



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ARIEL DE SOUSA LEITÃO

METODOLOGIA PARA ESTIMAÇÃO DA CURVA DE CARGA DE UNIDADES CONSUMIDORAS INDIVIDUAIS

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2021

Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado submetida à Coordenadoria de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Ariel de Sousa Leitão

Ariel de Sousa Leitão
Orientando

Jalberth Fernandes de Araújo, D. Sc.
Orientador

Professor Avaliador

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Masileide, aos meus irmãos, Arielly e Arley e a todos os meus familiares e amigos por todo o apoio durante meus estudos.

Agradeço a minha querida Cibele por todo o amor e amizade durante todos esses anos.

Agradeço aos meus professores e colegas da universidade, especialmente meu orientador, Jalberth Fernandes de Araújo, por todos os ensinamentos e conselhos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Izadora, Henrique e Nathalia por todo o apoio e companheirismo durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso é apresentada uma metodologia do tipo *bottom-up* para estimativa de curvas de carga horárias de unidades de consumidoras individuais. A metodologia é baseada nos dados de posse e hábitos de uso de equipamento elétricos presentes nas unidades de consumidoras bem como no histórico de consumo total de energia elétrica na região de estudo. As bases de dados utilizadas são as da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial, elaborada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica do ano 2019, e dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição da Agência Nacional de Energia Elétrica. No desenvolvimento da metodologia, foram considerados dados históricos de consumo de energia elétrica, bem como fatores climáticos relacionados à utilização de equipamentos de resfriamento para avaliar a sazonalidade no perfil de consumo das residências. Com o objetivo de validar a metodologia proposta, foi realizado um estudo de caso baseado na elaboração da curva de carga para unidades consumidoras no estado da Paraíba. A partir dos resultados obtidos foi possível constatar um menor consumo nas primeiras horas do dia, seguido de um aumento nos períodos da manhã e da tarde, atingindo valores máximos durante o início da noite, às 19 horas. Os resultados obtidos foram extrapolados para estimar o consumo mensal das unidades consumidoras bem como o consumo total de energia elétrica da classe residencial na Paraíba. Foi realizada uma comparação entre os valores estimados e os dados reais, obtendo-se uma porcentagem de erro inferior a 4% e 19%, respectivamente, e um coeficiente de determinação de aproximadamente 0,80. A metodologia proposta possibilita a estimação de curvas de carga horárias para unidades consumidoras de diferentes regiões, estados e classes econômicas bem como a avaliação dos impactos dos diferentes tipos de equipamentos elétricos sobre o perfil de consumo de unidades consumidoras residenciais, possibilitando estudos específicos de eficiência energética.

Palavras-chave: Curva de carga, Abordagem *bottom-up*, Distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

In this undergraduate thesis, a bottom-up methodology is presented to estimate hourly load profiles for individual consumers. The methodology is based on the data of ownership and use habits of appliances that are present in the dwellings as well as the historical data of total electricity consumption in the study region. The database used is from the Survey of Electrical Equipment Ownership and Usage Habits in the Residential Class, elaborated by the National Electricity Conservation Program in 2019 and from the Distribution Consumption and Revenue Reports from the National Electric Energy Agency. In the development of the methodology, historical electric energy consumption data were considered, as well as climatic factors related to the use of cooling equipment to evaluate seasonality in the consumption profile of consumers. In order to validate the proposed methodology, a study case was performed based on the elaboration of the load profile for consumers in the state of Paraíba. The results for the region showed a lower consumption in the first hours of the day, followed by an increase in the morning and afternoon, reaching maximum values during the early evening, at 7 pm. The resulting data was extrapolated to estimate the monthly consumption of individuals as well as total electrical energy consumption of the residential class in Paraíba. A comparison between the estimated values and the real data was conducted, resulting in a percentage error of less than 4% and 19%, respectively, and a coefficient of determination of approximately 0.80. The proposed methodology enables the estimation of hourly load profiles for consumers from different regions, states and economic classes as well as the evaluation of the impacts of different types of electrical appliance on the consumption profile of residential consumers, facilitating specific energy efficiency studies.

Keywords: Load profile, Bottom-up approach, Distribution network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação no consumo de energia elétrica por classe de consumo	15
Figura 2 – Número de consumidores da classe residencial	16
Figura 3 – Curva de carga de um consumidor residencial.....	17
Figura 4 – Técnicas de estimação de curvas de carga	19
Figura 5 – Distribuição geográfica dos entrevistados das PPHs	24
Figura 6 – Fluxograma da metodologia proposta	27
Figura 7 – Consumo de congeladores e refrigeradores em função da temperatura	37
Figura 8 – Variação da temperatura ao longo do ano na região de estudo	37
Figura 9 – Curvas de carga dos equipamentos de “área externa” e “serviço”	41
Figura 10 - Curvas de carga dos equipamentos da categoria “eletrônicos”.....	43
Figura 11 - Curvas de carga dos equipamentos das categorias “ambiente” e “outros” ..	43
Figura 12 - Curvas de carga de refrigeradores e congeladores.....	45
Figura 13 – Curva de carga de um dia típico da classe residencial na Paraíba	46
Figura 14 – Participação dos equipamentos no consumo total.....	48
Figura 15 – Curvas de carga de dias típicos de todos os meses do ano.....	49
Figura 16 - Correlação entre o consumo estimado e médio dos entrevistados.....	51
Figura 17 - Correlação entre o consumo residencial total estimado e real.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações da PPH	23
Tabela 2 – Distribuição regional dos entrevistados por classe econômica	25
Tabela 3- Equipamentos considerados no estudo de caso.	28
Tabela 4 – Potência considerada dos equipamentos analisados.	30
Tabela 5 – Horário de uso de equipamentos eletrônicos na Paraíba.	31
Tabela 6 – Horário de uso de equipamentos de área externa e serviço na Paraíba.	32
Tabela 7 – Horário de uso de equipamentos de ambiente e outros na Paraíba.	33
Tabela 8 – Frequência de uso de equipamentos na Paraíba.	34
Tabela 9 – Média do consumo por residência no estado da Paraíba.	38
Tabela 10 – Estimativa de consumo dos equipamentos de “área externa” e “serviço”..	41
Tabela 11 - Estimativa de consumo dos equipamentos “eletrônicos”	42
Tabela 12 - Estimativa de consumo dos equipamentos de “ambiente” e “outros”	44
Tabela 13 - Estimativa de consumo de refrigeradores e congeladores.	45
Tabela 14 – Estimativa de consumo de um dia típico.	47
Tabela 15 – Correlação do consumo dos equipamentos em relação ao consumo total. .	48
Tabela 16 - Comparação entre o estimado e o consumo médio dos entrevistados.	50
Tabela 17 - Comparação entre o consumo residencial total estimado e real.	52
Tabela 18 - Posse média e potência de variações de chuveiros elétricos na Paraíba.	56
Tabela 19 - Posse média e potência de variações de condicionadores de ar na Paraíba. .	56
Tabela 20 - Posse média e potência de variações de lâmpadas na Paraíba.	56
Tabela 21 - Posse média e potência de variações de máquinas de lavar roupas.	57
Tabela 22 - Posse média e potência de variações de televisores na Paraíba.	57

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PPH	Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

C_h	Consumo estimado total na hora “h” [W]
$C_{i,h}$	Consumo do equipamento “i” na hora “h”, sem uso eventual [W]
$C_{i,h_{total}}$	Consumo do equipamento “i” na hora “h” com uso eventual [W]
$E_{i,h}$	Consumo eventual do equipamento “i” na hora “h” [W]
FU_i	Frequência de uso considerada do equipamento “i” [dias/semana]
P	Potência elétrica [W]
P_k	Potência típica do equipamento da variação “k” [W]
PC_i	Potência considerada do equipamento “i” [W]
PM_i	Posse média do equipamento “i”
PM_k	Posse média da variação “k”
R	Coefficiente de correlação de Pearson
R^2	Coefficiente de determinação
T	Temperatura ambiente [°C]
t_i	Tempo de uso médio do equipamento “i”
TE_i	Taxa de uso eventual do equipamento “i” [%]
$TU_{i,h}$	Taxa de uso do equipamento “i” na hora “h” [%]

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Objetivos	12
1.2	Estrutura do Trabalho.....	13
2	Fundamentação Teórica	14
2.1	Classes de Consumo.....	14
2.1.1	Classe Residencial	16
2.2	Estimativa de Curvas de Carga	17
2.2.1	Abordagem <i>top-down</i>	19
2.2.2	Abordagem <i>bottom-up</i>	20
2.3	Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo	23
2.4	Coefficiente de Correlação de Pearson.....	25
2.5	Coefficiente de Determinação	26
3	Metodologia	27
3.1	Posse de Equipamentos	28
3.2	Caracterização dos Equipamentos.....	29
3.3	Hábitos de Uso	30
3.4	Estimativa de Consumo Horário	35
3.5	Sazonalidade	38
4	Resultados	40
4.1	Estimativas de Curvas de Carga Típicas	40
4.2	Análise de Sazonalidade	49
4.3	Extrapolação e Validação dos Resultados.....	50
5	Conclusões	53
	Referências.....	54
	Apêndice A – Valores típicos considerados de potência elétrica	56

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência têm como função principal o fornecimento de energia elétrica com qualidade no instante em que for consumida. Os consumidores são categorizados em diferentes classes de acordo com suas características próprias. Em vista das especificidades de cada tipo de consumidor, deve-se atentar às suas características de consumo e de sazonalidade nos estudos de planejamento dos sistemas de distribuição (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2005; FRANCISQUINI, 2006; A).

Nas unidades consumidoras de classe residencial, a demanda de potência elétrica está relacionada aos equipamentos utilizados nas residências e está associada a fatores como as condições climáticas e socioeconômicas da região. A temperatura ambiente e o poder aquisitivo dos consumidores influenciam diretamente na posse de equipamentos elétricos, bem como no uso dos equipamentos que são utilizados para climatização de ambientes. Como consequência, o perfil de consumo das unidades consumidoras varia entre as diferentes regiões e classes econômicas (GENJO, *et al.*, 2005; HARRINGTON, AYE e FULLER, 2018; ALBERINI, *et al.*, 2019).

No ano de 2020, o setor residencial foi responsável por cerca de 31% do consumo total de energia no Brasil, em que os principais equipamentos elétricos que compõem esse percentual são os relacionados a: iluminação, climatização, aquecimento de água e refrigeração. Por essa razão, a análise e a estimação de curvas de carga horárias desses consumidores tornam-se complexas devido à grande variabilidade de hábitos de uso dos equipamentos elétricos por parte das unidades consumidoras. Porém, de modo geral, a curva de carga horária de uma unidade consumidora residencial caracteriza-se por apresentar um valor praticamente constante ao longo do dia com um pico no fim da tarde (FRANCISQUINI, 2006; PROCEL, 2019; EPE, 2021).

As curvas de carga são gráficos da demanda de potência em função do tempo que permitem avaliar a variação do consumo de energia elétrica de uma localidade em um dado intervalo de tempo. Com a elaboração das curvas de carga de uma região, torna-se possível analisar o comportamento dos consumidores ou de uma região como um todo, possibilitando a adoção de medidas que garantam o bom funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica. Por essa razão, é necessário que sejam realizadas estimativas de consumo de energia elétrica (PROEDROU, 2021).

Há na bibliografia duas abordagens principais de estudos de estimativa do consumo de energia elétrica: a abordagem *top-down* e a abordagem *bottom-up*. A abordagem *top-down* é baseado em parâmetros agregados tais como indicadores macroeconômicos, climáticos etc. Por essa razão, essa abordagem tem como principal desvantagem o fato de seus resultados não apresentarem informações detalhadas sobre os usos finais da energia. Por outro lado, sua principal vantagem está associada a maior disponibilidade de dados necessários para a realização das estimativas. Em contrapartida, a abordagem *bottom-up* é baseada na utilização de dados desagregados relacionados ao consumo de energia elétrica tais como posses, características locais e hábitos de uso dos equipamentos elétricos para estimação do consumo total de uma região. A principal vantagem deste método está relacionada ao detalhamento dos resultados, possibilitando a identificação dos impactos individuais de cada um dos equipamentos analisados. No entanto, essas características fazem com que essa abordagem necessite de grandes bases de dados, sendo esta a sua principal desvantagem (STREICHER et al., 2019; TEIXEIRA, 2020; PROEDROU, 2021).

No Brasil, os dados necessários para realizar estimativas de curvas de carga utilizando a abordagem *bottom-up*, foco deste trabalho, podem ser obtidos a partir dos resultados de pesquisas tais como a Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH). A PPH mais recente, elaborada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), no âmbito do Plano de Aplicação de Recursos, foi publicada no ano de 2019. Trata-se de uma pesquisa declaratória com participantes distribuídos por todas as regiões do Brasil visando avaliar o mercado de eficiência energética nacional. A partir do conhecimento desses dados é possível desenvolver estudos com base em metodologias do tipo *bottom-up* para a estimação das curvas de carga horárias de consumidores residenciais de diferentes regiões e classes econômicas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral propor uma metodologia de estimação da curva de carga de unidades consumidoras individuais conectadas à rede de distribuição bem como o estudo de sua sazonalidade de acordo com a região de estudo.

Para que o objetivo geral seja alcançado, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as posses e hábitos de uso de equipamentos elétricos das unidades consumidoras;
- Identificar as características de funcionamento, de consumo, de uso e de sazonalidade dos equipamentos elétricos de maior influência na carga das unidades consumidoras;
- Estimar a curva horária de carga de energia elétrica das unidades consumidoras a partir da composição das curvas de carga dos principais equipamentos elétricos identificados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por cinco capítulos, incluindo esta introdução, descritos a seguir:

- No capítulo 2 está presente a fundamentação teórica necessária para o entendimento do trabalho;
- No capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta de estimação de curvas de carga;
- No capítulo 4 estão presentes os resultados obtidos a partir da realização dos procedimentos descritos no capítulo 3;
- No capítulo 5 estão presentes as considerações finais relativas aos resultados obtidas;
- No apêndice A estão apresentadas as potências típicas consideradas nos cálculos das curvas de carga dos equipamentos elétricos analisados neste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários para o entendimento deste trabalho. As subseções seguintes estão divididas em Classes de Consumo, Estimativa de Curvas de Carga, Pesquisas de Posse e Hábitos de Consumo, Coeficiente de Correlação de Pearson e Coeficiente de Determinação.curva

2.1 CLASSES DE CONSUMO

Os consumidores de energia elétrica são quaisquer pessoas físicas ou jurídicas, ou comunhão de fato ou de direito, legalmente representada, que solicita à distribuidora ou à comercializadora o fornecimento de energia elétrica e assume a responsabilidade pelo pagamento das faturas e pelas demais obrigações fixadas em normas e regulamentos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2018). As unidades consumidoras presentes nos sistemas de distribuição são classificadas em oito classes distintas, cada uma com diferentes subclasses, de acordo com a atividade exercida (ANEEL, 2010). As classes de consumo são:

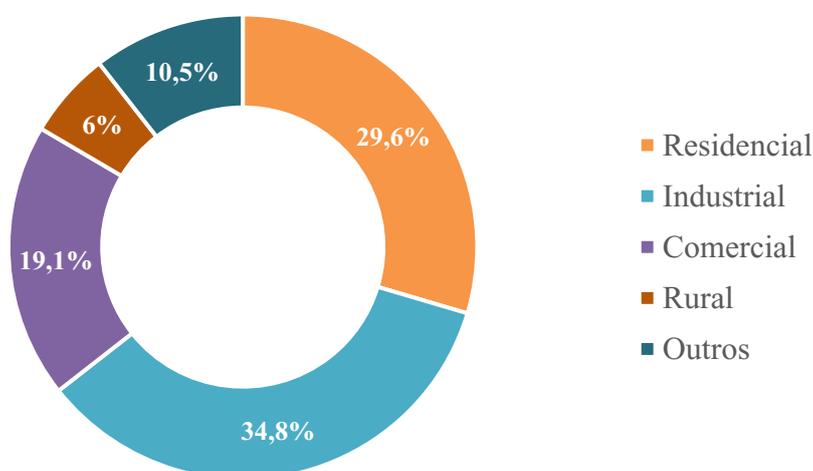
- Residencial;
- Industrial;
- Comércio, serviços e outras atividades;
- Rural;
- Poder público;
- Iluminação pública;
- Serviço público;
- Consumo próprio.

A classe residencial é a que possui o maior número de consumidores (cerca de 85% do total) e é responsável por aproximadamente 30% do consumo de energia elétrica no Brasil, consumo esse que é menor apenas que o da classe industrial (EPE, 2020). As unidades consumidoras da classe industrial, por sua vez, são classificadas de acordo com o ramo de atividade e pela faixa de consumo de energia elétrica, estando normalmente

conectadas diretamente à rede de distribuição de média tensão (FRANCISQUINI, 2006). Similarmente, os consumidores comerciais são classificados por ramo de atividade bem como pelo consumo mensal de energia elétrica (MARQUES, 2014).

A classe rural foi criada a partir do Decreto nº 7.891, de 2013 e abrange as unidades consumidoras que desenvolvem atividades no ramo da agropecuária (rural ou urbana), agroindústria, aquicultura, ensino rural, residência, cooperativa e serviço de irrigação, totalizando oito subclasses (ANEEL, 2015). Além disso, as classes de poder público, iluminação pública e serviço público estão relacionadas ao consumo de energia elétrica por parte de unidades de responsabilidade de consumidor que seja pessoa jurídica de direito público e a prestação de serviço público de responsabilidade do poder público, respectivamente, responsáveis por cerca de 10,5% do consumo total de energia elétrica no Brasil (EPE, 2020). Na Figura 1 é apresentada composição do consumo de energia elétrica no Brasil por classe de consumo no ano de 2019, último ano com dados consolidados e divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Figura 1 – Participação no consumo de energia elétrica por classe de consumo.



Fonte: EPE, 2020.

A partir das informações presentes na Figura 1 é possível constatar que as classes industrial, residencial e comercial são responsáveis por mais de 80% do consumo total de energia elétrica no Brasil, sendo 29,6% associados à classe residencial, foco do estudo de caso presente neste trabalho. Na subseção a seguir serão abordadas as principais características e aspectos relativos à classe residencial e suas subclasses.

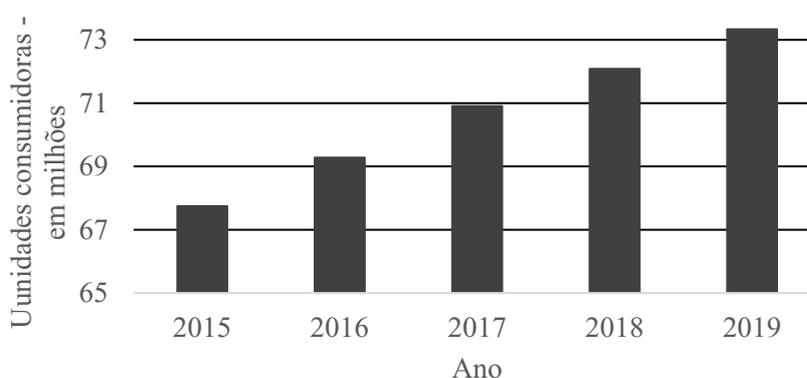
2.1.1 CLASSE RESIDENCIAL

A classe residencial compreende as unidades consumidoras com fim residencial, subdivididas de acordo com características socioeconômicas (ANEEL, 2010). Existem seis subclasses no setor residencial:

- Residencial;
- Residencial baixa renda;
- Residencial baixa renda indígena;
- Residencial baixa renda quilombola;
- Residencial baixa renda benefício de prestação continuada;
- Residencial baixa renda multifamiliar.

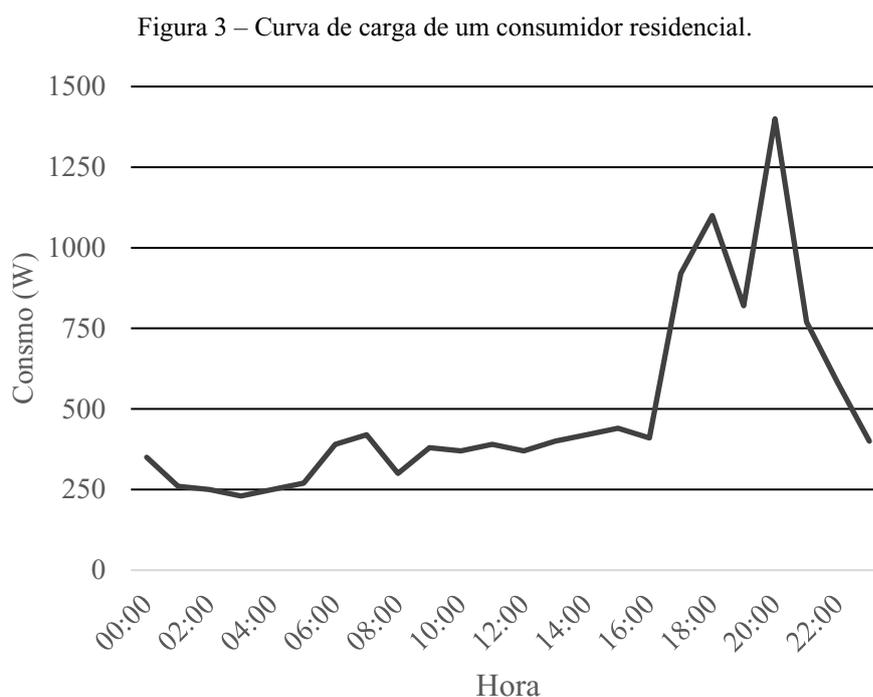
No ano de 2019, conforme apresentado na Figura 1, a classe residencial foi responsável por 29,6% do consumo total de energia elétrica no Brasil, sendo superado apenas pelo setor industrial. O consumo total do setor residencial brasileiro aumentou de 131,190 GWh para 142,781 GWh entre os anos de 2015 e 2019, resultando em um crescimento de 8,84% (EPE, 2020). Além disso, na Figura 2 está apresentada a variação do número de unidades consumidoras na classe residencial no Brasil entre os anos de 2015 e 2019, onde também é possível constatar um crescimento de 8,24%. O crescimento do setor residencial brasileiro reforça a necessidade de estudos relativos ao perfil de consumo das unidades consumidoras, necessários para o planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Figura 2 – Número de consumidores da classe residencial.



Fonte: EPE, 2020.

De modo geral, a curva de carga de uma unidade consumidora da classe residencial é caracterizada por um baixo consumo nas primeiras horas do dia seguido por um aumento do consumo no fim da tarde, momento em que atinge seus valores máximos (FRANCISQUINI, 2006). Na Figura 3 é apresentada uma curva de carga de um dia de um consumidor residencial cujo consumo mensal é de aproximadamente 330 kWh.



Fonte: Adaptado de FRANCISQUINI, 2006.

A partir da Figura 3 é possível observar um menor consumo no período da manhã bem como o seu aumento a partir das 17 horas, atingindo o valor máximo de 1400 W às 20 horas.

Na subseção a seguir serão esclarecidos o conceito e a relevância do estudo das curvas de carga bem como as diferentes abordagens para a sua estimação.

2.2 ESTIMATIVA DE CURVAS DE CARGA

Uma curva de carga é um gráfico de potência em função do tempo que permite verificar a variação do consumo de energia elétrica de uma localidade em um dado intervalo de tempo. Essas curvas são de grande importância na determinação das necessidades de provisão energético, em estudos de alteração de consumo

devido à introdução de novas tecnologias e no planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, uma vez que possibilitam a constatação dos horários em que a demanda é mais elevada (GRANDJEAN, ADNOT e BINET, 2012).

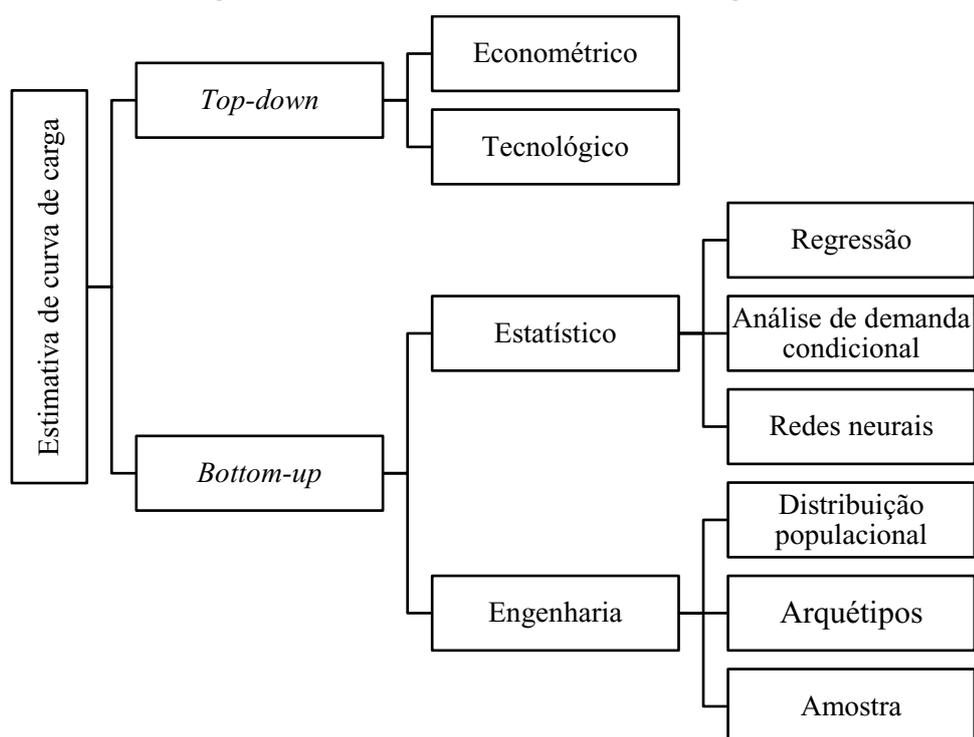
Em geral, esses estudos de planejamento por meio das curvas de carga são realizados com foco na demanda total da rede de distribuição de energia elétrica, incluindo o consumo de cargas comerciais, industriais, residenciais etc. Por essa razão, frequentemente é considerado que o perfil de consumo das unidades consumidoras residenciais apresenta pouca variação, independentemente de condições socioeconômicas, sendo comum em vários países o uso de uma única curva de carga padronizada para os estudos de planejamento energético (PROEDROU, 2021).

Apesar do uso frequente de curvas de carga padronizadas de consumidores residenciais, é sabido que fatores como temperatura e o poder aquisitivo influenciam diretamente na posse de equipamentos elétricos bem como no padrão de consumo desses equipamentos. Por exemplo, consumidores residenciais de regiões mais frias utilizam com maior frequência e possuem um maior número de equipamentos destinados ao aquecimento de água, tais como chuveiros e torneiras elétricas, do que consumidores de regiões mais quentes. Conseqüentemente, o perfil de consumo de energia elétrica entre consumidores residenciais não é homogêneo e, por essa razão, é de grande importância conhecer o perfil de carga desses consumidores (GENJO *et al.*, 2005; ALBERINI *et al.*, 2019).

Tradicionalmente, os estudos de estimativa de curvas de carga são categorizados a partir de duas abordagens principais: a abordagem *top-down* e a abordagem *bottom-up*. Esses dois tipos de abordagem estão relacionados à posição hierárquica dos dados utilizados nas estimativas com relação ao todo, isto é, tratando o sistema elétrico como um todo ou de modo desagregado. A disponibilidade de diferentes tipos de dados é determinante na escolha do método de estimação a ser empregado (SWAN e UGURSAL, 2009).

Na Figura 4 é apresentado um organograma com diferentes técnicas de estimação de curvas de carga derivadas das abordagens *top-down* e *bottom-up*, em que se destaca a diversidade de técnicas, principalmente associadas a abordagem *bottom-up*. Nas subseções a seguir são discutidos em maiores detalhes as principais técnicas e características das abordagens do tipo *top-down* e *bottom-up* para a estimação de curvas de carga.

Figura 4 – Técnicas de estimação de curvas de carga.



Fonte: Adaptado de SWAN e UGURSAL, 2009.

2.2.1 ABORDAGEM TOP-DOWN

Na abordagem *top-down* a curva de carga de uma região é estimada a partir do uso de macro-variáveis em conjunto com preditores estocásticos de modo a relacionar essas variáveis ao de consumo de energia elétrica. Os preditores estocásticos são baseados na análise de séries temporais como, por exemplo, métodos de média móvel autorregressiva (PROEDROU, 2021).

Segundo Swan e Ugursal (2009), há duas técnicas principais de aplicação da abordagem *top-down*: a técnica tecnológica, em que são utilizadas variáveis relativas ao consumo total de energia elétrica, e a técnica econométrica, em que são utilizadas variáveis relativas à aspectos econômicos do consumo de energia elétrica. Algumas das principais macro-variáveis utilizadas nessas técnicas são:

- Consumo total de energia elétrica na região/classe de consumo;
- Histórico de consumo de energia elétrica;
- Produto Interno Bruto (PIB);
- Renda;
- Taxa de desemprego;

- Características estruturais das residências;
- Condições climáticas.

A principal vantagem da abordagem *top-down* está relacionada ao fato de não ser necessário o uso de informações relativas ao uso de equipamentos elétricos individuais. Por outro lado, a falta de informações sobre os usos finais da energia elétrica faz com que essa abordagem não seja adequada para a avaliação dos impactos da adoção de novas tecnologias e/ou mudanças nos hábitos dos consumidores, inviabilizando estudos mais detalhados acerca de medidas de redução do consumo. Além disso, a necessidade de dados históricos e a falta de detalhamento dos resultados são as principais desvantagens dessa abordagem, fazendo com que os modelos do tipo *top-down* sejam adequados para estudos de dimensionamento de transformadores e planejamento de redes de distribuição (SWAN e UGURSAL, 2009; PROEDROU, 2021).

De acordo com Proedrou (2021), de modo geral, as técnicas do tipo *top-down* são desenvolvidas a partir dos seguintes passos:

- i. Coleta de dados históricos de consumo de energia elétrica;
- ii. Determinação das macro-variáveis a serem utilizadas;
- iii. Categorização e combinação das macro-variáveis;
- iv. Análise da série temporal histórica e determinação dos preditores estocásticos, caso necessário;
- v. Combinação dos preditores estocásticos com as macro-variáveis para gerar a curva de carga.

Na subseção a seguir serão abordados os principais aspectos relacionados a abordagem *bottom-up* para a estimação de curvas de carga.

2.2.2 ABORDAGEM *BOTTOM-UP*

Na abordagem *bottom-up* são utilizados dados desagregados de modo a identificar o consumo de energia elétrica de diferentes equipamentos e de diferentes tipos de consumidores. Portanto, nessa abordagem são estimadas curvas de carga de consumidores individuais representativos, ou seja, que possuem um perfil de consumo médio para a região de estudo. Desse modo, os resultados obtidos podem ser extrapolados para o

cálculo do perfil de carga de uma dada região (STREICHER *et al.*, 2019). Tradicionalmente, as técnicas do tipo *bottom-up* são classificadas em duas categorias distintas: técnicas estatísticas e técnicas de engenharia, conforme apresentado na Figura 4 (PROEDROU, 2021).

Nos métodos estatísticos são utilizadas macro-variáveis e dados socioeconômicos, tais como o consumo total de energia elétrica e a renda, em conjunto com técnicas de regressão que relacionam o uso dos equipamentos elétricos ao consumo de energia, incorporando características tanto da abordagem *bottom-up* quanto da abordagem *top-down* (SWAN e UGURSAL, 2009). As principais técnicas estatísticas de estimação de curva de carga estão descritas a seguir:

- Regressão – São utilizadas análises regressivas de modo a determinar modelos com coeficientes que relacionem os parâmetros de entrada ao consumo de energia elétrica;
- Análise de demanda condicional – São empregadas análises regressivas de modo a determinar coeficientes que relacionem a posse de equipamentos elétricos ao consumo total de energia;
- Redes neurais – São utilizados modelos matemáticos com o objetivo de realizar análises de consumo considerando a interferência do uso de um equipamento no perfil de consumo dos demais itens.

Por outro lado, nos métodos de engenharia as estimativas de consumo são realizadas a partir das características de funcionamento dos diferentes tipos de equipamentos elétricos e seu padrão de uso. Portanto, são necessários dados de potência nominal dos equipamentos bem como variáveis relacionadas à frequência de uso de cada um dos equipamentos. Segundo Swan e Ugursal (2009) “os métodos de engenharia são os únicos capazes de estimar o consumo de energia elétrica de um setor sem nenhum tipo de dado histórico.” As principais técnicas de engenharia para estimação de curva de carga estão descritas a seguir:

- Distribuição populacional – São utilizados dados de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos juntamente com suas características de consumo de modo a calcular o perfil consumo de cada equipamento individualmente. O perfil de consumo de uma dada região é, então,

estimado a partir da composição das curvas de carga representativas dos diferentes equipamentos, extrapolando os resultados à nível regional;

- Arquétipos – Nesta técnica é considerada uma classificação dos consumidores do setor residencial de acordo com a área, estrutura arquitetônica etc., de modo a estimar o consumo de energia elétrica para cada uma dessas classes a partir de parâmetros como troca de calor e iluminação, por exemplo;
- Amostragem – Semelhante à técnica de distribuição populacional, nesta técnica são utilizados dados de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos de uma amostra representativa de uma região, admitindo que as curvas de carga calculadas podem ser extrapoladas para toda uma cidade/estado/país.

Segundo Proedrou (2021), de modo geral, as técnicas do tipo *bottom-up* são abordados a partir dos seguintes passos:

- i. Determinação das micro-variáveis utilizadas (posse de equipamentos, potência nominal etc.);
- ii. Avaliação dos hábitos de uso de cada um dos equipamentos;
- iii. Cálculo do perfil de consumo de cada um dos equipamentos;
- iv. Composição dos dados individuais dos diferentes equipamentos para estimação da curva de carga da unidade consumidora com um todo.

As principais vantagens da abordagem *bottom-up* estão relacionadas ao fato de não ser necessário o conhecimento de dados históricos de consumo e ao detalhamento dos resultados, uma vez que são consideradas as contribuições individuais de cada equipamento. Essas características possibilitam análises dos impactos no perfil de consumo com a introdução de novas tecnologias e/ou alterações no padrão de consumo dos indivíduos. A principal desvantagem dessa abordagem é a necessidade de dados detalhados e abrangentes de modo a representar o perfil dos consumidores da região de estudo (STREICHER *et al.*, 2019; PROEDROU, 2021).

Na seção a seguir são discutidas as principais pesquisas relacionadas a posse de equipamentos elétricos no Brasil, utilizadas como base de dados para estimativas do tipo *bottom-up*.

2.3 PESQUISAS DE POSSE E HÁBITOS DE CONSUMO

A primeira pesquisa de campo quantitativa relacionada a posse de equipamentos elétricos e hábitos de consumo no Brasil foi realizada no ano de 1988 com a coordenação da Eletrobras, por meio do PROCEL (TEIXEIRA, 2020). Essa primeira pesquisa foi realizada com a participação de 10.818 entrevistados da classe residencial em 291 municípios de 23 estados e do Distrito Federal. Foi sucedida por uma nova pesquisa realizada entre os anos de 1997 e 1998 e executada pela PUC-Rio em 15 estados e no Distrito Federal. Uma terceira pesquisa foi realizada entre os anos de 2004 e 2006, esta última abrangendo as classes residencial, comercial, industrial e poder público, com um total de 14.442 questionários aplicados (PROCEL, 2017).

A mais recente pesquisa de posses e hábitos de uso de equipamentos elétricos foi realizada pelo PROCEL no ano de 2019, abrangendo consumidores da classe residencial dos 26 estados e do Distrito Federal. Segundo o PROCEL (2019), foi utilizada uma amostra de 1.100 residências nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Bahia e, nos demais estados, foram coletadas informações de 625 residências, abrangendo todas as cidades e capitais com ao menos cem mil domicílios e, nas mesorregiões em que não há cidades com essa quantidade de domicílios, a pesquisa foi realizada na cidade com o maior número de residências, totalizando 18.775 questionários aplicados.

Na Tabela 1 a seguir são apresentadas as informações coletadas pelo PROCEL na PPHs realizadas, em que é possível verificar a presença de informações que podem ser utilizadas na estimativa de curvas de carga por meio de técnicas do tipo *bottom-up*, conforme discutido anteriormente.

Tabela 1 – Informações da PPH.

Informações sobre o domicílio	Informações sobre os equipamentos elétricos
Número de pessoas por domicílio	Tipo, quantidade e padrão de uso de lâmpadas por cômodo
Tipos de domicílios	Quantidade e padrão de uso de equipamentos elétricos
Tipos de cômodos	Tipo de aquecimento de água para banho
Material de paredes, coberturas e pisos	Hábitos de uso dos chuveiros elétricos
Área construída dos domicílios	Tipo, número e frequência de uso do ar condicionado

Fonte: TEIXEIRA, 2020.

Na Figura 5 é apresentada a distribuição geográfica das cidades em que foram aplicados os questionários das PPHs de 2004-2006 e de 2019, em que é possível observar a maior abrangência da pesquisa mais recente.

Figura 5 – Distribuição geográfica dos entrevistados das PPHs.



Fonte: TEIXEIRA, 2020.

Entre os objetivos da PPH-2019, buscou-se comparar a posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos correspondente a cada região do Brasil, estratificar o consumo de equipamentos elétricos na classe de consumo residencial, verificar o nível de consciência sobre o uso eficiente da energia elétrica e identificar as ações de eficiência energética (PROCEL, 2019). Para que os objetivos da PPH-2019 fossem atingidos, os entrevistados foram indagados em relação as informações contidas na Tabela 1 bem como em relação a posse e uso de 59 equipamentos divididos em sete categorias distintas: cozinha (19 equipamentos), serviço (7 equipamentos), ambiente (4 equipamentos), eletrônicos (14 equipamentos), ferramentas (3 equipamentos), área externa (5 equipamentos) e outros (4 equipamentos). Além disso, também são disponibilizados dados referentes a frequência, tempo e horário de uso dos equipamentos e, em alguns casos, variação dos hábitos de uso do equipamento ao longo do ano. Dentre os equipamentos abrangidos pela PPH-2019, apenas dos chuveiros elétricos, condicionadores de ar e lâmpadas foram coletadas informações de potência elétrica, sendo os demais equipamentos categorizados por outras características (tamanho, volume, número de portas etc.) (TEIXEIRA, 2020).

A amostra da PPH foi determinada com base em um modelo probabilístico com nível de confiança de 95% e erro de amostragem de 1,0% no Brasil, 3,0% nas regiões geográficas e 4,0% nos estados e no Distrito Federal (PROCEL, 2019). A divisão proporcional da amostra em relação a classe econômica na PPH foi realizada de modo a abranger as regiões geográficas isoladamente e o país como um todo.

Na Tabela 2 está apresentada a distribuição dos participantes da PPH-2019 por região e classe econômica. Nela, é possível constatar que foram contemplados consumidores de todas as regiões e classes econômicas. Nas regiões Norte e Nordeste, a maior parte dos participantes selecionados fazem parte das classes D e E, enquanto nas regiões Centro Oeste, Sudeste e Sul predomina a participação das classes C1 e C2, de modo proporcional a composição populacional de cada local. Dessa forma, as informações presentes na pesquisa são representativas de cada região, possibilitando a realização de estudos cujos resultados reflitam as características das diferentes localidades.

Tabela 2 – Distribuição regional dos entrevistados por classe econômica.

Região	Número de entrevistados por classe econômica					
	A1	B1	B2	C1	C2	D-E
Norte	89	131	481	611	1.225	1.838
Nordeste	71	133	622	927	1.471	2.876
Centro Oeste	99	151	498	550	651	551
Sudeste	145	271	894	1.055	941	619
Sul	62	118	402	550	456	287

Fonte: PROCEL, 2019.

2.4 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida da correlação linear entre dois conjuntos de dados e é definido como a razão entre a covariância das duas variáveis e o produto de seus desvios-padrão (SHEUGH e ALIZADEH, 2015). O coeficiente de correlação varia entre -1 e 1, em que valores próximos de zero indicam baixa correlação entre os dados e valores próximos de 1 indicam forte correlação entre os dados, podendo esta correlação ser positiva ou negativa (FENG *et al.*, 2019).

Na Equação (1) está presente como é calculado o coeficiente de correlação de Pearson,

$$R = \frac{\sum(x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \cdot \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

em que R é o coeficiente de correlação de Pearson, x e y são as variáveis do conjunto de dados e \bar{x} e \bar{y} são os valores médios das variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado neste trabalho na avaliação da contribuição individual de cada equipamento elétrico na curva de carga total de uma unidade consumidora típica.

2.5 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

O coeficiente de determinação é numericamente igual ao quadrado do coeficiente de correlação de Pearson e, portanto, assume valores entre 0 e 1, podendo ser interpretado como a proporção da variação de uma variável dependente que pode ser explicada por uma variável independente. Quanto mais próximo de 1 é o valor do coeficiente de determinação, maior é a proporção da variação total nos valores da variável dependente que é explicada pela introdução da variável independente no modelo de regressão linear, indicando um maior ajuste dos valores estimados aos valores reais (CORNELL e BERGER, 1986).

O coeficiente de determinação é calculado conforme a Equação (2),

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SS_y} \quad (2)$$

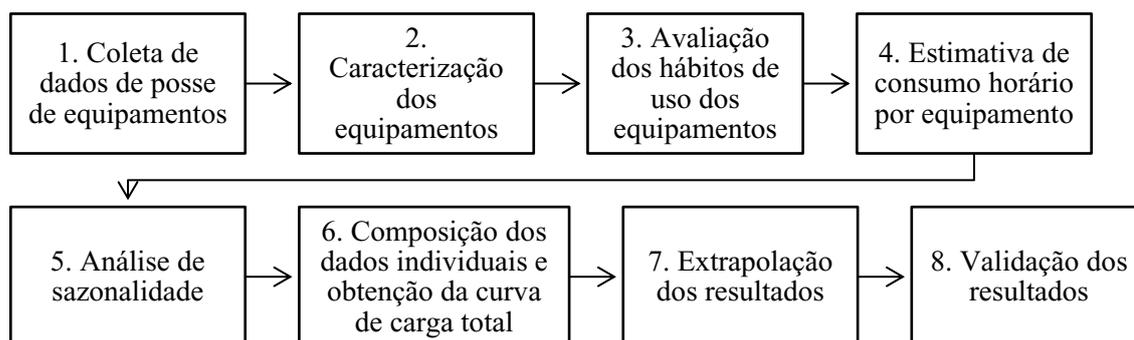
em que R^2 é o coeficiente de determinação, SSE é o somatório da diferença dos quadrados entre o valor estimado e o valor real e SS_y é o somatório da diferença dos quadrados entre o valor estimado e a sua média.

Neste trabalho, o coeficiente de determinação foi utilizado na avaliação dos resultados obtidos na estimação das curvas de carga para todos os meses do ano de unidades consumidoras individuais bem como da classe residencial como um todo.

3 METODOLOGIA

A abordagem da metodologia de estimação de curvas de carga proposta neste trabalho é do tipo *bottom-up*, mais especificamente por meio da utilização da técnica de engenharia por meio de amostragem, conforme apresentado no organograma da Figura 4. Esse tipo de técnica permite a estimação de curvas de carga individuais de cada equipamento elétrico bem como de unidades consumidoras como um todo sem a necessidade de conhecimento de dados históricos de consumo de energia elétrica dessas unidades, sendo essa a principal razão pela qual essa abordagem foi selecionada para a realização deste trabalho. Na Figura 6 é apresentado um fluxograma da metodologia proposta.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Autoria própria.

Nas seções a seguir serão detalhados os passos de 1 a 5 definidos no fluxograma da Figura 6 para a estimação de curvas de carga típicas da classe residencial do estado da Paraíba para todos os meses do ano, ou seja, curvas representativas do consumidor médio da região de estudo, de modo a possibilitar a extrapolação dos resultados bem como a análise de sazonalidade no perfil de consumo das unidades consumidoras ao longo do ano. Os demais passos do fluxograma serão abordados no Capítulo 4. É importante destacar que a metodologia proposta pode ser aplicada para estimação de curvas de carga de consumidores de outras localidades tais como bairros, cidades, estados etc., bastando, para isso, a utilização de dados de posse, hábitos de uso e de sazonalidade adequados para a região.

3.1 POSSE DE EQUIPAMENTOS

A análise de posse de equipamentos elétricos foi realizada a partir da base de dados disponibilizada na PPH-2019 (PROCEL, 2019). Neste trabalho foram considerados equipamentos elétricos de posse média não nula na região de estudo e que possuem informações relativas aos seus hábitos de uso por parte dos consumidores, totalizando 16 itens.

O uso de valores de posse média dos equipamentos analisados possibilita o cálculo de curvas de carga que representem o comportamento médio do consumo de energia elétrica de uma determinada região de modo a viabilizar a extrapolação dos resultados obtidos. Na Tabela 3 estão apresentados os equipamentos analisados neste trabalho, classificados conforme as categorias utilizadas na PPH-2019, bem como a correspondente posse média por domicílio na região de estudo.

Tabela 3- Equipamentos considerados no estudo de caso.

Equipamento	Categoria	Posse média por domicílio
Bebedouro	Outros	0,06
Chuveiro elétrico	Outros	0,06
Computador	Eletrônicos	0,16
Condicionador de ar	Ambiente	0,05
Congelador	Cozinha	0,10
Ferro elétrico a seco	Serviço	0,62
Ferro elétrico a vapor	Serviço	0,13
Lâmpada	Área externa	5,88
Máquina de lavar roupas	Serviço	0,49
<i>Notebook</i>	Eletrônicos	0,14
Refrigerador	Cozinha	1,00
Secadora de roupas	Serviço	0,02
Som/Rádio	Eletrônicos	0,36
Televisor	Eletrônicos	1,32
Ventilador	Ambiente	1,12
<i>Videogame</i>	Eletrônicos	0,04

Fonte: PROCEL, 2019.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

O segundo passo da metodologia proposta no fluxograma da Figura 6 compreende a caracterização dos equipamentos considerados em relação ao seu funcionamento. O cálculo das curvas de carga individuais dos equipamentos é realizado com base em valores de potência elétrica representativos dos equipamentos presentes nas unidades consumidoras. Porém, com exceção das lâmpadas e dos chuveiros elétricos, não há informações relativas à potência nominal dos equipamentos presentes na base de dados da PPH-2019.

Por essa razão, a potência considerada nos cálculos das curvas de carga de cada equipamento foi determinada a partir da ponderação dos valores típicos de consumo de cada variação do equipamento, conforme Equação (3).

$$PC_i = \sum_k \frac{PM_k \cdot P_k}{PM_i} \quad (3)$$

Em que,

PC_i – Potência considerada do equipamento “i” [W];

PM_i – Posse média do equipamento “i” considerando todas as variações;

PM_k – Posse média da variação “k”;

P_k – Potência típica do equipamento da variação “k” [W].

As informações relativas aos valores típicos de potência elétrica dos diferentes equipamentos e suas variações foram obtidas a partir de tabelas de consumo/eficiência energética do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e de catálogos de fabricantes que comercializam os produtos na região em estudo. Os valores típicos de potência considerados para cada variação dos equipamentos analisados neste trabalho estão apresentados no Apêndice A.

Na Tabela 4 estão presentes os valores considerados de potência de cada um dos equipamentos analisados. Nove destes equipamentos (bebedouro, computador, ferro elétrico a vapor, ferro elétrico a seco, *notebook*, secadora de roupas, som/rádio, ventilador e *videogame*) não possuem informações referentes às suas variações e, portanto, seus valores de potência considerada nos cálculos das estimativas de curvas de carga foram

obtidos diretamente dos catálogos de fabricantes e tabelas de consumo/eficiência energética do INMETRO.

Tabela 4 – Potência considerada dos equipamentos analisados.

Equipamento	Potência considerada (W)
Bebedouro	30,00
Chuveiro elétrico	4988,60
Computador	300,00
Condicionador de ar	888,89
Congelador	94,44
Ferro elétrico a seco	1000,00
Ferro elétrico a vapor	1200,00
Lâmpada	13,35
Máquina de lavar roupas	25,36
<i>Notebook</i>	45,00
Refrigerador	55,42
Secadora de roupas	1200,00
Som/Rádio	6,00
Televisor	108,42
Ventilador	40,00
<i>Videogame</i>	80,00

Fonte: Autoria própria.

3.3 HÁBITOS DE USO

As informações relativas aos hábitos de uso de equipamentos elétricos dos entrevistados da PPH-2019 estão apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7. Nelas, são apresentadas as informações declaradas do percentual de equipamentos ligados em cada hora do dia, sendo a linha “Eventual” referente ao percentual de entrevistados que declararam usar o equipamento sem um horário específico. Não obstante, foi considerado o uso contínuo de refrigeradores e congeladores durante todo o dia, conforme declarado pelos entrevistados.

Na Tabela 5 são apresentados os horários de uso dos equipamentos da categoria “eletrônicos” declarados pelos entrevistados, em que se observa uma intensificação no uso desses equipamentos no período da tarde.

Tabela 5 – Horário de uso de equipamentos eletrônicos na Paraíba.

Hora	Equipamentos ligados (%)				
	Computador	Notebook	Som/Rádio	Televisor	Videogame
00:00	0,00	5,06	0,00	2,55	4,55
01:00	0,00	3,80	0,00	0,97	4,55
02:00	0,00	3,80	0,00	0,36	0,00
03:00	0,00	3,80	0,00	0,36	0,00
04:00	0,00	3,80	0,45	0,36	0,00
05:00	0,00	3,80	0,89	0,61	0,00
06:00	1,11	3,80	2,23	4,01	0,00
07:00	1,11	6,33	7,14	8,88	0,00
08:00	1,11	6,33	13,39	14,11	0,00
09:00	4,44	6,33	26,79	14,96	4,55
10:00	5,56	6,33	26,79	13,87	9,09
11:00	5,56	7,59	25,89	16,18	4,55
12:00	6,67	7,59	22,77	23,97	4,55
13:00	6,67	8,86	13,39	21,78	9,09
14:00	5,56	10,13	8,48	11,68	18,18
15:00	6,67	10,13	6,70	8,64	27,27
16:00	3,33	11,39	7,14	9,00	27,27
17:00	5,56	11,39	6,7	12,77	22,73
18:00	25,56	13,92	8,48	41,97	13,64
19:00	25,56	11,39	5,36	55,96	27,27
20:00	25,56	13,92	4,02	58,76	22,73
21:00	24,44	13,92	3,57	56,20	22,73
22:00	22,22	11,39	2,68	38,56	18,18
23:00	6,67	6,33	0,00	14,72	9,09
Eventual	40,00	64,56	36,16	35,40	22,73

Fonte: PROCEL, 2019.

As informações referentes aos horários de uso dos equipamentos das categorias “área externa” e “serviço” estão presentes na Tabela 6. É possível constatar a partir desses dados que, à exceção das lâmpadas, cujo é fortemente associado a luminosidade, os equipamentos dessas categorias possuem uma maior diversidade de horários em que são utilizados.

Tabela 6 – Horário de uso de equipamentos de área externa e serviço na Paraíba.

Hora	Equipamentos ligados (%)				
	Lâmpada	Ferro elétrico a seco	Ferro elétrico a vapor	Máquina de lavar	Secadora de roupas
00:00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00
01:00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00
02:00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00
03:00	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00
04:00	0,76	0,26	0,00	0,00	0,00
05:00	1,60	0,26	0,00	0,33	0,00
06:00	3,32	0,52	0,00	3,27	0,00
07:00	3,15	1,84	2,50	15,03	0,00
08:00	1,60	2,62	1,25	25,49	0,00
09:00	0,82	4,20	2,50	35,62	0,00
10:00	0,73	2,89	50,00	30,72	7,69
11:00	0,82	1,57	3,75	23,20	15,38
12:00	2,45	0,79	1,25	17,65	0,00
13:00	1,99	5,25	32,50	7,19	7,69
14:00	0,54	11,02	52,50	6,21	0,00
15:00	0,49	12,6	52,50	6,21	0,00
16:00	0,98	9,97	42,50	5,88	0,00
17:00	9,17	6,04	15,00	3,27	0,00
18:00	56,68	7,09	16,25	5,56	0,00
19:00	78,43	7,09	12,50	9,80	0,00
20:00	73,32	3,67	12,50	10,46	0,00
21:00	51,56	2,62	11,25	7,19	0,00
22:00	25,75	2,36	7,50	3,59	0,00
23:00	5,66	0,26	0,00	0,98	0,00
Eventual	5,66	50,39	12,50	20,92	76,92

Fonte: PROCEL, 2019.

Na Tabela 7 são apresentados os horários de uso declarados pelos entrevistados da PPH-2019 referentes aos equipamentos das categorias “ambiente” e “outros”. Nela, é possível observar o uso concentrado de equipamentos de climatização durante a noite e a madrugada, o maior uso do chuveiro elétrico em horários imediatamente anteriores e posteriores aos horários comerciais típicos, bem como o uso constante do bebedouro pela maior parte dos entrevistados.

Tabela 7 – Horário de uso de equipamentos de ambiente e outros na Paraíba.

Hora	Equipamentos ligados (%)			
	Chuveiro elétrico	Condicionador de ar	Ventilador	Bebedouro
00:00	0,00	33,33	45,51	72,22
01:00	0,00	33,33	45,51	72,22
02:00	0,00	33,33	44,90	72,22
03:00	0,00	33,33	42,86	72,22
04:00	2,70	33,33	40,82	72,22
05:00	5,41	24,24	37,76	72,22
06:00	16,22	12,12	30,41	72,22
07:00	16,22	3,030	15,10	72,22
08:00	2,70	0,00	8,98	72,22
09:00	5,41	0,00	7,14	72,22
10:00	2,70	0,00	6,33	72,22
11:00	5,41	0,00	6,73	72,22
12:00	2,7	3,03	7,55	72,22
13:00	0,00	6,06	9,59	72,22
14:00	0,00	3,03	10,20	72,22
15:00	5,41	0,00	11,02	72,22
16:00	10,81	0,00	11,43	72,22
17:00	13,51	0,00	13,27	72,22
18:00	35,14	0,00	29,39	72,22
19:00	35,14	0,00	33,06	72,22
20:00	37,84	18,18	38,16	72,22
21:00	32,43	33,33	49,39	72,22
22:00	5,41	42,42	62,45	72,22
23:00	2,70	33,33	56,53	72,22
Eventual	24,32	45,45	22,45	25,00

Para que a curva de carga estimada de um equipamento individual seja capaz de representar seu perfil de consumo médio de modo a permitir a extrapolação dos resultados para diferentes períodos, também foi considerada a influenciada da frequência de uso do equipamento, ou seja, a quantidade de vezes em que o equipamento é utilizado em uma semana. Na Tabela 8 é apresentada a frequência de uso de cada equipamento declarada pelos entrevistados da PPH-2019 bem como a frequência de uso considerada para as estimativas da curva de carga, calculada por meio de uma média ponderada, em que, por exemplo, na alternativa “2 a 3 vezes por semana” foi considerada uma frequência de uso igual a 2,5 vezes por semana.

Tabela 8 – Frequência de uso de equipamentos na Paraíba.

Equipamento	Frequência de uso (% dos entrevistados)						Frequência considerada (dias/semana)
	6 a 7 vezes por semana	4 a 5 vezes por semana	2 a 3 vezes por semana	uma vez por semana	uma vez a cada 15 dias	uma vez por mês	
Bebedouro	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00
Chuveiro elétrico	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00
Computador	54,69	10,94	25,00	6,25	0,00	3,13	3,92
Condicionador de ar	57,69	19,23	19,23	3,85	0,00	0,00	4,27
Congelador	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00
Ferro elétrico a seco	18,27	2,88	12,50	26,28	11,22	28,85	1,75
Ferro elétrico a vapor	65,75	2,74	12,33	5,48	6,85	6,85	3,83
Lâmpada	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00
Máquina de lavar roupas	17,06	2,68	33,44	38,46	6,35	2,01	2,23
Notebook	45,83	11,11	33,33	2,78	0,00	6,94	3,67
Refrigerador	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00
Secadora de roupas	0,00	15,38	0,00	76,92	7,69	0,00	1,50
Som/Rádio	40,43	11,70	18,62	16,49	3,19	9,57	3,22
Televisor	88,38	4,82	5,32	0,74	0,00	0,74	4,78
Ventilador	81,30	5,87	6,96	1,52	0,00	4,35	4,53
Videogame	16,67	0,00	38,89	33,33	0,00	11,11	2,17

Fonte: Adaptado de PROCEL, 2019.

3.4 ESTIMATIVA DE CONSUMO HORÁRIO

A estimativa de consumo horário dos equipamentos elétricos, quarto passo da metodologia proposta no fluxograma da Figura 6, foi realizada a partir dos dados de posse e hábitos de uso discutidos na seção anterior.

Nas Equações (5) e (6) estão apresentadas as formas de calcular o consumo horário de cada equipamento de modo individual bem como da unidade consumidora como um todo, respectivamente. Além disso, na Equação (4) está apresentado o cálculo da parcela de consumo eventual de um dado equipamento em uma dada hora do dia de modo proporcional ao consumo declarado pelos entrevistados e apresentado nas Tabelas 5, 6 e 7.

$$E_{i,h} = TE_i \cdot PM_i \cdot PC_i \cdot \frac{TU_{i,h}}{100} \cdot \frac{FU_i}{7} \cdot \frac{C_{i,h}}{\sum_{h=0}^{23} C_{i,h}} \quad (4)$$

$$C_{i,h_{total}} = PM_i \cdot PC_i \cdot t_i \cdot \frac{TU_{i,h}}{100} \cdot \frac{FU_i}{7} + E_{i,h} \quad (5)$$

$$C_h = \sum_{i=1}^N \left(PM_i \cdot PC_i \cdot t_i \cdot \frac{TU_{i,h}}{100} \cdot \frac{FU_i}{7} + E_{i,h} \right) \quad (6)$$

Em que,

$E_{i,h}$ - Consumo eventual do equipamento “i” na hora “h” [W];

TE_i - Taxa de uso eventual do equipamento “i” (Tabelas 10, 11 e 12) [%];

PM_i - Posse média por domicílio do equipamento “i”;

PC_i - Potência considerada do equipamento “i” [W];

$TU_{i,h}$ - Taxa de uso do equipamento “i” na hora “h” (Tabelas 10, 11 e 12) [%];

FU_i - Frequência de uso considerada do equipamento “i” [dias/semana];

$C_{i,h}$ - Consumo do equipamento “i” na hora “h”, sem o uso eventual [W];

$C_{i,h_{total}}$ - Consumo do equipamento “i” na hora “h” com o uso eventual [W];

t_i - Tempo de uso médio do equipamento “i” [h];

C_h - Consumo estimado total na hora “h” [W].

As Equações (4), (5) e (6) foram utilizadas para calcular o consumo horário da maioria dos equipamentos analisados. Entretanto, a estimativa de consumo horário de refrigeradores e congeladores foi calculada a partir da temperatura ambiente, uma vez que, apesar de os refrigeradores e congeladores serem utilizados de modo contínuo, ou seja, durante todo o dia, o valor do consumo de energia elétrica não é constante ao longo das 24 horas, variando em função da temperatura (HARRINGTON, AYE e FULLER, 2018).

De acordo com Harrington, Aye e Fuller (2018), para refrigeradores de consumo aproximadamente igual a 39,9 kWh/mês, a razão de consumo entre as temperaturas de 32°C e 25°C e entre as temperaturas de 16°C e 32°C é de aproximadamente 154,8% e 31,5%, respectivamente. Portanto, é possível determinar equações quadráticas que estimam o consumo desses equipamentos para temperaturas entre 10°C e 35°C. Dessa forma, a Equação (7) estima o consumo em função da temperatura de um refrigerador cujo consumo declarado pelo fabricante é igual a 39,9 kWh/mês (valor típico da região de estudo) para uma temperatura de 25°C.

$$P = 0,07T^2 + 0,37T + 2,63 \quad (7)$$

De modo semelhante, a Equação (8) estima o consumo em função da temperatura de um congelador cujo consumo declarado é igual a 68 kWh/mês.

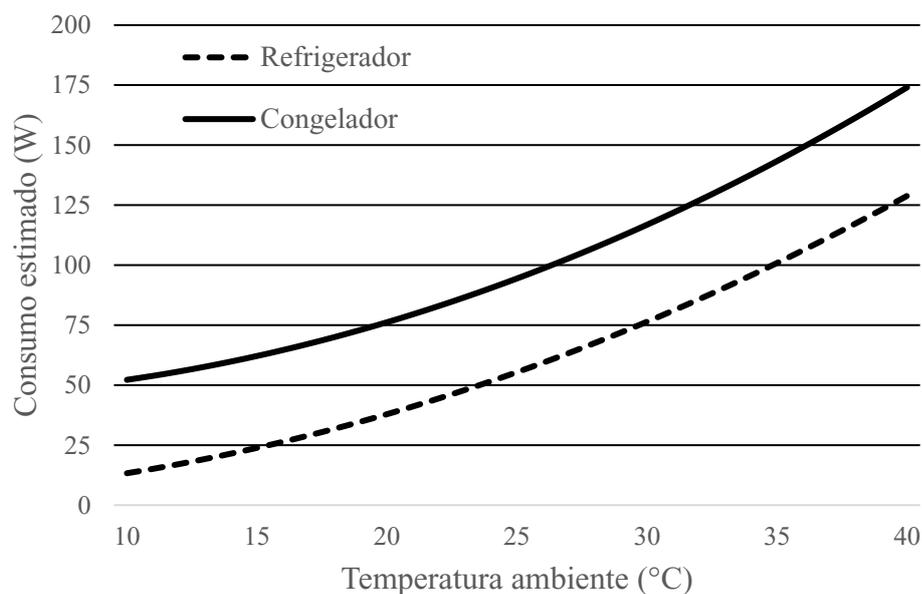
$$P = 0,08T^2 - 0,09T + 44,86 \quad (8)$$

Em que P é a potência elétrica, em watts, e T é a temperatura ambiente, em graus Celsius.

Na Figura 7 estão apresentadas as curvas que relacionam o consumo dos refrigeradores e congeladores típicos da região de estudo em função da temperatura ambiente, em que é possível observar uma elevação do consumo de energia elétrica com o aumento da temperatura ambiente.

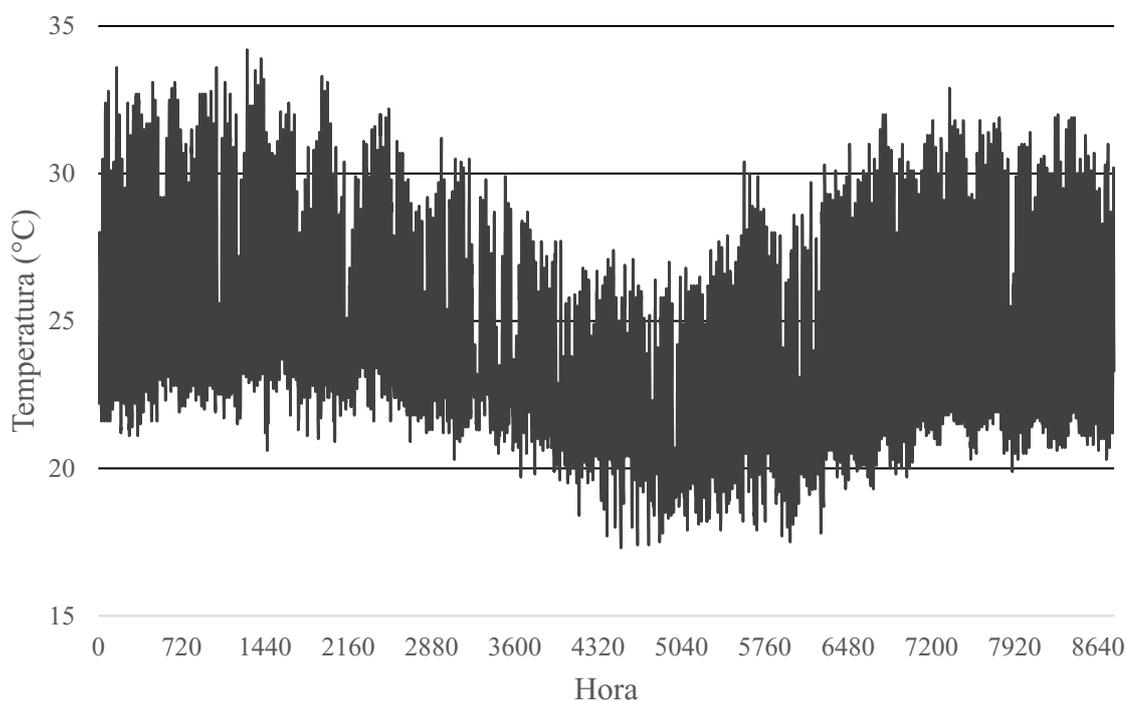
Além disso, na Figura 8 estão apresentados os dados de temperatura coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para cada hora do ano de 2020 na região de estudo, onde se observa uma redução da temperatura ambiente entre os meses de junho e setembro, durante o inverno.

Figura 7 – Consumo de congeladores e refrigeradores em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de HARRINGTON, AYE e FULLER, 2018.

Figura 8 – Variação da temperatura ao longo do ano na região de estudo.



Fonte: INMET, 2020.

A partir das curvas de consumo em função da temperatura presentes na Figura 7 dos dados de temperatura fornecidos pelo INMET é possível determinar o valor de potência considerada nas Equações (4), (5) e (6) para estimar o consumo de energia elétrica de refrigeradores e congeladores.

3.5 SAZONALIDADE

Na base de dados da PPH-19 não há dados suficientes para a estimação de curvas de carga para diferentes períodos do ano, informação importante na medida em que possibilita análises da variação do consumo de energia elétrica ao longo dos meses. Por essa razão, admitiu-se o mês de janeiro como base de cálculo das curvas de carga dos demais meses do ano e, para isso, adotou-se o consumo total da classe residencial na região em estudo, divulgado nos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição pela ANEEL (2021), como macro-variável auxiliar.

Na base de dados dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição divulgados pela ANEEL estão contidas informações relativas ao número de unidades consumidoras faturadas, consumo total faturado de energia elétrica e tarifas médias aplicadas por região, classe de consumo e nível de tensão para todos os meses desde o ano de 2003. Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios de consumo por residência para todos os meses nos cinco anos anteriores a realização da PPH-2019, bem como a variação percentual dos valores em relação ao consumo de janeiro.

Tabela 9 – Média do consumo por residência no estado da Paraíba.

Mês	Média do consumo diário por residência (kWh) - 2015 a 2019	Variação relativa a janeiro (%)
Janeiro	4,17	-
Fevereiro	4,34	4,08
Março	4,12	-1,20
Abril	4,15	-0,48
Maio	3,97	-4,80
Junho	3,96	-5,04
Julho	3,63	-12,95
Agosto	3,61	-13,43
Setembro	3,79	-9,11
Outubro	3,80	-8,87
Novembro	4,10	-1,68
Dezembro	3,98	-4,56

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2021.

A estimativa de curva de carga para os demais meses do ano é, então, calculada de modo a refletir a variação do consumo na classe residencial em relação ao mês de janeiro, conforme apresentado na Tabela 9.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após a realização das etapas da metodologia proposta na Figura 6. Inicialmente, serão apresentadas as estimativas de perfil de consumo de cada equipamento separadamente, seguido pela estimativa de curva de carga de uma unidade consumidora residencial representativa da região de estudo. De posse desses dados, é realizada uma análise da contribuição de cada equipamento no consumo total de energia elétrica bem como os seus coeficientes de correlação relativos à curva de carga total calculada. Em seguida, serão apresentadas estimativas de curvas de carga para dias típicos de todos os meses do ano, bem como uma análise comparativa da extrapolação dos resultados obtidos com dados reais de consumo residencial no estado Paraíba afim de validar os resultados obtidos.

4.1 ESTIMATIVAS DE CURVAS DE CARGA TÍPICAS

A estimativa de consumo horário de cada um dos equipamentos considerados neste trabalho foi realizada a partir das Equações (4), (5) e (6) bem como com a utilização dos dados relativos aos hábitos de uso presentes nas Tabelas 5, 6, 7 e 8, de modo a resultar em dados relativos a dias típicos de consumidores médios da região de estudo. No caso dos refrigeradores e congeladores, as estimativas de consumo foram realizadas em função da temperatura média de cada hora do dia na região de estudo, conforme discutido anteriormente, de acordo com as Equações (7) e (8), bem como de acordo com os dados de temperatura divulgados pelo INMET, apresentados na Figura 8.

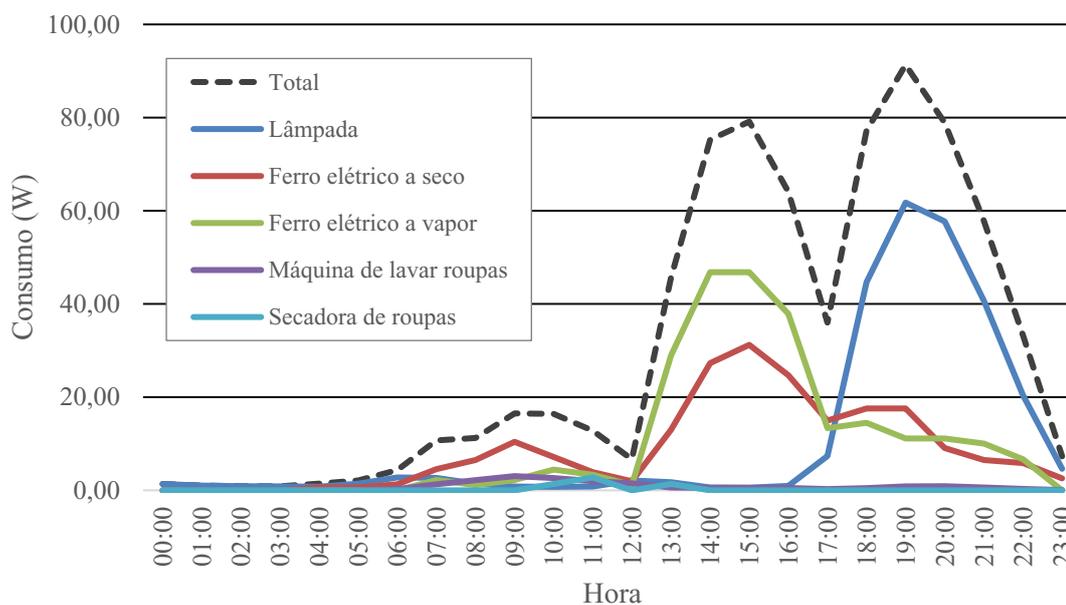
Na Tabela 10 e na Figura 9 estão apresentados os valores da curva de carga horária dos equipamentos analisados neste trabalho que compõem as categorias “área externa” e “serviço”. A partir dos resultados estimados é possível constatar um consumo pequeno durante o período da manhã e um consumo maior durante o período da tarde, com picos de carga às 15 horas e às 19 horas, atingindo valores de 79,15 W e 91,32 W, respectivamente. O consumo total estimado dos equipamentos das categorias “área externa” e “serviço” em um dia típico é de 732,51 W.

Tabela 10 – Estimativa de consumo dos equipamentos de “área externa” e “serviço”.

Hora	Consumo (W)					Total
	Lâmpada	Ferro elétrico a seco	Ferro elétrico a vapor	Máquina de lavar roupas	Secadora de roupas	
00:00	1,36	0,00	0,00	0,00	0,00	1,36
01:00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02
02:00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89
03:00	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87
04:00	0,78	0,64	0,00	0,00	0,00	1,43
05:00	1,44	0,64	0,00	0,03	0,00	2,11
06:00	2,79	1,29	0,00	0,28	0,00	4,36
07:00	2,66	4,56	2,23	1,29	0,00	10,74
08:00	1,44	6,49	1,11	2,19	0,00	11,24
09:00	0,83	10,41	2,23	3,06	0,00	16,53
10:00	0,76	7,16	4,46	2,64	1,38	16,41
11:00	0,83	3,89	3,34	1,99	2,77	12,83
12:00	2,11	1,96	1,11	1,52	0,00	6,70
13:00	1,75	13,01	28,98	0,62	1,38	45,75
14:00	0,61	27,31	46,82	0,53	0,00	75,28
15:00	0,57	31,23	46,82	0,53	0,00	79,15
16:00	0,95	24,71	37,90	0,51	0,00	64,07
17:00	7,38	14,97	13,38	0,28	0,00	36,01
18:00	44,68	17,57	14,49	0,48	0,00	77,22
19:00	61,75	17,57	11,15	0,84	0,00	91,32
20:00	57,74	9,10	11,15	0,90	0,00	78,88
21:00	40,66	6,49	10,03	0,62	0,00	57,80
22:00	20,40	5,85	6,69	0,31	0,00	33,25
23:00	4,63	2,58	0,00	0,08	0,00	7,29

Fonte: Autoria própria.

Figura 9 – Curvas de carga dos equipamentos de “área externa” e “serviço”.



Fonte: Autoria própria.

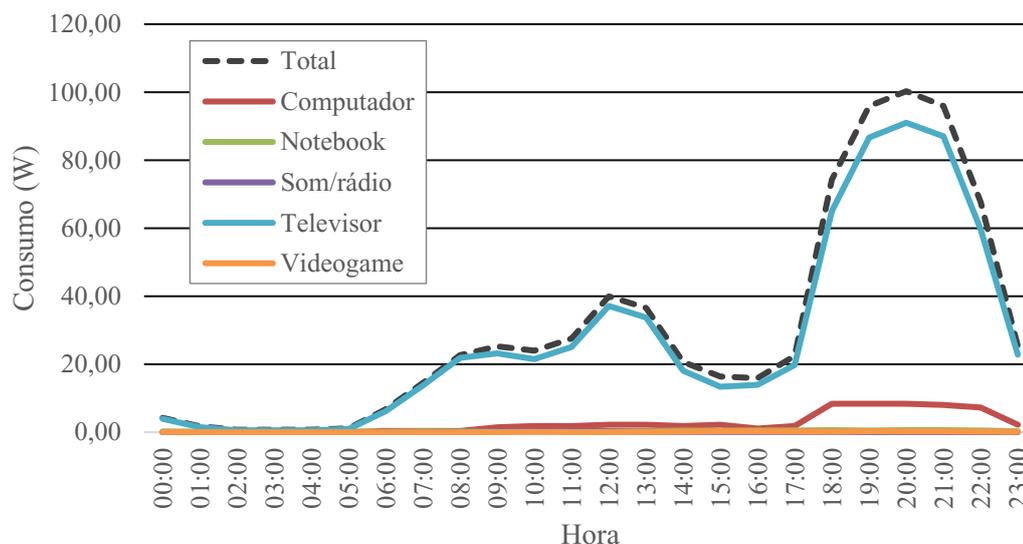
As estimativas referentes aos equipamentos da categoria “eletrônicos” estão apresentados na Tabela 11 bem como na Figura 10. Destaca-se o consumo praticamente nulo de *notebooks*, aparelhos de som/rádio e de *videogames* durante todo o dia, sendo o consumo total dessa categoria composto quase que totalmente pelo uso de televisores, juntamente com uma pequena contribuição do consumo de computadores no período da noite. A curva de carga total possui valores baixos de consumo no período da manhã e um maior consumo durante a noite, atingindo o valor máximo de 100,28 W por volta das 20 horas. O consumo total estimado dos equipamentos dessa categoria em um dia típico é igual a 741,32 W.

Tabela 11 - Estimativa de consumo dos equipamentos “eletrônicos”.

Hora	Consumo (W)					Total
	Computador	Notebook	Som/rádio	Televisor	Videogame	
00:00	0,00	0,22	0,00	3,95	0,05	4,22
01:00	0,00	0,17	0,00	1,50	0,05	1,72
02:00	0,00	0,17	0,00	0,56	0,00	0,73
03:00	0,00	0,17	0,00	0,56	0,00	0,73
04:00	0,00	0,17	0,01	0,56	0,00	0,73
05:00	0,00	0,17	0,01	0,94	0,00	1,12
06:00	0,36	0,17	0,03	6,21	0,00	6,77
07:00	0,36	0,28	0,08	13,75	0,00	14,48
08:00	0,36	0,28	0,16	21,85	0,00	22,65
09:00	1,45	0,28	0,32	23,17	0,05	25,27
10:00	1,82	0,28	0,32	21,48	0,10	24,00
11:00	1,82	0,34	0,31	25,06	0,05	27,57
12:00	2,19	0,34	0,27	37,12	0,05	39,96
13:00	2,19	0,39	0,16	33,73	0,10	36,56
14:00	1,82	0,45	0,10	18,09	0,20	20,65
15:00	2,19	0,45	0,08	13,38	0,29	16,39
16:00	1,09	0,50	0,08	13,94	0,29	15,91
17:00	1,82	0,50	0,08	19,78	0,25	22,43
18:00	8,37	0,62	0,10	65,00	0,15	74,23
19:00	8,37	0,50	0,06	86,66	0,29	95,90
20:00	8,37	0,62	0,05	91,00	0,25	100,28
21:00	8,01	0,62	0,04	87,03	0,25	95,94
22:00	7,28	0,50	0,03	59,72	0,20	67,73
23:00	2,19	0,28	0,00	22,80	0,10	25,36

Fonte: Autoria própria.

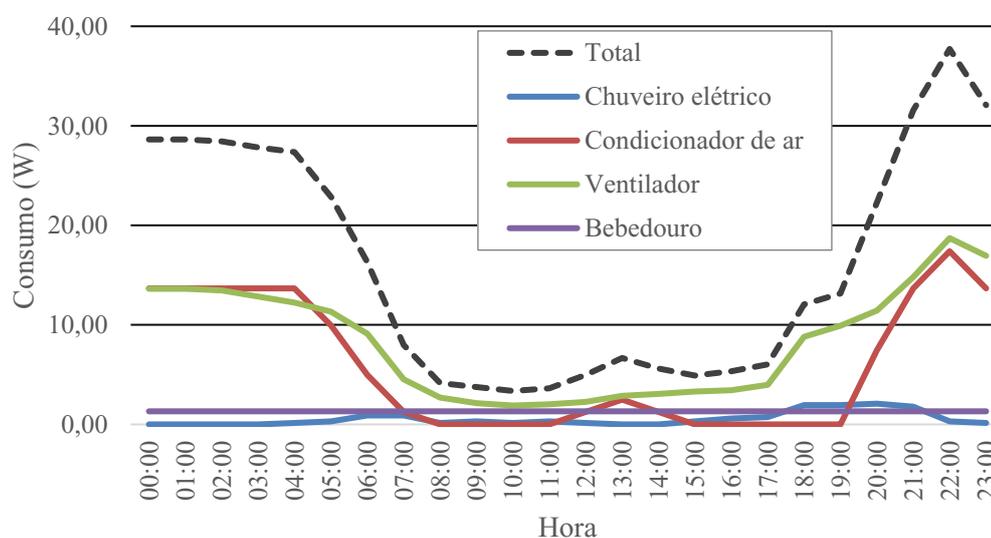
Figura 10 - Curvas de carga dos equipamentos “eletrônicos”.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 11 bem como na Tabela 12 são apresentadas as estimativas referentes aos equipamentos das categorias “ambiente” e “outros”. As curvas de carga estimadas evidenciam um consumo concentrado nos períodos da noite e da madrugada, principalmente associados ao uso de aparelhos condicionadores de ar e ventiladores. É importante destacar que, apesar de a potência considerada nos cálculos das estimativas de consumo de chuveiros elétricos ser a mais elevada dentre os equipamentos, igual a 4988,6 W, a sua baixa participação na curva de carga total é devido, principalmente, à baixa posse média desse equipamento na região de estudo.

Figura 11 - Curvas de carga dos equipamentos de “ambiente” e “outros”.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Estimativa de consumo dos equipamentos de “ambiente” e “outros”.

Hora	Consumo (W)				
	Chuveiro elétrico	Condicionador de ar	Ventilador	Bebedouro	Total
00:00	0,00	13,67	13,64	1,31	28,62
01:00	0,00	13,67	13,64	1,31	28,62
02:00	0,00	13,67	13,46	1,31	28,44
03:00	0,00	13,67	12,84	1,31	27,83
04:00	0,15	13,67	12,23	1,31	27,36
05:00	0,30	9,94	11,32	1,31	22,87
06:00	0,89	4,97	9,11	1,31	16,29
07:00	0,89	1,24	4,53	1,31	7,97
08:00	0,15	0,00	2,69	1,31	4,15
09:00	0,30	0,00	2,14	1,31	3,75
10:00	0,15	0,00	1,90	1,31	3,36
11:00	0,30	0,00	2,02	1,31	3,63
12:00	0,15	1,24	2,26	1,31	4,97
13:00	0,00	2,49	2,87	1,31	6,67
14:00	0,00	1,24	3,06	1,31	5,61
15:00	0,30	0,00	3,30	1,31	4,91
16:00	0,60	0,00	3,43	1,31	5,33
17:00	0,74	0,00	3,98	1,31	6,03
18:00	1,93	0,00	8,81	1,31	12,06
19:00	1,93	0,00	9,91	1,31	13,15
20:00	2,08	7,46	11,44	1,31	22,29
21:00	1,79	13,67	14,80	1,31	31,57
22:00	0,30	17,40	18,71	1,31	37,72
23:00	0,15	13,67	16,94	1,31	32,07

Fonte: Autoria própria.

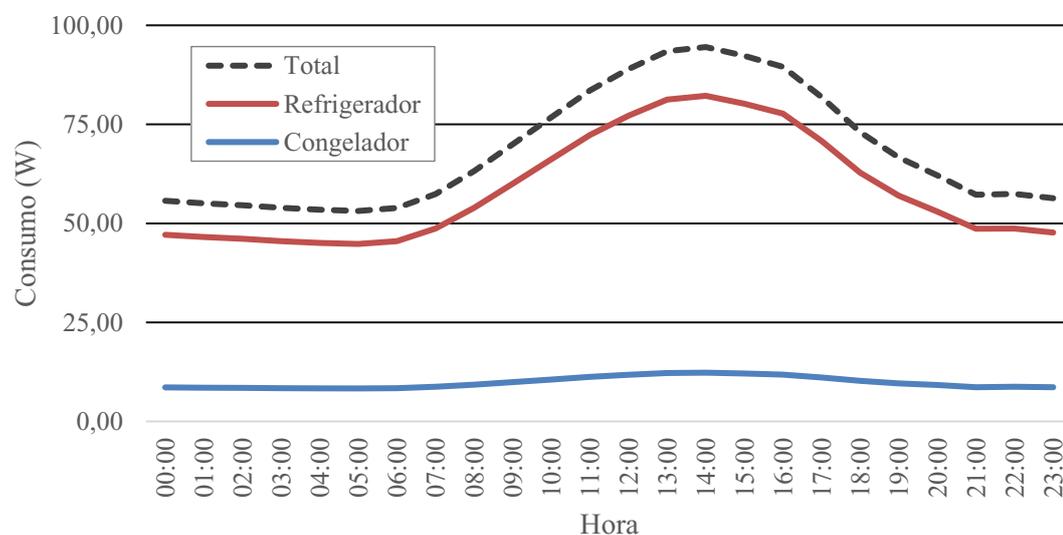
A curva de carga de equipamentos refrigeradores e congeladores foi estimada em função da temperatura ambiente, conforme informações apresentadas nas Figuras 8 e 9. Na Tabela 13 bem como na Figura 12 estão apresentados os valores calculados de consumo desses equipamentos para as 24 horas de um dia típico com base na temperatura média verificada para cada hora do dia na região de estudo durante o ano de 2020, de acordo com dados fornecidos disponibilizados pelo INMET.

Tabela 13 - Estimativa de consumo de refrigeradores e congeladores.

Hora	Consumo (W)		
	Refrigerador	Congelador	Total
00:00	47,13	8,58	55,71
01:00	46,55	8,51	55,07
02:00	46,09	8,47	54,56
03:00	45,53	8,41	53,93
04:00	45,07	8,36	53,43
05:00	44,80	8,33	53,13
06:00	45,50	8,40	53,90
07:00	48,67	8,74	57,41
08:00	53,93	9,29	63,22
09:00	60,02	9,93	69,95
10:00	66,19	10,59	76,78
11:00	72,29	11,24	83,53
12:00	77,17	11,76	88,93
13:00	81,25	12,20	93,45
14:00	82,21	12,31	94,51
15:00	80,20	12,09	92,29
16:00	77,69	11,82	89,51
17:00	70,82	11,08	81,90
18:00	62,80	10,23	73,03
19:00	57,00	9,61	66,61
20:00	52,95	9,18	62,13
21:00	48,64	8,61	57,25
22:00	48,71	8,74	57,45
23:00	47,70	8,63	56,34

Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Curvas de carga de refrigeradores e congeladores.

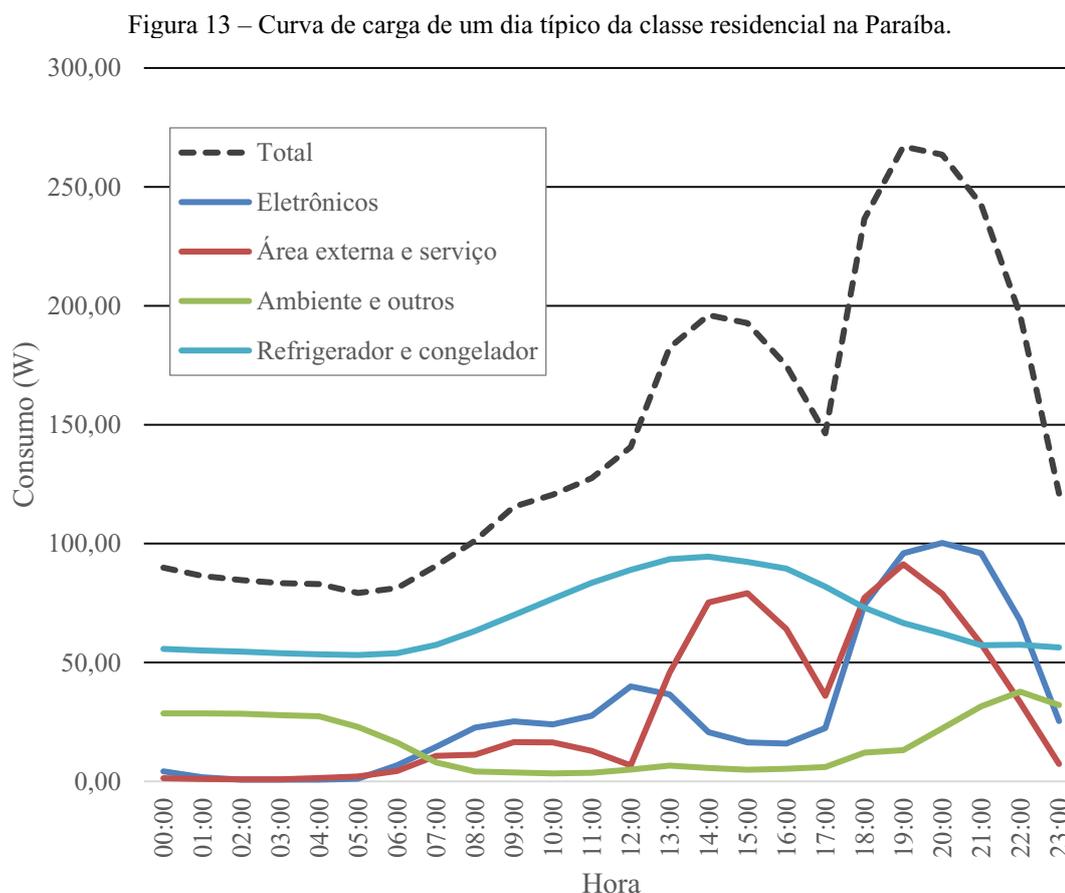


Fonte: Autoria própria.

A partir da análise das curvas de carga apresentadas na Figura 12 é possível constatar uma elevação do consumo tanto de refrigeradores quanto de congeladores no período entre 7 horas e 21 horas, atingindo seus valores máximos entre as 12 horas e as 14 horas, momento do dia em que as temperaturas estão mais elevadas. O consumo total estimado desses dois equipamentos em um dia típico é igual a 1644,03 W.

A curva de carga total típica da classe residencial do estado da Paraíba pode, então, ser calculada a partir da soma das estimativas de consumo de cada um dos equipamentos analisados anteriormente para as 24 horas do dia.

Na Figura 13 assim como na Tabela 14 são apresentados os resultados obtidos da curva de carga típica da classe residencial do estado da Paraíba. A partir da análise dos dados, verifica-se um menor consumo nas primeiras horas do dia, seguido por um aumento nos períodos da manhã e tarde, atingindo valores máximos durante o início da noite, às 19 horas, momento em que o consumo estimado é igual a 266,98 W. Ademais, o consumo total estimado de um dia típico é de 3503,15 W.



Fonte: Autoria própria.

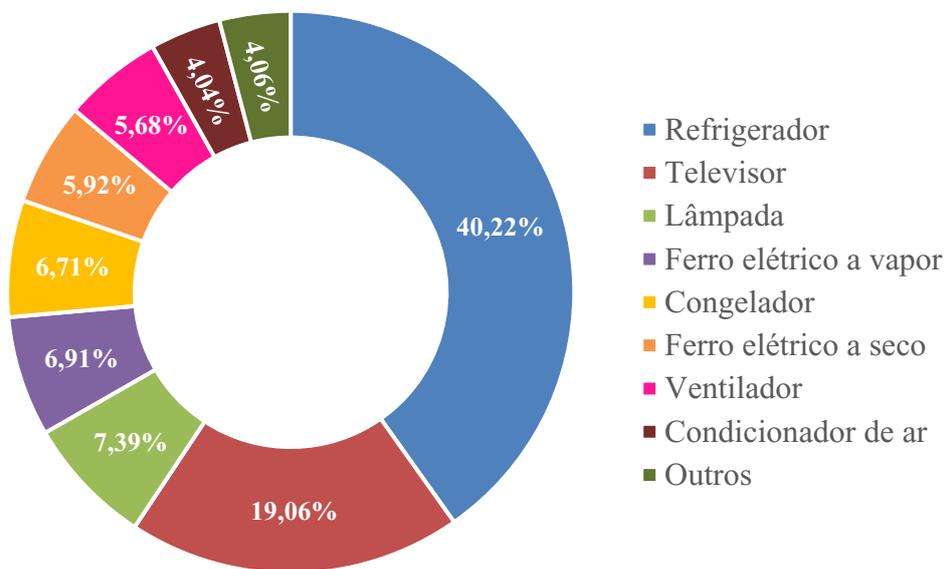
Tabela 14 – Estimativa de consumo de um dia típico.

Hora	Consumo (W)				Total
	Eletrônicos	Área externa e serviço	Ambiente e outros	Refrigerador e congelador	
00:00	4,22	1,36	28,62	55,71	89,91
01:00	1,72	1,02	28,62	55,07	86,42
02:00	0,73	0,89	28,44	54,56	84,62
03:00	0,73	0,87	27,83	53,93	83,35
04:00	0,73	1,43	27,36	53,43	82,95
05:00	1,12	2,11	22,87	53,13	79,24
06:00	6,77	4,36	16,29	53,90	81,32
07:00	14,48	10,74	7,97	57,41	90,60
08:00	22,65	11,24	4,15	63,22	101,26
09:00	25,27	16,53	3,75	69,95	115,50
10:00	24,00	16,41	3,36	76,78	120,53
11:00	27,57	12,83	3,63	83,53	127,56
12:00	39,96	6,70	4,97	88,93	140,56
13:00	36,56	45,75	6,67	93,45	182,43
14:00	20,65	75,28	5,61	94,51	196,06
15:00	16,39	79,15	4,91	92,29	192,74
16:00	15,91	64,07	5,33	89,51	174,83
17:00	22,43	36,01	6,03	81,90	146,37
18:00	74,23	77,22	12,06	73,03	236,54
19:00	95,90	91,32	13,15	66,61	266,98
20:00	100,28	78,88	22,29	62,13	263,58
21:00	95,94	57,80	31,57	57,25	242,57
22:00	67,73	33,25	37,72	57,45	196,15
23:00	25,36	7,29	32,07	56,34	121,06

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14 está apresentado o percentual de participação de cada equipamento analisado no consumo total de energia em um dia típico, em que é possível constatar que a demanda de refrigeradores, televisores e lâmpadas corresponde a dois terços do consumo total de energia elétrica de uma residência típica do estado da Paraíba. Além disso, na Tabela 15 estão apresentados os valores calculados de coeficiente de correlação entre as estimativas individuais de cada um dos equipamentos analisados e a curva de carga total da unidade consumidora. A análise desses dados evidencia a influência de cada um dos equipamentos considerados na composição da curva final, em que os televisores e lâmpadas presentes nas unidades consumidoras da região de estudo estão diretamente correlacionados às variações na curva de carga ao longo do dia.

Figura 14 – Participação dos equipamentos no consumo total.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 – Correlação do consumo dos equipamentos em relação ao consumo total.

Equipamento	Coefficiente de correlação
Refrigerador	0,39
Televisor	0,88
Lâmpada	0,81
Ferro elétrico a vapor	0,54
Congelador	0,38
Ferro elétrico a seco	0,63
Ventilador	-0,01
Condicionador de ar	-0,25
Computador	0,90
Bebedouro	0,00
Máquina de lavar roupas	0,01
Chuveiro elétrico	0,71
<i>Notebook</i>	0,94
Secadora de roupas	-0,04
<i>Videogame</i>	0,85
Som/rádio	0,04

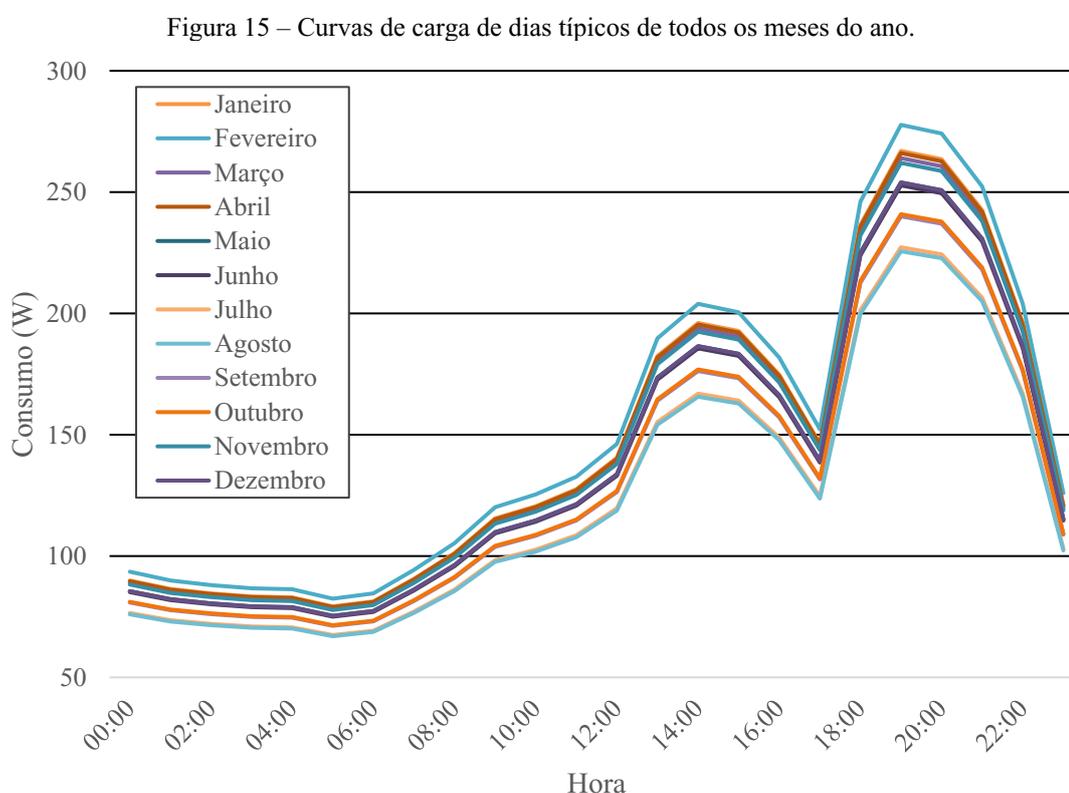
Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE DE SAZONALIDADE

Os resultados obtidos e discutidos nas seções anteriores foram usados como valores base para cálculo da estimativa de curva de carga dos 12 meses do ano. Para isso, utilizando o mês de janeiro como base, os resultados foram replicados para os demais meses considerando um coeficiente de variação de consumo para cada mês.

Os coeficientes multiplicativos de cada mês foram calculados a partir do consumo total da classe residencial no estado da Paraíba, conforme apresentado na Tabela 9. A partir dos valores de variação presentes na Tabela 9 é possível estimar as curvas de carga para os 12 meses do ano, considerando os resultados discutidos nas seções anteriores como sendo referentes ao mês de janeiro.

Na Figura 15 estão apresentadas as estimativas de curvas de carga de dias típicos para todos os meses do ano, em que é possível constatar a variação entre os valores de demanda horária para cada mês. É possível observar um maior consumo entre os meses de janeiro a abril, meses que compreendem o verão no hemisfério Sul, e menor nos meses de julho e agosto, durante o inverno.



Fonte: Autoria própria.

4.3 EXTRAPOLAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de validar os resultados obtidos a partir da metodologia proposta, foi realizada uma análise comparativa entre o consumo total estimado para os 12 meses do ano e os valores médios verificados na fatura de energia elétrica dos entrevistados da PPH-2019 na região de estudo deste trabalho. Os valores de consumo mensal estimados foram calculados a partir da extrapolação dos resultados obtidos para dias típicos de cada mês do ano presentes na Figura 15.

Os valores médios de consumo verificado nas faturas de energia dos entrevistados na PPH-2019, o consumo mensal estimado com base na metodologia proposta, o MAPE e o coeficiente de determinação estão apresentados na Tabela 16.

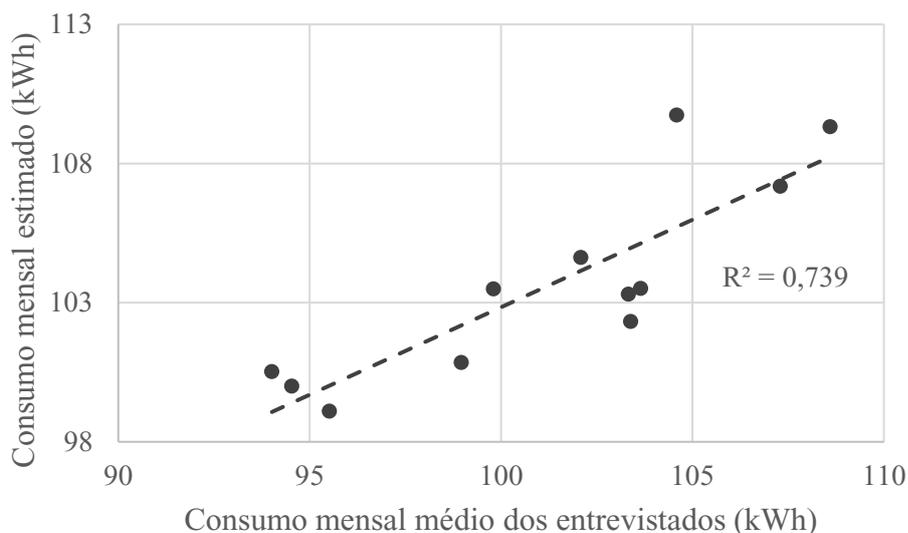
Tabela 16 - Comparação entre o estimado e o consumo médio dos entrevistados.

Mês	Consumo mensal estimado (kWh)	Consumo mensal médio dos entrevistados (kWh)
Janeiro	108,60	109,32
Fevereiro	102,09	104,62
Março	107,30	107,18
Abril	104,59	109,74
Mai	103,39	102,32
Junho	99,80	103,49
Julho	94,53	100,00
Agosto	94,01	100,52
Setembro	95,52	99,10
Outubro	98,96	100,85
Novembro	103,33	103,30
Dezembro	103,65	103,51
MAPE		2,51%
R²		0,7390

Fonte: Adaptado de PROCEL, 2019.

Conforme apresentado na Tabela 16, o coeficiente de determinação calculado foi de 0,7390 e o MAPE de 2,51%, o que indica um bom ajuste dos valores estimados aos valores reais, uma vez que as estimativas abrangem 73,90% das variações dos dados reais mesmo estando relacionadas a comportamentos humanos, de difícil modelagem. Na Figura 16 é possível observar a correlação entre os dois conjuntos de dados.

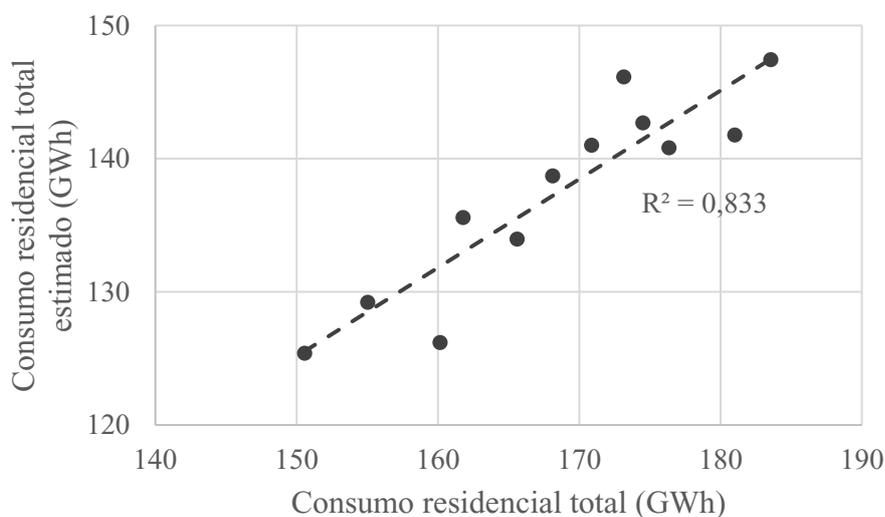
Figura 16 - Correlação entre o consumo estimado e médio dos entrevistados.



Fonte: Autoria própria.

Similarmente, na Figura 17 bem como na Tabela 17 estão apresentadas as análises referentes a estimativa de consumo mensal total da classe residencial do estado da Paraíba e os valores reais referentes ao ano de 2019 disponibilizados pela ANEEL (2021). O coeficiente de determinação obtido é igual a 0,8328 e o MAPE é de 18,36%, indicando um ajuste das estimativas aos valores reais. O MAPE de 18,36%, maior que o obtido no caso anterior, é devido, principalmente, à diferença entre o consumo médio da amostra da PPH-2019 (103,66 kWh) e o consumo médio real na classe residencial paraibana no ano de 2019 (123,45 kWh), 19,09% maior.

Figura 17 - Correlação entre o consumo residencial total estimado e real.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 - Comparação entre o consumo residencial total estimado e real.

Mês	Nº de residências	Consumo total (GWh)	Consumo total estimado (GWh)
Janeiro	1.357.618	183,56	147,44
Fevereiro	1.359.385	168,13	138,71
Março	1.360.712	173,17	146,13
Abril	1.362.188	174,52	142,69
Maio	1.362.839	176,36	140,81
Junho	1.362.500	161,79	135,58
Julho	1.365.033	160,16	126,18
Agosto	1.366.189	150,58	125,39
Setembro	1.367.558	155,04	129,21
Outubro	1.367.102	165,62	133,96
Novembro	1.366.829	170,88	141,00
Dezembro	1.372.335	181,02	141,76
MAPE			18,36%
R²			0,8328

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2021.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no estudo de caso desenvolvido neste trabalho permitem concluir que a metodologia proposta, baseada na abordagem do tipo *bottom-up*, é capaz de estimar curvas de carga de unidades consumidoras residenciais individuais para todos os meses do ano com um erro de 2,51% e um coeficiente de determinação igual a 0,7390, com uma margem de erro de 4,0% devido a amostragem. Além disso, também foi possível extrapolar os resultados obtidos de modo a estimar o consumo total acumulado da classe residencial no estado da Paraíba com um erro de 18,36% e um coeficiente de determinação igual a 0,8328, também com uma margem de erro de 4,0% devido a amostragem. Verificou-se também que, a partir dos valores estimado, há indícios de que o consumo de energia elétrica na classe residencial do estado da Paraíba está fortemente associado ao uso de refrigeradores, televisores e lâmpadas, correspondentes a cerca de dois terços do consumo de energia elétrica de uma residência típica. Portanto, é possível concluir que, a partir de dados amostrais específicos, é possível aplicar a metodologia proposta para estimar curvas de carga de unidades consumidoras de diferentes classes econômicas e regiões geográficas por meio da análise de dados de posse, hábitos de uso e características de funcionamento de diferentes equipamentos elétricos presentes nas unidades consumidoras, auxiliando nos estudos de provisionamento energético, planejamento de sistemas de distribuição e de eficiência energética.

REFERÊNCIAS

ALBERINI, A. et al. Hot weather and residential hourly electricity demand in Italy. **Energy**, v. 177, p. 44-56, 2019. ISSN 0360-5442.

ANEEL. **Resolução Normativa N°414**. Resolução Normativa N°414. [S.l.]: ANEEL. 2010.

ANEEL. Classes de Consumo, 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/zNaRBjCLDgbE/content/classe/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 31 Agosto 2021.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 55. 2018.

ANEEL. Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acesso em: 27 Outubro 2021.

CORNELL, J. A.; BERGER, R. D. Factors that Influence the Value of the Coefficient of Determination in Simple Linear and Nonlinear Regression Models. **Phytopathology**, v. I, n. 77, p. 63-70, Fevereiro 1986.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética. [S.l.]. 2020.

FENG, W. et al. An expert recommendation algorithm based on Pearson correlation. **Cluster Computing**, n. 22, p. 7401–7412, Maio 2019.

FRANCISQUINI, A. A. **Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e Em Transformadores de Distribuição**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira. 2006.

GENJO, K. et al. Relationship between possession of electric appliances and electricity for lighting and others in Japanese households. **Energy and Buildings**, v. 37, p. 259–272, 2005.

GRANDJEAN, A.; ADNOT, J.; BINET, G. A review and an analysis of the residential electric load curve models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 9, p. 6539-6565, 2012. ISSN 1364-0321.

HARRINGTON, L.; AYE, L.; FULLER, B. Impact of room temperature on energy consumption of household refrigerators: Lessons from analysis of field and laboratory data. **Applied Energy**, v. 211, n. 1, p. 346-357, Fevereiro 2018.

INMET. Estação: CAMPINA GRANDE (A313). **Portal INMET**, 2020. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A313>>. Acesso em: 04 Setembro 2021.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. São Paulo: Blucher, 2005.

MARQUES, M. D. S. **Metodologia para Modelagem de Curvas Típicas de Demanda Elétrica Utilizando Redes Neurais Artificiais Considerando Variáveis Climáticas**. Universidade Federal do Pampa. Dissertação de Mestrado. Alegrete. 2014.

PROCEL. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia. **Portal Procel Info**, 2017. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS05070313PTBRIE.htm>>. Acesso em: 1 Setembro 2021.

PROCEL. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial**. Procel. [S.l.]. 2019.

PROEDROU, E. A Comprehensive Review of Residential Electricity Load Profile Models. **IEEE Access**, v. 9, p. 12114-12133, 2021.

SHEUGH, L.; ALIZADEH, S. H. **A note on pearson correlation coefficient as a metric of similarity in recommender system**. 2015 AI & Robotics (IRANOPEN). Qazvin, Iran: IEEE. 2015. p. 1-6.

STREICHER, K. N. et al. Analysis of space heating demand in the Swiss residential building stock: Element-based bottom-up model of archetype buildings. **Energy and Buildings**, v. 184, p. 300-322, 2019. ISSN 0378-7788.

SWAN, L. G.; UGURSAL, V. I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 1819-1835, 2009. ISSN 1364-0321.

TEIXEIRA, C. A. **Aplicação do Método Bottom-up para Estimativa de Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Florianópolis. 2020.

APÊNDICE A – VALORES TÍPICOS CONSIDERADOS DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Tabela 18 - Posse média e potência de variações de chuveiros elétricos na Paraíba.

Variação	Posse média por domicílio	Potência típica (W)
< 4500 W	0,019	4000
4501 W - 6000 W	0,035	5250
6001 W - 7500 W	0,005	6750
Total	0,06	4988,60

Fonte: Adaptado de PROCEL, 2019.

Tabela 19 - Posse média e potência de variações de condicionadores de ar na Paraíba.

Variação	Posse média por domicílio	Potência típica (W)
Até 7.500 Btu/h	0,006	748
7501 - 10.000 Btu/h	0,033	800
10.001 - 12.000 Btu/h	0,010	1085
> 24.000 Btu/h	0,002	1844
Total	0,05	888,89

Fonte: Adaptado de PROCEL, 2019.

Tabela 20 - Posse média e potência de variações de lâmpadas na Paraíba.

Variação	Posse média por domicílio	Potência típica (W)
Incandescente	0,09	60,00
Fluorescente compacta	3,67	15,00
Fluorescente tubular	0,11	20,00
LED	1,98	8,00
Dicroica	0,03	7,00
Total	5,88	13,35

Fonte: Adaptado de PROCEL, 2019.

Tabela 21 - Posse média e potência de variações de máquinas de lavar roupas.

Variação	Posse média por domicílio	Potência típica (W)
Automática	0,19	8,45
Automática Lava/Seca	0,18	55,56
Semi Automática	0,12	7,14
Total	0,49	25,36

Fonte: Adaptado de PROCEL, 2019.

Tabela 22 - Posse média e potência de variações de televisores na Paraíba.

Variação	Posse média por domicílio	Potência típica (W)
CRT – Tubo	0,46	135,00
Plasma	0,06	210,00
LCD/LED	0,80	85,00
Total	1,32	108,42

Fonte: Adaptado de PROCEL, 2019.