



LUÍS FERNANDO CAPARROZ DUARTE

SISTEMA NÃO INVASIVO DE MONITORAMENTO DE
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM
CONJUNTOS NEBULOSOS

CAMPINAS
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

LUÍS FERNANDO CAPARROZ DUARTE

SISTEMA NÃO INVASIVO DE MONITORAMENTO DE
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM
CONJUNTOS NEBULOSOS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira

Esse exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Luís Fernando Caparroz Duarte, e orientado pelo Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira

CAMPINAS
2015

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

D85s Duarte, Luís Fernando Caparroz, 1980-
Sistema não invasivo de monitoramento de consumo de energia elétrica baseado em conjuntos nebulosos / Luís Fernando Caparroz Duarte. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Elnatan Chagas Ferreira.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Conjuntos difusos. 3. Medidores elétricos. 4. Sistemas inteligentes. I. Ferreira, Elnatan Chagas, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: A non-invasive power consumption monitoring system based on fuzzy sets

Palavras-chave em inglês:

Electricity - consumption

Fuzzy sets

Electric meters

Intelligent systems

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Elnatan Chagas Ferreira [Orientador]

Marcelo Botelho da Costa Moraes

Giovani Gracioli

José Antonio Siqueira Dias

Marco Antônio Robert Alves

Data de defesa: 27-02-2015


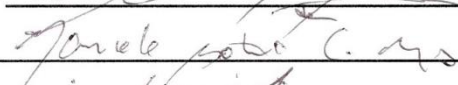
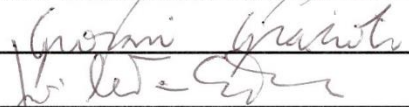
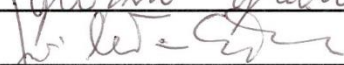
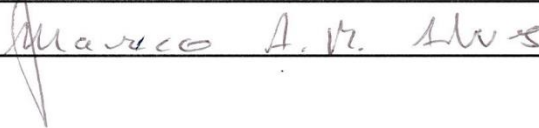
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Luís Fernando Caparroz Duarte

Data da Defesa: 27 de fevereiro de 2015

Título da Tese: "Sistema Não Invasivo de Monitoramento de Consumo de Energia Elétrica Baseado em Conjuntos Nebulosos"

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (Presidente): 
Prof. Dr. Marcelo Botelho da Costa Moraes: 
Prof. Dr. Giovani Gracioli: 
Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias: 
Prof. Dr. Marco Antônio Robert Alves: 

Resumo

A preocupação com o futuro dos recursos energéticos leva os pesquisadores a procurar formas mais eficientes de gerenciar estes recursos. Neste trabalho apresenta-se a implementação de um sistema não invasivo de monitoramento de consumo de energia elétrica baseado em conjuntos nebulosos, capaz de informar ao cliente, em período próximo de tempo real, sobre o consumo energético das principais cargas elétricas na unidade consumidora.

Este trabalho parte da premissa de que a necessidade de se conhecer com detalhes como se dá o uso da energia elétrica em uma residência é primordial para se alcançar edificações com alto grau de eficiência energética. O conhecimento preciso de como a energia elétrica está sendo consumida é fundamental para que as pessoas entendam como é possível reduzir o desperdício e maximizar economia sem que haja prejuízo na qualidade de vida.

O sistema proposto baseia-se em medição centralizada de energia elétrica. Para processar o consumo dos aparelhos em uso, utiliza a medição da tensão, da potência ativa e das cinco primeiras harmônicas ímpares da corrente elétrica como notação das assinaturas de cargas, medidas em nível de circuito, logo após os disjuntores de uma caixa de distribuição elétrica. A desagregação do consumo por aparelho é resolvida empregando técnicas de conjuntos nebulosos.

Como o sistema possui conexão com a Internet, além de informar seus usuários sobre o consumo energético de suas cargas elétricas, ele também pode ser usado como ferramenta para enviar informações pertinentes às empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica, favorecendo o desenvolvimento de redes inteligentes de abastecimento energético (*Smart Grids*).

Palavras-chave: Assinatura de carga, Conjuntos difusos, Energia elétrica - Consumo, Medidores elétricos, Sistemas inteligentes.

Abstract

Concerns about the future of energy resources lead the researchers to pursue more efficient ways to manage these resources. This work presents the implementation of a non-invasive power consumption monitoring system based on fuzzy sets, able to inform the customer, in a period close to real time, about the energy consumption of the main electrical appliances in their consumer units.

This work relies on the premise that knowing in detail how do we make use of electricity in a residence is essential to achieve buildings with high degree of energy efficiency. The precise knowledge on how the electricity is being consumed is fundamental to understand how it is possible to reduce wastage and maximize savings without loss of quality of life.

The proposed system is based on centralized measurement of electrical energy. To process the consumption of the appliances in use, it makes use of measurements of voltage, active power and the first five odd harmonics of the electrical current to constitute the load signatures, sensed at circuit level, just after the breakers at an electrical distribution box. The power consumption disaggregation is solved using fuzzy sets techniques.

Since the system has Internet connection, in addition to informing its users about the energy consumption of their electrical loads, it is also possible to send relevant information to electric utilities, supporting the Smart Grid development.

Keywords: Load signature, Electrical energy - Consumption, Fuzzy sets, Power meters, Smart systems.

Sumário

Lista de Figuras	xix
Lista de Abreviações	xxi
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Objetivo	5
1.2 Organização do texto	6
Capítulo 2 - Monitoramento de cargas elétricas	7
2.1 Princípios de medidas de grandezas elétricas para monitoramento do consumo energético de cargas elétricas	7
2.2 Medidores inteligentes para uso em eficiência energética.....	15
2.2.1 Monitoramento em nível de aparelho.....	16
2.2.2 Monitoramento não invasivo de cargas elétricas (NILM)	18
2.2.3 Considerações sobre sistemas NILM	23
Capítulo 3 - Noções básicas de lógica nebulosa.....	25
3.1 Introdução à lógica nebulosa	25
3.2 Números nebulosos.....	26
3.3 Formas das funções de pertinência	28
3.4 O número nebuloso triangular	29
3.5 Operações entre conjuntos nebulosos	30
3.6 Sistema de inferência nebuloso.....	35
3.7 Considerações sobre números nebulosos.....	37
Capítulo 4 - Técnica de discriminação de cargas elétricas baseada em conjuntos nebulosos.....	39
4.1 Assinatura de carga baseada em conjuntos nebulosos.....	40
4.2 Monitoramento de cargas elétricas em um mesmo circuito.....	43
4.3 Discriminação de cargas elétricas pela análise de conjuntos nebulosos.....	49
Capítulo 5 - Implementação do sistema NILM baseado em conjuntos nebulosos.....	53
5.1 Descrição do sistema	54
5.1.1 Módulo Medidor	54

5.1.2	Unidade de Processamento	55
5.1.3	Unidade de Apresentação	64
5.2	Teste do sistema	67
Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros		69
6.1	Conclusões.....	69
6.2	Trabalhos Futuros.....	70
Referências		73

À todos que trabalham para fazer deste mundo um lugar melhor.

Agradecimentos

Aos meus pais Luiz Fernando e Joana e aos meus irmãos José Francisco, Anaísa e Carlos Eduardo, pelo fantástico apoio, incentivo e carinho.

Ao Professor Dr. Elnatan Chagas Ferreira, pela orientação, atenção e confiança em meu trabalho.

Ao Professor Dr. José Antônio Siqueira Dias, pela paciência, atenção e grande auxílio prestado neste e em vários outros trabalhos.

Ao DEMIC: às secretárias Ester e Jaqueline e aos colegas Alcides, Alcino, Alex, Bernadete, Hugo, Jefferson, Felipe, Flávio, Kimi, Marcela, Pedro, Rafael, Reynaldo, Rodrigo, Sérgio, Ulisses e Wellington. Um grupo que fez história e vai deixar saudade.

Ao amigo Rodrigo Bacurau, pela indispensável contribuição no desenvolvimento desta pesquisa.

À Texas Instruments pelas amostras dos componentes cedidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao [NMC]: Cabrito, Cérebro, Daniel, Léo, Garga, Pini, Raoni e Victor, pela fraternal amizade e companheirismo.

E em especial a Jamile Paschoalloto, pelo amor, comprometimento, compreensão e fidelidade ao longo destes anos.

“A simplicidade é o último degrau da sabedoria.”

(Khalil Gibran)

“Que ninguém se engane, só se consegue a simplicidade através de muito trabalho.”

(Clarice Lispector)

Lista de Figuras

Figura 1. Média da economia anual de unidades consumidoras residenciais em virtude do nível de informação disponível sobre o consumo energético de seus aparelhos	4
Figura 2. Diagrama elétrico de ligação de um CI medidor de energia à rede elétrica.	9
Figura 3. Diagrama de blocos do processamento de sinais do AD71056	10
Figura 4. Medidores de energia para o monitoramento de carga em nível de aparelho.....	17
Figura 5. Uso da potência ativa como assinatura de carga.....	20
Figura 6. Exemplos de trajetórias V-I.	21
Figura 7. Exemplo gráfico de um número nebuloso	26
Figura 8. Representação gráfica de um conjunto <i>singleton</i> com domínio 3.	27
Figura 9. Representação gráfica de um conjunto corte- α com $\alpha = 0,4$	28
Figura 10. Formas das funções de pertinência comumente usadas.	29
Figura 11. Soma e subtração de números nebulosos triangulares	30
Figura 12. Diagrama de blocos de um sistema de inferência nebuloso.	35
Figura 13. Função de pertinência triangular aproximada do histograma da potência ativa.	43
Figura 14. Circuito elétrico residencial monitorado por um medidor inteligente.	44
Figura 15. Exemplo de segmento do conjunto de regras.....	48
Figura 16. Fluxograma do algoritmo do sistema de inferência.	50
Figura 17. Funcionamento do sistema de inferência nebuloso.....	51
Figura 18. Módulo Medidor.	55
Figura 19. Kits de desenvolvimento.....	56
Figura 20. Ligação entre o CC3100 e um microcontrolador.....	57
Figura 21. Fluxograma do <i>firmware</i> da Unidade de Processamento.....	59
Figura 22. Fluxograma da rotina de execução nominal.	60
Figura 23. Fluxograma da rotina de Aprendizagem e <i>Log</i> de Dados.	63
Figura 24. Exemplo do <i>Log</i> de Dados.	63
Figura 25. Formato das mensagens enviadas a Unidade de Apresentação.	64

Figura 26. Estrutura do banco de dados.....	65
Figura 27. Interface de apresentação	66
Figura 28. Protótipo de bancada do sistema NILM.	66
Figura 29. Mesa de ensaios	67
Figura 30. Ensaio do circuito de iluminação.	68

Lista de Abreviações

AMI	- <i>Advanced Metering Infrastructure</i>
ACEEE	- <i>American Council for an Energy-Efficient Economy</i>
ADC	- <i>Analog-to-Digital Converter</i>
AI	- <i>Artificial Intelligence</i>
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BPNN	- <i>Back Propagation Neural Network</i>
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CI	- Circuito Integrado
CoA	- <i>Center of Area</i>
CoG	- <i>Center of Gravity</i>
CoM	- <i>Center of Maximum</i>
DBN	- <i>Dynamic Bayesian Network</i>
DEMIC	- Departamento de Eletrônica e Microeletrônica
DSIF	- Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica
EEPROM	- <i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>

FEEC	- Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FoM	- <i>First of Maximum</i>
FP	- Fator de Potência
FPU	- <i>Float Point Unit</i>
GA	- <i>Genetic Algorithm</i>
GPIO	- <i>General Purpose Input/Output</i>
I	- Corrente
ID	- Número de identificação
IDE	- <i>Integrated Development Environment</i>
IoT	- <i>Internet of Things</i>
IP	- <i>Internet Protocol</i>
kB	- Kilo Bite (10^3 Bite)
LCD	- <i>Display</i> de cristal líquido
LoM	- <i>Last of Maximum</i>
MAC	- <i>Media Access Control</i>
MB	- Mega Bite (10^6 Bite)
MIT	- <i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MoM	- <i>Mean of Maximum</i>
MW	- Mega Watt (10^9 Watt)
NILM	- <i>Non-Intrusive Load Monitoring</i>
NTP	- <i>Network Time Protocol</i>

P	- Potência ativa
PC	- <i>Personal Computer</i>
PHY	- <i>Physical layer</i>
PIB	- Produto Interno Bruto
PLC	- <i>Power Line Communication</i>
Q	- Potência reativa
RBFNN	- <i>Radial Basis Function Neural Network</i>
RMS	- Root Mean Square
RTOS	- <i>Real-Time Operating System</i>
S	- Potência aparente
SDSPI	- <i>Secure Digital Serial Peripheral Interface</i>
SoC	- <i>System on Chip</i>
SPI	- <i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	- <i>Static Random Access Memory</i>
SVD	- <i>Singular Value Decomposition</i>
TCP	- <i>Transmission Control Protocol</i>
TW	- Tera Watt (10^{12} Watt)
UART	- <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UNICAP	- Universidade Estadual de Campinas
USB	- <i>Universal Serial Bus</i>
V	- Volt

VA	- Volt-Ampère
VAr	- Volt-Ampère reativo
V-I	- Tensão-Corrente
W	- Watt
WSN	- <i>Wireless Sensor Network</i>
Ws	- Watt-segundo

Capítulo 1

Introdução

Sustentabilidade, termo amplamente difundido pela sociedade atual, tem sua origem relacionada ao conceito de “desenvolvimento sustentável” [1] e exprime: “o suprimento das necessidades atuais sem comprometer a capacidade de gerações futuras de suprirem suas próprias necessidades”. Este é talvez o termo que melhor resuma a principal obrigação das políticas energéticas contemporâneas e futuras.

É de comum conhecimento que a demanda por energia elétrica cresce com o passar do tempo e que as principais fontes de energia elétrica no mundo ainda são derivadas da queima de combustíveis fósseis. Resultados de estudos apresentados pela 63ª edição do Relatório Estatístico de Energia Global da empresa BP corroboram estas afirmações mostrando que em 2013 o consumo global de energia primária aumentou em 2,3%, com 86,66% desta energia consumida proveniente de óleo, gás natural e carvão [2].

Embora haja certa especulação sobre até quando duram os estoques de fontes de energia não renováveis no mundo, pesquisadores estimam que óleo e gás natural devam existir até 2042 enquanto que o carvão deve perdurar até 2112 [3]. Estas estimativas levam em conta vários fatores como o volume estimado das reservas mundiais de óleo, gás natural e carvão, a variação do preço dessas *commodities* e a taxa de consumo.

Fica claro que a matriz energética mundial deverá sofrer grandes mudanças ainda neste século e que as próximas gerações deverão utilizar predominantemente outras fontes primárias de energia. Fontes de energia renováveis vêm conquistando espaço no cenário energético internacional. Energias eólica, fotovoltaica e de biomassa são fortes candidatas a fazerem frente a hidroelétrica e a nuclear na constituição da matriz energética futura, no entanto, estas fontes de energia, hoje

consideradas alternativas, ainda carecem de tempo para amadurecer suas tecnologias e ter suas empregabilidades aplicadas em escala maior.

Não é difícil prever que com o aumento da demanda energética e da escassez de combustíveis fósseis o preço da energia tende a aumentar. Fenômenos naturais como terremotos e estiagem também podem se tornar agravantes no aumento de preço da energia ao forçarem a paralisação de usinas nucleares e hidroelétricas, diminuindo a oferta de energia.

No Brasil, o cenário é ainda mais alarmante. Dados do Ministério de Minas e Energia do Governo Federal apontam uma perspectiva da expansão do mercado até 2023 que demandará a ampliação da capacidade de geração de energia elétrica instalada de 59,500 TW para 90,3 TW [4]. Esta perspectiva leva em consideração um aumento do PIB per capita de 3,2% ao ano e da população de 0,7% ao ano, o que demanda a expansão da capacidade instalada em 4,3% ao ano. De acordo com estes dados, 7.000 MW é a necessidade de crescimento anual da capacidade instalada brasileira até 2023 para garantir a segurança do suprimento energético no país.

A Tabela 1 apresenta a capacidade de geração das principais usinas hidroelétricas nacionais. É possível ter uma ideia da dimensão do desafio do setor de abastecimento energético brasileiro ao comparar a necessidade de crescimento anual necessária para garantir a segurança do suprimento energético com a capacidade de geração destas usinas.

Tabela 1. Capacidade de geração das principais usinas hidroelétricas nacionais [5].

Usina Hidroelétrica	Capacidade de geração (MW)
Itaipu	14.000
Belo Monte	11.233
Tucuruí I e II	8.535
Jirau	3.750
Santo Antônio	3.150
Ilha Solteira	3.444
Xingó	3.162
Paulo Afonso IV	2.462
Itumbiara	2.082

Nesta conjuntura, com o objetivo de garantir o abastecimento energético e sua sustentabilidade, agências governamentais e concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica vêm buscando, ao longo das últimas décadas, implantar programas de eficiência energética que estimulam o uso consciente de energia elétrica e desenvolvem soluções que auxiliam os consumidores a combaterem o desperdício, gerenciar melhor o uso da energia e gerar economias

tanto na conta de luz dos próprios clientes quanto nos investimentos em geração e infraestrutura da malha energética [6].

Poupar energia através da melhoria da eficiência de consumo por parte dos clientes é, possivelmente, o recurso econômico mais eficiente que se tem disponível no setor de abastecimento de energia. Programas de eficiência energética conseguem economizar energia ao custo de apenas um terço do necessário para produzir esta energia [7]. Não obstante, estes programas também trazem benéficos socioambientais imensuráveis através de suas externalidades positivas.

Dados do Instituto de Mudanças Climáticas da Universidade de Oxford apontam que somente melhorias técnicas e físicas realizadas em ambientes residenciais não são suficientes para garantir a redução do consumo de energia, uma vez que os consumos em casas idênticas podem facilmente divergir por um fator de dois ou mais, dependendo do comportamento dos seus habitantes [8].

Assim, a implantação da infraestrutura de medições avançadas (AMI) foi proposta como uma tecnologia promissora para o desenvolvimento do mercado de energia elétrica. Esta tecnologia se baseia no uso de medidores inteligentes (*smart meters*) para permitir que seus usuários tenham maiores informações sobre o consumo energético de suas unidades consumidoras residenciais, comerciais ou industriais.

Os medidores inteligentes possibilitam que seus usuários tomem conhecimento da demanda relativa de cargas elétricas¹ específicas que venham a ser monitoradas e também evidencia maus hábitos que, assim que descobertos, podem ser evitados, objetivando a segurança do abastecimento de energia elétrica e contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

O conhecimento preciso sobre o consumo individual das cargas elétricas é base para promover eficiência energética, uma vez que gera benefícios tanto para os clientes, que podem gerenciar o uso de seus aparelhos e obter redução de custos em suas contas de luz, como também para os utilitários, que pode otimizar a operação e planejamento do sistema de geração e distribuição de energia. Isto é o que aponta o resultado da pesquisa realizada pelo ACEEE entre os anos de 1995

¹ Desambiguação: neste trabalho o termo **carga elétrica** vem do inglês *electrical load* e não se refere à propriedade física fundamental da matéria, que determina as interações eletromagnéticas, mas sim ao componente elétrico que consome e/ou armazena e devolve energia ao ser alimentado por uma fonte.

e 2010 [9], comprovando que a quantidade de energia economizada através da mudança de comportamento dos consumidores aumenta em virtude do nível de informação que os consumidores possuem sobre os consumos energéticos de seus aparelhos elétricos.

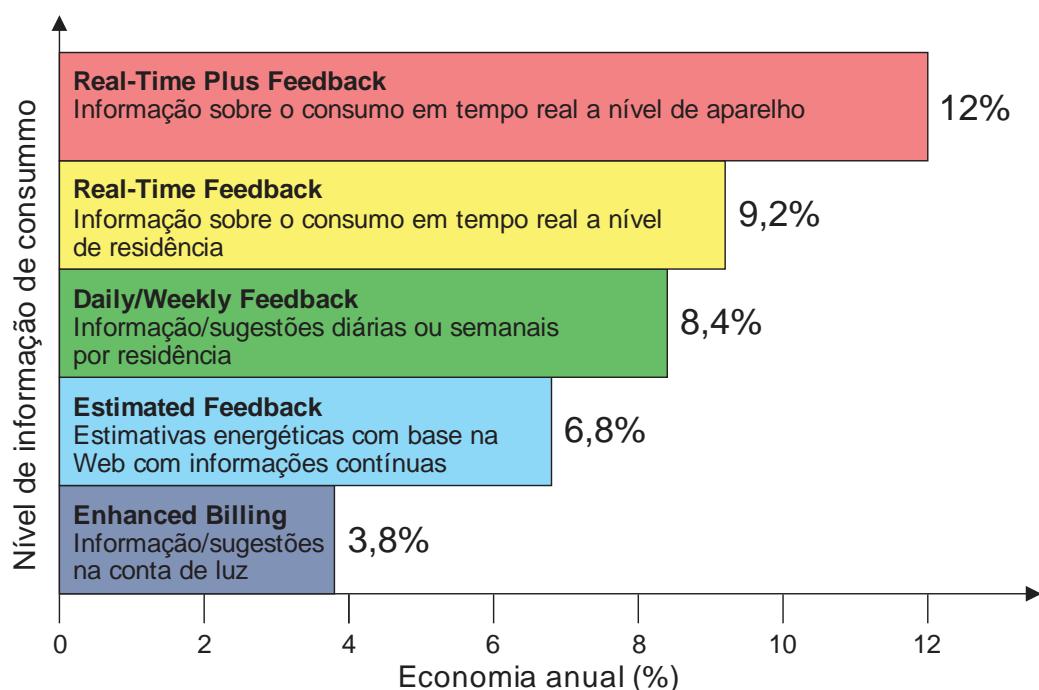


Figura 1. Média da economia anual de unidades consumidoras residenciais em virtude do nível de informação disponível sobre o consumo energético de seus aparelhos [9].

A ACEEE também apresenta em análises mais recentes que programas de eficiência energética que disponibilizam informações de consumo em tempo real para seus usuários apontam economia de até 19,5% [10].

Em decorrência desta necessidade ao redor do mundo, surgiu nos últimos anos um grande número de *startups* apresentando soluções de AMI com diversos níveis de informação de consumo de energia elétrica. Os maiores *players* que se destacam neste mercado são: Wattseeker [11] e Fludia [12] da França; PlotWatt [13], Bidgely [14], LoadIQ Enable.EI [15], Verlitics [16] e Verdigris [17] dos Estados Unidos; Onzo [18] e Navetas [19] do Reino Unido; Wattics [20] e Powersavvy [21] da Irlanda; e Yetu [22] da Alemanha. Algumas destas empresas receberam grandes aportes de grupos de investimentos de capital empreendedor (*Venture Capital*), como é o caso das americanas PlotWatt, que recebeu 3 milhões de dólares da Acorn Investments em julho de 2012 [23] e da Bidgely, que recebeu 3 milhões de dólares em meados de novembro de 2011 e mais 5 milhões de dólares em julho de 2013 da Khosla Ventures [24].

O grande número de *startups* no setor, sua difusão geográfica e a magnitude dos investimentos a elas concedidos demonstram claramente o interesse do mercado e o quão promissor e necessário ele aparenta ser para a sustentabilidade global.

Neste contexto, o Departamento de Eletrônica e Microeletrônica (DEMIC) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAP), hoje englobado pelo Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (DSIF) da FEEC / UNICAMP, iniciou estudos na área de sensoriamento e monitoramento de energia elétrica com o objetivo de desenvolver tecnologia de ponta para prover soluções ao setor de distribuição de energia elétrica. Estes estudos deram origem a uma jovem linha de pesquisa na área de eficiência energética que, até o momento, conta com a conclusão de seis dissertações de mestrado [25-30], quatro publicações internacionais [31-34] e um capítulo de livro [6].

O presente trabalho, fruto desta linha de pesquisa, exprime o desenvolvimento de um sistema que permite realizar o monitoramento do consumo de energia elétrica em unidades consumidoras de baixa tensão residenciais de forma não invasiva, permitindo que os usuários acessem, em tempo próximo do real, informações sobre o consumo individual dos equipamentos elétricos monitorados.

O sistema apresentado baseia-se em medição centralizada de energia elétrica (NILM), com medidas de grandezas elétricas em nível de circuito, logo após os disjuntores de uma caixa de distribuição. Para medir o consumo dos aparelhos, utiliza um medidor de grandezas elétricas desenvolvido especificamente para ser utilizado neste trabalho [29], que provê valores de potência ativa, corrente eficaz, tensão eficaz, fator de potência e as cinco primeiras componentes harmônicas ímpares do sinal de corrente. A desagregação do consumo por aparelho é resolvida empregando técnicas de conjuntos nebulosos.

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma técnica que permite discriminar o consumo energético individual de cargas elétricas que operam ligadas em paralelo, em um mesmo circuito elétrico, o qual é monitorado por um medidor de grandezas elétricas desenvolvido especificamente para esse trabalho.

A técnica de desagregação do consumo energético deve ser de possível implementação em sistemas microcontrolados, que possuem limitações de memória e de poder de processamento.

É desejável que esta técnica possa ser corroborada mediante o desenvolvimento de um protótipo de laboratório de um sistema embarcado, que implemente a técnica de desagregação do consumo energético e possa ser experimentado em ambiente laboratorial.

Com o intuito de criar um cenário para testes e ao mesmo tempo atender a demanda do setor de distribuição de energia elétrica por ferramentas de AMI, o foco do protótipo desenvolvido é o monitoramento do consumo de energia elétrica de cargas elétricas residenciais monofásicas em unidades consumidoras de baixa tensão.

1.2 Organização do texto

Uma revisão das técnicas de medidas de grandezas elétricas implementadas em medidores inteligentes de uso em ações de eficiência energética é apresentada no Capítulo 2. Também são citadas neste capítulo as principais técnicas de monitoramento de cargas elétricas, comparando suas vantagens e desvantagens. Neste ponto faz-se uma revisão bibliográfica a respeito de pesquisas e soluções comerciais de monitoramento de consumo energético.

No Capítulo 3 apresentam-se noções de conjuntos nebulosos, evidenciando os principais pontos empregados no desenvolvimento da técnica de desagregação do consumo das cargas elétricas.

O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento da técnica de desagregação do consumo das cargas elétricas baseada em conjuntos nebulosos, ponto focal deste trabalho. O Capítulo 5 exhibe o desenvolvimento do sistema não invasivo de monitoramento de cargas elétricas que implementa a técnica descrita no Capítulo 4, apresentando seus testes e resultados.

As conclusões deste trabalho são apresentadas de forma concatenada no Capítulo 6, junto com as sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Monitoramento de cargas elétricas

Para que pessoas em geral possam tomar conhecimento sobre seus hábitos de consumo de energia elétrica e modificá-los, objetivando economia de energia, é necessário fazer uso de ferramentas que apresentem relatórios com informações detalhadas a respeito do consumo energético de suas unidades consumidoras.

Como já apresentado no capítulo anterior, estudos apontam que quanto mais detalhadas são as informações e quanto mais rápido elas estão disponíveis para seus usuários, maior é a média de economia de energia alcançada.

Estas ferramentas são, em suma, sistemas computacionais ligados a medidores inteligentes de energia elétrica através de redes de telecomunicações.

Objetivando elucidar o leitor a respeito das técnicas desenvolvidas nesta Tese, apresenta-se neste capítulo uma revisão bibliográfica sobre como funcionam e quais são as principais técnicas implementadas em medidores inteligentes de energia elétrica voltados para uso em ações de eficiência energética.

2.1 Princípios de medidas de grandezas elétricas para monitoramento do consumo energético de cargas elétricas

Basicamente, todos medidores inteligentes são, na integra, medidores de potência e de outras grandezas elétricas, com armazenamento dessas informações em memória de massa de forma correlacionada e em função do tempo.

Potência é, por definição, uma quantidade de energia produzida, transferida ou transformada durante um intervalo de tempo. Matematicamente, podemos expressar a potência elétrica aparente (S) como a soma fasorial de duas potências: a potência ativa (P) e a potência reativa (Q).

$$S = P + Q \quad (1)$$

Medida em Watts (W), a potência ativa é a componente da potência elétrica responsável por realizar trabalho. É esta a componente que é acumulada no tempo pelos medidores de energia para ser tarifada. Consequentemente, é a principal grandeza elétrica monitorada pelos medidores inteligentes.

A potência reativa, medida em Volt-Ampère Reativo (VAr), é componente da potência é armazenada (ou devolvida) e não consumida pela carga elétrica.

A potência é geralmente obtida de forma indireta, através da medição da tensão e da corrente do circuito elétrico. Em circuitos de corrente alternada (CA), a potência aparente instantânea (S_i) é calculada multiplicando os valores instantâneos de tensão (V_i) e corrente (I_i):

$$S_i = V_i \times I_i \quad (2)$$

Muitos medidores inteligentes usam circuitos integrados (CIs) medidores de energia, nos quais os sinais de tensão e corrente são discretizados no tempo por um conversor analógico digital (ADC).

Nestes medidores, a tensão é geralmente obtida utilizando um divisor de tensão resistivo ligado diretamente à rede CA, enquanto a corrente pode ser adquirida através da medição da queda de tensão através de um resistor *shunt* ou através de um resistor de borda ligado a um transformador de corrente.

A Figura 2 mostra o diagrama elétrico básico de ligação de um CI medidor de energia elétrica à rede elétrica. Neste exemplo, um transformador de corrente com uma resistência de borda é usado para converter a medida de corrente elétrica em um valor de tensão proporcional a corrente elétrica medida, necessário para fornecer uma grandeza elétrica compatível com o canal de leitura de corrente do ADC, enquanto um simples divisor resistivo atenua a tensão da rede para alimentar o canal de leitura de tensão do ADC.

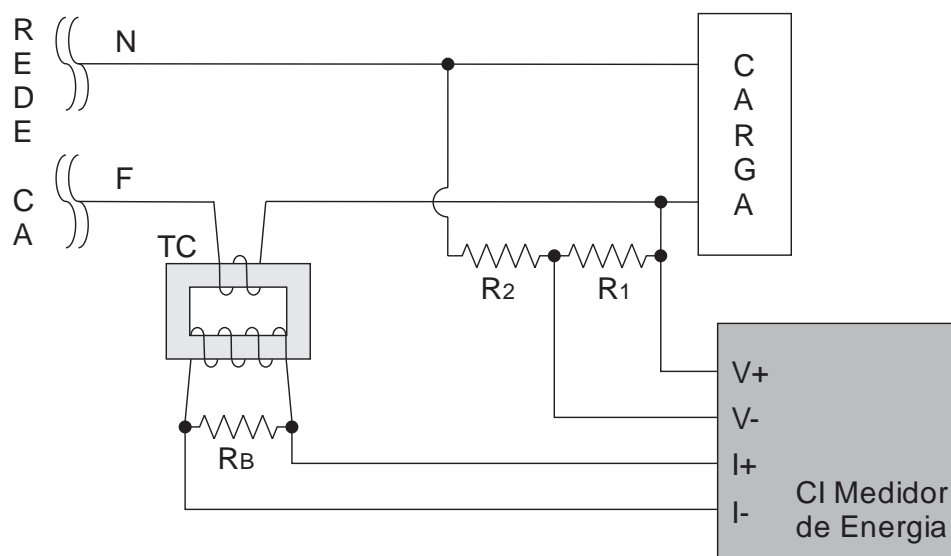


Figura 2. Diagrama elétrico de ligação de um CI medidor de energia à rede elétrica.

A fim de alcançar uma elevada precisão, os modernos CIs medidores de energia elétrica realizam o processamento de sinal, tais como multiplicação e filtros, no domínio digital. Esta abordagem proporciona estabilidade superior e precisão ao longo do tempo, mesmo em condições ambientais severas. Seu funcionamento baseia-se na alta precisão de conversores analógico digital do tipo Sigma-Delta, com resoluções entre 16 e 24 bits e processamento de sinal integrado em nível de *hardware*.

Para atingir alta resolução e reduzir o ruído, os ADCs Sigma-Delta convertem os sinais dos canais de corrente e tensão usando *oversampling*. Nesta técnica, os sinais são amostrados a uma frequência que é muitas vezes maior do que a largura da banda de interesse e assim espalha o ruído de quantização numa largura de banda mais larga. Com o ruído espalhado sobre uma largura de banda mais larga, o ruído de quantização no interior da banda de interesse é reduzida [35].

Esta estrutura de entrada analógica simplifica muito a interface com o sensor, proporcionando uma ampla faixa dinâmica para conexão direta com o sensor e também simplifica o projeto do filtro *antialiasing*.

Alguns CIs medidores de energia elétrica, como o AD71056 da Analog Devices, apresentam um filtro passa-alta após a amostragem do sinal de corrente para remover qualquer componente CC deste sinal, eliminando imprecisões no cálculo da potência ativa, que podem aparecer devido a deslocamentos nos sinais de tensão ou de corrente [36]. O cálculo da potência ativa é então

derivado a partir do sinal de potência instantâneo, o qual é gerado pela multiplicação direta dos sinais de corrente e tensão amostrados. Para extrair a componente de potência ativa, o sinal de potência instantânea é filtrado por um filtro passa-baixa.

A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos mostrando como a informação da potência ativa é extraída ao filtrar o sinal de potência instantânea por um filtro passa-baixa. Este esquema permite calcular a potência ativa de cargas elétricas alimentadas por tensão e corrente senoidais, independentemente do fator de potência.

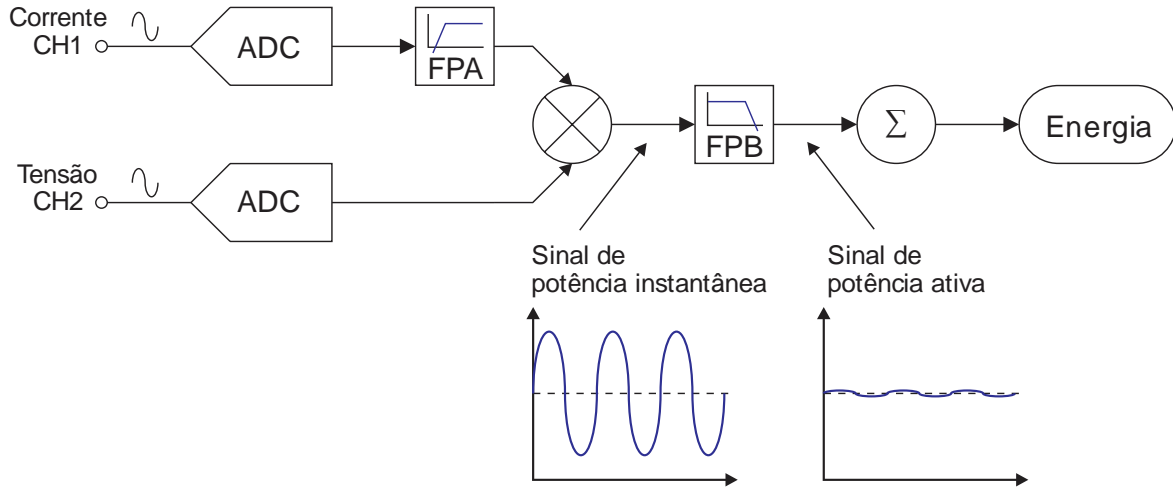


Figura 3. Diagrama de blocos do processamento de sinais do AD71056

Praticamente todo sinal de corrente em aparelhos reais têm algum conteúdo harmônico. Usando a transformada de Fourier, a tensão instantânea pode ser expressa em termos do seu conteúdo harmônico como:

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2} \times \sum_{h \neq 0}^{\infty} V_h \times \text{sen}(h\omega t + \alpha_h) \quad (3)$$

onde: $v(t)$ é a tensão instantânea no instante t ;

V_0 é o valor médio da tensão;

V_h é o valor eficaz da harmônica h da tensão;

α_h é o ângulo de fase da harmônica h da tensão.

e a corrente instantânea pode ser expressa como:

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \times \sum_{h \neq 0}^{\infty} I_h \times \text{sen}(h\omega t + \beta_h) \quad (4)$$

onde: $i(t)$ é a corrente instantânea no instante t ;

I_0 é o valor médio da corrente;

I_h é o valor eficaz da harmônica h da corrente;

β_h é o ângulo de fase da harmônica h da corrente.

A potência aparente S também pode ser expressa em termos da sua componente fundamental (P_1) e suas componentes harmônicas (P_h).

$$S = P_1 + P_h \quad (5)$$

onde P_1 é dado por:

$$\begin{aligned} P_1 &= V_1 \times I_1 \cos(\phi_1) \\ \phi_1 &= \alpha_1 - \beta_1 \end{aligned} \quad (6)$$

e P_h , por:

$$\begin{aligned} P_h &= \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h \times I_h \cos(\phi_h) \\ \phi_h &= \alpha_h - \beta_h \end{aligned} \quad (7)$$

Comparando as equações (1) e (5) é possível notar que a potência ativa é equivalente a componente fundamental da potência aparente e a potência reativa é equivalente a soma das componentes harmônicas superiores a fundamental da potência aparente.

São muitos os CIs comerciais que implementam medidores de energia capazes de medir tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente. Dentre tantos, podemos citar o ADE7763 da Analog Devices, o 78M6613 da Maxim Integrated e o CS5463 da Cirrus Logic como boas opções para serem empregados em medidores inteligentes por disponibilizarem acesso às grandezas elétricas medidas através de comunicação serial.

Outra técnica implementada em medidores inteligentes de precisão e baixo custo é a realização do processamento dos sinais em nível de *software*. Isto pode ser feito usando microcontroladores, normalmente com multiplicador e ADC integrados.

Esta técnica é semelhante à implementada em nível de *hardware*, utilizando os mesmos princípios e métodos de aquisição de processamento digital. Contudo, usando esta abordagem, o sistema pode ser personalizado para operar com consumo muito baixo, tal como na técnica desenvolvida em [27] para a concepção de um medidor de energia alimentado por baterias.

No trabalho citado, o sistema foi estabelecido para operar em uma rede CA de 60 Hz. Durante cada período de um segundo, ele ativa em um ciclo de rede, faz medições nos 3 ciclos de rede seguintes e fica em estado de baixo consumo nos outros 56 ciclos. O sistema calcula o valor RMS do produto $V \times I$ e acumula este valor em um registrador. Assumindo que não há mudança significativa na corrente e na tensão durante o período de um segundo, o valor medido nos 3 primeiros ciclos de rede é adotado como constante para o período. Desta forma, o sistema possui economia superior a 90% em comparação com medidores operando em 100% do período de amostragem.

É possível que o monitoramento da potência ativa em função do tempo seja suficiente para sistemas de monitoramento de energia que aplicam um medidor inteligente para cada equipamento monitorado. No entanto, sistemas que monitoram duas ou mais cargas elétricas, instaladas em paralelo, necessitam de outras medidas de grandezas elétricas para poder discriminar o consumo das cargas.

Artigos recentes foram publicados apresentando propostas de sistemas que permitem o monitoramento de várias cargas elétricas em um mesmo circuito [37, 38] e outros apresentando algoritmos para reconhecimento de padrões para identificação de cargas [39-43].

Embora as opiniões destes autores não sejam unânimes quanto à escolha das grandezas elétricas mais adequadas para identificação de cargas elétricas monitoradas em um mesmo circuito, praticamente todos os autores usam a potência ativa e a corrente. Alguns utilizam potência reativa [38, 41, 43-45], outros usam as componentes harmônicas da corrente [37-39, 43, 45-49] e outro usa ainda o fator de potência [32].

Alguns CIs medidores de energia mais complexos, como o ADE7880 da Analog Devices, são capazes de medir os módulos de componentes harmônicas dos sinais de tensão e corrente. No

entanto, estes CIs comerciais não permitem a obtenção da fase das componentes harmônicas destes sinais. Como os sinais de tensão e corrente são números complexos, apenas a informação de módulo pode não ser suficiente para uso em algoritmos de discriminação das cargas elétricas instaladas em um mesmo circuito.

Com o intuito de desenvolver um medidor inteligente para ser usado nesta Tese, o trabalho desenvolvido em [29] fez um profundo estudo das grandezas elétricas mais relevantes para permitir a identificação de cargas elétricas ligadas em um mesmo circuito. Como resultado, observou-se que a tensão e corrente eficazes, as potências ativa e reativa, o fator de potência e as componentes harmônicas ímpares do sinal de corrente são as grandezas elétricas mais adequadas para se usar na identificação de cargas elétricas residenciais. Verificou-se também que a maior parte de informação útil para a identificação de cargas através do espectro de frequência encontra-se nas cinco primeiras harmônicas ímpares (1ª, 3ª, 5ª, 7ª e 9ª) do sinal de corrente.

De posse das grandezas elétricas mais relevantes para uso na discriminação do consumo de cargas elétricas, o trabalho supracitado desenvolveu um módulo medidor com processamento das grandezas elétricas em nível de *software*. Baseado no MSP430AFE253, um microcontrolador com ADC Sigma-Delta de 24 bits e multiplicador de 32 bits integrado, o módulo medidor inicia os cálculos das grandezas elétricas após a amostragem de 64 amostras de tensão e corrente a uma taxa de 3,84 kS/s, ou seja, após a amostragem de um ciclo completo da rede de 60Hz.

O valor eficaz da tensão elétrica é calculado usando a seguinte equação:

$$V_{RMS} = G_v \sqrt{\sum_{n=1}^{64} \frac{v[n]^2}{64}} \quad (8)$$

onde: V_{RMS} é o valor eficaz da tensão;

G_v é o ganho das amostras de tensão;

n é o índice da amostra;

$v[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de tensão.

Da mesma forma, o valor eficaz da corrente elétrica é obtido por:

$$I_{RMS} = G_i \sqrt{\sum_{n=1}^{64} \frac{i[n]^2}{64}} \quad (9)$$

onde: I_{RMS} é o valor eficaz da corrente;

G_i é o ganho das amostras de corrente;

n é o índice da amostra;

$i[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de corrente.

A potência ativa (P) é calculada por:

$$P = G_i * G_v \sum_{n=1}^{64} \frac{(i[n] * v[n])}{64} \quad (10)$$

A potência aparente (S) é calculada a partir dos valores eficazes da tensão e da corrente:

$$S = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (11)$$

O fator de potência (FP) é dado por:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (12)$$

O valor eficaz das componentes harmônicas do sinal de corrente são calculadas usando uma fórmula baseada na equação clássica da Transformada Discreta de Fourier:

$$|I[k]_{RMS}| = \frac{\sqrt{Re\{I[k]\}^2 + Im\{I[k]\}^2}}{64} * G_i * \sqrt{2} \quad (13)$$

onde: k é o índice do componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta;

$|I[k]_{RMS}|$ é o valor eficaz do módulo do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente;

$Re\{I[k]\}$ é parte real do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente;

$Im\{I[k]\}$ é parte imaginária do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente

G_i é o ganho das amostras de corrente.

A fase das componentes harmônicas do sinal de corrente é calculada por:

$$\angle I[k] = \arctg \left(\frac{\text{Im}\{I[k]\}}{\text{Re}\{I[k]\}} \right) \quad (14)$$

onde: $\angle I[k]$ é a fase do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente;

$\text{Re}\{I[k]\}$ é parte real do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente;

$\text{Im}\{I[k]\}$ é parte imaginária do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente.

As equações que definem $\text{Re}\{I[k]\}$ e $\text{Im}\{I[k]\}$ são:

$$\text{Re}\{I[k]\} = \sum_{n=1}^N i[n] * \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (15)$$

$$\text{Im}\{I[k]\} = \sum_{n=1}^N i[n] * \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (16)$$

onde: k é o índice do componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta;

n é o índice da amostra de corrente no domínio do tempo discreto;

$\text{Re}\{I[k]\}$ é parte real do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta;

$\text{Im}\{I[k]\}$ é parte imaginária do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta;

$i[n]$ a n -ésima amostra do sinal de corrente no domínio do tempo discreto.

Estas técnicas de cálculo das grandezas elétricas também foram apresentadas em [34].

2.2 Medidores inteligentes para uso em eficiência energética

Apesar da variedade de técnicas e tecnologias utilizadas, os sistemas de monitoramento de consumo de energia pode ser dividido em dois grupos principais: os sistemas de monitoramento de cargas em nível de aparelho e os sistemas de monitoramento não invasivo de cargas (NILM).

Enquanto o termo NILM, do inglês *Non-Intrusive Load Monitoring*, é amplamente difundido na literatura, não há um termo comum aos autores para definir os sistemas de monitoramento de

cargas em nível de aparelho. A principal diferença entre eles é a quantidade de medidores inteligentes empregados no sistema.

Os sistemas de monitoramento de cargas em nível de aparelho usam um medidor inteligente para cada equipamento monitorado, normalmente interligados através de uma rede de telecomunicações, que pode ser por cabos (PLC, Ethernet), sem fio (ZigBee, WiFi) ou mista (Zigbee mais PLC).

Já os sistemas NILM fazem uso de apenas um medidor inteligente por circuito, ou por edifício, de forma que o medidor inteligente monitore mais de uma carga elétrica ligada no mesmo circuito.

2.2.1 Monitoramento em nível de aparelho

Sistema de monitoramento em nível de aparelho, sistema de monitoramento em nível de tomada, sistemas de monitoramento descentralizados ou sistemas de monitoramento intrusivos são termos que definem um sistema de monitoramento de energia onde cada aparelho monitorado é individualmente ligado a um medidor inteligente que o conecta à rede elétrica. Às vezes é chamado de monitoramento invasivo, pois necessita a abertura do circuito para ser instalado, o que pode ser simples em termos de equipamentos plugáveis na tomada, como um ferro de passar roupas, mas não desejável quando se trata de um grupo de lâmpadas instaladas no teto ou um chuveiro elétrico. A terminologia **sistema de monitoramento em nível de aparelho** foi escolhida para designar esta seção pois o termo ilustra adequadamente o conceito.

Esta é possivelmente a abordagem mais simples para reunir informações a respeito do consumo de energia de um aparelho. Nesta abordagem, cada medidor inteligente faz o monitoramento do consumo energético de um único aparelho ligado a ele, armazena estas informações em memória de massa e apresenta estas informações em um *display* ou disponibiliza estas informações para um sistema computacional que, por sua vez, reporta as informações em um relatório com formato amigável.

Ainda que este sistema seja capaz de fornecer com exatidão o consumo de energia de cada aparelho monitorado, ele se apresenta dispendioso em termos de instalação e manutenção. No entanto, esta abordagem ainda pode ser uma boa opção nos casos em que as informações sobre o consumo de energia de um edifício não precisa ser excepcionalmente detalhado e/ou quando o

monitoramento do consumo de apenas algumas cargas específicas, normalmente as mais dispendiosas (como aquecedores e chuveiros elétricos), agrega informações suficientes para o estudo de eficiência energética.

Existem muitos medidores de energia para o monitoramento de carga em nível de aparelho disponíveis no mercado. Mesmo que a maioria destes medidores apenas apresentem o consumo de energia do aparelho monitorado em uma tela LCD, modelos como "*Watts up? Pro*" podem gravar o consumo de energia ao longo do tempo e, em seguida, enviar os dados para um computador via USB, enquanto outros modelos como o "*Watts up? Net*" permitem que os dados armazenados sejam acessados via *Ethernet*. Há também modelos que enviam os dados de forma sem fio para um dispositivo central que mostra as informações em uma tela LCD, como o "*Kill A Watt CO2 Wireless*" e outros que disponibilizam as informações para um computador com conexão sem fio via Wi-Fi, como o "*Ecobee Smart Plug*". A Figura 4 apresenta os quatro medidores de energia para o monitoramento de carga em nível de aparelho.

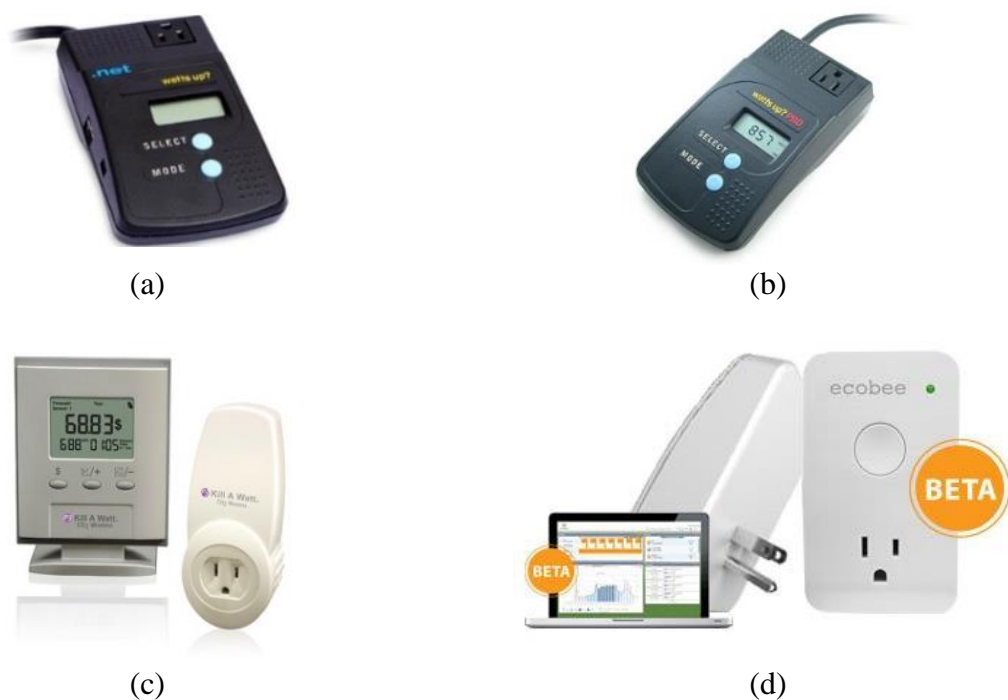


Figura 4. Medidores de energia para o monitoramento de carga em nível de aparelho: (a) Watts up? Pro [50], (b) Watts up? .Net [51], (c) Kill A Watt CO2 Wireless [52] e (d) Ecobee Smart Plug [53].

No final do processo, independentemente do método de comunicação adotado, um aplicativo computacional rodando em um PC, *smartphone* ou *tablet* é usado para apresentar aos usuários as informações provenientes dos sensores inteligentes.

As pesquisas nesta área mostram que diferentes meios de comunicação podem ser usados para aperfeiçoar o sistema de monitoramento de carga em nível de aparelho, automatizando a recuperação dos dados dos sensores e permitindo acesso às informações em tempo real. Trabalhos como [54] apresentam o uso da tecnologia de comunicação por meio da rede elétrica (PLC) para aquisição dos sinais dos módulos sensores. Grande parte dos trabalhos na área implementam comunicação por meio de redes de sensores sem fio (WSN). Os protocolos de comunicação sem fio mais utilizados nesta área são o ZigBee e variações do IEEE 802.15.4, como apresentados em [55] e [56]; não obstante, as redes híbridas também podem ser encontrados na literatura, tal como apresentadas em [31] e [57], nos quais os sistemas propostos fazem uso de ZigBee juntamente com PLC.

Pesquisas recentes nesta área também visam o desenvolvimento de novas funcionalidades derivadas do monitoramento energético para aplicações em *Smart Grid*. Em [58] os autores apresentam uma WSN de monitoramento energético focado no descobrimento de novidades nos padrões de consumo e objetivando encontrar anomalias no funcionamento dos equipamentos monitorados. Em [59] os pesquisadores apresentam uma WSN conectada a uma unidade de agendamento energético para escalonar os horários de acionamento de cargas elétricas residenciais com o objetivo reduzir a demanda energética em horários de pico.

2.2.2 Monitoramento não invasivo de cargas elétricas (NILM)

Monitoramento não invasivo de carga (NILM) é um termo amplamente difundido na literatura para abordar sistemas capazes de quantificar o consumo de energia de mais de um aparelho através da medição do consumo de energia de um mesmo circuito. É também conhecida como NALM ou NIALM, do inglês *Non-Intrusive Appliance Load Monitoring*. A terminologia vem do fato de que não é necessário ter um ponto de medida exclusivo para cada um dos equipamentos monitorados, ou seja, em contraste com a técnica apresentada na seção anterior, esta evita disseminar vários medidores na instalação elétrica para realizar as medições [60].

Esta abordagem é mais econômica e mais fácil de instalar e manter do que o monitoramento em nível de aparelho [38, 44, 61, 62]. Como a técnica NILM utiliza apenas um medidor de energia na entrada do ramal energético (quando implementado em nível de edifício) ou após o disjuntor (quando implementado em nível de circuito), também é chamada de monitoramento centralizado de cargas elétricas ou monitoramento de cargas elétricas em nível de circuito.

Sistemas NILM se baseiam no conceito de assinatura de carga para identificação de quais aparelhos estão em operação em cada instante. Assinatura de carga consiste em um conjunto de características elétricas únicas para cada carga elétrica.

Quando uma carga elétrica é ligada, ela apresenta um padrão de consumo elétrico. Um chuveiro elétrico, por exemplo, apresenta os sinais de tensão e corrente praticamente em fase, o que o caracteriza como uma carga resistiva. Um outro chuveiro, embora também possua característica resistiva, possivelmente consome uma quantidade de energia que o difere do modelo anterior. Já motores elétricos possuem a fase do sinal de corrente atrasada em relação à fase do sinal de tensão, o que os classifica como cargas indutivas. No entanto, como dois motores elétricos podem apresentar diferenças tanto na potência consumida quanto nas defasagens entre tensão e corrente, é possível diferenciar qual dos motores está ligado em um determinado momento apenas medindo a potência e o ângulo de fase entre tensão e corrente.

A assinatura de carga é então definida ao ensaiar o consumo energético de uma carga elétrica agrupando informações de grandezas elétricas derivadas da tensão e da corrente. Elas podem ser representadas tanto no domínio do tempo [32, 41, 45, 60, 63], quanto no domínio da frequência [37-39, 43, 45-48]. Também podem ser caracterizadas matematicamente em termos de *wavelets* [64, 65], autovalores [45] ou em componentes de Decomposição em Valores Singulares (SVD) [62].

Independentemente das grandezas elétricas escolhidas para compor as assinaturas, o algoritmo de reconhecimento de cargas pode operar baseado em características do estado estacionário (quando a carga encontra-se em regime) [32, 38, 39, 60, 63], com características transientes (quando a carga é ligada) [37, 46, 61, 62, 64, 65] ou ainda com uma combinação dos dois [44, 45, 66].

Metodologias que utilizam técnicas de processamento de sinal aliadas a algoritmos de reconhecimento de cargas com base em assinaturas de carga permitem a utilização de um único medidor inteligente instalado na entrada de alimentação do circuito elétrico para monitorar todas

as cargas instaladas nesse circuito. Uma vez medido o consumo do circuito, a desagregação do consumo de energia é então calculada por algoritmos que analisam as assinaturas das cargas.

Um dos primeiros estudos apresentando o monitoramento não invasivo de cargas elétricas foi desenvolvida no Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) e teve suas origens no monitoramento de carga elétricas residenciais [60]. Na técnica desenvolvida, os períodos de operação de cargas individuais são determinados pela identificação dos instantes em que as medições de potência mudam de um valor de estado estacionário para outro. Essas mudanças de estados de operação, conhecidas como eventos, correspondem às ações de liga e desliga da carga, caracterizada pela magnitude nos valores de potência ativa.

A Figura 5 exemplifica o monitoramento do consumo de energia de um refrigerador e um forno de micro-ondas instalados em um mesmo circuito. Ela apresenta claramente duas mudanças de estado com períodos distintos que se sobrepõem ao longo do tempo. Sabendo que o funcionamento do refrigerador é caracterizado por partidas do compressor que se mantem ligado por períodos consideravelmente longos enquanto o micro-ondas liga e desliga em ciclos de maior frequência, é possível discriminar em que momento cada um dos aparelhos está ligado e determinar o consumo de energia individual do refrigerador e do forno de micro-ondas.

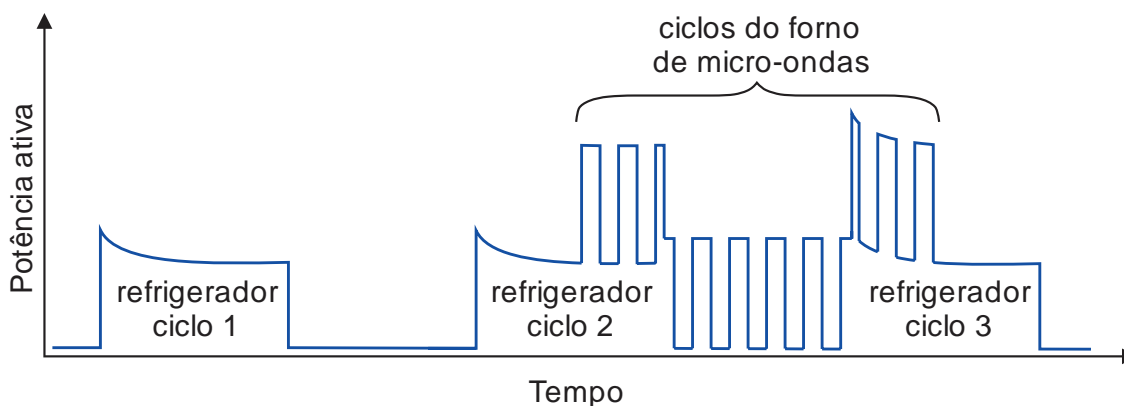


Figura 5. Uso da potência ativa como assinatura de carga [6].

Praticamente qualquer grandeza elétrica derivada de tensão e corrente pode ser usada para discriminar cargas elétricas em um mesmo circuito. Em [66], os autores destacam o fato de que hoje em dia grande parte das cargas elétricas possuem vários estados de operação em regime. Mesmo eletrodomésticos simples, como liquidificadores ou secadores de cabelo, podem operar em diferentes níveis de velocidade. Embora se trate de uma mesma carga elétrica, cada nível de velocidade distingue um estado de operação em regime e apresenta assinatura elétrica particular.

Nesse trabalho, os autores sugerem a criação de uma classificação taxonômica das cargas elétricas baseada em conjuntos de assinaturas no estado estacionário, no estado transitório e no padrão operacional.

Um método para a construção da taxonomia de aparelhos elétricos baseados em assinaturas de carga é apresentado em [67]. Neste trabalho, os autores sugerem uma forma bidimensional de assinatura de carga denominada trajetória tensão-corrente (V-I) para caracterizar aparelhos típicos de uso doméstico. A assinatura de carga do tipo trajetória V-I consiste em amostrar a tensão e a corrente em um ciclo de rede completo operado no estado estacionário, normalizá-los e, em seguida, esboçar graficamente o percurso V-I. A Figura 6 apresenta exemplos de trajetórias V-I.

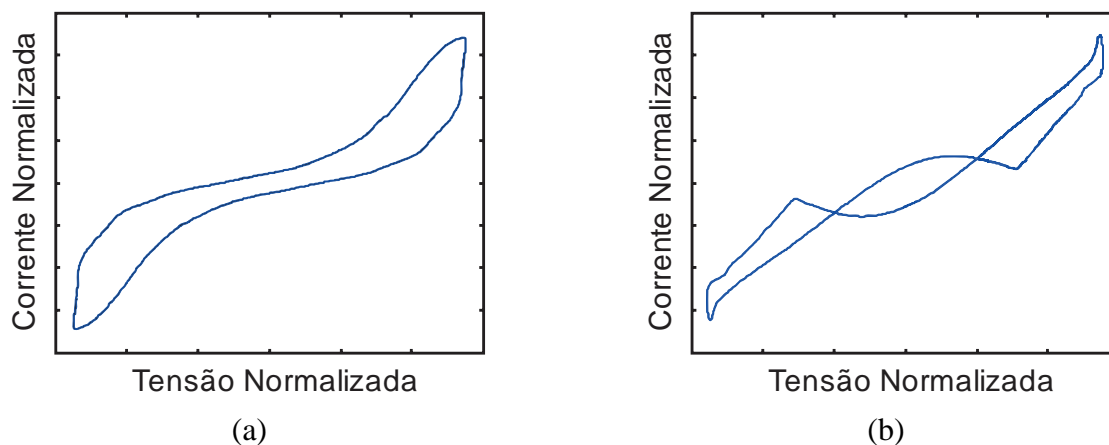


Figura 6. Exemplos de trajetórias V-I: (a) Aspirador de pó e (b) Forno de micro-ondas [67].

A metodologia proposta pelo trabalho supracitado para a construção da taxonomia de cargas elétricas pode ser sintetizada em: (1) medir a tensão e a corrente dos aparelhos domésticos; (2) construir as assinaturas de carga sob a forma de trajetória V-I; (3) analisar o formato das trajetórias V-I; (4) agrupar hierarquicamente os aparelhos de acordo com as semelhanças nas formas de suas trajetórias V-I; (5) definir a taxonomia de acordo com os resultados dos agrupamentos.

Em [68] os autores propõem uma metodologia para identificar cargas elétricas em um sinal composto, utilizando assinaturas de carga e algoritmos genéticos (GA). A metodologia consiste em definir uma assinatura para cada aparelho através da medida da corrente elétrica com cada aparelho operando em regime durante 50 ciclos de rede consecutivos. Em seguida, as formas de onda de corrente são agrupadas considerando a razão da sua componente fundamental (50 Hz)

pelo seu valor eficaz (RMS). Isto significa que quanto maior a razão, mais a assinatura se assemelha a uma forma senoidal. Eles consideram uma taxa de amostragem de 200 pontos por ciclo de rede suficiente para a avaliação do estado estacionário. Todavia, ponderam que uma maior taxa de amostragem é necessária para avaliações de transientes.

A precisão da técnica de identificação por algoritmo genético é elevada para um pequeno número de aparelhos, mas diminui à medida que o número de aparelhos agregados no mesmo circuito aumenta. Além disso, algoritmo empregado apresenta ampla diferença na precisão de identificação de assinaturas de carga baseadas em formas de onda senoidais, quasi-senoidais e não senoidais.

Uma abordagem diferente é apresentada em [69]. A metodologia proposta neste trabalho se baseia não só na detecção das alterações de estado de operação de aparelhos a partir de medidas simultâneas da energia consumida, mas também leva em consideração o padrão comportamental do usuário. Os autores alegam que se o usuário tem um estilo de vida normal, o padrão comportamental é susceptível de ser regular. Por exemplo, para usar o computador o usuário normalmente liga a luz no escritório primeiro, em seguida ele liga o computador e na sequência o monitor. Com base nesta premissa a característica temporal é levada em consideração e, por conseguinte, o uso de Rede Bayesiana Dinâmica (DBN) é aplicável no contexto da análise e mineração dos dados do consumo energético.

A identificação das cargas elétricas parte do princípio de que todos os aparelhos e os estados de operação destes aparelhos são conhecidos. A medida é realizada em nível de circuito, utilizando medidores de energia instalados no painel elétrico, medindo o consumo de energia elétrica do circuito em períodos de 5 segundos.

Outra abordagem para identificação das cargas elétricas é apresentada em [70]. Neste trabalho faz-se uso da integração de redes neurais RBFNN e BPNN com a lógica nebulosa para executar a identificação das cargas elétricas. Com esta integração os autores constataram 100% de eficácia na identificação de três cargas elétricas domésticas: uma lâmpada, um ventilador e um forno elétrico.

2.2.3 Considerações sobre sistemas NILM

O monitoramento de cargas elétricas em regime traz menos informações que o monitoramento de transientes. No entanto, para se monitorar transientes é necessário trabalhar com alta taxa de amostragem, alta velocidade de comunicação, alta velocidade de processamento e armazenamento de grande quantidade de informação.

Das técnicas de inteligência artificial (AI) implementadas nos trabalhos supracitados, a lógica nebulosa se destaca pela simplicidade computacional (quando comparada a outras técnicas de AI) e pela eficácia apresentada pelo resultado do trabalho onde ela foi empregada.

No geral, os resultados das pesquisas de monitoramento não invasivo de cargas elétricas apontam os melhores índices de acertos quando as cargas monitoradas são de natureza linear, quando as cargas não possuem (ou não são considerados) mais de um modo de operação, ou quando não há uma grande quantidade de cargas monitoradas no mesmo circuito.

Embora estas pesquisas apresentem um consenso sobre uso de alto poder de processamento para realizar a identificação das cargas elétricas, acredita-se que a simplificação do processo possa gerar um algoritmo possível de ser implementado em um sistema embarcado que apresente bons resultados no monitoramento de cargas elétricas.

Desta forma, o caminho escolhido para iniciar o desenvolvimento da técnica de desagregação do consumo energético de cargas elétricas foi: utilizar um módulo medidor com foco no monitoramento de cargas elétricas em regime; estudar análises de conjuntos nebulosos na identificação de cargas elétricas; buscar monitorar cargas elétricas de natureza preferencialmente linear e com apenas um modo de operação; evitar monitorar uma grande quantidade de cargas em um mesmo circuito.

Capítulo 3

Noções básicas de lógica nebulosa

A lógica nebulosa, também conhecida como lógica difusa (ou lógica *fuzzy*), é uma técnica de inteligência artificial que pode ser empregada na resolução de problemas que não são facilmente definíveis por modelos matemáticos práticos, pois suas variáveis são informações vagas e em geral descritas em uma linguagem natural como “leve” ou “intenso”. Esta técnica provê um método para traduzir expressões verbais imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos que podem ser calculados por sistemas computacionais [71].

Este capítulo traz uma compacta apresentação dos conceitos básicos de lógica nebulosa.

3.1 Introdução à lógica nebulosa

Criada pelo matemático Lotfali Askar-Zadeh da Universidade da Califórnia em Berkeley e apresentada em [72], a lógica nebulosa pode ser vista como uma extensão da lógica multi-valores. Ela modela o modo impreciso do raciocínio humano que é capaz de tomar decisões racionais num ambiente com incerteza e imprecisão. Para isso, ela baseia-se em conjuntos nebulosos, conceito este que estende o conceito clássico de conjuntos, permitindo que um elemento possa ter um grau de pertinência variando entre 0 e 1, ao invés de pertencer ou não ao conjunto como na teoria de conjuntos aristotélicos.

Neste conceito, um conjunto nebuloso A definido no universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência μ_A , a qual mapeia os elementos de U para o intervalo $[0,1]$.

$$\mu_A: U \Rightarrow [0,1] \quad (17)$$

Toda informação contida em um conjunto nebuloso é descrita por meio de uma função de pertinência. A função de pertinência associa um número real $\mu_A(x)$ no intervalo $[0,1]$ a cada elemento x pertencente a U , representando o grau de possibilidade de que o elemento x venha a pertencer ao conjunto A . Assim tem-se que:

- $\mu_A(x) = 1$, se x pertence totalmente ao conjunto A ($x \in A$);
- $0 < \mu_A(x) < 1$, se x pertence parcialmente ao conjunto A ;
- $\mu_A(x) = 0$, se x não pertence ao conjunto A ($x \notin A$).

Possivelmente, a característica mais notável dos conjuntos nebulosos é a sua habilidade de expressar transições graduais de não-pertinência para pertinência e vice-versa, o que permite a captura do sentido de expressões em linguagem natural que são vagas na maioria das vezes.

3.2 Números nebulosos

Um número real cujo valor preciso não é conhecido com exatidão pode ser expressado através de um intervalo nebuloso. O número nebuloso (ou número *fuzzy*) é um caso especial de conjunto nebuloso que define um intervalo nebuloso nos números reais, \mathbb{R} . Um intervalo nebuloso é geralmente representado por dois pontos extremos x_1 e x_4 (que formam o suporte do número nebuloso) e dois pontos intermediários x_2 e x_3 (que formam o núcleo do número nebuloso) como (x_1, x_2, x_3, x_4) , ilustrado na Figura 7 [73].

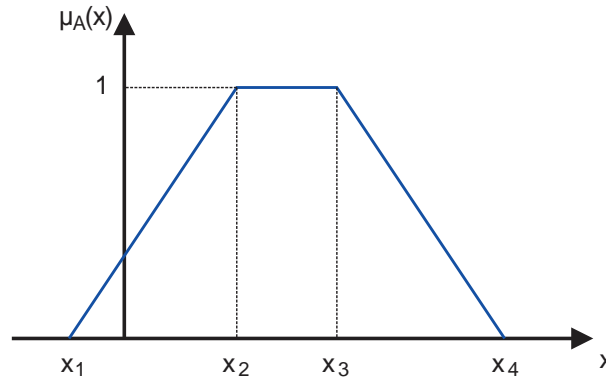


Figura 7. Exemplo gráfico de um número nebuloso $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$.

O suporte de um conjunto nebuloso A compreende todos os elementos com grau de pertinência maior que zero.

$$\text{Sup}(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (18)$$

O núcleo de um conjunto nebuloso A compreende todos os elementos com grau de pertinência maior que zero.

$$\text{Nuc}(A) = \{x \in U \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (19)$$

Para que um conjunto nebuloso possa ser considerado um número nebuloso, três propriedades básicas devem ser obedecidas: o conjunto nebuloso deve ser normal, convexo e seu suporte deve ser limitado.

Um conjunto nebuloso é dito normal se a máxima altura da função de pertinência for igual a 1.

$$\max_{x \in U} \{\mu_A(x)\} = 1 \quad (20)$$

A altura de um conjunto nebuloso A é o valor máximo da função de pertinência.

$$Al(A) = \max_{x \in U} \{\mu_A(x)\} \quad (21)$$

Um conjunto nebuloso é dito convexo se sua função de pertinência não possui baías ou buracos, tal que:

$$\begin{aligned} \mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2) &\geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)] \\ x_1, x_2 &\in U, \lambda \in [0, 1] \end{aligned} \quad (22)$$

Funções de pertinência não-convexas não possibilitam unicidade na avaliação numérica do valor no eixo horizontal.

Um conjunto nebuloso normal cujo suporte é um único ponto em U é chamado de *singleton* (ou *fuzzy-ton*). A Figura 8 ilustra o conjunto *singleton*.

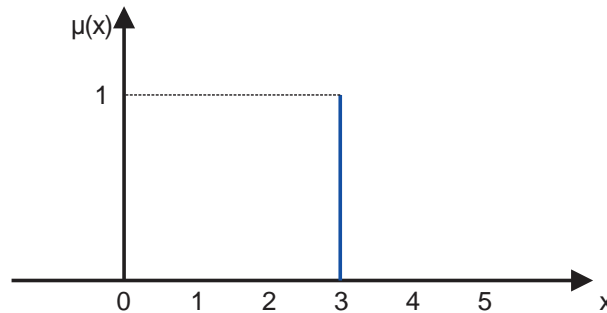


Figura 8. Representação gráfica de um conjunto *singleton* com domínio 3.

Todo número nebuloso pode ser segmentado em um subconjunto cujos elementos do domínio possuem um grau de pertinência superior ou igual a um valor α do intervalo $[0,1]$, de forma que:

$$A_\alpha = \{x \in U \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (23)$$

$$\alpha \in [0,1]$$

Esse subconjunto nebuloso A_α é denominado corte- α (α -cut) de um número nebuloso A e pode ser interpretado como o número nebuloso que apresenta uma restrição imposta ao domínio do conjunto original de acordo com o valor de α . Assim, o conjunto resultante contém todos os elementos do domínio que possuem um grau de pertinência $\mu_A(x)$ maior ou igual ao valor de α . A Figura 9 ilustra o conjunto corte- α .

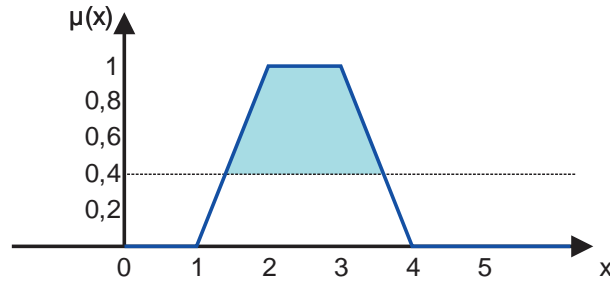
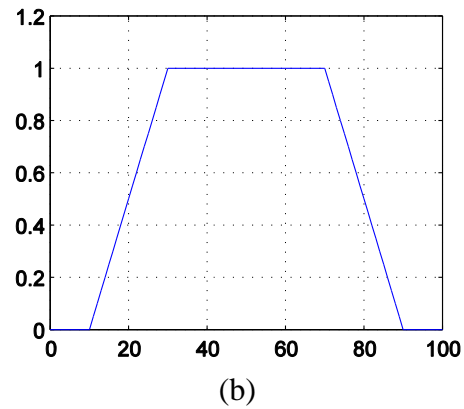
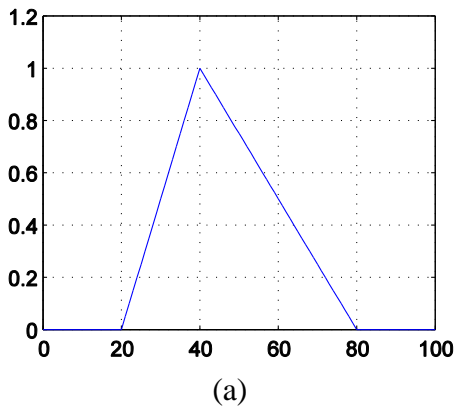


Figura 9. Representação gráfica de um conjunto corte- α com $\alpha = 0,4$.

3.3 Formas das funções de pertinência

As formas e os parâmetros das funções de pertinência mais adequados para caracterizar um certo número nebuloso dependem do contexto da aplicação. A Figura 10 ilustra formas de funções de pertinência comumente usadas [74].



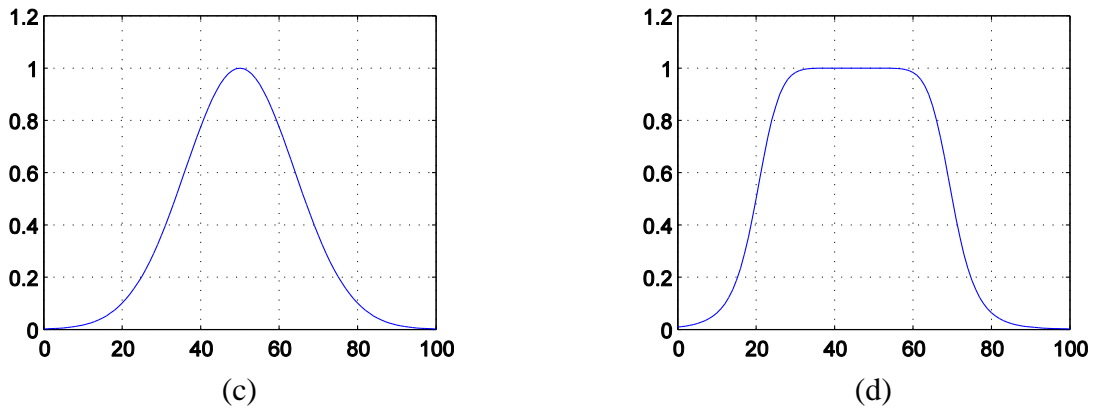


Figura 10. Formas das funções de pertinência mais comumente usadas: (a) Triangular, (b) Trapezoidal, (c) Gaussiana e (d) Sino generalizada [75].

3.4 O número nebuloso triangular

Em sistemas cujos parâmetros são definidos subjetivamente, a escolha de funções triangulares permite definir claramente regiões de pertinência nula, média e total. Ademais, esta forma geométrica também é matematicamente expressada com facilidade e processá-la demanda menos poder de processamento que formas como gaussiana e função sino generalizada.

A formas triangular é representada por três pontos e expressa por $A = (a_1, a_2, a_3)$. Esta representação é interpretada como funções de pertinência, tal que:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (24)$$

O número nebuloso triangular pode ser operado aritmeticamente como qualquer número nebuloso, mas é válido observar que nem sempre as operações aritméticas entre números nebulosos triangulares resultam em números nebulosos também triangulares. No entanto, a adição e a subtração de números nebulosos triangulares resulta em um número nebuloso também triangular. Este fato é relevante porquê garante a mesma notação para todos os números nebulosos, sejam eles operandos ou resultados.

Sejam dois números nebulosos triangulares: $A = (a_1, a_2, a_3)$ e $B = (b_1, b_2, b_3)$.

A operação de adição de dois números nebulosos triangulares é dada por:

$$\begin{aligned} A(+)B &= (a_1, a_2, a_3)(+)(b_1, b_2, b_3) \\ &= (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \end{aligned} \quad (25)$$

A operação de subtração de dois números nebulosos triangulares é dada por:

$$\begin{aligned} A(-)B &= (a_1, a_2, a_3)(-)(b_1, b_2, b_3) \\ &= (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3) \end{aligned} \quad (26)$$

A Figura 11 ilustra a soma e a subtração entre números nebulosos triangulares.

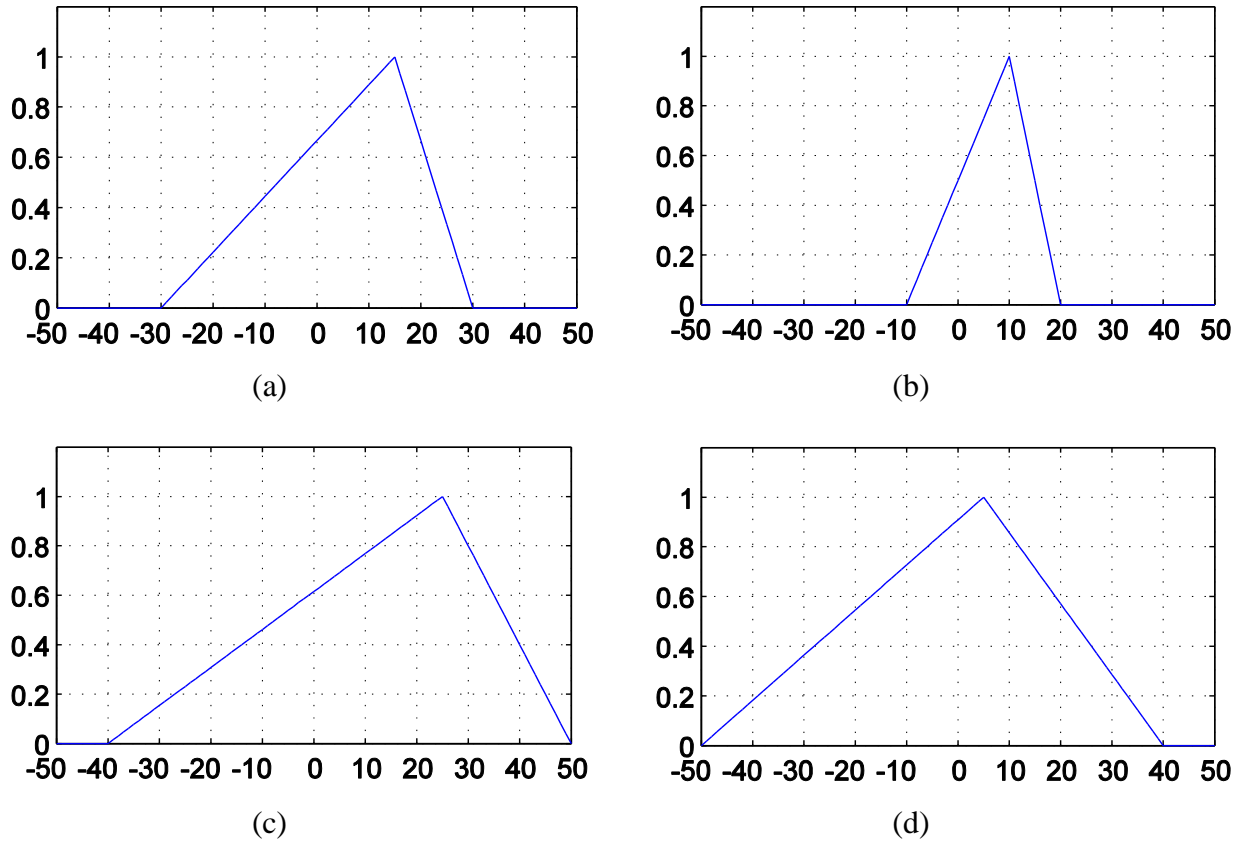


Figura 11. Soma e subtração de números nebulosos triangulares: (a) $A = (-30, 15, 30)$, (b) $B = (-10, 10, 20)$, (c) $A(+)B = (-40, 25, 50)$ e (d) $A(-)B = (-50, 5, 40)$.

3.5 Operações entre conjuntos nebulosos

Quando conjuntos nebulosos (tais como A , B e C) são descritos em um mesmo universo de discurso (U), as operações entre conjuntos mais comuns são [76, 77]:

Produto:

$$\mu_{A.B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (27)$$

Interseção:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (28)$$

União:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (29)$$

Complemento:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (30)$$

Estes conjuntos nebulosos descritos em um mesmo universo de discurso também seguem algumas propriedades convencionais, tais como:

Comutatividade:

$$\begin{aligned} A \cup B &= B \cup A \\ A \cap B &= B \cap A \end{aligned} \quad (31)$$

Associatividade:

$$\begin{aligned} A \cup (B \cup C) &= (A \cup B) \cup C \\ A \cap (B \cap C) &= (A \cap B) \cap C \end{aligned} \quad (32)$$

Distributividade:

$$\begin{aligned} A \cup (B \cap C) &= (A \cup B) \cap (A \cup C) \\ A \cap (B \cup C) &= (A \cap B) \cup (A \cap C) \end{aligned} \quad (33)$$

Idempotência:

$$\begin{aligned} A \cup A &= A \\ A \cap U &= A \end{aligned} \quad (34)$$

Identidade:

$$\begin{aligned} A \cup \emptyset &= A \quad e \quad A \cap U = A \\ A \cap \emptyset &= \emptyset \quad e \quad A \cup U = U \end{aligned} \quad (35)$$

Transitividade:

$$\text{Se } A \subseteq B \subseteq C, \text{ então } A \subseteq C \quad (36)$$

Leis de De Morgan:

$$\begin{aligned}(A \cap B)' &= A' \cup B' \\ (A \cup B)' &= A' \cap B'\end{aligned}\tag{37}$$

Neste ponto é válido notar que a Lei da Contradição ($A \cap A' = \emptyset$) e a Lei do Meio Exclusivo ($A \cup A' = U$) de conjuntos clássicos não se verificam para conjuntos nebulosos, pois:

$$\begin{aligned}\mu_{A \cap A'} &= \mu_A(x) \wedge (1 - \mu_A(x)) \neq 0 \Rightarrow A \cap A' \neq \emptyset \\ \mu_{A \cup A'} &= \mu_A(x) \vee (1 - \mu_A(x)) \neq 1 \Rightarrow A \cup A' \neq U\end{aligned}\tag{38}$$

Também é possível operar conjuntos nebulosos em universos de discurso distintos. Para isso, faz-se uso das normas e co-normas triangulares, que formam uma classe geral de operadores de união e interseção e seguem as propriedades de comutatividade, associatividade, monotonicidade e das condições de contorno [78].

Sejam A e B dois conjuntos nebulosos, respectivamente definidos nos universos U e V , e a e b valores de pertinência dados por $a = \mu_A(x)$ e $b = \mu_B(y)$, as normas e co-normas podem ser definidas como:

- A norma triangular ou norma- t é uma operação binária $t : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, onde " \times " denota o produto cartesiano, e satisfaz as seguintes condições:

Comutatividade: $a \mathbf{t} b = b \mathbf{t} a$

Associatividade: $a \mathbf{t} (b \mathbf{t} c) = (a \mathbf{t} b) \mathbf{t} c$

Monotonicidade: Se $a \leq b$ e $c \leq d$ então $a \mathbf{t} c \leq b \mathbf{t} d$

Condições de contorno: $a \mathbf{t} 0 = 0$, $a \mathbf{t} 1 = a$

Dentre as normas- t mais utilizadas estão:

Interseção:

$$a \mathbf{t} b = \min(a, b)\tag{39}$$

Produto algébrico:

$$a \mathbf{t} b = ab\tag{40}$$

Produto limite:

$$a \mathbf{t} b = \max\{0, a + b - 1\}\tag{41}$$

Produto drástico:

$$a \mathbf{t} b = \begin{cases} a & b = 1 \\ b & a = 1 \\ 0 & a, b < 1 \end{cases} \quad (42)$$

- A co-norma triangular ou norma-s é uma operação binária $s : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, onde " \times " denota o produto cartesiano, e satisfaz as seguintes condições:

Comutatividade: $a \mathbf{s} b = b \mathbf{s} a$

Associatividade: $a \mathbf{s} (b \mathbf{s} c) = (a \mathbf{s} b) \mathbf{s} c$

Monotonicidade: Se $a \leq b$ e $c \leq d$ então $a \mathbf{s} c \leq b \mathbf{s} d$

Condições de contorno: $a \mathbf{s} 0 = a$, $a \mathbf{s} 1 = 1$

Dentre as normas-s mais utilizadas estão:

União:

$$a \mathbf{s} b = \max(a, b) \quad (43)$$

Soma algébrica:

$$a \mathbf{s} b = a + b - ab \quad (44)$$

Soma limite:

$$a \mathbf{s} b = \min\{1, a + b\} \quad (45)$$

Soma drástica:

$$a \mathbf{s} b = \begin{cases} a & b = 1 \\ b & a = 1 \\ 0 & a, b > 0 \end{cases} \quad (46)$$

Fazendo uso da norma-t e da norma-s podemos operar conjuntos nebulosos em universos de discurso distintos, mapeando elementos de um universo para outro através do produto cartesiano dos universos.

Chamamos esse mapeamento de relações nebulosas (relações *fuzzy*). Essas relações também seguem as propriedades de comutatividade, associatividade, distributividade, idempotência, entre outras. Mas embora suportem as leis de De Morgan, também não suportam a lei da contradição nem a lei do meio exclusivo.

Assim temos generalizações das relações tradicionais, de forma que:

Interseção:

$$\mu_{A \cap B}(x, y) = \mu_A(x, y) \mathbf{t} \mu_B(x, y) \quad (47)$$

União:

$$\mu_{A \cup B}(x, y) = \mu_A(x, y) \mathbf{s} \mu_B(x, y) \quad (48)$$

Complemento:

$$\mu_{A'}(x, y) = 1 - \mu_A(x, y) \quad (49)$$

Podemos descrever relações entre conjuntos nebulosos através de declarações condicionais nebulosas do tipo SE-ENTÃO (*IF-THEN*), definidas matematicamente como:

$$R : SE A ENTÃO B = A \rightarrow B = A \times B \quad (50)$$

Neste caso, a relação nebulosa $A \times B$ significa $A \rightarrow B$ no produto cartesiano dos dois universos $U \times V = \{(x, y) \mid x \in U, y \in V\}$.

De acordo com a literatura, a função de pertinência $\mu_R(x, y)$ que define a implicação da declaração condição pode ser obtida de diversas formas, das quais as mais conhecidas são:

Zadeh:

$$\mu_R(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\} \quad (51)$$

Mamdani:

$$\mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (52)$$

Larsen:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (53)$$

Lukasiewicz:

$$\mu_R(x, y) = \min\{1, [1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]\} \quad (54)$$

3.6 Sistema de inferência nebuloso

As relações nebulosas geram conjuntos de regras que juntas a uma base de dados podem ser usadas por um sistema de inferência nebuloso. A união da base de dados e do conjunto de regras formam a base de conhecimento de um sistema de inferência nebuloso.

As bases de dados são formadas por conjuntos nebulosos que armazenam informações extraídas de dados numéricos ou fornecidas por especialistas e mantém o registro das informações de forma conveniente.

A Figura 12 apresenta os blocos funcionais de um sistema de inferência nebuloso.

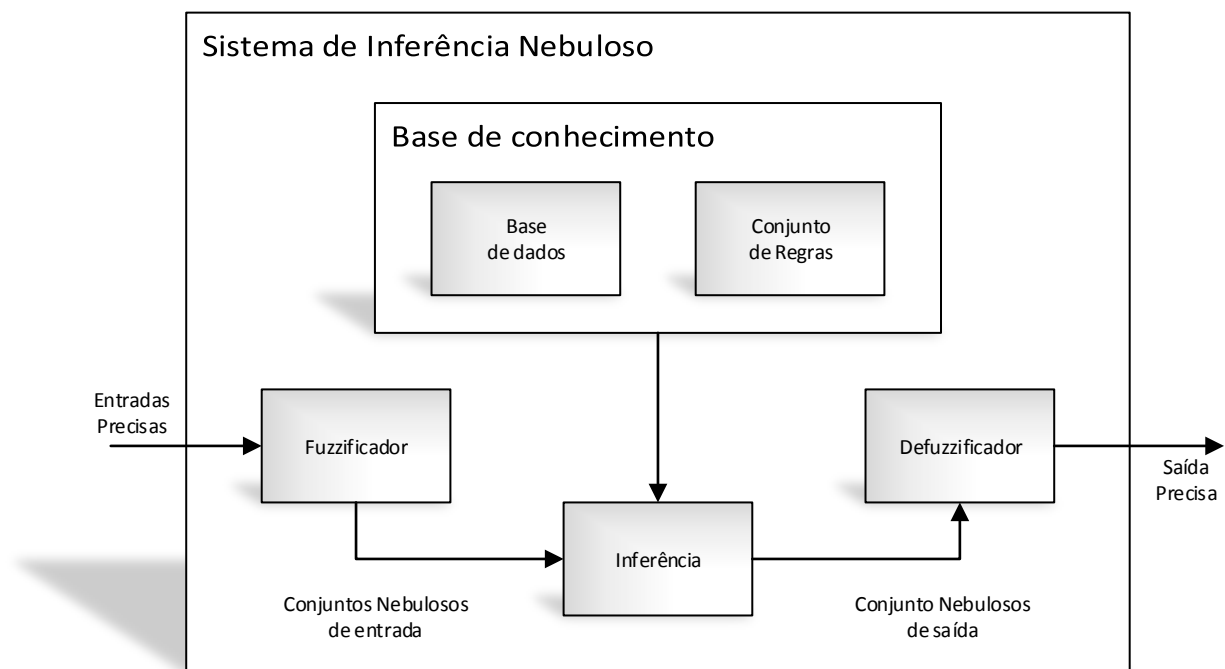


Figura 12. Diagrama de blocos de um sistema de inferência nebuloso.

O Fuzzificador (ou Interface de Fuzzificação) recebe os valores das variáveis de entrada e converte estes valores precisos (*crisp*) em valor de pertinência para cada função de pertinência definida nos universos de discurso correspondentes.

A Interface de Inferência processa o valor de pertinência de cada conjunto nebulosos de entrada em função da base de conhecimento e gera como resultado um conjunto nebuloso, simulando os processos de decisão humana fundamentados em conceitos nebulosos.

O Defuzzificador (ou Interface de Defuzzificação) transforma o conjunto nebuloso proveniente da interface de inferência em um valor preciso (*crisp*) que é o dado de saída do sistema de inferência nebuloso.

Existem diversos métodos de defuzzificação, cada um com uma característica intrínseca que o torna mais ou menos apropriado para uma determinada aplicação. Os métodos de defuzzificação mais conhecidos são [71]:

Centro da Área (CoA) ou Centro de Gravidade (CoG):

$$x^* = \frac{\sum_{j=1}^N x_i \cdot \mu_{OUT}(x_i)}{\sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(x_i)} \quad (55)$$

Centro dos Máximos (CoM):

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{k=1}^N \mu_{OUT}(x_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(x_i)} \quad (56)$$

Média dos Máximos (MoM):

$$x^* = \sum_{m=1}^M \frac{x_m}{M} \quad (57)$$

onde: x^* é o valor de saída do defuzzificador;

x_i é a posição da função de pertinência individual;

$\mu_{OUT}(x_i)$ é a área da função de pertinência modificada pela inferência nebulosa;

x_m é o m -ésimo elemento do universo de discurso, onde a função $\mu_{OUT}(x_i)$ tenha valor máximo;

M é o máximo de elementos x_m .

Um caso particular da MoM acontece quando a defuzzificação retorna um número nebuloso do tipo *singleton*. Neste caso, na possibilidade de um empate entre dois ou mais valores máximos, a média entre eles não faz sentido, pois o suporte deste valor seria nulo. Assim, adota-se um critério de escolha para definir uma única opção dentre as empatadas como saída.

O método Primeiro dos Máximos (FoM) retorna o primeiro ponto do domínio da função de pertinência com o maior grau de pertinência enquanto o método Último dos Máximos (LoM) retorna o último ponto do domínio da função de pertinência com o maior grau de pertinência.

Em aplicações de controle de malha fechada, onde o sistema de inferência nebuloso é usado para controlar uma variável de processo, saltos na saída do oscilador podem causar instabilidade e oscilações no sistema. Neste caso, métodos de defuzzificação que não apresentam mudanças bruscas na saída em função de entradas minimamente diferentes, como o CoA e o CoM, são mais indicados.

Em aplicações de suporte a decisão, como em sistemas de alocação de recursos ou priorização de projetos, o método de defuzzificação mais indicado é o CoM.

Em aplicações de reconhecimento de padrões, os métodos MoM, FoM ou LoM são indicados como método de defuzzificação pois apresentam o resultado mais plausível em termos de similaridade entre o objeto comparado e padrão de comparação.

3.7 Considerações sobre números nebulosos

Devido à característica dos números nebulosos de expressar transições graduais de não-pertinência para pertinência, eles podem ser usados para expressar o grau de pertinência de uma grandeza elétrica numa função de pertinência que represente uma assinatura de uma carga de uma determinada carga elétrica. Desta forma, é possível verificar qual carga está em operação ao comparar os graus de pertinência.

Por exemplo, sejam S e A as funções de pertinência que representam as assinaturas de carga geradas pelo consumo de corrente elétrica de um secador de cabelo e um aspirador de pó, respectivamente. Ao realizar uma medida de corrente elétrica m , é possível estimar qual aparelho é responsável pelo consumo desta corrente comparando os graus de pertinência de m em S e A . Supondo $\mu_S(m) = 0,8$ e $\mu_A(m) = 0,6$, atribui-se o consumo energético, no momento da medida m , ao secador de cabelo.

Para representar as funções de pertinência em sistemas embarcados, o número nebuloso triangular aparenta ser uma boa opção, pois suas operações de soma e adição resultam em uma mesma forma triangular e sua representação é dada por três pontos, ocupando pouca memória.

Capítulo 4

Técnica de discriminação de cargas elétricas baseada em conjuntos nebulosos

Discriminar o funcionamento de cargas elétricas monitoradas em nível de circuito e desagregar seu consumo energético não é trivial. Se uma única carga pode apresentar diferentes assinaturas de carga em função de seus estados de operação, várias cargas elétricas operando em estados aleatórios, e em um mesmo circuito, dificultam ainda mais o processo de monitoramento energético.

Conforme apresento no Capítulo 2, diversas pesquisas abrangem esta problemática e propõem metodologias para solucioná-la. No geral, elas adotam técnicas de reconhecimento de padrões baseadas em inteligência artificial. Redes neurais e algoritmos genéticos são as técnicas de AI mais abordadas, no entanto, a lógica nebulosa também se mostra eficiente na discriminação das cargas elétricas em sistemas NILM.

Esta técnica permite realizar reconhecimento de padrões de forma eficiente com complexidade computacional relativamente baixa [79], o que a caracteriza como promissora e compatível com sistemas embarcados e sistemas NILM.

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de uma técnica para discriminação de cargas elétricas para sistemas NILM, baseada em análise de conjuntos nebulosos e desenvolvida objetivando possibilitar sua implementação em um sistema embarcado.

4.1 Assinatura de carga baseada em conjuntos nebulosos

Parâmetros elétricos para a definição da assinatura de cargas devem possuir as seguintes características: apresentam valores bastante diferentes para diferentes cargas e repetem-se para a mesma carga.

A escolha de quais parâmetros são usados para a definição de assinaturas de cargas é um fator determinante no desempenho de sistemas NILM. O uso de poucos parâmetros reduz a acurácia da identificação, por outro lado, o uso de muitos parâmetros tornam os algoritmos de reconhecimento complexos e lentos, dificultando a sua implementação em sistemas embarcados ou até mesmo inviabilizando sua implementação.

Como a maioria dos sistemas NILM são desenvolvidos utilizando microcontroladores, a complexidade computacional dos algoritmos usados para calcular os parâmetros elétricos desejados é um fator limitante no desenvolvimento desses sistemas.

O uso dos componentes harmônicos do sinal de corrente como parâmetro para distinção de cargas residenciais tem se mostrado bastante promissor. Nos trabalhos apresentados em [43] e [46] foram utilizadas as oito primeiras harmônicas ímpares para análise de assinatura de cargas, em [47] as dezesseis primeiras harmônicas pares e ímpares foram usadas enquanto que em [38] apenas as 2ª e 3ª harmônicas são analisadas. Tendo em vista o custo computacional dos algoritmos usados para o cálculo da Transformada Discreta de Fourier (FFT, Goertzel, etc), o cálculo de muitas harmônicas, a uma taxa elevada e em tempo real pode se tornar impraticável.

O Módulo Medidor que empregamos neste trabalho se encarrega de calcular e entregar, a uma taxa de 1 Hz, as medidas de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, módulo e ângulo das primeiras cinco harmônicas ímpares (1ª, 3ª, 5ª, 7ª e 9ª harmônicas) da corrente [29].

No Brasil, os valores nominais das tensões fornecidas pela rede de distribuição pública para unidades consumidoras de baixa tensão variam de acordo com a localidade da unidade consumidora, podendo ser de 115, 120, 127 ou 220V, quando monofásicas e 220, 230, 240, 254 ou 440V, quando bifásicas [80].

Embora haja um valor nominal, a tensão eficaz oferecida pela rede pode variar. Em decorrência da natureza da geração e distribuição da energia elétrica, para manter constante a amplitude da

tensão no ponto de alimentação, independente da carga solicitada, é necessário dispor de recursos de controle em todos os níveis de tensão: nos geradores, a amplitude da tensão terminal é controlada através do campo de excitação; em transformadores reguladores, o nível de tensão é controlado através da troca de derivações. Em outros pontos da rede, a tensão pode ser regulada através de dispositivos controlados eletronicamente, os chamados compensadores estáticos de reativos, que controlam a absorção de corrente indutiva ou capacitiva, em função dos desvios da referência de tensão [81].

Independentemente do valor nominal oferecido na localidade, as instalações elétricas são padronizadas para fornecer um mesmo valor de tensão eficaz comum a todos os aparelhos instalados no circuito.

Os aparelhos elétricos são, em suma, cargas elétricas que possuem um ou mais estados de operação em regime permanente. Ao alimentar uma carga elétrica com uma tensão senoidal, observa-se a manifestação de uma corrente elétrica, também senoidal. Quando a carga possui natureza não-linear, a exemplo de cargas compostas por componentes semicondutores amplamente empregadas em fontes de alimentação de equipamentos modernos, a corrente resultante apresenta componentes harmônicas que causam ruídos na rede elétrica e fazem com que a tensão de alimentação das demais cargas deixe de ser uma onda senoidal pura.

Praticamente todas as instalações elétricas apresentam tensão de alimentação com componentes harmônicas e com variação de amplitude tanto da fundamental quanto das componentes harmônicas. Consequentemente, a corrente elétrica resultante também apresenta variações análogas as da tensão. Somando a este cenário os vários possíveis estados de operação das cargas, temos então, como resultado do funcionamento de uma carga elétrica, uma corrente elétrica resultante difusa.

Como as grandezas elétricas medidas pelo Módulo Medidor decorrem da tensão e da corrente, ao monitorar o funcionamento das cargas elétricas é esperado encontrar valores difusos para todas as grandezas elétricas medidas.

Com o intuito de minimizar a variação da corrente e seus componentes harmônicos em função da variação da tensão de alimentação, propõe-se normalizar as componentes harmônicas da corrente pelo valor eficaz da tensão de alimentação, criando assim variáveis que vamos denominar como **admitâncias relativas**.

A admitância é uma medida que representa o quanto um componente elétrico permite a passagem de corrente. É definida como o inverso da impedância, ou seja, a divisão do valor eficaz da corrente pelo valor eficaz da tensão, com os valores eficazes formados pela soma de todos os componentes harmônicos das respectivas grandezas elétricas. Como nesta proposta as variáveis criadas dividem apenas um componente harmônico da corrente pela soma de todos os componentes harmônicos da tensão, elas não caracterizam admitâncias propriamente ditas. Mas como apresenta o Siemens [S] como unidade de medida, optou-se por utilizar o termo admitância relativa do primeiro harmônico para indicar a normalização da componente fundamental da corrente elétrica, admitância relativa do terceiro harmônico para indicar a normalização do terceiro harmônico da corrente elétrica e assim sucessivamente.

$$Y_{H_n} = \frac{I_n \angle \theta_{I_n}}{V \angle \theta_V} = |Y_{H_n}| \angle \theta_{H_n} [S] \quad (58)$$

onde: Y_{H_n} é a admitância relativa do n-ésimo harmônico da corrente;

I_n é o módulo do n-ésimo harmônico da corrente;

θ_{I_n} é o ângulo do n-ésimo harmônico da corrente;

V é o módulo da tensão de alimentação;

θ_V é o ângulo da tensão de alimentação;

$|Y_{H_n}|$ é o módulo da admitância relativa do n-ésimo harmônico da corrente;

θ_{H_n} é o ângulo da admitância relativa do n-ésimo harmônico da corrente.

Pode-se notar na expressão matemática dada pela Eq. (58) que a admitância relativa é uma grandeza complexa, formada por um módulo (dado em valor eficaz) e um ângulo (dado em graus). O Módulo Medidor considera o ângulo da tensão de alimentação como a referência para calcular os ângulos da corrente e seus componentes harmônicos, assim, θ_V é zero e $\theta_{H_n} = \theta_{I_n}$.

Embora esta normalização não possua eficácia total para cargas não lineares, ela minimiza fortemente a variação da corrente e de seus componentes harmônicos em função da variação da tensão de alimentação, evidenciando a corrente e seus componentes harmônicos em função da natureza elétrica da carga em seus respectivos estados de operação.

Assim, optou-se por adotar a admitância relativa dos cinco primeiros componentes harmônicos ímpares da corrente, juntamente com a potência ativa, como notação de assinatura de carga. A assinatura foi definida como um conjunto de números nebulosos, um para cada admitância relativa, mais um para a potência ativa, que possuem suas funções de pertinência em forma de números nebulosos triangulares. A forma triangular foi adotada em função de sua simplicidade computacional, adequada para implementação em sistemas embarcados.

Estes números nebulosos são aproximações dos histogramas de suas medidas, dadas da seguinte forma: o suporte da função de pertinência é dado pelo intervalo entre o menor e o maior valor medido, enquanto o núcleo é um valor unitário que corresponde à média de todos os valores medidos.

A Figura 13 ilustra a função de pertinência triangular aproximada do histograma da potência ativa de um liquidificador modelo Eletrolux Powermix Silent PSB01.

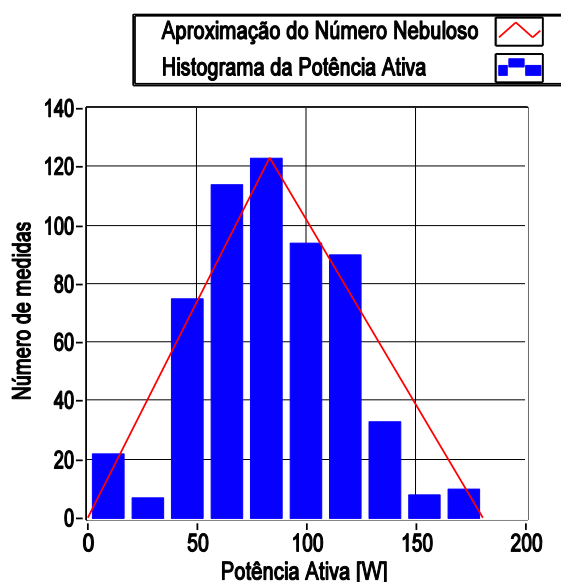


Figura 13. Função de pertinência triangular aproximada do histograma da potência ativa.

4.2 Monitoramento de cargas elétricas em um mesmo circuito

Pela teoria de circuitos é possível constatar que, em circuitos paralelos, a tensão eficaz de alimentação é a mesma para todas as cargas no circuito, independentemente da quantidade de cargas elétricas dispostas no circuito. Assim, em instalações elétricas, os equipamentos são

ligados em paralelo, garantindo que todos eles sejam alimentados com o mesmo valor de tensão eficaz.

A corrente eficaz drenada da fonte de alimentação em uma associação de cargas em paralelo aumenta em função da quantidade de cargas ligadas, pois a corrente total drenada é a soma de todas as correntes individualmente drenadas por cada carga no circuito. Como a potência é dada pela tensão multiplicada pela corrente, fica evidente que a potência também aumenta em função da quantidade de cargas ligadas no circuito.

Portanto, se a corrente e a potência de cada carga são conhecidas, considerando que as correntes e as potências sejam diferentes para cada carga, é possível discriminar qual carga está ligada de acordo com a medida da corrente e da potência do circuito. Neste exemplo, a corrente e a potência formam as assinaturas de cargas. A Figura 14 ilustra o monitoramento em nível de circuito de um circuito elétrico residencial.



Figura 14. Circuito elétrico residencial monitorado por um medidor inteligente.

Talvez a forma mais simples de se implementar um algoritmo para discriminar quais cargas estão ligadas em um circuito seja através do monitoramento da variação (ou delta) da grandeza elétrica seguida de comparação com uma tabela de assinatura de cargas. Esta é a abordagem mais comum encontrada na literatura. Ao ligar uma nova carga no circuito, um aumento no valor da grandeza elétrica em relação a medida no instante anterior indica a presença de uma nova carga. Ao comparar o valor desta variação com a tabela de assinatura de cargas, é possível encontrar qual carga entrou em operação. Assim, é possível manter o controle de quais cargas estão ligadas e quais estão desligadas.

O problema desta abordagem é que ela não atua corretamente quando duas ou mais cargas entram em operação ou são desligadas ao mesmo tempo. Outro problema com esta abordagem pode ocorrer em caso de desligamento de cargas durante a queda da força elétrica. Por exemplo, devido a uma tempestade, os usuários podem desconectar alguns aparelhos da tomada para evitar queimá-los com uma possível sobretensão na volta da energia elétrica. Neste caso, quando a força volta, o sistema retoma a operação de onde parou, antes da queda da força, mas como as cargas ligadas não condizem com a memória do sistema, este se perde até que todas as cargas sejam desligadas e o sistema reinicie sua operação.

Uma forma melhor de se discriminar quais cargas estão ligadas em um circuito é através da análise das combinações das cargas elétricas. Baseada no princípio da associação em paralelo, quando uma carga A entra em operação, ela consome x de corrente. Quando uma carga B entra em operação ela consome y de corrente. Quando as duas estão em operação, elas consomem $x + y$ de corrente, caracterizando o comportamento de uma nova carga formada pela associação em paralelo das cargas A e B . Desta forma, ao medir grandezas elétricas derivadas da corrente em um circuito, é possível discriminar qual combinação de cargas está ligada.

A maior dificuldade desta abordagem é que o número de combinações possíveis cresce exponencialmente com a quantidade de cargas no circuito, pois é dado por:

$$C = 2^N - 1 \quad (59)$$

onde: C é o número de combinações;

N é o número de cargas no circuito.

Somando lâmpadas e eletrodomésticos, não é difícil encontrar casas com vinte ou mais cargas elétricas. Apenas como exemplo, se considerarmos uma unidade consumidora residencial com oito conjuntos de lâmpadas, um chuveiro elétrico e onze eletrodomésticos, são mais de um milhão de combinações possíveis de cargas elétricas.

Para minimizar este efeito, nesta proposta faz-se uso de um Módulo Medidor por circuito ao invés de um único Módulo Medidor para monitorar todas as cargas de uma residência.

A norma ABNT NBR 5410:2004 [82] prevê a segmentação da instalação elétrica em circuitos de iluminação, tomadas de uso específico e tomadas de uso geral. No pior caso do exemplo acima,

se todas as lâmpadas pertencerem ao mesmo circuito de iluminação, se todos os eletrodomésticos pertencerem ao mesmo circuito de tomadas de uso geral e com chuveiro instalado em um circuito particular de tomada de uso específico, teríamos apenas 256 combinações no circuito de iluminação, 2047 combinações no circuito dos eletrodomésticos e apenas uma possibilidade no circuito do chuveiro. Números notavelmente muito menores de possibilidades se comparados a todas as possibilidades possíveis. Na prática, em instalações elétricas dentro da norma, encontramos um maior número de circuitos, o que diminui ainda mais o número de combinações de cargas monitoradas por circuito.

Para que se possa fazer comparações, é preciso conhecer quais cargas estão dispostas em cada circuito e também quais são suas assinaturas de carga.

Propõe-se neste trabalho uma etapa de aprendizado para que cada carga possa ser monitorada durante um período em que ela exerça todos os modos de operação que possui. Durante esse período são realizadas medidas de potência ativa e das admitâncias relativas dos cinco primeiros componentes harmônicos ímpares da corrente. Ao final do período são calculados os valores mínimo, máximo e a média de cada grandeza elétrica monitorada. Estes valores montam números nebulosos triangulares como notação da assinatura da carga monitorada.

Voltando no exemplo da unidade consumidora residencial, ainda que 2047 combinações de cargas em um mesmo circuito não seja um valor alto para ser discriminado por medidor inteligente, é um valor incrivelmente alto para se medir durante a etapa de treinamento. Também há de se considerar a complexidade de se operar todas as combinações de cargas em todos os modos de operação disponíveis.

Para realizar o treinamento de forma eficaz, propõe-se que, ao final do treinamento de uma carga, as combinações entre esta e as demais cargas do circuito sejam calculadas. Isto permite a redução drástica tanto da quantidade de monitoramentos realizados durante a fase de treinamento quanto de sua complexidade.

Para organizar as assinaturas de cargas, propõe-se a seguinte técnica:

- ❖ Uma palavra binária registra o número de identificação (ID) da carga e de suas combinações. Todas as cargas recebem um ID cujo valor é dado por:

$$ID_n = 2^n - 1 \quad (60)$$

onde: ID_n é o número de identificação da n -ésima carga que foi treinada no sistema;

n é o número que identifica a ordem na qual a carga foi treinada no sistema.

- ❖ O ID das combinações entre as cargas é dado pela operação OU entre os IDs das cargas que formam as combinações.

Assim, o ID das assinaturas de carga das cargas isoladas possuem um único *bit* 1 em sua palavra binária e os *bits* 1 encontrados no ID de uma combinação de cargas indicam quais cargas formam esta combinação pela posição desses *bits*.

Como exemplo, vamos adotar um palavra binária de 4 *bits* para compor o ID das assinaturas de carga. Supondo que a carga liquidificador seja a primeira carga treinada no sistema, o ID que discrimina a assinatura de carga do liquidificador é 0b0001. Em um segundo momento, o sistema é treinado para identificar um ferro de passar roupas. O ID da assinatura de carga do ferro de passar roupas é 0b0010, enquanto a assinatura de carga dada pela operação do liquidificador junto com o ferro de passar roupas é dado pelo ID 0b0011. A terceira carga treinada é uma geladeira e o ID que identifica sua assinatura de carga é 0b0100. Quando a geladeira opera junto com o liquidificador, ela gera uma assinatura de carga discriminada pelo ID 0b0101 e quando ela opera junto com o ferro de passar roupas, a assinatura de carga é dada pelo ID 0b0110. A operação das três cargas ao mesmo tempo gera uma assinatura de carga identificada pelo ID 0b0111.

Como a assinatura de cargas é formada pela potência ativa mais admitâncias relativas e como as cargas são ligadas em paralelo, para se calcular a assinatura de carga da combinação entre cargas, basta somar o valor de suas assinaturas de carga em seus respectivos universos de discurso, obedecendo a aritmética de números nebulosos triangulares exibida na Seção 3.4 do Capítulo 2.

Como proposta de implementação, a base de dados contendo as assinaturas de carga podem ser armazenadas em um arquivo de texto, de forma que cada linha deste possua a notação da assinatura de uma carga específica. Neste modelo, cada linha é composta por 19 campos separados por tabulação. O primeiro campo especifica o ID da carga cuja assinatura consta nos campos seguintes. Os campos 2, 3 e 4 registram respectivamente os valores mínimo, média e máximo da potência ativa. Os campos 5, 6 e 7 registram respectivamente os valores mínimo,

média e máximo da admitância relativa da fundamental da corrente. Os campos 8, 9 e 10 registram respectivamente os valores mínimo, média e máximo da admitância relativa do terceiro harmônico da corrente. E assim respectivamente até que os campos 17, 18 e 19 registrem respectivamente os valores mínimo, média e máximo da admitância relativa do nono harmônico da corrente.

O último passo do treinamento de uma carga se dá pela criação de uma declaração condicional nebulosa do tipo SE-ENTÃO. Esta declaração condicional informará a interface de inferência que se uma grandeza elétrica medida se assemelha a uma assinatura de carga de uma carga específica, então a carga em operação é a carga específica.

Como proposta de implementação, o conjunto de regras pode ser armazenado em um arquivo de texto, de forma que cada regra é escrita em uma linha deste arquivo. Cada linha é composta por 6 campos separados por tabulação, nos quais os 5 primeiros definem as condições e o último define a implicação da declaração condicional. Naturalmente, as condições se referem às funções de pertinência das assinaturas de carga e a implicação se refere ao ID dessa assinatura de carga. A Figura 15 apresenta um segmento do conjunto de regras para o exemplo das três cargas treinadas.

AR1H_1	AR3H_1	AR5H_1	AR7H_1	AR9H_1	0b0001
AR1H_2	AR3H_2	AR5H_2	AR7H_2	AR9H_2	0b0010
AR1H_3	AR3H_3	AR5H_3	AR7H_3	AR9H_3	0b0011
AR1H_4	AR3H_4	AR5H_4	AR7H_4	AR9H_4	0b0100
AR1H_5	AR3H_5	AR5H_5	AR7H_5	AR9H_5	0b0101
AR1H_6	AR3H_6	AR5H_6	AR7H_6	AR9H_6	0b0110
AR1H_7	AR3H_7	AR5H_7	AR7H_7	AR9H_7	0b0111

Figura 15. Exemplo de segmento do conjunto de regras.

A linha 4 (em negrito) na Figura 15 pode ser lida da seguinte forma: SE medida da admitância relativa da fundamental da corrente = admitância relativa da fundamental da corrente da geladeira E medida da admitância relativa do terceiro harmônico da corrente = admitância relativa do terceiro harmônico da geladeira E medida da admitância relativa do quinto harmônico da corrente = admitância relativa do quinto harmônico da geladeira E medida da admitância relativa do sétimo harmônico da corrente = admitância relativa do sétimo harmônico da geladeira E medida da admitância relativa do nono harmônico da corrente = admitância relativa do nono harmônico da geladeira ENTÃO carga = ID da geladeira.

4.3 Discriminação de cargas elétricas pela análise de conjuntos nebulosos

Uma vez de posse da base de conhecimento formada pela base de dados e do conjunto de regras geradas pelo treinamento do sistema, é possível discriminar qual ou quais cargas estão em operação através de um sistema de inferência nebuloso com defuzzificação do tipo FoM.

Ainda que o método de defuzzificação FoM seja uma técnica de defuzzificação leve em termos computacionais, como este deve ser implementado em um sistema embarcado, com limitações de processamento e principalmente de memória, foi desenvolvida uma metodologia para minimizar o consumo desses recursos.

Ao invés de alimentar o sistema de inferência nebuloso com todas as assinaturas de carga e todo conjunto de regras disponíveis, propõe-se realizar uma busca na base de conhecimento e selecionar um grupo de assinaturas de cargas que apresentem potência ativa com valor mínimo superior ou igual a 87% potência ativa medida e valor máximo inferior ou igual a 113% potência ativa medida. Com menos opções para serem processadas, esta técnica diminui drasticamente a quantidade de memória necessária e também a quantidade de cálculos executados pelo sistema de inferência nebuloso.

O intervalo de $\pm 13\%$ da potência ativa medida foi escolhido em função da variação da tensão da rede de distribuição de tensão nominal de 127V. A ANEEL considera crítica (inferior ao patamar de precária) uma rede de 127V com tensão superior a 135V [83], o que corresponde a uma variação de 6,3%. Como a potência aumenta com o quadrado da tensão, espera-se não encontrar na prática uma variação de potência superior a 13%. Por facilitar a implementação do algoritmo optou-se por manter a mesma variação para o nível inferior, ainda que para a ANEEL a variação de -6,3% na da tensão da rede de 127V esteja classificada na condição precária.

Esse processo de otimização é executado por uma interface denominada montadora. Uma vez que a interface montadora seleciona as assinaturas de cargas que apresentam valores de potência ativa no intervalo de $\pm 13\%$ do valor medido, ela cria uma nova base de conhecimento, denominada base de conhecimento instantânea. Criada de forma descartável para cada execução de inferência realizada, a base de conhecimento instantânea é a base de conhecimento que alimenta o sistema de inferência nebuloso nesta proposta.

A Figura 16 apresenta o fluxograma do algoritmo do sistema de inferência.

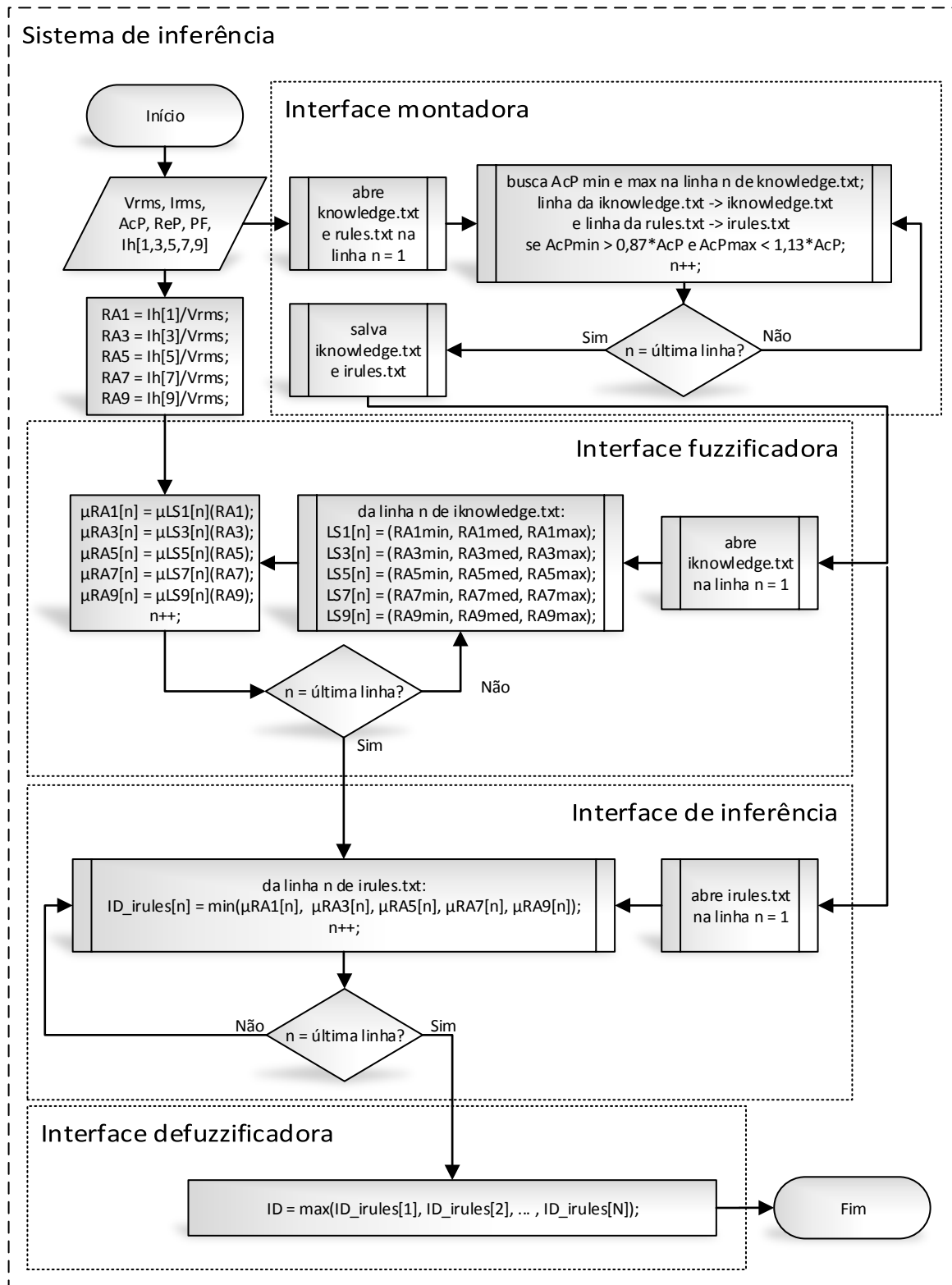


Figura 16. Fluxograma do algoritmo do sistema de inferência.

A Figura 17 ilustra o funcionamento do sistema de inferência nebuloso.

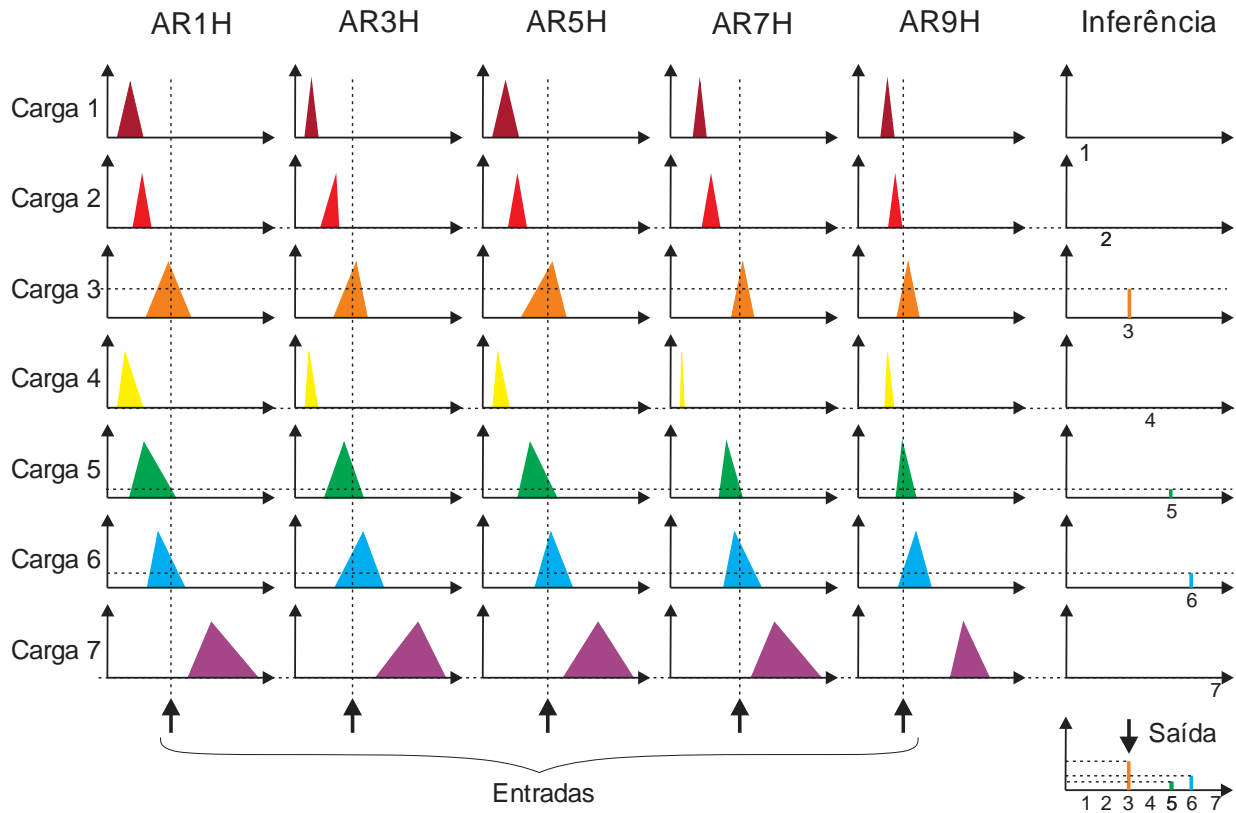


Figura 17. Funcionamento do sistema de inferência nebuloso.

Na entrada do sistema de inferência nebuloso, uma interface de fuzzificação recebe os valores das medidas de admitâncias relativas e calcula o grau de pertinência desses valores para cada função de pertinência das assinaturas de carga presentes na base de conhecimento instantânea.

A interface de inferência recebe estes valores e, através da norma-t, realiza a operação de interseção entre os graus de pertinência das funções de pertinência de todas as admitâncias relativas de uma mesma carga. O resultado desta interseção é a criação de um número nebuloso com formato *singleton*, cujo domínio, dado pela implicação da condição de inferência, se refere ao ID da carga inferida e a altura, dada pela Eq. (39), expõe o grau de pertinência da inferência.

A interface defuzzificadora analisa todos os número nebulosos gerados pela interface de inferência e retorna o valor do domínio do *singleton* que possui maior altura. Caso haja um empate entre mais de um *singleton*, o valor retornado é o valor do domínio do primeiro encontrado.

O ID retornado pelo sistema de inferência nebuloso é enviado a uma interface, denominada interface de desagregação, para saber se o ID se refere a uma carga exclusiva ou a uma combinação de cargas.

A verificação é feita através da operação binária E entre a o ID e uma máscara formada pelo *bit* 1, deslocada para a esquerda, até $n - 1$ vezes, sendo que n é o número de cargas treinadas. Para cada operação binária E executada, se a resposta é igual a 1, ela indica que a carga identificada pelo valor da máscara faz parte da combinação que gerou a assinatura de carga deste ID. Se entre todas as operações binárias E, apenas uma resposta for igual a 1, o ID verificado é de uma carga exclusiva.

Quando um ID de carga exclusiva é verificado, o valor da potência ativa medida é atribuído a ela. Como as medidas são realizadas a cada segundo, adota-se que o consumo da carga seja constante neste período. Desta forma, ao integrar estes valores, tem-se o valor do consumo de energia em Watt-segundo.

Quando mais de uma carga é encontrada em um ID verificado, o valor do consumo atribuído a cada carga é aproximado por:

$$E_n = P \cdot \frac{Pm_n}{\sum_{n=1}^N Pm_n} \cdot 1s [Ws] \quad (61)$$

onde: E_n é o consumo da n -ésima carga que compõe a combinação de cargas;

P é a medida da potência ativa;

Pm_n é média da potência ativa da n -ésima carga que compõe a combinação de cargas;

N é o número de cargas que compõem a combinação de cargas;

1s é um segundo.

Assim, desagrega-se o consumo medido, atribuindo às N cargas suas respectivas parcelas do consumo.

Se nenhum ID é encontrado, o valor do consumo é atribuído à uma carga fictícia denominada outros, que possui o ID fixo 0xFFFFFFFF.

Capítulo 5

Implementação do sistema NILM baseado em conjuntos nebulosos

Inicialmente denominado “Sistema Inteligente de Gestão Energética para Unidades Consumidoras de Baixa Tensão”, o sistema NILM apresentado neste trabalho faz parte do desenvolvimento de um projeto maior, uma linha de pesquisa que, com o apoio de companhias distribuidoras de energia elétrica, busca prover soluções de monitoramento de cargas elétricas residenciais.

Como a inteligência do sistema é proveniente de análises de conjuntos nebulosos, optou-se por modificar o nome inicial, referenciado na dissertação de mestrado que deu origem ao módulo medidor customizado, para “Sistema não invasivo de monitoramento de consumo de energia elétrica baseado em conjuntos nebulosos”.

Embora o sistema desenvolvido foque no monitoramento energético de unidades consumidoras de baixa tensão residenciais, acredita-se que as técnicas aqui empregadas sejam úteis para qualquer tipo de unidade consumidora desde que os módulos de sensoriamento das grandezas elétricas sejam adaptados tanto para amplitudes de tensão e corrente quanto para a frequência de operação da rede.

Neste capítulo apresenta-se a concepção do sistema NILM que adota a técnica de discriminação de cargas elétricas baseada em conjuntos nebulosos, exibindo os cenários de teste e comentando os resultados.

5.1 Descrição do sistema

O sistema não invasivo de monitoramento de consumo de energia elétrica baseado em conjuntos nebulosos é fundamentado em medição centralizada não invasiva (NILM), em nível de circuito.

Cada circuito elétrico presente na unidade consumidora residencial é monitorado por um módulo medidor dedicado, instalado na saída de cada um dos disjuntores presentes na caixa de distribuição elétrica.

Esta abordagem é deveras importante, pois permite diminuir o número de cargas monitoradas por um único medidor, resultando na redução drástica de possibilidades de cargas elétricas operando ao mesmo tempo no mesmo circuito.

O sistema é composto por vários módulos de *software* e *hardware* que juntos serão capazes de informar ao usuário, em tempo próximo do real, o consumo de cada aparelho elétrico presente na residência. Isto permite ao usuário conhecer fidedignamente o consumo energético dos equipamentos elétricos que possui, em função de seus hábitos de uso.

Concebido de forma modular, o sistema é composto pelos seguintes componentes físicos:

- Módulos Medidores;
- Unidade de Processamento;
- Unidade de Apresentação.

5.1.1 Módulo Medidor

Desenvolvido para ser usado especialmente neste trabalho, o módulo medidor apresentado em [29] foi criado para monitorar circuitos elétricos monofásicos e bifásicos, fornecendo à unidade de processamento os valores das medidas das seguintes grandezas elétricas: tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, módulo e ângulo das primeiras cinco harmônicas ímpares (1ª, 3ª, 5ª, 7ª e 9ª harmônicas) da corrente.

Este módulo medidor é capaz de operar em instalações elétricas com tensão nominal eficaz de até 220V, e corrente eficaz de até 50A por circuito. Desenvolvido com uso de técnicas de programação que permitem uma alta otimização dos cálculos das grandezas elétricas, apresentados na seção 2.1, o módulo medidor é baseado em um microcontrolador de 16 Bits da

Texas Instruments, o MSP430AFE253 [84], de baixo custo, baixo consumo e com ADC Sigma-Delta de 24 bits e multiplicador de 32 bits integrados.

Embora seu emprego nesta Tese tenha sido o monitoramento de cargas elétricas em estado estacionário, o módulo medidor é capaz de calcular todas as grandezas elétricas supramencionadas a uma frequência máxima de 46 Hz, viabilizando seu uso para análise de transientes.

Ele apresenta erros iguais ou inferiores a 0,14% na potência ativa, 0,21% na potência aparente, 0,05% no fator de potência, 0,05% no valor da tensão eficaz e 0,26% na corrente eficaz, 0,03% para a componente fundamental da corrente, 0,58% para a 3ª harmônica, 3,69% para a 5ª harmônica, 6,63% para a 7ª harmônica e 11,81% para a 9ª harmônica.

A comunicação com a unidade de processamento é feita de forma serial. Apesar de possuir um formato compatível com a interface PCIe x1, a comunicação se faz por meio do protocolo SPI. A Figura 18 apresenta o módulo medidor em seu tamanho real.



Figura 18. Módulo Medidor.

Mais informações a respeito deste medidor estão disponíveis em [29] e [34].

5.1.2 Unidade de Processamento

O principal módulo desenvolvido neste trabalho é a Unidade de Processamento. Durante o desenvolvimento, este módulo sofreu diversas modificações e sua versão final difere das citações nos artigos submetidos antes da defesa da Tese.

O projeto inicial propunha uma Unidade de Processamento composta por um computador de arquitetura x86 de dimensões reduzidas (mini-ITX), executando um *software* desenvolvido em

ambiente LabVIEW, que implementaria o algoritmo de identificação de cargas. No entanto, com o intuito de desenvolver uma ferramenta escalável e acessível, que possa ser de fato usada em programas de eficiência energética e também disponibilizada no mercado, optou-se por substituir o computador x86 por um sistema embarcado baseado em um microcontrolador ARM com conectividade Wi-Fi.

Esta mudança final na escolha da arquitetura do sistema reduziu drasticamente o poder de processamento e também a quantidade de memória disponível, dando uma nova dimensão para o desafio de desenvolver a técnica de desagregação do consumo energético de cargas elétricas compatível com as limitações do sistema.

O ARM Cortex-M4 foi o microcontrolador escolhido como núcleo da unidade de processamento. Além de possuir uma excelente relação de custo x benefício, ele integra uma grande variedade de recursos como arquitetura de 32 *Bits*, periféricos de comunicação flexíveis e operador aritmético de alta performance com operações de ponto flutuante [85].

Diversas empresas como Atmel, Freescale, NXP, Texas Instruments, entre outras, produzem o Cortex-M4 sob licença da ARM. Cada uma delas oferece soluções para o desenvolvimento de sistemas embarcados com IDEs e kits de desenvolvimentos exclusivos.

Embora as soluções oferecidas sejam semelhantes, a plataforma de desenvolvimento adotada neste trabalho foi a da Texas Instruments, que incorpora o IDE Code Composer Studio na versão 6 e os kits de desenvolvimento EK-TM4C1294XL [86] e o CC3100BOOST [87]. A Figura 19 apresenta os kits de desenvolvimento adotados neste trabalho.

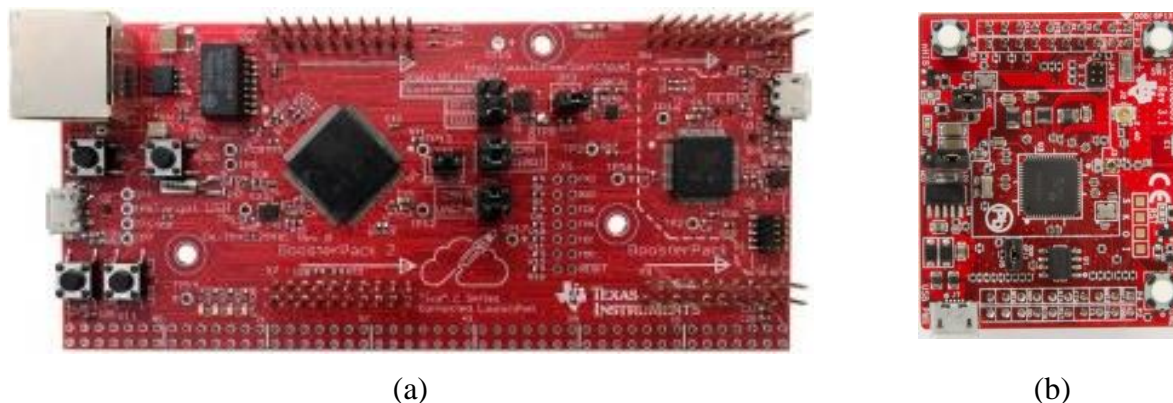


Figura 19. Kits de desenvolvimento: (a) EK-TM4C1294XL e (b) CC3100BOOST.

O principal fator para determinar a escolha da plataforma de desenvolvimento foi a experiência prévia com produtos da mesma empresa e a possibilidade de migrar o código desenvolvido entre diferentes microcontroladores. Mas considera-se válido informar que outros pontos também contaram fortemente a favor desta escolha: a disponibilidade gratuita de códigos fonte com exemplos de uso do sistema operacional (TI-RTOS [88]) e bibliotecas (TivaWare [89]), a ferramenta de programação e depuração (JTAG) integrada nos *kits* de desenvolvimento, o preço dos *kits* de desenvolvimento (US\$ 19,99 cada) e do IDE (grátis) e a disponibilidade no mercado.

O EK-TM4C1294XL, também denominado TM4C1294 *Connected LaunchPad*, traz como elemento principal o microcontrolador TM4C1294NCPDT, um ARM Cortex-M4 que trabalha a 120 MHz e integra 1 MB de memória Flash, 256 kB de memória SRAM, 6 kB de memória EEPROM, unidade de ponto flutuante, USB e 8 temporizadores de 32 *Bits*, entre outros periféricos. Este kit também possui interface *Ethernet* 10/100 MAC+PHY, mas optou-se por deixar a comunicação Wi-Fi por conta do SoC presente no CC3100BOOST. Assim, o TM4C ficou desonerado de uma função que consome processamento consideravelmente e o sistema incorporou comunicação com a Internet de forma sem fio com tecnologia SmartConfig™, uma funcionalidade que facilita o processo de configuração da interface de comunicação Wi-Fi.

Chamado de SimpleLink Wi-Fi CC3100 BoosterPack, o CC3100BOOST é na íntegra uma placa de extensão padronizada que pode ser acoplada em diversos *kits* de desenvolvimento, dentre eles o EK-TM4C1294XL e traz o CC3100 como principal componente. Esta placa de extensão pode ser ligada a praticamente qualquer microcontrolador com comunicação serial SPI ou UART. A Figura 20 apresenta uma generalização da ligação do CC3100 com um microcontrolador.

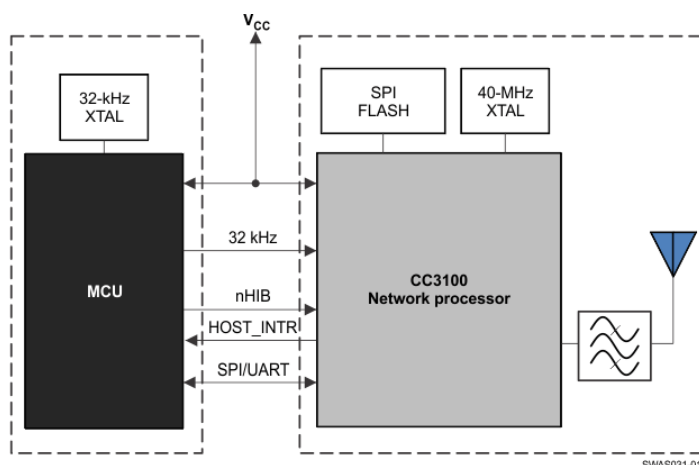


Figura 20. Ligação entre o CC3100 e um microcontrolador [90].

O CC3100 é um SoC de baixo custo com foco em aplicações de Internet das Coisas (IoT). Baseado em um ARM Cortex-M3, ele incorpora em seu *firmware* proprietário os drivers Wi-Fi certificados e a pilha TCP/IP, além de integrar um rádio com características IEEE 802.11 b/g/n.

A tecnologia SmartConfig™ embarcada no CC3100 permite que ele opere tanto como um ponto de acesso (*Access Point*) quanto como um dispositivo cliente (*End Device*). Semelhantemente a roteadores Wi-Fi, o CC3100 possui um servidor HTTP embarcado com suporte de configuração, acessível quando operado em modo de ponto de acesso. Desta forma, o usuário pode fazer uso de um PC, *tablet* ou *smartphone* para realizar uma conexão ponto a ponto com o CC3100 e configurá-lo para que este acesse, como um dispositivo cliente, uma rede Wi-Fi com saída para a Internet.

O EK-TM4C1294XL possui acesso à maioria dos pinos do TM4C. Ele possui em seu *layout* espaço para ligar duas placas de expansão do tipo BoosterPack e uma interface do tipo barra de pinos disponibilizando 98 pontos de conexão, alguns em paralelo com as barras de pinos dos BoosterPacks.

A composição do *hardware* da Unidade de Processamento foi então definida por um EK-TM4C1294XL, que constitui a base onde é ligado um CC3100BOOST na área BoosterPack 1 e um adaptador de cartão de memória SD mais uma interface de alimentação e comunicação do Módulo Medidor na área BoosterPack 2.

Cartões de memória do tipo SD são muito utilizados como memória de massa em sistemas embarcados. Fortemente difundidos em dispositivos eletrônicos como câmeras digitais e telefones celulares, os cartões SD permitem armazenamento de grande quantidade de informação de forma confiável a um custo extremamente baixo. Por este motivo ele foi adotado como memória de massa onde fica armazenada a base de conhecimento do sistema.

Os Módulos Medidores foram desenvolvidos para receber a alimentação e os sinais condicionados de tensão da rede elétrica através de uma placa concentradora. No protótipo de laboratório, esta placa foi simplificada por uma interface que atende apenas um Módulo Medidor, adaptada da placa de testes utilizada em [29].

O *hardware* da Unidade de Processamento é formado pela conexão do EK-TM4C1294XL com o CC3100BOOST, o adaptador do cartão SD e a interface de comunicação com o Módulo Medidor.

A comunicação do EK-TM4C1294XL com o cartão SD é feita por comunicação serial SPI e o sistema de arquivos é baseado na biblioteca de código aberto FatFS [91].

O *firmware* da Unidade de Processamento é baseado no sistema operacional de tempo real da Texas Instruments, o TI RTOS, que foi escolhido por integrar nativamente as bibliotecas de comunicação com o módulo Wi-Fi CC3100, comunicação com cartão de memória SD, comunicação USB, sistema de arquivos FAT e protocolos TCP/IP. Ele também disponibiliza exemplos de código fonte de diversas técnicas de programação como tarefas, semáforo, temporizadores, relógio de tempo real e tratamento de interrupções de tarefas, *software* e *hardware*. O uso de um sistema operacional facilita o desenvolvimento pois permite organizar as múltiplas rotinas em forma de tarefas claramente definidas e gerenciáveis.

O fluxograma apresentado na Figura 21 ilustra o funcionamento do *firmware* da Unidade de Processamento.

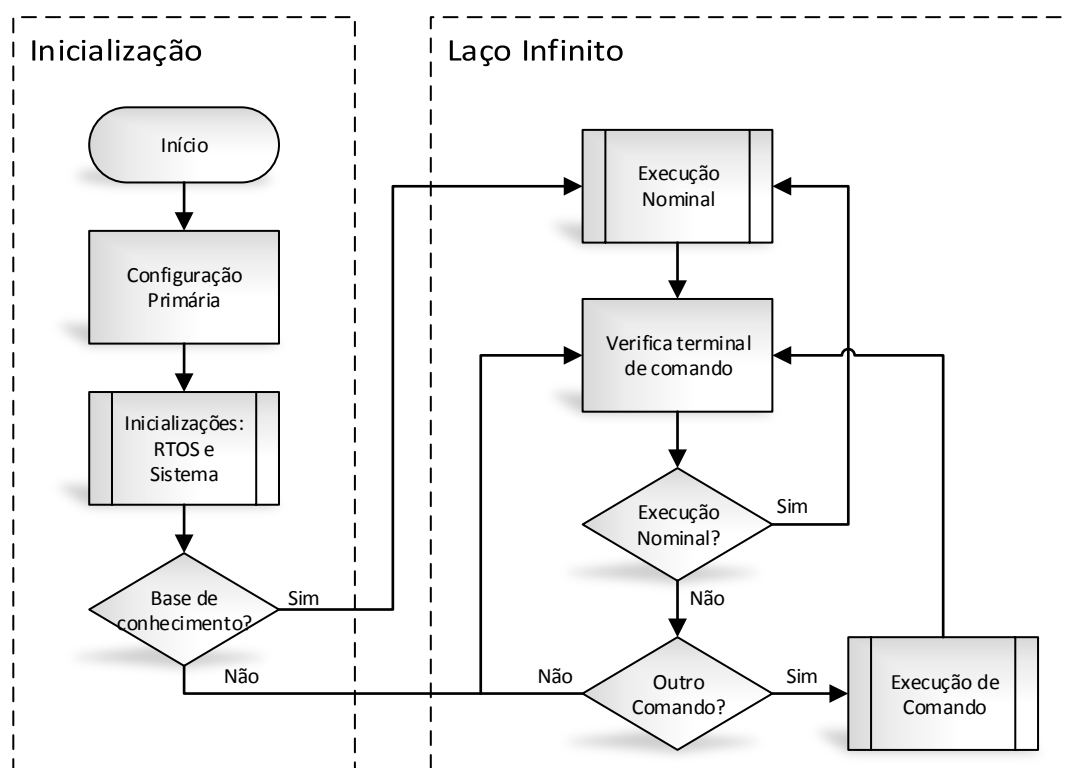


Figura 21. Fluxograma do *firmware* da Unidade de Processamento.

Ao iniciar, o sistema executa a rotina de configuração primária, na qual são selecionadas as funções das portas do microcontrolador. Nesta etapa, são configurados quais portas fazem a aquisição do sinal de clock, quais são de entrada e saída (GPIO), quais fazem as comunicações

SPI e UART com o módulo Wi-Fi, quais fazem a comunicação SPI com o cartão SD e quais se ligam à USB. Também são configurados nesta rotina os periféricos FPU (unidade aritmética de ponto flutuante) e a UART, que opera como terminal de comunicação serial via USB.

Na sequência é configurado o RTOS, que em primeira instância se encarrega de inicializar todos os recursos do *kernel* (temporizadores, gerenciador de memória, semáforos, interrupções e tarefas), os *drivers* (GPIO, UART, SPI, SDSPI, USB, Wi-Fi) e o sistema de arquivo (FatFS). Em seguida o RTOS entra em operação e executa a tarefa de inicialização do sistema, que faz a requisição da hora certa a um servidor NTP e verifica no sistema de arquivos se há registro de uma base de conhecimento e de um número identificador (ID) da Unidade de Processamento. Em caso positivo ele entra automaticamente em modo de execução nominal. Em caso negativo ele aguarda um comando do terminal.

A rotina de Execução Nominal é a implementação da técnica de desagregação *an sich*. Ela é executada ciclicamente, a cada segundo, em função da habilitação de um semáforo controlado por um temporizador. Na Figura 22 é apresentado o fluxograma da rotina de execução nominal.

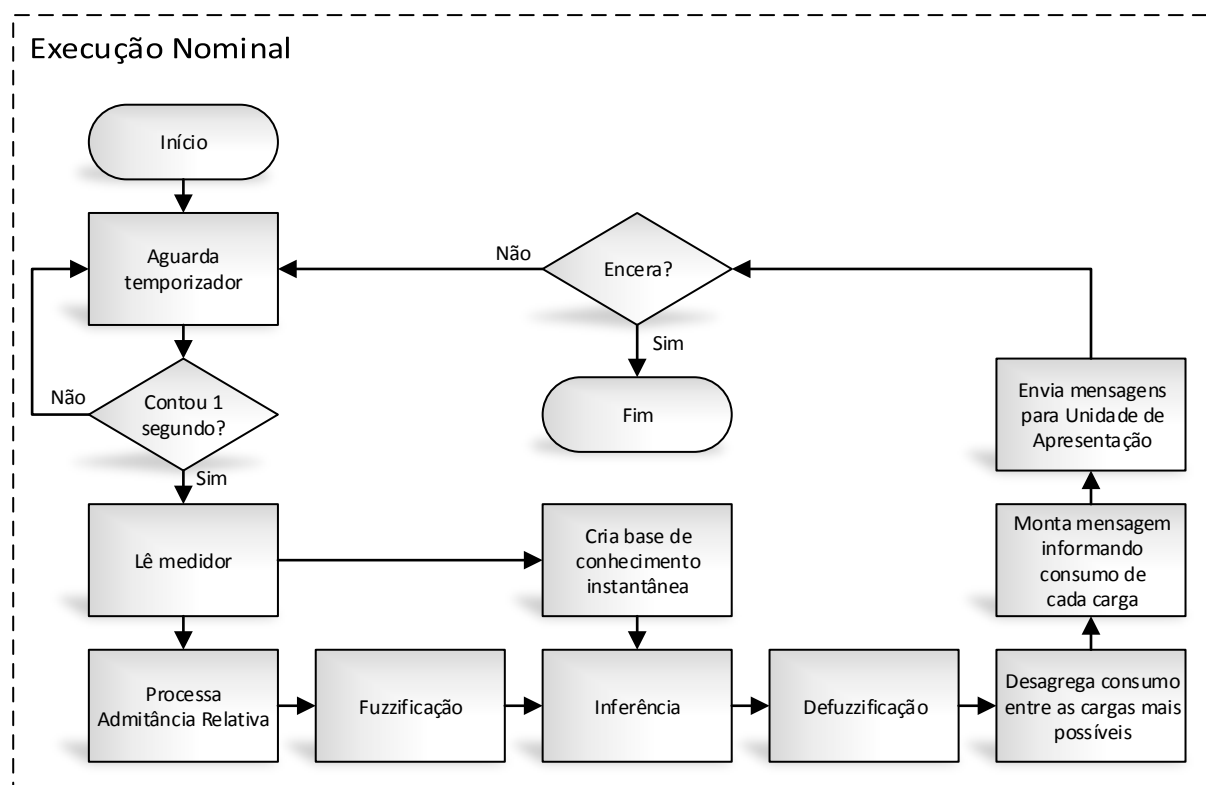


Figura 22. Fluxograma da rotina de execução nominal.

Ao iniciar a rotina de Execução Nominal, ela requisita os valores das grandezas elétricas adquiridas pelo Módulo Medidor através de uma comunicação SPI. Os valores são então processados para gerar as admitâncias relativas que são enviadas a interface de fuzzificação.

O valor da potência ativa é enviada a interface montadora, que busca na base de dados os conjuntos de números nebulosos que descrevem as combinações de cargas elétricas que possuem potência ativa próxima ao valor medido ($\pm 13\%$). A interface montadora monta uma nova base de dados e um novo conjunto de regras que dão origem a uma base de conhecimento instantânea, a qual será usada pela interface de inferência e descartada ao final do processo.

A interface de fuzzificação recebe os valores das admitâncias relativas e calcula o grau de pertinência em cada variável nebulosa em seus respectivos universos de discurso.

Com base das informações provenientes da interface de fuzzificação e da base de conhecimento instantânea, a interface de inferência gera um conjunto de números nebulosos que é tratado pela interface de defuzzificação e resulta no valor que representa a combinação de cargas mais possível.

O valor resultante da interface de defuzzificação é entregue a interface de desagregação que verifica quais cargas fazem parte da combinação de cargas. Se esta combinação for formada por uma única carga, o valor integral de consumo é então enviado para a Unidade de Apresentação, caso contrário, ela divide o valor de consumo medido entre as cargas, criando para cada carga uma mensagem indicando seu consumo à Unidade de Apresentação.

Pelo terminal de comandos é possível enviar os comandos descritos na Tabela 2 para a Unidade de Processamento.

Os comandos *learn* e *log* iniciam a rotina de Aprendizagem e *Log* de Dados que possui dois modos de operação.

O modo de operação Aprendizagem cria as funções de pertinência para uma nova carga no sistema. Acumula as informações das medidas durante o ciclo contínuo e ao ser encerrada, realiza o processamento das possíveis combinações de carga e salva os resultados na base de conhecimento.

O modo de operação *Log* de Dados funciona como um caso particular da rotina de Aprendizagem, armazenando no sistema de arquivos em formato texto o resultado de todas as

medidas recebidas do Módulo Medidor. No entanto, esta rotina não atua na base de conhecimento quando em modo *Log* de Dados.

Tabela 2. Lista de comandos do terminal.

Comando	Descrição
<i>id</i>	Cria ou modifica o número identificador da Unidade de Processamento
<i>learn</i>	Treina o sistema para reconhecer uma carga, processa as combinações possíveis e salva os resultados na base de conhecimento.
<i>log</i>	Faz requisições contínuas ao Módulo Medidor e salva o <i>log</i> de dados no sistema de arquivos.
<i>ml</i>	Faz uma única requisição de medidas ao Módulo Medidor.
<i>msg</i>	Cria mensagem de teste para ser enviada a Unidade de Apresentação.
<i>print</i>	Apresenta na tela os valores da última medida do Módulo Medidor.
<i>test</i>	Executa a rotina de execução nominal uma única vez e apresenta os resultados na tela, sem enviar as mensagens a Unidade de Apresentação.
<i>time</i>	Solicita a hora certa ao servidor NTP, salva o resultado e o apresenta na tela.
<i>send</i>	Envia mensagem à Unidade de Apresentação.
<i>start</i>	Executa a rotina de execução nominal ciclicamente.
<i>stop</i>	Encerra a atividade cíclica em andamento, qualquer que seja ela.

Assim como a rotina de Execução Nominal, que pode ser iniciada pelo comando *start*, a rotina de Aprendizagem e *Log* de Dados também é cíclica. Ambas podem ser encerradas pelo comando *stop*, cujo resultado é checado ao final de cada ciclo de operação de cada rotina.

A Figura 23 apresenta o fluxograma da rotina de Aprendizagem e *Log* de Dados e a Figura 24 mostra um segmento do *log* de dados armazenado no sistema de arquivos.

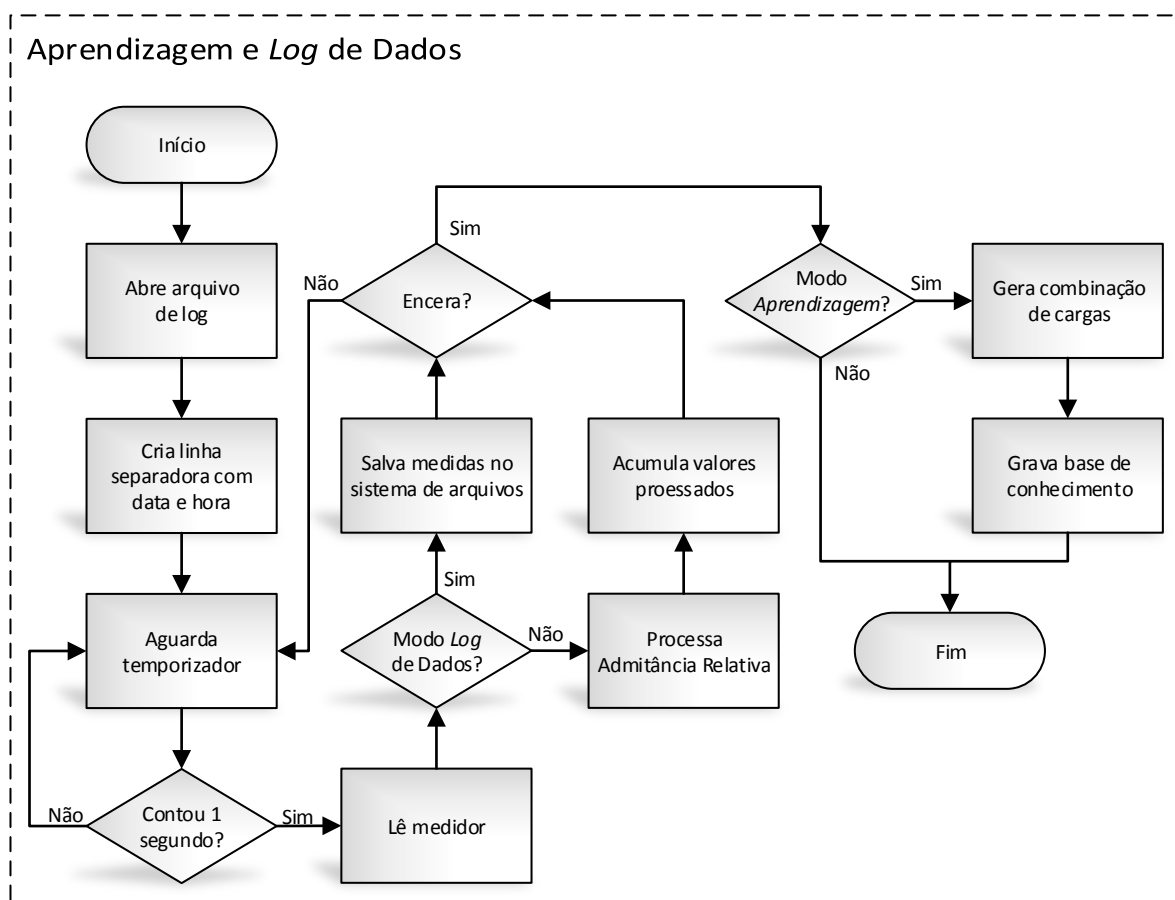


Figura 23. Fluxograma da rotina de Aprendizagem e Log de Dados.

```

Log started at: Mon Feb  2 22:23:53 2015
#128.384354;1.248936;119.877899;160.343872;106.486839;0.747630;0.933742
;1.224702;0.160034;0.146698;0.037786;0.033340;5.574268;3.122043;2.94951
2;2.621860;2.005065;30;
#128.438538;1.245138;119.671120;159.923706;106.086830;0.748301;0.931738
;1.220257;0.162256;0.146698;0.037786;0.031118;5.575555;3.100384;2.93506
4;2.595608;1.868532;91;
#128.381424;1.244168;119.080132;159.727997;106.456352;0.745518;0.927550
;1.220257;0.162256;0.146698;0.037786;0.033340;5.571269;3.106523;2.92802
5;2.617576;1.976338;168;
#128.402771;1.241146;119.046738;159.366577;105.950836;0.746999;0.927135
;1.215811;0.162256;0.148920;0.040008;0.031118;5.573871;3.099241;2.92321
8;2.497317;1.819842;197;
  
```

Figura 24. Exemplo do Log de Dados.

A maior parte dos comandos foram implementados com finalidade de depuração do sistema durante o desenvolvimento. Os comandos *ml*, *msg*, *print*, *test*, *time* e *send* executam sub-rotinas das rotinas já apresentadas. O comando *id* permite modificar o número identificador da unidade

de processamento no próprio sistema, eliminando a necessidade de remover o cartão SD do sistema para modificar esta informação.

A comunicação com a Unidade de Apresentação é resolvida de forma confiável e organizada através de *Socket* TCP baseado no padrão Berkeley [92]. As mensagens são montadas linha a linha em um arquivo de mensagens que se comporta com um *buffer* de saída. Cada linha deste arquivo registra o consumo energético de uma única carga no período de 1 segundo.

Ao ser executada, a sub-rotina de Envio de Mensagens se conecta ao servidor da Unidade de Apresentação pela porta 9000 e envia uma a uma as mensagens disponíveis no arquivo. Ao receber uma confirmação de recebimento, as mensagens são apagadas do arquivo de mensagens.

Caso a confirmação de recebimento não chegue em um período inferior a 100 ms, a conexão é encerrada e as mensagens são mantidas na Unidade de Processamento até que ocorra uma nova conexão com o servidor.

Embora sejam armazenadas em formato de texto no sistema de arquivos para fins de depuração de código, as mensagens são enviadas em pacotes de dados cuja formatação é apresentada pela Figura 25.

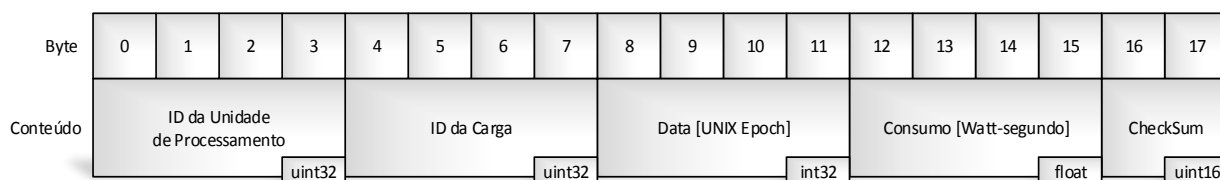


Figura 25. Formato das mensagens enviadas a Unidade de Apresentação.

5.1.3 Unidade de Apresentação

O servidor *web*, responsável por prover a interface com o usuário, que inicialmente fazia parte da unidade de processamento baseada no PC, foi redesenhado para operar como uma unidade nas nuvens. Denominada Unidade de Apresentação, este sistema recebe, armazena e apresenta as informações referentes ao consumo energético provenientes de uma ou mais Unidades de Processamento.

A implementação desta unidade é baseada em um sistema LAMP [93], de código aberto, que tem o Linux como sistema operacional. Nele rodam o servidor HTTP Apache, com interface

programada em PHP e o banco de dados MariaDB. Esta configuração foi escolhida por possuir confiabilidade, desempenho e flexibilidade. Por motivo de disponibilidade da máquina, este sistema foi instalado em um computador Intel Core™ 2 Duo E6750 com 1GB de RAM e 120GB de HDD.

Associado ao LAMP, um servidor *Socket* TCP [94] foi criado para se encarregar de receber as informações provenientes da Unidade de Processamento e acomodá-las no banco de dados MariaDB.

A estrutura do banco de dados foi definida de forma extremamente leve, possuindo apenas duas tabelas: *loads* e *aliases*. Na tabela *loads* são armazenadas as informações de consumo de cada carga, com identificação de origem e registro de data e hora da realização do consumo. A tabela *aliases* registra um nome legível para as cargas monitoradas e as Unidades de Processamento.

A Figura 26 apresenta a estrutura adotada do banco de dados.

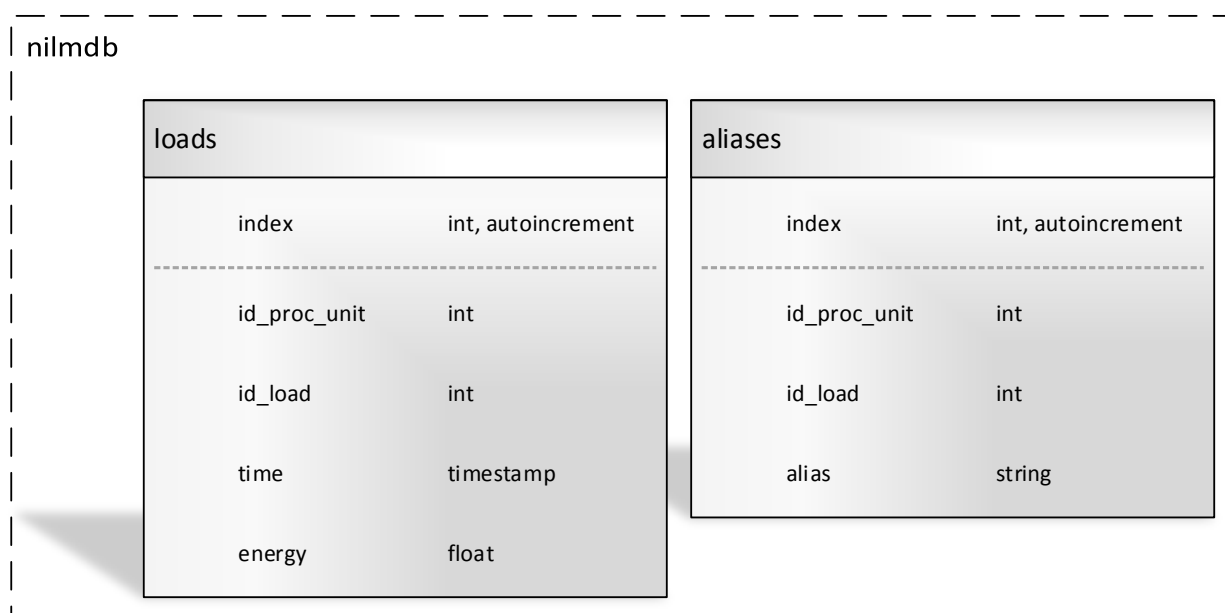


Figura 26. Estrutura do banco de dados.

As informações da tabela *aliases* são inseridas através da aba Configuração da interface *Web*, escrita em PHP. Esta interface também faz as buscas (*queries*) no banco de dados e apresenta na aba Monitoramento as informações do consumo mensal de cada aparelho, em forma de gráfico de barras. A Figura 27 exibe as telas da Interface de Apresentação.



Figura 27. Interface de apresentação: (a) Configuração e (b) Monitoramento.

A Figura 28 apresenta o protótipo de bancada do sistema não invasivo de monitoramento de consumo de energia elétrica baseado em conjuntos nebulosos.

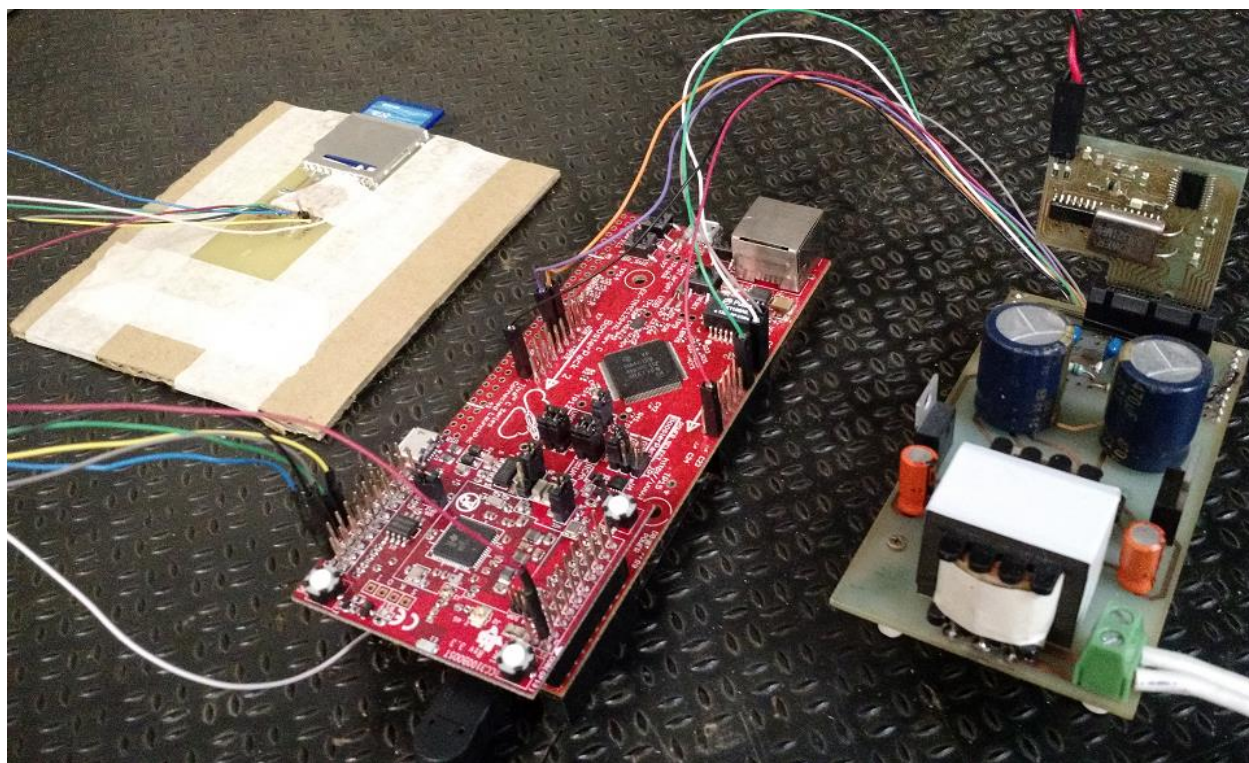


Figura 28. Protótipo de bancada do sistema NILM.

5.2 Teste do sistema

Uma mesa de ensaios que permite a instalação de várias cargas com diferentes características elétricas foi montada para testar o sistema. A Figura 29 exibe a mesa de ensaios. Nela foram instalados conjuntos de lâmpadas individualmente controlados por interruptores.



Figura 29. Mesa de ensaios.

As lâmpadas foram selecionadas para simular cargas lineares e não-lineares que, quando em operação conjunta, apresentem características de consumo elétrico semelhantes a outra carga ou mesmo a outro conjunto de cargas. Por exemplo, quando as cargas 2 e 5 estão ligadas ao mesmo tempo, elas apresentam potência ativa e fator de potência semelhantes aos da carga 1. Assim foi possível testar o sistema quanto a correta discriminação entre as cargas. As cargas escolhidas para testar o sistema são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Cargas instaladas na mesa de ensaios.

Cargas do circuito de testes	
Carga 1	Lâmpada incandescente 100W 127V
Carga 2	Lâmpada halógena PAR20 50W 127V
Carga 3	Lâmpada incandescente 40W 127V
Carga 4	Lâmpada fluorescente compacta 20W 127V
Carga 5	Lâmpada halógena dicróica 50W 12V com transformador

No ensaio, cada carga foi treinada individualmente durante o período de um minuto. Após o a conclusão da etapa de treinamento, cada possibilidade de conjunto de carga foi testada 5 vezes, totalizando 160 medidas.

Com exceção de três medidas, sendo duas medidas do conjunto das duas da lâmpadas halógenas mais a lâmpada incandescente de 40W (cargas 2, 3 e 5) e uma medida da lâmpada halógena dicróica sozinha (carga 5), o sistema reconheceu corretamente todas as demais 157 medidas, ou seja, 98,125% de acerto.

A Figura 30 mostra a realização do ensaio do circuito de testes. Em evidência está o terminal de depuração, informando o resultado positivo das duas lâmpadas halógenas (cargas 2 e 5) operando em conjunto. Também é possível ver nas últimas linhas do terminal o resultado do cálculo de consumo, discriminando o consumo de cada carga.

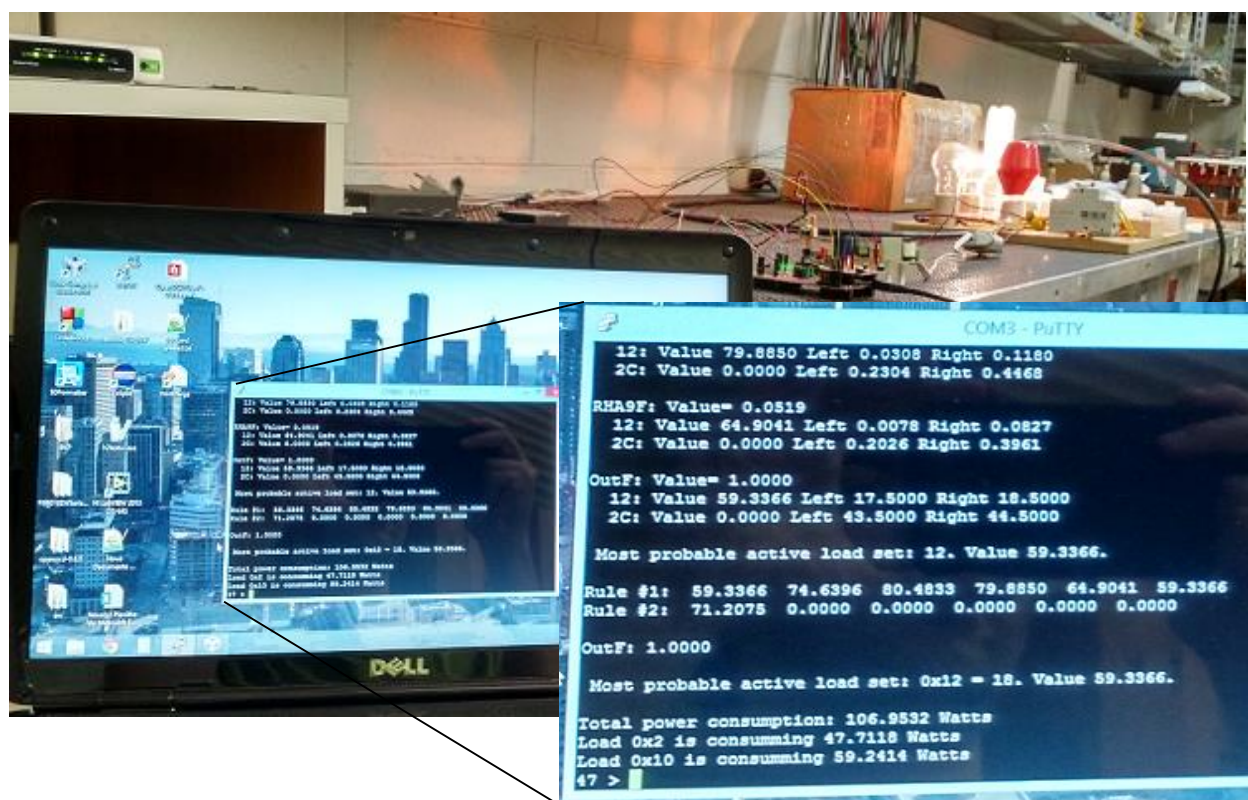


Figura 30. Ensaio do circuito de iluminação.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma técnica para desagregar informações referentes ao consumo energético de cargas elétricas residenciais, baseada na análise de conjuntos nebulosos. A técnica utiliza aproximações dos histogramas das grandezas elétricas medidas para criar funções de pertinência de conjuntos nebulosos e usá-las como assinatura de carga.

Para garantir a simplicidade computacional do sistema, utilizou-se aproximação em números nebulosos triangulares como meio de tradução dos histograma das grandezas elétricas em funções de pertinência. Observou-se que mesmo as cargas que não apresentam o histograma das medidas de suas grandezas elétricas próximas da forma triangular podem ter suas funções de pertinência aproximadas para um número nebuloso triangular. Embora seja nítido que nestes casos esta técnica apresente erro de aproximação, os resultados dos experimentos mostram que ela é funcional. Não obstante, abre-se espaço para que o modelo de assinatura de cargas possa ser melhorado em estudos futuros.

Foi desenvolvido um protótipo de laboratório de um sistema embarcado que implementa a técnica desenvolvida, capaz de discriminar o consumo energético de cargas elétricas que operam ligadas em paralelo em um mesmo circuito elétrico. Este protótipo, que faz uso de um módulo medidor de grandezas elétricas que foi desenvolvido para esse trabalho, permitiu experimentar a técnica desenvolvida com bons resultados.

Através dos experimentos foi constatado que a aquisição das grandezas elétricas na frequência de 1 Hz é alta para sistemas que buscam analisar cargas operando em regime permanente. Tanto equipamentos com controle de potência eletrônico quando equipamento tocados por motores elétricos apresentam transientes maiores que 1 segundo.

Entende-se que seja incrivelmente complicado ter uma amostra de funcionamento de cada eletrodoméstico existente, no entanto, não se descarta a ideia de criar um banco de dados com assinaturas de carga de forma que informações de equipamentos treinados em uma unidade consumidora possa ser compartilhado com outras.

Como não era o foco deste trabalho, não foi criada na Unidade de Apresentação nenhuma forma de inteligência para dar dicas ao usuário sobre como ele pode diminuir os gastos e evitar o desperdício, ainda assim, ela permite ao usuário conhecer de forma discriminada o consumo energético dos equipamentos elétricos que possui em função de seus hábitos de uso após um período de uso.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, sugere-se a evolução dos Módulos Medidores para que eles entreguem as medidas das admitâncias relativas e também operem com frequências menores, evitando evidenciar transientes de cargas elétricas.

Sugere-se também estudar melhorias para as aproximações das funções de pertinência, de forma que elas representem fidedignamente os modos de operação dos aparelhos.

Acredita-se que seja possível aprimorar a técnica desenvolvida para discriminar não só a carga em operação, mas também em que modo de operação ela se encontra, o que melhoraria ainda mais a qualidade da informação a respeito dos hábitos de uso dos consumidores.

O desenvolvimento de uma Unidade de Apresentação mais avançada também é uma excelente proposta. Como as informações são arquivadas na Unidade de Apresentação com discriminação de consumo por aparelho e do período de consumo, é possível realizar buscas no banco de dados e fazer comparações dos resultados permitindo a apresentação das informações de várias formas diferentes. Por exemplo, é possível informar o consumo de cada aparelho em função de diferentes

períodos. Também é possível informar o consumo de grupos de aparelhos e distinguir se algum deles entrou em operação em um horário restrito.

Sugere-se a criação de uma interface vinculada a Unidade de Apresentação que permita criar alarmes que informem, através de mensagens texto para celular ou e-mail, notícias sobre o consumo excessivo de determinado aparelho ou a indevida entrada em operação de um aparelho em horário de pico.

For fim, vislumbra-se a possibilidade de desenvolvimento um aplicativo de rede social que permita a comparação do consumo energético entre unidades consumidoras de mesmo porte e também de um banco de dados dos eletrodomésticos treinados nas diversas unidade consumidoras, evitando assim o treinamento de cargas já conhecidas.

Referências

1. BRUNDTLAND G. H., AND WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development**. Oxford University Press. Oslo. 1987. ISBN 019282080X.
2. BP. **BP Statistical Review of World Energy**. Londres, p. 40-41. 2014.
3. SHAFIEE, S.; TOPAL, E. When will fossil fuel reserves be diminished? **Energy Policy**, v. 37, p. 181-189, 2009.
4. EPE. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2014-2013)**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2013.
5. ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 2015. Disponível em: <www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: fev. 2015.
6. DUARTE, L. F. C.; FERREIRA, E. C.; SIQUEIRA DIAS, J. A. Measurement Techniques for Energy Efficiency Programs. In: EISSA, M. **Energy Efficiency - The Innovative Ways for Smart Energy, the Future Towards Modern Utilities**. 1. ed. Rijeka: InTech, v. 1, 2012. Cap. 9. ISBN 978-953-51-0800-9.
7. FRIEDRICH, K. et al. **Saving Energy Cost-Effectively: A National Review of the Cost of Energy Saved through Utility-Sector Energy Efficiency Programs**. American Council for an Energy-Efficient Economy. Washington, DC. 2009.
8. DARBY, S. **The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption: A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and Direct Displays**. Environmental Change Institute, University of Oxford. Oxford. 2006.
9. EHRHARDT-MARTINEZ, K.; DONNELLY, K. A.; LAITNER, J. A. **Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities**. ACEEE. Washington D.C. 2010.
10. YORK, D. et al. **Frontiers of Energy Efficiency: Next Generation Programs Reach for High Energy Savings**. ACEEE. Washington D.C. 2013.
11. **Watseeker**, 2014. Disponível em: <www.wattseeker.com>. Acesso em: fev. 2015.
12. **Fludia Smart Energy Components**, 2014. Disponível em: <www.fludia.com>. Acesso em: fev. 2015.

13. **Plotwatt**, 2013. Disponível em: <www.plotwatt.com>. Acesso em: fev. 2015.
14. **Bidgely**, 2014. Disponível em: <www.bidgely.com>. Acesso em: fev. 2015.
15. **LoadIQ**, 2013. Disponível em: <www.loadiq.com>. Acesso em: fev. 2015.
16. **Verlitics**, 2012. Disponível em: <www.verlitics.com>. Acesso em: fev. 2015.
17. **Verdigris**, 2015. Disponível em: <verdigris.co>. Acesso em: fev. 2015.
18. **Onzo**, 2012. Disponível em: <www.onzo.com>. Acesso em: fev. 2015.
19. **Navetas Energy Management**, 2004. Disponível em: <www.navetas.com>. Acesso em: fev. 2015.
20. **Wattics**, 2011. Disponível em: <www.wattics.com>. Acesso em: fev. 2015.
21. **Powersavvy**, 2011. Disponível em: <www.powersavvy.ie>. Acesso em: fev. 2015.
22. **Yetu**, 2013. Disponível em: <www.yetu.com>. Acesso em: fev. 2015.
23. OHNESORGE, L. K. PlotWatt raises \$3M to launch utility software. **Triangle Business Journal**, 2012. Disponível em: <www.bizjournals.com/triangle/print-edition/2012/07/06/plotwatt-raises-3m-to-launch-utility.html?page=all>. Acesso em: fev. 2015.
24. SHU, C. Bidgely Cleans Up \$5M From Khosla Ventures To Make Household Energy Conservation Fun And Easy. **Tech Crunch**, 2013. Disponível em: <techcrunch.com/2013/07/24/bidgely-cleans-up-5m-from-khosla-ventures-to-make-household-energy-conservation-fun-and-easy/>. Acesso em: fev. 2015.
25. ZAMBIANCO, J. D. B. **Sistema para monitoramento detalhado do consumo elétrico residencial utilizando rede de sensores zigbee**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNICAMP. Campinas. 2010.
26. AIROLDI, D. **Sistema de comunicação de dados pela rede elétrica, de baixo custo, aplicado a uma rede de medidores individuais de energia elétrica residencial: concepção do circuito, protótipo e testes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNICAMP. Campinas. 2011.
27. MORAIS, F. J. D. O. **Equipamento eletrônico de baixo consumo com comunicação sem fio para auxílio nas inspeções de detecção de roubo de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNICAMP. Campinas. 2011.
28. MORO, J. Z. **Medidor de consumo de energia elétrica descentralizado e com interface WEB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNICAMP. Campinas. 2013.
29. BACURAU, R. M. **Medidor de energia inteligente para discriminação de consumo por aparelho através de assinatura de cargas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNICAMP. Campinas. 2013.
30. HERNANDES JUNIOR, L. J. **Proposta de Criação de uma Atividade de Pré-inspeção**

- para Implementação de uma Metodologia de Ação no Auxílio da Detecção de Fraudes e Roubo de Energia Elétrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). UNICAMP. Campinas. 2015.
31. DUARTE, L. F. C. et al. Characterization and breakdown of the electricity bill using custom smart meters: a tool for energy-efficiency programs. **International journal of circuits, systems and signal processing**, v. 5, n. 2, 2011. ISSN 1998-4464.
 32. MORO, J. Z. et al. A Home Appliance Recognition System Using the Approach of Measuring Power Consumption and Power Factor on the Electrical Panel, Based on Energy Meter ICs. **Scientific Research Circuit and Systems**, p. 245-251, 2013. ISSN 2153-1285.
 33. HERNANDES JUNIOR, L. J. et al. Optimizing the Inspection Routine for the Detection of Electrical Energy Theft in AES Eletropaulo in São Paulo, Brazil. **WSEAS Transactions on Power Systems**, p. 80-89, 2012. ISSN 1790-5060.
 34. BACURAU, R. M. et al. Techniques for Efficient Implementation of Firmware in Microcontroller s Based Energy Consumption Breakdown Smart Meters. **VIVECHAN International Journal of Research**, v. 5, n. 1, 2014. ISSN 0976-8211.
 35. ANALOG DEVICES. **ADE7953 Data Sheet - Single Phase, Multifunction Metering IC with Neutral Current Measurement.** . 2011.
 36. ANALOG DEVICES. **AD71056 Data Sheet - Energy Metering IC with Integrated Oscillator and Reverse Polarity Indication.** . 2006.
 37. PATEL, S. N. E. A. At the Flick of a Switch: Detecting and Classifying Unique Electrical Events on the Residential Power Line. **UbiComp 2007: Ubiquitous Computing**, p. 271-288, 2007.
 38. HUANG, S.-J. et al. Classification of Home Appliance Electricity Consumption Using Power Signature and Harmonic Features. **IEEE PEDS**, Singapore, p. 596-599, 2011.
 39. BOUHOURAS, A. S. et al. Load signatures improvement through the determination of a spectral distribution coefficient for load identification. **9th International Conference on the European Energy Market (EEM)**, Florence, p. 1-6, May 2012.
 40. BARANSKI, M.; VOSS, J. Genetic algorithm for pattern detection in NIALM systems. **Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference**, v. 4, p. 3462 - 3468, Oct 2004. ISSN 1062-922X.
 41. RAHIMI, S.; CHAN, A. D. C.; GOUBRAN, R. A. Usage Monitoring of Electrical Devices in a Smart Home. **33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS**, Boston, August 2011.
 42. MARCEAU, M. L.; ZMEUREANU, R. Nonintrusive load disaggregation computer program to estimate the energy consumption of major end users in residential buildings. **Energy Conversion Manage**, v. 41, p. 1389-1403, 2000.
 43. SRINIVASAN, D.; NG, W. S.; LIEW, A. C. Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 1, p. 398 -

- 405, 2006. ISSN 0885-8977.
44. CHANG, H. C. et al. A New Measurement Method for Power Signatures of Nonintrusive Demand Monitoring and Load Identification. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, p. 764-771, 2012.
 45. LIANG, J. et al. Load Signature Study - Part I: Basic Concept, Structure, and Methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, April 2010.
 46. COLE, A.; ALBICK, A. Nonintrusive identification of electrical loads in a three-phase environment based on harmonic content. **Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. IMTC 2000.**, Baltimore, MD, v. 1, p. 24 - 29, 1 May 2000. ISSN 1091-5281.
 47. LEE, K. D. et al. Estimation of variable-speed-drive power consumption from harmonic content. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, n. 3, p. 566 - 574, Sept 2005. ISSN 0885-8969.
 48. SHAW, S. R.; LAUGHMAN, C. R. . A Kalman-Filter spectral envelope preprocessor. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 56, n. 5, p. 2010 - 2017, Oct 2007. ISSN 0018-9456.
 49. CLARK, F. J. J.; STOCKTON, J. R. Principles and theory of wattmeters operating on the basis of regularly spaced sample pairs. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 15, p. 645-652, 1982.
 50. WATTS UP? **Watts up? PRO**. Disponível em: <www.wattsupmeters.com/secure/products.php?pn=0&wai=200&more=4>. Acesso em: fev. 2015.
 51. WATTS UP? **Watts Up?.NET**. Disponível em: <www.wattsupmeters.com/secure/products.php?pn=0&wai=0&more=2>. Acesso em: fev. 2015.
 52. P3 INTERNATIONAL. **Kill a WATT CO2 Wireless**. Disponível em: <www.p3international.com/products/p4250.html>. Acesso em: fev. 2015.
 53. ECOBEE. **Ecobee3 - The smarter wi-fi thermostat**. Disponível em: <www.ecobee.com/>.
 54. SON, Y.-S.; MOON, K.-D. Home energy management system based on power line communication. **Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics (ICCE)**, 2010. 115-116.
 55. HAN, J.; CHOI, C.-S.; LEE, I. More efficient home energy management system based on ZigBee communication and infrared remote controls. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 57, n. 1, p. 85-89, 2011.
 56. HAN, D.-M.; LIM, J.-H. Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 56, n. 3, p. 1403-1410, 2010.
 57. HAN, J. et al. Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 60, n. 2, 2014.

-
58. FILHO, G. P. R. et al. NodePM: A Remote Monitoring Alert System for Energy Consumption Using Probabilistic Techniques. **Sensors**, v. 14, n. 1, p. 848-867, 2014.
59. EROL-KANTARCI, M.; MOUFTAH, H. T. Wireless Sensor Networks for domestic energy management in smart grids. **25th Biennial Symposium on Communications (QBSC)**, 2010. 63-66.
60. HART, G. W. Nonintrusive appliance load monitoring. **Proceedings of the IEEE**, v. 80, n. 12, p. 1870 - 1891, Dec 1992. ISSN 0018-9219.
61. LEEB, S. B. **A conjoint pattern recognition approach to nonintrusive load monitoring**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). MIT. Massachusets. 1993.
62. CHANG, H.-H. Non-Intrusive Demand Monitoring and Load Identification for Energy Management Systems Based on Transient Feature Analyses. **Energies**, v. 5, p. 4569-4589, 2012. ISSN 1996-1073.
63. FARINACCIO, L.; ZMEUREANU, R. Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses. **Energy and Buildings**, v. 30, n. 3, p. 245–259, Aug 1999. ISSN 0378-7788.
64. ROBERTSON, D. C. et al. Wavelets and electromagnetic power system transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2, p. 1050 - 1058, 1996. ISSN 0885-8977.
65. CHANG, H. H. Load identification of non-intrusive load-monitoring system in smart home. **WSEAS Transactions on Systems**, v. 9, p. 498-510, 2010. ISSN 1109-2777.
66. LEE, W. K. et al. Exploration on Load Signatures. **International Conference on Electrical Engineering (ICEE)**, 2004.
67. LAM, H. Y.; FUNG, G. S. K.; LEE, W. K. A Novel Method to Construct Taxonomy of Electrical Appliances Based on Load Signatures. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 52, n. 2, p. 653 - 660, 2007.
68. LEUNG, J. S. K.; NG, K. S. H.; CHENG, J. W. M. Identifying appliances using load signatures and genetic algorithms. **Proceedings of International Conference on Electrical Engineering (ICEE)**, 2007.
69. LIN, G.-Y. et al. Applying power meters for appliance recognition on the electric panel. **5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)**, 2010. 2254-2259.
70. CHANG, J.-R.; JUANG, H.-C.; LO, C.-H. An Intelligent Algorithm for Non-Intrusive Appliance Load Monitoring System. **Future Information Technology Lecture Notes in Electrical Engineering**, 2014. 721-725.
71. SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2ª. ed. São Paulo: Blücher, 2007. ISBN 978-85-212-0416-9.
72. ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.
73. RENTERÍA, A. R. **Estimación de probabilidad fuzzy a partir de dados imprecisos**. Tese

- (Doutorado em Engenharia Elétrica). PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2006.
74. DUBOIS, D.; PRADE, H. M. **Fuzzy sets and systems - Theory and applications**. Toulouse: Academic Press, 1980. ISBN 9780122227509.
75. JANG, J.-S. R.; SUN, C.-T.; MIZUTAN, E. **Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence**. : Prentice Hall, 1996. ISBN 0-13-261066-3.
76. ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. : McGraw-Hill, 1995.
77. TANSCHKEIT, R. **Fundamentos de lógica fuzzy e controle fuzzy**. Disponível em: <tcs.eng.br/PUC/Fuzzy/SI-Logica_Control_Fuzzy.pdf>. Acesso em: fev. 2015.
78. PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An introduction to fuzzy sets: Analysis and design**. Cambridge: MIT Press, 1998.
79. VIOT, G. Fuzzy logic in C. **Dr. Dobb's Journal**, 1993. 40-49.
80. ABDO, J. M. M. **Resolução nº 505 de 26 de novembro de 2001**. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. . 2001.
81. DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Apostila do curso. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**, 2010. Disponível em: <www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>. Acesso em: fev. 2015.
82. ABNT. **NBR 5410:2004 - Instalações elétricas de baixa tensão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 209. 2004. ISBN 978-85-07-00562-9.
83. ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. . 2014.
84. TEXAS INSTRUMENTS. **MSP430AFE2x3, MSP430AFE2x2, MSP430AFE2x1: Mixed signal microcontroller**. Texas Instruments. , p. 42. 2011. (SLAS701A).
85. ARM. ARM The Architecture for the Digital World. **Cortex-M4 Processor**. Disponível em: <www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m4-processor.php>. Acesso em: fev. 2015.
86. TEXAS INSTRUMENTS. **Tiva™ C Series TM4C1294 Connected LaunchPad Evaluation Kit EK-TM4C1294XL User's Guide**. 2014.
87. TEXAS INSTRUMENTS. **CC3100 SimpleLink™ Wi-Fi® and IoT Solution BoosterPack Hardware User's Guide**. 2014.
88. TEXAS INSTRUMENTS. **TI-RTOS: Real-Time Operating System (RTOS)**. Disponível em: <www.ti.com/tool/ti-rtos>. Acesso em: fev. 2015.
89. TEXAS INSTRUMENTS. **TivaWare™ for C Series (Complete)**. Disponível em: <www.ti.com/tool/sw-tm4c>. Acesso em: fev. 2015.

90. TEXAS INSTRUMENTS. **CC3100 Data Sheet - CC3100 SimpleLink™ Wi-Fi® Network Processor, Internet-of-Things Solution for MCU Applications.** . 2015.
91. CHAN. **FatFs - Generic FAT File System Module**, 2015. Disponível em: <elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html>. Acesso em: fev. 2015.
92. SECHREST, S. **An Introductory 4.4BSD Interprocess Communication Tutorial.** . 1997.
93. ROUSE, M. TechTarget. **LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP)**, 2014. Disponível em: <searchenterpriselinux.techtarget.com/definition/LAMP>. Acesso em: fev. 2015.
94. HALL, B. **Beej's Guide to Network Programming - Using Internet Sockets.** : Jorgensen Publishing, 2011.