



**Patrícia Valéria Sathler de Queiroz**

**Mensuração do consumo de energia elétrica: algoritmo  
para detecção de potenciais usuários da termoacumulação  
como alternativa para deslocamento de carga**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza  
Co-orientador: Prof. Maurício Nogueira Frota

Rio de Janeiro  
Setembro de 2011



**Patrícia Valéria Sathler de Queiroz**

**Mensuração do consumo de energia elétrica: algoritmo  
para detecção de potenciais usuários da termoacumulação  
como alternativa para deslocamento de carga**

**Prof. Reinaldo Castro Souza, PhD.**

Orientador  
Programa de Pós-Graduação em Metrologia  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

**Prof. Maurício Nogueira Frota, PhD.**

Co-orientador  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Metrologia  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

**Prof. João Carlos de Oliveira Aires, DSc.**

Universidade Gama Filho - UGF

**Prof. José Francisco Pessanha, PhD.**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do  
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 19 de Setembro de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e dos orientadores.

### **Patrícia Valéria Sathler de Queiroz**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na UGF (Universidade Gama Filho) em 2007. Pós Graduou-se em Engenharia de Segurança no Trabalho na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em 2009. Colaborou no desenvolvimento no projeto de P&D Light/Puc-Rio de "Racionalização do uso de energia e aplicação da termoacumulação como estratégia para proposição de tarifa diferenciada voltada a clientes comerciais de alto consumo", que motivou esta dissertação de mestrado.

#### Ficha Catalográfica

Queiroz, Patrícia Valéria Sathler de

Mensuração do consumo de energia elétrica : algoritmo para detecção de potenciais usuários da termoacumulação como alternativa para deslocamento de carga / Patrícia Valéria Sathler de Queiroz ; orientador: Reinaldo Casto Souza ; co-orientador: Maurício Nogueira Frota. – 2011.

98 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2011.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Consumo de Energia. 3. Eficiência Energética. 4. Termoacumulação. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Frota, Maurício Nogueira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Este trabalho é dedicado à minha mãe Celina, que almejou o meu crescimento intelectual, ao meu marido William, que sempre me incentiva na busca do conhecimento. Ao meu orientador e amigo Reinaldo, que me deu a oportunidade de trilhar este novo caminho. Ao meu co-orientador Maurício, que abriu caminhos para esta dissertação.

## Agradecimentos

A Deus por me revigorar as energias, especialmente nos momentos mais difíceis e por ter colocado pessoas maravilhosas em meu caminho, verdadeiros anjos, que me apoiam e me fortalecem em todos os momentos.

Ao meu querido Guru, amigo e orientador professor PhD. Reinaldo Castro Souza, que com suas sábias colocações, me ajudaram nas melhores escolhas, enriquecendo o meu conhecimento.

Ao meu co-orientador professor PhD. Maurício Nogueira Frota, por seu entusiasmo e energia positiva, que me revitalizou em todo o percurso durante o mestrado e desenvolvimento da pesquisa de termoacumulação, também por suas valiosas sugestões e orientações.

Ao Sebastião G. de Oliveira, do Núcleo de Estatística Computacional (NEC) – PUC-Rio, por ter realizado a programação do sistema gerador de curvas de cargas - SIMCAR, implementando os algoritmos, favorecendo ao bom andamento da pesquisa e do desenvolvimento deste trabalho.

A Fernanda Particelli e a equipe da Light do projeto de Termoacumulação, por ter disponibilizado todas as informações necessárias para o desenvolvimento do projeto.

A todos os professores do curso de Metrologia, que se empenharam em solidificar os conhecimentos básicos da área metrológica, focando na inovação e qualidade.

Aos meus amigos do mestrado, especialmente, Aguinaldo e Marcio, pela parceria e companheirismo durante o curso.

Aos funcionários da secretária do curso de Metrologia, pelas orientações a respeito das questões burocráticas a serem seguidas no curso.

Ao meu amigo e irmão Eric pelo apoio e sugestões técnicas e minha irmã Adriana, pelas revisões de texto.

## Resumo

Queiroz, Patrícia Valéria Sathler de Queiroz; Souza, Reinaldo Castro; Frota, Maurício Nogueira. **Mensuração do consumo de energia elétrica: algoritmo para detecção de potenciais usuários da termoacumulação como alternativa para deslocamento de carga.** Rio de Janeiro, 2011. 98p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação desenvolveu-se de forma articulada com o projeto de P&D LIGH-ANEEL, coordenado pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI), Projeto Ref. P&D 003/2008, intitulado *Racionalização do uso de energia e aplicação da termoacumulação como estratégia para proposição de tarifa diferenciada voltada a clientes comerciais de alto consumo.* A dissertação teve como **objetivo** o desenvolvimento e validação de um algoritmo para identificação de clientes potenciais ao uso da tecnologia de termoacumulação. O trabalho orientou-se no contexto da crescente demanda por energia imposta ao setor elétrico pela expansão da economia, notadamente em horários de alta demanda. A **motivação** deste trabalho, atendendo aos interesses do PósMQI na área de energia, é oferecer uma ferramenta de auxílio à decisão para o planejamento energético das concessionárias. Como **resultado** obteve-se o mapeamento das curvas de cargas, obtidas por meio do sistema computacional desenvolvido (SIMCAR). Este sistema (amigável) permite enquadrar os clientes potenciais, segundo características de consumo estruturadas em três categorias indicativas do uso da termoacumulação: “muito potencial”, “potencial” e “já modula”. Dentre as **conclusões**, o algoritmo desenvolvido mostrou-se ferramenta eficaz de auxílio ao planejamento energético e a termoacumulação uma alternativa sustentável para adequação da matriz energética do país, podendo gerar economias de até 40%.

## Palavras-chave

Metrologia; Consumo de Energia; Eficiência Energética; Termoacumulação.

## Abstract

Queiroz, Patrícia Valéria Sathler de Queiroz; Souza, Reinaldo Castro (Advisor); Frota, Maurício Nogueira (Co-Advisor). **Measurement of electric energy consumption: algorithm for detecting potential users of thermo-accumulation as an alternative for load shift.** Rio de Janeiro, 2011. 98p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An algorithm to measure and detect potential thermo-accumulation customers among the clients of a distributing utility was proposed in this work. Such algorithm uses statistical methods for the treatment of “missing data” and is applied to the measured hourly demands of medium and high voltage customers of the utility. Basically, the thermo-accumulation technique can be defined as a strategy to shift load from peak hours to off-peak hours. The algorithm allows the construction of load curves from the observed load series after the removal of outliers and/or missing values. From the profile of such curves, the algorithm produces the classification of the clients into three possible categories: highly potential, just potential and non potential (i.e. an already modulated client). Also important to mention this dissertation, is part of an R&D project developed for a Brazilian southern utility. A friendly computer system named SIMCAR, developed in Visual Basic, implemented the proposed algorithm. As a final word, in surveys conducted with users of this technology, it was mentioned that the savings on energy consumption can be as high as 40%.

## Keywords

Metrology; Consumption of energy; Energetic Efficiency; Thermo-accumulation.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>13</b>
1.1. Problematização e motivação	16
1.2. Hipótese	17
1.3. Objetivo geral	17
1.3.1. Objetivos específicos	17
1.4. Metodologia	17
1.4.1. Classificação da pesquisa	18
1.4.2. Estrutura da dissertação	18
<b>2 Eficiência energética no setor elétrico brasileiro</b>	<b>20</b>
2.1. Principais ações brasileira de eficiência energética	22
2.1.1. Programa brasileiro de etiquetagem (PBE)	23
2.1.2. Programa nacional de conservação de energia elétrica (PROCEL)	24
2.1.3. O Programa CONPET	26
2.1.4. Programa de eficiência energética (PEE)	27
2.1.5. Lei de eficiência energética	28
2.2. Eficiência energética em edifícios	28
2.3. Características básicas do sistema elétrico brasileiro	29
2.3.1. Agentes institucionais	30
2.3.2. Sistema de geração	31
2.3.3. Sistema de transmissão	32
2.3.4. Sistema de distribuição	33
2.3.5. Nível de tensão elétrica	33
2.3.6. Horário de ponta	34
2.4. Tarifa	34
2.4.1. Tipos de tarifas	35
2.4.2. Grupos tarifários	36
<b>3 Mapeamento das curvas de carga</b>	<b>38</b>
3.1. Curva de carga típica por natureza de consumidor	40
3.1.1. Curva de carga residencial	40
3.1.2. Curva de carga industrial	41
3.1.3. Curva de carga comercial	42



3.2. Medição de energia elétrica	43
3.2.1. Medidores	44
<b>4 Termoacumulação: alternativa tecnológica para eficiência energética.</b>	<b>49</b>
4.1. Fundamentos da termoacumulação	50
4.1.1. Formas de termoacumulação	51
4.1.2. Tecnologias de armazenamento para sistemas de termoacumulação	52
4.1.3. Tipos de sistemas de termoacumulação	54
4.1.4. O funcionamento básico da termoacumulação	54
<b>5 Algoritmo para detecção de clientes potenciais</b>	<b>56</b>
5.1. Construção do algoritmo	57
5.1.1. Análise exploratória da população	57
5.1.2. Levantamento da base de dados	58
5.1.3. Tratamento de dados aberrantes “ <i>outliers</i> ”	58
5.1.4. Tratamento de dados faltantes “ <i>missing data</i> ”	61
5.1.5. Descrição do algoritmo de detecção	65
5.1.6. Fluxograma básico do algoritmo de detecção	67
5.2. Sistema gerador de curvas de carga (SIMCAR)	68
5.2.1. Características do sistema	69
<b>6 Testes e aplicações do algoritmo de detecção</b>	<b>71</b>
6.1. Mapeamento das curvas de cargas	71
6.2. Testes do algoritmo	72
6.3. Outras aplicações	74
<b>7 Conclusões e recomendações</b>	<b>76</b>
7.1. Produção acadêmica resultante da pesquisa de mestrado	77
<b>8 Referências bibliográficas</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO I – Estudo do caso da EBVRJ</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO II – Manual SIMCAR</b>	<b>92</b>

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Subgrupo Tarifário "A".	36
Tabela 2 - Subgrupo Tarifário "B".	36
Tabela 3 - Tabela de referência para enquadramento tarifário subgrupo A.	37

## Lista de figuras

Figura 1 – Evolução do consumo final por fonte	21
Figura 2 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia	24
Figura 3 - Selo PROCEL	25
Figura 4 – Selo Conpet	27
Figura 5 - Matriz de energia elétrica	32
Figura 6 – Tarifas praticadas no mundo	35
Figura 7 - Distribuição do consumo final de energia elétrica	39
Figura 8 - Curva de carga típica do SIN, consumidor residencial	41
Figura 9 - Curva de carga típica do SIN - consumidor industrial	42
Figura 10 - Curva de Carga típica do SIN - consumidor comercial	42
Figura 11 – Medidor eletromecânico NANSEN M1A-T	45
Figura 12 – Medidor eletrônico NANSE	46
Figura 13 – Instalação típica de reservatório de água gelada	53
Figura 14 – Instalação típica de um reservatório de gelo	53
Figura 15 – Instalações básicas de um sistema de termoacumulação	54
Figura 16 – Intervalo de confiança (96 medições de um dia útil)	60
Figura 17 – Intervalo de confiança (96 medições de um dia útil) com “outlier”	60
Figura 18 – Diagrama de blocos rotina tratamento de “outlier”	61
Figura 19 – Carga diária de um consumidor com “missings data”	63
Figura 20 – Tratamento “missing data”	64
Figura 21 – Fluxograma básico do algoritmo de detecção	68
Figura 22 – Tela principal do sistema computacional	69
Figura 23 – Gráfico dos resultados do mapeamento das curvas de carga	72
Figura 24 – Curva de carga cliente muito potencial	73
Figura 25 – Curva de carga cliente potencial	73
Figura 26 – Curva de carga cliente que já modula	74
Figura 27 – Impacto da termoacumulação na curva de carga	75

## Siglas e Abreviaturas

ALIO – Asociación Latino-Iberoamerica de Investigación Operativa  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ANP – Agência Nacional do Petróleo  
AP – Audiência Pública  
AT – Alta Tensão  
BEN – Balanço Energético Nacional  
BIG – Banco de Informações de Geração  
BT – Baixa Tensão  
CAG – Central de Água Gelada  
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica  
CCM – Centro de Controle de Medição  
CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica  
CONPET – Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural  
CMSE – Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico  
CNAE – Classificação Nacional de Atividades Econômica  
CNPE – Conselho Nacional de Políticas Energética  
DU – Dias Útil  
EAT – Extra Alta Tensão  
EBVRJ – Edifício da Bolsa de Valores do Rio de Janeiro  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
ERPO – Encontro Regional de Pesquisa Operacional  
GLD – Gerenciamento pelo Lado da Demanda  
IFORS – The International Federation of Operational Research Societies  
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia  
MME – Ministério de Minas e Energia  
MT – Média Tensão  
OIML – Organização Internacional de Metrologia Legal  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico  
PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem  
PCH – Pequena Central Hidroelétrica  
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento  
PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia  
PEE – Programa de Eficiência Energética  
PEN – Plano Nacional de Operação Energética  
PPH – Pesquisa de Posses e Hábitos  
PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
SIMCAR – Sistema Gerador de Curva de Carga  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
SOBRAPO – Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional  
UAT – Ultra Alta Tensão