com>.
- [Melodia et al., 2005] Melodia, T. Vuran, M. C. Pompili, D. (2005). The State of the Art in Cross-layer Design for Wireless Sensor Networks. *Proceedings of EuroNGI Workshops on Wireless and Mobility*, Springer Lecture Notes on Computer Science, LNCS 388.
- [Merrett et al., 2008] Merrett, G. V. Weddell, A. S. Lewis, A. P. Harris, N. R. Al-Hashimi, B. M. White, N. M. (2008). An Empirical Energy Model for Supercapacitor Powered Wireless Sensor Nodes. *17th International IEEE Conference on Computer Communications and Networks*. IEEE.
- [Microchip Technology Inc., 2009] Microchip Technology Inc. (2009). MCP9700 Datasheet. Available on: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21942a.pdf>.
- [National, 2010] National (2010). USB-6216 DAQ. Available on: <http://www.ni.com>.
- [National,] National, title="NI USB-6009 DAQ", h. . A. n. . . y.
- [National Instruments, 2010] National Instruments (2010). NI LabVIEW SignalExpress 2009. Available on: <http://www.ni.com/labview/signalexpress/>.
- [National Semiconductor Corporation, 2009] National Semiconductor Corporation (2009). LM35 Datasheet. Available on: <http://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>.
- [Newman, 2004] Newman, J. (2004). Fortran programs for simulation of electrochemical systems - dualfoil.f program for lithium battery simulation. Available on: www.cchem.berkeley.edu/jsngrp/fortran.html.

- [Newman Doyle, 1997] Newman, J. Doyle, M. (1997). Analysis of capacity-rate data for lithium batteries using simplified models of the discharge process. *Journal of Applied Electrochemistry*, 27:846–856(11).
- [NICTA: National ICT Australia, 2009] NICTA: National ICT Australia (2009). Castalia: A Simulator for WSN. Available on: <http://castalia.npc.nicta.com.au>.
- [Niyato et al., 2007] Niyato, D. Hossain, E. Rashid, M. Bhargava, V. (2007). Wireless Sensor Networks with Energy Harvesting Technologies: A Game-Theoretic Approach to Optimal Energy Management. *Wireless Communications, IEEE*, 14(4):90–96.
- [NS Proj., 2009] NS Proj. (2009). NS-2: Network Simulator. Available on: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [Park et al., 2005] Park, C. Lahiri, K. Raghunathan, A. (2005). Battery Discharge Characteristics of Wireless Sensor Nodes: An Experimental Analysis. *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2005. IEEE SECON 2005. 2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference on*, 430–440.
- [Park et al., 2001] Park, S. Savvides, A. Srivastava, M. (2001). Battery Capacity Measurement and Analysis Using Lithium Coin Cell Battery. *ISLPED '01: Proceedings of the 2001 international symposium on Low power electronics and design*, 382–387, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Pedram Wu, 1999] Pedram, M. Wu, Q. (1999). Battery-powered digital cmos design. *DATE '99: Proceedings of the conference on Design, automation and test in Europe*, 17, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Perla et al., 2008] Perla, E. Catháin, A. O. Carbajo, R. S. Huggard, M. Mc Goldrick, C. (2008). Powertossim z: realistic energy modelling for wireless sensor network environments. *Proceedings of the 3rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks, PM2HW2N '08*, 35–42, New York, NY, USA. ACM.
- [Pop et al., 2005] Pop, V. Bergveld, H. Notten, P. Regtien, P. (2005). State-of-the-art of battery state-of-charge determination. *Measurement Science and Technology*, 16(12):R93–R110.
- [PowerStor, 2008a] PowerStor (2008a). Powerstor Supercapacitors calculations. Available on: <http://www.cooperbusmann.com/3/CooperPowerStorTechnicalData.html>.

- [PowerStor, 2008b] PowerStor (2008b). PowerStor Supercapacitors datasheet. Available on: <http://www.cooperbusmann.com/3/PowerStorFinder.html>.
- [PowerStor, 2009] PowerStor (2009). Methods for Measuring Capacitance, Inflow Current, Internal Resistance and ESR. Available on: <http://www.cooperbusmann.com/3/PowerStorFinder.html>.
- [Raghunathan et al., 2005] Raghunathan, V. Kansal, A. Hsu, J. Friedman, J. Srivastava, M. (2005). Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems. IPSN '05: Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 64, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- [Raghunathan et al., 2002] Raghunathan, V. Schurgers, C. Park, S. Srivastava, M. (2002). Energy-Aware Wireless Microsensor Networks. Signal Processing Magazine, IEEE, 19(2):40–50.
- [Rao et al., 2003] Rao, R. Vrudhula, S. Rakhmatov, D. N. (2003). Battery Modeling for Energy-Aware System Design. Computer, 36:77–87.
- [Rao et al., 2005] Rao, V. Singhal, G. Kumar, A. Navet, N. (2005). Battery Model for Embedded Systems. VLSI Design, International Conference on, 0:105–110.
- [Renner et al., 2009] Renner, C. Jessen, J. Turau, V. (2009). Lifetime Prediction for Supercapacitor-Powered Wireless Sensor Nodes. Proceedings of the 8th GI/ITG KuVS Fachgespräch "Drahtlose Sensornetze" (FGSN'09), 55–58.
- [Rong Pedram, 2003] Rong, P. Pedram, M. (2003). An Analytical Model for Predicting the Remaining Battery Capacity of Lithium-Ion Batteries. Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, 1:11148.
- [Roundy et al., 2004] Roundy, S. Steingart, D. Frechette, L. Wright, P. Rabaey, J. (2004). Power Sources for Wireless Sensor Networks. EWSN 2004, LNCS, 2920:1–17.
- [Seah et al., 2009] Seah, W. K. G. Eu, Z. A. pink Tan, H. (2009). Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) – Survey and Challenges.
- [Semiconductor Today, 2008] Semiconductor Today (2008). US Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory (NREL) sets solar

- cell efficiency record of 40.8%. Available on: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2008/AUGUST/NREL_140808.htm.
- [Shnayder et al., 2004] Shnayder, V. Hempstead, M. rong Chen, B. Allen, G. W. Welsh, M. (2004). Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications. In *Sensys*, 188–200. ACM Press.
- [Simjee Chou, 2008] Simjee, F. Chou, P. H. (2008). Efficient Charging of Supercapacitors for Extended Lifetime of Wireless Sensor Nodes. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(3).
- [Simjee et al., 2005] Simjee, F. Sharma, D. Chou, P. H. (2005). Everlast: Long-Life, Supercapacitor-Operated Wireless Sensor Node. *SenSys '05: Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, 315–315, New York, NY, USA. ACM.
- [Solarbotics Ltda, 2008] Solarbotics Ltda (2008). 37 x 66 mm Polycrystalline Solar Cell. Available on: <http://www.solarbotics.com/products/scc3766/>.
- [Soto et al., 2006] Soto, W. D. Klein, S. Beckman, W. (2006). Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance. *Solar Energy*, 80(1):78 – 88.
- [Szewczyk et al., 2004] Szewczyk, R. Polastre, J. Mainwaring, A. Culler, D. (2004). Lessons from a Sensor Network Expedition. 307–322.
- [Tang et al., 2005] Tang, Q. Gupta, S. Schwiebert, L. (2005). BER Performance Analysis of an On-Off Keying based Minimum Energy Coding for Energy Constrained Wireless Sensor Applications. *Communications*, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on, volume 4, 2734 – 2738 Vol. 4.
- [Texas, 2006] Texas (2006). Power management. Available on: <http://www.ti.com>.
- [Texas, 2009a] Texas (2009a). TS5A23159 Datasheet. Available on: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ts5a23159.pdf>.
- [Texas, 2009b] Texas (2009b). TS5A3359 Datasheet. Available on: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ts5a3359.pdf>.
- [Texas Instruments, 2006] Texas Instruments (2006). INA327 Instrumentation Amplifier. Available on: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina327.pdf>.

- [Texas Instruments, 2008] Texas Instruments (2008). CC1000 datasheet. Available on: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf>.
- [Texas Instruments, 2009a] Texas Instruments (2009a). INA333 Datasheet. Available on: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps61130.pdf> /[lit/ds/symlink/ina333.pdf](http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina333.pdf).
- [Texas Instruments, 2009b] Texas Instruments (2009b). TPS61130 Datasheet. Available on: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps61130.pdf>.
- [TinyOS Project, 2009] TinyOS Project (2009). TOSSIM: Tynyos Simulator. Available on: <http://docs.tinyos.net/index.php/TOSSIM>.
- [Vieira et al., 2006] Vieira, M. A. M. da Cunha, A. B. da Silva Jr., D. C. (2006). Designing Wireless Sensor Nodes. SAMOS VI, LNCS, 4017:99–108.
- [Zhang Cheng, 2003] Zhang, Y. Cheng, L. (2003). Cross-layer Optimization for Sensor Networks. Proceedings of New York Metro Area Networking Workshop 2003.
- [Zubieta Bonert, 1998] Zubieta, L. Bonert, R. (1998). Characterization of Double-Layer Capacitors (DLCs) for Power Electronics Applications. Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, volume 2, 1149–1154 vol.2.

Apêndice A

Tabelas de Capacidade Efetiva das Pilhas Utilizadas nos Experimentos

APÊNDICE A. TABELAS DE CAPACIDADE EFETIVA DAS PILHAS UTILIZADAS
206 NOS EXPERIMENTOS

Corrente (mA)	Horas	Capacidade (mAh)	Corrente (mA)	Horas	Capacidade (mAh)
5	700	3.500	33	87,4	2.885
6	550	3.300	34	84	2.857
7	475	3.325	35	81	2.835
8	400	3.200	36	78,3	2.818
9	367	3.303	37	75,9	2.807
10	333	3.330	38	73,7	2.801
11	313,3	3.446	39	71,8	2.798
12	289,8	3.477	40	70	2.800
13	266,1	3.459	41	68,4	2.805
14	244,2	3.419	42	67	2.813
15	225	3.375	43	65,7	2.824
16	208,6	3.337	44	64,5	2.836
17	194,8	3.311	45	63,3	2.849
18	183,1	3.296	46	62,2	2.860
19	173,1	3.289	47	61,1	2.870
20	164,3	3.286	48	59,9	2.876
21	156,4	3.283	49	58,7	2.878
22	149	3.277	50	57,5	2.875
23	141,9	3.264	51	56,2	2.869
24	135,2	3.244	52	55	2.861
25	128,6	3.215	53	53,9	2.858
26	122,3	3.179	54	53,1	2.865
27	116,2	3.137	55	52,5	2.888
28	110,4	3.092	56	52,3	2.929
29	105	3.046	57	52,3	2.983
30	100	3.000	58	52,2	3.030
31	95,4	2.957	59	51,2	3.018
32	91,2	2.918	60	47,5	2.850

Tabela A.1: Capacidade Efetiva de 1 em 1 mA para a pilha alcalina Duracell MN1500, considerando-se tensão de corte de 0,8 V.

Corrente (mA)	Horas	Capacidade (mAh)	Corrente (mA)	Horas	Capacidade (mAh)
5	136,4	682	33	18,5	611
6	113,6	682	34	18	612
7	92,5	648	35	17,5	613
8	80	640	36	17	612
9	61,7	555	37	16,5	611
10	61,4	614	38	16	608
11	57	627	39	15,5	605
12	54	648	40	15	600
13	51	663	41	14,6	600
14	48	672	42	14,3	599
15	45	675	43	13,9	598
16	42	672	44	13,2	595
17	39	663	45	13,2	592
18	36	648	46	12,8	589
19	33	627	47	12,4	584
20	30	600	48	12,1	579
21	29	609	49	11,7	573
22	28	616	50	11,33	567
23	27	621	51	11,12	567
24	26	624	52	10,9	568
25	25	625	53	10,7	567
26	24	624	54	10,5	567
27	23	621	55	10,3	566
28	22	616	56	10,1	565
29	21	609	57	9,9	563
30	20	600	58	9,7	561
31	19,5	605	59	9,5	558
32	19	608	60	9,3	555

Tabela A.2: Capacidade Efetiva de 1 em 1 mA para a bateria alcalina Duracell MN1604, considerando-se tensão de corte de 4,8 V.

Corrente (mA)	Capacidade (mAh)	Corrente (mA)	Capacidade (mAh)
19	128,0	40	121,2
20	127,7	41	120,9
21	127,4	42	120,6
22	127,0	43	120,2
23	126,7	44	119,9
24	126,4	45	119,6
25	126,1	46	118,9
26	125,8	47	118,6
27	125,4	48	118,3
28	125,1	49	118,0
29	124,8	50	117,7
30	124,5	51	117,3
31	124,1	52	117,0
32	123,8	53	116,7
33	123,5	54	116,4
34	123,2	55	116,0
35	122,8	56	115,7
36	122,5	57	115,4
37	122,2	58	115,1
38	121,9	59	114,7
39	121,5	60	114,4

Tabela A.3: Capacidade Efetiva de 1 em 1 mA para a bateria de íons de lítio LIR2450, considerando-se tensão de corte de 2,75 V.

Apêndice B

INTI: Unidade Integrada de Captura de Energia Solar

Apesar de ainda não haver resultados, a solução final de hardware da unidade integrada de captura de energia solar e sua implementação já foram concluídas e atualmente a INTI está em fase de testes.

B.1 Requisitos e Solução Proposta

A Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI) tem como requisitos a simplicidade e o baixo custo, quando comparada com as soluções propostas na literatura, e deve ser habilitada com a capacidade de rastreamento do ponto de máxima potência (RPMP) e a consciência de disponibilidade energética (CODE).

A INTI é uma unidade de suprimento de energia para o nó sensor de uma RSSF com a capacidade de captura de energia solar, composta por um mini-painel solar, dois supercapacitores, uma bateria recarregável de íons de

lítio (*back-up*) e um agente de gerenciamento de energia, responsável pela gestão eficiente das múltiplas fontes de energia da unidade. O diagrama de blocos é rerepresentado na fig. B.1.

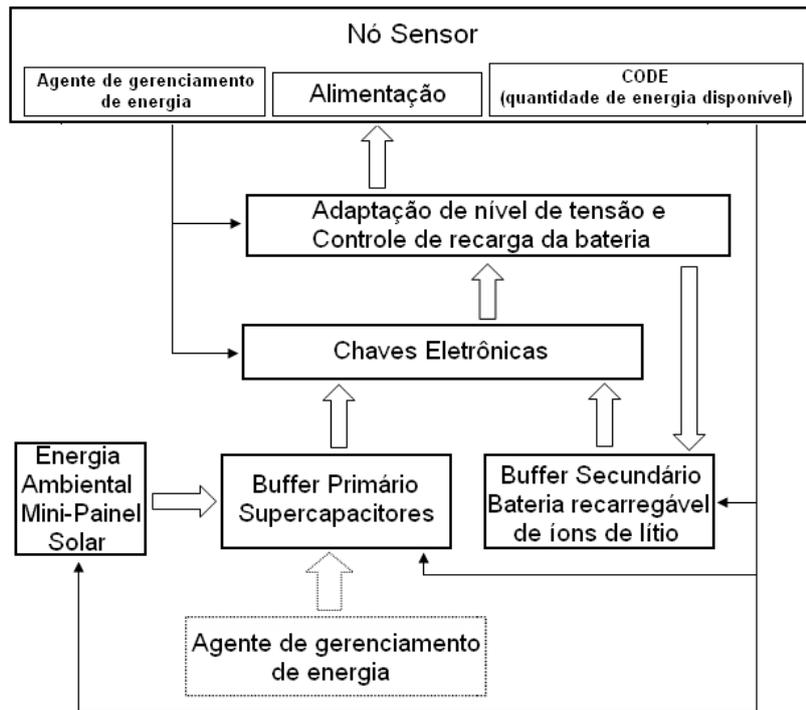


Figura B.1: Diagrama de blocos da unidade de suprimento de energia.

B.2 Implementação da Solução Proposta

Com base no diagrama de blocos da Fig. B.1 e os resultados das caracterizações dos dispositivos que compõem a INTI, o projeto de hardware foi executado e o diagrama esquemático é apresentado na Fig. C.1.

Comparando-se o diagrama esquemático com o diagrama de blocos, pode-se observar que o bloco de energia ambiental é constituído pelo mini-painel solar SCC3766 (37 x 66 mm) e o diodo *schottky* (D_1), que protege o mini-painel solar de circulação de corrente reversa.

O bloco de chaves eletrônicas é constituído pelos CI's TS5A23159 (U1) [Texas, 2009a] e TS5A3359 (U6, U7 e U8) [Texas, 2009b] da Texas Instruments. O TS5A23159 é composto de duas chaves analógicas que operam na faixa de 1,65 V a 5,5 V, possuem resistência no estado ligado de 1 Ω e consumo máximo de 50 nA. Ela e o transistor bipolar BC548 (Q1) são responsáveis pela seleção de qual fonte de energia será colocada na saída (COM2): mini-painel solar/supercapacitores ou bateria de *back-up*. O transistor foi projetado para operar como chave e somente conduzirá quando a tensão em sua base, ou seja, a tensão do supercapacitor for igual a 1 V (2 V nos dois supercapacitores). Enquanto ele estiver cortado, a tensão da bateria é que será colocada na saída (desde que a tensão de alimentação do TS5A23159 seja igual ou superior a 1,65 V). Caso contrário, é a tensão fornecida pelo conjunto mini-painel/supercapacitores que estará na saída. Esta é a implementação em hardware do agente de gerenciamento de energia, que atua de forma automática e livre de controle de software. A outra chave do TS5A23159, habilitada pelo pino IN1, é utilizada para habilitar/desabilitar a alimentação dos amplificadores de instrumentação e de dois TS5A3359, um que é responsável pela seleção de medidas de corrente da INTI (U8) e outro que é responsável pela recarga da bateria de íons de lítio (U7). Isto é necessário para mini-

mizar o consumo de energia da INTI, visto que as medidas de corrente não são feitas continuamente. O TS5A3359 também é uma chave analógica, que tem as mesmas especificações elétricas que o TS5A23159, mas se diferencia dessa última por possuir três posições selecionáveis pelas entradas digitais (função MUX/DEMUX). O terceiro TS5A3359 (U6) é responsável pela seleção das seguintes medidas: tensão do supercapacitor, tensão da bateria ou temperatura, que é fornecida pelo MCP9700 da Microchip Technology Inc. [Microchip Technology Inc., 2009], que é um sensor de temperatura linear de baixo custo, baixo consumo ($6 \mu\text{A}$) e tolerância de $\pm 2^\circ\text{C}$. O MCP9700 converte temperatura em tensão analógica.

O bloco do *buffer* primário é composto por dois supercapacitores e os TL431 que, além de proteger os supercapacitores contra sobretensão, atuam como um agente de gerenciamento de energia em hardware (bloco mostrado na Fig. B.1), viabilizando a atuação autônoma do mini-painel solar de forma automática e livre de controle por software.

O bloco do *buffer* secundário é composto de uma pilha de íons de lítio, que atua como bateria de *back-up* para a INTI. Experimentos realizados com os supercapacitores mostraram que em períodos de grande incidência de luz solar, a bateria dificilmente será utilizada, pois os supercapacitores serão capazes de alimentar o nó sensor também no período da noite.

O bloco de adaptação de nível de tensão e controle de recarga da bateria é composto pelo conversor DC-DC TPS61130PW da Texas Instruments [Texas Instruments, 2009b]. O TPS61130 é um conversor DC-DC tipo fly-back com eficiência de até 90%, faixa de tensão de operação de 1,8 V a 5,5 V e duas saídas de tensão ajustáveis. Ele foi projetado, conforme instruções das notas de aplicação do fabricante [Texas Instruments, 2009b], para ter uma saída fixa em 4,2 V e outra em 3,3 V (saída do LDO). Por se tratar de um

protótipo, foram colocados *jumpers* de seleção de alimentação (J5, J6, J7 e J8) para o nó sensor, de modo a possibilitar o teste e a análise de diferentes alternativas de alimentação.

O bloco CODE, dentro do nó sensor, dispõe de algoritmos responsáveis pelo processamento de medidas de temperatura do ambiente, tensão e corrente das múltiplas fontes disponíveis (supercapacitores, mini-painel e bateria) e pela implementação dos modelos dessas múltiplas fontes propostos anteriormente. Os amplificadores de instrumentação INA333 da Texas Instruments [Texas Instruments, 2009a] são responsáveis pelo condicionamento das medidas à entrada analógica do conversor A/D do nó sensor. Eles operam na faixa de 1,8 V a 5,5 V, possuem ganho de rejeição em modo comum igual ou superior a 100 dB e consumo de 50 μA .

O bloco do agente de gerenciamento de energia, dentro do nó sensor, é responsável pelo envio de comandos de habilitação de CIs ou de seleção para a obtenção de medidas de tensão, corrente e temperatura. No diagrama esquemático existe o pino sel-A do CI U1 (TS5A23159), que habilita ou desabilita a alimentação dos INA333 (U9, U10 e U11) e de dois TS5A3359 (U7 e U8); os pinos V-S0 e V-S1 do chip U6 (TS5A3359), que fazem a seleção entre as medidas de tensão do supercapacitor, da bateria ou da temperatura; os pinos RB-0 e RB-1 do CI U7 (TS5A3359), que fazem a seleção entre os resistores limitadores da corrente de recarga da bateria de íons de lítio; e os pinos I-S0 e I-S1 do CI U8 (TS5A3359), que fazem a seleção entre as medidas de corrente do mini-painel solar, da recarga da bateria ou do nó sensor (carga). A medida de corrente do mini-painel solar (R_2) é utilizada pela CODE para calcular a eficiência de corrente e habilitar o RPMP do mini-painel solar. A medida de corrente da bateria (R_3) é utilizada pelo agente de gerenciamento de energia para fazer o controle de recarga da bateria de

íons de lítio. A medida de corrente do nó sensor (R_1) é utilizada pela CODE para processar o algoritmo do modelo da bateria de íons de lítio. Todos esses pinos são conectados às portas digitais e às entradas analógicas do nó sensor. Os pinos PVCC e PGND são conectados aos pinos de alimentação e terra do nó sensor, respectivamente. A Fig. B.2 ilustra as camadas inferior e superior do *layout* da INTI.

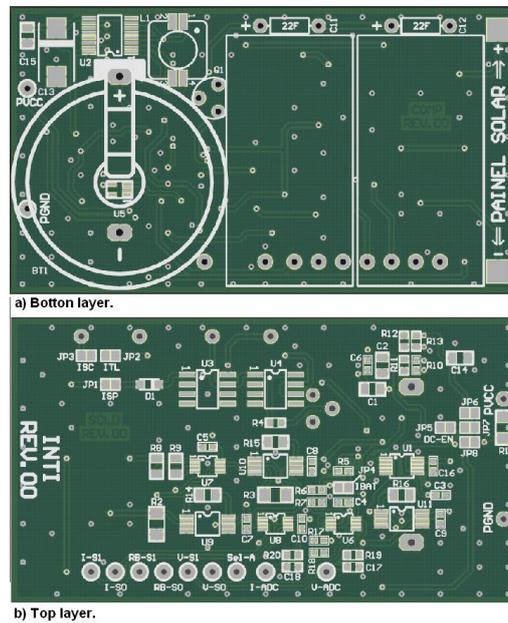


Figura B.2: Camadas inferior e superior da PCI da Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI).

Apêndice C

Diagrama Esquemático da INTI

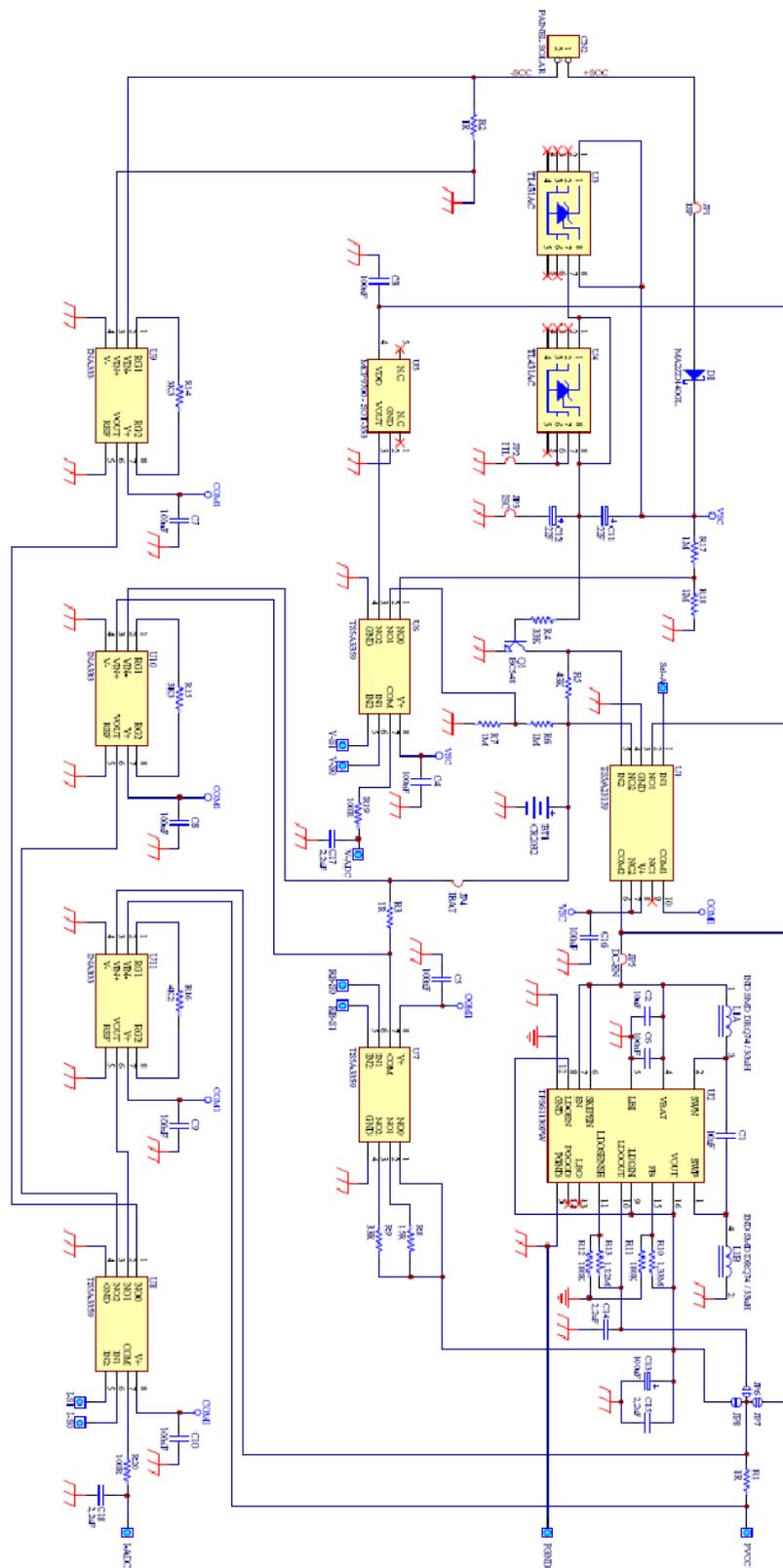


Figura C.1: Diagrama esquemático da Unidade Integrada de Captura de Energia Solar (INTI).