



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

THAYS APARECIDA DE ABREU SANTOS

**DETERMINAÇÃO DE PERFIL DE CURVA DE CARGA RESIDENCIAL
BASEADO NUM SISTEMA-*FUZZY***

Ilha Solteira

2016



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THAYS APARECIDA DE ABREU SANTOS

**DETERMINAÇÃO DE PERFIL DE CURVA DE CARGA RESIDENCIAL BASEADO
NUM SISTEMA-*FUZZY***

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP - Câmpus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Orientadora: Profa. Dra. Anna Diva Plasencia Lotufo

Ilha Solteira

2016

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237d Santos, Thays Aparecida de Abreu.
Determinação de perfil de curva de carga residencial baseado num sistema-fuzzy / Thays Aparecida de Abreu Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
66 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2016

Orientador: Anna Diva Plasencia Lotufo
Inclui bibliografia

1. Carga elétrica residencial. 2. Lógica fuzzy. 3. Sistemas inteligentes. 4. Resposta à demanda.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Determinação de perfil de Curva de Carga Residencial Baseado Num Sistema-Fuzzy


AUTORA: THAYS APARECIDA DE ABREU SANTOS

ORIENTADORA: ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. FRANCISCO VILLARREAL ALVARADO
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. MARA LUCIA MARTINS LOPES
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. ELIZETE DE ANDRADE AMORIM
Centro de Engenharia e Ciências Exatas CECE / Universidade Estadual do Oeste do Paraná


Prof. Dr. RICARDO MENEZES SALGADO
Instituto de Ciências Exatas / Universidade Federal de Alfenas

Ilha Solteira, 09 de junho de 2016

Dedicatória

A Deus

A São José

Ao meu esposo Junior

Agradecimentos

Acima de tudo e de todos agradeço a Deus!!! Por me fazer ir mais longe, quando acho que não posso mais... por todo amanhecer me dar o dom da vida. Por sempre me levantar em minhas quedas.

A minha querida família, minha avó Ana Rosa, minha mãe Bel, minha irmã Mariana, meu padrasto Rogério, e ao meu primo David, por todo apoio e carinho... sem vocês tudo seria mais difícil...eu amo muito vocês!

Ao meu esposo Junior, por ser essa pessoa sensacional que Deus colocou em minha vida. Por me fazer acreditar sempre em mim e por me fazer uma pessoa melhor a cada dia. Não me vejo sem você em minha vida.

À todos meus colegas de laboratório, em especial ao Marcos e a Marleide, e também aos amigos de pós-graduação Mahdi e Uiliam...por sempre estarem do meu lado para me ajudar no que fosse necessário...pelo companheirismo, amizade e cafezinhos...vocês são especiais para mim.

A minha parceira de casa durante mais de dois anos, Lourdes Dickman, por dividir comigo os momentos de angustia e de alegrias, e também a minha parceira de vôlei e todas as horas Danilla Lemos. Obrigada por terem feito parte dos meus dias!

Gostaria de agradecer também a minha amiga Juciane e minha prima Camila, por me emprestarem suas residências, ou melhor, seus medidores de energia durante 24 horas, para que eu pudesse medir o consumo de energia de hora em hora para a validação do meu trabalho.

À minha orientadora Anna Diva, que acredito que hoje esse papel de orientadora e orientada já foi ultrapassado... posso dizer que somos grandes amigas. Obrigada por toda contribuição pessoal e profissional em minha vida, obrigada de coração.

Ao professor Minussi por toda contribuição nesse trabalho, por acreditar na minha capacidade de desenvolvê-lo. Obrigada pela paciência, pelas ideias e por ser essa pessoa incrível que tanto admiro.

Claro que não podia faltar a professora Mara... ou minha amiga Mara?! Pessoas como ela são anjos em forma de ser humano... e que ser humano!!! Obrigada por toda ajuda profissional e pessoal. Feliz daquele que tem uma Mara na vida!

Meus agradecimentos a CAPES, por ter me proporcionado uma bolsa de estudos.

“ Deus é bom o tempo todo...

O tempo todo Deus é bom! ”

RESUMO

Considerando a crescente demanda de energia elétrica no setor residencial, faz-se necessário conhecer o padrão de consumo de eletricidade de forma detalhada, impulsionando a mudança do comportamento dos consumidores finais, com o objetivo de reduzir o consumo global e a racionalização do uso da energia elétrica. Portanto, conhecer o perfil da curva de carga, com antecedência, é importante para detectar os picos e os vales, e incentivar os consumidores a mudar seus hábitos de consumo de energia, principalmente durante os períodos em que as tarifas são mais caras. Assim, nesta pesquisa propõe-se a utilização de um sistema *fuzzy* para obter o perfil de carga elétrica residencial. Como o consumo de energia elétrica, em residências, está altamente correlacionado com a ocupação ativa, foram levados em consideração o número de ocupantes na residência e os diferentes períodos do dia ao longo de 24 horas. Com base neste modelo foi possível simular o perfil de carga elétrica, a detecção dos picos que podem comprometer a eficiência do sistema e, conseqüentemente, oferecer mecanismos para melhorar o gerenciamento de demanda e incentivar a utilização racional de energia elétrica. Com objetivo de verificar a eficiência do sistema *fuzzy*, comparou-se as curvas de carga obtidas pelo sistema proposto com as curvas de carga reais e por meio desta comparação foi possível observar que os resultados são promissores.

Palavras-chave: Carga elétrica residencial. Lógica *Fuzzy*. Resposta à demanda.

ABSTRACT

The electrical energy demand is increasing mainly in residences. Therefore, it is necessary to know in advance the electricity pattern consumption. This knowledge is important to change behavior and reduce the global consumption. Furthermore, the load curve profile known in advance can detect the highest points and valleys and force the consumers to change their behavior principally during the high tariffs. Thus, this work proposes a fuzzy system to obtain the electrical load profile in residences. The electrical energy consumption is correlated with the active occupation of the residences, therefore the system considers the quantity of inhabitants and the different periods of the day during 24 hours. Based on this parameters it is possible to obtain the electrical load profile detecting the highest points that can compromise the efficiency of the system, and provide mechanisms to improve the demand managing besides forcing the rational use of electrical energy. To verify the efficiency of the proposed system, the results obtained are compared with real load curves measured in loco concluding that these results are promising.

Keywords: Residential electrical load. Fuzzy Logic. Demand Response.

Lista de Figuras

Figura 1 - Conjuntos <i>Fuzzy</i>	23
Figura 2 - Interseção entre os Conjuntos <i>Fuzzy</i> A e B	24
Figura 3 - União entre os Conjuntos <i>Fuzzy</i> A e B	24
Figura 4 - Complemento do Conjunto <i>Fuzzy</i> A	25
Figura 5 – Tipos de Funções de Pertinência	26
Figura 6 - Diagrama de blocos de um sistema- <i>fuzzy</i>	28
Figura 7 – Sistema <i>Fuzzy</i> aplicado à determinação do perfil de curva de carga residencial	32
Figura 8 - Funções de Pertinência "Períodos do Dia"	35
Figura 9 - Funções de Pertinência "Ocupação"	36
Figura 10 - Funções de Pertinência "Consumo de Energia Elétrica"	38
Figura 11 - Processo de Inferência <i>Fuzzy</i>	40
Figura 12 - Perfil de Consumo Residencial: Muito Frio/Frio (a)	51
Figura 13 - Perfil de Consumo Residencial: Muito Frio/Frio (b)	53
Figura 14 - Perfil de Consumo Residencial: Ameno/Agradável (a)	54
Figura 15 - Perfil de Consumo Residencial: Ameno/Agradável (b)	55
Figura 16 - Perfil de Consumo Residencial: Quente/Muito Quente (a)"	57
Figura 17 - Perfil de Consumo Residencial: Quente/Muito Quente (b)"	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Base de Regras "Muito Frio/Frio (a)"	43
Tabela 2 - Base de Regras "Muito Frio / Frio (b)"	44
Tabela 3 - Base de Regras "Ameno / Agradável (a)"	46
Tabela 4 - Base de Regras "Ameno/Agradável (b)"	47
Tabela 5 - Base de Regras "Quente/Muito Quente (a)"	49
Tabela 6 - Base de Regras "Quente / Muito Quente (b)"	50
Tabela 7 - Relação de eletroeletrônicos e suas potências	52

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	14
1.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	15
2 CARGA ELÉTRICA RESIDENCIAL	17
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.2 CONSUMO DE ELETRICIDADE NO BRASIL	20
3.1 CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	22
3.2 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	25
3.3 SISTEMA- <i>FUZZY</i>	27
3.3.1 Fuzzificação	28
3.3.2 Inferência	29
3.3.3 Defuzzificação	29
4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CARGA RESIDENCIAL	31
4.1 ENTRADAS DO SISTEMA- <i>FUZZY</i>	32
4.1.1 Períodos do Dia	33
4.1.2 Ocupação	36
4.2 SAÍDA DO SISTEMA- <i>FUZZY</i>	37
4.3 BASE DE REGRAS DO SISTEMA- <i>FUZZY</i>	38
4.3.1 Conjunto 1: Frio/Muito Frio	41
4.3.2 Conjunto 2: Ameno/Agradável	45
4.3.3 Conjunto 3: Quente/Muito Quente	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1 CONJUNTO 1: FRIO/MUITO FRIO	51
5.2 CONJUNTO 2: AMENO/AGRADÁVEL	54

5.3	CONJUNTO 3: QUENTE/MUITO QUENTE	56
5.4	DISCUSSÕES	59
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	61
6.1	CONCLUSÕES	61
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

A previsão de cargas elétricas é um recurso técnico de grande utilidade para o gerenciamento da demanda de energia elétrica e está se tornando indispensável em consequência do crescimento do número de usuários, principalmente no setor residencial (GRANDJEAN et al., 2012; JONAS; LOMAS, 2015). O setor elétrico doméstico tem impactos significativos nos períodos de pico de demanda de energia elétrica ao longo do dia. Esses picos de carga afetam consideravelmente a eficiência do sistema de energia, resultando no congestionamento da rede elétrica (ZÚÑIGA et al., 2014; ABREU et al., 2015).

Assim, é necessário um melhor conhecimento da curva de carga elétrica no setor doméstico. Esta informação permite, aos usuários, detectar o uso indevido de energia elétrica, visando reduzir o seu consumo e viabilizando o uso da energia nas horas do dia em que a tarifa de energia elétrica possui um preço menor (TORRINI, 2012).

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que buscam a modelagem da carga elétrica residencial. Esses modelos são classificados em dois grupos: de cima para baixo e de baixo para cima. (SWAN; UGURSAL, 2009). Os modelos de baixo para cima apresentam maior vantagem devido ao seu nível de detalhes (SWAN; UGURSAL, 2009; GRANDJEAN et al., 2012).

Nesta pesquisa, é utilizada uma estratégia denominada “de baixo para cima”, sendo desenvolvido um modelo para obter o perfil da curva de carga elétrica residencial baseado na lógica *fuzzy* (ZADEH, 1965). Esta abordagem é adotada por causa da existência limitada de dados no ambiente doméstico que descrevem residências brasileiras, e a complexidade de modelar o comportamento humano. A partir do uso da lógica *fuzzy*, estimar o perfil da carga baseado na observação comportamental dos usuários residenciais.

Obter o perfil de consumo de carga elétrica em residências não é uma tarefa fácil, pois mesmo que os clientes tenham as mesmas características gerais, (por exemplo, duas residências distintas com o mesmo número de habitantes, o mesmo tipo de habitação, número iguais de cômodos, aparelhos eletrônicos iguais etc.) não há a mínima possibilidade de as duas curvas de demanda de energia serem iguais. A influência do comportamento humano sobre a demanda de energia residencial é tão importante que não há qualquer possibilidade de duas famílias com o mesmo consumo de energia elétrica diária apresentar a mesma curva de carga. Essa é a razão pela qual a modelagem da demanda de energia em uma área específica é uma tarefa difícil.

Levando em conta que o perfil da demanda de eletricidade no setor residencial está altamente correlacionado com o tempo de ocupação das residências, no modelo consideram-se a quantidade de habitantes em uma residência em diferentes períodos do dia, assim como as atividades diárias que caracterizam como as pessoas usam o seu tempo. Neste modelo considera-se a ocupação como ativa os períodos em que os usuários estão na residência acordados ou dormindo. Nas principais publicações disponibilizadas na literatura (TORRINI, 2012; LÓPEZ-RODRÍGUEZ et al., 2013) são consideradas a ocupação como ativa apenas o tempo em que os usuários estão na residência e acordados.

O perfil do consumo de energia utilizando um sistema inteligente pode simular as atividades diárias dos ocupantes em suas residências e, também, contribuir no gerenciamento de demanda de energia (STRBAC, 2008; CARBONTRUST, 2011; VAN DAN et al., 2013; ANTUNES et al., 2014), na resposta da demanda (STRBAC, 2008; PIPATTANASOMPORN et al., 2012; JAVED et al., 2012; BARTUSCH e ALVEHAG, 2014; SIANO, 2014; HONG et al., 2015) e futuramente no projeto da rede inteligente (*smart grid*) (MOLDERINK et al., 2010, LI; YAO, 2010; IKIM et al., 2011; INIEWSKI; MOZEL, 2012). A rede inteligente constitui-se num novo paradigma de relacionamento entre sistema, ambiente e os consumidores. A produção de energia é caracterizada por várias fontes de geração (distribuição), como, por exemplo, hidráulica, térmica, eólica, solar etc., na qual, o consumidor terá livre escolha do fornecimento de energia, podendo consumir e/ou produzir energia elétrica.

Portanto, nesta pesquisa, baseado num modelo *fuzzy*, curvas de carga residencial são construídas considerando as características de um grupo de domicílios brasileiros, levando em consideração os períodos do dia, o número de ocupantes na casa e a temperatura.

1.1 MOTIVAÇÃO

Na pesquisa de mestrado da autora Silva (2012) foi abordado o problema da previsão de carga global de sistemas elétricos, ou seja, englobando todos os consumidores (residenciais, comerciais, industriais, entre outros), sendo um problema clássico adotado na literatura especializada. Nesta condição, usam-se bases de dados do histórico do tamanho em que se dispõe. Isto decorre pelo fato que as estatísticas são as grandes “conselheiras”. Ou seja, espera-se que no futuro o comportamento da carga irá se repetir. Como não se trata, apenas de repetir valores, outras informações (exógenas) são igualmente importantes, as quais, conjuntamente com a base histórica, são usadas como entrada ao sistema predictor que, habitualmente, é

desenvolvido como uma alternativa clássica, por exemplo, a abordagem de Box-Jenkins (O'DONOVAN, 1983). Modernamente, a literatura tem tomado preferência pelo emprego de técnicas nominadas “inteligentes”, *e.g.*, redes neurais artificiais (HAYKIN, 2008), lógicas *fuzzy* (ZADEH, 1965) etc. A carga global prevista é, finalmente, repartidas aos diversos barramentos do sistema visando realizar os vários estudos (fluxo de potência, análise da estabilidade etc.) que são necessários e adequados no contexto do planejamento, planejamento da operação e da operação. No entanto, à medida que se aproxima dos barramentos (particionamento da carga total), a previsão se torna mais complexa, isto porque o comportamento da carga não é tão influenciado pela estatística (não se observa regularidade estatística importante). A situação é ainda mais dramática se o interesse é a previsão da carga residencial. Este assunto (o que acontece o consumo doméstico) intrigou-me durante todo o tempo. Por esta razão, busca-se contribuir com o estudo da previsão residencial. Evidentemente, a razão disto, é proporcionar um entendimento comportamental dos usuários residenciais e, em especial, oferecer uma ferramenta visando à economia doméstica e a racionalização do uso da energia. Neste sentido, a proposta, nesta pesquisa, compreende ao desenvolvimento de um procedimento, baseado na lógica *fuzzy* (ZADEH, 1965), que necessita, para sua execução, de um reduzidíssimo volume de informações e que seja robusto e confiável, *i.e.*, algo bastante “palatável” ao usuário e que seja passivo de receber inovações. É neste sentido que se pretende desenvolver esta pesquisa de doutorado.

1.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa consiste em desenvolver um modelo que esboce um perfil de consumo de carga elétrica residencial, utilizando um sistema inteligente que necessita de poucos dados de entrada para cumprir com os requisitos de um modelo detalhado. Portanto, visa-se contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia para auxiliar no gerenciamento de demanda de energia elétrica, na resposta de demanda e futuramente na rede inteligente.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este texto está dividido em sete capítulos, sendo organizados da seguinte forma: carga elétrica residencial, lógica *fuzzy*, construção da curva de carga, resultados, discussões e finalizando com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica de alguns trabalhos que realizaram a previsão de cargas elétricas residenciais e, também, abrange brevemente como a energia elétrica no Brasil chega a seus consumidores.

No capítulo 3 é abordado o conceito de lógica *fuzzy*, dando maior ênfase à ferramenta utilizada nesta pesquisa, ou seja, o Sistema-*Fuzzy* (SF) proposto.

No capítulo 4 é descrita a metodologia desenvolvida para construção do perfil de consumo de energia elétrica residencial utilizando um sistema fuzzy. Apresentam-se, no Capítulo 5, os perfis de consumo de energia residencial obtidos por meio do SF proposto. São apresentados, também, dois perfis de consumo de energia reais, medidos de hora em hora, num período de 24 horas.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 CARGA ELÉTRICA RESIDENCIAL

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura são encontrados diferentes tipos de modelos com objetivo de modelar a curva de demanda residencial. Esses modelos são classificados em dois grupos principais: “de cima para baixo” e de “baixo para cima” (GRANDJEAN et al., 2012).

Os modelos “de cima para baixo” não implicam uma grande complexidade, mas sua implementação necessita do uso de uma extensa base de dados empíricos (AIGNER et al., 1984; BARTELS et al., 1992). Os dados utilizados são informações gerais, como: produto interno bruto (PIB), taxa de desemprego, apresentação estatística sobre a população-alvo, evolução predita, taxas de saturação de aparelhos, etc.

Os modelos “de baixo para cima” começam a partir das menores unidades possíveis de um sistema e, sucessivamente, vão agregando estas unidades para alcançar níveis mais elevados do sistema elétrico. São caracterizadas com dados de entradas do consumo individual dos aparelhos domésticos selecionados, informações meteorológicas, conta de energia elétrica das famílias, comportamento humano etc. (WALKER; POKOSKI, 1985; CAPASSO et al., 1994; STOKES, 2005; YAO; STEEMERS, 2005; PAATERO; LUND’S, 2006, ARMSTRONG et al., 2009; WIDEN et al., 2009; KAGVIC et al., 2010; RICHARDSON et al., 2010; WIDEN; WÄCKELGÅRD, 2010; LÓPEZ-RODRÍGUEZ et al., 2013; ZÚÑIGA et al., 2014).

Os modelos “de baixo para cima” apresentam a vantagem de um alto nível de detalhes, pois a demanda de energia pode ser calculada por um par de famílias e até mesmo para cada utilização final. Por conseguinte, será apresentada uma breve revisão bibliográfica de algumas publicações mais relevantes.

O Trabalho de Yao e Steemers (2005) propõe um modelo que se baseia no consumo diário por pessoa, taxa de utilização do equipamento, número de ocupação nas residências e dados meteorológicos. Para validar o modelo, os autores utilizaram uma curva de carga de uma base de dados do reino Unido, sendo a curva de carga escolhida de uma casa com três habitantes, medida durante um dia de trabalho no inverno.

Stoke’s (2005) desenvolveu um modelo aplicável no setor residencial, sendo capaz de gerar três tipos de curvas de cargas: (1) perfil de demanda de 30 minutos para um agregado familiar médio, (2) perfil de demanda de 30 minutos para uma moradia específica, e (3) perfil

de demanda de 1 minuto para um cliente selecionado. O propósito de Stoke's é a modelagem da curva de carga elétrica de residências britânicas. Seu modelo tem que ser capaz de fornecer perfis de demanda para a situação contemporânea com um futuro, assim as curvas de carga devem ser reguláveis.

O trabalho de Paatero e Lund's (2006) tem como objetivo obter uma curva de carga de 1 hora para clientes residenciais. Para desenvolver o modelo proposto, os autores estudaram uma série de medidas de curva de carga, com isso eles notaram que a demanda de energia varia de acordo com os diferentes períodos, especialmente em relação a estação do ano, o dia e a hora. Paatero e Lund construiu um modelo de dois níveis: o primeiro nível define os equipamentos domésticos estabelecidos para cada residência e a tendência de oscilação de carga. O segundo nível simula cada aparelho em cada domicílio com o auxílio das probabilidades de uso de cada um.

No trabalho de Armstrong et al. (2009) foi desenvolvido um modelo que reconstrói a curva de carga dos aparelhos domésticos de elétricos, com uma resolução de tempo de 5 minutos. O objetivo da modelagem é obter vários perfis de consumo para os aparelhos selecionados, para determinar a forma de como calor e energia combinados podem ser integrados em habitações canadenses e como eles podem fornecer a potência necessária. Foram selecionadas três famílias para serem simuladas, sendo diferenciadas pelo tamanho da residência e a quantidade do consumo de energia.

Widen et al. (2009) propõem um modelo de geração de curva de carga, baseado no uso final de cada aparelho, função densidade de iluminação natural e consumo de água; além disso define e simula equipamentos domésticos. A principal finalidade deste modelo é gerar curvas de carga elétrica para aparelhos domésticos que servirá então como entradas para outras ferramentas de simulação. Entre eles estão sendo modelados programas de sistemas descentralizados de geração de eletricidade em pequena escala ou equipamentos de produção de água doméstica com base em energia solar. Outro objetivo desta ferramenta de simulação é estudar as modificações da curva de carga doméstica em um ponto de vista prospectivo, quando se consideram as mudanças em termos de comportamento e a eficiência energética dos aparelhos.

Widen e Wäckelgård (2010) buscam melhorar o modelo proposto por Widen et al. (2009), sendo utilizado um modelo estocástico. Como esperado, os dados de entrada deste modelo são os mesmos que o do modelo anterior: tempo de uso das atividades domésticas provenientes de variáveis estatísticas e dados meteorológicos. O modelo assume que a qualquer

instante de tempo t , cada ocupante de uma casa deve estar em um dos três estados de disponibilidade: (1) ausente: a pessoa não está em casa; (2) presente e inativo: o habitante está em casa e dorme; (3) presente e ativo: membro da habitação está em casa e pode realizar cada tipo de atividade doméstica. A partir dessas informações, uma cadeia de Markov que gera diversas sequências de atividades domésticas com altos níveis de resolução foi construída, sendo esta a principal característica da modelagem de Widen e Wäckelgård (2010).

O modelo de Walker e Pokoski (1985) foi o primeiro que considerou o comportamento humano para construir a curva de carga residencial. Os autores observam a complexidade envolvida na aquisição de dados, que os obrigou a considerar apenas um cenário com um único indivíduo que vive na casa. Este cenário é, então, usado para gerar variações que dependem de funções de distribuição de probabilidade para alterar a hora de início das atividades principais. Eles também propõem o uso de uma função de inclinação que é construída com base em outros estudos publicados. Esta função é usada para calcular a tendência das pessoas para se engajar em certas atividades em um determinado momento do dia.

No trabalho de Capasso et al. (1994) foi desenvolvido um modelo chamado ARGOS, que melhorou o modelo de Walker e Pokoski (1985) e se tornou um ponto de referência para modelos desenvolvidos posteriormente, especialmente os que se referem à modelagem de comportamento humano. O modelo ARGOS simula a curva de carga de usuários residenciais considerando quatro atividades domésticas: (1) cozinhar; (2) afazeres domésticos; (3) lazer e (4) higiene pessoal. Cada membro da família é caracterizado por um cenário de presença e uma tendência específica para cada atividade doméstica.

Em Richardson et al. (2010) foi adotada uma abordagem detalhada do procedimento “de baixo para cima”, sendo utilizados os elementos do agregado familiar, especificando os equipamentos domésticos e os membros da família. Os autores usaram dados de estudos que contêm registros detalhados de atividades domésticas para 21.000 habitações. Esses registros foram utilizados para criar perfis de presença e atividade a cada dez minutos. Foram levados em consideração os dados dos aparelhos, como taxas de penetração, consumo anual, taxa de ocupação, tempo de utilização, informações sazonais, dados demográficos estatísticos e as curvas de carga totalizando de 22 habitações. Com esses dados, pode-se calcular a curva de demanda para uma habitação com base no número de membros da família, o dia da semana e o mês do ano. Neste modelo há a necessidade de uma grande quantidade de dados, de modo a incorporar as características dos ocupantes.

No trabalho de López-Rodríguez et al. (2013), são utilizadas as informações obtidas pelo TUS (Time Use Survey), realizado pelo Instituto Nacional de Estatística da Espanha, em 2009-2010, para a obtenção de perfis de ocupação ativa de habitações espanholas. Estes perfis, cujos padrões apresentam semelhanças significativas com o perfil típico da procura de eletricidade doméstica, foram obtidos para classificar as residências em função do seu número de habitantes, sendo consideradas casas com ocupações de 1 a 6 pessoas, e para os dias de semana e fins de semana. Três picos de ocupação ativa foram identificados, (1) parte da manhã, (2) à tarde e (3) à noite. Esta informação foi utilizada como entrada de um modelo estocástico baseado na cadeia de Markov e técnicas de Monte Carlo, que gera os perfis de ocupação ativa nas habitações, com o objetivo de simular o consumo doméstico de energia elétrica.

Os modelos mencionados até agora ressaltam a dificuldade da modelagem do comportamento humano. Assim, Zúñiga et al. (2014) desenvolveram uma pesquisa utilizando os sistemas de lógica *fuzzy* para modelar o comportamento humano relacionado à ativação de aparelhos e iluminação em uma residência. Foram considerados a característica da atividade de cada pessoa e um conhecimento do seu cronograma de lazer e da rotina doméstica. Com base neste modelo, o perfil de ativação de hora em hora para cada aparelho pode ser obtido e, posteriormente, a curva de carga do setor residencial pode ser calculada.

2.2 CONSUMO DE ELETRICIDADE NO BRASIL

Considerando a geração de energia elétrica no Brasil, as usinas hidrelétricas, as quais são predominantes, usam a água para gerar energia. Com a escassez de chuvas, pouco volume de água é acumulado nos reservatórios, fazendo com que as usinas hidrelétricas não consigam gerar energia suficiente para abastecer um país continental como o Brasil, com isso é necessário utilizar as usinas Termelétricas. Há alguns anos, o procedimento usado para o despacho da geração, correspondia à adoção das usinas hidrelétricas funcionando na base, enquanto que as termelétricas nas horas de ponta. Hoje em dia, entretanto, esta distribuição tem sido modificada, ou teria de ser modificada visando atender outra realidade. Ou seja, no planejamento hidrotérmico, deve-se usar as unidades térmicas com vistas que se tenha nos reservatórios (nas barragens hidrelétricas) quantidade de água suficiente para gerar energia de forma racional em todo o tempo do ano. Neste caso, as termelétricas podem ser usadas nos períodos de ponta, bem como na base em períodos devidamente limitados. Se isto for bem

planejado, por certo, não haveria problemas no abastecimento de energia no país, evidentemente, se houver capacidade de geração para atender a demanda.

As usinas Termelétricas geram energia a partir da queima de combustíveis fósseis (diesel, carvão mineral, gás natural, gasolina etc.), não sendo as mais indicadas para gerar energia, por produzirem impactos ambientais. Portanto, este tipo de energia é altamente prejudicial ao meio ambiente. Outra desvantagem é que o custo final deste tipo de energia é mais elevado do que a gerada em hidrelétricas.

No início de 2015, as contas de energia passaram a trazer o Sistema de Bandeiras Tarifárias. As bandeiras são classificadas nas cores verde, amarela e vermelha, que indicam se a energia custa mais ou menos, em função das condições de geração de eletricidade. A bandeira verde indica que as condições de geração de energia são favoráveis, assim, a tarifa de energia não sofre nenhum acréscimo. A bandeira amarela informa que as condições de geração estão menos favoráveis, fazendo com que a tarifa sofra acréscimos de R\$ 0,025 (em 2015 e 2016) para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos. E a bandeira vermelha aponta que as condições de geração de energia estão mais custosas, com isso a tarifa sofre um acréscimo de R\$ 0,045 para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos (ANEEL, 2016).

Por causa do crescimento da procura de energia, a falta de chuvas (e assim a falta de água para produzir energia por hidrelétricas) e considerando o comportamento do mercado futuro de venda e de compra de energia, a identificação do comportamento individualizado do consumo residencial de energia elétrica é necessária para auxiliar os setores de geração e de distribuição de energia elétrica.

Mesmo com o aumento do número de consumidores na classe residencial, com a crise financeira que o país está passando, desde o início de 2015, o terceiro trimestre do ano obteve um agravamento nas condições de emprego e renda, o crédito ficou mais restrito, conjugados ao reajuste elevado das tarifas de energia elétrica têm contribuído para o recuo do consumo de energia nas residências (ANEEL, 2016).

No Brasil, as cargas elétricas dos consumidores residenciais de energia, normalmente são formadas pela utilização de chuveiros elétricos, climatização, refrigeração, iluminação, ferro elétrico, televisão e outros equipamentos elétricos. Um dos fatores que mais influenciam a carga elétrica em áreas residências são os fatores climáticos, principalmente a variável temperatura (O'DONOVAN, 1983).

3 LÓGICA FUZZY

3.1 CONJUNTOS FUZZY

A lógica *fuzzy* foi desenvolvida, em 1965, na Universidade da Califórnia, pelo Dr. Lotfi A. Zadeh (ZADEH, 1965). Sua principal finalidade é tratar e representar as incertezas, termos linguísticos, redundâncias, imprecisão e de forma geral conceitos mal definidos, já que o mundo não é construído somente por fatos totalmente verdadeiros ou falsos (ZADEH, 1965).

A teoria clássica de conjuntos é definida por uma lógica que dá a uma proposição um valor completamente verdadeiro, cujo valor de verdade é arbitrado igual a 1, ou completamente falso, cujo valor de verdade é igual a 0, fazendo com que essa lógica não represente bem os conceitos vagos. A vantagem da lógica *fuzzy* é de poder ser aplicada às informações que não são absolutamente verdadeiras ou falsas, possuindo, portanto, um valor entre 0 e 1 (BAUER, 1996).

A teoria dos conjuntos *fuzzy* é vista como uma extensão da teoria de conjuntos clássicos, sendo associada aos conceitos básicos de funções de pertinência, operações *fuzzy* com conjuntos, números, relações, regras, etc.

Nos conjuntos *fuzzy*, um determinado elemento pode pertencer a um conjunto parcialmente. O grau de pertinência é definido por meio da função de pertinência, sendo seus valores reais definidos no intervalo $[0, 1]$. A função de pertinência de um conjunto *fuzzy* é definida pela equação (1) (ZADEH, 1965):

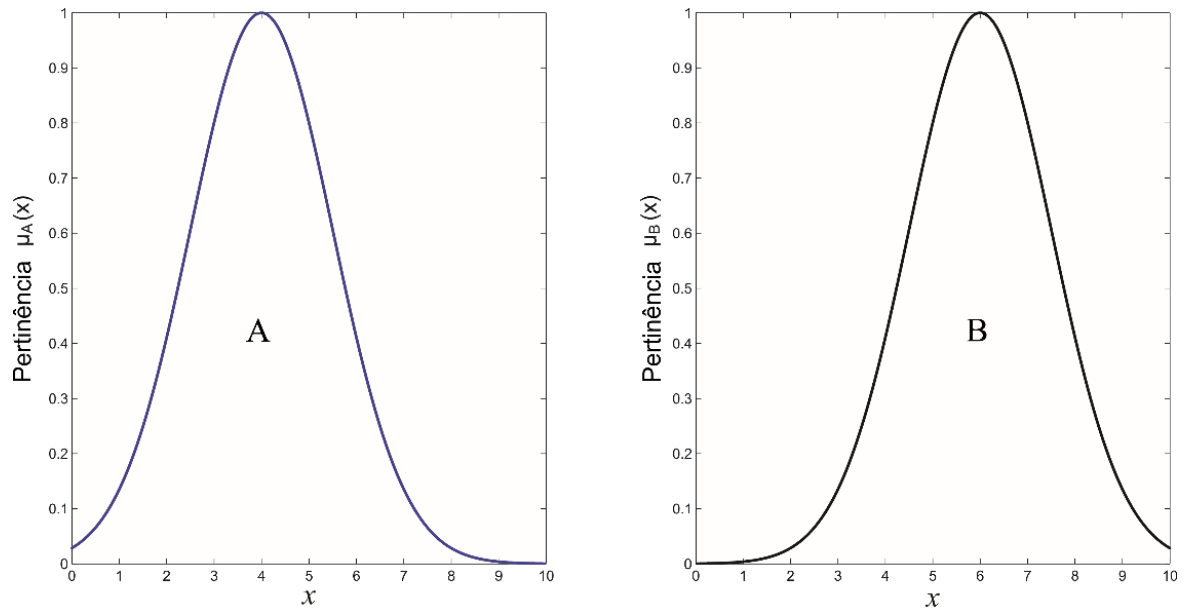
$$\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

na qual a cada elemento de $x \in U$, está associado ao grau $\mu_A(x)$, ou seja, o valor que x pertence a A .

Via de regra, para aplicações práticas, o número de conjuntos *fuzzy* deve situar-se entre 3 e 10, dependendo do grau de exigência das soluções esperadas. Um maior número de conjuntos, geralmente, produz melhores soluções, porém, exigem um maior esforço computacional, ou maior complexidade.

Consideram-se A e B dois conjuntos *fuzzy*, com funções de pertinência $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$, respectivamente, como ilustrados na Figura 1. Os operadores básicos mais importantes dos conjuntos *fuzzy* são definidos a seguir (ZADEH,1965; TERANO et al., 1991; KARTALOPOULOS, 1996; ARABSHAHI, 1996; BAUER, 1996; AZIZ e PARTHIBAN, 1996a).

Figura 1 - Conjuntos *Fuzzy*



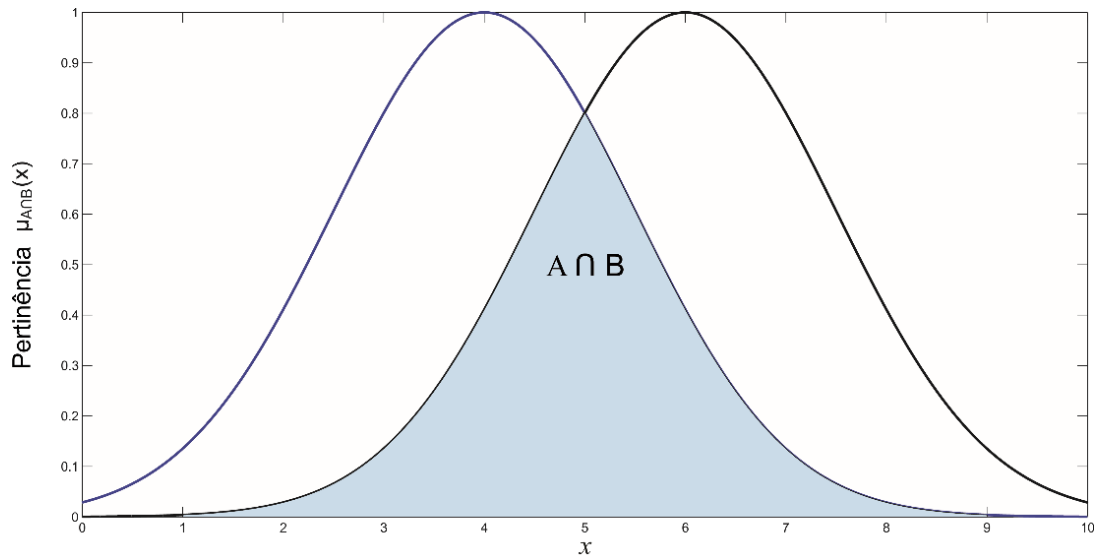
Fonte: Elaboração do próprio autor.

I) Operador AND (\wedge): indica a interseção de dois conjuntos, sendo a função de pertinência da interseção destes dois conjuntos *fuzzy* definida na equação (2):

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2)$$

Na Figura 2 está ilustrada a interseção dos dois conjuntos *fuzzy* A e B (cor azul) (AZIZ; PARTHIBAN, 1996c; BAUER, 1996).

Figura 2 - Interseção entre os Conjuntos *Fuzzy A* e *B*



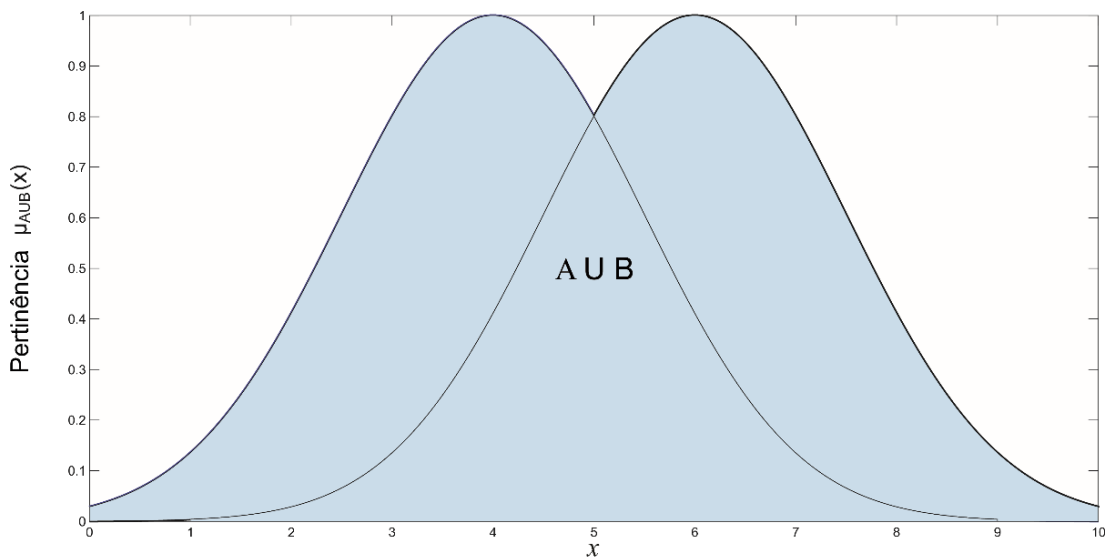
Fonte: Elaboração do próprio autor.

II) Operador OR (\vee): indica a união de dois conjuntos, sendo a função de pertinência da união destes dois conjuntos *fuzzy* definida por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (3)$$

A união dos dois conjuntos *fuzzy* está ilustrada na Figura 3 (AZIZ; PARTHIBAN, 1996c; BAUER, 1996).

Figura 3 - União entre os Conjuntos *Fuzzy A* e *B*



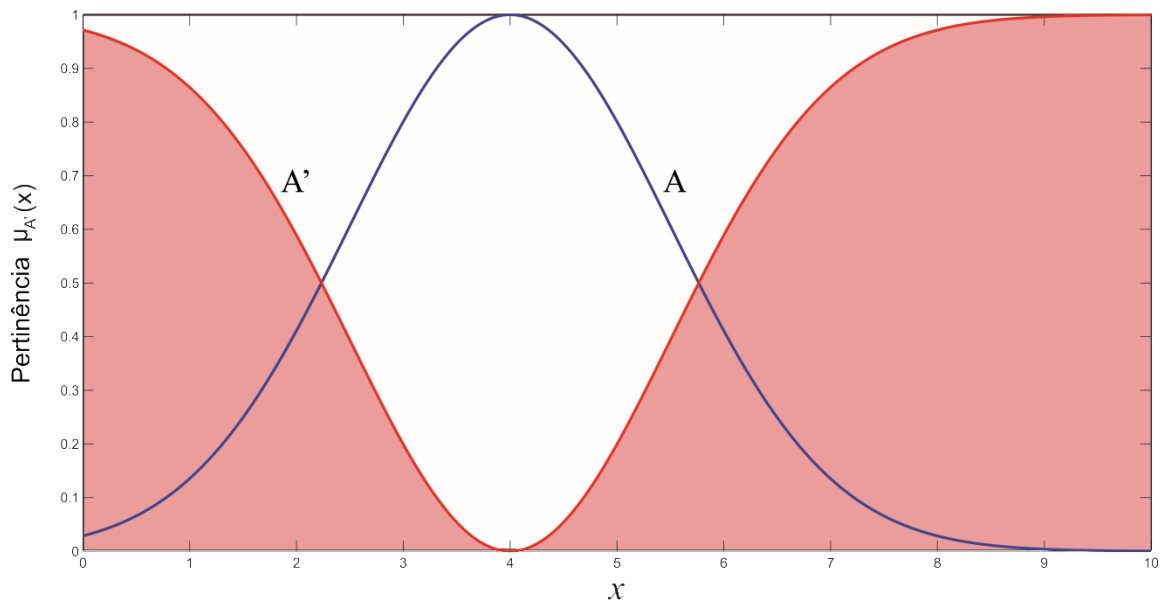
Fonte: Elaboração do próprio autor.

III) Operador NOT: indica o complemento de um conjunto *fuzzy*, sendo a função de pertinência do complemento de A , A' definida pela equação (4):

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4)$$

Na Figura 4 ilustra-se o conjunto A (cor vermelha) e seu complemento A' (cor azul) (AZIZ e PARTHIBAN, 1996c; BAUER, 1996).

Figura 4 - Complemento do Conjunto *Fuzzy* A



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.2 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

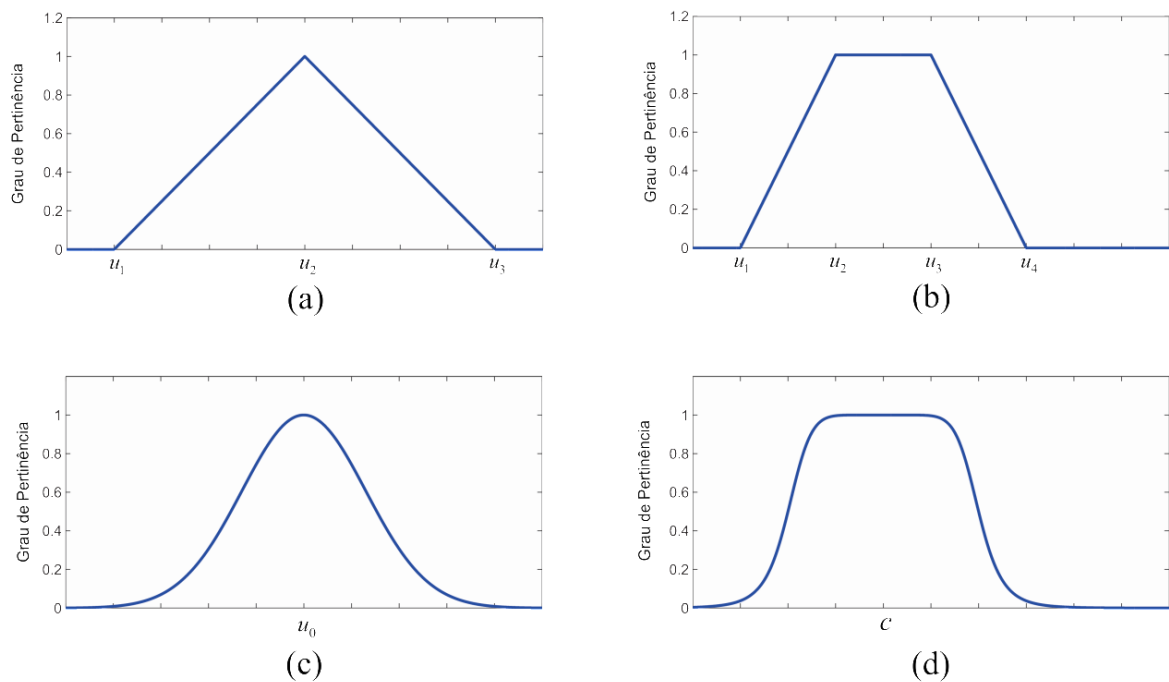
As funções de pertinência são uma representação gráfica da magnitude de participação de cada entrada, caracterizando, de forma gradual, a pertinência nos conjuntos *fuzzy*, ao contrário do que acontece com a pertinência dos conjuntos matemáticos tradicionais, denominados *crisp*, para os quais a pertinência é dada da forma *pertence* ou *não pertence*. Essas funções associam um peso a cada entrada processada, definindo uma superposição funcional entre as entradas e, enfim determinando uma resposta de saída (LOPES et al., 2003).

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, sendo escolhidas de acordo com o tipo de aplicação. Entre as funções existentes, as mais utilizadas são as funções triangulares,

trapezoidais, gaussianas e sino. O projetista tem a liberdade de escolher uma destas funções, de forma que melhor se ajuste na aplicação em questão, para obter melhores resultados (KASABOV, 1998; MENDEL, 1995).

Na figura 5 estão ilustradas as funções de pertinência triangular (a), trapezoidal (b), gaussianiana (c) e sino (d).

Figura 5 – Tipos de Funções de Pertinência



Fonte: Elaboração do próprio autor.

a) Triangular

A função de pertinência triangular é definida pela equação (5), sendo u_1 , u_2 e u_3 os vértices utilizados para compor a função.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x-u_1}{u_2-u_1}, \quad u_1 \leq x \leq u_2 \\ \frac{x-u_3}{u_3-u_2}, \quad u_2 \leq x \leq u_3 \\ 0, \quad x < u_1 \text{ ou } x > u_3 \end{array} \right. \quad (5)$$

b) Trapezoidal

A função de pertinência trapezoidal está definida na equação (6), sendo, u_1 , u_2 , u_3 e u_4 os vértices utilizados na composição da função.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & , x < u_1 \\ \frac{x-u_1}{u_2-u_1} & , u_1 \leq x \leq u_2 \\ 1 & , u_2 \leq x \leq u_3 \\ \frac{x-u_4}{u_4-u_3} & , u_3 \leq x \leq u_4 \\ 0 & , x > u_4 \end{cases} \quad (6)$$

c) Gaussiana

A função de pertinência gaussiana é definida da seguinte forma:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-u_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

sendo:

u_0 : centro da função gaussiana;

σ^2 : variância (mede a meia largura a uma altura de e^{-1}).

d) Sino

A função de pertinência sino encontra-se ilustrada na figura 5(d), sendo definida por:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (8)$$

sendo:

a : amplitude (mede a abertura da função);

b : metade da amplitude;

c : centro da função sino.

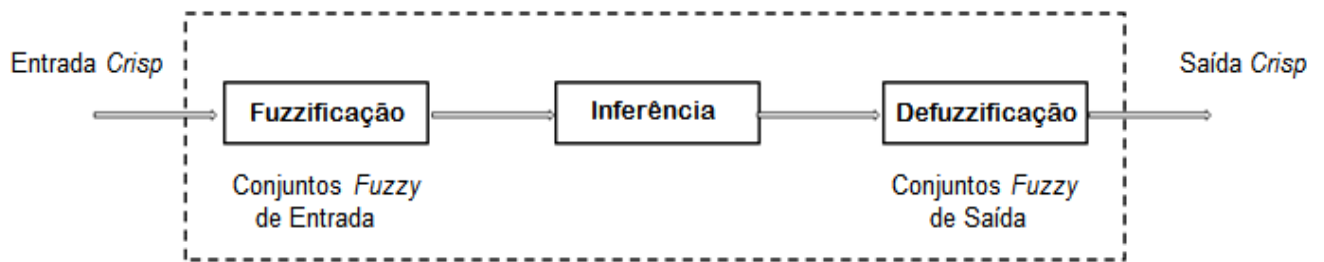
3.3 SISTEMA-FUZZY

O sistema-*fuzzy*, também conhecido como controlador *fuzzy*, produz soluções descomplicadas de problemas com um alto grau de complexidade, devido ao fato de utilizar um conjunto simples que considera vários tipos de regras. Estas regras são utilizadas pelo

controlador *fuzzy* em um procedimento proposto por Ebrahim Mamdani nos anos 70 (LOPES et al., 2003; MENDEL, 1995).

Um sistema-*fuzzy* é constituído por três componentes: (1) fuzzificação; (2) inferência e (3) defuzzificação, como ilustrados na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de blocos de um sistema-*fuzzy*



Fonte: elaboração da própria autora.

3.3.1 Fuzzificação

A fase de fuzzificação é responsável pela conversão de cada entrada real (*crisp*) em uma variável *fuzzy*, fazendo, assim, uma decomposição em um sistema de entrada-saída em um ou mais conjuntos *fuzzy*.

Cada conjunto *fuzzy* cobre uma região particular de valores de entrada ou de saída e, por meio da função de pertinência, é produzido um grau de pertinência (μ) com valores compreendidos entre 0 e 1 (BEZDEK, 1993; KANDEL, 1993). O resultado dos conjuntos *fuzzy* representa o grau para o qual um valor de entrada ou um valor de saída é um membro daquele conjunto *fuzzy* particular. Na fase de “fuzzificação” é observada uma superposição entre os limites dos conjuntos *fuzzy*, sendo indispensável para prover uma operação suave do sistema. O processo de “fuzzificação” permite que as entradas e as saídas do sistema sejam expressas em termos linguísticos de maneira que as regras possam ser aplicadas de uma maneira simples para representar um sistema complexo (LOPES et al., 2003).

3.3.2 Inferência

Após as entradas e as saídas do sistema terem sido decompostas em seus respectivos grupos de conjuntos *fuzzy*, a base de regras é definida, sendo constituída por uma série de declarações *Se - Então*, as quais consistem de uma premissa e de uma conclusão definida como sendo uma função da entrada e uma função da saída dos conjuntos *fuzzy*, respectivamente, como ilustra a equação (9). Estas regras são do tipo (AZIZ e PARTHIBAN, 1996b; CHEN e PHAM, 2006):

$$\text{Se } x \text{ é } A < \textit{premissa} >, \text{ então, } y \text{ é } B < \textit{conclusão} > \quad (9)$$

Estas regras são um dos principais componentes dos sistemas nebulosos (KANDEL, 1993; MENDEL, 1995).

A base de regras pode ser criada a partir da experiência do especialista, ou por outro procedimento usando técnicas inteligentes (*e.g.*, redes neurais artificiais). Frequentemente, um sistema nebuloso exige mais de uma regra para descrever completamente toda a ação necessária.

3.3.3 Defuzzificação

Na etapa de “defuzzificação”, cada saída *fuzzy* é convertida em saída real (*crisp*). Existem diferentes técnicas para converter as saídas *fuzzy* em valores reais, sendo destacados: critério de máximo, média do máximo e o centro da área (MENDEL, 1995; ARABSHAHI, 1996).

- **Critério do máximo** : neste processo, encontra-se o ponto máximo no qual a função de pertinência é um máximo;
- **Média do máximo** : neste processo são escolhidos os valores de saída em que a função de pertinência está para um valor máximo;
- **Centro de área** : este método encontra o centro da gravidade da solução dos conjuntos nebulosos.

Em relação aos métodos supracitados, o mais utilizado é o centro de área, também conhecido como centroide, definido pela equação (10). O valor de saída é calculado tomando-

se o somatório do produto da pertinência do conjunto de entrada, para cada entrada, pelo valor de saída determinado por meio de um conjunto de regras. Este resultado é dividido pelo somatório dos valores de pertinência do conjunto de entrada para cada entrada, resultando, assim, o valor da ação de controle (ARABSHAHI, 1996; KARTALOPOULOS, 1996, LOPES, 2005).

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i v_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (10)$$

sendo:

CA : centro área;

n : número de regras *fuzzy*;

μ_i : grau de pertinência da regra i ;

v_i : atividade de controle recomendada referente à regra i .

4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CARGA RESIDENCIAL

Para obter o perfil de carga residencial, nesta pesquisa baseou-se nas publicações de Zúñiga et al. (2014) e López-Rodríguez et al. (2013). No trabalho de Zúñiga et al. (2014) foi usado um sistema *fuzzy* para construir a curva de consumo de aparelhos domésticos de residências na Espanha: (1) fogão elétrico; (2) máquina de lavar roupas e (3) iluminação. Foram utilizadas as funções de pertinência de entrada períodos “Dia-Noite” e “Períodos do Dia”, sendo o período “Dia-Noite” utilizado somente as regras de iluminação. Assim, nesta pesquisa utiliza-se a mesma ferramenta do trabalho de Zúñiga et al., o Sistema *Fuzzy*, mas com diferentes entradas, saída e objetivos.

No trabalho de López-Rodríguez et al. (2013) é construído o perfil da curva de carga residencial utilizando um modelo estocástico, levando em consideração a ocupação ativa na casa, sendo considerada como ocupação ativa somente os momentos em que as pessoas estão na residência na condição “acordadas”. Foram construídas curvas de carga considerando-se residências de 1 a 6 pessoas. Assim, o referido trabalho serviu de inspiração, nesta pesquisa, visando criar o conjunto de entrada “Ocupação”, isto porque a ocupação está diretamente correlacionada com o consumo de energia elétrica. A proposição de López-Rodríguez et al. encontra-se baseada num modelo estocástico. Nesta tese, o modelo desenvolvido constitui-se num sistema inteligente, havendo, portanto, diferenças expressivas.

À medida que se chega ao consumidor, a previsão de cargas elétricas é obtida com pouca precisão, isso se deve ao fato do consumidor agir sobre livre e espontânea vontade. Assim, nesta pesquisa propõe-se uma metodologia que utiliza um Sistema Fuzzy (SF) para construir um perfil de curva de carga residencial de um grupo específico de residências. Para construir o perfil de consumo de energia, leva-se em consideração a rotina da maior parte dos brasileiros, que possuem uma jornada de trabalho de 8 horas por dia. Assim, uma entrada do SF é o parâmetro “Períodos do Dia” e a outra entrada definida como “Ocupação”, e a saída é o “Consumo de Energia”.

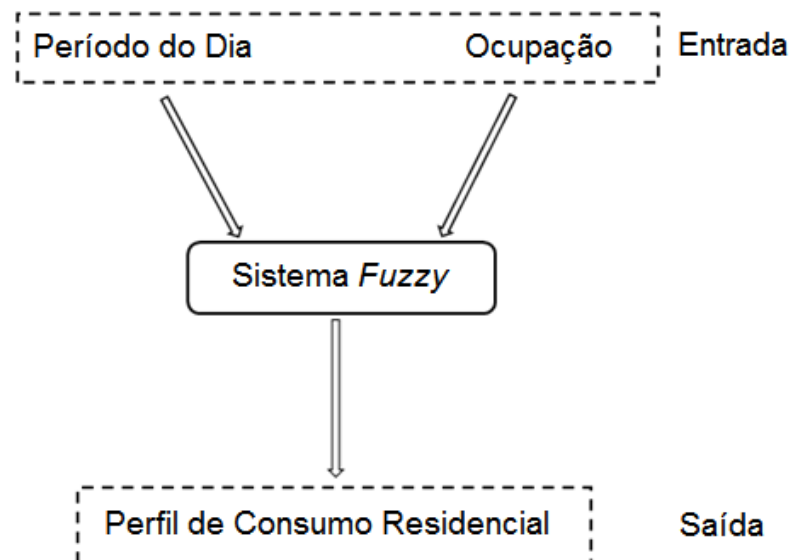
Caso se queira obter uma curva de perfil de energia de um grupo de consumidores diferentes do supracitado, basta mudar as regras do SF. Uma observação muito importante, é que sempre haverá a necessidade de usar o histórico dos habitantes, ou seja, sua rotina para criar as regras e, assim, obter a curva de perfil de consumo. Quanto mais informações forem obtidas dos moradores da classe de residências em estudo, mais próxima a curva de perfil obtido (via SF) estará da curva de perfil de energia real.

É importante ressaltar, também, que mesmo que uma residência possua a mesma rotina, o mesmo número de habitantes de outra residência, suas respectivas curvas de consumo serão diferentes, mas os perfis e o esboço serão basicamente similares. Isso ocorre por causa de que cada ser humano possui um comportamento único, e hábitos distintos.

A grande vantagem de utilizar o SF é de não necessitar de dados reais para obter uma curva de perfil de consumo de energia elétrica, isto porque, no Brasil, esse tipo de dados é inacessível.

O modelo proposto foi implementado no software MATLAB e está representado brevemente na Figura 7.

Figura 7 – Sistema *Fuzzy* aplicado à determinação do perfil de curva de carga residencial



Fonte: Elaboração da própria autora.

A seguir são apresentadas, detalhadamente, como foram construídas as entradas e saída do modelo desenvolvido.

4.1 ENTRADAS DO SISTEMA-FUZZY

Para formular os conjuntos de entrada do SF, foram consideradas residências brasileiras específicas, com no máximo cinco habitantes, que realizam uma jornada de trabalho de 8 horas por dia.

Foram criados dois conjuntos de entradas “Períodos do Dia” e “Ocupação”, que serão utilizadas como variáveis de entrada do SF.

A função de pertinência utilizada para representar os conjuntos de entrada foi a função sino (gaussiana). Esta escolha se deve ao fato desta função interpretar de melhor forma a representação dos períodos e das ocupações na residência.

4.1.1 Períodos do Dia

Para definir os diferentes períodos do dia, que serão utilizados como um conjunto de entrada do SF, foi levada em consideração a rotina diária de um grupo de pessoas que trabalham 8 horas por dia, de segunda-feira a sexta-feira, sendo essas representadas pela maior parte dos consumidores residenciais do setor de energia elétrica brasileiro. Com base na rotina diária dessa classe de pessoas, foram estabelecidos 8 períodos distintos, compreendidos no intervalo entre 0h e 24h.

O primeiro período considerado corresponde ao “Primeiro Período de Sono”. Neste período, normalmente, são utilizados os aparelhos de ar-condicionado e ventiladores quando a temperatura está alta.

O segundo período refere-se ao “Café da manhã”. Neste período, os habitantes acordam e começam a utilizar diversos aparelhos eletroeletrônicos, como: iluminação, chuveiro elétrico, micro-ondas, entre outros.

O próximo período considerado é o “Primeiro Período de Trabalho”, sendo este o terceiro período do dia. Nestes períodos, os habitantes deixam suas casas para irem para o trabalho desligando todos os aparelhos eletroeletrônicos, exceto os aparelhos de consumo contínuo, como geladeira e *freeze*. Entende-se por consumo contínuo, os aparelhos que permanecem ligados durante as 24 horas do dia na rede elétrica, como geladeira, entre outros.

O quarto período é o “Almoço”. Trata-se de um período em que as pessoas dispõem de um intervalo de 2 horas (em média), para almoçarem. Neste período, consideram-se dois casos distintos, ou seja, o caso das pessoas que voltam para suas respectivas casas e assim consomem energia elétrica em suas residências, e o caso das pessoas que não retornam para suas respectivas casas.

O quinto período considerado é o “Segundo Período de Trabalho”, que é o momento em que os habitantes retornam para seus respectivos trabalhos.

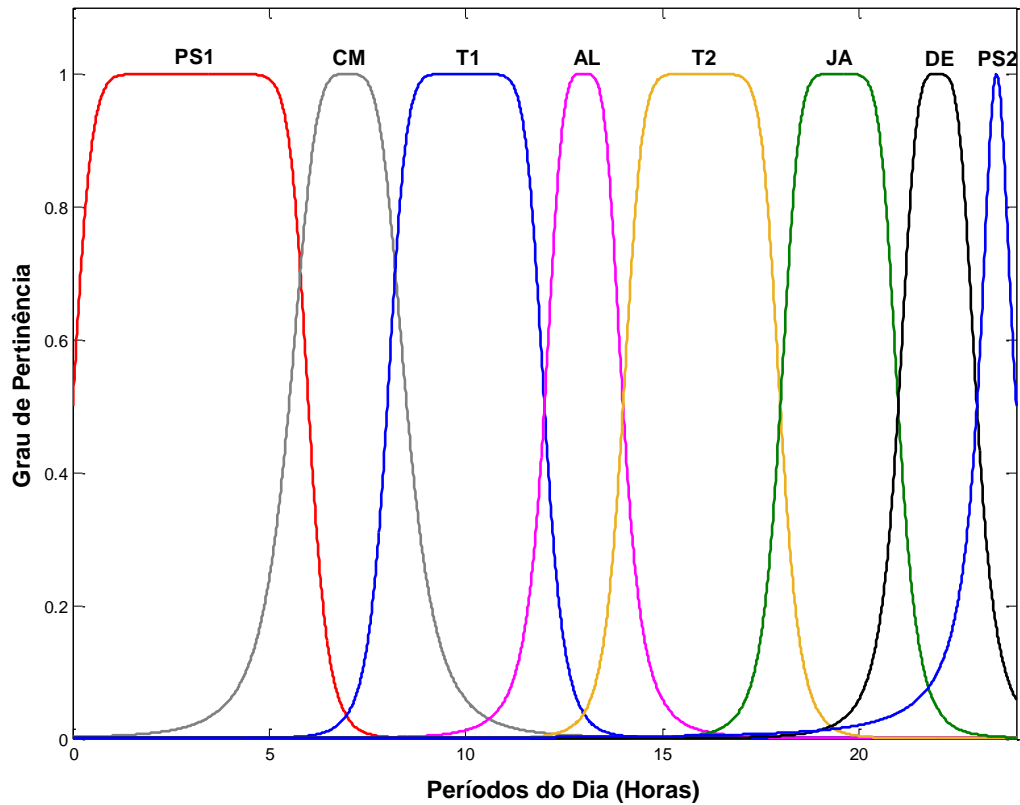
Ao acabar o expediente de trabalho, os moradores voltam para suas respectivas casas, ativando diversos aparelhos eletroeletrônicos, como chuveiro elétrico, iluminação, TV e já começam a preparar o jantar, ou algo para comer. Esse é o sexto período considerado.

O sétimo período considerado é o “Descanso”, sendo este o momento em que os moradores descansam após um longo dia de trabalho, ativando algum aparelho para refrigeração de ar quando a temperatura está alta, o chuveiro elétrico quando a temperatura está amena ou fria, televisor, entre outros.

O último período utilizado refere-se ao “Segundo Período do Sono”. Neste período, os habitantes estão se preparando para dormir, desativando praticamente todos os aparelhos eletroeletrônicos, exceto os de consumo contínuo e os equipamentos de climatização caso a temperatura esteja alta (ar condicionado e ventiladores).

Assim, oito funções de pertinência no intervalo de $[0, 24]$ horas são definidas, o que corresponde a 24 horas do dia, para identificar os diferentes períodos do dia, ou seja, os períodos em que os habitantes estão em suas respectivas casas utilizando aparelhos eletroeletrônicos ou dormindo e, também, os períodos que estão fora da residência. Assim, a variável linguística "Períodos de Dia" possui oito valores linguísticos, onde cada termo é caracterizado por uma função de pertinência de acordo com a Figura 8.

Figura 8 - Funções de Pertinência "Períodos do Dia"



Fonte: Elaboração da própria autora.

sendo:

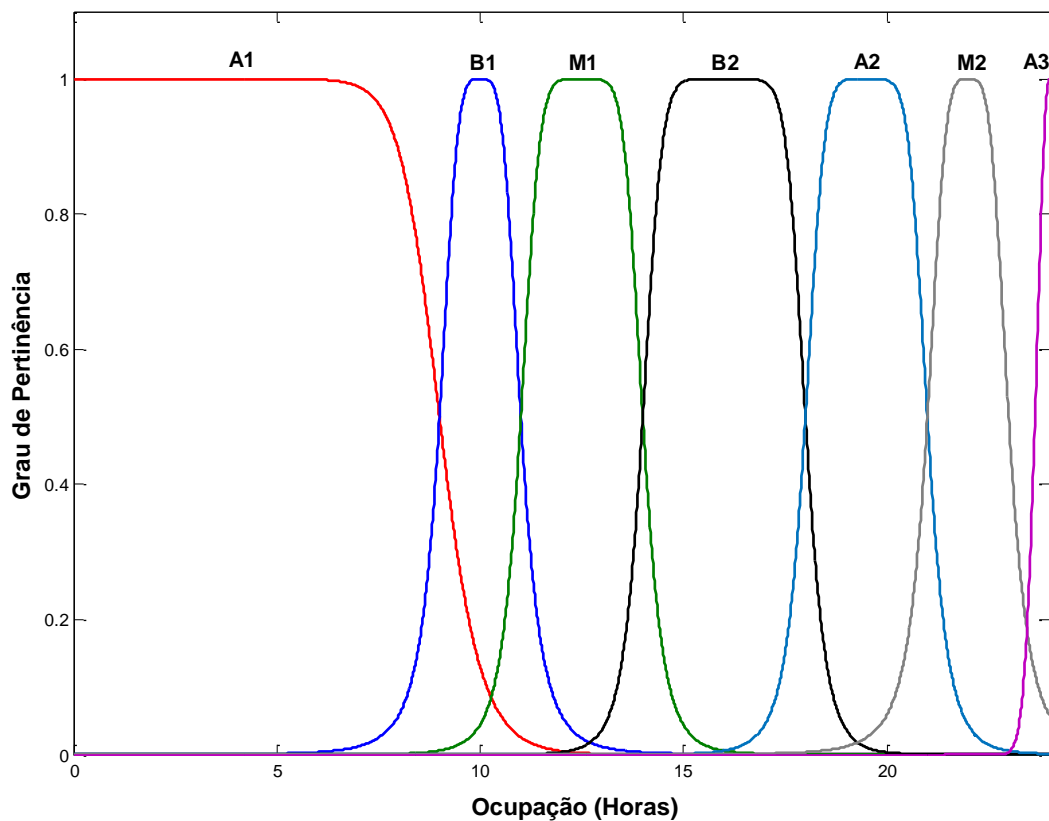
- Primeiro Período do Sono (PS1) : [0h, 6h];
- Café da Manhã (CM) : [6h, 8h];
- Primeiro Período de Trabalho (T1) : [8h, 12h];
- Almoço (AL) : [12h, 14h];
- Segundo Período de Trabalho (T2) : [14h, 18h];
- Jantar (JA) : [18h, 21h];
- Descanso (DE) : [21h, 23h];
- Segundo Período do Sono (PS2) : [23h, 24h].

4.1.2 Ocupação

Por causa da alta correlação que existe entre o perfil da demanda de eletricidade no setor residencial, com o tempo de ocupação das residências, é criada a variável de entrada “Ocupação”.

A variável linguística "Ocupação" é definida por 7 valores linguísticos que determinam se a ocupação é “Alta”, “Média” ou “Baixa”, dependendo da quantidade de usuários. Nesta pesquisa propõe-se abordar uma residência com um máximo de 5 habitantes. A ocupação é considerada “Alta” quando 4 ou 5 habitantes estão na residência, “Média”, quando há 2 ou 3, e “Baixa” quando há apenas um ou nenhum habitante. Cada valor linguístico é caracterizado por uma função de adesão ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Funções de Pertinência "Ocupação"



Fonte: Elaboração da própria autora.

sendo:

- Alta 1 (A1) : ocupação alta no período [0h, 8h];
- Baixa 1 (B1) : ocupação baixa no período [8h, 12h];
- Media 1 (M1) : ocupação media no período [12h, 14h];
- Baixa 2 (B2) : ocupação baixa no período [14h, 18h];
- Alta 2 (A2) : ocupação alta no período [18h, 21h];
- Media 2 (M2) : ocupação média no período [21h, 23h];
- Alta 3 (A3) : ocupação alta no período [23h, 24h].

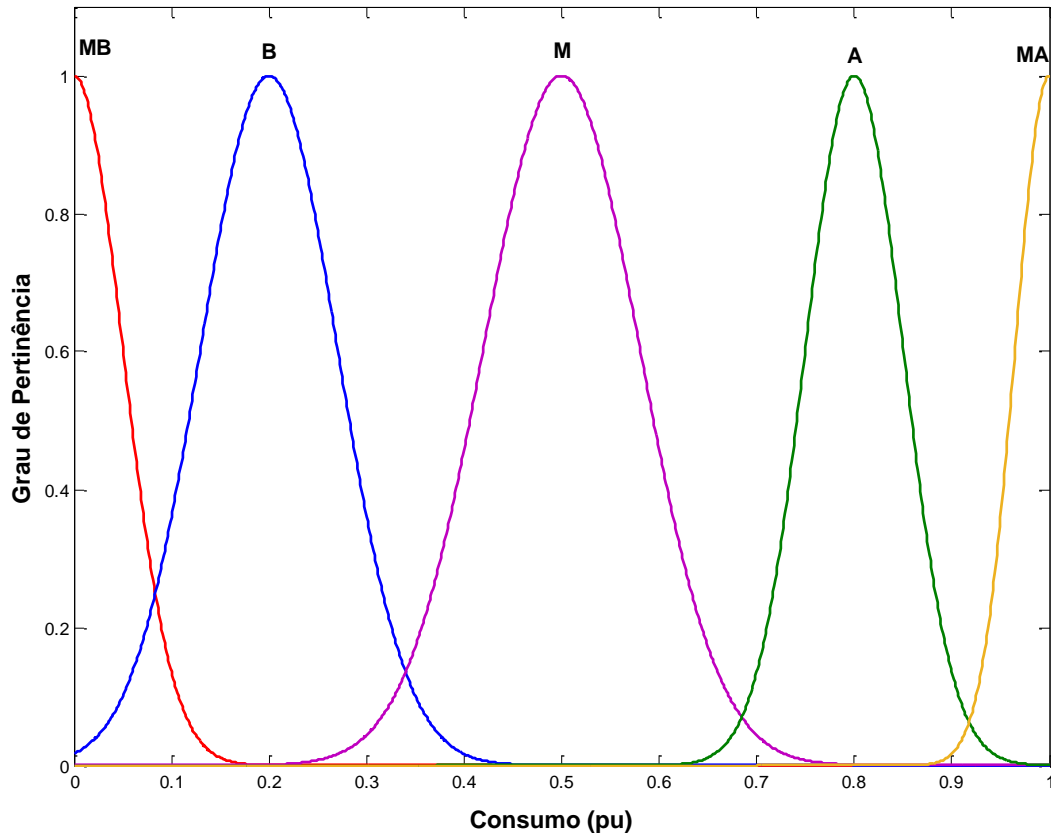
4.2 SAÍDA DO SISTEMA-*FUZZY*

A saída do sistema *fuzzy* é representada pelo consumo de energia elétrica num período de 24 horas. O resultado desejado do sistema é mostrar os perfis de consumo dos usuários durante todo o dia, indicando os horários de maior e menor utilização.

Para representar a saída do sistema *fuzzy* "Consumo de Energia Elétrica", são definidas 5 funções de pertinência (conjuntos *fuzzy*) no intervalo [0, 1]. Na Figura 10 ilustra-se as funções de pertinência que são determinadas pelos valores linguísticos (“Muito Alto”, “Alto”, “Médio”, “Baixo”, “Muito Baixo”) e são convertidos em valores reais (*crisp*) entre zero e um. Este processo é conhecido como “defuzzificação”. Um valor próximo de 1 significa que há várias pessoas disponíveis na casa para ativar os aparelhos eletroeletrônicos e a iluminação, e um valor próximo de zero significa que há poucas pessoas e, assim, o consumo de energia é menor.

Na saída do SF é utilizada a função de pertinência Gaussiana, por causa da melhor representação dos valores linguísticos.

Figura 10 - Funções de Pertinência "Consumo de Energia Elétrica"



Fonte: Elaboração da própria autora.

sendo:

- Muito Baixo (MB) : muito baixo consumo de energia elétrica;
- Baixo (B) : baixo consumo de energia elétrica;
- Médio (M) : médio consumo de energia elétrica;
- Alto (A): : alto consumo de energia elétrica;
- Muito Alto (MA) : muito alto consumo de energia elétrica.

4.3 BASE DE REGRAS DO SISTEMA-FUZZY

Após serem definidas as entradas e as saídas por meio das variáveis linguísticas, é possível criar os conjuntos de regras para obter a curva de consumo de energia elétrica. A base de regras é um dos principais componentes do SF. As regras podem ser definidas de acordo

com o conhecimento do especialista, sendo crucial para obtenção de bons resultados. As regras são definidas em consonância com a seguinte relação, representada pela equação (11):

$$\text{Se } X_1 \text{ é } A \text{ e } X_2 \text{ é } B, \text{ então, } Y \text{ é } C \quad (11)$$

em que X_1 períodos do dia e X_2 ocupação são as entradas do sistema; Y consumo de energia é a saída e A , B e C são os valores assumidos em cada variável, respectivamente. Esta relação também pode ser expressa da seguinte forma: "Se *antecedente*, então, *consequente*".

O procedimento utilizado, nas entradas do SF, é convertido por meio das funções de pertinência para as saídas. Ao aplicar as regras, é obtida uma saída cujo valor é um número *fuzzy*, que deve ser convertido em um valor real (*crisp*). Este processo é conhecido como "defuzzificação". Para realizar a defuzzificação deste trabalho foi utilizado o método "centro de área", definido pela equação (10).

Na Figura 11, está representado o processo de inferência fuzzy em relação às 17h30min, sendo consideradas as entradas Períodos do Dia e Ocupação, a saída Consumo de Energia Elétrica, e as regras (i) e (ii) ativas neste horário. Considerando a entrada Períodos do Dia, observe que às 17h30min a variável linguística T2 tem pertinência 0,9 e a variável linguística JA possui pertinência 0,15. A entrada ocupação, neste mesmo horário, tem variável linguística B2 com pertinência 0,9 e a variável linguística A2 com pertinência 0,15.

Utilizando a regra (i), tem-se que a pertinência em relação a saída é igual variável linguística B (baixa), sendo obtida de acordo com a equação (12)

$$\mu_i = \min\{\mu_{T2}; \mu_{B2}\} = \min\{0,9; 0,9\} = 0,9 \quad (12)$$

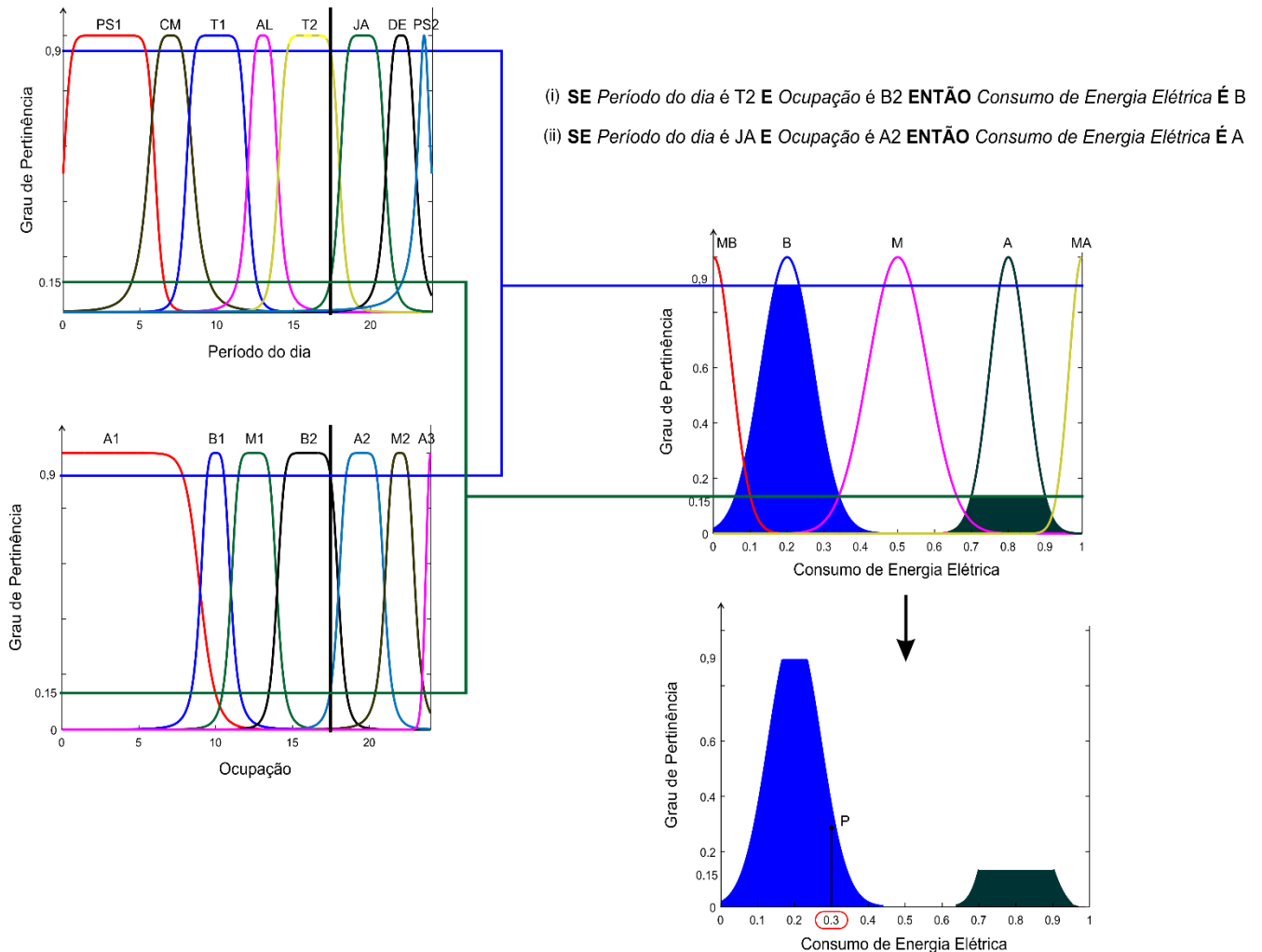
Ao utilizar a regra (ii), obtém-se que a pertinência em relação a saída é igual variável linguística A (alta), a qual é obtida pela equação (13)

$$\mu_{ii} = \min\{\mu_{JA}; \mu_{A2}\} = \min\{0,15; 0,15\} = 0,15 \quad (13)$$

O valor real (*crisp*) P , obtido no processo de defuzzificação em relação à hora 17h30min, é obtido pela equação (14), a qual é a formula do centroide, considerando as regras (i) e (ii).

$$P = \frac{\mu_i * v_B + \mu_{ii} * v_A}{\mu_i + \mu_{ii}} = \frac{0,9 * 0,2 + 0,15 * 0,8}{0,9 + 0,15} = 0,3 \quad (14)$$

Figura 11 - Processo de Inferência Fuzzy



Fonte: Elaboração da própria autora.

Para definir as bases de regras considerou-se o fator climático “Temperatura”, que influencia na carga elétrica residencial (O’ Donovan, 1983). Poderia ser considerada também como fator climático a estação do ano, mas como o Brasil é um país tropical, normalmente as quatro estações não ocorrem nos períodos que deveriam ocorrer. Em muitas regiões, dias que seriam de inverno, a temperatura fica alta como se fosse a estação verão. Assim, considerar o fator climático estação do ano não seria uma boa informação. Por isso, nos conjuntos de regras utiliza-se a variação da temperatura, que irá influenciar na ativação de alguns aparelhos eletroeletrônicos de alto consumo.

Assim, foram criadas bases de regras distintas, levando em consideração a variação da temperatura. Quando a temperatura está abaixo de 15°C o clima foi classificado como “Frio/Muito Frio”. Se a temperatura está no intervalo entre 15°C e 25°C o clima é considerado “Ameno/Agradável”. Mas, se a temperatura está acima de 25°C, o clima é classificado como “Quente/Muito Quente”. Tais conjuntos foram nomeados como “Conjunto 1”, “Conjunto 2” e “Conjunto 3”, respectivamente.

Para cada conjunto de regras, foram desenvolvidas duas bases de regras distintas por causa das diferentes características das rotinas de pessoas que vivem em grandes centros urbanos (trabalhando longe de suas residências) e que normalmente não retornam para suas respectivas residências no período do almoço, e o outro é definido por habitantes que moram em pequenas cidades, e assim retornam para suas habitações para almoçar, ou descansar.

Para criar as bases de regras dos Conjuntos 1, 2 e 3, foram declarados que as residências possuem alguns aparelhos eletroeletrônicos, como: geladeira, condicionador de ar, ventilador, televisor, máquina de lavar roupa, chuveiro elétrico e, também, lâmpadas de iluminação.

É importante ressaltar que a grande dificuldade desta pesquisa foi encontrar a base de regras que melhor represente a curva de perfil de consumo de energia residencial, levando em consideração as diferentes temperaturas. Para isso, foram meses analisando o comportamento de alguns habitantes em suas residências e, também, observando seus hábitos diários.

4.3.1 Conjunto 1: Frio/Muito Frio

Para desenvolver o “Conjunto de Regras 1” foi considerado o clima “Muito Frio/Frio”, para temperaturas abaixo de 15° Celsius. Assim, com objetivo de obter o perfil de consumo nas residências quando as temperaturas estão abaixo de 15° Celsius foram construídos dois conjuntos de regras para o clima “Muito Frio/Frio”. Os dois conjuntos são diferenciados por habitantes que moram em pequenas e em grandes cidades. Na Tabela 1, é apresentado o “Conjunto de Regras 1 (a)”, o qual foi desenvolvido considerando-se as informações e as observações do hábito de habitantes que vivem em pequenas cidades. Já na Tabela 2, apresenta-se o “Conjunto de Regras 2 (b)” baseado nos costumes de habitantes que residem em grandes cidades.

Pode-se observar pelas Tabelas 1 e 2 que as regras 4, 8,9 10, 15 e 16 possuem saídas distintas. Isso ocorre devido ao fato do hábito de habitantes de pequenas cidades serem diferentes do hábito de habitantes de grandes cidades. Observe que o consumo (saída) das

regras 4, 15 e 16 em relação à Tabela 2 são sempre maiores que o consumo da Tabela 1, isso ocorre porque em grandes cidades os habitantes normalmente chegam ou saem de casa juntos, enquanto que nas pequenas cidades isso não ocorre. Já as regras 8, 9 e 10 possuem saídas distintas, pois está sendo considerado o fato dos habitantes da Tabela 1 retornarem para suas respectivas residências no período do almoço, enquanto os habitantes da Tabela 2 não retornam. Essa mesma situação ocorre também nas regras dos conjuntos 2 e 3.

Tabela 1 - Base de Regras "Muito Frio/Frio (a)"

Regra	Período do Dia	Ocupação	Consumo
01	PS1	A1	B
02	PS1	M2	MB
03	CM	A1	M
04	CM	B1	B
05	CM	M1	M
06	T1	A1	B
07	T1	B1	B
08	AL	B1	M
09	AL	M1	M
10	AL	B2	M
11	T2	B2	B
12	T2	B2	B
13	JA	A2	A
14	JA	A2	MA
15	JA	M2	A
16	DE	M2	M
17	DE	A3	A
18	PS2	M2	M
19	PS2	A3	MB
20	PS2	A3	B

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 2 - Base de Regras "Muito Frio / Frio (b)"

Regra	Período do Dia	Ocupação	Consumo
01	PS1	A1	B
02	PS1	M2	MB
03	CM	A1	M
04	CM	B1	M
05	CM	M1	M
06	T1	A1	B
07	T1	B1	B
08	AL	B1	MB
09	AL	M1	B
10	AL	B2	B
11	T2	B1	B
12	T2	B2	B
13	JA	A2	A
14	JA	M2	MA
15	JA	M2	MA
16	DE	M2	A
17	DE	A3	A
18	PS2	M2	M
19	PS2	A3	MB
20	PS2	A3	B

Fonte: Elaboração da própria autora.

4.3.2 Conjunto 2: Ameno/Agradável

No “Conjunto de Regras 2” foi considerado o clima “Ameno/Agradável”, ou seja, quando a temperatura encontra-se no intervalo de 15° a 25° Celsius. Para obter o perfil de consumo nas residências, quando as temperaturas estão no intervalo descrito, foram apresentados dois conjuntos de regras “Ameno/Agradável”, que são distinguidos por habitantes que moram em grandes centros, e por habitantes que moram em pequenas cidades. Na Tabela 3 apresenta-se o “Conjunto de Regras 2 (a)”, que foram desenvolvidas tomando-se informações e observações relativas ao hábito de residentes que vivem em pequenas cidades. Na Tabela 4 é apresentada o “Conjunto de Regras 2 (b)”, considerando habitantes que residem em grandes cidades.

Tabela 3 - Base de Regras "Ameno / Agradável (a)"

Regra	Período do Dia	Ocupação	Consumo
01	PS1	A1	B
02	PS1	M2	MB
03	CM	A1	M
04	CM	B1	B
05	CM	M1	M
06	T1	A1	B
07	T1	B1	B
08	AL	B1	M
09	AL	M1	M
10	AL	B2	M
11	T2	B1	B
12	T2	B2	B
13	JA	A2	A
14	JA	M2	MA
15	DE	M2	M
16	DE	A3	A
17	PS2	M2	M
18	PS2	A3	MB
19	PS2	A3	B

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 4 - Base de Regras "Ameno/Agradável (b)"

Regra	Período do Dia	Ocupação	Consumo
01	PS1	A1	B
02	PS1	M2	MB
03	CM	A1	M
04	CM	B1	M
05	CM	M1	M
06	T1	A1	B
07	T1	B1	B
08	AL	B1	MB
09	AL	M1	B
10	AL	B2	B
11	T2	B1	B
12	T2	B2	B
13	JA	A2	A
14	JA	M2	MA
15	DE	M2	A
16	DE	A3	A
17	PS2	M2	M
18	PS2	A3	MB
19	PS2	A3	B

Fonte: Elaboração da própria autora.

4.3.3 Conjunto 3: Quente/Muito Quente

Neste caso, para a construção do “Conjunto de Regras 3”, foi considerada a temperatura “Quente/Muito Quente”, ou seja, quando a temperatura está acima de 25° Celsius. Da mesma maneira dos conjuntos anteriores, serão apresentados dois conjuntos “Quente/Muito Quente”, que são distinguidos por habitantes que moram em grandes centros, e que normalmente não retornam para suas respectivas residências no período do almoço, e o outro é definido por habitantes que moram em pequenas cidades, e assim retornam para suas habitações para almoçar, ou descansar. Na Tabela 5, apresenta-se o “Conjunto de Regras 3 (a)”, que foi criado baseado em informações e observações do hábito de habitantes que vivem em pequenas cidades, enquanto na Tabela 6 apresenta-se o “Conjunto de Regras 3 (b)”, sendo estas regras desenvolvidas considerando habitante de grandes centros, que apresentam hábitos um pouco diferentes das pessoas que moram em pequenas cidades.

Tabela 5 - Base de Regras "Quente/Muito Quente (a)"

Regra	Período do Dia	Ocupação	Consumo
01	PS1	A1	A
02	PS1	A1	M
03	CM	A1	B
04	CM	B1	B
05	CM	M1	M
06	T1	A1	B
07	T1	B1	B
08	AL	B1	M
09	AL	M1	M
10	AL	B2	M
11	T2	B2	B
12	T2	B2	B
13	JA	A2	M
14	JA	M2	A
15	DE	M2	M
16	DE	A3	M
17	PS2	A3	A
18	PS2	A3	M

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 6 - Base de Regras "Quente / Muito Quente (b)"

Regra	Período do Dia	Ocupação	Consumo
01	PS1	A1	A
02	PS1	A1	M
03	CM	A1	M
04	CM	B1	M
05	CM	M1	M
06	T1	A1	B
07	T1	B1	B
08	AL	B1	B
09	AL	M1	B
10	AL	B2	B
11	T2	B2	B
12	T2	B2	B
13	JA	A2	M
14	JA	M2	A
15	DE	M2	A
16	DE	A3	A
17	PS2	A3	A
18	PS2	A3	M

Fonte: Elaboração da própria autora.

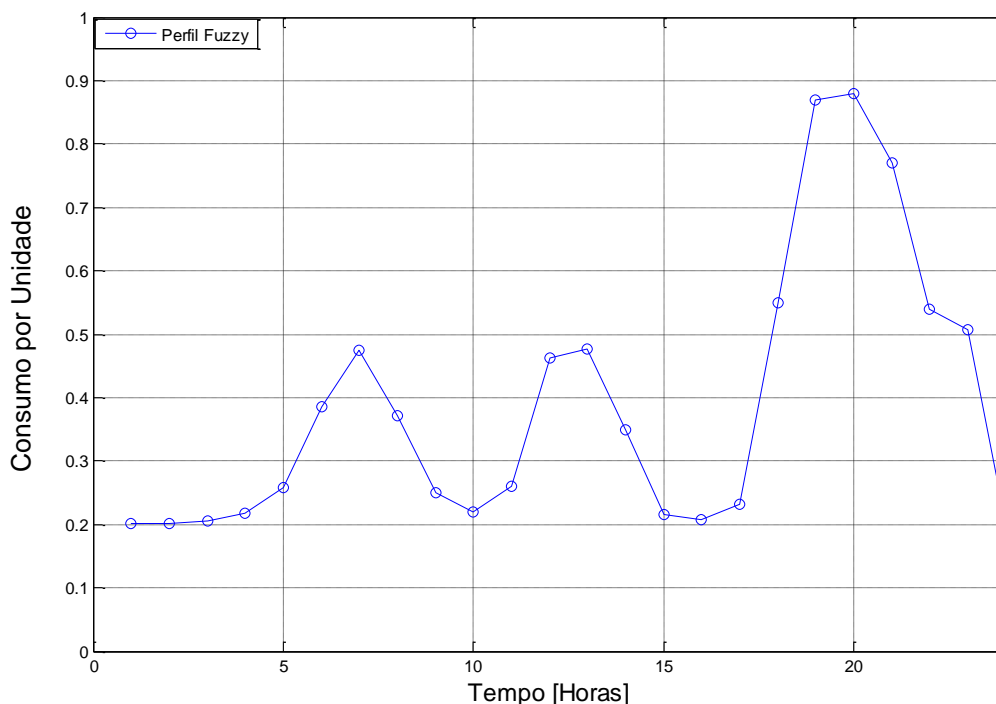
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para todos os resultados obtidos, foi considerado um dia típico de semana analisando um grupo de residências específico, com habitantes que possuem a mesma rotina diária, ou seja, que trabalham 8 horas por dia, com, no máximo, 5 habitantes na residência.

5.1 CONJUNTO 1: FRIO/MUITO FRIO

Os resultados do “Conjunto 1” foram obtidos utilizando os conjuntos de entrada e de saída e, também, as bases de regras previamente elaboradas. Assim, por meio dos conjuntos de entrada “Períodos do Dia” e “Ocupação”, do conjunto de saída “Consumo de Energia” e do “Conjunto de Regras” (definido na Tabela 1) obtém-se a Figura 12.

Figura 12 - Perfil de Consumo Residencial: Muito Frio/Frio (a)



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na Figura 12, ilustra-se o perfil de consumo de energia elétrica, para um período de 24 horas, obtido via SF, em um dia no qual a temperatura está abaixo de 15° Celsius, sendo consideradas uma classe de residências com no máximo 5 habitantes. Estes moradores trabalham 8 horas por dia e residem em cidades pequenas (com poucos habitantes), retornando para suas respectivas residências no período de almoço.

Em todas as curvas, os valores da carga estimada são normalizados, *i.e.*, os valores são compreendidos entre 0 e 1, tal como é o espectro variação da teoria de conjuntos *fuzzy*. A norma refere-se ao valor total da carga de todos os eletrodomésticos escolhidos para cada residência. A potência de cada aparelho faz parte de um arquivo podendo, se necessária, ser ajustada pelo usuário. Podendo, ainda, serem incluídos novos equipamentos. A listagem dos equipamentos e de suas potências, considerados nos experimentos, encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Relação de eletroeletrônicos e suas potências

Eletroeletrônicos	Consumo W/h
Geladeira	115
Ar Condicionado	814
Ventilador	80
Televisão	130
Máquina de Lavar Roupa	401
Chuveiro Elétrico	6800
Lâmpadas de Iluminação	20

Fonte: Elaboração da própria autora.

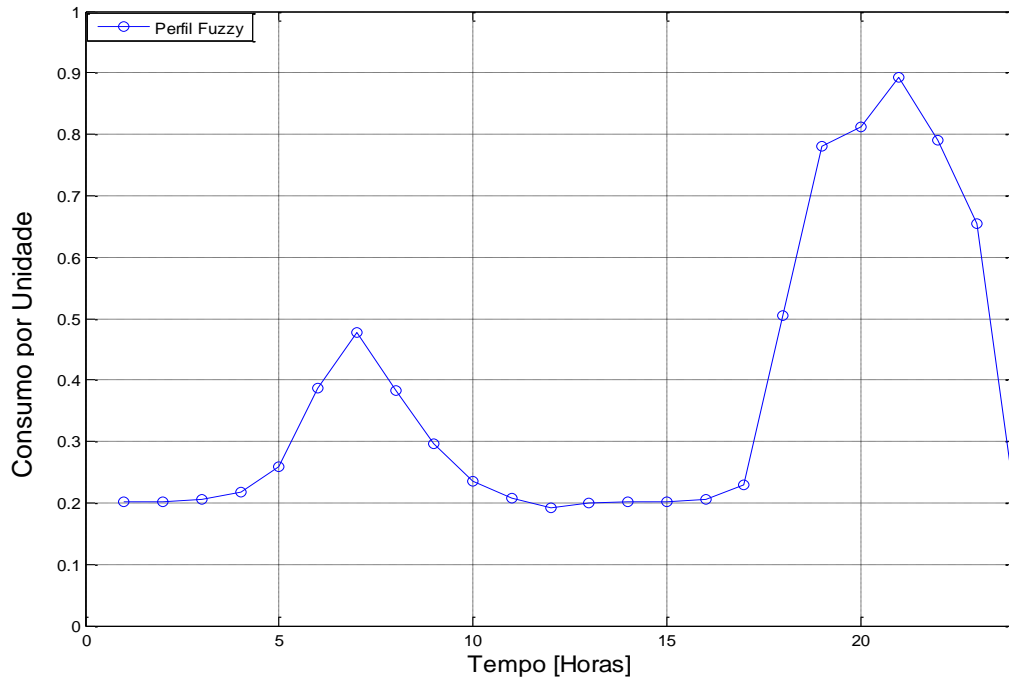
Pode-se observar na Figura 12 a ocorrência de 3 picos de energia, sendo a maior deles ocorrendo no período da noite, às 20 h. O primeiro pico ocorre no período da manhã, ou seja, no momento em que os moradores acordam e começam a ativar alguns aparelhos eletrodomésticos como: chuveiro elétrico, iluminação, entre outros. O segundo pico acontece no período do almoço, no momento em que os moradores chegam nas suas respectivas residências, ligam o televisor, abrem a geladeira para preparar o almoço, alguns tomam banho ativando o chuveiro elétrico. E o terceiro (e maior pico) ocorre no período da noite, sendo o momento em que os moradores chegam do emprego, ou da escola.

Os vales ocorrem nos momentos em que não há habitantes nas residências e também no período do sono, pois quando a temperatura está baixa, nenhum aparelho para refrigerar o ambiente é ativado, funcionando apenas os eletrodomésticos de uso contínuo.

Para obter o perfil de consumo residencial descrito na Figura 13, foram utilizados os conjuntos de entrada, o conjunto de saída e a base de regras apresentada na Tabela 2. De

maneira similar à Figura 12, na Figura 13 ilustra-se o perfil de consumo de energia elétrica durante 24 horas, com a diferença que são consideradas residências de grandes centros urbanos, ou seja, cidades que abrigam muitos habitantes.

Figura 13 - Perfil de Consumo Residencial: Muito Frio/Frio (b)



Fonte: Elaboração da própria autora.

Pode-se notar na Figura 13 a ocorrência de 2 picos de carga: um pico mais baixo e outro mais alto. O pico mais baixo ocorre na parte da manhã às 7h, no período do café da manhã, no qual os habitantes acendem lâmpadas, utilizam o chuveiro elétrico. O pico mais alto ocorre no período da noite, no momento em que os moradores já estão em suas residências com diversos equipamentos sendo utilizados.

Os vales ocorrem no período do sono, das 24 h às 5 horas, pois como está sendo considerada a temperatura abaixo de 15° não é necessária a ativação de aparelhos de ar-condicionado e ventiladores, correspondente ao período das 9 h até às 17 horas, pois estão sendo considerados os habitantes das grandes cidades, que normalmente não retornam para suas residências no período do almoço.

Como está sendo considerado o clima “Frio/Muito Frio”, quando se ativa o chuveiro elétrico, o mesmo é ligado na temperatura inverno. Deste modo, o consumo de energia será alto.

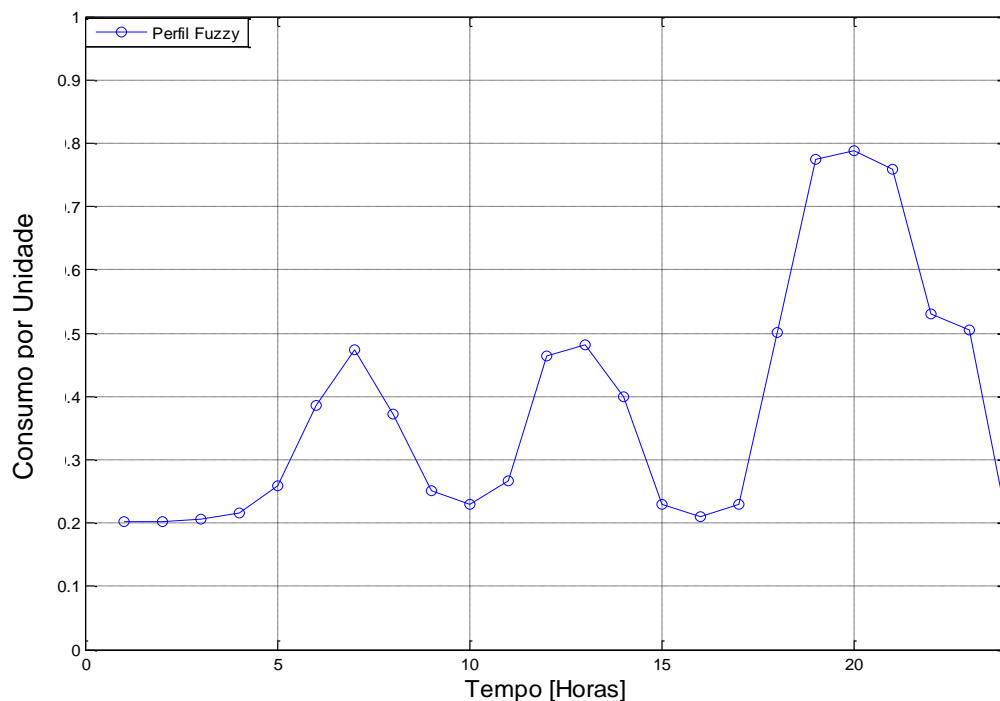
5.2 CONJUNTO 2: AMENO/AGRADÁVEL

Para obter as curvas referentes aos perfis de consumo residencial do “Conjunto 2”, foram utilizados os conjuntos de entrada, o conjunto de saída e as regras definidas de acordo com o conhecimento do comportamento dos habitantes e suas atividades ao longo do dia.

Nas Figuras 14 e 15 são mostrados os perfis das curvas de consumo de energia elétricas construídos a partir dos conjuntos de regras definidos nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. As regras da Tabela 3 foram construídas com base em moradores que residem em cidades pequenas. Na Tabela 4 foram levados em consideração os habitantes que residem em cidades de grande porte.

Na Figura 14 ilustra-se o perfil de consumo de energia elétrica de um grupo de residências, no período de 24 horas. A curva foi obtida via execução do SF, considerando residências com, no máximo, 5 habitantes, jornada de trabalho diário de 8 horas e residem em cidade de pequeno porte.

Figura 14 - Perfil de Consumo Residencial: Ameno/Agradável (a)

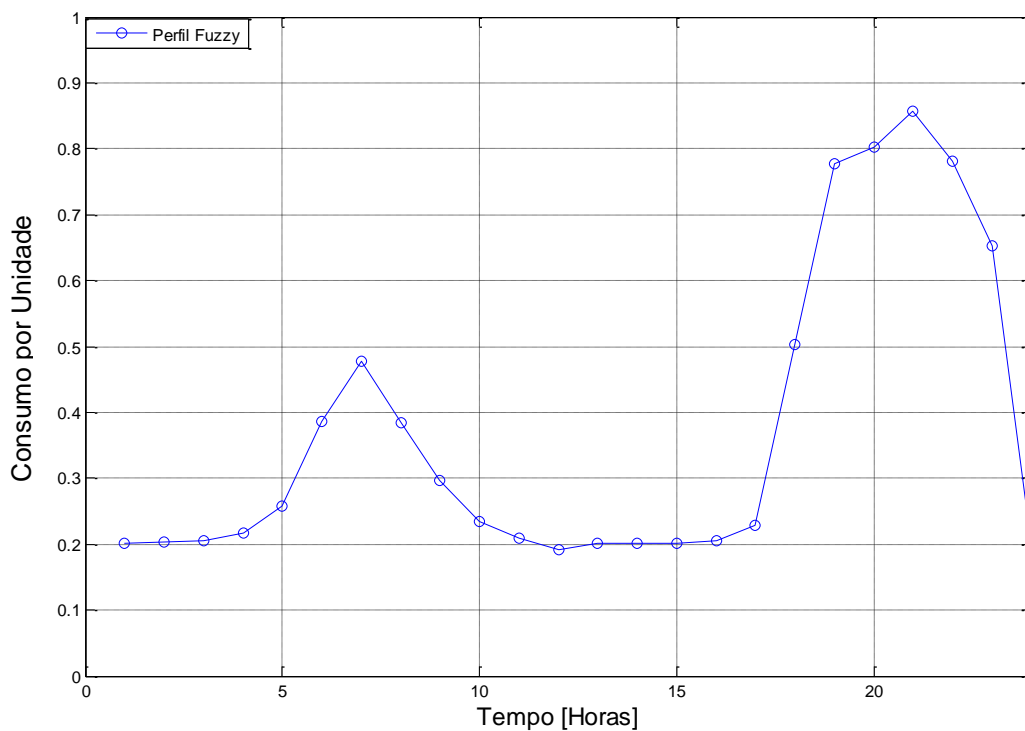


Fonte: Elaboração da própria autora.

A partir da Figura 14, podem-se observar três picos de energia, ou seja, o primeiro ocorre às 7h correspondente ao momento em que os moradores estão tomando café da manhã e se preparando para sair para trabalho. O segundo pico ocorre no período do almoço. O maior pico de carga ocorre no intervalo das 19 h às 21 horas, sendo este o período em que os habitantes chegam a suas residências. Os vales de energia ocorrem no momento em que são desativados praticamente todos os aparelhos elétricos, exceto os de uso contínuo, ou seja, nos horários em que não há ninguém na residência e nos horários em que os habitantes estão dormindo.

A curva mostrada na Figura 15 representa o perfil de consumo de energia elétrica de 1 em 1 hora, num total de 24 horas, de uma classe de residências específicas, cujos moradores saem bem cedo para trabalhar e retornam somente no fim do expediente.

Figura 15 - Perfil de Consumo Residencial: Ameno/Agradável (b)



Fonte: Elaboração da própria autora.

Observam-se, na Figura 15, que para essa classe de consumidores são obtidos dois picos de carga: um no momento em que os moradores acordam, tomam café da manhã e se preparam para sair para trabalho. O pico mais alto acontece às 21 horas correspondente ao momento em que os habitantes já chegaram à residência.

Pode-se notar uma diferença nos perfis das Figuras 14 e 15, principalmente no período do almoço, causado pelo fato dos consumidores, que residem em grandes cidades, não retornarem para suas residências neste período, assim ocorre um vale no período das 8 h até às 18 h. Outra diferença relevante acontece no período da noite, onde se pode notar que o maior pico dos consumidores de cidades menores ocorre às 20h, enquanto que dos consumidores das grandes cidades acontece às 21h. Isso acontece como consequência ao fato dos moradores de grandes centros demorarem mais para retornarem para suas residências.

5.3 CONJUNTO 3: QUENTE/MUITO QUENTE

Os resultados do “Conjunto 3” são obtidos com base nas definições dos conjuntos de entrada e de saída, bem como nas regras definidas com base no conhecimento do comportamento humano e suas atividades diárias.

Para validar o perfil de consumo de carga residencial, obtido via execução do SF proposto, foi medido o consumo de energia de uma residência em uma cidade de pequeno porte (Ilha Solteira) e, também, em uma cidade com muitos habitantes (São Paulo). Os moradores destas residências se enquadram na classe de pessoas que possuem a rotina e o número de ocupantes descritos nas entradas do SF proposto. O consumo de energia foi medido de hora em hora, em um período de 24 horas, em um dia. A temperatura média, naquela ocasião, era de 27° Celsius.

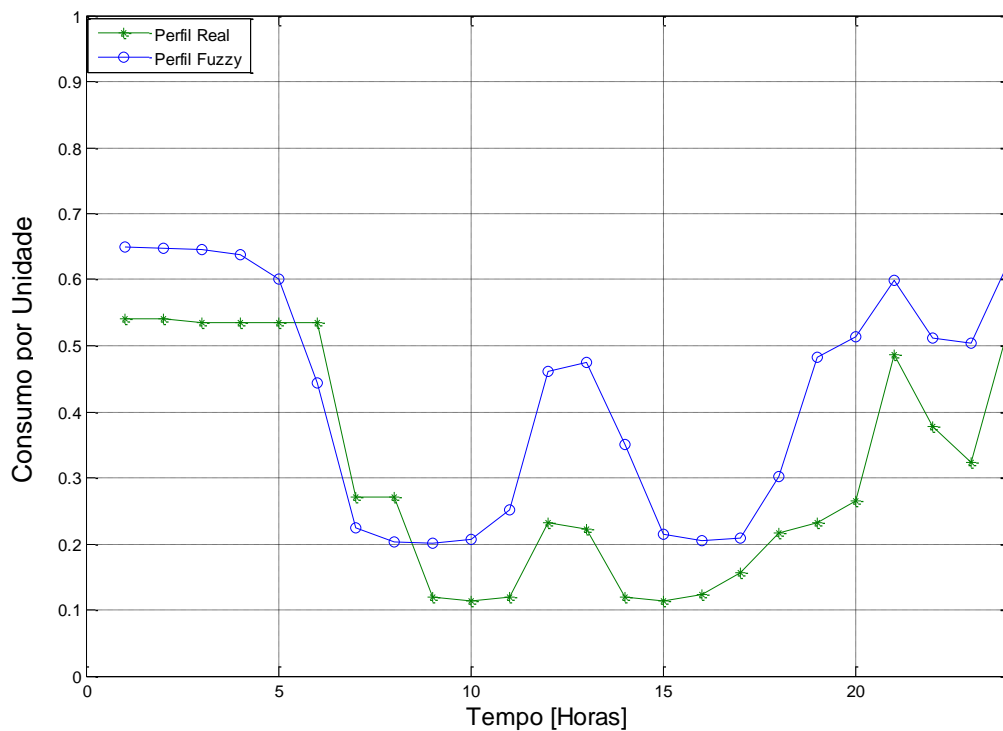
Nas Figuras 16 e 17 são ilustrados os perfis de curva de consumo de energia elétrica obtidos. Para obtenção das curvas de carga elétrica do “Conjunto 3”, foram criadas duas bases de regras distintas, considerando dois grupos de pessoas que possuem rotinas diferentes, por causa do local que residem.

Na Figura 16 mostra-se o perfil de consumo de energia elétrica no período de 24 horas, obtido via SF e também usando-se dados reais. Foi considerado um dia típico de semana, considerando um grupo de residências específico com, no máximo, 5 habitantes. Esses moradores trabalham 8 horas por dia e moram em cidades pequenas com retorno para casa durante o período do almoço. Como estão sendo consideradas as altas temperaturas, ou seja, quando o clima está quente ou muito quente, pode-se notar que o maior consumo é durante a noite (primeiro e segundo períodos do sono) em consequência da utilização de aparelhos de ar-condicionado que consomem muita energia.

Visando realizar o estudo comparativo, o consumo medido é normalizado considerando-se o levantamento dos equipamentos eletrodomésticos de cada residência (potência total apurada), ou seja, trata-se de uma comparação ajustada por unidade de demanda elétrica.

Assim, a carga estimada horária diária é determinada tomando-se os valores obtidos a partir da execução do SF multiplicado pela potência total da residência.

Figura 16 - Perfil de Consumo Residencial: Quente/Muito Quente (a)"



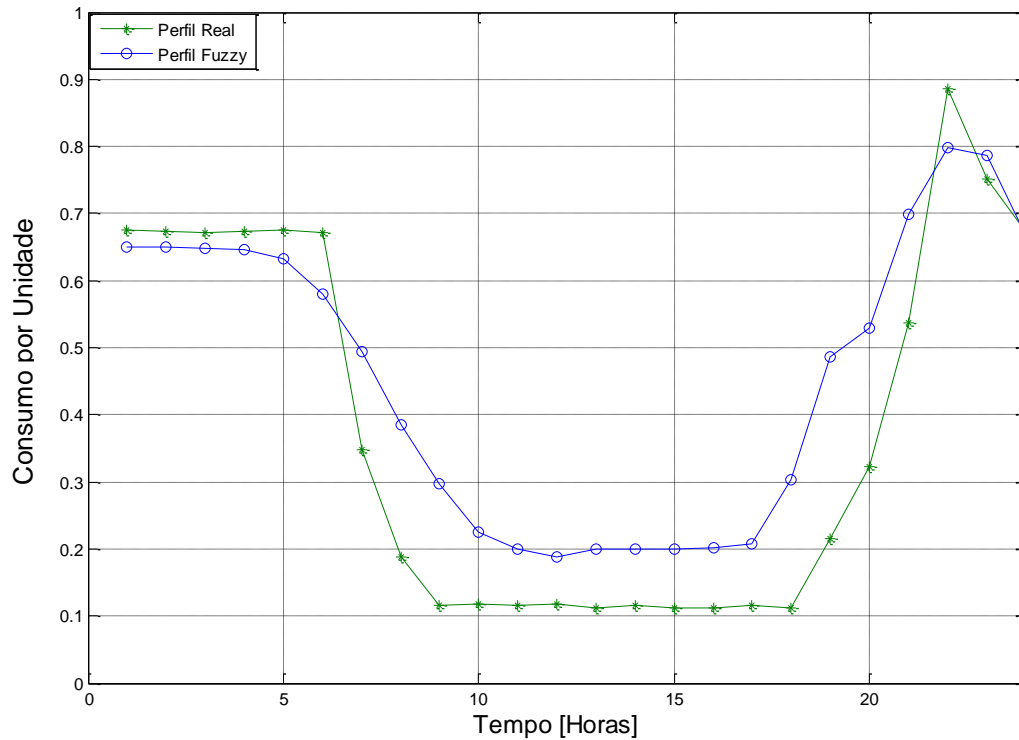
Fonte: Elaboração da própria autora.

Pode-se notar na Figura 16 que a curva de perfil, gerada via execução do SF foi otimista, pois acompanha a curva de perfil real de consumo de energia praticamente nas 24 horas. Um pico local de carga ocorre no horário de almoço, entre as 12h e 14h e outro ocorre a partir das 19 h, ou seja, no momento em que os habitantes chegam em suas respectivas residências.

Observa-se que um consumo mais acentuado de energia elétrica ocorre das 23h às 5h, tanto no perfil real, quanto no perfil *fuzzy*, por causa da utilização de aparelhos de ar-condicionado, sendo observada a formação de um “platô” no referido horário, por causa da carga se comportar quase constante (uso do aparelho de ar-condicionado).

Na Figura 17 ilustra-se o perfil de consumo de energia elétrica obtido pelo SF, e o perfil real (medido de 1 em 1 hora, num total de 24 horas em uma residencial na cidade São Paulo).

Figura 17 - Perfil de Consumo Residencial: Quente/Muito Quente (b)"



Fonte: Elaboração da própria autora.

Observa-se, na Figura 17, que o perfil do SF foi otimista, pois é o mesmo perfil do consumo real basicamente em todos os horários. Pode-se notar também que o maior pico de carga real ocorre às 21h. O perfil gerado pelo SF ocorre no intervalo das 21h às 22h, e que o consumo permanece alto e constante das 24h até às 5h, tanto no perfil encontrado pelo SF, como no perfil real. Como os habitantes das grandes cidades normalmente não retornam para suas residências no período do almoço, ocorre um vale no período das 9h até às 18h.

A grande diferença das curvas de perfis de consumo do “Conjunto 3” em relação as curvas de perfis dos “Conjunto 1” e do “Conjunto 2” é no período em que os habitantes estão dormindo, pois no “Conjunto 3” está sendo considerado o clima “Quente/Muito Quente”, necessitando assim do uso de aparelhos de ar-condicionado, que consomem muita energia. Assim no período das 24h às 5h o consumo é alto quando o clima em consideração é o “Quente/Muito Quente”. Quando o clima é “Ameno/Agradável” ou “Frio/Muito Frio” o

período citado possui o consumo baixo, pois estão funcionando somente os aparelhos de uso contínuo.

5.4 DISCUSSÕES

Nesta pesquisa foi proposta a utilização de um SF com vista à obtenção de perfis de consumo de energia elétrica residencial baseando-se na rotina de um grupo de pessoas que trabalham 8 horas por dia.

Uma contribuição importante deste trabalho é considerar como ocupação ativa os momentos em que os habitantes estão em suas respectivas residências, independentemente se estão dormindo ou acordados. Os trabalhos encontrados na literatura (LÓPEZ-RODRÍGUEZ, et. al., 2013), consideram como ocupação ativa somente os momentos em que as pessoas estão nas casas e acordadas. No Brasil, um país em que a maior parte das cidades o clima é quente praticamente o ano todo, faz-se necessário considerar também os momentos em os habitantes estão dormindo, pois neste período são ativados aparelhos que possuem um consumo alto, *e.g.*, os condicionadores de ar.

Para verificar se o SF conseguiu construir perfis satisfatórios, foi medido o consumo de energia de 1 em 1 hora em duas residências em cidades distintas. Um consumo foi medido na cidade de Ilha Solteira e o outro na cidade de São Paulo, ambos em uma quarta-feira. Foram escolhidas essas cidades pelo fato de serem cidades com portes totalmente diferentes, sendo uma com poucos habitantes e um território pequeno (Ilha Solteira) e a outra com muitos habitantes e um imenso território (São Paulo).

A partir das Figuras 15 e 16, pode-se verificar que os perfis das curvas obtidas pelo SF foram satisfatórios, pois acompanham as curvas reais praticamente em todos horários.

Pode-se notar também que as curvas de perfil de consumo do clima “Frio/Muito Frio” são muito parecidas com as curvas do clima “Ameno/Agradável”. Isso se deve ao fato de que quando a temperatura está abaixo de 25°C são utilizados praticamente os mesmos aparelhos eletroeletrônicos. Pode-se concluir, também, nas Figura 11 e 12, que as curvas de perfis, quando a temperatura está abaixo de 15°C, apresentam maior consumo durante a noite, no período de 20h as 21h, isso ocorre porque quando o clima está frio ou muito frio é necessário utilizar o chuveiro elétrico bem aquecido, consumindo assim mais energia elétrica.

Outra observação interessante é que os picos da noite nas cidades grandes são sempre superiores aos picos da noite de cidades pequenas, isso ocorre, pois em grandes cidades os habitantes normalmente chegam em suas residências juntos, ou praticamente no mesmo horário.

Como informado anteriormente, a estimativa da carga horária diária é determinada tomando-se os valores obtidos a partir da execução do SF multiplicado pela potência total da residência. Deste modo, SF proposto pode ser interpretado como sendo uma “previsão” do modo como os moradores de uma determinada residência usam a energia elétrica. Com isto pode-se, na sequência, oferecer uma série de informações, aos usuários, com vistas à obtenção de economia e racionalidade energética.

Esta previsão, evidentemente, contém imprecisões inerentes à estocasticidade do problema abordado. Porém, o método proposto é embrionário que pode e deve ser aperfeiçoado. A melhoria pode ser vislumbrada baseada nas seguintes alternativas:

- aperfeiçoamento da base de regras e usar um processo de “defuzzificação” mais eficiente;
- desenvolvimento de um sistema híbrido combinando o SF proposto e a base histórica do consumo, devidamente ajustada contemplando os dados mais recentes, ou seja, considerando-se uma pequena base de dados históricos (PBDH), por exemplo, em torno de 30 dias. Visando aumentar os recursos tecnológicos disponíveis, pode empregar uma rede neural simples (e.g., *feedforward* de 3 camadas de neurônios) com o propósito de estimar, de forma automática, dois parâmetros de ponderação entre o SF e o PBDH que proporcione uma melhor previsão.

Estas duas alternativas podem ser implementadas via escolha de uma ou outra, de acordo com o interesse do usuário, ou, ainda, usando-se uma combinação das duas.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 CONCLUSÕES

A previsão de cargas elétricas em residências é um assunto pouco estudado no Brasil, em consequência da falta de acessos a dados reais. Na Espanha, os estudos estão bem à frente, com modelos estocásticos para obter o perfil de consumo residencial. Este trabalho teve como objetivo utilizar um sistema inteligente que, com poucos dados de entrada, tivesse a capacidade de obter a curva de perfil de carga elétrica residencial. Assim, foi proposto um SF, para a obtenção de perfis de consumo diário de carga elétrica residencial, considerando-se a variação de temperatura e um grupo de, no máximo, 5 moradores.

Para obter os resultados, foram criados três conjuntos de regra, Conjunto 1, 2 e 3, levando em consideração a variação da temperatura. Para cada conjunto foram desenvolvidas duas bases de regras distintas: (1) uma para pessoas que residem em grandes cidades e que normalmente não retornam para suas respectivas residências no período do almoço, e (2) a outra é definida considerando habitantes que moram em pequenas cidades, e assim retornam para suas habitações para almoçar, ou descansar. A informação se os habitantes retornam ou não para suas residências no período do almoço causa uma grande diferença de consumo neste período, o que pode ser interessante para o gerenciamento de demanda.

Nas Figuras 11 e 12 estão os perfis de curva de carga elétrica residencial quando o clima está “Frio/Muito Frio”, e as Figuras 13 e 14 representam os perfis de consumo de energia quando no clima “Ameno/Agradável”. Pode-se observar que os perfis da Figura 11 e da Figura 13, e também os perfis das Figuras 12 e 14, são praticamente os mesmos, por causa da utilização dos mesmos aparelhos quando a temperatura está abaixo de 25°C. Mas o consumo de energia é um pouco mais elevado quando a temperatura está abaixo de 15°, em consequência da utilização do chuveiro elétrico.

Nas Figuras 15 e 16, são apresentadas as curvas de perfis de consumo de energia elétrica quando as temperaturas estão altas, acima de 25°C. Pode-se notar, na Figura 15, que o consumo no período em que os habitantes estão dormindo é mais alto que qualquer outro período, por causa da utilização de aparelhos de ar-condicionado que consomem muita energia. Na Figura 16, quando estão sendo consideradas as grandes cidades, o maior consumo é em torno das 22h, pois neste horário alguns habitantes já estão se preparando para dormir, ativando

o aparelho elétrico de ar-condicionado e outros habitantes ainda estão acordados, com outros aparelhos elétricos ligados.

Em ambas as Figuras, 15 e 16, são mostradas o perfil de consumo obtido pelo SF em comparação com perfil de consumo real. Os perfis reais foram obtidos via medição de energia num período de 24 horas em duas residências, uma na cidade de Ilha Solteira e outra na cidade de São Paulo, quando a temperatura média era de 28°C. Pode-se notar que as curvas de perfis de consumo obtidos por meio do sistema *fuzzy* possuem o mesmo (semelhante) perfil das curvas reais praticamente em todos horários, o que leva a uma confiabilidade do modelo proposto nesta pesquisa.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, algumas propostas podem ser feitas, como:

- Realizar uma pesquisa com várias residências distintas considerando o número de ocupantes na residência, a rotina os habitantes ao longo do dia, os aparelhos domésticos, o número de cômodos e a renda da família. A partir desses dados fornecidos, utilizar uma rede neural artificial da família ART com objetivo de classificar o tipo de consumidor. A partir dessa informação, utilizar o SF para obter o perfil da curva de carga elétrica das distintas classes de consumidores.
- Acrescentar mais entradas no SF, como, por exemplo, de aparelhos eletro-eletrônicos existentes nas residências (ar-condicionado, chuveiros elétricos, geladeira, lavadoras, lâmpadas de iluminação, entre outros.). Para obter a informação dos aparelhos que se encontram na casa, seria interessante realizar uma pesquisa com alguns habitantes de residências distintas, para ter a informação de quais aparelhos eletro-eletrônicos são mais comuns nas habitações.
- Realizar um estudo completo dos parâmetros das funções de pertinência das entradas do SF. Após serem realizadas várias modificações nos parâmetros, verificar a evolução ou não dos resultados em relação ao perfil de curva de carga elétrica residencial.

REFERÊNCIAS

- ABREU, T.; LOPES, M. L. M.; ALVES, U. N. L. T.; MINUSSI, C. R.; LOTUFO, A. D. P. Residential electric load curve profile based on fuzzy systems. In: IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES LATIN AMERICA, 2015, Montevideo. **Proceedings...** New York: IEEE, 2015. p. 591-596.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Site. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 7 jan. 2016.
- AIGNER, D. J.; SOROOSHIAN C.; KERWIN P. Conditional demand analysis for estimating residential end-use load profile. **The Energy Journal**, Cleveland, v. 5, n. 3, p. 81-97, 1984.
- ANTUNES, P.; CARREIRA, P.; SILVA, M. M. Towards an energy management maturity model. **Energy Policy**, London, v. 73, p. 803-814, 2014.
- ARABSHAHI, P.; CHOI, J. J.; MARKS II, R. J.; CAUDELL, T. P. Fuzzy parameter adaptation in optimization: Some neural net training examples. **IEEE Computational Science & Engineering**, Melville, v. 3, p. 57-65, 1996.
- ARMSTRONG M. M.; SWINTON M. C.; RIBBERINK H.; BEAUSOLEIL-MORRISON I.; MILLETTE J. Synthetically derived profiles for representing occupant-driven electric loads in Canadian housing. **Journal of Building Performance Simulation**, Abingdon, v. 2, p. 15-30, 2009.
- AZIZ, S. A.; PARTHIBAN, J. **Fuzzy logic introduction**. [S. l.: s. n.], 1996a.
- AZIZ, S. A.; PARTHIBAN, J. **Everything you've always wanted to know about designing fuzzy logic machines but were afraid to ask**. [S. l.: s. n.], 1996b.
- AZIZ, S. A.; PARTHIBAN, J. **You fuzzyin' with me?**. [S. l.: s. n.], 1996c.
- BARTELS, R.; FIEBIG, D. G.; GARBEN, M.; LUMSDAINE, R. An end-use electricity load simulation model: Delmod. **Utilities Policy**, Kidlington, v. 2, n. 1, p. 71-82, 1992.
- BARTUSCH, C.; ALVEHAG, K. Further exploring the potential of residential demand response programs in electricity distribution. **Applied Energy**, Kidlington, v.124, p. 39-59, 2014.
- BAUER, P.; NOUAK, S.; WINKLER, R. **A brief course in fuzzy logic and fuzzy control**. Campinas: Unicamp, 1996.
- BEZDEK, J. C. Fuzzy models: what are they, and why?. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, Piscataway, v. 1, p. 1-6, 1993.
- CAPASSO, A.; GRATTIERI, W.; LAMEDICA, R.; PRUDENZI, A. A bottom-up approach to residential load modeling. **IEEE Transaction on Power Systems**, Piscataway, v. 9, p. 957-964, 1994.
- CARBONTRUST. **Energy management: a comprehensive guide to controlling energy use**. [S. l.]: Carbon Trust, 2011.

CHEN, G.; PHAM, T. T. **Introduction to fuzzy systems**. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2006.

O'DONOVAN, T. M. **Short term forecasting: an introduction to the Box-Jenkins approach**, New York: John Wiley & Sons, 1983. 256p.

GRANDJEAN, A.; ADNOT, J.; BINET, G. A review and an analysis of the residential electric load curve models. **Renewable and Sustainable energy reviews**, Kidlington, v. 16, p. 6539-6565, 2012.

HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2008.

HONG, S. H.; YU, M.; HUANG, X. A real-time demand response algorithm for heterogeneous devices in building and homes. **Energy**, Rondebosch, v. 80, p. 123-132, 2015.

INIEWSKI, K.; MOZEL, T. **Power line communication technologies for smart grids, smart cars, and smart homes**. [S. l.]: CMOS Emerging Technologies, 2012.

IKIM, Y. I.; MIN KOAND, J.; HWAN CHOI, S. Methods for generating TLPs (Typical Load Profiles) for smart grid- based energy programs. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTACIONAL INTELLIGENCE APPLICATIONS IN SMART GRID, 2011, Paris. **Proceedings...** New York: IEEE, 2011. p. 1-6.

JAVED, F.; ARSHAD, N.; WALLIN, F.; VASSILEVA, I.; DAHLQUIST, E. Forecasting for demand response in smart grids: An analysis on use of anthropologic and structural data and short term multiple loads forecasting. **Applied Energy**, Kidlington, v. 96, p. 150-160, 2012.

JONAS, R.; K. LOMAS. Determinants of high electrical energy demand in UK homes: Socio-economic and dwelling characteristics. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 101, p. 24-34, 2015.

KANDEL, A. **Fuzzy control systems**. Boca Raton: CRC, 1993.

KARTALOPOULOS, S. V. **Understanding neural networks and fuzzy logic: Basic concepts and applications**. Piscataway: IEEE, 1996. 232 p.

KASABOV, N. K. **Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering**. Cambridge: MIT, 1998.

KAGVIC, A.; MAVROGIANNI, A.; MUMOVIC, D.; SUMMERFIELD, A.; STEVANIVIC, Z.; DJUREOVIC- PETROVIC, M. A review of bottom-up building stock models for energy consumption. **Building and Environment**, Kidlington, v. 45, p. 1683-1697, 2010.

LI Z; YAO, T. Renewable energy basing on smart grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS NETWORKING AND MOBILE COMPUTING (WICOM), 6., 2010, Chengdu. **Proceedings...** Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. p. 1-4.

LOPES, M. L. M.; MINUSSI, C. R.; LOTUFO, A. D. P. Electrical load forecasting formulation by a fast neural network. **Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications**, Leicester, v. 11., n. 1, p. 51-57, 2003.

LOPES, M. L. M. **Desenvolvimento de redes neurais para previsão de cargas elétricas de sistema de energia elétrica**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

LÓPEZ-RODRÍGUEZ, M. A.; SANTIAGO, I.; TRILLO-MONTERO, D.; TORRINI, J.; MORENO-MUNOZ, A. Analysis and modeling of active occupancy of the residential sector in Spain: An indicator of residential electricity consumption. **Energy Policy**, London, v. 62, p. 742-751, 2013.

MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. **IEEE**, Piscataway, v. 83, p. 345-377, 1995.

MOLDERINK, A.; BAKKER, V.; BOSMAN, M. G. C.; HURINK, J. L.; SMIT, G J. M. Management and Control of Domestic Smart Grid Technology. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 1, p. 109-119, 2010.

PAATERO J.; LUND P. A model for generating household electricity load profiles. **International Journal of Energy Research**, Chichester, v. 30, p. 273-290, 2006.

PIPATTANASOMPORN, M.; KUZLU M.; RAHMAN, S. An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 3, p. 2166-2173, 2012.

RICHARDSON, I.; THOMSON, M.; INIELD D.; CLIFFORD, C. Domestic electricity use: a high-resolution energy demand model. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 42, p. 1878–1887, 2010.

SIANO, P. Demand response and smart grids - A survey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 30, p. 461–478, 2014.

SILVA, T. A. A. **Previsão de cargas elétricas através de um modelo híbrido de regressão com redes neurais**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

STOKES M. **Removing barriers to embedded generation: a fine-grained load model to support low voltage network performance analysis**. 2005. 447 f. PhD thesis (Doctor of Philosophy) - Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, Leicester, 2005.

STRBAC, G. Demand side management: Benefits and challenges. **Energy Policy**, London, v. 36, p. 4419-4426, 2008.

SWAN, L. G; UGURSAL, V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 13, n. 8, p. 1819–1835, 2009.

TERANO, T.; ASAI, K. and SUGENO, M. **Fuzzy systems theory and its applications**. London: Academic Press, 1991. 264 p.

TORRINI, J. Demand side management for the European supergrid: occupancy variances of European single-person households. **Energy Policy**, London, v. 44, p. 199- 206, 2012.

VAN DAN, S. S.; BAKKER C. A.; Buiter, J. C. Do home energy management systems make sense? Assessing their overall lifecycle impact. **Energy Policy**, London, v. 63, p. 398-407, 2013.

ZADEH, L. *Fuzzy sets*. **Information and Control**, Maryland Heights, v. 8, p. 338-353, 1965.

ZÚÑIGA, K. V.; CASTILLA, I.; AGUILAR, R. M. Using fuzzy logic to model the behavior of residential electrical utility customers. **Applied Energy**, Kidlington, v. 115, p. 384-393, 2014.

WALKER, C. F.; POKOSKI, J. L. Residential load shape modeling based on customer behavior. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 107, p. 1703–1711, 1985.

WIDEN, J.; LUNDH, M.; VASSILEVA, I.; DAHLQUIST, E.; ELLEGARD, K.; WÄCKELGARD, E. Construction load profiles for household electricity and hot water from time- use data. Modelling approach and validation. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 41, p. 753-768, 2009.

WIDEN, J., WÄCKELGÅRD, E. A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand. **Applied Energy**, Kidlington, v. 87, p. 1880-1892, 2010.

YAO R.; STEEMERS K. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 37, p. 663–71, 2005.