

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 08/02/2020.

Fernando Deluno Garcia

Medidor Cognitivo de Energia para Aplicações em Eficiência Energética

Bauru - SP

2018

Fernando Deluno Garcia

Medidor Cognitivo de Energia para Aplicações em Eficiência Energética

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP para obtenção do título de mestre.

UNESP — UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão

Coorientador: Prof. Dr. Wesley Angelino de Souza

Bauru - SP

2018

Garcia, Fernando Deluno.

Medidor Cognitivo de Energia para Aplicações em Eficiência Energética / Fernando Deluno Garcia, 2018
182 f.

Orientador: Fernando Pinhabel Marafão

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Desagregação do consumo. 2. Eficiência energética. 3. Medidor cognitivo de energia elétrica. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Medidor Cognitivo de Energia para Aplicações em Eficiência Energética.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FERNANDO DELUNO GARCIA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 08 dias do mês de fevereiro do ano de 2018, às 09:00 horas, no(a) Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba-UNESP, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFAO - Orientador(a) do(a) Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP, Prof. Dr. ANDRE AUGUSTO FERREIRA do(a) Departamento de Energia Elétrica / Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY do(a) Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP/Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de FERNANDO DELUNO GARCIA, intitulada **DESAGREGAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA APLICADO NA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão

Examinadora.

Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFAO

Prof. Dr. ANDRE AUGUSTO FERREIRA

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

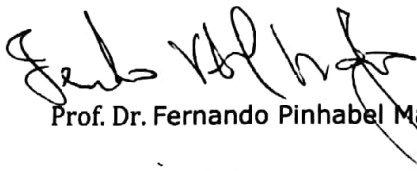
A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
FERNANDO DELUNO GARCIA

DE: "DESAGREGAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA APLICADO NA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA"

PARA:

Medidor Cognitivo de Energia para Aplicações em
Eficiência Energética

Bauru, 08 de fevereiro de 2018.



Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafao

Orientador

Agradecimentos

Muitos são os desafios enfrentados quando decidimos caminhar em direção ao novo, desconhecido. Parte desta jornada é constituída por experiências; a outra, pelas relações criadas e que nos fortalecem para continuar em busca dos objetivos almejados. Ao atingi-los, torna-se impossível não olhar para trás e sentir-se grato por todo apoio recebido.

Gostaria então de agradecer especialmente duas pessoas envolvidas diretamente no desenvolvimento deste trabalho. Primeiro, ao professor Fernando Pinhabel Marafão — orientador desta dissertação — que desde o início fez questão de dialogar e debater ideias, ampliando meu horizonte de expectativas e facilitando a condução do trabalho. Segundo, ao Wesley Angelino de Souza — coorientador desta dissertação — a quem sou extremamente grato por todo tempo dedicado e pelos conhecimentos compartilhados.

Não posso deixar de citar os amigos do GASI (Grupo de Automação e Sistemas Integráveis — UNESP Sorocaba) que também fizeram parte desta trajetória. Em especial, gostaria de agradecer ao Augusto Matheus dos Santos Alonso com quem tive a oportunidade de estudar durante esses anos de mestrado. Seu apoio também foi essencial para cumprimento deste trabalho.

Por fim, à FAPESP — processo 2016/08645-9 — pelo apoio financeiro e institucional ao projeto temático para Pesquisas Interdisciplinares em Redes Elétricas Inteligentes.

“O homem erudito é um descobridor de fatos, que já existem — mas o homem bom é um criador de valores, que não existiam, e que ele faz existir.
Albert Einstein.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor cognitivo de energia elétrica, enfatizando sua aplicação para avaliação da eficiência energética e consumo padrão de eletrodomésticos classificados pelo PROCEL e de acordo com a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. Para tal, é proposta uma metodologia de desagregação do consumo de energia que possibilita estimar o consumo individual de cada eletrodoméstico em uma residência. Os eletrodomésticos são classificados e identificados a partir de indicadores que caracterizam a operação de um equipamento, sendo calculados através das formas de onda de tensão e corrente e da Teoria de Potência Conservativa (CPT). Com isso, foi criada uma base de dados composta por indicadores de diversos eletrodomésticos para que se pudesse identificá-los a partir do algoritmo K-ésimo vizinho mais próximo (KNN). Tendo em vista o engajamento do consumidor residencial em relação aos seus hábitos de consumo, o trabalho proposto faz uso do medidor cognitivo de energia elétrica para fornecer recomendações e diagnósticos sobre os eletrodomésticos utilizados na residência. Por fim, o teste do protótipo possibilitou validar a metodologia proposta, estabelecendo um novo conceito e aplicação de medidores inteligentes de energia.

Palavras-chave: desagregação do consumo; eficiência energética; medidor cognitivo de energia elétrica.

Abstract

This work presents the development of a cognitive energy meter, emphasizing its application to evaluate the energy efficiency and standard appliances consumption classified by PROCEL and according to the National Energy Efficiency Labeling. For this purpose, an energy consumption disaggregation methodology is proposed, which makes possible to estimate the individual consumption of each appliance in a house. Appliances are classified and identified by indicators that characterize the operation of an equipment, being calculated through voltage and current waveforms and by the Conservative Power Theory (CPT). Thus, a database composed of indicators of several household appliances was created so that they could be identified using the K-nth nearest neighbor (KNN) algorithm. Considering the engagement of the residential consumer in relation to their consumption habits, the proposed work makes the use of the cognitive energy meter to provide recommendations and diagnoses about the appliances used in the residence. Finally, the prototype validated the proposed methodology, establishing a new concept and application of smart energy meters.

Keywords: energy disaggregation; energy efficiency; cognitive energy meter.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Medidor de energia: eletromecânico e eletrônico.	37
Figura 2 – Infraestrutura de comunicação.	39
Figura 3 – Rede Inteligente de Energia - Adaptado.	40
Figura 4 – Módulos de um medidor digital de energia.	41
Figura 5 – Sistema de gerenciamento.	45
Figura 6 – Programas de etiquetagem no mundo.	49
Figura 7 – Etiqueta de certificação do Energy Star.	50
Figura 8 – Selo PROCEL de economia de energia.	51
Figura 9 – Curva de carga diária apresentada pelo SINPHA.	52
Figura 10 – Etiqueta de eficiência energética.	53
Figura 11 – Relação entre o consumo de energia elétrica por residência e o preço do kWh.	55
Figura 12 – Avaliação dos métodos de sugestões e recomendações.	61
Figura 13 – Identificação de equipamentos a partir da análise de eventos — variação de consumo.	67
Figura 14 – Etapas do método NILM.	67
Figura 15 – Diagrama da plataforma desenvolvida.	85
Figura 16 – Plataforma de Desenvolvimento.	86
Figura 17 – Pinos disponíveis para conexão.	87
Figura 18 – Placa para condicionamento dos sinais de tensão.	88
Figura 19 – Placa para condicionamento dos sinais de corrente - Sensores LA25-P.	88
Figura 20 – Circuito do conversor A/D.	89
Figura 21 – Conexão entre a PRU1 e o conversor AD.	90
Figura 22 – Leitura dos canais de conversão após a sinalização de uma amostra convertida.	90
Figura 23 – Fluxo de operações da PRU0.	91
Figura 24 – Fluxo de operações da PRU0.	92
Figura 25 – Fluxo de operações da aplicação principal.	93
Figura 26 – Conexão entre os elementos do sistema.	93
Figura 27 – Forma direta 2.	95
Figura 28 – Exemplo de classificação de uma amostra utilizando o algoritmo KNN.	96
Figura 29 – Padrões de consumo para diferentes cargas.	97
Figura 30 – Sistema supervisor — Interface com o usuário.	102
Figura 31 – Consumo desagregado apresentado percentualmente.	102
Figura 32 – Consumo desagregado em kWh e tempo de uso dos eletrodomésticos.	103
Figura 33 – Supervisão do consumo das cargas de interesse.	103

Figura 34 – Variação do consumo de potência ativa.	104
Figura 35 – Classe 1: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	108
Figura 36 – Classe 2: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	109
Figura 37 – Classe 3: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	110
Figura 38 – Classe 4: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	111
Figura 39 – Classe 4: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	112
Figura 40 – Classe 5: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	113
Figura 41 – Classe 6: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	114
Figura 42 – Classe 7: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	116
Figura 43 – Classe 8: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	117
Figura 44 – Classe 9: Potência ativa média dos estados 1 e 2.	118
Figura 45 – Classe 9: Potência ativa média para o estado 3.	119
Figura 46 – Classe 10: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	120
Figura 47 – Classe 11: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	121
Figura 48 – Classe 12: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	122
Figura 49 – Classe 13: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	123
Figura 50 – Classe 14: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	124
Figura 51 – Classe 15: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	125
Figura 52 – Classe 16: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	126
Figura 53 – Classe 17: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	127
Figura 54 – Classe 18: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	128
Figura 55 – Classe 19: Oscilograma e decomposição harmônica de corrente.	130
Figura 56 – Distribuição das cargas considerando potência e fator de potência.	131
Figura 57 – Distribuição das cargas considerando potência ativa e reativa.	131
Figura 58 – Fronteira de decisão das cargas de interesse.	132
Figura 59 – Monitoramento da geladeira.	133
Figura 60 – Monitoramento do micro-ondas na potência média.	133
Figura 61 – Oscilações da potência ativa durante a operação do micro-ondas.	133
Figura 62 – Monitoramento de duas cargas.	134
Figura 63 – Monitoramento de três cargas.	134
Figura 64 – Avaliação de sub-classes: Geladeira.	135
Figura 65 – Geladeira ligada.	135
Figura 66 – Geladeira e Micro-ondas ligados.	136
Figura 67 – Diferença entre formas de onda da corrente - Micro-ondas gerou evento.	136
Figura 68 – Exemplo de classificação de carga.	137
Figura 69 – Exemplo de classificação de carga.	137
Figura 70 – Exemplo de classificação de carga.	138
Figura 71 – Exemplo de classificação de carga.	138
Figura 72 – Desagregação de consumo.	139

Figura 73 – Desagregação de consumo.	140
Figura 74 – Potência Ativa Média (W) - Teste de 24 horas.	140
Figura 75 – Momentos em que o sistema de degelo é ativado - Teste de 24 horas.	141
Figura 76 – Consumo da geladeira.	142
Figura 77 – Consumo padrão — Potência Ativa (W) x Horário.	143
Figura 78 – Desagregação de consumo.	143
Figura 79 – Sugestões e recomendações: Geladeira.	144
Figura 80 – Oscilograma — Partida Fria.	145
Figura 81 – Potência ativa média — Micro-ondas em condições diferentes de operação.	145
Figura 82 – Selo dos aparelhos de micro-ondas analisados.	146
Figura 83 – Sugestões e recomendações: Micro-ondas.	148
Figura 84 – Potência ativa média - Ar condicionado.	148
Figura 85 – Potência ativa média - Micro-ondas em condições diferentes de operação.	149
Figura 86 – Potência ativa média - Ar condicionado split.	150
Figura 87 – Acionamento - Ar condicionado inverter.	151
Figura 88 – Potência ativa média - Ar condicionado inverter.	151
Figura 89 – Sugestões e recomendações: Ar condicionado.	153

Lista de tabelas

Tabela 1 – Condicionador de ar - Janela. Fonte: (MDIC, 2013)	57
Tabela 2 – Condicionares de ar - Split Cassete, HI-WALL e Piso-Teto. Fonte: (MDIC, 2013)	57
Tabela 3 – Equipamentos que utilizam R141b como agente de expansão das espumas.	58
Tabela 4 – Congeladores que utilizam R141b como agente de expansão das espumas.	58
Tabela 5 – Equipamentos que utilizam Ciclopentano como agente de expansão das espumas.	59
Tabela 6 – Congeladores que utilizam Ciclopentano como agente de expansão das espumas.	59
Tabela 7 – Níveis máximos de consumo para refrigeradores e congeladores frost-free.	59
Tabela 8 – Níveis máximos de consumo para refrigeradores e congeladores.	59
Tabela 9 – Índices de eficiência energética para micro-ondas.	60
Tabela 10 – Coeficientes da reta do consumo padrão (2005).	81
Tabela 11 – Classificação do refrigerador em número de estrelas.	82
Tabela 12 – Classe 1: Potência Ativa e Fator de Potência - Compressor ligado.	107
Tabela 13 – Classe 1: Fator de reatividade e não linearidade - Compressor ligado.	108
Tabela 14 – Classe 1: Potência Ativa e Fator de Potência - Sistema de degelo.	108
Tabela 15 – Classe 1: Fator de reatividade e não linearidade - Sistema de degelo.	109
Tabela 16 – Classe 2: Potência Ativa e Fator de Potência.	109
Tabela 17 – Classe 2: Fator de reatividade e não linearidade.	110
Tabela 18 – Classe 3: Potência Ativa e Fator de Potência.	110
Tabela 19 – Classe 3: Fator de reatividade e não linearidade.	110
Tabela 20 – Classe 4: Potência Ativa e Fator de Potência.	112
Tabela 21 – Classe 4: Fator de reatividade e não linearidade.	112
Tabela 22 – Classe 5: Potência Ativa e Fator de Potência.	113
Tabela 23 – Classe 5: Fator de reatividade e não linearidade.	114
Tabela 24 – Classe 6: Potência Ativa e Fator de Potência.	115
Tabela 25 – Classe 6: Fator de reatividade e não linearidade.	115
Tabela 26 – Classe 7: Potência Ativa e Fator de Potência.	115
Tabela 27 – Classe 7: Fator de reatividade e não linearidade.	115
Tabela 28 – Classe 8: Potência Ativa e Fator de Potência.	117
Tabela 29 – Classe 8: Fator de reatividade e não linearidade.	117
Tabela 30 – Classe 9: Potência Ativa e Fator de Potência.	117
Tabela 31 – Classe 9: Fator de reatividade e não linearidade.	118
Tabela 32 – Classe 10: Potência Ativa e Fator de Potência.	119
Tabela 33 – Classe 10: Fator de reatividade e não linearidade.	119

Tabela 34 – Classe 11: Potência Ativa e Fator de Potência.	121
Tabela 35 – Classe 11: Fator de reatividade e não linearidade.	121
Tabela 36 – Classe 12: Potência Ativa e Fator de Potência.	122
Tabela 37 – Classe 12: Fator de reatividade e não linearidade.	122
Tabela 38 – Classe 13: Potência Ativa e Fator de Potência.	123
Tabela 39 – Classe 13: Fator de reatividade e não linearidade.	123
Tabela 40 – Classe 14: Potência Ativa e Fator de Potência.	124
Tabela 41 – Classe 14: Fator de reatividade e não linearidade.	125
Tabela 42 – Classe 15: Potência Ativa e Fator de Potência.	125
Tabela 43 – Classe 15: Fator de reatividade e não linearidade.	125
Tabela 44 – Classe 16: Potência Ativa e Fator de Potência.	126
Tabela 45 – Classe 16: Fator de reatividade e não linearidade.	126
Tabela 46 – Classe 17: Potência Ativa e Fator de Potência.	127
Tabela 47 – Classe 17: Fator de reatividade e não linearidade.	127
Tabela 48 – Classe 18: Potência Ativa e Fator de Potência.	129
Tabela 49 – Classe 18: Fator de reatividade e não linearidade.	129
Tabela 50 – Classe 19: Potência Ativa e Fator de Potência.	129
Tabela 51 – Classe 19: Fator de reatividade e não linearidade.	129

Lista de abreviaturas e siglas

AD	Analógico—Digital
AFE	Analog Front End Metrology chip
ALM	Appliance Load Monitoring
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMR	Automatic Meter Reading
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BBB	Beagle Bone Black
BPL	Broadband over Power Lines
CEE	Coefficiente de Eficiência Energética
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
CLASP	Collaborative Labeling and Appliance Standards Program
CONPET	Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e Gás Natural
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CPT	Conservative Power Theory
CS	Chip Select
DFT	Discret Fourier Transform
DIN	Data Input
DOE	Department of Energy (Estados Unidos)
DOUT	Data Output
DRDY	Data Ready
DSP	Digital Signal Processor
DT	Decision Tree
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPA	Environmental Protection Agency (Estados Unidos)
FEEC	Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FFT	Fast Fourier Transform
GASI	Grupo de Automação e de Sistemas Integráveis
GPRS	General Packet Radio Service
HAN	Home Area Network
HMM	Hidden Markov Models
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IDEC	Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor
IGSD	Institute for Governance and Sustainable Development
IHD	in-home display
ILM	Intrusive Load Monitoring
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
KNN	K-Nearest Neighbor
LCD	Liquid-crystal display
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MEPS	Minimum Energy Performance Standards
MISO	Master Input Slave Output
MLP	Multilayer Perceptron
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSI	Master Output Slave Input
NBR	Norma Brasileira aprovada pela ABNT
NILM	Non-intrusive Load Monitoring
NN	Neural Network
OPF	Optimum Path Forest

PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PAN	Personal Area Network
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas
PLC	Power Line Communication
PNE2030	Plano Nacional de Energia para 2030
PPE2020	Plano Paulista de Energia para 2020
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRU	Programmable Real Time Unit
RF	Rádio frequência
RTC	relógio de tempo real
RTQ	Regulamento Técnico da Qualidade
SCLK	Serial Clock
SINPHA	Sistema de Informação de Posses e Hábitos de Uso de Aparelhos Elétricos
SMS	Smart Metering Systems
SOC	System-On-Chip
SVM	Support Vector Machine
WEB	World Wide Web
WMAN	Wireless Metropolitan Access Network

Lista de símbolos

A	Potência aparente
AV	Volume ajustado
B_μ	Reatividade equivalente da fase
C	Consumo declarado
Cp	Consumo padrão
D	Potência residual
EF	Efeito térmico
f	Frequência do sistema elétrico
G_μ	Condutância equivalente da fase
G^b	Condutância equivalente balanceada de todas as fases
$\underline{i}$	Vetor das correntes instantâneas das fases
i_μ	Corrente instantânea de fase
$i_{a\mu}$	Corrente ativa de fase
$\underline{i}_{a\mu}^b$	Corrente ativa balanceada instantânea de fase
$\underline{i}_{a\mu}^u$	Corrente ativa desbalanceada instantânea de fase
$\underline{i}_a^b$	Corrente ativa balanceada
$\underline{i}_a^u$	Corrente ativa desbalanceada
$\underline{I}_a^b$	Corrente ativa balanceada eficaz
$\underline{I}_a^u$	Corrente ativa desbalanceada eficaz
i_u	Corrente de desbalanço
$i_{r\mu}$	Corrente reativa de fase
$\underline{i}_{r\mu}^b$	Corrente reativa balanceada instantânea de fase
$\underline{i}_{r\mu}^u$	Corrente reativa desbalanceada instantânea de fase

i_v	Corrente residual
$\underline{i}_r^b$	Corrente reativa balanceada
$\underline{i}_r^u$	Corrente reativa desbalanceada
$\underline{I}_r^b$	Corrente reativa balanceada eficaz
$\underline{I}_r^u$	Corrente reativa desbalanceada eficaz
i_d	Corrente residual
I_d	Corrente residual eficaz
I_e	Índice de eficiência energética
N	Potência de desbalanço
N_a	Potência ativa de desbalanço
N_u	Potência reativa de desbalanço
p	Potência ativa instantânea
$p(t)$	Potência ativa instantânea
P	Potência ativa média
P_μ	Potência ativa média por fase
Q	Potência reativa média
t	Tempo
T	Tempo de ciclo (inverso da frequência)
$\underline{v}$	Vetor das tensões instantâneas das fases
v_μ	Tensão instantânea de fase
$\hat{v}$	Integral imparcial instantânea das tensões
$\hat{v}_\mu$	Integral imparcial instantânea da tensão de fase
$\underline{\hat{v}}$	Vetor da integral imparcial das tensões
V_c	Volume do congelador em litros
V_r	Volume do refrigerador em litros
w	Energia reativa instantânea

$w(t)$	Energia reativa instantânea
W	Energia reativa média
W_μ	Energia reativa média por fase
W_c	Potência nominal em Watts
$\bar{x}$	Valor médio de uma variável
$x_f(t)$	Integral no tempo da variável $x(t)$
$\hat{x}(t)$	Integral imparcial de $x(t)$
λ	Fator de Potência
λ_d	Fator de não-linearidade
λ_Q	Fator de Reatividade
λ_U	Fator de Assimetria
ω	Frequência angular $2\pi f$

Sumário

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Contextualização	31
1.2	Motivação	32
1.3	Justificativa e objetivos	33
1.4	Organização do trabalho	35
2	MEDIDORES INTELIGENTES DE ENERGIA	37
2.1	Caracterização do medidor digital	40
2.1.1	Sensoriamento, condicionamento e digitalização de sinais	42
2.1.2	Unidade de processamento	42
2.1.3	Memória de armazenamento em massa	42
2.1.4	Interface de comunicação	42
2.1.5	Interface homem-máquina	43
2.2	Considerações sobre o medidor digital	43
2.3	Medidores Cognitivos de Energia: Perspectivas e Tendências	44
2.4	Conclusões parciais	45
3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	47
3.1	Consumo eficiente de energia elétrica	47
3.2	Programas de eficiência energética	48
3.2.1	Panorama mundial	48
3.2.1.1	Minimum Energy Performance Standard	49
3.2.1.2	Energy Star	49
3.2.1.3	Collaborative Labeling and Appliance Standards Program	50
3.2.2	Ações de eficiência energética no Brasil	50
3.2.2.1	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica	50
3.2.2.2	Programa Brasileiro de Etiquetagem	53
3.2.2.3	Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e Gás Natural	54
3.2.2.4	Lei de Eficiência Energética	54
3.2.2.5	Plano Paulista de Energia	54
3.3	Eficiência energética nas residências	54
3.3.1	Consumo energético na climatização	56
3.3.2	Consumo energético nos equipamentos de refrigeração	58
3.3.3	Consumo energético nos fornos de micro-ondas	60
3.4	Aplicação de medidores cognitivos	61

3.5	Conclusões Parciais	63
4	TÉCNICAS APLICADAS E METODOLOGIA PROPOSTA	65
4.1	Reconhecimento de cargas residenciais	65
4.1.1	Assinatura de potência	65
4.1.2	Categorização das técnicas de monitoramento	66
4.1.2.1	Abordagem intrusiva ou distribuída - ILM	66
4.1.2.2	Abordagem não intrusiva ou concentrada - NILM	67
4.1.2.3	Abordagem semi intrusiva ou semi distribuída - SILM	68
4.1.2.4	Considerações sobre a abordagem NILM	68
4.2	Teoria de potência conservativa	69
4.2.1	Potência e Energia	71
4.2.2	Decomposição da corrente de fase	73
4.2.3	Decomposição da potência do sistema	75
4.2.4	Caracterização de cargas	77
4.3	Metodologia proposta	78
4.3.1	Cargas residenciais de interesse	80
4.3.1.1	Geladeiras	80
4.3.1.2	Condicionadores de ar	82
4.3.1.3	Micro-ondas	82
4.3.1.4	Considerações sobre os indicadores	83
4.4	Conclusões Parciais	84
5	PROPOSTA DE MEDIDOR COGNITIVO RESIDENCIAL	85
5.1	Caracterização do sistema	85
5.2	Descrição dos elementos de hardware	85
5.2.1	Plataforma de desenvolvimento	85
5.2.2	Condicionamento dos sinais analógicos	87
5.2.3	Conversor analógico/digital	88
5.3	Aquisição de dados	89
5.4	Algoritmos implementados	94
5.4.1	Procedimento de cálculo da CPT	94
5.4.2	Algoritmo de Goertzel	94
5.4.3	Algoritmo de classificação KNN	95
5.4.4	Monitoramento de cargas	97
5.4.5	Desagregação do consumo de energia	101
5.5	Sistema supervisório	101
5.6	Conclusões Parciais	104
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	107

6.1	Coleta de dados	107
6.1.1	Classe 1: Geladeira	107
6.1.2	Classe 2: Micro-ondas	109
6.1.3	Classe 3: Purificador de água	110
6.1.4	Classe 4: Notebook	111
6.1.5	Classe 5: Aparelho de som	113
6.1.6	Classe 6: Televisão LED	114
6.1.7	Classe 7: Liquidificador	115
6.1.8	Classe 8: Televisão LCD	116
6.1.9	Classe 9: Máquina de lavar roupas	117
6.1.10	Classe 10: Secador de cabelos	119
6.1.11	Classe 11: Lâmpada Fluorescente	120
6.1.12	Classe 12: Computador de mesa	121
6.1.13	Classe 13: Forno Elétrico	122
6.1.14	Classe 14: Monitor LCD-LED-Tubo	123
6.1.15	Classe 15: Lâmpada LED	125
6.1.16	Classe 16: Ferro de Passar Roupa	126
6.1.17	Classe 17: Lâmpada Incandescente	126
6.1.18	Classe 18: Fritadeira Elétrica	128
6.1.19	Classe 19: Ar condicionado	129
6.2	Formação da base de dados	130
6.3	Metodologia para o monitoramento e classificação de cargas	132
6.3.1	Avaliação da metodologia e atualização da base de dados	134
6.3.2	Reconhecimento dos eletrodomésticos	135
6.4	Desagregação do consumo	139
6.5	Avaliação do consumo de energia	140
6.5.1	Geladeiras	140
6.5.1.1	Avaliação do consumo da geladeira	141
6.5.1.2	Sugestões e recomendações	144
6.5.2	Micro-ondas	144
6.5.2.1	Avaliação do consumo do micro-ondas	146
6.5.2.2	Sugestões e recomendações	147
6.5.3	Condicionadores de ar	148
6.5.3.1	Avaliação do consumo do ar condicionado split	149
6.5.3.2	Estudo de caso: ar condicionado split inverter	150
6.5.3.3	Sugestões e recomendações	152
6.6	Conclusões Parciais	153
6.7	Considerações Finais	154
7	CONCLUSÃO	157

7.1	Contribuições	158
7.2	Trabalhos futuros	158
	REFERÊNCIAS	161
	APÊNDICES	169
	APÊNDICE A – PROTÓTIPO DO MEDIDOR.	171
	ANEXOS	173
	ANEXO A – CIRCUITOS DE CONDICIONAMENTO.	175

1 Introdução

1.1 Contextualização

Energia elétrica é considerada um bem fundamental para sociedade moderna (BARAI; KRISHNAN; VENKATESH, 2015). Nesse sentido, o crescimento global da demanda por energia traz à tona questões relacionadas com o impacto ambiental, social e econômico. Como consequência disso, há uma crescente busca por alternativas que resultem em ações concretas para utilização da energia de maneira eficiente, atendendo as necessidades atuais, e promovendo o desenvolvimento sustentável (IEA, 2013). Assim, para o gerenciamento do uso de energia, os medidores de energia elétrica são necessários tanto para as concessionárias quanto para os consumidores. Nesse cenário, o medidor de energia é considerado um dos pilares da infraestrutura de um sistema elétrico (EPRI, 2010).

Uma abordagem para atender as necessidades atuais de melhor gestão e uso eficiente de energia elétrica é a criação das Redes Inteligentes de Energia (do inglês, Smart Grids) e da infraestrutura de medição inteligente (BARAI; KRISHNAN; VENKATESH, 2015). Nesse contexto, há um grande interesse em desenvolver tecnologias que possibilitem os consumidores residenciais a se conscientizarem em relação aos seus hábitos de consumo e ao uso racional desse recurso (WERANGA; CHANDIMA; KUMARAWADU, 2012). Diante disso, novos medidores de energia elétrica vem sendo desenvolvidos para prover informações detalhadas sobre o consumo de energia elétrica em comparação aos medidores tradicionais. Tais dispositivos são conhecidos como medidores inteligentes de energia (do inglês, smart energy meters) e possibilitam maior exatidão de medição, capacidade de armazenamento, envio automático de informações de consumo e integração com sistemas de gerenciamento de energia (BARAI; KRISHNAN; VENKATESH, 2015; OPRIS; CARACASIAN, 2013b; ZHENG; GAO; LIN, 2013). Dos medidores inteligentes, destacam-se as seguintes características (ZHENG; GAO; LIN, 2013):

- Qualidade e clareza das informações coletadas;
- Disponibilização de informações que impactem diretamente sob o comportamento do consumidor;
- Possibilidade de consulta dos consumos anteriores, ou ainda das médias de consumo;
- Previsões baseadas no histórico comportamental da residência e também da região onde está localizado;
- Controle dos gastos.

Atualmente, um dos principais temas destacados na literatura é a utilização dos medidores inteligentes de energia para realizar a desagregação do consumo por cargas (XU; MILANOVIĆ, 2015). Tal função também é destacada como um aprimoramento dos medidores inteligentes, denominado medidor cognitivo de energia (MAKONIN; POPOWICH; GILL, 2013; MAKONIN et al., 2013).

Do dicionário Michaelis, a palavra cognitivo é um adjetivo que se refere à cognição ou ao conhecimento; na psicologia, cita-se de estados ou processos que se relacionam à identificação de um conhecimento dedutível e à solução de tarefas e problemas específicos; na linguística, refere-se ao processo mental de percepção, juízo, memória e raciocínio. A partir dessas definições pode-se dizer que a cognição está relacionada com a acumulação de informações adquiridas a partir da experiência e dos conhecimentos obtidos a partir dessas experiências. Já no ramo da computação, embora não haja consenso sobre uma definição da computação cognitiva, pode-se considerar que é a computação aplicada à geração de conhecimento a partir da interpretação e extração — experiência — de significado dos dados (VARGA; ROTTA, 2018).

Destacado o significado, entre as principais aplicações dos medidores cognitivos destacam-se: o monitoramento do consumo de energia no ambiente residencial e a criação de mecanismos que possibilitem os consumidores entenderem seus hábitos de consumo e reduzirem gastos com energia elétrica (MAKONIN et al., 2013; WERANGA; CHANDIMA; KUMARAWADU, 2012).

Assim, esse trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um medidor cognitivo de energia elétrica para ser utilizado no contexto residencial, enfatizando sua aplicação em questões relacionadas à eficiência energética de eletrodomésticos. Para tal, as informações de consumo padrão indicadas na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) serão utilizadas para comparação do consumo medido pelo sistema desenvolvido.

1.2 Motivação

Com o crescimento de demanda por energia elétrica, principalmente nas áreas urbanas, novas abordagens têm sido propostas para tornar os sistemas de energia mais eficientes (IEA, 2013). Nesse contexto, em muitos países, os medidores de energia tradicionais têm sido substituídos pelos medidores de energia inteligentes (OPRIS; CARACASIAN, 2013a).

Com o avanço da eletrônica e das tecnologias de comunicação, tais dispositivos passaram por diversas modificações em um curto período. Como consequência disso, nenhuma tecnologia foi totalmente consolidada. Contudo, a capacidade de coletar informações de consumo em tempo real vem alterando a forma de como os sistemas de energia tradicionais são estruturados, isto é, a integração entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica tem aumentado conforme o avanço da tecnologia

(OPRIS; CARACASIAN, 2013a). Isso possibilita a melhor gestão e controle do uso de energia elétrica, tendo como objetivo o aumento da eficiência energética e a redução da emissão de gases que provocam o efeito estufa. Nesse cenário, os medidores inteligentes são essenciais para obter informações detalhadas sobre o consumo de energia elétrica (OPRIS; CARACASIAN, 2013b; ZHOU; XU; MA, 2010).

No contexto residencial, os consumidores podem se beneficiar em diversos sentidos, pois com informações detalhadas de consumo poderão estimar seus gastos com energia elétrica, receber informações que levem ao conhecimento de seus hábitos de consumo e ao gerenciamento do próprio consumo de energia elétrica (MAKONIN et al., 2013; WERANGA; CHANDIMA; KUMARAWADU, 2012; ZHOU; XU; MA, 2010).

Além disso, a capacidade de receber informações possibilita a criação de programas de conscientização que podem reduzir o consumo de energia a partir da interação criada com o consumidor (MAKONIN et al., 2013).

1.3 Justificativa e objetivos

As Redes Elétricas Inteligentes constituem hoje um tema amplamente discutido em todo o mundo, com objetivo de desenvolver técnicas, produtos e padrões que permitam monitorar e gerenciar o fluxo de energia de forma eficaz, nos sistemas de energia modernos. Assim, o desenvolvimento tecnológico é necessário para criar soluções que resultem na redução e melhor uso da energia. No contexto residencial, uma das soluções que podem ser adotadas é a utilização de dispositivos que permitam monitorar o consumo de energia. Com a substituição dos medidores convencionais para os chamados medidores inteligentes isso se torna possível (MAKONIN; POPOWICH; GILL, 2013).

Diante disso, o desenvolvimento de tecnologias para medição de energia elétrica têm sido impulsionado devido às necessidades latentes de melhoria de gestão e eficiência da medição de energia. No entanto, a organização da rede deve ser repensada, tendo como iniciativa e tendência o desenvolvimento de projetos de infraestrutura de medição inteligente. À vista disso, os medidores inteligentes são os elementos base para construção de uma rede elétrica inteligente (CGEE, 2013). Além dos indicadores de consumo, os dados coletados pelos medidores contêm várias informações úteis, sendo uma delas o acompanhamento do consumo e dos estados dos eletrodomésticos conectados à rede elétrica (MAKONIN; POPOWICH; GILL, 2013).

Nesse contexto, a aplicação dos medidores inteligentes de energia é vista como essencial para que os consumidores possam se conscientizar em relação ao seu próprio consumo de energia. Assim, a utilização de medidores inteligentes pode trazer diversos benefícios ao consumidor residencial, incluindo a redução de gastos, melhor qualidade de serviço das concessionárias e até novos modelos de tarifação (WERANGA; CHANDIMA;

KUMARAWADU, 2012).

As ações voltadas à eficiência energética tem grande potencial para criar equipamentos e serviços que favoreçam consumidores e concessionárias. De modo geral, a sociedade inteira é beneficiada, pois consumidores podem se conscientizar em relação aos seus hábitos de consumo e fazer o uso racional de energia elétrica (LEIVA; PALACIOS; AGUADO, 2016). À vista disso, informações detalhadas e em tempo real sobre consumo de energia elétrica podem auxiliar na criação de técnicas e políticas que aumentem a eficiência energética (BARKER et al., 2014).

Nesse contexto, a aplicação de técnicas para realizar análise e desagregação do consumo de cargas tem ganhado atenção significativa (XU; MILANOVIĆ, 2015), principalmente no setor residencial. Com a utilização dessa técnica de desagregação o conceito de medidor inteligente pode ser redefinido, sendo chamado de medidor cognitivo (MAKONIN; POPOWICH; GILL, 2013). Com isso, o próprio medidor de energia pode ser utilizado como ferramenta para fornecer sugestões de consumo com base em informações extraídas pelo monitoramento de cargas e do conhecimento de hábitos dos consumidores (MAKONIN et al., 2013; BARKER et al., 2014).

Considerando os temas destacados, esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor cognitivo de energia elétrica, tendo em vista sua aplicação no monitoramento de cargas residenciais de interesse. Essa característica pode ser obtida a partir do método chamado monitoramento de cargas não intrusivo, o qual faz uso de um sistema de monitoramento concentrado em apenas um ponto de medição (PAC — Ponto de Acoplamento Comum), e de técnicas para reconhecimento de padrões das assinaturas de potência dos eletrodomésticos. Diante disso, a decomposição da potência elétrica em diversas subcomponentes possibilita análise detalhada da carga. Uma metodologia é conhecida como Teoria de Potência Conservativa (CPT – Conservative Power Theory) (PAREDES, 2011), (TENTI; MATTARELLI, 2003).

A proposta dessa dissertação se apoia no trabalho realizado por Souza (SOUZA, 2016) que contribuiu com a criação de um sistema de monitoramento não intrusivo, além de analisar diversas técnicas de reconhecimento de padrões aplicadas para classificação de cargas residenciais. Tal proposta constitui um sistema voltado ao consumidor residencial, enfatizando a aplicação de um sistema de supervisão do consumo de energia elétrica.

Considerando os resultados obtidos e o modelo conceitual de medidor cognitivo desenvolvido por Souza (SOUZA, 2016), o principal objetivo deste trabalho é desenvolver e utilizar um medidor cognitivo de energia para avaliação de eficiência energética de cargas residenciais.

Assim, a principal contribuição dessa dissertação é o desenvolvimento de metodologias que permitem discriminar o consumo energético individual de eletrodomésticos, com

intuito de verificar se essas operam dentro dos padrões de eficiência energética definidos na ENCE. Além disso, o medidor cognitivo será utilizado para apresentar informações detalhadas relacionadas ao consumo de energia e indicadores de eficiência energética. À vista disso, foram escolhidas três cargas principais, considerando o impacto no consumo de energia residencial: geladeiras, aparelhos de micro-ondas e condicionadores de ar.

1.4 Organização do trabalho

Este primeiro capítulo apresentou uma breve contextualização do trabalho, destacando as motivações e objetivos do seu desenvolvimento. As definições dos conceitos apresentados são detalhadas nos capítulos seguintes.

No segundo capítulo é apresentado um panorama sobre a medição de energia elétrica, destacando a evolução dos instrumentos utilizados, bem como as perspectivas e tendências no cenário das Redes Inteligentes de Energia. Além disso, o instrumento de medição é caracterizado, enfatizando suas características construtivas e tecnologias utilizadas.

O terceiro capítulo é estruturado para conceituar eficiência energética. Assim, é destacada a importância do consumo de energia elétrica de maneira eficiente e os principais programas voltados a eficiência energética. Tais programas são apresentados em nível mundial e, posteriormente, são apresentadas as ações realizadas no Brasil com ênfase no Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Diante disso, a aplicação de medidores inteligentes de energia é apresentada como ferramenta necessária para informar e conscientizar o consumidor em relação aos seus hábitos de consumo de energia elétrica.

No quarto capítulo são apresentadas as técnicas de reconhecimento de equipamentos (ou cargas residenciais), enfatizando a abordagem não intrusiva. Além disso, esse capítulo descreve as definições recentes da Teoria de Potência Conservativa, a qual permite o cálculo de componentes de corrente e potência diretamente relacionadas ao comportamento dos circuitos elétricos em condições de operação senoidais ou não senoidais, simétricas ou assimétricas. Essas duas subseções foram organizadas para apresentar a metodologia de reconhecimento de cargas proposta nesse trabalho, bem como as características de operação das cargas de interesse.

A plataforma de hardware desenvolvida é caracterizada no quinto capítulo. Nesse capítulo também são apresentados os algoritmos utilizados em todas as etapas de operação: Aquisição de dados, processamento de dados, sistema de reconhecimento de cargas e desagregação de consumo.

Os resultados e a discussão em relação as informações obtidas são apresentadas no capítulo 6. Assim, o capítulo descreve o procedimento experimental elaborado para coletar

as informações e os procedimentos de teste aplicados.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões da dissertação e a proposta para futuros trabalhos.

7 Conclusão

Com ênfase em questões relacionadas à eficiência energética, a proposta desse trabalho foi analisar algumas das principais fontes de consumo de energia elétrica em uma residência. Para tal, desenvolveu-se um medidor cognitivo de energia elétrica, empregando técnicas que possibilitam desagregar, identificar e caracterizar essas cargas residenciais, com intuito de verificar se essas operam dentro dos padrões de eficiência energética definidos pelo Procel. À vista disso, foram escolhidas três cargas principais, considerando o impacto no consumo de energia residencial: geladeiras, aparelhos de micro-ondas e condicionadores de ar.

A revisão bibliográfica indicou as técnicas que podem ser aplicadas no monitoramento de cargas residenciais, sendo categorizadas como intrusivas, não intrusivas e semi-intrusivas. A técnica aplicada foi a de monitoramento não intrusivo de cargas, na qual o elemento medidor analisa o consumo total de todos os equipamentos conectados à rede com objetivo de realizar a desagregação do consumo de energia elétrica.

Entre as propostas estudadas, considerou-se o medidor inteligente cognitivo residencial desenvolvido por Souza (SOUZA, 2016). Nessa proposta, o sistema de identificação de cargas representa um eletrodoméstico utilizando informações de potência ativa, fator de potência, fator de reatividade e fator de não linearidade, obtidos pela Teoria de Potência Conservativa. Explorando sua aplicação no setor residencial, Souza (SOUZA, 2016) desenvolveu sistema de supervisão de consumo para fornecer informações detalhadas para o consumidor residencial.

À vista disso, o protótipo de medidor cognitivo desenvolvido apresentou melhoramentos no sistema de aquisição de dados e explorou a utilização do consumo desagregado para avaliação do consumo padrão de eletrodomésticos de interesse, utilizando as informações especificadas na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia.

Por fim, a utilização do protótipo possibilitou o desenvolvimento das propostas e a conclusão dos objetivos estabelecidos. Com resultado obtido em ambiente de testes, o trabalho aponta para utilização de medidores de energia como meio de comunicação com o consumidor residencial uma vez que o dispositivo medidor pode ser utilizado para fornecer sugestões e recomendações, bem como avaliar consumo e realizar diagnósticos de operação dos eletrodomésticos.

7.1 Contribuições

A principal contribuição foi apresentar a utilização do medidor de energia elétrica para monitorar eletrodomésticos e avaliar o consumo padrão apresentado na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. Com isso, um canal de comunicação com o consumidor pôde ser estabelecido para fornecer sugestões e recomendações sobre o eletrodoméstico, bem como para conscientizar-se em relação ao consumo de energia elétrica.

Além disso, a metodologia proposta para realizar a desagregação do consumo de energia, denominada desagregação por blocos, mostrou-se eficiente para cargas que não apresentam variações significativas no consumo. Cabe ainda ressaltar que a desagregação é realizada no instante em que a carga é monitorada.

7.2 Trabalhos futuros

Devido a simplicidade do algoritmo de monitoramento de eventos, variações graduais e lentas do consumo de potência ativa não são detectadas. Assim, novas metodologias podem ser estudadas para identificar esses comportamentos. Como consequência disso, a metodologia de desagregação por blocos pode ser reestruturada para considerar cargas de consumo variável.

Outra questão apontada no trabalho está relacionada eletrodomésticos que apresentam vários modos de operação. Como indicado no caso da geladeira, a solução foi criar uma máquina de estados. Tal condição implica em criar um sistema estático e dependente do comportamento da carga. Nesse sentido, a arquitetura de uma máquina de estados configurável em tempo de execução pode ser utilizada.

Além disso, destacou-se que a base de conhecimento pode ser atualizada dinamicamente. Com isso, as fronteiras de decisão entre classes podem ser aperfeiçoadas para eliminar erros de classificação. Outra possibilidade é a inserção de novas classes na base de conhecimento. Para tal, um modelo com a base de conhecimento hospedada remotamente (em nuvem) pode ser elaborado. Assim, o medidor cognitivo poderá acessar a base de dados remota periodicamente com objetivo de atualizar a base de dados local, facilitando o procedimento de classificação.

As cargas de interesse foram selecionadas considerando o impacto no consumo de energia residencial. No entanto, grande parte dos condicionares de ar são bifásicos. Embora esses aparelhos tenham sido avaliados no trabalho, o sistema proposto é de um medidor monofásico. Diante disso, o sistema pode ser alterado para medir mais de uma fase. Como consequência, os algoritmos da CPT e a metodologia de classificação de cargas devem ser alterados para suportar o sistema bifásico.

Nesse contexto, as cargas de interesse podem ser determinadas pelo usuário. Para

tal, uma interface de cadastro de eletrodomésticos pode ser criada para registrar no medidor os parâmetros da ENCE.

Em relação ao procedimento realizado para monitorar os eletrodomésticos, é interessante fazer um estudo considerando período superior a um ano. Pois, como destacado, o consumo de alguns eletrodomésticos como a geladeira são influenciados conforme as variações de temperatura. Assim sendo, o procedimento de análise considerando um ano inteiro aproximará com maior exatidão o consumo padrão. Com isso também é possível avaliar a questão da degradação de eficiência energética do eletrodoméstico. Isto é, se o equipamento passa a consumir mais ao longo da vida útil.

Por fim, assim como os programas de eficiência energética, os benefícios gerados — em relação a redução de consumo — só podem ser definidos se for realizada uma análise comparativa entre um período anterior a utilização do medidor cognitivo de energia e um período posterior a aplicação.

Referências

ACEEE. *State regulators can play a critical role in unleashing building energy data*. 2017. Disponível em: <<http://aceee.org/blog/2017/04/state-regulators-can-play-critical>>. Citado na página 63.

AKAGI, H.; NABAE, A. The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions. *ETEP European Transaction on Electrical Power Engineering*, v. 3, n. 1, p. 27–31, 1993. Citado na página 69.

ALMEIDA, L. R. de. *Modelagem para análise de desempenho de fornos micro-ondas no contexto da qualidade de energia elétrica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 83 e 144.

ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 395, DE 15 DE DEZEMBRO DE 2009*. 2009. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002015.pdf>>. Citado na página 53.

ANEEL. *Nota Técnica nº 0098/2012-SRD/ANEEL*. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/resultado/nota_tecnica_0098_srd-aneel.pdf>. Citado na página 155.

ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 502, DE 7 DE AGOSTO DE 2012*. 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/ren2012502.pdf/fc281535-189c-46d6-b7aa-ba7733985ccc?version=1.0>>. Citado na página 155.

BARAI, G. R.; KRISHNAN, S.; VENKATESH, B. Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - a review. *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, p. 138–145, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 31, 39, 40 e 41.

BARKER, S. et al. *Empirical Characterization, Modeling, and Analysis of Smart Meter Data*, v. 32, n. 7, 2014. Citado na página 34.

BASU, K. et al. Nonintrusive load monitoring: A temporal multilabel classification approach. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, v. 11, n. 1, 2015. Citado na página 68.

BOGILA, A. *Teorias de Potência Conservativa e Instantânea: Análise Comparativa*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — FEB/UNESP, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 76.

CARDOSO, R. B. *Avaliação da Economia de Energia atribuída ao Programa Selo PROCEL em Freezers e Refrigeradores*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2008. Citado na página 83.

CARRIARMEL, K. et al. Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? the case of electricity. *Energy Policy*, n. 52, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 41, 62 e 63.

CEMIG. *Guia do melhor consumo: Dicas de economia de energia e segurança com a rede elétrica*. 2014. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Eficiencia_Energetica/Documents/GUIA%20MELHOR%20CONSUMO_CARTILHA.pdf>. Citado na página 60.

CGEE. *Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional*. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 33, 40 e 43.

CHANG, H.-H. et al. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012. Citado na página 68.

CHOI, T.-S. et al. Analysis of energy savings using smart metering system and ihd (in-home display). *IEEE T&D Asia*, 2009. Citado na página 44.

CLASP. *Air Conditioner*. Disponível em: <<http://clasp.ngo/Why-Standards-and-Labels/ac>>. Citado na página 56.

CLASP. *Brazil*. Disponível em: <<http://clasp.ngo/OLD%20ITEMS/PastProgramLocations/Brazil>>. Citado na página 56.

CLASP. *Brazil - Cooking & Dishwashing, Microwave - Residential*. Citado na página 60.

CLASP. *Brazil - Heating & Air Conditioning, Room AC - Residential*. Disponível em: <http://clasp.ngo/Tools/Tools/SL_Search/SL_SearchResults/SL%20Detail%20Page?m=8fa3c303-a367-443f-b1d8-6e3ec5af6a7d>. Citado na página 56.

CLASP. *Brazil - Heating & Air Conditioning, Room AC - Residential*. Disponível em: <http://clasp.ngo/Tools/Tools/SL_Search/SL_SearchResults/SL%20Detail%20Page?m=96940e6f-6078-4d8c-9521-71aab38c3b35>. Citado na página 57.

CLASP. *Brazil - Refrigeration, Refrigerator - Residential*. Citado na página 58.

CLASP. *Forecast on Cooling*. Disponível em: <<http://clasp.ngo/en/Resources/Resources/Headlines/2016/Forecast-on-Cooling>>. Citado na página 56.

COVER, T.; HART, P. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 3, p. 21–27, 1967. Citado 2 vezes nas páginas 95 e 96.

CPFL. *CPFL Energia traz 10 dicas para utilizar o ar-condicionado de maneira econômica, segura e inteligente*. 2016. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/releases/Paginas/ar-condicionado-dez-16.aspx>>. Citado na página 56.

CZARNECKI, L. Currents' physical components (cpc) concept: a fundamental of power theory. *Proc. of the International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, 2008. Citado na página 69.

DEPENBROCK, M. Quantities of a multiterminal circuit determined on the basis of kirchhoff's laws. *ETEP European Transaction on Electrical Power Engineering*, v. 8, n. 4, p. 249–257, 1998. Citado na página 69.

DONG, M. et al. An eventwindow based load monitoring technique for smart meters. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, v. 3, n. 2, p. 787–796, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 68.

DUARTE, L. F. C. *SISTEMA NÃO INVASIVO DE MONITORAMENTO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM CONJUNTOS NEBULOSOS*. Tese (Doutorado) — FEEC/UNICAMP, 2015. Citado na página 68.

EHRHARDT-MARTINEZ, K.; DONNELLY, K. A.; LAITNER, J. A. *Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities*. 2010. Citado 3 vezes nas páginas 61, 62 e 63.

ELETROBRAS. *DICAS DE ECONOMIA DE ENERGIA POR SETOR DE CONSUMO*. 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7B78C3767C-76C3-4A2C-BBBE-AE52D88C0EDE%7D&ServiceInstUID=%7B46764F02-4164-4748-9A41-C8E7309F80E1%7D>>. Citado na página 55.

EPRI. *Accuracy of Digital Electricity Meters*. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 37.

FORTES, M. Z. et al. Análise da adoção de medidores inteligentes como instrumento da política pública de eficiência energética. *ENGEVISTA*, v. 19, n. 2, p. 316–327, 2017. Citado na página 155.

FOUDEH, H. A.; MOKHTAR, A. S. Automated meter reading and advanced metering infrastructure projects. *9th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference (JIEEEEC)*, p. 1–6, 2015. Citado na página 38.

FRYZE, S. Active, reactive, and apparent power in non-sinusoidal systems. *Przeglad Elektrot.*, n. 7, p. 193–203, 1932. Citado na página 69.

FUGITA, S. D. *Smart Meter Integrado a Analisador de Qualidade de Energia para Propósito de Identificação de Cargas Residenciais*. Tese (Doutorado) — EESC/USP, 2014. Citado na página 68.

GUO, Z.; WANG, Z. J.; KASHANI, A. Home appliance load modeling from aggregated smart meter data. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, v. 30, n. 1, 2015. Citado na página 69.

HART, G. W. Nonintrusive appliance load monitoring. *Proceedings of the IEEE*, v. 80, n. 12, p. 1870–1891, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 130.

IDEC. *Quanto você gasta com energia elétrica?* 2013. Disponível em: <http://www.idec.org.br/uploads/revistas_materias/pdfs/173-capal.pdf>. Citado na página 55.

IEA. *Technology Roadmap: Energy efficient building envelopes*. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

IEA. *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. 2014. Citado na página 47.

IEA. *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics*. 2014. Citado na página 47.

IEA. *Energy Efficiency Market Report*. 2016. Citado na página 47.

- INMETRO. *Tabelas de consumo/eficiência energética: Condicionadores de ar*. 2017. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores.asp>>. Citado na página 56.
- ISA, M. A. H. M. et al. Android-based application for real time energy monitoring of domestic electricity. *IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC 2015)*, 2015. Citado na página 44.
- KOUTITAS, G. C.; TASSIULAS, L. Low cost disaggregation of smart meter sensor data. *IEEE SENSORS JOURNAL*, v. 16, n. 6, p. 71–97, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 65, 66 e 68.
- LANDI, C.; MEROLA, P.; IANNIELLO, G. Arm-based energy management system using smart meter and web server. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2011. Citado na página 44.
- LEITE, D. R. V. *MEDIDORES ELETRÔNICOS: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA NO CONTEXTO DAS REDES INTELIGENTES*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2013. Citado na página 155.
- LEIVA, J.; PALACIOS, A.; AGUADO, J. A. Smart metering trends, implications and necessities: A policy review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 55, p. 227–233, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 34, 43 e 44.
- MAKONIN, S. et al. A consumer bill of rights for energy conservation. *IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference - (IHTC)*, 2014. Citado na página 44.
- MAKONIN, S. et al. Exploiting hmm sparsity to perform online real-time nonintrusive load monitoring. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, 2015. Citado na página 69.
- MAKONIN, S.; POPOWICH, F.; GILL, B. The cognitive power meter: Looking beyond the smart meter. *26th Annual IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, p. 1–5, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 32, 33, 34, 43 e 44.
- MAKONIN, S. et al. Inspiring energy conservation through open source power monitoring and in-home display. *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 44.
- MDIC. *Portaria Inmetro nº 20 de 1 de Fevereiro de 2006*. 2006. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001000.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 81.
- MDIC. *Portaria n.º 174, de 10 de abril de 2012*. 2012. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001810.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 82.
- MDIC. *Portaria Inmetro nº 410 de 16 de Outubro de 2013*. 2013. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002015.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 57.
- MME. *Plano Nacional de Eficiência Energética*. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 48, 50 e 54.

NAGHIBI, B.; DEILAM, S. Non-intrusive load monitoring and supplementary techniques for home energy management. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 44, 65, 66, 67 e 68.

NIST. *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0*. 2014. Disponível em: <<https://www.nist.gov/news-events/news/2014/10/nist-releases-final-version-smart-grid-framework-update-30>>. Citado na página 40.

OPRIS, I.; CARACASIAN, L. On the implementation of the functionalities of smart metering systems. *8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, p. 1–6, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 32, 33, 38, 40 e 43.

OPRIS, I.; CARACASIAN, L. The relation between smart meters and electricity consumers. *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, v. 1, n. 1, p. 325–329, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 31, 33, 40 e 43.

PAREDES, H. K. M. *Teoria de Potência Conservativa: Uma nova Abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades*. Tese (Doutorado) — FEEC/UNICAMP, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 34, 70, 73, 74 e 75.

PAULO, E. de S. *Balanço Energético do Estado de São Paulo*. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

PAULO, E. de S. *Plano Paulista de Energia 2020*. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 50, 54 e 56.

PEREIRA, C. D.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. *Nota técnica referente aos níveis mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar no Brasil*. 2013. Citado na página 56.

PESSOA, J. L. N.; GHISI, E. *Estado da arte em eficiência energética: sistemas de condicionamento de ar*. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 82.

PROCEL. *Dicas da Eletrobras Procel para economizar energia elétrica em residências e condomínios*. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7B367B9C63-5C2B-4686-9A4E-7108C08CF79F%7D&ServiceInstUID=%7B46764F02-4164-4748-9A41-C8E7309F80E1%7D>>. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 59.

PROCEL. *PROCEL Info*. Disponível em: <<http://www.procel.gov.br/main.asp>>. Citado na página 52.

PROCEL. *Resultados PROCEL ANO BASE 2015-2016*. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 51, 52 e 53.

RIDI, A.; GISLER, C.; HENNEBERT, J. A survey on intrusive load monitoring for appliance recognition. *22nd International Conference on Pattern Recognition*, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 44, 65, 66 e 68.

RIGODANZO, J. *INSTALAÇÃO DE MEDIDORES INTELIGENTES NO BRASIL: UMA ANÁLISE ECONÔMICA*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2015. Citado na página 155.

- RODRIGUES, R. de P. *RECONHECIMENTO DE CARGAS ELÉTRICAS MONOFÁSICAS NÃO-LINEARES ATRAVÉS DA DECOMPOSIÇÃO WAVELET E DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2009. Citado na página 68.
- RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 95 e 96.
- SAIKIA, L. C. et al. Gprs enabled smart energy meter with in-home display and application of time of use pricing. *IEEE Annual India Conference (INDICON)*, 2016. Citado na página 44.
- SALVADOR, E. *EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REFRIGERADORES*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2013. Citado na página 81.
- SHARMA, K.; SAINI, L. M. Performance analysis of smart metering for smart grid: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 49, p. 720–735, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 37, 39, 40, 41 e 43.
- SOUZA, E. P. de. *ECONOMIA DE ENERGIA EM AR CONDICIONADO NO BRASIL: EFICIÊNCIA E ECONOMICIDADE*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 82 e 83.
- SOUZA, W. A. *ESTUDOS DE TÉCNICAS DE ANÁLISE E TECNOLOGIAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE MEDIDORES INTELIGENTES DE ENERGIA RESIDENCIAIS*. Tese (Doutorado) — FEEC/UNICAMP, 2016. Citado 9 vezes nas páginas 34, 69, 78, 87, 89, 96, 97, 155 e 157.
- STAR, E. *Energy Star*. 2017. Disponível em: <<https://www.energystar.gov/>>. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- TANG, G.; WU, K.; LEI, J. Semi-intrusive load monitoring for large-scale appliances. 2014. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Semi-Intrusive-Load-Monitoring-for-Large-Scale-App-Tang-Wu/f5794f8098a3f00240c0b209e67c582da5f83b20>>. Citado na página 68.
- TANG, G.; WU, K.; LEI, J. Semi-intrusive load monitoring for large-scale appliances. *IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS*, v. 26, 2016. Citado na página 68.
- TENTI, P.; MATTAVELLI, P. A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions. *Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions*, n. 35, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 69.
- TESHOME, D. F.; HUANG, T. D.; LIAN, K.-L. Distinctive load feature extraction based on fryze's time-domain power theory. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.
- VARGA, S.; ROTTA, T. C. *Afinal, o que é computação cognitiva?* 2018. Disponível em: <<https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/tlcbr/entry/mp270?lang=en>>. Citado na página 32.

VIANA, A. N. C. et al. *EFICIÊNCIA ENERGÉTICA : FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 49.

WEC. *World Energy Perspective. Energy Efficiency Policies — What works and what does not*. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 49.

WEC. *World Energy Perspective. Energy Efficiency Policies — 2016*. 2016. Citado 7 vezes nas páginas 47, 48, 49, 54, 55, 56 e 58.

WERANGA, K. S. K.; CHANDIMA, D. P.; KUMARAWADU, S. P. Smart metering for next generation energy efficiency & conservation. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, n. 1, p. 1–8, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 34.

WOOD, G.; NEWBOROUGH, M. Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design. *Energy and Buildings*, n. 35, 2002. Citado na página 61.

XU, Y.; MILANOVIĆ, J. V. Artificial-intelligence-based methodology for load disaggregation at bulk supply point. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, v. 30, n. 2, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 68.

ZHENG, J.; GAO, D. W.; LIN, L. Smart meters in smart grid: An overview. *IEEE Green Technologies Conference*, p. 57–64, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 31, 40, 42 e 43.

ZHOU, L.; XU, F.-Y.; MA, Y.-N. Impact of smart metering on energy efficiency. *Proceedings of the Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2010. Citado na página 33.

ZIVIC, N. S.; UR-REHMAN, O.; RULAND, C. Evolution of smart metering systems. *Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, p. 635–638, 2015. Citado na página 38.