

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Estiven Orozco Zuluaga

**Desagregação da Energia Elétrica por
Eletrodomésticos para Consumidores
Residenciais**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Delberis Araujo Lima

Rio de Janeiro
Agosto de 2018



Estiven Orozco Zuluaga

**Desagregação da Energia Elétrica por Eletrodomésticos para
Consumidores Residenciais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Delberis Araujo Lima

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Rodrigo Flora Calili

Programa de Pós-Graduação em metrologia – PUC-Rio

Marcio Zamboti Fortes

UFF

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2018

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

Estiven Orozco Zuluaga

Graduou-se em Engenharia Elétrica em 2013 na Universidade Nacional da Colômbia. Sua área de pesquisa envolve otimização linear e desagregação de energia elétrica para consumidores residenciais.

Ficha Catalográfica

Orozco Zuluaga, Estiven

Desagregação da Energia Elétrica por Eletrodomésticos para Consumidores Residenciais/ Estiven Orozco Zuluaga; orientador: Delberis Araujo Lima. – 2018.

89 f. : il. color. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Desagregação de energia elétrica 3. Otimização Linear 4. Horário ponta 5. Tarifa branca. I. Lima, Delberis Araujo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Aos meus pais Gloria e Norberto e à minha irmã por todos os conhecimentos oferecidos ao longo da minha vida; por todo amor, pela confiança e ajuda nessa busca pelo meu sonho.

Ao meu orientador, Prof. Delberis, pela sabedoria e ajuda oferecida ao longo deste processo; pela paciência e dedicação incondicionais que sempre encontrei na medida em que avancei na pesquisa.

Aos meus parceiros Mauricio Céspedes e Sergio Álvarez por serem uma grande ajuda e companhia incondicional neste processo; também aos colegas de pós-graduação do laboratório de sistemas de energia porque sempre me senti acompanhado integralmente. Agradeço a eles pelo companheirismo e pela motivação ao longo do meu caminho na PUC-Rio.

Ao Daniel Barreto, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho, mediante a disposição oferecida para a medição dos dados reais, o incômodo da instalação do medidor na sua casa, além da aquisição de medidas específicas dos eletrodomésticos, muito obrigado pela contribuição, já que sem estes dados, uma aplicação real teria sido impossível.

Aos professores e todos o que fazem parte da Engenharia Elétrica da PUC-Rio, nos quais sempre encontrei apoio e um grande conhecimento.

Ao CNPq pela ajuda e confiança recebidas as quais foram essenciais neste caminho em busca do conhecimento porque, sem a ajuda deles, teria sido difícil me formar.

Ao Brasil pelo acolhimento e ajuda recebidos em todo este tempo que estive aqui, pessoalmente é um país bonito, forte e que oferece muitas oportunidades de crescimento.

Resumo

Orozco Zuluaga, Estiven; Lima, Delberis Araújo. **Desagregação da Energia Elétrica por Eletrodomésticos para Consumidores Residenciais**. Rio de Janeiro, 2018. 89p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nos últimos anos, o custo com energia elétrica tem aumentado de forma significativa para os consumidores no Brasil. Grandes consumidores, como indústrias e comércios, atualmente dispõem de alternativas para mitigar estes custos, como a otimização do contrato de demanda, a correção do baixo fator de potência, a utilização de geração própria, renovável ou não renovável, além da possibilidade de migrar para o mercado livre de energia elétrica, com diversas modalidades de contratos, preços e prazos. Já os consumidores residenciais, em função dos custos menores com as faturas de energia e da limitação técnica dos medidores, até agora dispunham de poucos mecanismos para atenuar seus custos. Entretanto, nos últimos anos tem sido cada vez mais comum a utilização de geração distribuída, principalmente com o uso de painéis fotovoltaicos por parte destes consumidores. Além disto, com a redução dos custos dos medidores inteligentes de energia elétrica, estes consumidores também podem monitorar seu consumo em tempo real, promovendo ações de aumento de eficiência energética para reduzir custos. Mais recentemente, foram criadas as bandeiras tarifárias, que propõem identificar as condições sistêmicas por cores verde, amarela e vermelha. As cores amarela e vermelha sinalizam aumentos de custos na produção de energia elétrica e, conseqüentemente, são repassados para o consumidor na forma de aumento de tarifa, promovendo resposta da demanda. Assim, há uma razão adicional para os consumidores monitorarem seu consumo. Não obstante, em 2018 foi adotada uma nova modalidade tarifária voltada para esta classe de consumidor chamada tarifa branca. Nesta modalidade, o consumidor possui diferentes valores de tarifas para diferentes períodos do dia. Assim, o consumidor que optar por esta modalidade pode reduzir o custo da sua fatura deslocando o consumo de horários de maior valor de tarifa para horários de menor valor de

tarifa. Esta dissertação busca analisar em detalhes a viabilidade de um consumidor residencial migrar seu contrato para a chamada tarifa branca. Para isto, é proposto um modelo de otimização linear inteiro misto que busca desagregar o consumo de energia elétrica, medido de forma não invasiva, do consumidor para os diferentes eletrodomésticos da casa. Logo, o consumidor poderá decidir pela mudança contratual avaliando a perda de conforto que terá em mudar seus hábitos de consumo. A aplicação do modelo proposto é interessante não só por apresentar um diagnóstico mais detalhado do consumo de energia elétrica, mas também por identificar o funcionamento de eletrodomésticos como geladeira, ar condicionado e frigobar, que possuem diferentes estados de operação que dificilmente seriam capturados por uma simples inspeção destes eletrodomésticos. Para ilustrar o modelo proposto, nesta dissertação, dados de um consumidor real foram utilizados e a acurácia do modelo pôde ser comprovada com medições diretas de alguns eletrodomésticos. Desta forma, o consumidor tem a sua disposição uma ferramenta de apoio à decisão importante para monitorar o funcionamento dos eletrodomésticos e definir se deve migrar para a nova modalidade tarifária.

Palavras-chave

Consumo de energia elétrica; desagregação de energia elétrica; otimização linear; tarifa branca; redes inteligentes.

Abstract

Zuluaga, Estiven Orozco; Lima, Delberis Araujo (Advisor). **Disaggregation of Electrical Energy by Home Appliances for Residential Consumers.** Rio de Janeiro, 2018. 89p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the last years, energy consumption has increased significantly for consumers in Brazil. Large consumers, such as industrial and commercial customers, are currently subject to cost-mitigation alternatives such as demand contract optimization, power factor reduction, self-generation, renewable or non-renewable generation, and the possibility of migrating to the free market of electric energy, with various modes of purchase, prices and deadlines. The consumer, in which the means of the upper costs with the fat means of the data of the meters, is in function of minor engines to reduce their costs. However, on a constant basis, with the use of photovoltaic panels, by these consumers. In addition, with the help of the costs of smart electric power meters, these profits are potentially higher, in real time, the ability to generate weaker sound profits for the cost image. More recently, they were created as tariff plates, which identify the systemic conditions by the green, yellow and red nuclei. The yellow and red samples are generated from the temperature of electric energy production and, consequently, are passed on to the consumer in the form of temperature increase. Thus, there is a large difference in consumption levels of your consumption. Nevertheless, in 2015 a new tariff modality was implemented for this class of energy consumption called the white tariff. In this mode, the buyer has different rate values for different periods of the day. Thus, consumers who have this option can reduce the cost of their invoice in relation to the consumption of schedules of higher tariff value for the hours of lower tariff value. This dissertation looks at the analysis on a feasibility of a residential ad migrating its contract to a so-called white tariff. To this end, it is necessary a linear model that makes the difference in consumption of electric energy, measured non-invasively, from consumer to the different units of household appliances of the house. Therefore, the consumer is also evaluated by contracting a service that improves their consumption capacity.

The application of the model is more interesting, but no longer presents the power of electric power, but also has the same standard of electricity as the refrigerator, air conditioning and minibar, which have different states of operation that are hardly captured by a simple inspection of each appliance. To illustrate the proposed model, this dissertation, data from a real consumer were used and an accuracy of the model can be proven with the direct measurements of some home appliances. The way in which the consumer has a migration support tool for the operation of the equipment and defines whether to migrate to a new tariff modality.

Keywords

Electric power consumption; disaggregation of electrical energy; linear optimization; white tariff; smart grids.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Revisão Bibliográfica	23
2	Metodologia Proposta	28
2.1	Medição	28
2.1.1	Medição de energia elétrica da rede residencial	28
2.1.2	Medição de energia elétrica por aparelho	30
2.2	Estimação do Modelo de Otimização	31
2.3	Métricas de avaliação	40
3	Pré e pós-processamento dos dados de entrada	42
3.1	Dados de entrada do caso de estudo	42
3.2	Pré-processamento dos dados de entrada	44
3.2.1	Mapeamento dos aparelhos no pré-processamento	44
3.2.2	Identificação dos aparelhos que podem estar desligados	44
3.2.3	Alocação dos pesos de uso para cada aparelho	45
3.2.4	Identificação dos aparelhos bifásicos	46
3.2.5	Identificação dos aparelhos com comportamento periódico	48
3.3	Pós-Processamento	52
4	Resultados e Discussões	55
4.1	Análise da tarifa branca	66
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	71
6	Referências bibliográficas	73
	Anexo I	77
	Anexo II	87

Lista de Figuras

Figura 2-1 – Medidor utilizado neste trabalho [26]	29
Figura 2-2 – TC tipo garra de 100/50mA [27]	29
Figura 2-3 – Tela das medições fornecidas pelo DMI	30
Figura 2-4 – Medidor de Energia Elétrica de Multi-função [28]	30
Figura 2-5 – Fluxograma do modelo básico.	31
Figura 2-6 – Fluxograma da metodologia inicial adicionando o pré-processamento	35
Figura 2-7 – Fluxograma da metodologia final incluindo pós-processamento	38
Figura 3-1 – Consumo nas fases 1 e 2, no intervalo de 22:00 às 00:00	47
Figura 3-2 – Consumo característico de uma geladeira	48
Figura 3-3 – Consumo da residência de 17:00 às 20:00	50
Figura 3-4 – Consumo da residência de 23:00 às 02:00	51
Figura 3-5 – Tecnologia de ar-condicionado <i>inverter</i> e a convencional [32]	53
Figura 4-1 – Desagregação dos aparelhos no intervalo de 16:30 às 21:29	60
Figura 4-2 – Desagregação aparelhos não flexíveis intervalo de 16:30 às 21:29	62
Figura 4-3 – Desagregação aparelhos flexíveis no intervalo de 16:30 às 21:29	63
Figura 4-4 – Desagregação das perdas e da variável de folga no intervalo de 16:30 às 21:29	64

Figura 4-5 – Comparação entre os dados calculados e os esperados na geladeira	65
Figura 4-6 – Comparação entre os dados calculados e os esperados no minibar	65
Figura 4-7 – Custo tarifa branca deslocando o total de energia de ponta ou intermediário para o horário fora de ponta	68
Figura 4-8 – Custo tarifa branca deslocando o total de energia consumido no horário ponta e no intermediário para o horário fora de ponta	69
Figura 6-1 – Desagregação de energia no intervalo de 8:00 às 11:00	78
Figura 6-2 – Desagregação aparelhos não flexíveis no intervalo de 08:00 às 11:00	79
Figura 6-3 – Desagregação aparelhos flexíveis no intervalo de 08:00 às 11:00	80
Figura 6-4 – Desagregação das perdas e da variável de folga no intervalo de 08:00 às 11:00	81
Figura 6-5 – Desagregação de energia no intervalo de 11:00 às 14:00	82
Figura 6-6 – Desagregação aparelhos não flexíveis no intervalo de 11:00 às 14:00	83
Figura 6-7 – Desagregação aparelhos flexíveis no intervalo de 11:00 às 14:00	84
Figura 6-8 – Desagregação das perdas e da variável de folga no intervalo de 11:00 às 14:00	85
Figura 6-9 – Comportamento ar-condicionado no intervalo de 11:00 às 14:00	86
Figura 6-10 – Consumo real apresentado pela geladeira	87
Figura 6-11 – Consumo real apresentado pelo ar-condicionado tipo <i>inverter</i>	88

Figura 6-12 – Desagregação do consumo do ar-condicionado somando a variável de folga

89

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Modelo dos horários de funcionamento dos aparelhos fornecido pelo usuário	32
Tabela 2 – Dados de placa dos aparelhos no caso de estudo	42
Tabela 3 – Aparelhos com três estados de operação ($k = 3$)	43
Tabela 4 – Aparelhos com quatro estados de operação ($k = 4$)	43
Tabela 5 – Pesos dos aparelhos no intervalo de 16:29 às 21:30	56
Tabela 6 – Valores da penalização da variação por aparelho no intervalo da tarifa branca	57
Tabela 7 – Valores do fator de ajuste para cada aparelho no intervalo da tarifa branca	58
Tabela 8 – Matriz desligado dos aparelhos no intervalo de 17:01 às 17:06	59
Tabela 9 – Consumos de energia na ponta de 17:30 às 20:29	61
Tabela 10 – Consumos de energia no horário intermediário de 16:30 às 17:29 e 20:30 às 21:29	61
Tabela 11 – Métricas de avaliação no intervalo de 16:30 até 21:29	66
Tabela 12 – Tarifas de energia da Light para consumo residencial acima de 450 kWh	67
Tabela 13 – Custo da energia aplicando tarifa branca e tarifa convencional	68
Tabela 14 – Consumo de energia dos aparelhos nos horários ponta e intermediário	70
Tabela 15 – Consumo de energia dos aparelhos no intervalo de 08:00 às 11:00	78

Tabela 16 – Consumo de energia dos aparelhos no intervalo de 11:00
às 14:00

82

Nomenclatura

Caracteres Romanos Maiúsculos

$AP_{ON(t,i)}$	Matriz ligado do aparelho i para cada intervalo de tempo t
$AP_{OFF(t,i)}$	Matriz desligado do aparelho i para cada intervalo de tempo t
$E_{(i)}^{max}$	Consumo máximo de energia elétrica para cada aparelho i
$E_{(i)}^{min}$	Consumo mínimo de energia para cada aparelho i
$F_{(i)}$	Fator de ajuste da potência ativa para cada aparelho i
G	Valor que se refere ao maior peso alocado do conjunto de aparelhos I
$L_{(i,k)}$	Quantidade de vezes que cada aparelho i ficou no estado de operação k para cada intervalo de tempo t
$P_{c(t)}^f$	Potência Ativa calculada a cada intervalo de tempo t
$P_{(i)}^{ONmax}$	Potência máxima de ligado aparelho i
$P_{(i)}^{ONmin}$	Potência mínima de ligado aparelho i
$P_{(i)}^{OFFmax}$	Potência máxima de desligado aparelho i
$P_{(i)}^{OFFmin}$	Potência mínima de desligado aparelho i
$P_{(i,k)}$	Potências ativas nominais de cada aparelho i, para cada estado de operação k
$P_{m(t)}^f$	Potência Ativa medida a cada intervalo de tempo t
$P_{\frac{T}{n}}^{med_ar}$	Valor de comparação com respeito a quantidade de tempo total T dividido entre o tamanho da janela n.
$W_{(t,i,k)}$	Peso alocado a cada intervalo de tempo t e cada aparelho i, no estado de operação k

Caracteres Romanos Minúsculos

$mm(\delta_{(n)})$	Média móvel da variável de folga com janela de tamanho n
--------------------	--

Caracteres Gregos Maiúsculos

$\beta_{(t)}$	Perdas elétricas da rede a cada intervalo de tempo t
$\theta_{(t,i,k)}$	Variável binária indicativa à ligação de cada aparelho i, no estado de operação k, para cada intervalo de tempo t
$\theta_{(t-1,i,k)}$	Variável binária indicativa à ligação de cada aparelho i, no estado de operação k, para cada intervalo de tempo (t-1)

Caracteres Gregos Minúsculos

$\delta_{(t)}$	Variável de folga com a finalidade de fechar a potência ativa calculada a medida a cada intervalo de tempo t
λ_{δ}	Penalização da variável de folga
$\lambda_{(i)}$	Vetor que contém as penalizações das variações para cada aparelho i
λ_p	Penalização da diferença entre a potência ativa calculada e a medida
$\Omega^{k_{ON}}$	Conjunto de estados de operação indicativos aos estados de ligado do aparelho

Sobrescritos

k_{ON}	Estado de operação ligado
f	Fase
max	Valor máximo
min	Valor mínimo
ON	Ligado
OFF	Desligado

Subscritos

c	Valor calculado
δ	Folga
i	Aparelho
k	Estado de operação
m	Valor medido
n	Janela da média móvel
p	Potência ativa
t	Intervalo de tempo
T	Tempo total

Abreviaturas, Siglas e Símbolos

<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>AP</i>	Audiência Pública
<i>BESS</i>	Sistema de Bateria de Armazenamento de Energia
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>GD</i>	Geração distribuída
<i>kWh</i>	Quilowatt-hora
<i>MAPE</i>	Erro Médio Absoluto Percentual
<i>PROCEL</i>	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
<i>PV</i>	Foto Voltaico
<i>SG</i>	Rede Inteligente
<i>SM</i>	Medidor Inteligente
<i>TC</i>	Transformador de Corrente
<i>TI</i>	Tecnologia da Informação

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes” – **Issac Newton**

1 Introdução

Atualmente a demanda por eficiência energética vem crescendo significativamente no mundo todo. No Brasil, tem-se estimulado o uso de novas tecnologias com a finalidade de direcionar os hábitos de consumo dos usuários para um melhor aproveitamento da energia e da rede elétrica, ou seja, criando programas de resposta da demanda. Desta forma, as novas tecnologias podem contribuir para evitar crises como a ocorrida em 2001, na qual a população brasileira foi obrigada a mudar drasticamente, de forma indesejada, os hábitos de consumo.

Desde a crise de 2001, o sistema elétrico brasileiro vem sendo modificado com o objetivo de aumentar sua segurança e confiabilidade, em um primeiro momento aumentando a oferta de fontes termoeletricas e, em seguida, ampliando a oferta de fontes alternativas de energia, como a energia eólica e solar.

Mais recentemente, indústrias e comércios também têm explorado os avanços dos programas de eficiência energética, tal como a substituição de sistema das lâmpadas por outras mais eficientes e aquisição de novos equipamentos que cumpram com as exigências de acordo com o PBE ou Plano Brasileiro de Etiquetagem e, a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia, selo PROCEL¹ [1]. Além disto, a autoprodução com fontes renováveis, o monitoramento contínuo da demanda e da rede, mudanças no contrato de energia, entre outras medidas, já fazem parte do cotidiano de grandes consumidores de energia.

Para o segmento residencial, que atualmente representa 23% do consumo total de energia elétrica no Brasil [2], sempre houve maior dificuldade para estabelecer programas de gerenciamento pelo lado da demanda, seja pelo alto custo para o monitoramento de energia ou pela instalação de fontes de energia para autoprodução, além da falta de opção de diferentes modalidades contratuais de

¹ O Selo Procel tem como objetivo identificar os produtos que apresentem os melhores níveis de eficiência energética

tarifas oferecidas pelas distribuidoras. Entretanto, nos últimos anos, houve uma expansão da geração distribuída (GD) [3] para consumidores residenciais. Assim, gerou-se um incentivo para tornar as redes elétricas e consumidores residenciais mais eficientes. Associado a isto, nos últimos anos a inclusão das redes inteligentes (*Smart Grids*) e, micro redes (*Microgrids*) que, em conjunto com a arquitetura dos sistemas de tecnologia da informação (TI), permitem alcançar um maior controle dos recursos associados a este tipo de rede para a classe residencial. Fazem parte dessa arquitetura múltiplos dispositivos de medição, comunicação, equipamentos de acionamento e controle, entre outros [4].

A implantação das bandeiras tarifárias além de oferecer informação dos custos de geração que tem que ser repassados aos consumidores finais, impulsionaram o gerenciamento pelo lado da demanda, com o objetivo de reduzir consumos exagerados. Finalmente, com a inclusão da nova tarifa branca, proveram-se ainda mais recursos para esta classe de consumo. Adicionalmente, com o aumento da oferta de fontes renováveis, a redução dos custos de monitoramento e mudanças nas regras tarifárias para o consumidor residencial aumentaram significativamente as possibilidades de este consumidor otimizar os custos de energia com a menor perda de conforto possível [5]. Este trabalho está focado na utilização de medidores inteligentes e na utilização das novas regras tarifárias para aumentar a eficiência do sistema e reduzir custos para o consumidor residencial final.

Conhecer a quantidade de energia elétrica consumida por um ou por um grupo de consumidores foi uma necessidade criada pela evolução das redes elétricas desta forma, fornecer a quantidade necessária de geração e atender devidamente o consumo. Os primeiros dispositivos (baseados em lâmpadas) que conseguiram fornecer essa informação, mediam somente o tempo que as lâmpadas ficavam acesas para mostrar o consumo de energia, pois a tensão e a corrente nessas lâmpadas eram constantes, e todas eram ligadas por apenas uma chave. Na época, final do século XIX, criou-se a unidade lâmpada-hora [6] para fazer esta medição, assim, os medidores de energia evoluíram e foram se adaptando às novas características das redes elétricas até chegar aos medidores eletromecânicos. A evolução destes medidores foi determinada pela necessidade de se conhecer com maior detalhamento o consumo de energia elétrica, transmitir e armazenar as

medições e, para isso, medidores mais complexos, com tecnologia digital surgiram recentemente. Os *smart meter* (SM), ou medidores inteligentes, são dispositivos eletrônicos com a capacidade de medição, processamento e transmissão dos dados obtidos diretamente da rede elétrica.

Do ponto de vista das regras tarifárias, em dezembro de 2010 mediante a audiência pública (AP) nº120 [7], a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apresentou a tarifa branca, uma nova opção que dá ao consumidor a possibilidade de gerenciar seu consumo de energia elétrica e dividi-lo de forma mais eficiente ao longo do dia. Os clientes que são atendidos em baixa tensão (127, 220, 380 ou 440 Volts) denominados usuários do grupo B, por exemplo, que são compostos por residências e pequenos comércios, poderão ter a opção de contratar essa tarifa. A nova opção tarifária estabelece os horários, fora de ponta, intermediário e ponta, com diferentes tarifas para cada um deles. O usuário poderá escolher de acordo com as suas necessidades se aderir ou não a nova tarifa branca é opcional. Assim, o usuário que optar pela tarifa branca conforme a Resolução normativa nº 733/2016 [8], de acordo com as seguintes regras:

- A partir de primeiro de janeiro de 2018, para novas ligações e para unidades consumidoras com média anual de consumo mensal superior a 500 kWh;
- Depois de primeiro de janeiro de 2019, para unidades consumidoras com média anual de consumo mensal superior a 250 kWh;
- Depois de primeiro de janeiro de 2020, para todas as unidades consumidoras.

É importante que o consumidor, antes de optar pela tarifa branca, conheça a composição do seu perfil de consumo. Quanto mais detalhes tiver o usuário do seu consumo, mais possibilidade de deslocá-lo para o período fora de ponta e, maiores serão os benefícios desta modalidade. Entretanto, a tarifa branca não é recomendada se o usuário que optar por aderir esta tarifa apresenta altos consumos de energia nos períodos de ponta ou intermediário e, estes consumos não consigam ser deslocados para o período fora de ponta. Nessas situações, o valor da fatura pode, inclusive, ser maior que na tarifa convencional.

Para o segmento residencial existia apenas uma opção tarifária, a tarifa convencional, que tem um valor único (em R\$/kWh) cobrado pela energia consumida e é igual em todos os dias e para todas as horas. A nova modalidade denominada de tarifa branca cria condições que incentivam os consumidores que optarem por aderir à nova tarifa, a deslocar o consumo do período de ponta e/ou do período intermediário para períodos em que a rede de distribuição de energia elétrica tem capacidade ociosa. Este benefício reduz a necessidade de reforçar a rede elétrica [9], aumentando a eficiência da mesma. Assim, se o consumidor conhecer o seu consumo de energia em um nível de detalhes que o permita analisar sua disponibilidade para deslocar parte do consumo do horário ponta e/ou intermediário para o fora da ponta, ele poderá se beneficiar desta modalidade.

Este trabalho propõe que mediante a utilização de um medidor inteligente conseguir as medições do consumo de energia elétrica de uma residência, em intervalos de um minuto. Desta forma alocar consumos de energia individuais nos diferentes eletrodomésticos utilizados nessa residência com a finalidade de definir a melhor estratégia de deslocamento de carga para o consumidor, centrando a análise na quantidade de energia elétrica consumida nos horários de ponta e intermediário. Assim, o consumidor poderá considerar a possibilidade de migrar para o contrato que utiliza a tarifa branca. Para isto, será utilizado um modelo de otimização linear inteiro misto que busca minimizar a diferença entre a energia total consumida e a soma da energia desagregada entre os diferentes eletrodomésticos na residência.

Apesar de ser um modelo aparentemente simples, que poderia ser proposto baseando-se apenas nos hábitos de consumo do consumidor, deve-se levar em consideração que vários eletrodomésticos, como ar condicionado, geladeira, freezer, depois de ligados, podem ter vários estágios de consumo, o que dificultaria a análise do consumidor.

Para entender a metodologia usada no trabalho proposto, foram consideradas três etapas para o desenvolvimento do mesmo. A primeira etapa consiste em um pré-processamento de dados, que permite que o usuário forneça algumas informações de seus hábitos de consumo de energia elétrica ao longo do dia. Além disto, podem-se atribuir características de consumo de energia elétrica para eletrodomésticos como geladeira e/ou freezer que, como já mencionado possuem

vários estados de operação, ou a identificação de equipamentos que demandam um alto consumo de energia como, o boiler. A segunda etapa consiste na aplicação do modelo de otimização para desagregação dos eletrodomésticos e, em seguida, a última etapa, permite alocar a energia a eletrodomésticos com infinitos estados de operação, tais como alguns tipos de condicionares de ar ou máquinas de lavar com tecnologia *inverter*.

Para atender aos objetivos propostos, esta dissertação está organizada da seguinte forma: além do primeiro capítulo, em que está apresentada a motivação do trabalho e a revisão bibliográfica; no segundo capítulo encontra-se o método de otimização proposto para o problema da desagregação de energia elétrica para cada um dos diferentes equipamentos encontrados em uma determinada residência; no terceiro capítulo está apresentada a abordagem feita para a preparação dos dados de entrada, que é necessária para o modelo de otimização proposto; no quarto capítulo estão apresentados os resultados referentes ao horário de ponta, obtidos pelo modelo de otimização, bem como as métricas de avaliação utilizadas para validar o modelo proposto; no quinto capítulo tem-se as considerações finais e a conclusão do trabalho, além das propostas para os trabalhos futuros; no sexto capítulo encontram-se todas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação; com o propósito de apresentar uma análise mais abrangente, alguns resultados que foram considerados relevantes no desenvolvimento do trabalho encontram-se no Anexo I; no final deste documento, encontra-se o Anexo II, no qual são apresentadas as medidas do consumo real para alguns aparelhos.

1.1 Revisão Bibliográfica

Nesta subseção será apresentada a contextualização na classe residencial para diferentes aspectos, tais como: medição de energia elétrica, autoprodução, tarifas e uma revisão do estado da arte para os diferentes modelos de desagregação vistos na literatura atual. Parte destes elementos serão considerados no trabalho proposto para desagregação do consumo de energia.

A utilização de medição para monitoramento do consumo de energia elétrica é parte importante na composição de uma rede elétrica e, em função disto,

em [10] o autor realça a necessidade do uso dos medidores inteligentes como ponto de partida para a implantação das redes inteligentes, começando pela substituição dos medidores eletromecânicos.

Em [11] propõe-se utilizar medidores eletrônicos para fornecer uma grande massa de dados que poderá ser alocada nos centros de controle das concessionárias, permitindo um melhor planejamento e controle de toda a rede. Além disso, a referência destaca que, com o uso desses medidores, vários serviços poderão ser ofertados ao consumidor além de auxiliar no controle remoto das cargas, tanto pelo usuário, quanto pela concessionária. Adicionalmente, pode-se conhecer dados como o consumo em tempo real, equipamentos que mais consomem energia elétrica, valor a pagar até o momento, além da projeção de fatura no final do ciclo, que são alguns exemplos de interação entre usuário e medidor. Mediante a tecnologia oferecida com este tipo de medidor, antes mesmo de chegar à sua casa, o consumidor poderá programar o uso de qualquer equipamento conectado à sua rede elétrica.

Com relação a desagregação de energia elétrica entre os diferentes eletrodomésticos, o problema pode ser abordado de duas formas: a primeira mediante um método intrusivo de medição de consumo de energia elétrica e, na segunda, por meio de um método não intrusivo.

O método intrusivo consiste em que cada equipamento ligado na rede deve possuir instalado um medidor de energia. Cada uma das medições deverá ser conduzida até um sistema de monitoramento central onde será efetuada a classificação do consumo de cada um deles. Não é necessário nenhum tipo de *software* para a classificação dos equipamentos, porém, tem-se custos maiores na utilização do *hardware* devido a medição individual e na comunicação até o monitoramento central.

No método não intrusivo, também conhecido como *non-intrusive load monitoring* (NILM) somente é medida a energia elétrica consumida na entrada da rede elétrica, ou seja, é medida a energia consumida pelo conjunto total de aparelhos. Neste método, se comparado com o método intrusivo, tem-se uma utilização menor do *hardware*, entretanto, há um aumento do uso computacional

devido à dificuldade de segregar cada aparelho. Assim um algoritmo robusto deve ser utilizado.

Conceitos considerados fundamentais no problema da desagregação de energia foram introduzidos por George W. Hart [12]. Em seu trabalho podem ser conhecidos com mais detalhes o reconhecimento de aparelhos utilizando as duas formas anteriormente citadas. Neste caso, o autor propõe fazer a medição de potência ativa e reativa de acordo com o método não intrusivo. Assim, de acordo com as variações apresentadas no consumo de potência ativa e reativa, e comparando com os dados de placa de cada equipamento, pode-se inferir sobre os aparelhos que estão ligados na rede. Uma desvantagem deste modelo é o fato de que aparelhos com mesma potência podem gerar erro no reconhecimento, portanto não devem ser escolhidos como alvos para essa abordagem. Também não devem ser eleitos pequenos eletrodomésticos, aparelhos continuamente variáveis, além de eletrodomésticos que estão sempre ligados na rede elétrica, mediante o trabalho proposto nesta dissertação, procura-se incorporar os comportamentos apresentados por este tipo de aparelhos.

Em [13] foi usado o NILM e incorporando o uso da mesma técnica usada no trabalho anterior, mediante a detecção do consumo de potência ativa e reativa complementando-se com informações da localização dos ocupantes da residência. Esta informação consegue reduzir o número potencial de equipamentos a serem usados na desagregação. A localização pode ser fornecida por exemplo mediante *smartphones* de uma forma fácil e de baixo custo, reduzindo, assim, o custo computacional que normalmente é demandado por este tipo de algoritmos.

Em [14] é efetuado o monitoramento de toda a carga em curtos intervalos de tempo. Mediante a utilização do *steady-state signature* ou “método de detecção de estado estável”, no qual é feita a medida das mudanças nas potências ativa e reativa, e o sinal ON/OFF (ligado ou desligado) com as identificações dos respectivos tempos, o reconhecimento e armazenamento das variações podem ser feitos de duas formas: na primeira é utilizado o ajuste manual, ou seja, consiste na medição do consumo do aparelho simulando os estados de ON/OFF (ligado ou desligado) manualmente, depois armazenando as variações encontradas com a identificação de tempo; na segunda forma utiliza-se o ajuste automático, no qual o equipamento simula os mesmos estados ON/OFF (ligado ou desligado) e os

armazena igualmente como foi feito no modo manual, para fazer o treinamento do *pattern recognition algorithm* ou “algoritmo de reconhecimento de padrões”, e dessa forma identificar os aparelhos.

Em [15] propõe-se um método baseado no *Rule-based Profile Recognition Algorithm* (RPRA), ou “Algoritmo de reconhecimento de perfil baseado em regras”, que faz a desagregação dos equipamentos que compõem a rede mediante a detecção de vários potenciais eventos de ON/OFF (ligado ou desligado) dos aparelhos. Sendo necessário o uso de um conjunto de regras que atribuem uma pontuação a cada ocorrência desses eventos. De acordo com as pontuações decide-se quais eventos podem ser usados no mapeamento final de cada equipamento. Desta forma foi proposto o modelo Desagregação de Consumos Residenciais de Eletricidade (DCRE) o qual demonstrou ter uma capacidade aceitável de extrair informação de qualidade do sinal global de consumos de uma residência. Entretanto, o DCRE apresentou problemas de identificação dos equipamentos nos horários do dia em que eram desempenhadas a maioria das tarefas domésticas, isto devido ao alto grau de perturbações detectado na rede elétrica nesse horário de funcionamento.

Em [16] são abordadas as diferentes tecnologias atuais, utilizadas para identificação de equipamentos. Uma das abordagens é o $\Delta P - \Delta Q$ Plane, ou “espaço bidimensional de potência ativa e reativa totais” que propõe o acréscimo de um terceiro plano, o terceiro harmônico da corrente, deixando a identificação em um espaço tridimensional. Atualmente, uma grande quantidade de equipamentos geram harmônicos, devido a presença de dispositivos como bobinas eletrônicas, inversores de corrente alternada e controle de velocidade para motores. Neste trabalho complementa-se a análise mediante o espectro no domínio de frequência da corrente do terceiro harmônico, usando a *Fast Fourier Transform* (FFT) ou “transformada rápida de Fourier”, desta forma identificam-se cada um dos equipamentos que fazem parte da rede.

O trabalho exposto em [17] encontra-se baseado no mesmo princípio de identificação das potências elétricas e do terceiro harmônico da corrente usado em [16] incorporando, na classificação desses harmônicos, o uso de *neural-network* (NN) ou “rede neural”. O treinamento das NNs é necessário para a correta identificação, e é feito com base nos trabalhos [18], [19], [20], [21] e [22]. De

acordo com as medições feitas pelo NILM e utilizando a informação provida pelas NNs, a identificação dos equipamentos é apresentada com destaque para os aparelhos que apresentam consumos de energia elétrica altamente não lineares. Como desvantagem, o método não considera equipamentos com múltiplos estados de operação.

Com relação ao uso de diferentes modelos tarifários, em [23] apresenta-se o panorama no Brasil referente à criação de uma legislação do setor elétrico tendo como base a instalação de telhados solares no país e, também, o estudo da paridade tarifária entre a geração pelos métodos convencionais e a geração fotovoltaica. A legislação apresentada neste trabalho para o setor elétrico alemã, encontra-se baseada no mecanismo de sistema de preços *Feed-in Law* (FIL), mecanismo que foi criado em 1991 na Alemanha, com o objetivo de garantir a inclusão das fontes renováveis na rede elétrica convencional. Este mecanismo obriga as concessionárias alemãs que operam na rede pública a pactuar preços acessíveis para a energia provida pelas fontes renováveis, os chamados *Feed-in tariffs* (FIT) [24]. Além disto, é também analisada a matriz energética brasileira e os efeitos da inserção da geração distribuída (GD).

A partir do problema da desagregação de energia elétrica, nesta dissertação propõe-se o uso da técnica NILM no consumo de energia de um usuário residencial e, mediante um modelo de otimização linear inteiro misto, usando como referência [25], desagregar o consumo de energia elétrica total, por cada um dos equipamentos que a compõem. Este trabalho não só planeja auxiliar na tomada de decisão quanto ao uso dos equipamentos da rede elétrica residencial, mas também aborda o impacto nos usuários ao aderir à tarifa branca. Também são discutidos quais equipamentos poderão deslocar o seu consumo de energia elétrica para outro horário de funcionamento de forma a proporcionar, assim, um melhor aproveitamento da tarifa branca, uma vez que, quanto mais consumo de energia elétrica for transferido do horário intermediário e/ou ponta para o horário fora da ponta, maiores serão os benefícios obtidos com esta modalidade tarifária. Além disto, cria-se uma base fundamental para analisar o impacto de sistemas fotovoltaicos nas redes elétricas residenciais.

2 Metodologia Proposta

Neste capítulo, é descrito o modelo usado para desagregar a energia elétrica consumida por cada um dos aparelhos que compõem uma rede elétrica residencial, considerando que a desagregação é feita considerando individualmente cada uma das fases da rede. Além disto, será apresentado o processo de medição utilizado como entrada para o modelo de desagregação proposto. Na sequência, será apresentado o modelo de otimização, acrescido de um modelo de pré e pós-processamento, para alcançar melhores resultados, considerando alguns valores esperados a partir de medições feitas diretamente nos eletrodomésticos. Finalmente, serão apresentados alguns critérios de avaliação com o propósito de conhecer a acurácia da desagregação proposta para alguns eletrodomésticos.

2.1 Medição

2.1.1 Medição de energia elétrica da rede residencial

Para o estudo proposto foi utilizado um multimedidor e analisador de energia elétrica trifásico TRUE RMS [26] “Medidor DMI Mini TCR MC – Trifásico”, como apresentado na Figura 2-1, desenvolvido e fabricado pela ISSO Telecom LTDA. Este medidor possui erro de medição de $\pm 5\%$, necessitando do uso de transformadores de corrente (TCs) para reduzir o nível de corrente. Neste caso, os TCs são de 100/50mA tipo garra como apresentado na Figura 2-2, com erro de medição de $\pm 3\%$ [27]. Assim, o erro de medição do conjunto pode chegar a $\pm 8\%$, para cada fase, o medidor utilizado neste trabalho pode apresentar este nível de erro mas, existem outros dispositivos no mercado que podem entregar medições com menor erro.



Figura 2-1 – Medidor utilizado neste trabalho [26]



Figura 2-2 – TC tipo garra de 100/50mA [27]

O medidor armazena cada uma das grandezas elétricas (potência elétrica ativa, reativa e aparente, corrente, tensão e fator de potência) em intervalos de um minuto, as grandezas medidas são transmitidas em tempo real, e podem ser observadas e transmitidas via internet. Para ilustrar, a Figura 2-3 apresenta a tela disponibilizada pelo equipamento referente às medições. Neste trabalho, só será usada a potência ativa, usando o mesmo intervalo de captura das medidas do equipamento de um minuto. Optou-se por considerar este intervalo de tempo na desagregação, para capturar o comportamento dos aparelhos que funcionam em intervalos curtos de tempo. Esse comportamento é evidenciado na geladeira que, às vezes, apresenta consumos de energia elétrica, em ciclos de cinco minutos, ou no conjunto de *modem* e carregadores sem fio, já que este possui três estados de operação, variando sem uma frequência de uso pré-definida.

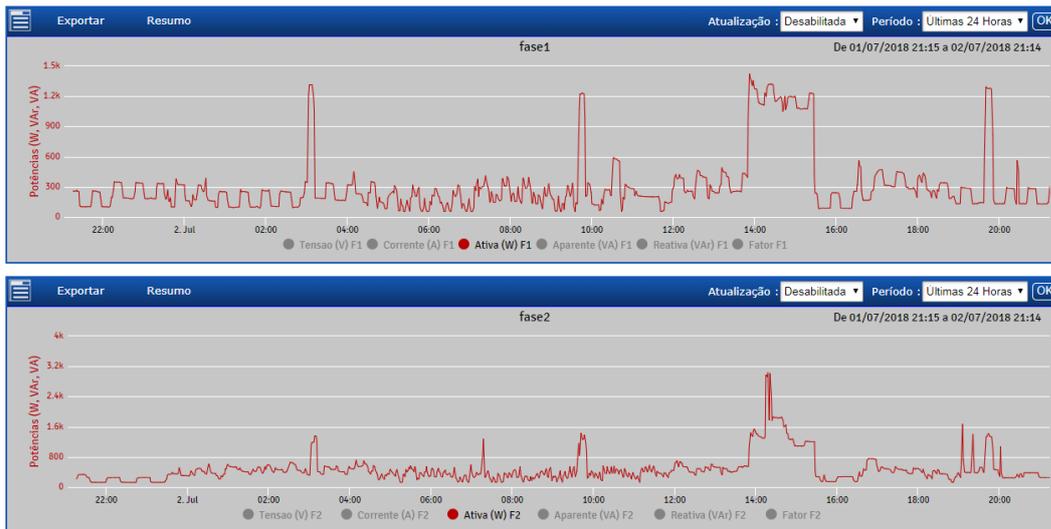


Figura 2-3 – Tela das medições fornecidas pelo DMI

2.1.2 Medição de energia elétrica por aparelho

Foi feita uma medição de energia elétrica, individualmente, somente nos aparelhos que permitem o uso de um medidor como o apresentado na Figura 2-4. Este medidor registra grandezas elétricas como: potência ativa, corrente, tensão, fator de potência e energia elétrica ativa em determinado intervalo de tempo, com um erro de medição de $\pm 3\%$ [28]. A potência/energia ativa foi usada para comparar os valores fornecidos pelos dados de placa do aparelho, bem como a energia elétrica consumida em um determinado intervalo de tempo. Neste caso, esta informação pode ser incorporada como restrição no modelo ou como comparação dos resultados finais obtidos pelo modelo.



Figura 2-4 – Medidor de Energia Elétrica de Multi-função [28]

2.2 Estimação do Modelo de Otimização

Nesta subseção é apresentada a proposta da metodologia inicial feita para o modelo de desagregação, além da proposta final, que considera tratar os dados antes e/ou depois de aplicar o modelo proposto. Para representar a ideia do modelo matemático, foi apresentado na Figura 2-5 um fluxograma que contém o resumo do desenvolvimento inicial do mesmo.

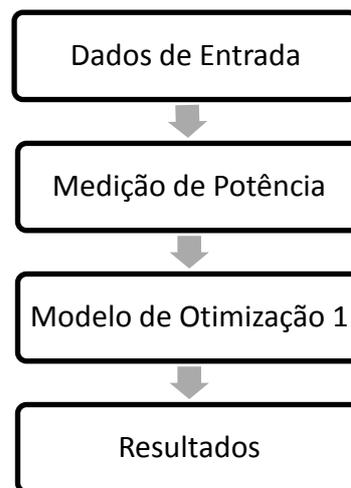


Figura 2-5 – Fluxograma do modelo básico.

Os dados de entrada do modelo proposto consideram a potência ativa e tensão nominal dos eletrodomésticos. Caso o consumidor conheça o padrão de funcionamento do eletrodoméstico, poderá fornecer esta informação utilizando a Tabela 1. Os dados contidos nesta tabela são meramente para exemplificar o uso da mesma. A interpretação da tabela pelo modelo é feita da seguinte forma:

- Se o número correspondente ao intervalo de tempo e aparelho for igual a zero (0), este aparelho encontra-se disponível, desta forma o modelo de otimização poderá acionar ou não o aparelho;
- Se o número correspondente ao intervalo de tempo e aparelho for igual a um (1), o aparelho será tratado pelo modelo como se estivesse ligado. Desta forma, este dado é utilizado como restrição.

Adicionalmente, pode ser incorporada diretamente ao modelo, o consumo de energia mensal, informação que alguns aparelhos indicam nos dados de placa,

ou pode ser tomado do eletrodoméstico pela medição individual, apresentado em detalhe na subseção 3.2.1.

Tabela 1 – Modelo dos horários de funcionamento dos aparelhos fornecido pelo usuário

Tempo	Aparelhos						
	Aparelho 1	Aparelho 2	Aparelho 3	...	Aparelho n-2	Aparelho n-1	Aparelho n
hh:mm	0	0	0	...	0	0	0
hh:mm	0	0	0	...	0	0	0
hh:mm	0	0	0	...	0	0	0
hh:mm	0	0	0	...	0	0	0
hh:mm	0	1	0	...	0	0	0
hh:mm	0	1	0	...	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
hh:mm	0	1	0	...	0	1	0
hh:mm	0	1	0	...	0	1	0
hh:mm	0	0	0	...	0	0	0
hh:mm	0	0	0	...	0	0	0
hh:mm	0	0	0	...	0	0	0

Inicialmente, a ideia de aplicar o modelo proposto buscava desagregar a energia ao longo das 24 horas do dia mas, em função do número de combinações necessárias e da grande quantidade de soluções, o intervalo de tempo foi reduzido. Assim, optou-se por aplicar o modelo a cada 3 (três) horas, alinhando o período com a duração do horário de ponta para a tarifa branca, [9]. Além disto, o período intermediário de 1 (uma) hora, também previsto na tarifa branca, encontra-se observado pelo modelo proposto.

O modelo básico para desagregação de potência elétrica por cada eletrodoméstico pode ser descrito como se segue:

$$\min_{\theta_{(t,i,k)}, \beta_{(t)}} \left\{ \lambda_p \sum_{t \in T} |P_{c(t)}^f - P_{m(t)}^f| \right\} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$P_{c(t)}^f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} + \beta_{(t)} \quad \forall t \in T \quad (2.2)$$

$$\sum_{k \in K} \theta_{(t,i,k)} = 1 \quad \forall t \in T, i \in I \quad (2.3)$$

$$\theta_{(t,i,k)} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in I, k \in K \quad (2.4)$$

$$1.5\% P_{m(t)}^f \leq \beta_{(t)} \leq 2.5\% P_{m(t)}^f \quad \forall t \in T \quad (2.5)$$

Sendo:

$P_{c(t)}^f$ – Potência ativa calculada a cada intervalo de tempo t .

$P_{m(t)}^f$ – Potência ativa medida a cada intervalo de tempo t .

$\theta_{(t,i,k)}$ – Variável binária indicativa do modo de ligado/desligado de cada aparelho i , no estado de operação k , para cada intervalo de tempo t .

$P_{(i,k)}$ – Potências ativas nominais de cada aparelho i , para cada estado de operação k .

$F_{(i)}$ – Fator de ajuste da potência ativa para cada aparelho i .

$\beta_{(t)}$ – Perdas elétricas da rede a cada intervalo de tempo t .

λ_p – Penalização da diferença entre a potência calculada e a medida.

A expressão (2.1) $\lambda_p \sum_{t \in T} |P_{c(t)}^f - P_{m(t)}^f|$ corresponde à função objetivo do modelo básico proposto, que minimiza o módulo da diferença entre a potência ativa calculada e a potência ativa medida na fase selecionada ao longo do intervalo de tempo t , sendo penalizada por λ_p .

A restrição (2.2) representa a potência ativa calculada $P_{c(t)}^f$ a cada intervalo de tempo t , levando em consideração a potência de cada aparelho i multiplicado pelo fator de ajuste $F_{(i)}$ para cada aparelho i . Este fator foi adicionado para minimizar diversos fatores que influenciam no consumo de cada aparelho, os

quais foram observados nas medições feitas. São exemplos, as condições ambientais, tais como, se se encontra localizado dentro ou fora da residência, a temperatura ambiente do local, entre outros, além da vida útil do mesmo. Assim, o fator de ajuste pode variar entre (0,97 – 0,99).

A restrição (2.3) garante que cada aparelho i só pode usar um estado de operação k para cada intervalo de tempo t .

A restrição (2.4) determina que a variável de decisão indicativa ao estado de operação k do aparelho i para cada intervalo de tempo t é binária.

Na restrição (2.5) encontram-se os limites das perdas elétricas, os quais estão entre 1.5% e 2.5%. Estes limites usados para as perdas elétricas foram fixados de acordo com a literatura das perdas para consumidores residenciais de acordo com a estimação das mesmas no trabalho apresentado em [29] e, que indica o valor normal que pode apresentar, assim criou-se este intervalo.

Para avaliar a solução do problema descrito pela expressão (2.1), devem-se considerar todos os possíveis estados que cada um dos aparelhos pode apresentar. Conforme indicado em [12], o problema da desagregação refere-se a um problema NP-completo, em que a solução requer grande esforço computacional. Isto se deve ao fato de que n aparelhos com s estados de operação resultam em s^n combinações, o que pode acabar em um problema computacionalmente intratável para um grande número de eletrodomésticos e/ou estados de operação [30]. Entretanto, quando n é suficientemente pequeno, e cada aparelho possui poucos estados de operação, o número de combinações reduz drasticamente. No caso de estudo deste trabalho, a quantidade de eletrodomésticos não é grande o suficiente para provocar estes problemas. Entretanto, alguns aparelhos contêm múltiplos estados de operação e, por meio do uso do modelo básico proposto (modelo de otimização 1 (um)), para alguns intervalos do dia, a solução obtida pode resultar muito diferente da solução esperada, isto baseado nas observações feitas em alguns dos equipamentos.

Para enfrentar este desafio, na Figura 2-6 é apresentado o fluxograma que representa a ideia da segunda abordagem proposta adicionando as modificações com respeito ao modelo de otimização 1 (um) (sinalizadas em vermelho). Para este caso, o modelo será tratado como modelo de otimização 2.

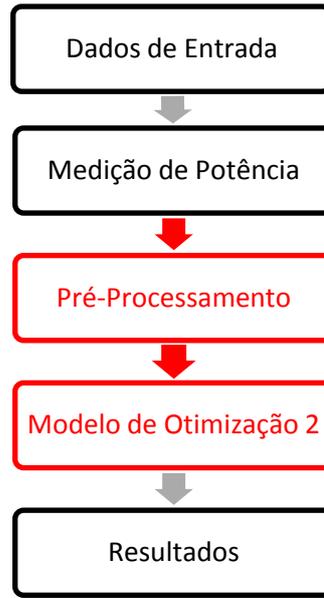


Figura 2-6 – Fluxograma da metodologia inicial adicionando o pré-processamento

O modelo de otimização, correspondente com a Figura 2-6, pode ser descrito da seguinte forma:

$$\min_{\theta_{(t,i,k)}, \beta_{(t)}} \left\{ \lambda_P \sum_{t \in T} |P_{c(t)}^f - P_{m(t)}^f| + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} W_{(t,i,k)} \theta_{(t,i,k)} + \sum_{t=2}^T \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \lambda_{(i)} |\theta_{(t,i,k)} + \theta_{(t-1,i,k)}| \right\} \quad (2.6)$$

Sujeito a:

$$P_{c(t)}^f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} + \beta_{(t)} \quad \forall t \in T \quad (2.7)$$

$$\sum_{k \in \Omega^{k_{ON}}} \theta_{(t,i,k)} \geq AP_{ON(t,i)} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (2.8)$$

$$\sum_{k \in K} \theta_{(t,i,k)} = 1 \quad \forall t \in T, i \in T \quad (2.9)$$

$$\theta_{(t,i,k)} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in I, k \in K \quad (2.10)$$

$$\theta_{(t,i,1)} \geq AP_{OFF(t,i)} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (2.11)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} \geq E_{(i)}^{min} \quad \forall i \in I \quad (2.12)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} \leq E_{(i)}^{max} \quad \forall i \in I \quad (2.13)$$

$$1.5\% P_{m(t)}^f \leq \beta_{(t)} \leq 2.5\% P_{m(t)}^f \quad \forall t \in T \quad (2.14)$$

Sendo:

$W_{(t,i,k)}$ – Peso alocado par cada aparelho i , no estado de operação k , a cada intervalo de tempo t .

$\theta_{(t-1,i,k)}$ – Variável binária indicativa à ligação de cada aparelho i , no estado de operação k , para cada intervalo de tempo $(t - 1)$.

$AP_{ON(t,i)}$ – Matriz ligado ON indicativa ao estado ligado/desligado de cada aparelho i para cada intervalo de tempo t .

$\Omega^{k_{ON}}$ – Conjunto de estados de operação indicativos ao estado de ligado do aparelho.

$AP_{OFF(t,i)}$ – Matriz desligado OFF indicativa à não ligação de cada aparelho i para cada intervalo de tempo t .

λ_p – Penalização da diferença entre a potência calculada e a medida.

$\lambda_{(i)}$ – Penalização das variações para cada aparelho i .

$E_{(i)}^{min}$ – Consumo mínimo de energia para cada aparelho i .

$E_{(i)}^{max}$ – Consumo máximo de energia elétrica para cada aparelho i .

A expressão (2.6) corresponde à função objetivo do modelo de otimização 1 (um), acrescida de dados fornecidos pelo pré-processamento, como são os pesos alocados para cada tempo t , para cada um dos aparelhos i no estado de operação k indicados mediante o segundo termo da função objetivo

$(\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} W_{(t,i,k)} \theta_{(t,i,k)})$ (ver em detalhes na subseção 3.2.3). Com os resultados obtidos pelo modelo de otimização 1, verificou-se que, tal como foi abordado em [25], eletrodomésticos com potências similares provocam erros na desagregação proposta, além disto, observou-se que alguns aparelhos ligavam e desligavam em cada variação do intervalo de tempo t . Então, para reduzir o efeito indesejado de liga e desliga, propõe-se adicionar uma penalização na variação de estado, a qual se encontra no terceiro termo da função objetivo $(\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \lambda_{(i)} |\theta_{(t,i,k)} + \theta_{(t-1,i,k)}|)$, e pode ser visto em detalhes na subseção 3.2.5.

Assim, o problema de otimização fica mais assertivo para alguns intervalos e consegue obter resultados para outros intervalos que antes não eram possíveis de se obter com o modelo de otimização básico. Além dos pesos e da penalização da variação de estado, foram adicionadas as expressões (2.8) e (2.11), matriz ligado e matriz desligado dos aparelhos, respectivamente. Mediante a restrição (2.8), indica-se ao modelo que, de acordo com cada valor da matriz ligado dos aparelhos ($AP_{ON(t,i)}$), o aparelho i deve estar ligado no tempo t , de acordo com informações providas pelo usuário ou que foram calculados e adicionados por meio do pré-processamento dos aparelhos. Analogamente, com a restrição (2.11) indica-se ao modelo que, com base no valor da matriz desligado dos aparelhos ($AP_{OFF(t,i)}$), o aparelho i deve estar desligado no tempo t , de acordo com a informação calculada por meio do pré-processamento. A inclusão destas restrições pode ser vista, em detalhes na subseção 3.2.

A restrição (2.12) indica o consumo mínimo de energia, adicionada de acordo com as observações e medições feitas para cada aparelho i com base em um período de análise. Da mesma forma, com a restrição (2.13) se estabelece um consumo máximo de energia. Para ambos os casos, é feita uma estimativa para o intervalo de estudo usado, neste caso de três (3) horas.

Com base na metodologia apresentada no fluxograma da Figura 2-6 e, de acordo com as modificações feitas no modelo de otimização 1, adicionando o pré-processamento, foram observadas melhoras significativas nos resultados obtidos, reduzindo por exemplo o liga e desliga apresentado pela geladeira e o minibar, isto de acordo com a observação direta dos valores da potência ativa medida na

residência. Ainda assim, observa-se que alguns aparelhos não podem ser desagregados pelo modelo proposto, como é o caso do ar-condicionado com tecnologia *inverter*, este aparelho pode ter infinitos estados, o que dificulta sua desagregação pelo modelo.

Para superar este desafio, foi considerada uma etapa adicional, denominada de pós-processamento no modelo proposto, descrita em detalhes na subseção 3.3. De forma simplificada, busca-se, a partir dos resultados obtidos do modelo de otimização, identificar se o referido eletrodoméstico esteve ou não funcionando e qual a potência assumida por ele. No fluxograma da Figura 2-7 encontra-se representada a proposta de modificação da metodologia adotada, incluindo esta etapa adicional.

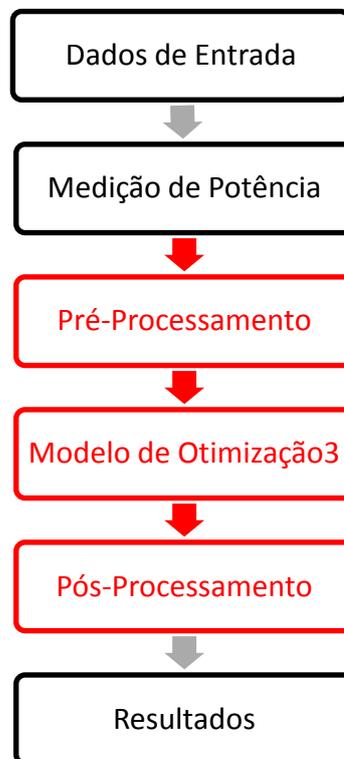


Figura 2-7 – Fluxograma da metodologia final incluindo pós-processamento

O modelo de otimização final pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\min_{\theta_{(t,i,k)}, \delta_{(t)}, \beta_{(t)}} \left\{ \begin{aligned} & \lambda_P \sum_{t \in T} |P_{c(t)}^f - P_{m(t)}^f| + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} W_{(t,i,k)} \theta_{(t,i,k)} + \\ & \sum_{t=2}^T \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \lambda_{(i)} |\theta_{(t,i,k)} + \theta_{(t-1,i,k)}| + \\ & \lambda_\delta \sum_{t \in T} \delta_{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Sujeito a:

$$P_{c(t)}^f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} + \beta_{(t)} + \delta_{(t)} \quad \forall t \in T \quad (2.16)$$

$$\sum_{k \in \Omega^{k_{ON}}} \theta_{(t,i,k)} \geq AP_{ON(t,i)} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (2.17)$$

$$\sum_{k \in K} \theta_{(t,i,k)} = 1 \quad \forall t \in T, i \in I \quad (2.18)$$

$$\theta_{(t,i,k)} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in I, k \in K \quad (2.19)$$

$$\theta_{(t,i,1)} \geq AP_{OFF(t,i)} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (2.20)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} \geq E_{(i)}^{min} \quad \forall i \in I \quad (2.21)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} \leq E_{(i)}^{max} \quad \forall i \in I \quad (2.22)$$

$$1.5\% P_{m(t)}^f \leq \beta_{(t)} \leq 2.5\% P_{m(t)}^f \quad \forall t \in T \quad (2.23)$$

$$\delta_{(t)} \in \mathbb{R} \quad \forall t \in T \quad (2.24)$$

Sendo:

$\delta_{(t)}$ – Variável de folga real, que tem a finalidade de fechar a diferença entre a potência ativa calculada e a medida para cada intervalo de tempo t .

λ_δ – Penalização da variável de folga.

Para considerar a etapa de pós-processamento, adiciona-se no modelo de otimização uma variável de folga, do tipo real, representada por $\delta_{(t)}$. Esta variável pode ser encontrada no quarto termo da função objetivo da expressão (2.15) ($\lambda_{\delta} \sum_{t \in T} \delta_{(t)}$), sendo penalizada por um lambda (λ_{δ}). Esta nova variável ($\delta_{(t)}$), tem o propósito de fechar o balanço de potência entre a potência ativa calculada e a medida. O tratamento feito nesta variável pode ser observado em detalhes na subseção 3.3.

2.3 Métricas de avaliação

Para a análise dos resultados da desagregação da potência ativa nos diferentes aparelhos do caso de estudo obtidos pelo modelo de otimização, foram calculadas três (3) diferentes métricas de avaliação. Desta forma, conhecer a acurácia do modelo de otimização nos diferentes intervalos de tempo, em que foi possível, para os aparelhos não flexíveis. As métricas usadas estão definidas como segue:

O $MAPE_i$ apresenta uma diferença porcentual entre o valores calculados e os valores esperados da potência elétrica do aparelho i ao longo do intervalo de cálculo do tempo t . Segundo os dados apresentados por esta métrica de avaliação, resultados próximos de zero (0) indicam uma boa acurácia:

$$MAPE_i = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{|y_{i(t)} - \widehat{y}_{i(t)}|}{y_{i(t)}}}{N} \times 100$$

O coeficiente R_i^2 indica o quanto a variação total dos dados é explicada pelo modelo, de acordo com a potência elétrica do aparelho i ao longo do intervalo de cálculo do tempo t , de acordo com os dados apresentados, resultados próximos do 100% indicam boa acurácia:

$$R_i^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_{i(t)} - \widehat{y}_{i(t)})^2}{\sum_{t=1}^T (y_{i(t)} - \bar{y}_{i(t)})^2}$$

em que,

$y_{i(t)}$ – é o valor do dado real;

$\widehat{y}_{i(t)}$ – é o valor do dado calculado;

N – é o número total de observações;

$\overline{\widehat{y}_{i(t)}}$ – é a média do valor do dado calculado;

3

Pré e pós-processamento dos dados de entrada

No contexto deste capítulo, descrevem-se as características apresentadas pelos dados de entrada do caso de estudo, bem como o tratamento dos mesmos e as considerações feitas mediante o pré-processamento. Além disto, também é apresentada a abordagem feita para o pós-processamento dos dados do modelo de otimização.

3.1

Dados de entrada do caso de estudo

Nesta subseção, apresentam-se os principais dados usados neste trabalho para o caso de estudo. Assim, na Tabela 2 estão apresentados os dados de placa dos eletrodomésticos de um consumidor. Tem-se que, para os aparelhos monofásicos (110V), são considerados com o valor de 1 (um) na coluna tensão e os aparelhos bifásicos (220V), têm valor de 2 (dois).

Tabela 2 – Dados de placa dos aparelhos no caso de estudo

Item	Aparelho	Tensão 1 = 1 ϕ 2 = 2 ϕ	Potência elétrica (W)
1	Geladeira	1	145
2	Boiler	2	2000
3	Iluminação sala-1-2	1	300
4	Iluminação sala-1-3	1	300
5	Iluminação sala-1-4	1	160
6	Iluminação cômodo 1-1	1	20
7	Iluminação corredor entrada	1	16
8	Iluminação de serviço-1	1	40
9	Iluminação exterior	1	24
10	Iluminação de serviço-2	1	40
11	Modem e carregadores sem fio	1	24
12	Televisão 1	1	84
13	Minibar	1	90
14	Ar condicionado	2	1060

Normalmente, os aparelhos são considerados com 2 (dois) estados de operação ($k = 2$), ligado e desligado. Entretanto, alguns deles possuem 3 (três) ou 4 (quatro) estados, como televisão, geladeira e/ou frigobar. Na Tabela 3, estão apresentados os aparelhos que, de acordo com os dados de placa, possuem 3 (três) estados de operação ($k = 3$), sendo ligado, desligado e standby. Na Tabela 4 são apresentados os aparelhos que possuem 4 (quatro) estados de operação ($k = 4$), no qual o estado ligado pode ter mais de uma potência consumida.

Tabela 3 – Aparelhos com três estados de operação ($k = 3$)

Aparelho	Estados de operação		
	Desligado	Potência 1 (W)	Potência 2 (W)
Televisão 1	0	0,5	84

Tabela 4 – Aparelhos com quatro estados de operação ($k = 4$)

Aparelho	Estados de operação			
	Desligado	Potência 1 (W)	Potência 2 (W)	Potência 3 (W)
Modem e carregadores sem fio	0	5	18	24
Minibar	0	88,2	90	91,8

Além disto, a partir das análises feitas no desenvolvimento deste trabalho, foram classificados dois tipos de eletrodomésticos: os flexíveis e os não flexíveis. Os flexíveis são aparelhos que o estado de operação depende diretamente do comando do usuário, como é o caso de lâmpadas, televisão, sanduicheira, etc. Os não flexíveis são os aparelhos em que os estados operações não dependem diretamente de comandos do usuário, como o refrigerador, máquina de lavar, ar condicionado, entre outros. Esses comportamentos são definidos por diversos fatores, entre eles a temperatura.

Assim, caso o padrão de comportamento destes aparelhos possa ser observado individualmente e incorporado no modelo mediante restrições ou penalizações na função objetivo, o mapeamento deste e de outros eletrodomésticos tende a ser mais assertivo. Para ilustrar esta ideia, na subseção 3.2.5, estão apresentados alguns comportamentos de eletrodomésticos

identificados ao longo do intervalo de tempo que possuem padrões de comportamentos quase periódicos. Estes padrões serão incorporados no modelo como restrições de energia mínima e máxima consumida e horários de funcionamento para cada um deles ao longo das 3 (três) horas de análise.

3.2 Pré-processamento dos dados de entrada

Nesta subseção será apresentado o tratamento dos dados de pré-processamento. Os quais foram incorporados no modelo de otimização por medições específicas dos aparelhos, dados de placa e hábitos de consumo mediante a utilização de restrições, penalizações e variáveis.

3.2.1 Mapeamento dos aparelhos no pré-processamento

Analisando as medições de energia elétrica deste consumidor, podem ser identificados padrões de operação de alguns equipamentos. Com a identificação dos eletrodomésticos por medição direta ou identificação, ligado ou desligado,

De acordo com a metodologia adotada neste trabalho, foi definida a necessidade de conhecer a quantidade de energia mensal que pode atingir determinado aparelho. Esta informação pode ser obtida do fabricante, mediante os dados de placa do mesmo ou através de medições feitas diretamente no aparelho, e deve ser convertido para o intervalo de 3 (três) horas.

Sabendo-se que pode haver erro na estimativa para o intervalo considerado, devem ser criados os limites mínimo ($E_{(i)}^{\min}$) e máximo ($E_{(i)}^{\max}$) de consumo de energia elétrica para o intervalo considerado, como está apresentado nas expressões (2.21) e (2.22).

3.2.2 Identificação dos aparelhos que podem estar desligados

A identificação dos aparelhos que podem estar desligados foi feita com a finalidade de melhorar o desempenho computacional usado na desagregação de

energia elétrica, mediante o reconhecimento de quais aparelhos não devem ser considerados na desagregação para cada intervalo de tempo t . Para isto, foi gerada uma matriz denominada desligado ($AP_{OFF(t,i)}$), na qual, cada elemento indica para o modelo de otimização o estado atual do aparelho i e o intervalo de tempo t . Assim, quando o elemento da matriz for igual a um (1) o aparelho deverá ser considerado desligado. No caso do elemento da matriz ser igual a zero (0), o aparelho poderá estar ou não desligado. Este status será definido pelo modelo de otimização.

Para exemplificar a aplicação da matriz $AP_{OFF(t,i)}$, considerou-se a potência ativa medida da residência no tempo $t = 1$, com valor igual a 500 W ($P_{m(1)}^f = 500 W$). Sabendo-se que a potência ativa do boiler é de 2000 W, ou seja, a potência a ser usada por cada fase é 1000 W ($P_{(2,4)} = 1000 W$), dado que para este intervalo de tempo a potência ativa do boiler é maior do que a potência ativa total medida, o boiler deve ser considerado desligado. Desta forma, considerando que o boiler é representado pelo índice 2, tem-se $AP_{OFF(1,2)} = 1$. Assim, consegue-se reduzir a quantidade de aparelhos a serem usados pelo modelo de otimização a cada intervalo de tempo t , diminuindo o esforço computacional e o tempo de execução do modelo de otimização.

3.2.3

Alocação dos pesos de uso para cada aparelho

De acordo com as informações fornecidas pelo usuário ou baseado nas medições de consumo de energia elétrica de alguns equipamentos, é possível distinguir quais aparelhos são mais usados do que outros. Deste modo, pode-se priorizar o uso de aparelhos que são usados com maior frequência e penalizar aqueles que não são usados com maior frequência. Esta metodologia foi adotada da seguinte forma: (i) primeiro, aloca-se o mesmo peso ($W_{(t,i,k)}$) para todos os aparelhos i , em todos os estados de operação k e ao longo do intervalo de tempo t ; (ii) depois aplica-se o modelo de otimização e, de posse dos resultados, atualiza-se os valores dos pesos para cada aparelho, somando-se a quantidade de vezes que cada aparelho i esteve ligado em cada estado de operação k ao longo do

intervalo de tempo t . Este valor deve ser atribuído a variável ($l_{(i,k)}$). O peso será obtido pela seguinte relação:

- Calcula-se o valor de $l_{(i,k)}$:

$$l_{(i,k)} = \sum_{t=1}^T \theta_{(t,i,k)} \quad \forall i \in I, k \in K$$

- Se o valor de $l_{(i,k)}$ for diferente de zero (0) o novo valor do peso será:

$$W_{(t,i,k)} = \frac{1}{l_{(i,k)}} \quad \forall t \in T, i \in I, k \in K$$

- Se o valor de $l_{(i,k)}$ for zero (0) o novo valor do peso será:

$$W_{(t,i,k)} = G \quad \forall t \in T, i \in I, k \in K$$

Para o caso quando $l_{(i,k)}$ seja zero (0), o valor de G corresponderá ao maior peso calculado para todos os aparelhos. Desta forma consegue-se identificar modalidades de uso nos aparelhos, priorizando aqueles que tem maior probabilidade de uso alocando-os pesos menores, ou alocando pesos significativamente grandes, para aparelhos que tendem a não serem usados. A mesma técnica dos pesos foi adotada em [25].

3.2.4 Identificação dos aparelhos bifásicos

Para a identificação de aparelhos bifásicos, além dos dados de placa, é preciso reconhecer as fases nas quais estes encontram-se ligados à rede elétrica. Posteriormente, calculam-se os incrementos de potência ativa medida para cada intervalo de tempo ($\Delta P_{m(t)}$) em cada fase já identificada. Assim, ao comparar o incremento atingido nas duas fases, pode-se inferir se o aparelho está ligado ou não. Esta informação irá alimentar a matriz AP_{ON} , colocando o valor de um (1) no elemento que corresponde a esse aparelho i , no intervalo de tempo t ($AP_{ON(t,i)} = 1$).

Para entender o reconhecimento deste tipo de aparelho, considere novamente o boiler, o qual possui potência por cada fase de 1000 W ($P_{(2,4)} = 1000 W$) e encontra-se ligado nas fases a e b . Calcula-se o incremento da

potência ativa no tempo 1 ($t = 1$) em cada uma das fases, sendo estes incrementos: na fase a ($\Delta P_{m(1)}^{Fa} = 994 W$) e na fase b ($\Delta P_{m(1)}^{Fb} = 998 W$). Com base em uma potência de comparação, para este caso de $990 W$ ($\Delta P^c_2 = 990$), se o incremento calculado para ambas as fases atinge e/ou supera este valor, considera-se o aparelho como ligado. Como neste caso os incrementos de potência ativa calculados foram maiores que a potência de comparação, considera-se o boiler ($i = 2$) como ligado, indicando-o no modelo mediante a matriz de ligado dos aparelhos ($AP_{ON(t,i)}$), colocando o valor de um (1) no elemento correspondente ($AP_{ON(1,2)} = 1$). Na Figura 3-1 pode ser observado o intervalo no qual este aparelho liga, entre 22:37 e 22:55 (sinalizado em verde), intervalo no qual a potência medida nas duas fases superaram o valor da potência de comparação. Este comportamento foi registrado para vários intervalos na janela de tempo total do caso de estudo.

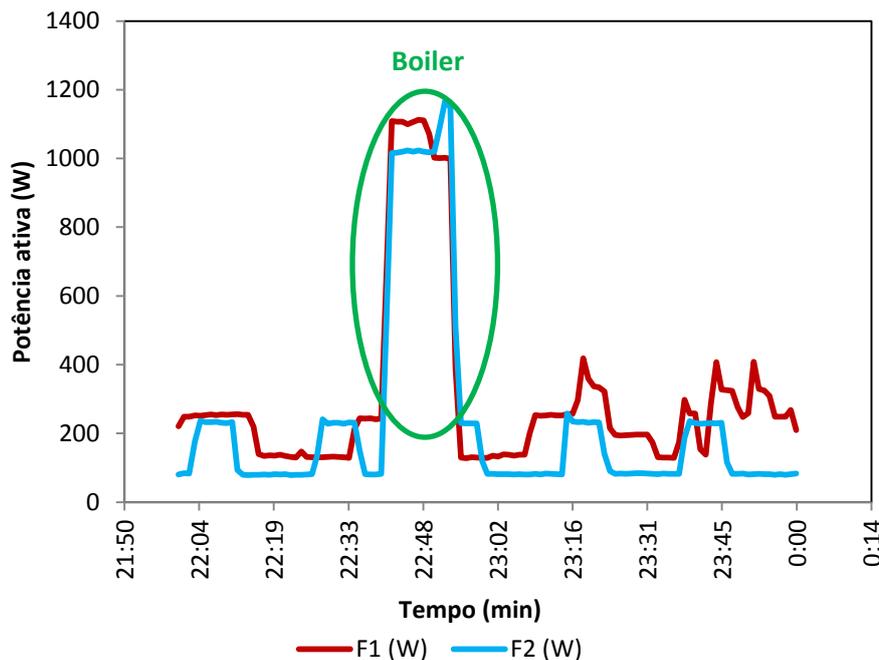


Figura 3-1 – Consumo nas fases 1 e 2, no intervalo de 22:00 às 00:00

3.2.5 Identificação dos aparelhos com comportamento periódico

Alguns eletrodomésticos não flexíveis apresentam um padrão de consumo de energia elétrica quase periódico, que pode ser identificado na curva de carga do consumidor residencial.

Na Figura 3-2 apresenta-se o comportamento de uma geladeira com potência de 90W, para um intervalo de 12 horas obtido pela medição direta do aparelho. Como é possível observar, tem-se um consumo muito bem definido e, praticamente, periódico no intervalo considerado.

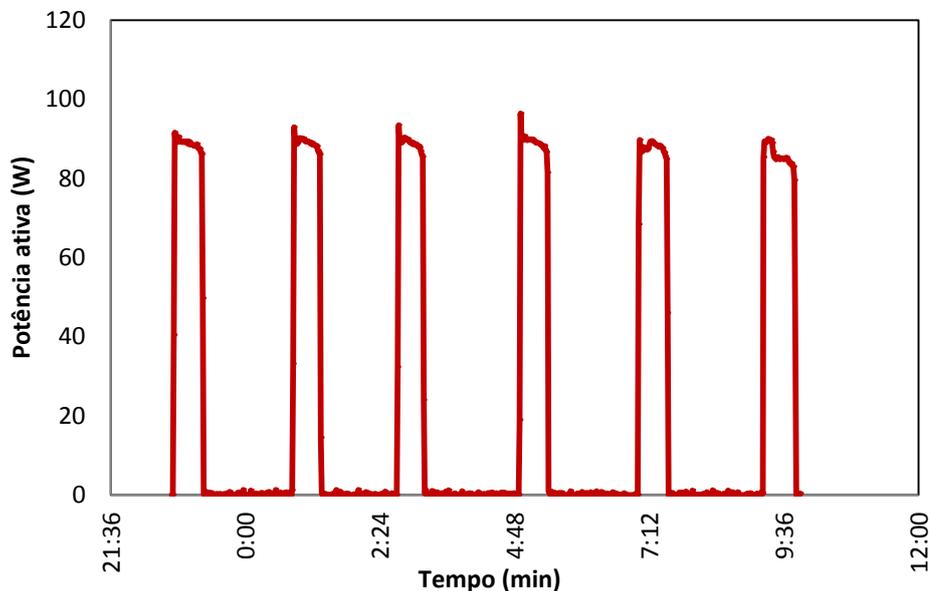


Figura 3-2 – Consumo característico de uma geladeira

Um estudo obtido da *Virginia Tech* [31], mostra que é possível fazer este tipo de mapeamento para alguns eletrodomésticos, corroborando a análise apresentada.

O algoritmo que identifica o eletrodoméstico com comportamento periódico pode ser apresentado da seguinte forma. Primeiro, calcula-se as variações (ΔP_t) de potência ativa medida ($P_{m(t)}^f$) na residência, identificando o melhor tamanho da janela para o cálculo com respeito ao intervalo de tempo t . Foram analisadas quatro (4) janelas diferentes definidas como segue:

- $\Delta_{P_t} = P_{m(t)}^f - P_{m(t-1)}^f \quad \forall t = \{2, \dots, T\}$
- $\Delta_{P_t} = P_{m(t)}^f - P_{m(t-2)}^f \quad \forall t = \{3, \dots, T\}$
- $\Delta_{P_t} = P_{m(t)}^f - P_{m(t-3)}^f \quad \forall t = \{4, \dots, T\}$
- $\Delta_{P_t} = P_{m(t)}^f - P_{m(t-4)}^f \quad \forall t = \{5, \dots, T\}$

Após calculadas cada uma das variações já descritas na potência ativa medida, e analisando os resultados obtidos em cada uma das janelas escolhidas é possível observar para qual cálculo conseguiram-se incorporar dados de potência dos aparelhos listados. Dependendo da quantidade de variações apresentadas na potência ativa medida do intervalo de tempo (t) para o ($t + 1$), os quais são produzidos pelas variações entre os estados de operação de um aparelho, afetam-se cada um dos valores calculados para as variações propostas.

Segundo, devem-se definir os limites de potência ativa mínima ($P_{(i)}^{ONmin}$) e máxima ($P_{(i)}^{ONmax}$), entre os quais o aparelho será considerado como ligado. Assim quando a variação de potência ativa (Δ_{P_t}) esteja entre os dois limites de potência definidos, o aparelho i considera-se como ligado para o intervalo de tempo t , sendo indicado mediante o uso da matriz de ligado ($AP_{ON(t,i)} = 1$). Desta forma o aparelho continuará no estado de ligado, até que nos dados de variação da potência ativa medida (Δ_{P_t}) seja atingido um valor de potência que, esteja entre os limites de potência ativa mínima ($P_{(i)}^{OFFmin}$) e máxima ($P_{(i)}^{OFFmax}$), nos quais o aparelho passa a ser considerado como desligado. Deve ser levado em consideração que este valor é negativo já que a variação será de uma potência maior para uma menor. Desta forma, modifica-se o valor do elemento correspondente ao aparelho i , no intervalo de tempo t , na matriz de ligado dos aparelhos, do valor um (1) para zero (0) ($AP_{ON(t,i)} = 0$). Assim, o aparelho passa a estar disponível para o modelo de otimização usá-lo se precisar.

Assim, na Figura 3-3 tem-se os dados de entrada do consumidor residencial a ser estudado nesta dissertação e, correspondem ao consumo de potência ativa medida para o intervalo de 17:00 às 20:00.

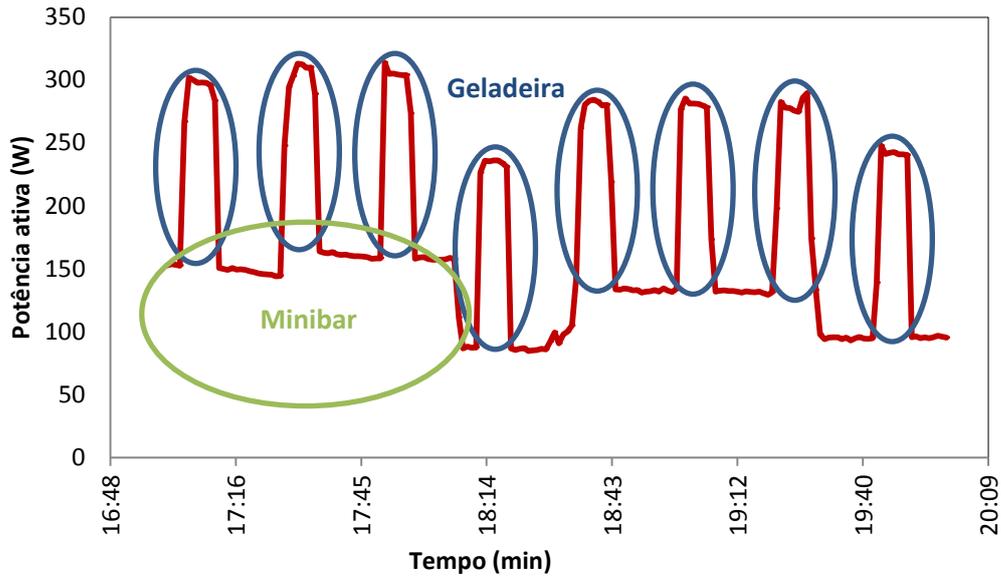


Figura 3-3 – Consumo da residência de 17:00 às 20:00

Um consumo periódico pode ser observado com variações de potência elétrica de aproximadamente 140 W em intervalos bem definidos, entre 7-10 min. Esta variação pode ser observada nos seguintes intervalos: 17:04-17:13; 17:27-17:36; 17:50-17:58; 18:12-18:20; 18:35-18:44; 18:58-19:07; 19:20-19:30; 19:43-19:52, os quais foram destacados em azul na Figura 3-3. De acordo com a potência atingida nestes intervalos de tempo, e, fazendo a comparação com os dados das potências consignadas na Tabela 2, além do padrão de variação observado, pode-se inferir que se trata da geladeira.

Na Figura 3-4, tem-se o consumo de potência ativa do mesmo consumidor no horário de 23:00 às 02:00, em que foi identificado outro consumo periódico, o qual encontra-se sinalizado em verde, também foi identificado e sinalizado da mesma forma na Figura 3-3.

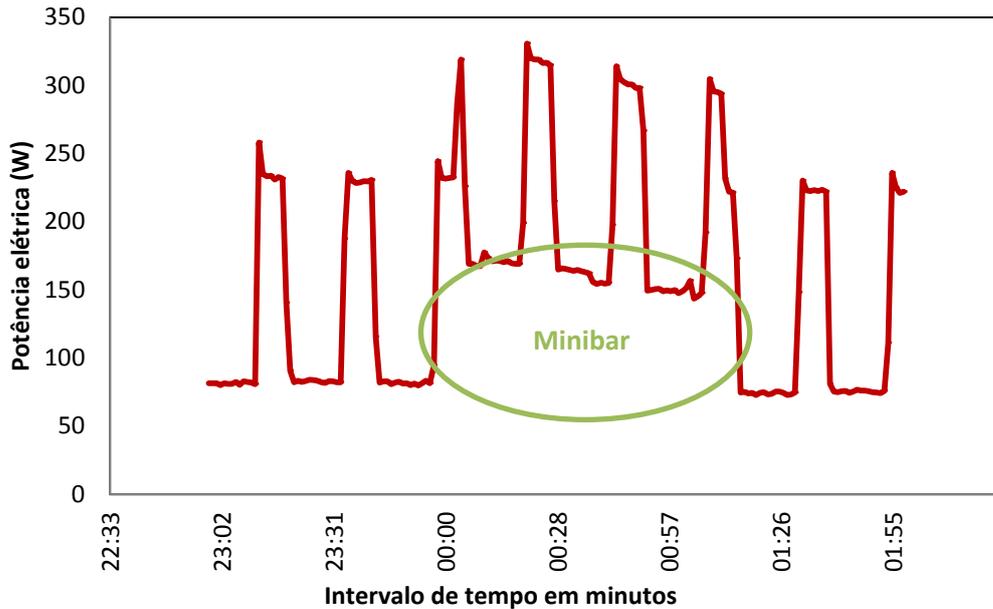


Figura 3-4 – Consumo da residência de 23:00 às 02:00

Analisando as variações na potência medida observa-se que, neste caso, atinge uma potência de aproximadamente 90 W, o tempo que ficou ligado girou em torno de 58-70 min. Na Figura 3-3 esta variação pode ser observada nos seguintes intervalos: 17:01-18:08, e, na Figura 3-4 nos intervalos: 00:02-01:12. Caracterizando-se por apresentar uma menor frequência no consumo, com respeito ao comportamento da geladeira. Assim, de acordo com a potência ativa atingida nos intervalos e, com as potências dos aparelhos listados na Tabela 2, foi identificado que o consumo está sendo gerado pelo minibar.

De acordo com a análise feita no pré-processamento, deve-se valorar o conjunto de aparelhos que formam a rede, porque um dos maiores problemas aparece quando há aparelhos com potências próximas e/ou iguais, mas, de diferente tipo de consumo. Assim, para não induzir a desagregação nesse tipo de erro, têm-se as seguintes opções: (i) adicionar dados mais detalhados dos consumos de energia elétrica de cada aparelho, por exemplo, tipo de consumo de acordo com as variações evidenciadas; (ii) complementar com horários típicos de funcionamento; (iii) de acordo com as restrições adotadas o modelo de otimização poderia encontrar uma melhor solução do que a proposta pelo pré-processamento.

Mediante o pré-processamento dos comportamentos periódicos, foram identificadas em ocasiões inconsistências que, por exemplo, no caso da

desagregação do minibar, já que este possui uma potência similar à potência da TV, estava sendo alocado parte do consumo da TV para este.

Para resolver este problema, optou-se por deixar que o algoritmo implementado para a desagregação utilize os aparelhos que ofereçam uma melhor solução ao problema de alocação de energia elétrica em cada um dos eletrodomésticos. Além disto, foi adotada uma penalização maior na variação dos estados para o minibar, com respeito à TV, já que a TV pode apresentar um comportamento de liga e desliga. Desta forma, conclui-se que somente a geladeira será tratada no pré-processamento.

3.3 Pós-Processamento

Nesta subseção serão tratados os tipos de aparelhos que não foram mapeados com o uso do pré-processamento ou pelo modelo de otimização, porque estes possuem infinitos estados de operação.

Com os dados observados neste caso de estudo, um aparelho que pertence a esta categoria é o ar-condicionado do tipo *inverter*. Na tecnologia *inverter*, o compressor varia seu funcionamento de acordo com a temperatura do ambiente e mediante o uso de detectores de presença. Entretanto, a principal diferença em relação a tecnologia convencional está diretamente relacionada com o fato de que no *inverter* permanece ligado o tempo todo evitando os picos e vales provocados pelo liga e desliga dos aparelhos convencionais. Além disto, há uma redução significativa no ruído e, conseqüentemente, uma redução no consumo. Na Figura 3-5 está apresentado um comparativo do funcionamento da tecnologia do tipo *inverter* e da tecnologia convencional.

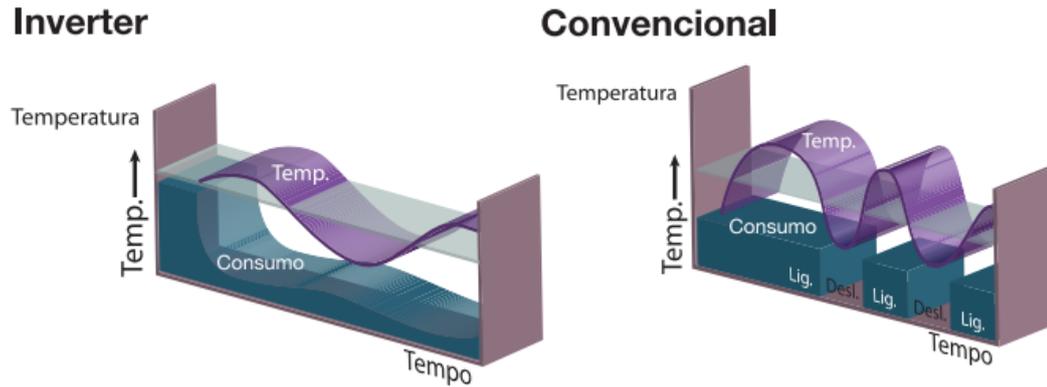


Figura 3-5 – Tecnologia de ar-condicionado *inverter* e a convencional [32]

Como o modelo de otimização proposto utiliza variáveis inteiras para mapear os eletrodomésticos, propõe-se adicionar no cálculo da potência ativa, uma variável de folga do tipo real, representada por delta, usada ao longo do intervalo de tempo t $\delta(t)$, $(P_{c(t)}^f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} + \beta_{(t)} + \delta(t))$. Esta variável é usada para compensar a diferença entre a potência ativa medida e a calculada. Há também, neste caso, incorporada na função objetivo uma penalização λ_δ , para garantir que a variável somente será usada nos casos em que não seja possível recuperar a energia mediante o uso dos aparelhos que são acionados através de variáveis inteiras.

Assim, para alocar a energia associada a este eletrodoméstico, deve-se, após a aplicação do modelo de otimização, verificar os intervalos em que a variável de folga armazenou dados de consumo de energia elétrica que possam ser atribuídos para o ar-condicionado ou serão tratados consumos realizados por aparelhos que não fazem parte dos aparelhos listados nos dados de entrada. Além de consumos que não foram mapeados mediante o algoritmo proposto, e que são gerados por pequenas variações apresentadas nos eletrodomésticos, como por exemplo o dia e/ou o horário de uso, além das variações na temperatura, o tempo de uso etc. Então, para diferenciar estes dados na variável de folga, será utilizada uma média móvel nos dados alocados na variável de folga.

Mediante uma média móvel, pode-se obter um valor médio dentro de um determinado período ou, a denominada janela de cálculo em um conjunto de dados. Inicialmente, será assumido um valor de 10 (dez) no tamanho da janela de cálculo. Este valor, refere-se à quantidade de valores que serão tomados da

variável de folga e , corresponde ao tempo em minutos que serão tomados do intervalo de tempo.

Definido o tamanho da janela, assume-se o valor da potência de comparação, que como foi feito nos casos anteriores de identificação de aparelhos no pré-processamento indicam, quando o aparelho deve ser considerado como ligado. Como o ar-condicionado do caso de estudo é bifásico, deve ser calculada a média móvel para as duas fases, para cada variável de folga de acordo com a desagregação de energia feita. Assim, quando os valores calculados pelas médias móveis para as duas fases ultrapassarem ou igualarem o valor assumido para a potência de comparação, o ar-condicionado será considerado como ligado. Assumindo os valores que mediante a desagregação foram alocados na variável de folga, no intervalo do tamanho da janela escolhido, o cálculo da média móvel pode ser definido da seguinte forma:

$$mm(\delta_{(n)}) \geq P^{m_ar}$$

em que,

- $mm(\delta_{(n)})$ É a média móvel aplicada na variável de folga de janela n (o tamanho da amostra).
- P^{m_ar} Potência de comparação do ar-condicionado

De acordo com os resultados obtidos com a aplicação da média móvel, é feita uma comparação com as observações de uso do aparelho. Desta forma, pode ser definido um novo valor para o tamanho da janela e/ou para o valor de potência de comparação, com o objetivo de alocar consumo de forma mais assertiva ao ar-condicionado. Também, pode ser conceituado que estes valores poderão variar de acordo com o intervalo do dia, assim, conhecendo o horário do dia no qual o ar condicionado possui uma maior ou menor probabilidade de ser usado. Depois de vários testes, evidenciou-se que o valor da janela de cálculo, apresentou melhores resultados utilizando o valor de vinte (20).

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados e analisados alguns dados adicionais para a entrada do modelo de otimização e, também os diferentes resultados obtidos para a desagregação de energia elétrica do caso de estudo. Além disto, é apresentada a análise referente ao custo pela tarifa branca, comparando-a com a tarifa convencional e uma abordagem para deslocar consumos de energia elétrica dos horários ponta e/ou intermediários para fora de ponta.

A implementação do tipo de modelo de otimização proposto neste trabalho foi desenvolvida no *software* Xpress [33]. Como foi abordado na subseção de medição, o modelo proposto será aplicado a cada 3 (três) horas, devido a que foi o menor intervalo de tempo que conseguia incluir o horário da tarifa branca [9] e a solução era similar a resposta esperada, desagregando os consumos de energia elétrica a cada 1 (um) minuto. A solução foi obtida utilizando a técnica *branch and bound* [34].

O pré e o pós-processamento são realizados com o *software* MATLAB [35]. As simulações foram realizadas num computador com processador Intel Core i7, 3,40 GHz com 8 GB de RAM. O tempo para processar um intervalo de 3 horas varia entre 1 e 5 minutos.

O intervalo de tempo apresentado nesta seção, refere-se ao horário de 16:29 às 21:30, desta forma incluem-se os horários propostos pela tarifa branca: o horário intermediário e o horário ponta. De acordo com estes horários definidos e, conhecendo a desagregação do consumo nestes intervalos de tempo, apresenta-se uma proposta dos aparelhos que poderiam ser deslocados para o horário fora de ponta para o usuário. Os resultados para outros períodos do dia que foram considerados relevantes estão apresentados no Anexo I.

De acordo com o modelo de otimização final apresentado na expressão (2.15), no primeiro termo $\left(\lambda_P \sum_{t \in T} \left| P_{c(t)}^f - P_{m(t)}^f \right| \right)$, observa-se a diferença entre a potência ativa calculada e a medida para cada intervalo de tempo t , assume-se uma penalização deste termo de 50 ($\lambda_P = 50$). De acordo com o valor assumido para λ_P , procura-se que a diferença entre a potência calculada e a medida seja muito próxima de zero (0), dado que os valores dos demais termos na função objetivo são relativamente pequenos.

No segundo termo, observam-se os pesos de uso associados ($W_{(t,i,k)}$) para cada variável binária ($\theta_{(t,i,k)}$), que penaliza cada aparelho i , para cada estado k , em cada intervalo de tempo t , desta forma na Tabela 5 encontram-se apresentados os valores dos pesos.

Tabela 5 – Pesos dos aparelhos no intervalo de 16:29 às 21:30

$W_{(t,i,k)}$		$\forall t \in T$			
i	Eletrodoméstico	k={1,...,K}			
		1	2	3	4
1	Geladeira	0	0	0,00794	0,01818
2	Boiler	0	0	0,00552	0,09524
3	Iluminação sala-1-2	0	0	0,00552	0,09524
4	Iluminação sala-1-3	0	0	0,00552	0,09524
5	Iluminação sala-1-4	0	0	0,00552	0,09524
6	Iluminação cômodo 1-1	0	0	0,00552	0,09524
7	Iluminação corredor entrada	0	0	0,00625	0,04762
8	Iluminação de serviço-1	0	0	0,00787	0,01852
9	Iluminação exterior	0	0	0,01136	0,01075
10	Iluminação de serviço-2	0	0	0,02273	0,00552
11	Modem e carregadores sem fio	0,02273	0,00552	0,00552	0,00552
12	Televisão 1	0,00000	0,05555	0,00613	0,00613
13	Minibar	0,00877	0,01493	0,01493	0,01493
14	Ar condicionado	NA	NA	NA	NA

Tendo valores relativamente pequenos da ordem de 10^{-2} , os quais foram alocados de acordo com a frequência de utilização de cada um deles, observa-se que no caso do ar-condicionado não apresenta nenhum valor, já que este faz parte do pós-processamento e, pode ser visto em detalhes na subseção 3.2.3.

Para o terceiro termo $\sum_{t=2}^T \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \lambda_{(i)} |\theta_{(t,i,k)} + \theta_{(t-1,i,k)}|$, observa-se que encontra-se penalizado pelo lambda $\lambda_{(i)}$, que penaliza a cada aparelho i quando há

mudança nos estados de operação k , do tempo (t) para o tempo ($t - 1$) e que apresentam os seguintes valores, observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores da penalização da variação por aparelho no intervalo da tarifa branca

i	Eletrodoméstico	$\lambda_{(i)}$	Valor
1	Geladeira	$\lambda_{(1)}$	1
2	Boiler	$\lambda_{(2)}$	0,5
3	Iluminação sala-1-2	$\lambda_{(3)}$	0,5
4	Iluminação sala-1-3	$\lambda_{(4)}$	0,5
5	Iluminação sala-1-4	$\lambda_{(5)}$	0,5
6	Iluminação cômodo 1-1	$\lambda_{(6)}$	0,5
7	Iluminação corredor entrada	$\lambda_{(7)}$	0,5
8	Iluminação de serviço-1	$\lambda_{(8)}$	0,5
9	Iluminação exterior	$\lambda_{(9)}$	0,5
10	Iluminação de serviço-2	$\lambda_{(10)}$	0,5
11	Modem e carregadores sem fio	$\lambda_{(11)}$	0,5
12	Televisão 1	$\lambda_{(12)}$	0,5
13	Minibar	$\lambda_{(13)}$	2
14	Ar condicionado	$\lambda_{(14)}$	NA

Estes valores de lambda ($\lambda_{(i)}$), foram alocados de acordo com observações feitas mediante o pré-processamento, as quais indicavam os aparelhos que deviam permanecer mais tempo ligados do que outros. Como se nota, os valores entre zero (0) e um (1) são alocados para aparelhos que podem mudar de estado de operação facilmente e, valores maiores que um (1), são utilizados em aparelhos que devem estar mais tempo sem mudar de estado de operação. Desta forma tem-se que os valores das penalizações lambda ($\lambda_{(i)}$), para os aparelhos 1 e 13, que correspondem à geladeira e o minibar, respectivamente, são maiores com relação as penalizações dos outros aparelhos.

Para penalizar a variável de folga foi adotado um valor relativamente pequeno, de 0,03 ($\lambda_{\delta} = 0,03$), dado que trata-se de uma variável do tipo real (\mathbb{R}), e levando em consideração que o problema de otimização proposto minimiza a função objetivo, os outros termos deverão ser relativamente menores. Então, o aporte da variável de folga seria grande. Mediante a utilização de um valor pequeno na penalização, garante-se que o modelo somente usará esta variável quando for preciso. Caso fosse adotado um valor alto para a penalização, o modelo tentaria recuperar a potência ativa do intervalo usando mais os outros aparelhos, induzindo a erros maiores.

No cálculo da potência ativa na expressão (2.16) ($P_{c(t)}^f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} + \beta_{(t)} + \delta_{(t)} \forall t \in T$), encontra-se o fator de ajuste da potência $F_{(i)}$, para cada aparelho i , apresentam os valores consignados na Tabela 7:

Tabela 7 – Valores do fator de ajuste para cada aparelho no intervalo da tarifa branca

i	Eletrodoméstico	$F_{(i)}$	Valor
1	Geladeira	$F_{(1)}$	0,98
2	Boiler	$F_{(2)}$	0,99
3	Iluminação sala-1-2	$F_{(3)}$	0,99
4	Iluminação sala-1-3	$F_{(4)}$	0,99
5	Iluminação sala-1-4	$F_{(5)}$	0,99
6	Iluminação cômodo 1-1	$F_{(6)}$	0,99
7	Iluminação corredor entrada	$F_{(7)}$	0,99
8	Iluminação de serviço-1	$F_{(8)}$	0,99
9	Iluminação exterior	$F_{(9)}$	0,99
10	Iluminação de serviço-2	$F_{(10)}$	0,99
11	Modem e carregadores sem fio	$F_{(11)}$	0,99
12	Televisão 1	$F_{(12)}$	0,99
13	Minibar	$F_{(13)}$	0,99
14	Ar condicionado	$F_{(14)}$	0,99

De acordo com informações fornecidas pelo usuário, o conjunto de modem e carregadores sem fio ficam ligados o tempo todo na tomada. Estes aparelhos foram combinados e correspondem ao aparelho 11 na Tabela 2. Este comportamento é indicado ao modelo de otimização mediante o uso da matriz ligado dos aparelhos ($AP_{ON(t,i)}$), apresentada em detalhes na subseção 3.2.1. Então na matriz de ligado, este elemento terá o valor de um (1) o tempo todo ($AP_{ON(t,11)} = 1, \forall t \in T$). Para o caso da iluminação exterior, que corresponde ao aparelho 9, segundo a Tabela 2, é acionado por um fotosensor. Desta forma, adota-se como ligado de 18:00 às 06:00. Os intervalos de tempo terão que ser calculados de acordo a que cada intervalo de tempo da desagregação que corresponde a 180 minutos de medições na residência, e será considerada como ligada 12 horas a iluminação exterior, tem-se que o total de minutos será de 2160.

Esta informação na matriz de ligado terá o valor de um (1) para cada elemento $AP_{ON(t,9)} = 1, \forall t = \{18:00, \dots, 06:00\}$.

Alguns aparelhos serão considerados como desligados mediante o uso da matriz de desligado dos aparelhos ($AP_{OFF(t,i)}$). Desta forma, quando a potência do aparelho for maior do que a potência ativa medida, este pode ser considerado como desligado. Para ilustrar, na Tabela 8 tem-se seis (6) intervalos que foram tomados do pré-processamento e que correspondem ao horário de 17:01 às 17:06. Observa-se a potência individual de cada aparelho e a potência total medida ao longo dos seis (6) intervalos.

Tabela 8 – Matriz desligado dos aparelhos no intervalo de 17:01 às 17:06

$AP_{OFF(t,i)}$								
i	Eletrodoméstico	t = {1,...,6}						Potência (W)
		1	2	3	4	5	6	
1	Geladeira	0	0	0	0	0	0	145
2	Boiler	1	1	1	1	1	1	1000
3	Iluminação sala-1-2	1	1	1	1	1	0	300
4	Iluminação sala-1-3	1	1	1	1	1	0	300
5	Iluminação sala-1-4	1	1	1	1	0	0	160
6	Iluminação cômodo 1-1	0	0	0	0	0	0	20
7	Iluminação corredor entrada	0	0	0	0	0	0	16
8	Iluminação de serviço-1	0	0	0	0	0	0	40
9	Iluminação exterior	0	0	0	0	0	0	24
10	Iluminação de serviço-2	0	0	0	0	0	0	40
11	Modem e carregadores sem fio	0	0	0	0	0	0	24
12	Televisão 1	0	0	0	0	0	0	84
13	Minibar	0	0	0	0	0	0	0
	Potência total intervalo (W)	153	154	153	152	267	302	

Na Tabela 8 pode ser analisado que o boiler nos seis (6) intervalos está considerando-se como desligado, para a Iluminação sala-1-2 nos primeiros cinco (5) intervalos está considerando-se como desligada. Desta forma, indica-se ao modelo de otimização mediante a restrição (2.20) ($\theta_{(t,i,1)} \geq AP_{OFF(t,i)}$).

Para complementar as informações de entrada do modelo, foram adicionados os dados de consumo de energia mensais da geladeira e o minibar, que foram transformados para o intervalo de estudo de três (3) horas. Para o caso

proposto, foi adotado um valor de energia mínima para o minibar de $0,0313 \text{ kWh}$ ($E_{(13)}^{min} = 0,0313$) e no caso da geladeira foi adotado um valor de energia mínima de $0,0421 \text{ kWh}$ ($E_{(1)}^{min} = 0,0421$). Estes valores são indicados ao modelo de otimização mediante a restrição (2.21) $(\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} \geq E_{(i)}^{min})$.

Já definido o limite inferior da energia, deve ser estabelecido o limite máximo. Para o caso do minibar, a energia máxima é $0,0325 \text{ kWh}$ ($E_{(13)}^{max} = 0,0325$), afetando a restrição (2.22) $(\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (P_{(i,k)} F_{(i)}) \theta_{(t,i,k)} \leq E_{(i)}^{max})$.

A partir das restrições definidas e aplicando o modelo de otimização final, na Figura 4-1 apresentam-se os resultados da desagregação de energia elétrica para o intervalo de 16:30 às 21:29. Desta forma, tem-se o conjunto de aparelhos que formam cada minuto de consumo de energia elétrica.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1521998/CA

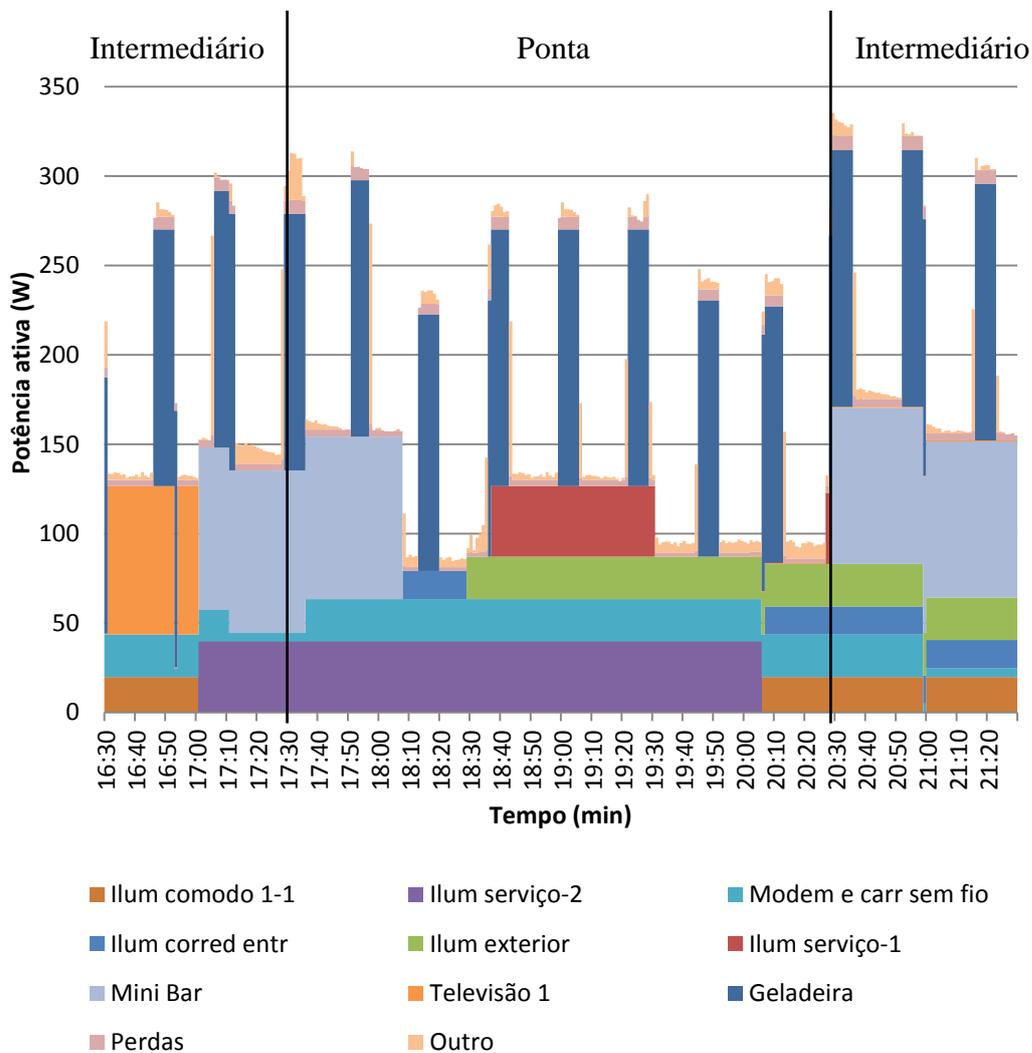


Figura 4-1 – Desagregação dos aparelhos no intervalo de 16:30 às 21:29

Na Tabela 9 é apresentado um resumo do consumo de energia elétrica dos aparelhos e, uma proporção do consumo individual com respeito ao consumo total de energia elétrica no horário ponta.

Tabela 9 – Consumos de energia na ponta de 17:30 às 20:29

Aparelho	kWh	Proporção do total
Geladeira	0,1340	26,5%
Iluminação cômodo 1-1	0,0079	1,6%
Iluminação corredor entrada	0,0116	2,3%
Iluminação serviço-1	0,0370	7,3%
Iluminação exterior	0,0479	9,5%
Iluminação serviço-2	0,1030	20,3%
Modem e carregadores sem fio	0,0694	13,7%
Televisão 1	0,0002	0,0%
Mini Bar	0,0590	11,7%
Perdas	0,0124	2,4%
Variável de folga	0,0239	4,7%
Total	0,5062	100%

A Tabela 10 apresenta um resumo do consumo de energia elétrica dos aparelhos e, uma proporção do consumo individual com respeito ao consumo total de energia elétrica no horário intermediário.

Tabela 10 – Consumos de energia no horário intermediário de 16:30 às 17:29 e 20:30 às 21:29

Aparelho	kWh	Proporção do total
Geladeira	0,0909	22,4%
Iluminação cômodo 1-1	0,0297	7,3%
Iluminação corredor entrada	0,0158	3,9%
Iluminação exterior	0,0238	5,9%
Iluminação serviço-2	0,0191	4,7%
Modem e carregadores sem fio	0,0305	7,5%
Televisão 1	0,0407	10,0%
Mini Bar	0,1312	32,4%
Perdas	0,0100	2,5%
Variável de folga	0,0133	3,3%
Total	0,4051	100%

A Figura 4-2 apresenta uma comparação no consumo de energia elétrica para os aparelhos não flexíveis, a geladeira e o minibar com respeito ao total da curva de carga da residência.

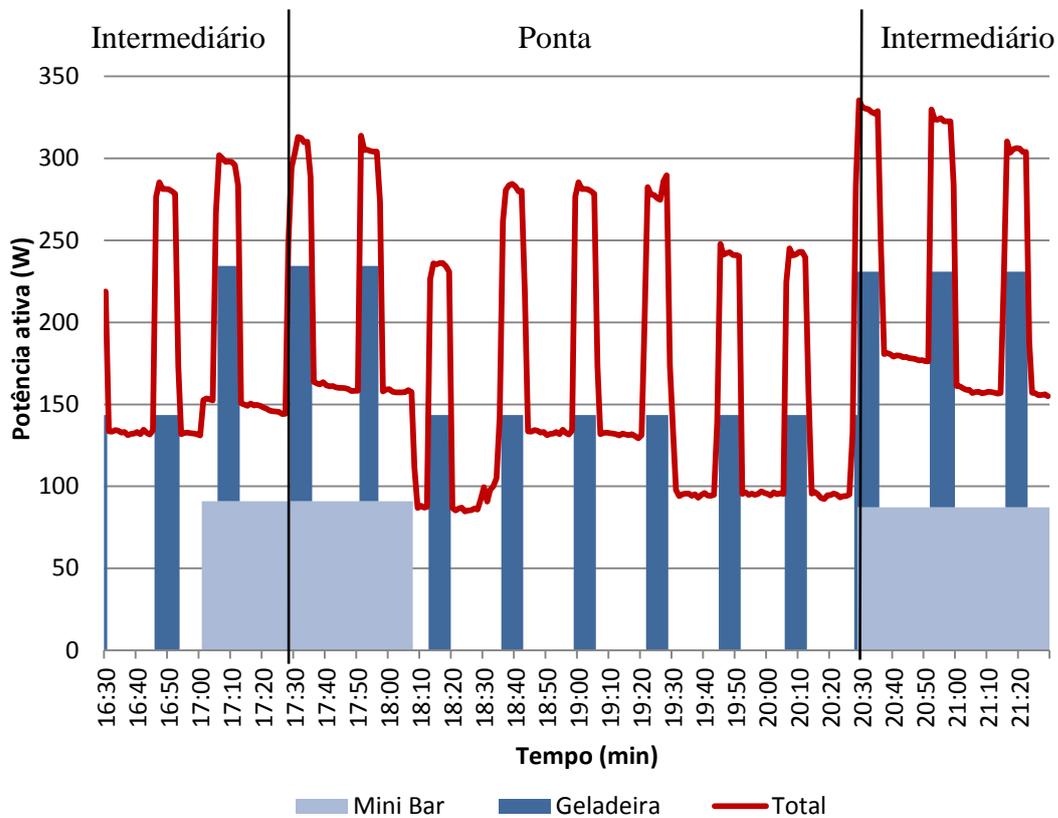


Figura 4-2 – Desagregação aparelhos não flexíveis intervalo de 16:30 às 21:29

Na Figura 4-3 está ilustrado o comportamento do consumo de energia elétrica ao longo deste intervalo de tempo, dos aparelhos flexíveis.

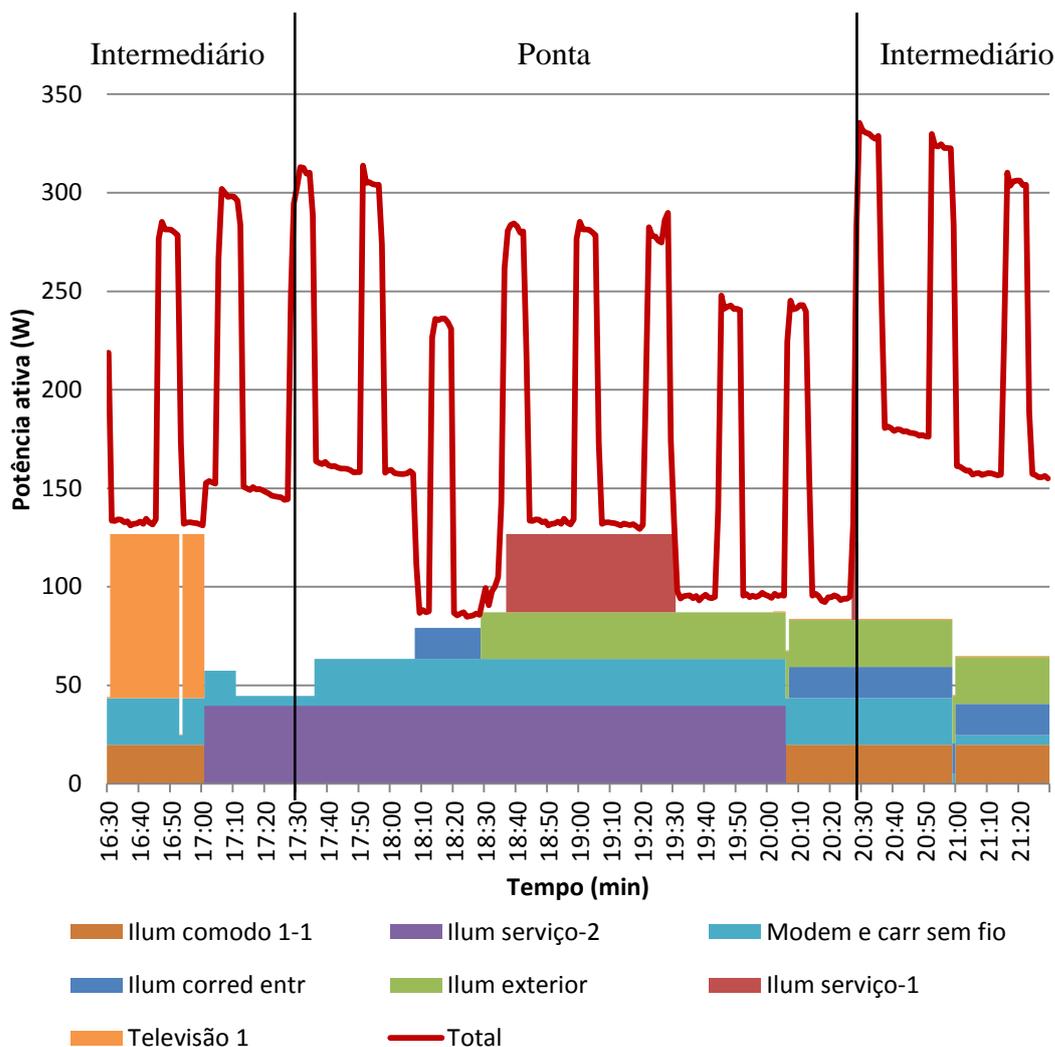


Figura 4-3 – Desagregação aparelhos flexíveis no intervalo de 16:30 às 21:29

Os resultados do modelo de otimização para a desagregação das perdas elétricas e da variável de folga estão apresentados na Figura 4-4. Observa-se que os valores das perdas devem estar entre os limites já definidos no desenvolvimento da metodologia proposta. Por isto, as perdas elétricas variam em proporção do valor apresentado pela potência ativa medida. Entretanto, a variável de folga somente é usada pelo modelo quando este não encontra uma resposta que garanta todas as restrições da melhor forma possível usando os aparelhos listados.

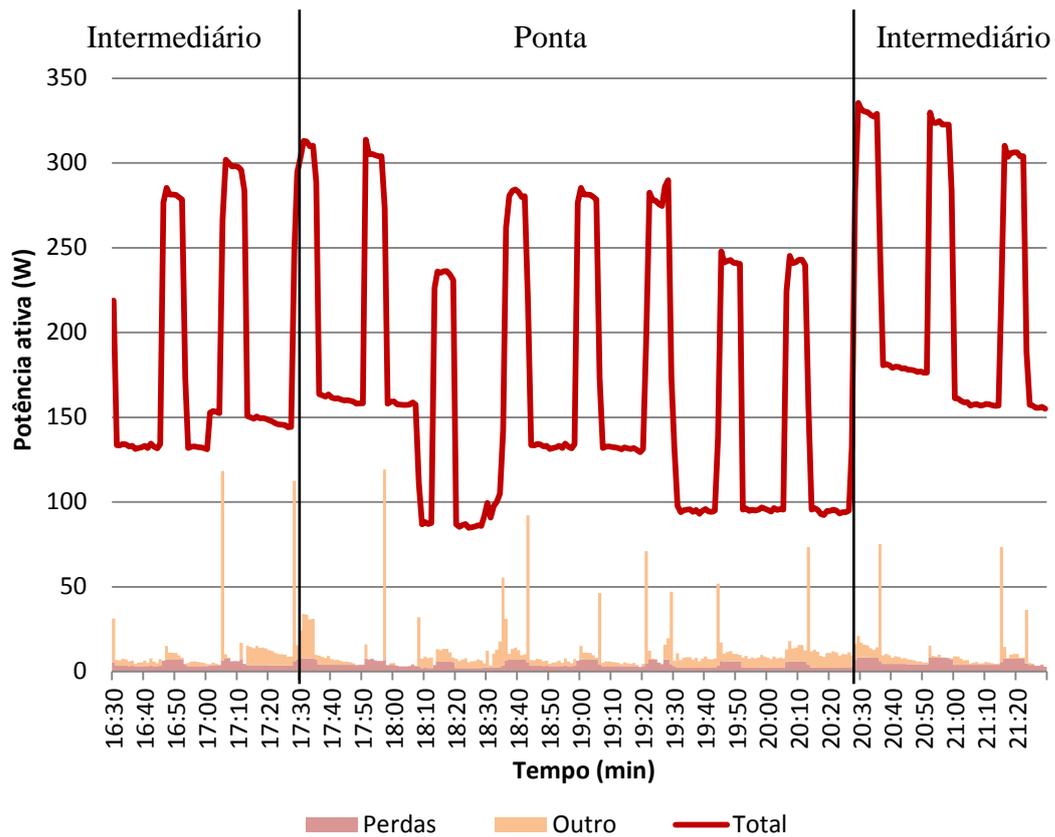


Figura 4-4 – Desagregação das perdas e da variável de folga no intervalo de 16:30 às 21:29

Para a geladeira e o minibar faz-se uma comparação entre os dados esperados e os calculados, na Figura 4-5 e na Figura 4-6 respectivamente. Os dados esperados para ambos os casos foram obtidos pela observação da curva de carga diária do consumidor e, portanto, podem apresentar um erro com relação ao seu real comportamento.

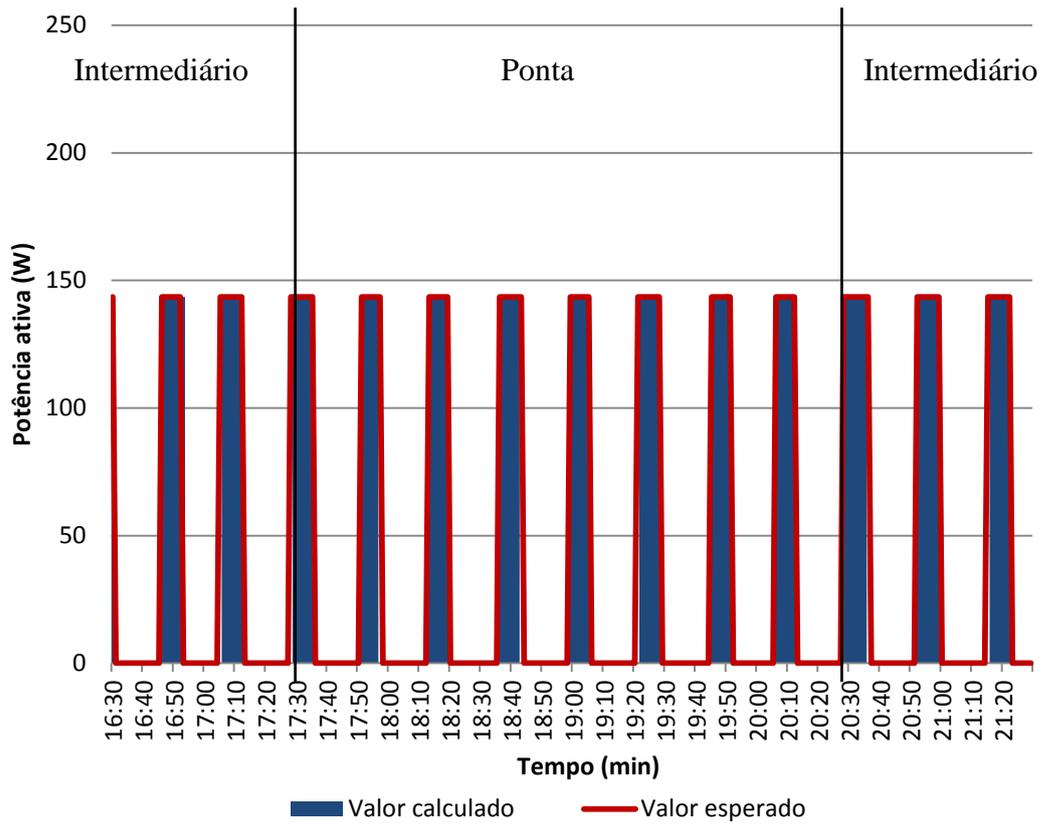


Figura 4-5 – Comparação entre os dados calculados e os esperados na geladeira

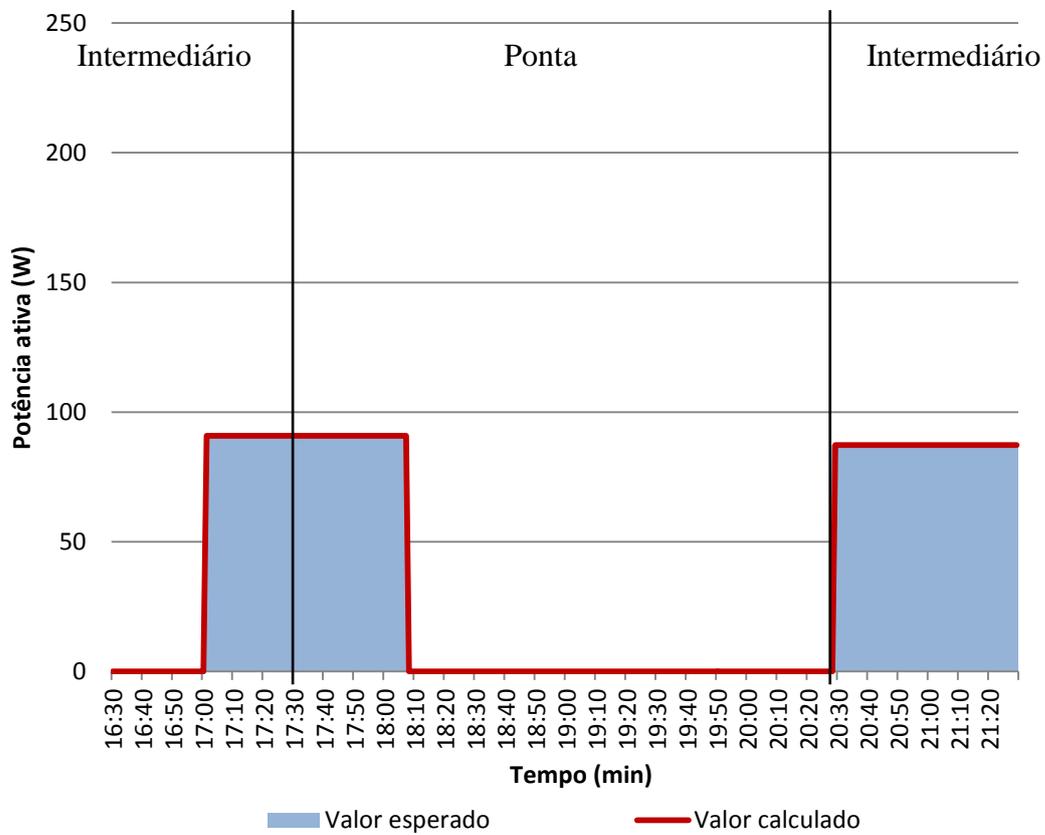


Figura 4-6 – Comparação entre os dados calculados e os esperados no minibar

Considerando os dados esperados, nesta dissertação para os aparelhos não flexíveis na Tabela 11 apresentam-se as diferentes métricas de avaliação calculadas para a geladeira e o minibar para este intervalo de tempo. Não foram calculadas métricas de avaliação para os aparelhos flexíveis, já que são aparelhos que dependem do comando do usuário, dificultando-se a identificação nos dados de entrada para obter dados esperados.

Tabela 11 – Métricas de avaliação no intervalo de 16:30 até 21:29

	Geladeira	Minibar
MAPE	8%	9%
R^2	88%	99%

Com relação às métricas de avaliação calculadas neste intervalo de tempo, o MAPE e o R^2 , as quais foram definidas na subseção 2.3, conclui-se que o modelo de desagregação proposto neste trabalho, está obtendo valores compatíveis com os valores esperados.

4.1 Análise da tarifa branca

O modelo de desagregação proposto permite que o usuário possa avaliar sua adesão à bandeira branca. Considerando que o consumidor em estudo seja elegível para optar pela bandeira branca, deve-se inicialmente, avaliar os custos da tarifa convencional e os custos da tarifa branca. Depois, deve-se avaliar se há possibilidade de deslocamento de energia elétrica do horário ponta e/ou intermediário para o horário fora de ponta e, finalmente, identificar quais aparelhos devem ser deslocados.

Na tarifa convencional, o usuário paga uma única tarifa pelo consumo de energia elétrica ao longo das 24h do dia e, é calculada mediante a expressão (4.1).

$$C_c = E_T * T_c \quad (4.1)$$

em que,

C_c – custo da energia com a tarifa convencional (\$R).

E_T – energia total consumida (kWh) da residência nas 24h.

T_c – preço da tarifa convencional (R\$/kWh).

A tarifa branca, possui três (3) intervalos de tarifa diferenciada, para conhecer o custo total de energia consumida ao longo das 24h do dia e, é calculada mediante a expressão (4.2).

$$C_{tb} = E_p * T_p + E_{int} * T_{int} + E_{f_p} * T_{f_p} \quad (4.2)$$

em que,

C_{tb} – custo da energia com a tarifa branca (\$R).

E_p – energia consumida no horário ponta (kWh).

E_{int} – energia consumida no horário intermediário (kWh).

E_{f_p} – energia consumida no horário fora de ponta (kWh).

T_p – preço no horário ponta (R\$/kWh).

T_{int} – preço no horário intermediário (R\$/kWh).

T_{f_p} – preço no horário fora de ponta (R\$/kWh).

Serão calculadas as duas bases tarifárias anteriores, segundo os dados fornecidos pela distribuidora de energia elétrica da cidade do Rio de Janeiro, Light S.A. (LIGHT, 2018), para os usuários residenciais. Na Tabela 12 observam-se os valores das bases tarifárias, estes valores possuem PIS/COFINS e ICMS.

Tabela 12 – Tarifas de energia da Light para consumo residencial acima de 450 kWh

Tipo de tarifa	Período	R\$/kWh
Tarifa branca	Ponta	1,70302
	(17:30 às 20:29)	
	Intermediário	1,13278
	(16:30 às 17:29 e 20:30 às 21:29)	
Fora ponta	0,80256	
(0h às 16:29 e 21:30 às 24h)		
Convencional	--	0,91543

Para obter os resultados associados de um dia típico deste consumidor, deve-se proceder a desagregação para todas as 24 horas do dia. Na Tabela 13 estão apresentados os custos associados à tarifa branca e convencional para o dia de estudo. Como se observa, o custo associado à tarifa branca é maior que o custo associado à tarifa convencional. Portanto, a princípio, não é recomendado a mudança tarifária.

Tabela 13 – Custo da energia aplicando tarifa branca e tarifa convencional

Tipo de tarifa	Período	Consumo de energia (kWh)	Custo (R\$)
Tarifa branca	Ponta	0,5062	4,117
	Intermediário	0,4051	
	Fora Ponta	3,4842	
Convencional	--	4,3955	4,025

Para que seja viável adesão à tarifa branca, devem-se igualar ou diminuir os custos. Isto pode ser feito deslocando consumo de energia elétrica do horário intermediário e/ou da ponta, para o horário fora de ponta.

Na Figura 4-7, pode se conhecer o comportamento apresentado no custo da tarifa branca ao deslocar o consumo de energia referente ao horário de ponta ou do intermediário, para o horário fora de ponta.

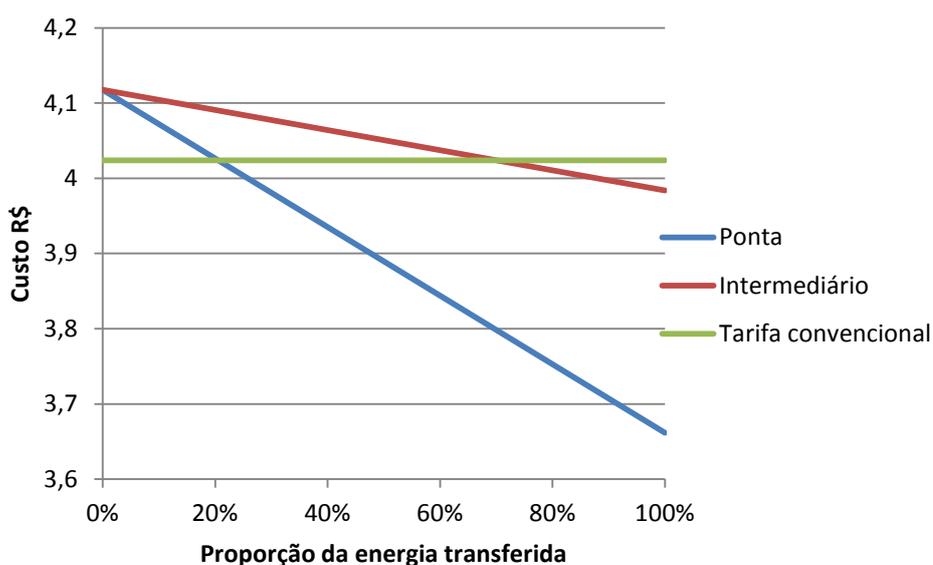


Figura 4-7 – Custo tarifa branca deslocando o total de energia de ponta ou intermediário para o horário fora de ponta

Desta forma, considerando o horário ponta a partir de aproximadamente 0,10 kWh, que corresponde ao 21% do consumo deste horário, sendo deslocados da ponta para o horário fora da ponta, começa haver vantagem em migrar para a tarifa branca.

Considerando apenas o horário intermediário a partir de aproximadamente 0,28 kWh, que corresponde 70% do consumo deste horário, sendo deslocados para o fora de ponta, começa a ser rentável a adesão da tarifa branca.

Deslocando o total da energia consumida no horário ponta para o fora de ponta, o custo da tarifa branca é de R\$3,66, se comparado com o custo da tarifa convencional, tem-se um desconto de aproximadamente 10%. Desta forma, deslocando o total da energia consumida no horário intermediário para o fora de ponta, o custo da tarifa branca é de R\$3,98, se comparado com o custo da tarifa convencional, tem-se um desconto de aproximadamente 1%.

Na Figura 4-8 tem-se apresentado o comportamento do custo da tarifa branca deslocando o consumo total do horário ponta e do intermediário para o horário fora de ponta. Desta forma, deslocando este consumo, o custo da tarifa branca é de R\$3,52, se comparado com o custo da tarifa convencional, obtém-se um desconto de aproximadamente 14%.

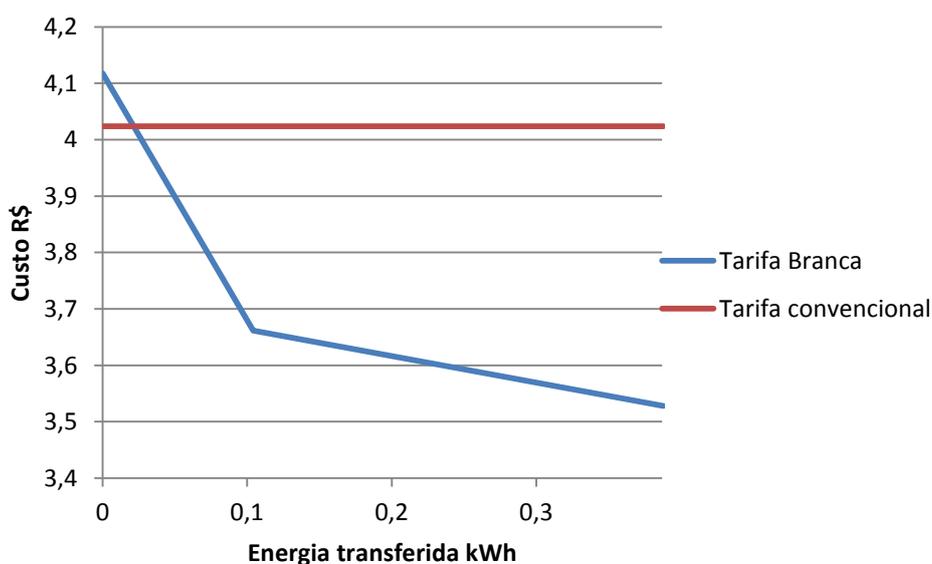


Figura 4-8 – Custo tarifa branca deslocando o total de energia consumido no horário ponta e no intermediário para o horário fora de ponta

Na Tabela 14 estão apresentados os consumos de energia elétrica do diferentes aparelhos para os horários ponta e intermediário, incluindo as perdas e a variável de folga.

Tabela 14 – Consumo de energia dos aparelhos nos horários ponta e intermediário

Eletrodoméstico	Energia consumida			
	Ponta		Intermediário	
	(kWh)	Proporção	(kWh)	Proporção
Geladeira	0,1340	26,5%	0,0909	22,4%
Boiler	0,0000	0,0%	0,0000	0,0%
Iluminação sala-1-2	0,0000	0,0%	0,0000	0,0%
Iluminação sala-1-3	0,0000	0,0%	0,0000	0,0%
Iluminação sala-1-4	0,0000	0,0%	0,0000	0,0%
Iluminação cômodo 1-1	0,0079	1,6%	0,0297	7,3%
Iluminação corredor entrada	0,0116	2,3%	0,0158	3,9%
Iluminação serviço-1	0,0370	7,3%	0,0000	0,0%
Iluminação exterior	0,0479	9,5%	0,0238	5,9%
Iluminação serviço-2	0,1030	20,3%	0,0191	4,7%
Modem e carregadores sem fio	0,0694	13,7%	0,0305	7,5%
Televisão 1	0,0002	0,0%	0,0407	10,0%
Minibar	0,0590	11,7%	0,1312	32,4%
Perdas	0,0124	2,4%	0,0100	2,5%
Variável de folga	0,0239	4,7%	0,0133	3,3%
Total	0,5062	100%	0,4051	100%

Com a informação fornecida pela anterior tabela e baseado na quantidade de energia a ser deslocada de horário, pode ser identificado qual aparelho pode suprir esta quantidade de energia, ou se, deve-se escolher um conjunto de aparelhos. De acordo com o consumo de energia a ser deslocado do horário ponta para o fora de ponta, tem-se que equivale a aproximadamente o 74% do consumo da geladeira ou a praticamente todo o consumo da iluminação da área de serviço 2.

Neste caso, para a quantidade de energia a ser deslocada do horário intermediário para o fora de ponta, deve-se deslocar grande parte dos consumos de vários aparelhos, devido a que este é um horário curto e os aparelhos não apresentam consumos consideráveis.

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Nesta dissertação foi apresentada uma solução ao problema da desagregação de energia elétrica para consumidores residenciais considerando mapear o consumo de energia elétrica dos eletrodomésticos ao longo do dia e estabelecer estratégias para minimizar o custo associado ao consumo de energia elétrica. A proposta está alinhada com a modalidade tarifária chamada tarifa branca, que permite que consumidores residenciais possam se beneficiar de deslocar seu consumo de energia elétrica do horário da ponta e intermediário, para fora da ponta. Assim, uma aplicação direta do trabalho proposto é identificar quais eletrodomésticos estão sendo utilizados para que o mesmo possa avaliar a relação custo-benefício da mudança contratual, tendo em conta o benefício econômico e a perda de conforto.

O modelo proposto considera a utilização de um medidor inteligente para aquisição de dados, uma análise de pré-processamento para tratamento da informação, um modelo de otimização inteira mista para a desagregação e uma etapa de pós-processamento para identificar eletrodomésticos que não apresentam variações discretas, como o ar-condicionado com tecnologia *inverter*.

Verificou-se, a título de exemplo, que, mediante o deslocamento do consumo de aproximadamente 74% do consumo da geladeira do horário ponta para o fora de ponta ou deslocando aproximadamente 70% do consumo do horário intermediário, começa-se a obter vantagens na mudança contratual. Vale ressaltar que o deslocamento do consumo de um eletrodoméstico como a geladeira não é trivial, já que ela deva funcionar ao longo das 24 horas do dia. Entretanto, há uma sinalização para o uso de sistemas de armazenamento de energia e/ou geração distribuída que pode fazer o papel de prover a energia necessária para tornar viável a mudança tarifária.

Para conseguir um modelo de desagregação mais assertivo, podem ser acrescentados dados como ocupação dos locais da residência, informações de consumo mais detalhadas de cada equipamento, inclusão de medições de corrente elétrica entre outras medidas para melhorar a capacidade de diferenciar aparelhos com potências similares. Adicionalmente, a detecção de componentes harmônicas de corrente utilizando a transformada rápida de Fourier FFT também pode ser utilizada como alternativa, caso os medidores possam prover esta informação. Assim, aumenta-se a acurácia na identificação de equipamentos com consumos com muitos estados de operação, como os de tecnologia *inverter*.

6

Referências bibliográficas

- 1 Centro Brasileiro de Informação de eficiência energética, Procel. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em março 2018.
- 2 Empresa de Pesquisa Energética <<http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Forms/EPEResenhaMensal.aspx>> Acesso em março 2018.
- 3 Instituto Nacional de Eficiência Energética, INEE. Disponível em: <<http://www.inee.org.br>>. Acesso em setembro 2017.
- 4 Costa, E. A.; Frota, M. N. Automação da medição e segurança de dados em redes inteligentes: estudo da experiência brasileira. Dissertação (mestrado) – Metrologia para a Qualidade e Inovação, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.
- 5 Rütther Ricardo, **Edifícios solares fotovoltaicos**: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil – Florianópolis: LABSOLAR, 2004.
- 6 Brito G. J. L. Sistema para monitoramento de consumo de energia elétrica particular, em tempo real e não invasivo utilizando a tecnologia Arduino - Londrina, 2016.
- 7 Rigodanzo, J. Instalação de Medidores Inteligentes No Brasil: Uma Análise Econômica. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. 2015.
- 8 Agência Nacional de Energia Elétrica - RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 733, DE 06 DE SETEMBRO DE 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016733.pdf>>. Acesso em abril 2018.
- 9 Agência Nacional de Energia Elétrica - Tarifa branca. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>. Acesso em abril 2018.
- 10 Fugita, S. D. Smart Meter Integrado a Analisador de qualidade de Energia para Propósitos de identificação de Cargas Residenciais. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de concentração

- em Sistemas Elétricos de Potência – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2014.
- 11 Ministério de Minas e Energia. Smart Grid, Relatório. 2010. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/acoes/energia-eletrica/relatorio-smart-grid>>. Acesso em abril 2018.
 - 12 G. W. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," **Proceedings of the IEEE**, vol. 80, no. 12, pp. 1870-1891, Dec. 1992.
 - 13 Reyes, A. L. Location-aware Energy Disaggregation in Smart Homes, Master's Thesis - Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Delft University of Technology - The Netherlands. 2015.
 - 14 Hannu, P. Non-intrusive appliance load monitoring system based on a modern kWh-meter. Espoo. **Technical Research Centre of Finland**, VTT Publications 356. 1998.
 - 15 Horta, D. M.; Costa, S. S. Desagregação de consumos de eletricidade residenciais com recurso a apenas um sensor. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Mecânica – Universidade Técnica de Lisboa. 2011.
 - 16 Mahmood, A. Zubair, A. K. "Modified Nonintrusive Appliance Load Monitoring For Nonlinear Devices," **2007 IEEE International Multitopic Conference**, Lahore, pp. 1-5, 2007.
 - 17 Srinivasan D.; W. S. Ng.; Liew, A. C. "Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 21, no. 1, pp. 398-405, Jan. 2006.
 - 18 Hartana, R. K.; Richards, G. G. "Constrained neural network based identification of harmonic sources," **Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, USA**, vol.2 pp. 1743-1748, 1990.
 - 19 Wijayakulasooriya, J. V.; Putrus, G. A.; Minns, P. D. "Electric power quality disturbance classification using self-adapting artificial neural networks," **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, vol. 149, no. 1, pp. 98-101, Jan. 2002.
 - 20 Rukonuzzaman, M.; Nakaoka, M. "Magnitude and phase determination of harmonic currents by adaptive learning back-propagation neural network," **Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power**

- Electronics and Drive Systems.** PEDS'99 (Cat. No.99TH8475), Hong Kong, vol.2, pp. 1168-1173, 1999.
- 21 Dash, P. K.; Swain, D. P.; Mishra, B. R.; Rahman, S. "Power quality assessment using an adaptive neural network," **Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth**, New Delhi, India, vol.2, pp. 770-775, 1996.
- 22 Santoso, S.; Powers, E. J.; Grady, W. M.; Parsons, A. C. "Discussion of "Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier-Part 1: theoretical foundation" [Closure to discussion]," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 15, no. 4, pp. 1347-1348, Oct. 2000.
- 23 Salamoni T. I. Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil –PPGEC, Florianópolis, SC. 2009.
- 24 Bundesgesetzblatt Jahrgang 2000, Teil I, Nr. 13, ausgegeben zu Bonn am [BGBl. I] 31. März 2000.
- 25 Piga, D.; Cominola, A.; Giuliani, Matteo.; Castelletti, A.; Rizzoli, A. E. "Sparse Optimization for Automated Energy End Use Disaggregation," **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, vol. 24, no. 3, pp. 1044-1051, May 2016.
- 26 ISSO tecnologia - DMI T5T Trifásico. Disponível em: <http://www.issotecnologia.com/produtos/85/dmi_t5t_trifasico>. Acesso em abril 2018.
- 27 ISSO tecnologia - TC - 100/50mA Garra. Disponível em: <http://issotecnologia.com/produtos/63/tc_100_50ma_garra>. Acesso em abril 2018.
- 28 Test Instruments - HP-9800 Hopi. Disponível em: <<http://testinstruments.pk/hp-9800-hopi>>. Acesso em: abril. 2018.
- 29 Xeres, E. V. Proposta de uma Metodologia para Avaliação das Perdas Comerciais dos Sistemas Elétricos. O caso Manaus, Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 2011.

- 30 Kelly, J. D. Disaggregation of Domestic Smart Meter Energy Data, University of London Imperial College of Science, Technology and Medicine Department of Computing. 2017.
- 31 Virginia Tech – Dados consumos eletrodomésticos usuários residenciais. Disponível em <<http://www.ari.vt.edu/research-data>>. Acesso em abril 2018.
- 32 Fujitsu-General - Ar condicionado Tecnologia Inverter. Disponível em: <<http://www.fujitsu-general.com/br/products/tecnologiainverter.html>>. Acesso em janeiro 2018.
- 33 Xpress - FICO™ Xpress Optimization Suite. [Online] Disponível em: <<http://www.fico.com/en/Products/DMTools/Pages/FICO-XpressOptimization-Suite.aspx>>. Acesso em janeiro 2018.
- 34 WOLSEY, L. A. **Integer programming**, first ed. Jhon Wiley & Sons, NewYork, 1998.
- 35 Matlab (Matrix Laboratory) versão 8.1.0.604 – Software produzido pela MathWorks Inc. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>. Acesso em dezembro 2017.
- 36 Fluke True-rms Digital Multimeters – 289. Disponível em: <http://assets.fluke.com/manuals/287_289_umpor0000.pdf>. Acesso em julho 2017.

Anexo I

Neste anexo estão apresentados os intervalos que foram considerados relevantes no dia, dado que não foi possível apresentar todos os intervalos que compõem um dia (24 horas). Devido a que o modelo de desagregação proposto neste trabalho consegue recuperar intervalos de três (3) horas, será apresentado por exemplo, o intervalo onde foi identificado um comportamento irregular para a geladeira, além do intervalo em que foi possível alocar consumo para o ar-condicionado.

Na Figura 6-1 estão apresentados os resultados da desagregação de energia elétrica no intervalo de 08:00 às 11:00, mostrando o conjunto de aparelhos que conformam cada minuto de consumo de energia elétrica.

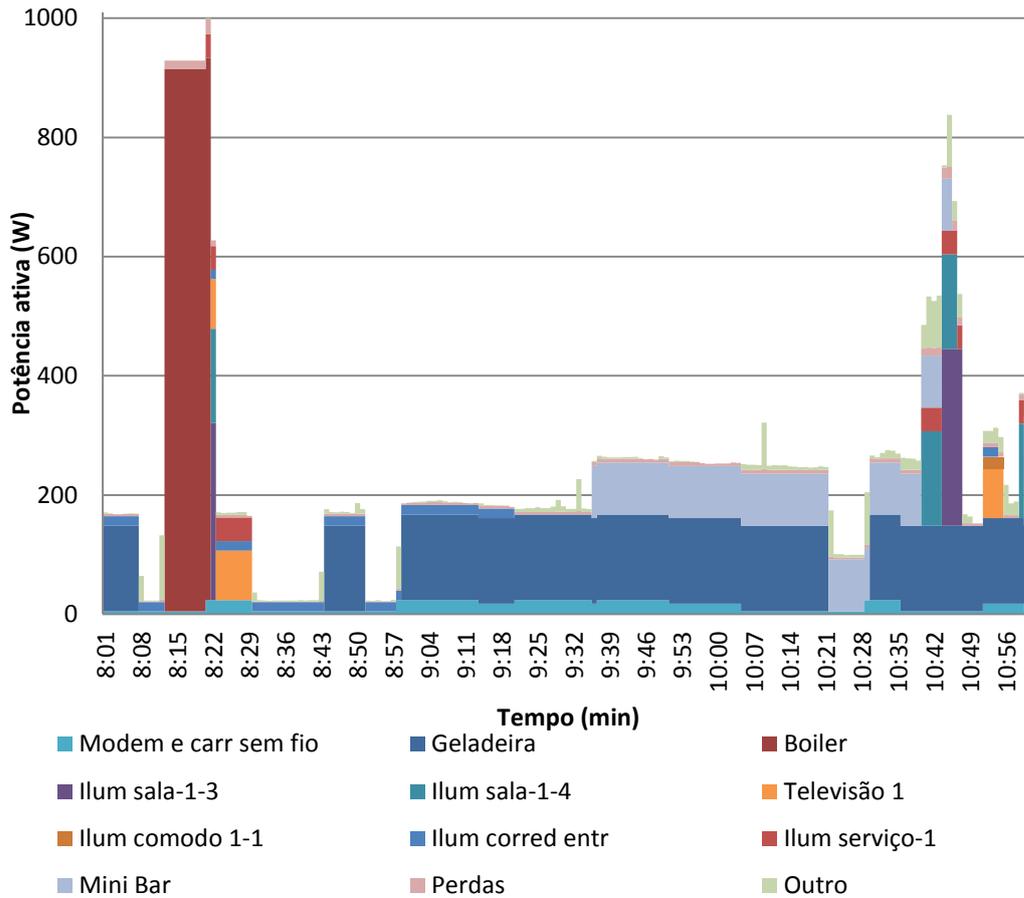


Figura 6-1 – Desagregação de energia no intervalo de 8:00 às 11:00

A Tabela 15 apresenta um resumo do consumo de energia elétrica dos aparelhos com respeito ao consumo total de energia elétrica neste intervalo.

Tabela 15 – Consumo de energia dos aparelhos no intervalo de 08:00 às 11:00

Eletrodoméstico	kWh	Proporção do total
Geladeira	0,3110	42,0%
Boiler	0,1365	18,4%
Iluminação sala-1-3	0,0248	3,3%
Iluminação sala-1-4	0,0238	3,2%
Iluminação cômodo 1-1	0,0013	0,2%
Iluminação corredor entrada	0,0195	2,6%
Iluminação serviço-1	0,0132	1,8%
Modem e carregadores sem fio	0,0405	5,5%
Televisão 1	0,0194	2,6%
Minibar	0,1019	13,8%
Perdas	0,0167	2,3%
Variável folga	0,0315	4,3%
Total	0,7401	100%

Na Figura 6-2 está apresentada uma comparação do comportamento de consumo de energia elétrica dos aparelhos não flexíveis: a geladeira e o minibar, com respeito ao total da potência medida do intervalo, representando aproximadamente o 42% e o 14% do total da energia elétrica para este intervalo de tempo, respectivamente.

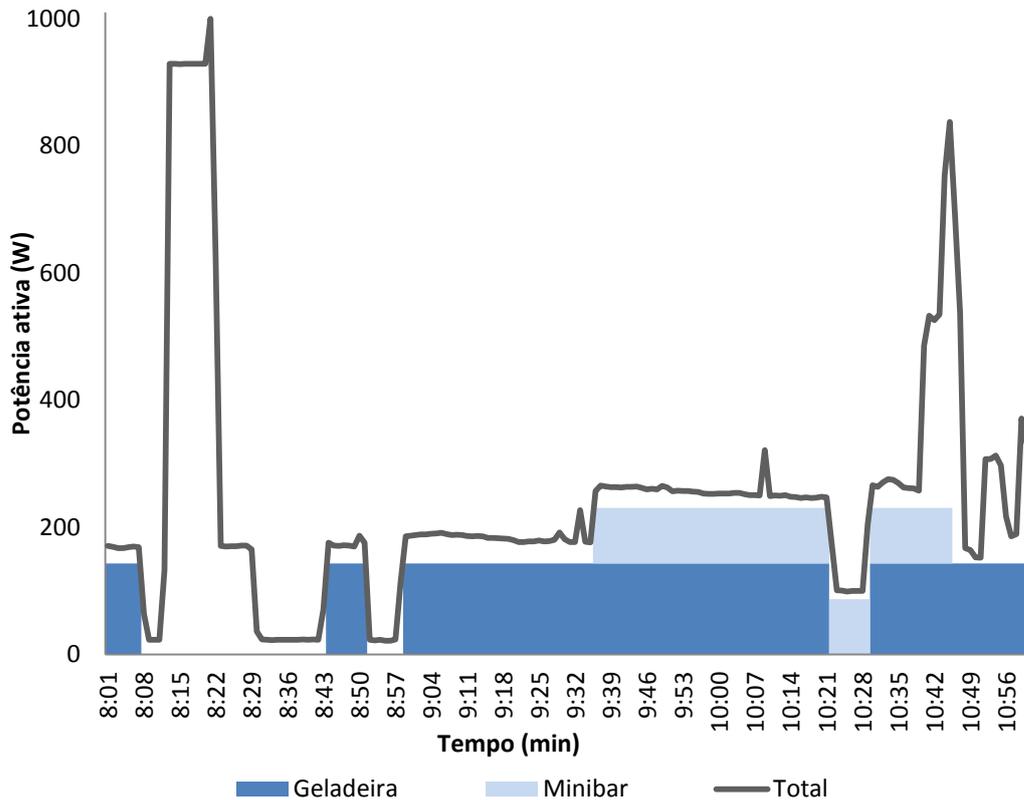


Figura 6-2 – Desagregação aparelhos não flexíveis no intervalo de 08:00 às 11:00

Observa-se que o consumo da geladeira para este intervalo é diferente ao comportamento que já foi evidenciado nela em outros intervalos, mas, este consumo pode ser gerado por uma ação do usuário, possivelmente algum fato como deixar a porta aberta ou, efetuar uma limpeza da mesma pode apresentar este tipo de comportamento, gerando um consumo elevado de energia.

Como não foi possível observar nos dados de entrada valores iguais ou semelhantes aos evidenciados para a geladeira e o minibar, como já tinha sido possível evidenciá-los para outros intervalos de tempo, não foi possível calcular métricas de avaliação.

A Figura 6-3 ilustra o comportamento do consumo de energia elétrica dos aparelhos flexíveis ao longo do mesmo intervalo de tempo.

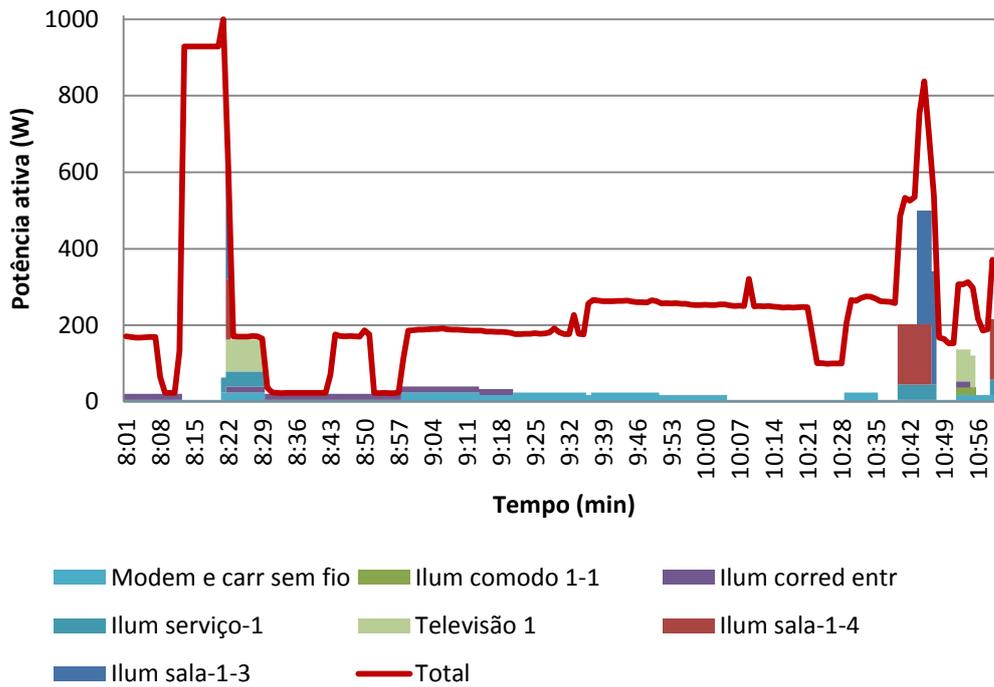


Figura 6-3 – Desagregação aparelhos flexíveis no intervalo de 08:00 às 11:00

Os resultados do modelo de otimização para a desagregação das perdas elétricas e da variável de folga estão apresentados na Figura 6-4. Como já foi evidenciado as perdas elétricas variam de acordo com o valor da potência ativa medida.

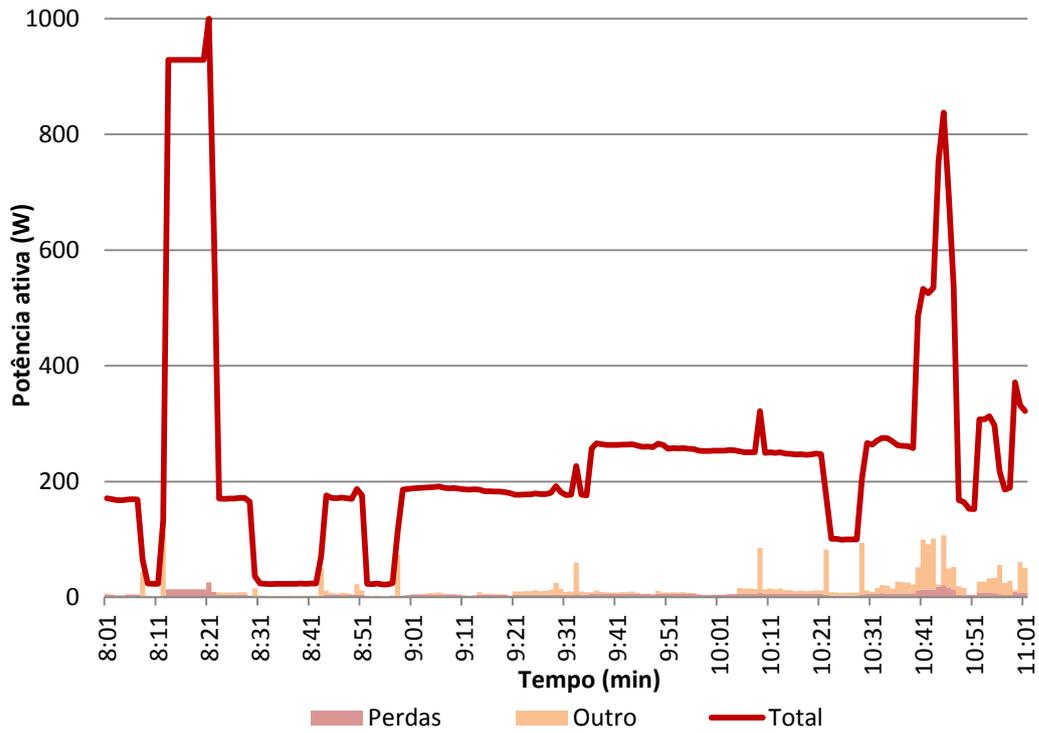


Figura 6-4 – Desagregação das perdas e da variável de folga no intervalo de 08:00 às 11:00

Na Figura 6-5 estão apresentados os resultados da desagregação de energia elétrica no intervalo de 11:00 às 14:00, mostrando o conjunto de aparelhos que conformam cada minuto de consumo de energia elétrica.

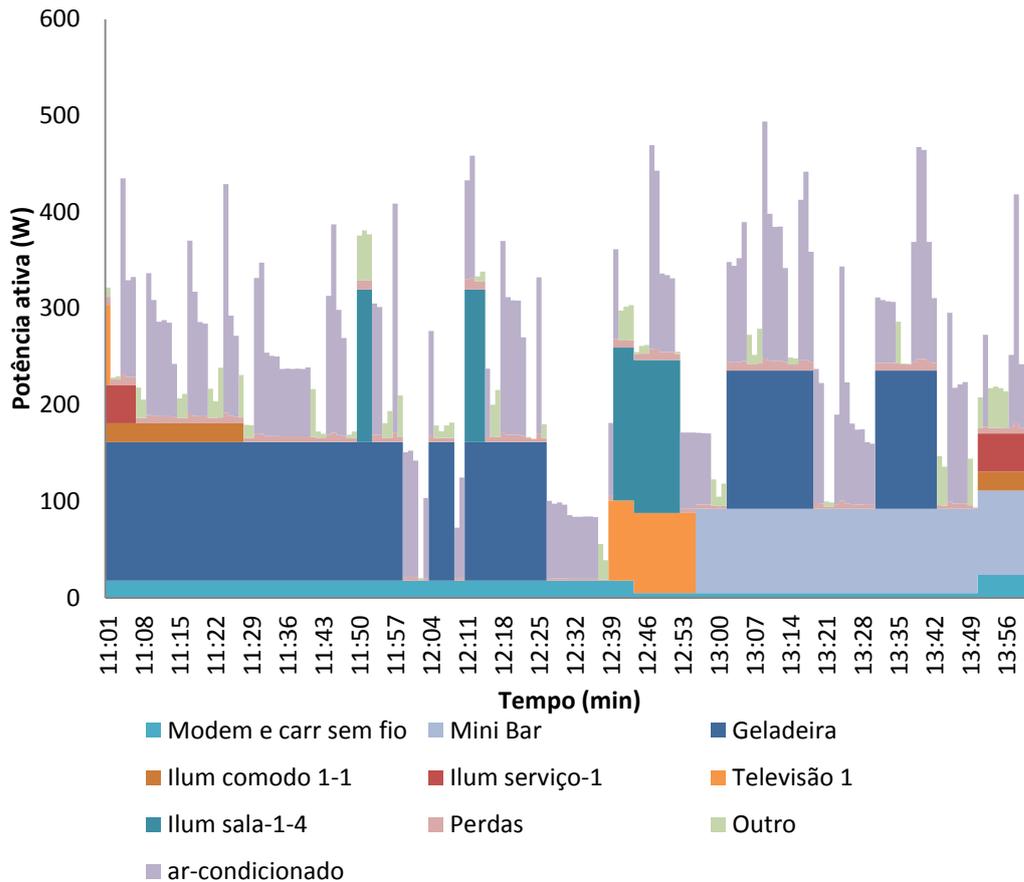


Figura 6-5 – Desagregação de energia no intervalo de 11:00 às 14:00

Na Tabela 16 apresenta um resumo do consumo de energia elétrica dos aparelhos com respeito ao consumo total de energia elétrica neste intervalo.

Tabela 16 – Consumo de energia dos aparelhos no intervalo de 11:00 às 14:00

Aparelho	kWh	Proporção do total
Geladeira	0,2584	34,2%
Iluminação sala-1-4	0,0528	7,0%
Iluminação cômodo 1-1	0,0125	1,7%
Iluminação serviço-1	0,0112	1,5%
Modem e carregador sem fio	0,0405	5,4%
Televisão 1	0,0249	3,3%
Mini Bar	0,0960	12,7%
Perdas	0,0189	2,5%
Variável folga	0,0245	3,2%
Ar-condicionado	0,2154	28,5%
Total	0,7552	100%

Na Figura 6-6 apresenta-se uma comparação do consumo de energia elétrica, para os aparelhos não flexíveis: a geladeira e o minibar com respeito ao consumo total medido neste intervalo de tempo. Representando aproximadamente 34% e o 13% do total da energia elétrica no mesmo intervalo de tempo, respectivamente.

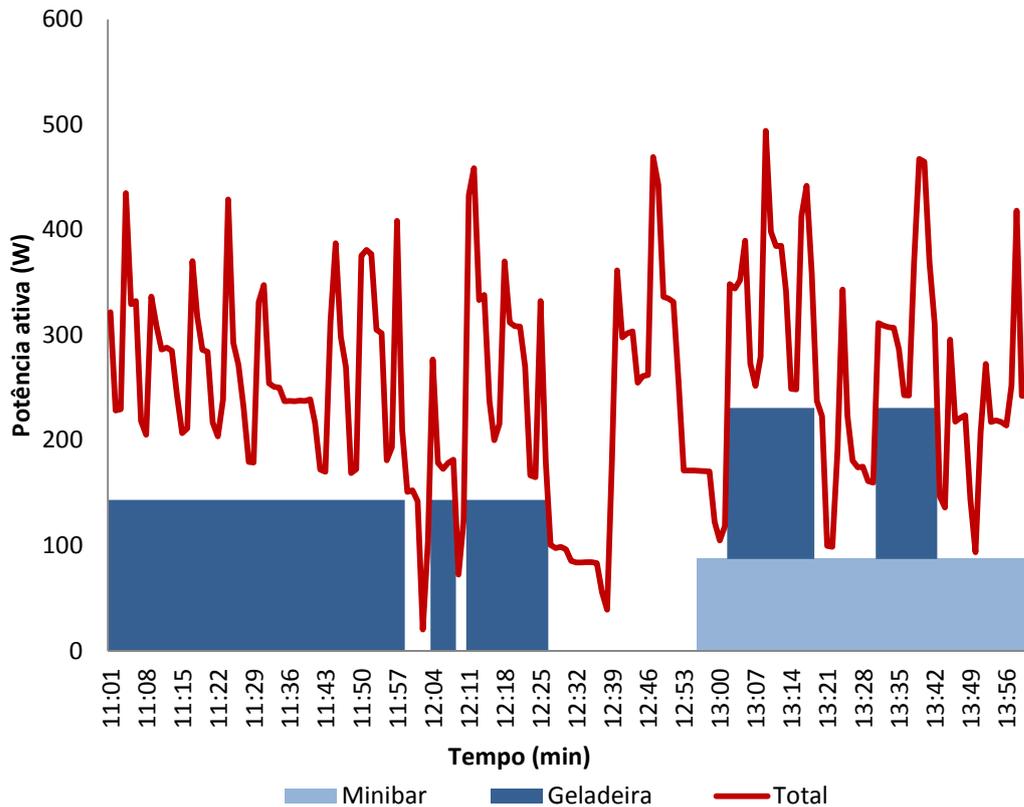


Figura 6-6 – Desagregação aparelhos não flexíveis no intervalo de 11:00 às 14:00

Da mesma forma que foi evidenciado no anterior intervalo de 8:00 às 11:00, para o intervalo atual, também não foi possível identificar nos dados de entrada, valores característicos dos consumos que já foram apresentados para a geladeira e o minibar, o que dificulta consideravelmente o cálculo das métricas de avaliação.

A Figura 6-7 apresenta o comportamento do consumo de energia elétrica dos aparelhos flexíveis ao longo do mesmo intervalo de tempo.

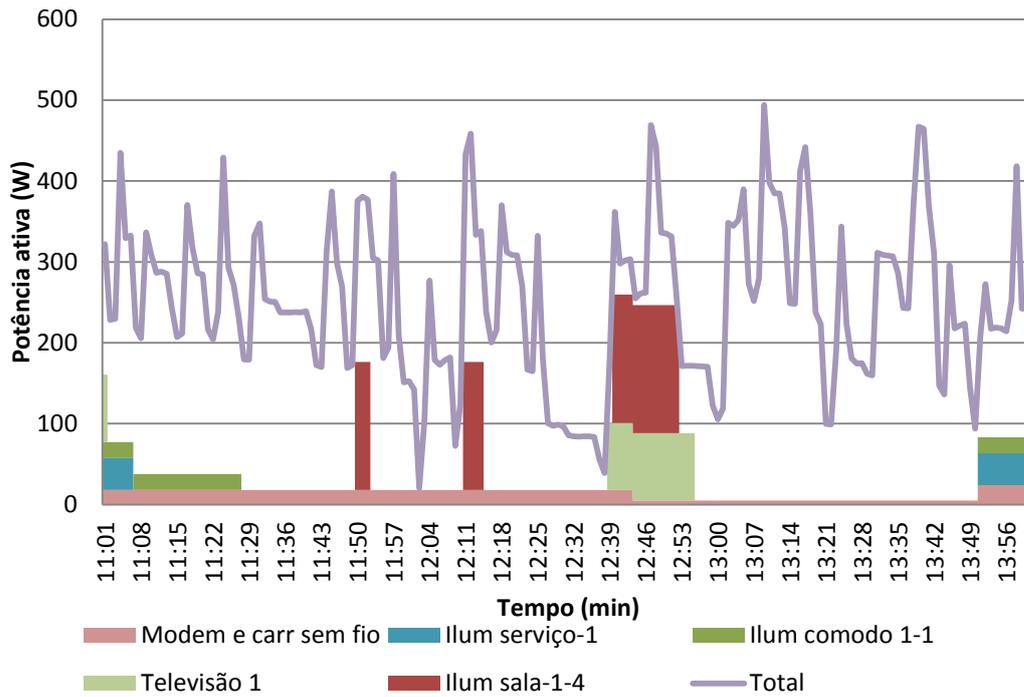


Figura 6-7 – Desagregação aparelhos flexíveis no intervalo de 11:00 às 14:00

Os resultados do modelo de otimização para a desagregação das perdas elétricas e da variável de folga estão apresentados na Figura 6-8. Entretanto, para este intervalo evidencia-se um maior uso da variável de folga, mas, mediante o pós-processamento muita da energia alocada nesta variável foi destinada para o ar-condicionado.

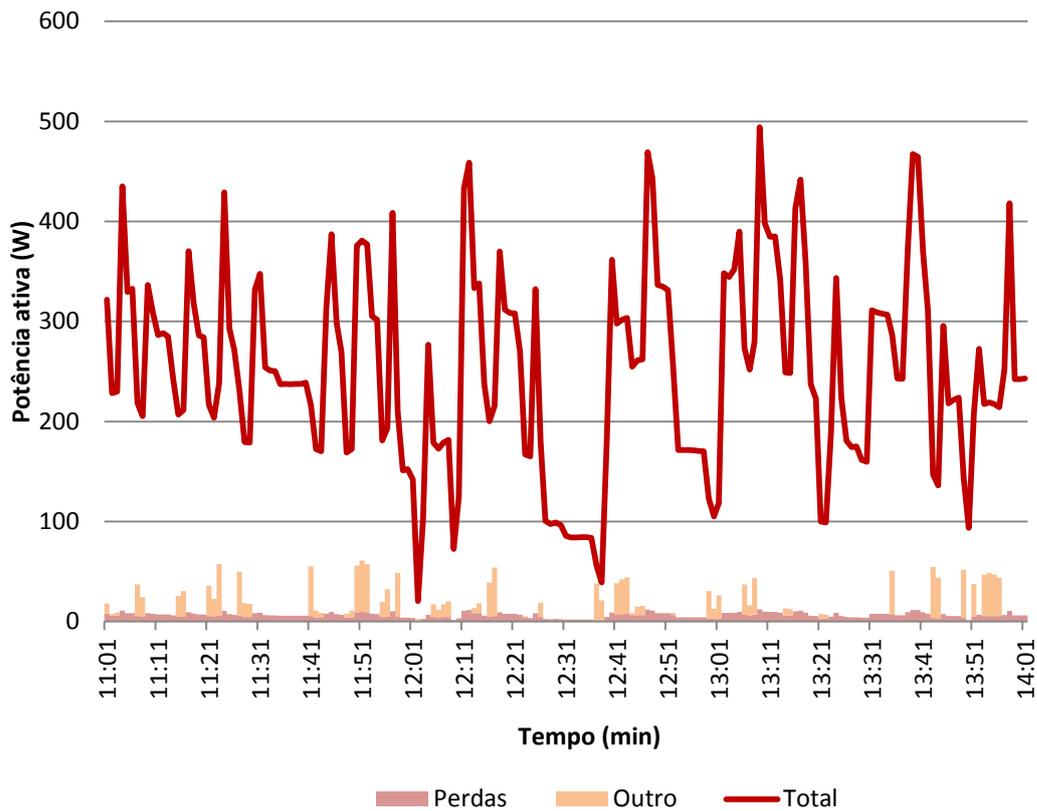


Figura 6-8 – Desagregação das perdas e da variável de folga no intervalo de 11:00 às 14:00

Como foi evidenciado na potência de entrada, observam-se muitas oscilações nos valores medidos, indicando que pode-se tratar do consumo gerado pelo tipo de ar-condicionado *inverter* do caso de estudo. Desta forma com o tratamento da variável de folga feito no pós-processamento, alocou-se energia elétrica ao ar-condicionado e, encontra-se apresentado na Figura 6-9.

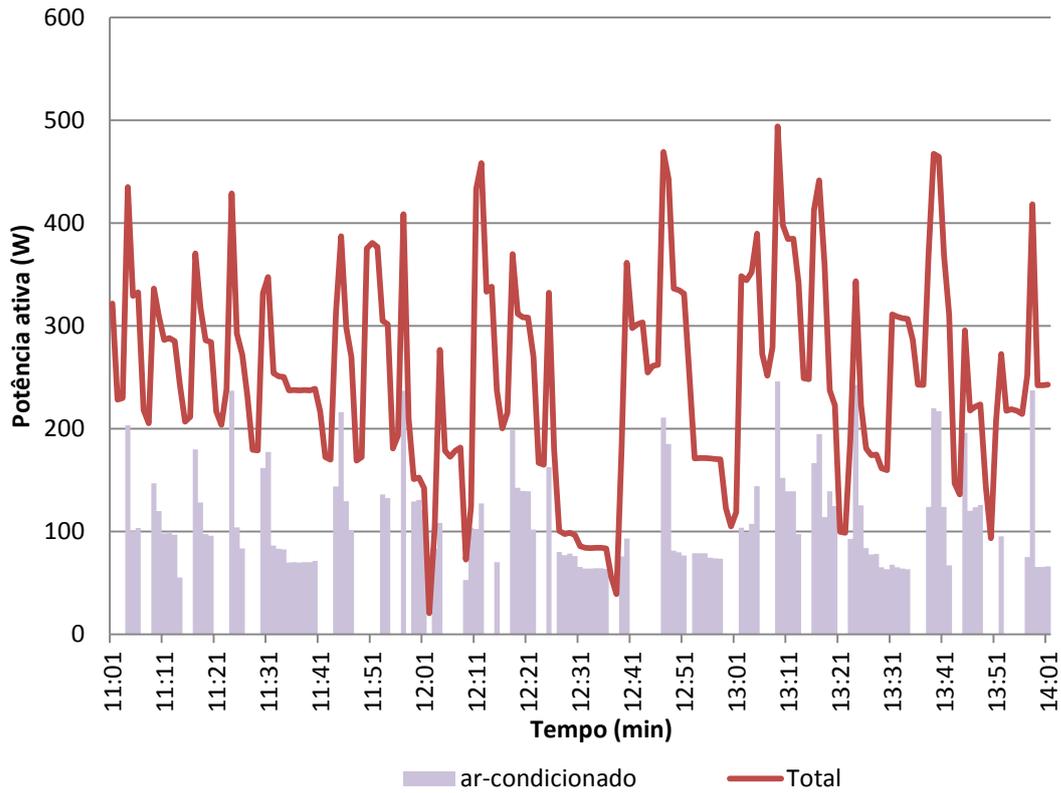


Figura 6-9 – Comportamento ar-condicionado no intervalo de 11:00 às 14:00

Com base na quantidade de energia alocada mediante a desagregação de energia, o ar-condicionado consome aproximadamente o 28,5% do total da energia elétrica total para este intervalo.

Anexo II

No presente anexo estão apresentadas as medições feitas para alguns eletrodomésticos com o intuito de comparar os dados de consumo reais com os dados desagregados. As medições individuais foram feitas com um multímetro *True-rms Digital Multimeters Fluke 289*, o qual possui uma exatidão de $(\pm 0,8\% + 5)$. As especificações de exatidão são dadas como: $\pm ([\% \text{ do valor medido }] + [\text{número de dígitos menos significativos }])$ [36].

Na Figura 6-10 apresenta-se o consumo de corrente real correspondente à geladeira. Neste caso, em função das características do medidor, nota-se que a escala apresentada está em mV, escala usada pelo multímetro que utiliza um TC tipo garra que transforma a medida de corrente para tensão, tendo que 100 mV correspondem a 1A. Apesar das medidas diretas terem sido feitas em dias diferentes das medidas usadas para a desagregação observadas no capítulo 4, nota-se um padrão de desagregação muito similar ao obtido pelo modelo. A exceção pode ser observada no pico que ocorre entre 9h e 12h, que representa a função desgelos, não prevista no modelo de desagregação.

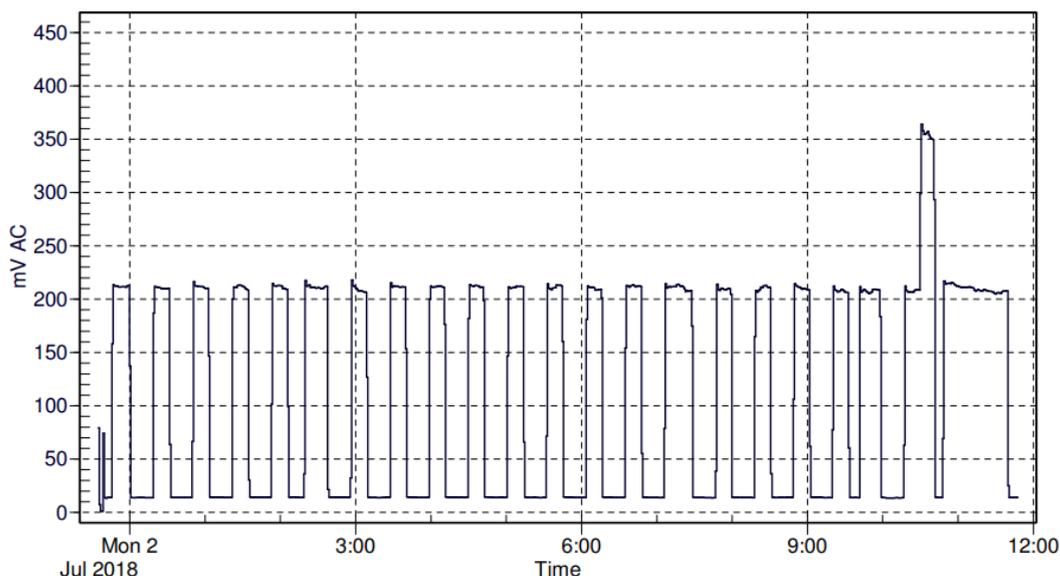


Figura 6-10 – Consumo real apresentado pela geladeira

A Figura 6-11 apresenta o consumo de corrente real correspondente ao ar-condicionado do tipo *inverter*.

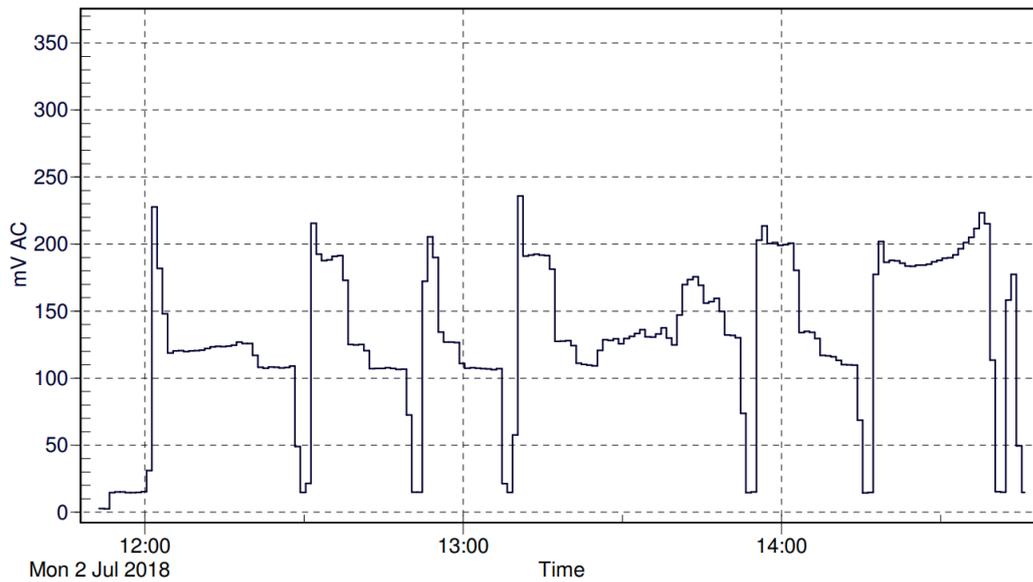


Figura 6-11 – Consumo real apresentado pelo ar-condicionado tipo *inverter*

Na Figura 6-12 apresenta-se o consumo desagregado no ar-condicionado adicionando os dados da variável de folga. No resultado apresentado no capítulo 4, a alocação do consumo do ar-condicionado, foi feita considerando uma média móvel, e, quando os valores eram muito baixos, estes não foram considerados como parte do consumo do ar-condicionado. Porém, como se nota, estes podiam fazer parte do consumo do ar-condicionado.

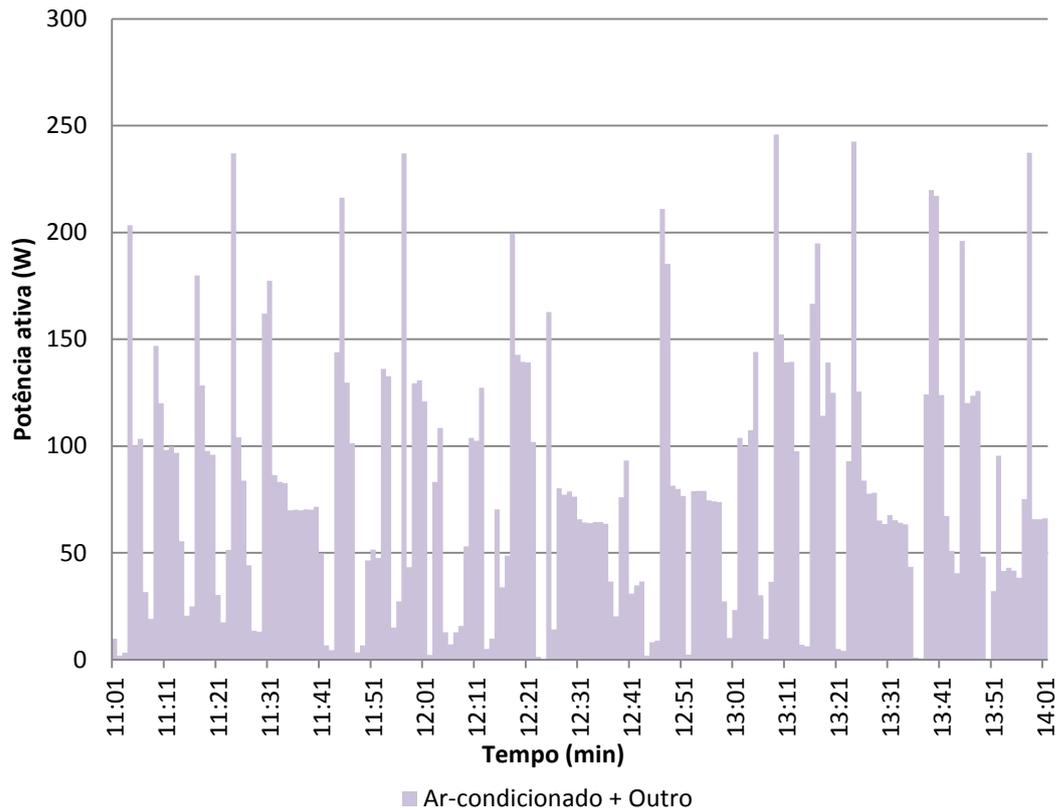


Figura 6-12 – Desagregação do consumo do ar-condicionado somando a variável de folga

Observa-se, que o consumo real do ar-condicionado do tipo *inverter*, apresenta uma semelhança com os dados desagregados mediante a abordagem proposta nesta dissertação. Entretanto, como mencionado anteriormente no caso da geladeira, estas medidas também foram tomadas em dias diferentes às medidas usadas na desagregação, o que limita a comparação dos resultados.