

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL GUILHEN TOCCHIO

**PROJEÇÃO DA DEMANDA POR AR CONDICIONADO NO SETOR
RESIDENCIAL BRASILEIRO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2020

GABRIEL GUILHEN TOCCHIO

**PROJEÇÃO DA DEMANDA POR AR CONDICIONADO NO SETOR
RESIDENCIAL BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto

Co-orientador: Prof. Dr. Ing. Rodrigo Corrêa da Silva

LONDRINA

2020



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

PROJEÇÃO DA DEMANDA POR AR CONDICIONADO NO SETOR RESIDENCIAL BRASILEIRO

por

GABRIEL GUILHEN TOCCHIO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 26 de outubro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Ismael de Marchi Neto
Prof. Orientador

Rafael Sene de Lima
Membro titular

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

TOCCHIO, Gabriel G. .**PROJEÇÃO DA DEMANDA POR AR CONDICIONADO NO SETOR RESIDENCIAL BRASILEIRO**. 2020. 57p.Trabalho de Conclusão de Curso(Bacharelado em Engenharia Mecânica)–Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.

O crescimento econômico estimulou uma melhoria nos padrões de vida e no aumento da demanda residencial por ar condicionado, além de outros produtos associados ao consumo de energia elétrica. Estatisticamente, o Brasil se encontra entre os dez maiores consumidores de condicionadores de ar do mundo. O consumo estimado de energia elétrica para aparelhos no setor residencial mais que triplicou nos últimos doze anos, enquanto que seu uso doméstico aumenta 9% por ano. Dessa forma, espera-se que a demanda por eletricidade devido ao uso de ar condicionado aumente nas próximas décadas, como resultado do crescimento populacional, maior renda e preferências individuais por espaços refrigerados. O crescimento da demanda brasileira por ar condicionado ainda é obscura e uma questão de consumo negligenciada. Com o objetivo de reduzir as incertezas associadas ao aumento do consumo de ar condicionado no Brasil, o presente trabalho tem como objetivo entender as atuais demandas no setor residencial brasileiro, prevendo também futuras demandas associadas ao seu consumo de energia elétrica. Uma revisão aprofundada do mercado atual de ar-condicionado no Brasil é apresentada no presente trabalho. A metodologia proposta baseia-se em dados climáticos monitorados por 265 estações meteorológicas entre os anos de 2015 e 2018. Correlações empíricas são usadas para determinar as temperaturas internas médias diárias para edifícios residenciais típicos se a norma ANSI / ASHRAE para conforto térmico interno é aplicado para estimar o número médio de dias de resfriamento e aquecimento durante o período de um ano. Serão efetuados também esforços para projetar o consumo de eletricidade pelo resfriamento até 2035, considerando vários efeitos como crescimento populacional, posse de ar condicionado, capacidade de refrigeração e eficiência do equipamento.

Palavras-chave: ar condicionado; conforto térmico, demanda de eletricidade; Brasil.

ABSTRACT

TOCCHIO, GABRIELG. .**FORECASTING DEMAND FOR AIR CONDITIONING IN THE BRAZILIAN RESIDENTIAL SECTOR**.2020. 57p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Federal University of Technology - Parana. Londrina, 2020.

Economic growth leads to an improvement in standards of living and increased residential demand for air conditioning and other energy-consuming products. Brazil is among the ten largest air conditioning consumers in the world. The estimated electricity consumption for air conditioners in the residential sector has more than tripled in the last twelve years, while household air conditioner ownership increased by 9% per year. Demand for electricity due to the use of air conditioning is expected to increase in the upcoming decades as a result of population growth, higher incomes, and higher individual preferences for air-conditioned spaces. However, the growth in the Brazilian demand for air conditioning is a blind spot and an overlooked issue. In order to reduce the uncertainty associated with the evolution of the use of air conditioning in Brazil, the present work aims to understand the current use of air conditioning in the Brazilian residential sector and to forecast the future electricity demand. An in-depth review of the current air conditioning market in Brazil is presented in the academic work. Forecasting is based on a proposed methodology which includes weather data monitored by 265 meteorological stations between 2015 and 2018. Empirical correlations are used to determine daily average indoor temperatures for typical residential buildings and the ANSI/ASHRAE standard for indoor thermal comfort is applied to estimate the average number of cooling and heating days during a year. Efforts are also made to project the electricity consumption by space cooling until 2035 considering several effects, such as population growth, ownership of ACs, cooling capacity, and equipment efficiency.

Keywords: air conditioning; space cooling, residential sector; buildings, electricity demand; Brazil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -Estoque global de ar condicionado.	11
Figura 2 -Demanda de energia para refrigeração de ambientes em edifícios no ano de 2016.	14
Figura 3 - Posse de ar condicionado no setor brasileiro.	14
Figura 4- Diagrama do conforto humano.....	18
Figura 5- PMV em função do PPD.	22
Figura 6- Aquisição de eletrodomésticos no Brasil.....	27
Figura 7 - Consumo de energia por eletrodomésticos no Brasil.....	27
Figura 8- Visão geral de uma compressão AC de estágio único.....	29
Figura 9- Visão geral de uma compressão AC de estágio único.....	30
Figura 10- Aumento da eficiência (EER) dos ACs.....	33
Figura 11- EER de ACs para o setor residencial.....	34
Figura 12- Plataforma de coleta de dados BDMEP.....	38
Figura 13 - Método ON/OFF Climatização.	40
Figura 14 - Média anual de CD e de CDD das capitais estaduais brasileiras entre os anos de 2015 a 2018 para os três tipos de tipologia construtiva predominantes. ...	44
Figura 15 -Média anual de HD e de HDD das capitais estaduais brasileiras entre os anos de 2015 a 2018 para os três tipos de tipologia construtiva predominantes. ...	46
Figura 16 - Consumo médio regional referente a utilização de aparelhos de ar condicionado para o setor residencial brasileiro ano 2018.....	47
Figura 17 - Projeção da demanda total de eletricidade entre 2018 e 2035 para dois cenários.....	48
Figura 18 - Estudo paramétrico cenário base.....	49
Figura 19 - Estudo paramétrico cenário alternativo.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades e capacidade de refrigeração de ACs por país / região em 2016.	31
Tabela 2 - Valores médios anuais de <i>CD</i> , <i>CDD</i> , <i>HD</i> e <i>HDD</i> das regiões brasileiras edifícios de alvenaria.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS

\overline{CD}	Dia grau de resfriamento médio [dia]
Clo	Vestimenta [clo]
EER	Índice de eficiência energética
f	Fator consumo de eletricidade
F_{cl}	Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nu
GT_{med}	Média das temperaturas médias externas a residência [°C]
h	Horário de operação [h]
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² .K]
I_{cl}	Resistência térmica das roupas [m ² .°C/W]
M	Taxa metabólica [W/m ²]
Met	Metabolismo [met]
n	Número de lares
P_a	Pressão parcial do vapor de água [Pa]
P_o	Percentual de posse de ar condicionado [%]
\dot{Q}_L	Capacidade média de refrigeração[kW]
T_{ar}	Temperatura do ar [°C]
T_b	Temperatura base [°C]
T_{cl}	Temperatura superficial das roupas [°C]
T_{med}	Temperatura compensada média [°C]
$T_{med(in)}$	Temperatura media interna [°C]
T_{rad}	Temperatura radiante média [°C]
UR	Umidade relativa[%];
W	Trabalho mecânico [W/m ²];

LISTA DE ACRÔNIMOS

AC	Ar condicionado
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers</i>

COP	Coeficiente de Performance
EER	Índice de Eficiência Energética
<i>SEER</i>	<i>Seasonal energy efficiency ratio</i>
<i>EIA</i>	<i>U.S. Energy Information Administration</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Enegetica
PIB	Produto Interno Bruto
GHG	Gases de Efeito Estufa
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado
HFC	Hydrofluorocarbon
HCFC	Chlorofluorocarbons
<i>INDC</i>	<i>Intended Nationally Determined Contribution</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
<i>MEPS</i>	<i>Minimum Energy Performance Standards</i>
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
<i>NDC</i>	<i>Nationally Determined Contribution</i>
<i>LPG</i>	<i>Liquid petroleum gas</i>
<i>RAC</i>	<i>Room air conditioner</i>
<i>BDMEP</i>	<i>Meteorological Database for Teaching and Research</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>PMV</i>	<i>Predicted mean vote</i>
<i>PPD</i>	<i>Predicted percentage of dissatisfied</i>
<i>CDD</i>	<i>Cooling degree days</i>
<i>HDD</i>	<i>Heating degree days</i>
<i>CD</i>	<i>Cooling days</i>
<i>HD</i>	<i>Heating days</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1. JUSTIFICATIVA	15
1.2. OBJETIVO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. CONFORTO TÉRMICO	17
2.2. ÍNDICE DIA-GRAU	19
2.3. MODELO PMV E PPD	20
2.4. NORMA ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2017	21
2.5. MÉTODO DAS EQUAÇÕES PREDITIVAS	23
2.6. O CENÁRIO ENERGÉTICO NO BRASIL E SEU SETOR RESIDENCIAL DE USO FINAL	24
3 METODOLOGIA.....	38
3.1. MÉTODO ON/OFF CLIMATIZAÇÃO	39
3.2. CÁLCULO CONSUMO SETOR RESIDENCIAL BRASILEIRO E PROJEÇÕES	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5 CONCLUSÕES	51
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

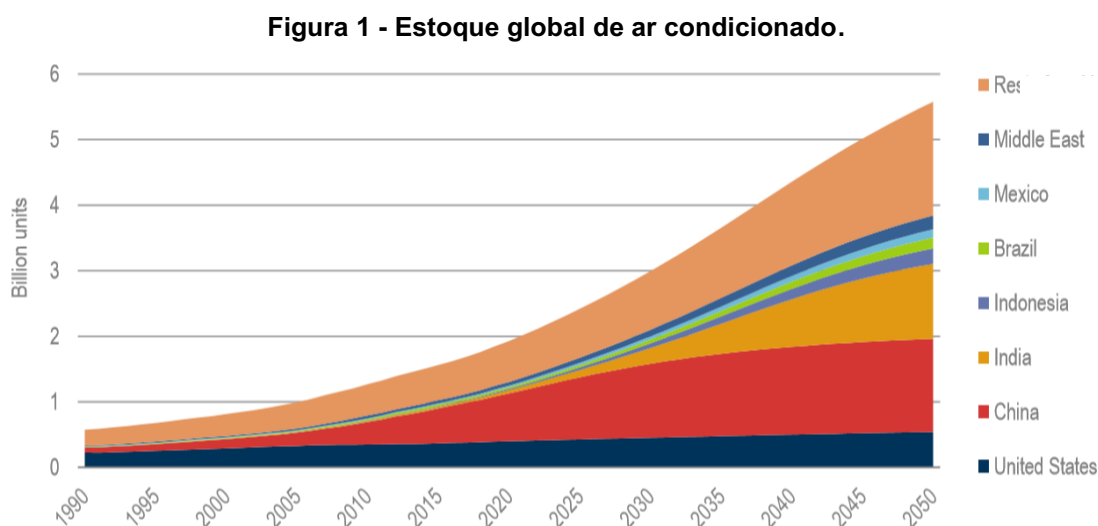
O consumo mundial de energia elétrica tem um crescimento previsto de 13.845,24 Mtep em 2012 para 20.553,50 Mtep em 2040(EIA, 2016).Espera-se que cerca de 70% do crescimento ocorra em países não pertencentes à OCDE, enquanto paralelamente o crescimento econômico e a expansão da população também é um determinante subjacente importante do uso de energia principalmente em países em desenvolvimento (WU; ZHU; ZHU, 2018). Embora seja esperado que o consumo de energia renovável aumente ainda projeta-se que as fontes de energia não renováveis representem cerca de 78% do consumo de final de energia em 2040 (EIA, 2016).

A eletricidade é a forma de consumo de energia de maior crescimento final. O avanço econômico dos países em desenvolvimento depende do consumo elétrico, fator-chave no crescimento econômico (SHAHBAZ et al., 2017). As projeções indicam que a geração global de eletricidade aumentará em 69%, de 21.600 TWh no ano de 2012 para 36.500 TWh em 2040 (EIA, 2016). Países não pertencentes à OCDE promoverão, à medida que os padrões de vida aumentam, um crescimento na geração de eletricidade de em média em 2,5% ao ano (EIA, 2016). Consequentemente espera-se que a demanda de energia elétrica para eletrodomésticos e serviços comerciais como escolas, hospitais, shopping centers e edifícios de escritórios aumente nos próximos anos, e embora esse crescimento econômico force um aumento no consumo, a maneira como o futuro das atividades econômicas se traduzem em demanda por energia depende, especialmente, de políticas e mudanças estruturais nas economias(IEA, 2016).

De acordo com estudos realizados pela Agência Internacional de Energia (AIE)(IEA, 2016),o consumo de energia por motores elétricos no setor da construção civil dobrará nos próximos anos, principalmente devido ao uso de ar condicionados. A demanda por eletrodomésticos representará metade do aumento no consumo de energia até 2040. Como resultado do crescimento econômico e do aumento de renda da população, existe uma preferência natural pelo conforto térmico, resultando em um aumento notável no uso de energia elétrica para aquecimento de ambiente, ventilação e ar condicionado (HVAC).

Atualmente observa-se que a energia utilizada para o conforto térmico em edificações apresenta uma elevada ascensão não apenas no Brasil, mas também a

nível mundial. Estima-se que entre os anos de 1990 e 2016 a demanda elétrica para climatização mais que triplicou como é possível observar no Figura 1 (SLADE, 2018). O uso de aparelhos de ar condicionado e ventiladores já representam cerca de 20% do consumo total de eletricidade do mundo, segundo os dados da IEA, o planeta enfrenta uma “coldc runch” (IEA, 2018).



Fonte: Adaptado de *Opportunities for energy-efficient air conditioning* – Slade (2018).

A “crise fria” consiste em um ciclo que se inicia na crescente demanda de energia elétrica recorrente da climatização artificial de ambientes. Dessa forma, a matriz energética global é sobrecarregada elevando as necessidades por geração e distribuição, ainda maiores em horários de pico, que muitas das vezes é atendida principalmente por usinas termoelétricas. Essas usinas, por sua vez, resultam no aumento significativo das emissões de carbono que contribuem para o aquecimento global, aumentando a temperatura ambiente e, por fim, causando maior demanda por climatização.

O aumento da carga de ar condicionado, especialmente de refrigeração, aumenta a necessidade geral de energia no edifício, bem como a capacidade de geração e distribuição para atender à demanda nos horários de pico, colocando uma pressão enorme sobre os sistemas de energia elétrica. Em termos de média em todos os países, o resfriamento do espaço representou 14% da demanda de pico em 2016 (IEA, 2018). Em dias de maior aquecimento térmico, o arrefecimento representa mais de 70% da demanda elétrica das residências nos Estados Unidos,

como na Filadélfia no ano de 2011, quando o ar condicionado representou 74% da demanda de eletricidade residencial (WAITE et al., 2017).

Mais de 50% da carga de pico diária em Pequim durante uma onda de calor em 2017 estava relacionada ao resfriamento térmico de um ambiente (STATE GRID CORPORATION OF CHINA, 2017). Já a Índia, sofreu um déficit no atendimento da demanda de pico em cerca de 17 GW durante o verão de 2012. Esse déficit interrompeu o serviço de energia elétrica por várias horas (cerca de 16 horas por dia) em algumas partes do país e um apagão em grande escala afetou cerca de 600 milhões de pessoas (YALE ENVIRONMENT 360, 2019).

O pico de demanda define então a exigência de capacidade de geração de eletricidade, além da demanda por requisitos de infra-estrutura de transportes e distribuição (WAITE et al., 2017). Os custos para construir, manter e operar um sistema elétrico para atender ao pico de demanda são extremamente altos, pois são usados apenas por períodos provisórios, onde os custos são geralmente duas ou quatro vezes em valores por kWh do suprimento de eletricidade com carga de base (IEA, 2018). Por sua vez, esses valores são refletidos no preço da energia elétrica para o consumidor.

Atualmente, o uso de condicionadores de ar é muito comum, não apenas em países desenvolvidos, mas também em países emergentes como é o caso da China. Segundo Mc Neil e Letschert (2008), no período de 1990 a 2003 o percentual de residências chinesas que possuíam um aparelho ar condicionado subiu de 1% para 62%, sendo que somente em 2010, 50 milhões de unidades foram vendidas (MCNEIL; LETSCHERT, 2008).

Estima-se hoje que existam cerca de 1,6 bilhões de aparelhos em uso no mundo, sendo que mais da metade se encontram na China e nos Estados Unidos (IEA, 2018, p. 19). Sivak (2009) evidencia que os principais motivos da relativa ascensão do ar condicionado nos países em desenvolvimento se dão, entre outros fatores, pelo crescimento populacional, econômico e pela urbanização nas regiões mais quentes do planeta (SIVAK, 2009).

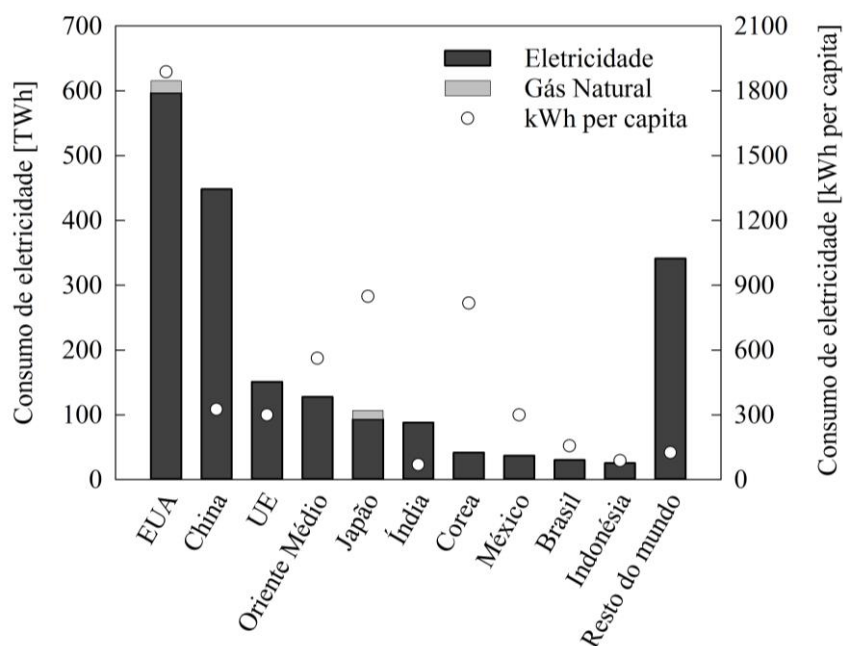
A maior parte do crescimento projetado no uso de eletricidade para resfriamento até 2050 vem de países em desenvolvimento. O maior crescimento previsto virá da Índia; um aumento de 27 milhões de ACs em 2016 para 1,1 bilhões, traduzindo-se em uma taxa esperada de crescimento de 4.206% até 2050 (ARMSTRONG, 2018). No mesmo período, espera-se uma taxa de crescimento de

1.845% na Indonésia, de 697% no México e 503% no Brasil, países consideravelmente mais suscetíveis aos efeitos das mudanças climáticas, transformando resfriamento de um ambiente interno em uma questão de saúde. A Índia, como grande parte da América do Sul e África, provavelmente experimentarão extremos de temperatura associados às mudanças climáticas nas próximas décadas (MMA, 2016) (SCHIERMEIER, 2018).

A Figura 2 representa o consumo global de energia elétrica para resfriamento de edifícios, de todos os setores, por país no ano de 2016. Os Estados Unidos continuam sendo de longe o maior consumidor de energia para refrigeração do mundo; esse número, no entanto tem se estabilizado nos últimos anos. O Brasil, todavia, consumiu apenas 32 TWh em 2016, cerca de 19 vezes menos que os Estados Unidos, 14 vezes menos que a China e 2,8 vezes menos que a Índia. O consumo de energia per capita para refrigeração mostra ainda mais disparidades em todo o mundo. O Brasil teve um consumo de cerca de 150 kWh per capita, enquanto os Estados Unidos consumiram 1.880 kWh per capita e, o Japão e a Coréia, mais de 800 kWh.

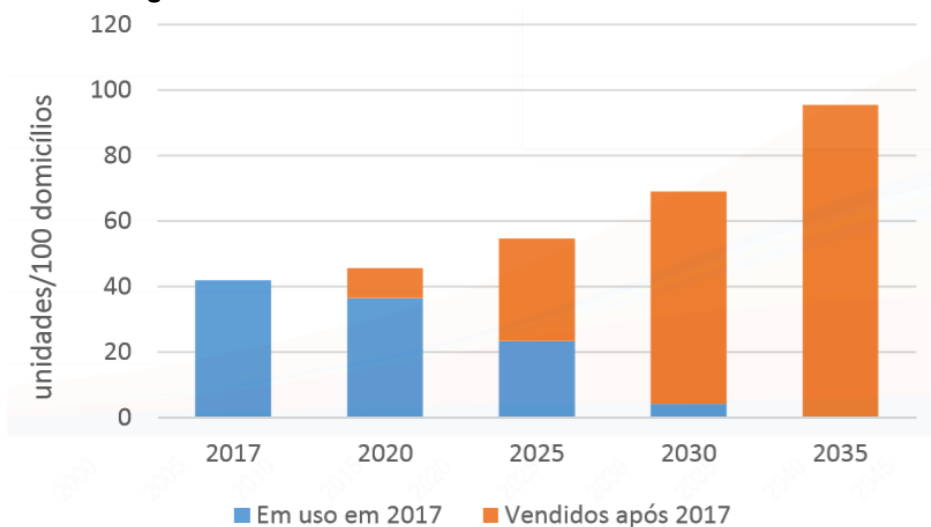
No Brasil em 2017, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2018), o consumo final referente à utilização de aparelhos de ar condicionado foi de 18,7 TWh, isso apenas no setor residencial, e as projeções mais recentes apontam para um crescimento de aproximadamente 40% nos próximos 10 anos, como é retratado na Figura 3. Tais números revelam a relevância de políticas de eficiência energética voltada para uso de aparelhos de ar condicionado nas edificações (EPE, 2018).

Figura 2 - Demanda de energia para refrigeração de ambientes em edifícios no ano de 2016.



Fonte: Adaptado de *Future of cooling* – IEA (2018).

Figura 3 - Posse de ar condicionado no setor brasileiro.



Fonte: NOTA TÉCNICA EPE 030/2018 (2018).

Embora os ACs impactem significativamente a demanda de eletricidade e sejam comercializados por todo o mundo, há uma carência de informações reunidas a seu respeito no Brasil.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para obter uma maior compreensão das potenciais necessidades futuras de ar condicionado no Brasil, primeiro é importante entender a dimensão da demanda que o país sofre recorrente a climatização. Ocorre que a quantificação deste tipo demanda, ainda é algo complexo de ser analisado. Isso se deve, principalmente, pela quantidade de variáveis que levam em conta parâmetros de conforto térmico serem de difícil acesso.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um método, baseado nos critérios de conforto térmico da norma *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017* (2017), onde é possível identificar a quantidade de vezes que foi necessário recorrer a utilização de um aparelho de climatização (ANSI/ASHRAE 55-2017, 2017). Para isso, considerou-se a temperatura interna de três tipologias construtivas, sendo elas madeira, alvenaria e concreto, propostas pelo método das Equações Preditivas (KRÜGER; GIVONI, 2004). Dessa forma, estima-se a demanda energética por climatização no Brasil levando em conta parâmetros internos e externos do ambiente local.

Além dos objetivos gerais o presente trabalho também apresenta alguns objetivos específicos, sendo estes:

- A aquisição de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de todas as estações convencionais cadastradas no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) (INMET, 2019);
- O estudo de parâmetros de conforto térmico;
- O estudo e aplicação do método das Equações Preditivas para três tipologias construtivas de baixo custo (madeira, concreto e alvenaria) (KRÜGER; GIVONE, 2004);

- O estudo da norma *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017* (2017) e a implementação do código em MATLAB para o cálculo de parâmetros de climatização(ANSI/ASHRAE 55-2017, 2017);
- O estudo do método abordado pela nota técnica EPE 030/2018 (2018) para o cálculo da demanda energética por utilização de aparelhos condicionadores de ar (EPE, 2018);
- O desenvolvimento e aplicação de um método alternativo para a perspectiva atual de demanda energética por de climatização no Brasil.
- Serão avaliados também dois cenários que quantificam o consumo de eletricidade para refrigeração até 2035, em paralelo a um estudo paramétrico visando identificar os impactos de variáveis-chave na demanda de energia elétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento da metodologia proposta que se inicia com o conceito de conforto térmico; índice Dia-Grau; Voto Médio Predito (PMV) e o Percentual de Pessoas Termicamente Desconfortável (PPD); Norma ANSI/ASHRAE Standard 55-2017; método das equações preditivas; o cenário energético no Brasil e seu setor residencial de uso final.

2.1 CONFORTO TÉRMICO

De acordo com a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*, o conforto térmico pode ser definido como: “O estado mental que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda” (ANSI/ASHRAE 55-2017, 2017). É intrínseco do ser humano, desde seu primórdio, buscar formas de garantir este estado, principalmente em decorrência das adversidades proporcionadas pelo ambiente. Com a intenção de amenizar as altas temperaturas desérticas do Egito, os antigos faraós dispunham de escravos com a função de abanadores de enormes folhas de plantas nativas.

Com o passar do tempo, o homem começou a entender a importância do estudo do controle térmico de ambiente e como aquilo poderia beneficiá-lo de forma muito positiva, não só para execução de trabalhos, mas também para momentos de lazer. Segundo Lamberts (2016), o desempenho humano, principalmente em atividades que demandam atenção seja ela manual ou intelectual, está inteiramente ligado ao conforto térmico do indivíduo (LAMBERTS, 2016).

Uma forma de entender melhor como este estado pode ser atingido, é importante primeiro conhecer quais são as variáveis envolvidas e compreendê-las. As variáveis de conforto térmico estão divididas em dois tipos:

- Variáveis Humanas: Metabolismo (Met) e Vestimentas (Clo);
- Variáveis Ambientais: Temperatura do ar (T_{ar}), Temperatura Radiante Média (T_{Rad}), Velocidade do ar (V_{ar}) e Umidade Relativa do ar (UR).

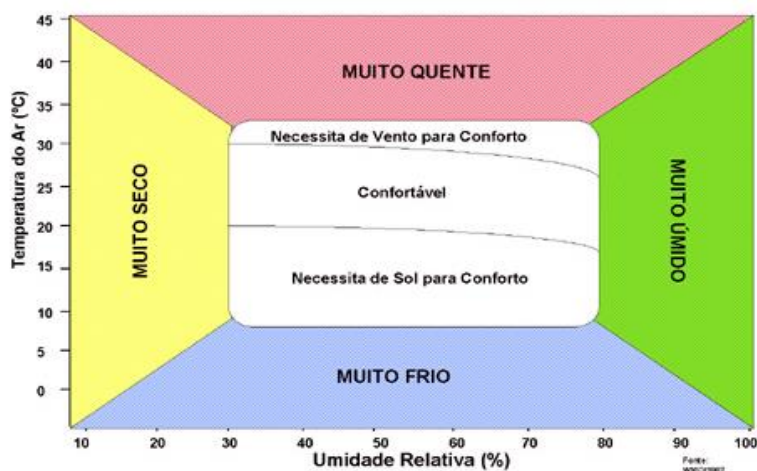
Por meio do metabolismo o corpo gera calor a partir de elementos orgânicos. A proporção de energia na forma de calor dissipada depende da quantidade de trabalho muscular. Já a vestimenta impõe um isolamento térmico entre o corpo e o meio, dificultando a troca de calor por convecção.

Outro fator importante é a umidade relativa (UR), a qual representa a quantidade de vapor de água no ar dividido pela quantidade máxima que este pode conter, a uma determinada temperatura e pressão. À medida que a temperatura do meio se eleva, o organismo secreta suor a fim de aumentar sua dissipação de calor por evaporação, porém se o ambiente estiver com a UR alta, esta troca de calor não será eficiente. Dessa forma, quanto maior a UR, menor a eficiência da evaporação na remoção do calor. Já a velocidade do ar é uma variável que está diretamente ligada às trocas de calor por convecção e evaporação, retirando o ar quente e facilitando a evaporação de água em contato com a pele, reduz a sensação térmica quente.

Em conjunto com as variáveis ambientais do local, a temperatura radiante média representa a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual as trocas de calor por radiação são iguais ao ambiente real não uniforme.

Com base nos parâmetros apresentados, e levando em conta somente as variáveis ambientais, a Figura 4 representa um diagrama alternativo de conforto térmico (INMET, 2019).

Figura 4 - Diagrama do conforto humano.



Fonte: INMET – Conforto Térmico (2019).

2.2 ÍNDICE DIA-GRAU

O Método Dia-Grau surgiu em meados da década de 20, onde tem por finalidade estimar a quantidade de energia requerida para o resfriamento ou aquecimento de ambientes em diferentes localidades (SIVAK, 2009).

O cálculo de tais parâmetros consiste primeiramente no estabelecimento de uma temperatura base (T_b) ideal para o conforto térmico humano. Através dos modelos de análise propostos pela literatura (baseando-se em 18°C no ambiente externo), sendo que o calor adicional gerado pelos ocupantes e suas atividades, resultaria em uma temperatura interna média de 21°C (SIVAK, 2017).

Em seguida deve ser estabelecido o período de tempo da análise, sendo comum a escolha de um ano, por conta da variação climática entre as quatro estações. O parâmetro Dia-Grau indica o quão “frio” ou “quente” um determinado local é, comparando a temperatura média diária ao ar livre com a T_b por um determinado período de tempo. O *Cooling Degree Day (CDD)*, Dia-Grau de Resfriamento, é calculado subtraindo 18 °C (T_b) da temperatura média diária compensada (T_{med}) e somando apenas valores positivos ao longo de um ano inteiro, como é expresso na Eq (1) e Eq (2). Similarmente, o *Heating Degree Day (HDD)*, Dia-Grau de Aquecimento, acumulado por mais de um ano é determinado pela soma dos dias com T_{med} menor que T_b , mostrado na Eq (3) e Eq (4). O Dia-Grau é geralmente calculado de acordo com a temperatura do bulbo seco. O índice i refere-se há um dia específico do ano.

$$CDD = T_{med} - T_b \quad (1)$$

$$CDD_{anual} = \sum_{i=1}^{365} CDD_i \begin{cases} \text{Se } T_{med,i} > T_b \text{ então,} & CDD_i = T_{med,i} - T_b \\ \text{se não} & CDD_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$HDD = T_b - T_{med} \quad (3)$$

$$HDD_{Anual} = \sum_{i=1}^{365} HDD_i \begin{cases} \text{Se } T_{med,i} < T_b \text{ então, } & HDD_i = T_b - T_{med,i} \\ \text{se não } & HDD_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Vale ressaltar que o *CDD* e o *HDD* são calculados usando apenas temperaturas externas e não há necessidade de prever temperaturas internas.

Apesar dos parâmetros *CDD* e *HDD* serem muito utilizados há alguns anos, estes oferecem valores não muito bem mensuráveis, além do fato de se basearem única e exclusivamente nos valores de temperatura externa do ambiente, deixando de lado muitas variáveis importantes para o conforto térmico humano, conforme já apresentado anteriormente.

2.3 MODELO PMV E PPD

A principal pesquisa em câmara climatizada foi realizada por Fanger (1970) em 1970, se tornando o marco divisor no estudo de conforto térmico, sendo inclusive adotada como norma internacional, a *ISO7730 (Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, 1984)* (FANGER, 1970; ISO7730, 1984).

Desde então, esse documento é adotado tanto para os ambientes condicionados artificialmente como também, pela falta de uma norma específica, para os ambientes condicionados naturalmente. Essa metodologia também é conhecida como Modelo Fanger, Modelo Estático ou Modelo PMV/PPD, em que por PMV entende-se Voto Médio Predito e por PPD Percentual de Pessoas Termicamente Desconfortáveis, as quais são apresentadas pelas Eq (5) e Eq (7), respectivamente. A Eq (6) representa a carga térmica presente no cálculo do PMV.

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,36M} + 0,028) \cdot L \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
L = \{ & (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - \\
& - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\
& - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) \\
& - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_{ar}) \\
& - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 \\
& - (T_{rad} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \}
\end{aligned} \tag{6}$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-[0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2]} \tag{7}$$

Onde:

PMV : Voto Médio Predito;

M : Taxa metabólica (W/m^2);

W : Trabalho mecânico (W/m^2), sendo nulo para a maioria das atividades;

I_{cl} : Resistência térmica das roupas ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

F_{cl} : Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nu;

T_{ar} : Temperatura do ar ($^\circ C$);

T_{rad} : Temperatura radiante média ($^\circ C$);

V_{ar} : Velocidade relativa do ar (m/s);

P_a : Pressão parcial do vapor de água (Pa);

h_c : Coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot K$);

T_{cl} : Temperatura superficial das roupas ($^\circ C$);

PPD : Percentual de Pessoas termicamente desconfortável (%).

2.4 NORMA ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2017

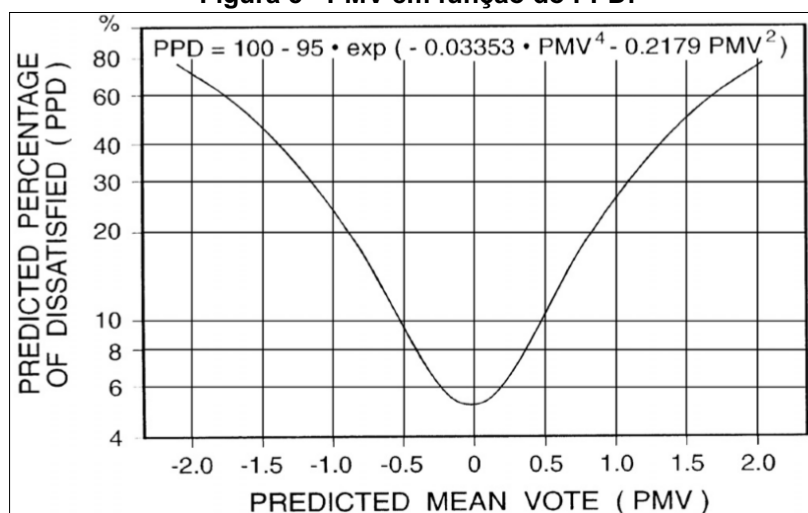
A Norma *Standard 55* foi publicada pela primeira vez em 1966 e republicada em 1974, 1981 e 1992. A partir de 2004, é agora atualizada usando os procedimentos de manutenção contínua da *ASHRAE*. A norma *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017* a mais recente edição do *Standard 55* incorpora sete adendos à edição de 2013 que foram escritos com um foco renovado na aplicação do padrão

por praticantes e uso de linguagem clara e executável (ANSI/ASHRAE 55-2017, 2017).

O objetivo desta norma é especificar as combinações de fatores termo-ambientais internos e fatores pessoais, que irão produzir condições de conforto térmico aceitáveis para a maioria dos ocupantes dentro de um espaço.

O método analítico (Modelo Estático) abrangente para determinar estas condições, utiliza algoritmos de cálculo, implementados em uma ferramenta de conforto térmico *ASHRAE* (2017). O *PMV*, prevê a média do valor dos votos de sensação térmica de um grande grupo de pessoas em uma escala de sensações de 7 pontos, expresso de -3 a +3 correspondente às seguintes categorias: (-3) *cold*, (-2) *cool*, (-1) *slightly cool*, (0) *neutral*, (1) *slightly warm*, (2) *warm* e (3) *hot*(ANSI/ASHRAE 55-2017, 2017). Em qualquer nível de *PMV*, a proporção de uma população de membros insatisfeitos pode ser prevista através da curva percentual de insatisfação ilustrada na Figura 5.

Figura 5 - PMV em função do PPD.



Fonte: ANSI/ASHRAE Standard55-2017 (2017).

Pela definição da norma, um ambiente interno só é termicamente aceitável se uma maioria substancial (mais de 80%) dos ocupantes estiver termicamente satisfeito, ou seja, equivalente ao *PPD*.

2.5 MÉTODO DAS EQUAÇÕES PREDITIVAS

Krüger e Givoni (2004) apresentaram resultados da aplicação de fórmulas para prever as temperaturas diárias internas em três casas de baixo custo monitoradas em Curitiba, Brasil. As casas eram ocupadas por famílias que não tinham dispositivos de refrigeração nem de aquecimento e eram construídas com diferentes materiais de construção com diferentes propriedades térmicas. Medições com *data-loggers* do tipo HOBO foram realizadas em dois períodos diferentes: no inverno, de 9 de julho a 3 de agosto de 2000 e no verão, de 12 de dezembro de 2000 a 10 de janeiro (KRÜGER; GIVONE, 2004).

A disponibilidade dos dados de Krüger e Dumke (2001), medidos tanto no verão quanto no inverno em casas ocupadas, apresentou a oportunidade de descobrir se uma única fórmula seria capaz de "prever" as temperaturas internas sob condições climáticas muito diferentes utilizando apenas os dados da temperatura exterior (KRÜGER; DUMKE, 2001).

Com base nesses estudos, concluiu-se que a partir dos dados das temperaturas externas e internas, medidos ao longo de várias semanas, foi possível prever a temperatura interna de um determinado edifício em qualquer clima, mesmo quando este é muito diferente do clima sob o qual os dados originais foram coletados. Essas equações preditivas para as temperaturas médias internas são apresentadas com suas respectivas tipologias construtivas:

- Tipologia construtiva de madeira, Eq (8):

$$T_{med(in)} = GT_{med} + 4,1 - 0,067 \cdot GT_{med} + 0,74 \cdot (T_{med} - GT_{med}) \quad (8)$$

- Tipologia construtiva de alvenaria, Ep (9):

$$T_{med(in)} = GT_{med} + 3,7 + 0,092 \cdot GT_{med} + 0,7 \cdot (T_{med} - GT_{med}) \quad (9)$$

- Tipologia construtiva de concreto, Eq (10):

$$T_{med(in)} = GT_{med} + 1,7 - 0,05 \cdot GT_{med} + 0,7 \cdot (T_{med} - GT_{med}) \quad (10)$$

Onde:

$T_{med(in)}$: Temperatura média interna da residência (°C);

T_{med} : Temperatura média externa à residência (°C);

GT_{med} : Média das temperaturas médias externas a residência (°C), referente ao período de análise.

2.6 O CENÁRIO ENERGÉTICO NO BRASIL E SEU SETOR RESIDENCIAL DE USO FINAL

O crescimento econômico indicado pelo produto interno bruto (PIB) é um fator determinante no aumento do consumo de energia. No Brasil, o PIB cresceu de US\$1.953 bilhões em 1990 para US\$ 2.894 bilhões em 2017, enquanto a oferta de energia elétrica aumentou de 141,9 Mtep para 292,1 Mtep (MME; EPE, 2018). Cerca de 43% da energia doméstica é fornecida por energia renovável, valor superior à média mundial, onde as fontes renováveis representam apenas 13,7% e 10,5% do mix de energia nos países da OCDE (MME; EPE, 2018). A energia elétrica é, atualmente, a segunda principal fonte de energia no Brasil (17,5%) depois dos derivados de petróleo (42,6%) (MME; EPE, 2018). O consumo de energia elétrica atingiu 526,2 TWh em 2017 (MME; EPE, 2018), suprido principalmente por usinas hidrelétricas (65,2%), seguido por gás natural e outros derivados do petróleo (13,5%), biomassa (8,2%), eólica (6,8%), carvão (3,6%), nuclear (2,5%) e solar (0,1%). Por sua vez, 80,4% da eletricidade é fornecida por fontes renováveis, bem acima da média mundial (22,8%).

O setor residencial é o segundo maior consumidor de eletricidade (25,5%), depois do setor industrial (37,7%). Os edifícios residenciais consumiram 134 TWh em 2017 (MME; EPE, 2018). Para fins de comparação, o consumo de energia elétrica no setor residencial foi de 83 TWh em 2005, representando um aumento de 61% entre 2005-2017. Outro fator importante que contribui para o crescimento da demanda de eletricidade é o aumento do número de famílias. Entre os anos de 1990 a 2012, esse número aumentou em 77%, com 27 milhões de novas unidades

consumidoras (MME; EPE, 2014). Em 2017, foram estimados 69,8 milhões de domicílios no Brasil e 99,8% deles tinham acesso à energia elétrica; 99,5% das famílias (69,4 milhões) possuíam eletricidade provida pela rede pública, com 99,2 de disponibilidade (IBGE, 2018).

Embora o número de famílias tenha aumentado nos últimos anos, a demanda por energia total por residência caiu, enquanto a demanda por eletricidade mostrou uma tendência oposta. Em 1990, uma família consumia anualmente 0,51 toe, enquanto em 2012 o consumo caiu para 0,38 toe, consequência do uso de fontes mais eficientes para cozinhar (grande parte das famílias no Brasil usa gás liquefeito de petróleo - LPG) paralelamente ao uso mais frequente de coletores de energia solar para aquecimento de água. Além disso, houve também uma diminuição no número médio de pessoas por domicílio. Enquanto 1990 havia 4,2 pessoas por moradia, em 2012 esse dado caiu para 3,2 (MME; EPE, 2014). O consumo médio mensal de energia elétrica por família passou de 114 kWh em 1990 para 123 kWh em 1994, o que significa um crescimento de 1,9% ao ano. Desde a implementação do plano real em 1994, houve um crescimento de 3,7% até 2000, atingindo 153 kWh. Outro dado a se notar é a demanda mensal individual de eletricidade: Em 1990, o valor era de 27,1 kWh / pessoa-mês, subindo para até 49 kWh / pessoa-mês em 2012.

Durante o racionamento de energia elétrica de 2001 (CORRÊA DA SILVA; DE MARCHI NETO; SILVA SEIFERT, 2016), o governo federal estabeleceu a meta obrigatória de redução de demanda do setor residencial em 20% em todas as regiões, exceto no sul do Brasil. Essa medida entrou em vigor durante o segundo semestre de 2001, e, conseqüentemente, a demanda mensal de cada família caiu de 132 kWh em 2001 para 126 kWh em 2002. Após esse período, houve novamente uma tendência de aumento na demanda por energia elétrica. O consumo médio mensal por família atingiu 156 kWh em 2012 (MME; EPE, 2014) e 159,8 kWh em 2016 (MME; EPE, 2019). Durante a crise de eletricidade em 2001, a Lei de Eficiência Energética 10295/2001 entrou em vigor para a eficiência mínima de vários equipamentos, como motores elétricos, transformadores, lâmpadas, fogões, geladeiras, ar condicionados, etc.

Cozinhar é o uso de energia doméstica de maior consumo energético, correspondendo a 58% em 2010. Apesar da menor eficiência, lenha e carvão são predominantemente utilizados em comparação com o GLP e gás natural. A

participação de GLP e gás natural vem, no entanto, aumentando nos últimos anos e contribuindo para a redução do consumo de energia para esses fins. A segunda maior porção de energia inclui eletricidade para iluminação e eletrodomésticos como geladeira, televisão, máquina de lavar etc. O aquecimento de água é responsável por consumir 10% da energia total, a fonte de energia predominante para esse fim é a eletricidade (70%), enquanto a porção restante (30%) é fornecida por aquecedores de água através da combustão de GLP ou gás natural. Em 2005, o ar-condicionado foi responsável por 1% do uso total de energia consumida nas famílias, e 2% em 2010 (MME; EPE, 2014).

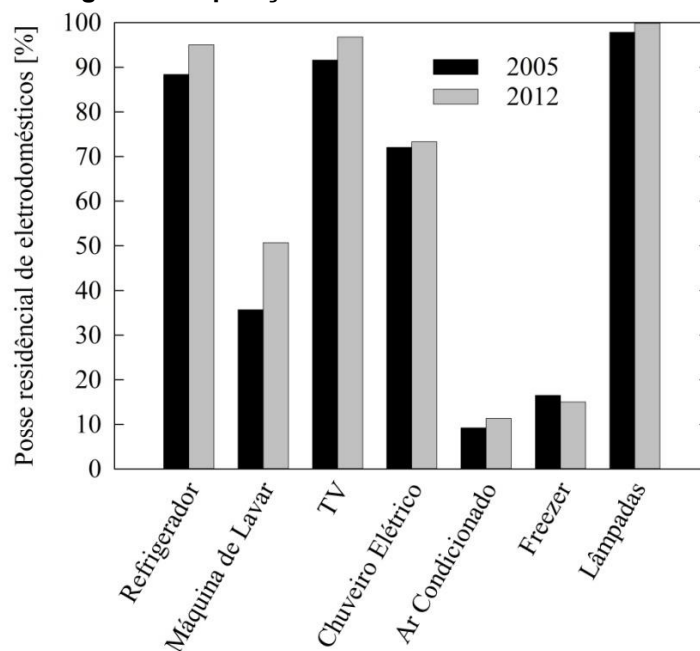
O aumento da aquisição de eletrodomésticos entre 2005 e 2012 nas residências brasileiras é ilustrado na Figura 6. Representando mais de 81% do consumo de eletricidade em uma casa típica brasileira, atualmente, as lâmpadas para iluminação são encontradas em quase todas as residências, ou seja, 99,5% em 2012. Com exceção dos freezers (redução de 16,5% em 2005 para 14,7% em 2012) e chuveiros elétricos (redução de 71,9% em 2005 para 70,1% em 2012), todos os eletrodomésticos mostram um aumento de aquisição média. Já as lavadoras de roupas têm o aumento mais significativo, de 35,5% em 2005 para 50% em 2012. A aquisição de geladeiras aumentou de 87,9% para 94,5%, enquanto a TV passou de 91,3% para 96,3% entre 2005 e 2012. Estimativas indicam que os ACs foram encontrados em apenas 11,1% dos domicílios em 2012, ante 8,9% em 2005.

Um estudo recente (MME; EPE, 2019b) estima que a aquisição de ACs no setor residencial dobrou entre 2005 e 2017. Apesar desse aumento nas vendas na última década, a penetração de ACs ainda é baixa no setor residencial, em torno de 0,4 unidade por domicílio; enquanto na China estima-se 1 unidade por família e nos Estados Unidos 2 unidades por família. Diferentemente da China e Estados Unidos, o Brasil se encontra geograficamente posicionado em uma zona tropical, onde se estima que o consumo de eletricidade por ACs no setor residencial tenha aumentado 237% nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017 (MME; EPE, 2019b).

De acordo com um relatório (MME; EPE, 2019b), como resultado do aumento das vendas de ACs, a parcela de energia elétrica consumida pelo ar-condicionado nas residências passou para quase 14% em 2017, enquanto em 2005 era de cerca de 7%. A mudança em hábitos de consumo como a redução no

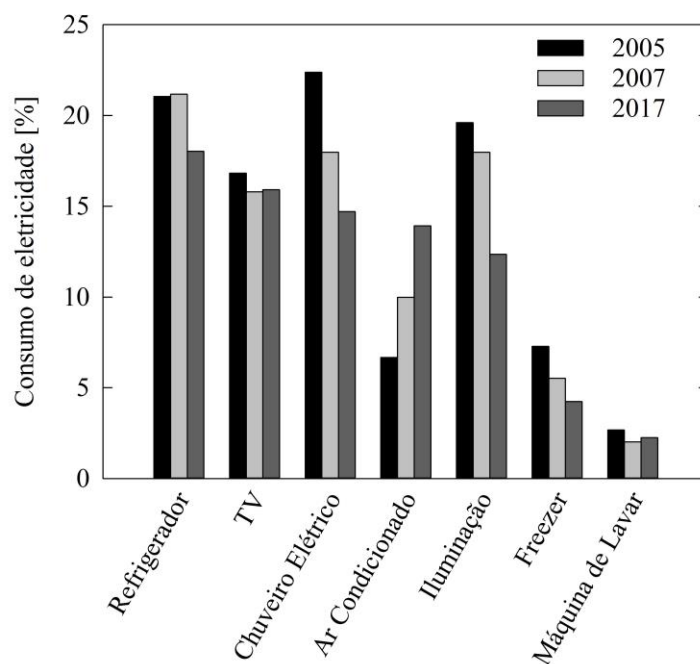
uso de freezers e a aquisição de lâmpadas mais eficientes como os LEDs tornaram os ACs o quarto eletrodoméstico mais usado em 2017, atrás da geladeira, da TV e do chuveiro elétrico, apresentado na Figura 7.

Figura 6 - Aquisição de eletrodomésticos no Brasil.



Fonte: Modificado de MME; EPE, (2014)

Figura 7 - Consumo de energia por eletrodomésticos no Brasil.



Fonte: Modificado de MME (2019b).

Apesar da crescente demanda por ACs nos últimos anos, parte do consumo de eletricidade foi evitada devido a políticas de energia como programas de etiquetagem e o estabelecimento de níveis mínimos de eficiência. Estima-se que o ganho acumulado na eficiência energética das ACs tenha sido de 8% entre 2005 e 2017 (MME; EPE, 2019b).

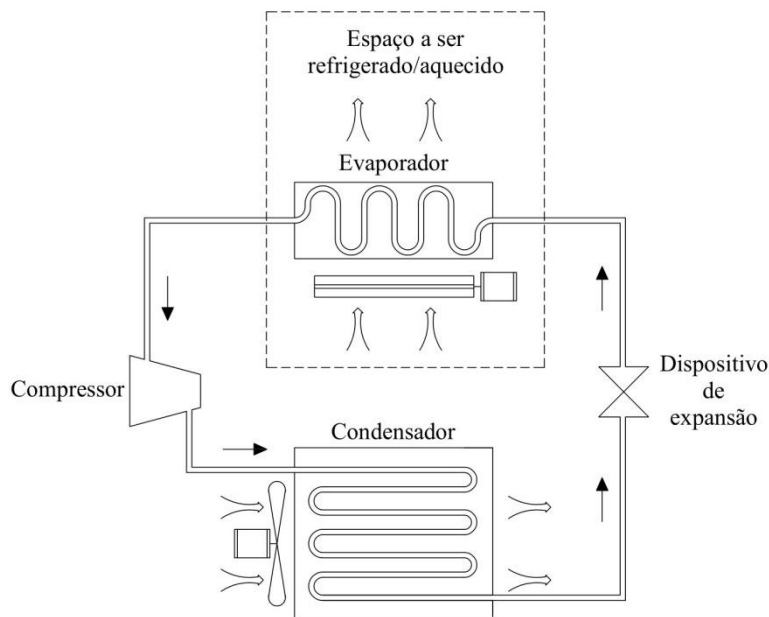
O crescimento do uso de ACs em edifícios tem mudado inclusive os horários de pico da demanda de energia elétrica, que no passa do ocorria entre as 17h e as 22h, enquanto nos últimos anos ocorre durante a tarde e no verão (CORRÊA DA SILVA; DE MARCHI NETO; SILVA SEIFERT, 2016), que, começando em setembro, mostra sua intensidade máxima e diminui no início de abril (MME; EPE, 2019b). No setor residencial, o uso de ACs ocorre principalmente ao entardecer e à noite, enquanto nos setores comerciais e industriais, principalmente ao longo do dia.

As tecnologias de ar-condicionado disponíveis no Brasil variam em escala e custo: de pequenas e portáteis unidades projetadas para um único cômodo, até as plantas em larga escala para edifícios inteiros, como complexos de escritórios, shopping centers, hospitais e hotéis.

Grande maioria dos ACs opera em um ciclo de compressão de vapor, onde um fluido de trabalho refrigerante é empurrado pelo sistema e passa por alterações de estado. Figura 8 demonstra um sistema de compressão de vapor de estágio único que opera no modo de refrigeração. Seus quatro componentes principais são: um compressor, para aumentar a pressão do refrigerador; um condensador para rejeitar o calor do espaço externo e uma válvula de expansão térmica (ou válvula de borboleta) para reduzir a pressão do refrigerante e por fim um evaporador, para remover o calor do espaço interno e fornecer conforto térmico. Estão incluídos ventiladores para facilitar a troca de calor no evaporador e no condensador.

O ciclo de compressão de vapor pode também ser revertido para o modo de aquecimento, no qual o evaporador troca de papéis e se torna o condensador, fornecendo calor para a sala interna enquanto o condensador se torna o evaporador, rejeitando o calor para o exterior. ACs que operam nos modos de refrigeração e aquecimento são muito comuns na China, Índia, Brasil, Japão e União Européia e são responsáveis por cerca de 90% do mercado total (SHAH; WAIDE; PHADKE, 2013).

Figura 8 - Visão geral de uma compressão AC de estágio único.



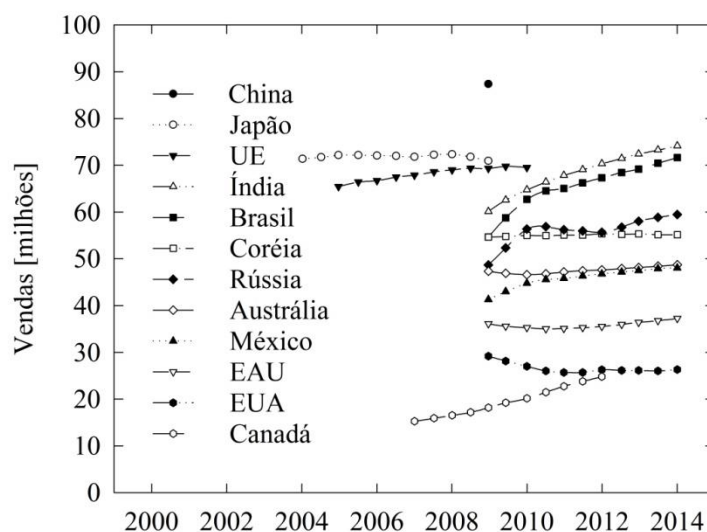
Fonte: Autoria própria.

Os ACs atualmente comercializados no Brasil operam com hidrofluorcarbonetos (HFCs), como por exemplo os modelos R410 e R134a. O uso de clorofluorcarbonetos (CFCs) foi proibido no Brasil no ano de 2010, no entanto, muitos ACs ainda operam com hidroclorofluorcarbono (HCFC) e o R22 é o refrigerador mais utilizado no país.

Conforme indicado na Figura 9, o mercado global de ACs tem apresentado uma tendência crescente nos últimos anos, enquanto as vendas nas economias emergentes estão crescendo rapidamente, as vendas na Europa, Japão e EUA permanecem estáveis. Os mercados nos países citados são dominados por condicionadores de ar ambiente (RACs) em vez de unidades centrais, também conhecidas como sistemas de ar-condicionado com dutos nos Estados Unidos. Como na maioria dos países exceto os Estados Unidos, as unidades de divisão única (ou *split*) dominam o mercado brasileiro no setor residencial e comercial. Enquanto as unidades de divisão por inversor e os sistemas de divisão múltipla tem tido crescimento rápido, as unidades de janela têm tido ritmo mais constantes nos últimos anos (CLASP, 2011). ACs portáteis também estão disponíveis no Brasil, os ACs reversíveis operam nos modos de resfriamento e aquecimento e geralmente são comercializados no sul e sudeste do Brasil devido ao clima temperado, enquanto outras regiões são dominadas quase exclusivamente pelos ACs de

resfriamento. Em 1998 foram estimadas vendas anuais de 1,11 milhão de ACs, as unidades de janela representaram 67% das vendas, enquanto as unidades fracionadas representaram apenas 0,44% (CARDOSO, 2012). As vendas foram estimadas em 4,35 milhões de unidades em 2013, as unidades fracionadas representaram 82% das vendas e as de janela 18% (SORGATO, 2015).

Figura 9 - Visão geral de uma compressão AC de estágio único.



Fonte: Modificado de Shah; Waide; Phadke(2013).

A capacidade média de saída de resfriamento das unidades RAC enviadas no Brasil para o setor residencial varia geralmente entre 2,05 kW (7.000 BTU/h) e 7,03 kW (24.000 BTU/h). Para fins de comparação, a capacidade média de resfriamento dos RACs comercializados na China em 2008 foi de 4,3 kW. Na Europa, a capacidade média de resfriamento dos RACs é de 5,9 kW, enquanto no Japão a estimativa é de 3,67 kW (CLASP, 2011).

A Tabela 1 mostra as unidades de AC e sua capacidade de refrigeração por país/região. Cerca de 1,6 milhão de unidades de ACs estão em uso nos setores comercial e residencial no mundo, correspondendo a 11.673 GW da capacidade de saída de resfriamento. O Brasil representa apenas 1,7% do estoque instalado em 2016 (ou seja, 27 milhões de unidades), enquanto mais da metade está em uso na China e nos Estados Unidos. Em termos de capacidade mundial de produção de refrigeração, a participação do Brasil é de apenas 1,1%, e quase 50% dos ACs são instalados no setor residencial, abaixo da média mundial de quase 70%. A

aquisição de ACs pelas famílias varia consideravelmente entre os países, de mais de 90% nos Estados Unidos e no Japão para menos de 10% na Europa e 4% na Índia(IEA, 2018)(IEA, 2018). No Brasil, essa porcentagem atualmente é de 16% (IEA, 2018). Mais da metade de sua capacidade de sua refrigeração está instalada no setor comercial, o que representa uma participação de 53,5% em comparação com 46,5% no setor residencial. Uma tendência oposta é observada no mundo, onde quase 53% da capacidade de saída de refrigeração está instalada no setor residencial.

Tabela 1 - Unidades e capacidade de refrigeração de ACs por país / região em 2016.

	Milhões de unidades			Capacidade de produção (GW)		
	Residencial	Comercial	Total	Residencial	Comercial	Total
EUA	241	132	374	2295	2430	4726
União Européia	43	53	97	192	654	847
Japão	116	33	148	407	352	759
Korean	30	29	59	129	220	348
México	7	9	16	40	65	105
China	432	138	569	1092	807	2899
Índia	14	13	27	77	72	149
Indonésia	7	5	12	32	27	59
Brasil	14	14	27	59	68	127
África do Sul	1	1	3	6	15	22
Oriente Médio	30	18	47	147	153	299
Mundo	1093	529	1622	6181	5191	11673

Fonte: Modificado de Shah; Waide; Phadke (2013).

A eficiência energética é uma estratégia essencial para garantir um crescimento econômico seguro, sustentável e inclusivo. A maioria das contribuições nacionalmente determinadas (CNDs)¹ menciona a eficiência como o fator crucial de estratégia para reduzir a carga ambiental do sistema energético (IEA, 2018). Ao estabelecer um nível mínimo de eficiência para vários

¹As contribuições determinadas nacionalmente estão no cerne do Acordo de Paris e da realização desses objetivos em longo prazo. Os CND incorporaram esforços de cada país para reduzir as emissões nacionais e se adaptara os impactos das mudanças climáticas (UNFCCC (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE), 2019) (UNFCCC, 2019).

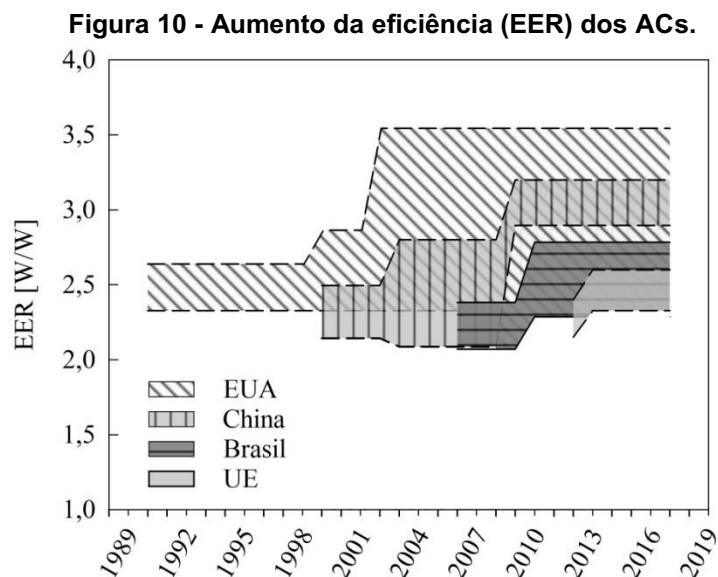
equipamentos, os formuladores de políticas promovem a adoção de tecnologias mais eficientes e, conseqüentemente, incentivam os consumidores a economizar energia e dinheiro.

De um ponto de vista termodinâmico, os ACs movem o calor do interior para o exterior ou vice-versa, adicionando trabalho aos sistemas geralmente fornecidos por energia elétrica. Assim sua eficiência é expressa em termos de proporção da produção de energia desejada (para resfriar ou aquecer o espaço) em relação à entrada de trabalho. Por sua vez, o valor dos parâmetros de eficiência dos ACs é maior que o da unidade, e quanto maior o parâmetro, mais eficiente é o equipamento. As principais métricas usadas para determinar a eficiência são o coeficiente de performance (COP), o índice de eficiência energética (EER) e o índice sazonal de eficiência energética (SEER) (ALVES et al., 2016).

O COP é determinado usando a quantidade de energia produzida desejada para resfriar ou aquecer a entrada da rede em qualquer condição operacional, é também uma medida instantânea e pode ser calculada em termos de unidades de potência (por exemplo, kW) a qualquer momento. O EER é um parâmetro comumente aplicado aos programas de rotulagem e padrão e é determinado em carga máxima durante um curto período de tempo (SHAH; WAIDE; PHADKE, 2013). É definida como a razão entre a produção de energia para refrigeração ou aquecimento (em kWh) e a energia de entrada (em kWh) sob certas condições internas e externas em termos de temperatura e umidade. A única exceção são os Estados Unidos, onde a energia de resfriamento ou de aquecimento é definida em uma unidade de BTU, enquanto a energia de entrada é definida em kWh; é, portanto, um parâmetro não adimensional (IEA, 2018). O SEER é um parâmetro mais preciso que o EER, uma vez que é responsável pelo desempenho durante a condição local da parte de tempos em tempos para produzir um valor estaticamente representativo da eficiência energética média (SHAH; WAIDE; PHADKE, 2013). Resumidamente, o SEER é determinado nas mesmas condições internas que o EER, mas em ampla variedade de condições externas. Infelizmente, o SEER ainda não é aplicado no programa de rotulagem brasileiro, conforme discutido nesta seção.

A eficiência dos ACs em termos de EER e SEER aumentou nos últimos anos devido a melhorias na tecnologia e políticas mais rigorosas, os novos ACs disponíveis no mercado brasileiro são mais eficientes que no passado, conforme

apresentado na Figura 10. Existem, no entanto, consideráveis variações na eficiência dos ACs nos países, como descrito na Figura 10 e Figura 11.



Fonte: Modificado de IEA (2019).

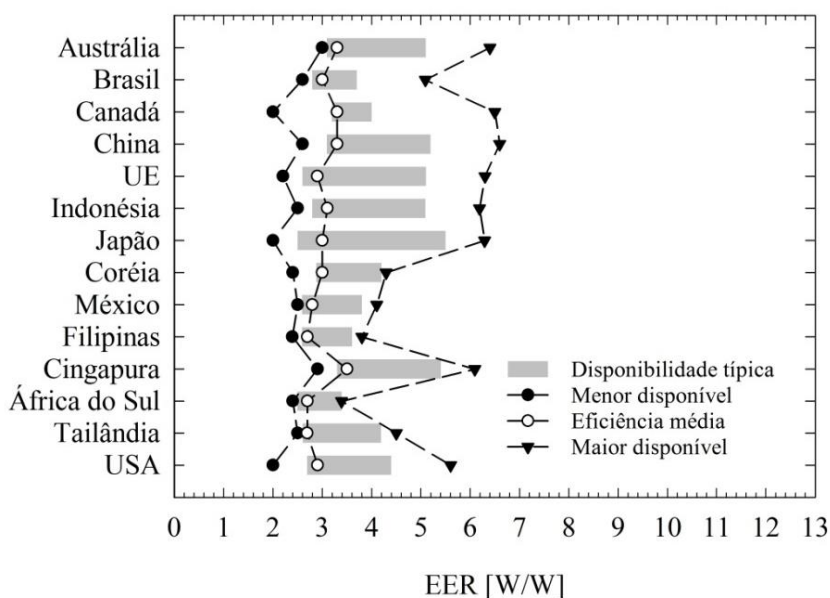
Devido a aplicação de políticas mais rígidas, o Japão, China e Estados Unidos comercializam equipamentos mais eficientes em comparação ao Brasil, no qual ACs típicos usados no setor residencial operam em um EER entre 2,81 e 3,69. O EER típico usado nos ACs nos domicílios japoneses varia entre 2,5 e 5,5, enquanto na Austrália varia entre 3,1 e 5,1.

Outro aspecto importante é a melhor tecnologia disponível em termos de EER em todo o mundo (Figura 11). Austrália, Canadá, China, Indonésia e Japão comercializam ACs com o EER maior que 6, enquanto no Brasil o valor mais alto do EER é um pouco maior que 5. As melhorias em termos de EER são resultados de uma evolução constante de várias tecnologias que, juntas aumentam a eficiência, como por exemplo ventiladores e compressores mais eficientes, controladores de velocidade do motor de compressores, etc. (GOETZLER et al., 2016). Uma revisão das tecnologias recentes aplicadas para melhor desempenho dos ACs está disponível em outro local (CHUA et al., 2013) (SHE et al., 2018).

As políticas influenciam fortemente a eficiência do equipamento, principalmente aplicando os Padrões Mínimos de Desempenho Energético (MEPS) e a rotulagem energética, no Brasil, O MEPS é obrigatório e foi reforçado nos últimos anos, conforme indicado pelos valores de EER mostrados na Figura 11. Em

2001, após uma enorme crise energética, foram estabelecidos regulamentos de política nacional para conservação de energia, a lei número 10.295, conhecida como Lei de Eficiência Energética, foi aprovada para fortalecer o programa de rotulagem existente.

Figura 11- EER de ACs para o setor residencial.



Fonte: Modificado de IEA (2019).

Um regulamento específico para ACs entrou em vigor somente em 2007 (Portaria número 364/2007). Se exigia um EER mínimo entre 2,08 e 2,24 para os ACs da janela de acordo com a capacidade de saída de resfriamento e de 2,39 para todos os ACs divididos, valores do EER mínimo em 2011. Quando o decreto número 323/2011 entrou em vigor, estabeleceu um EER mínimo de 2,30-2,78 para as unidades de janela de acordo com sua capacidade de refrigeração e de 2,60 para as unidades divididas. A última revisão do EER mínimo foi feita em 2018 (Portaria número 020/2018) e estabeleceu que os ACs divididos devem ter um EER mínimo de 3,02, enquanto as unidades de janela devem ter um EER mínimo, variando entre 2,65 e 2,94 a partir de 2020. No entanto, os níveis estabelecidos para o EER na regulamentação brasileira são muito baixos em comparação a outros países. Os ACs atualmente comercializados no Brasil têm níveis de EER consistentes com os usados na China há mais de dez anos. Como mostrado na Figura 10 e na Figura 11, a China tem elevado seu EER mínimo nos últimos anos,

com impactos positivos, pois os equipamentos mais eficientes são vendidos por lá com os níveis mais altos do mundo, ou seja, acima de 6,5.

Uma das limitações do EER é que ele não reproduz de forma confiável a operação dos ACs na prática, uma vez que a operação de carga parcial não é levada em consideração. Os ACs operam em carga máxima apenas por tempo limitado e o rácio sazonal de eficiência energética fornece informações mais representativas sobre o desempenho dos ACs sujeitos às condições climáticas locais. Vários países como Índia, China, Austrália, Tailândia e Estados Unidos já usam o SEER em suas políticas e padrões regulatórios. O SEER é particularmente favorável para avaliar ACs equipados com tecnologia de inversor, com vendas aumentando consideravelmente em todo o mundo. Portanto, é importante que o Brasil o adote como parâmetro mínimo de desempenho dos ACs para favorecer equipamentos com tecnologia inversora notavelmente mais eficientes que os modelos convencionais (PEREIRA; LAMBERTS; GHISI, 2013).

O Brasil adotou um programa de rotulagem denominado Procel, cujo objetivo é informar ao consumidor sobre o nível de eficiência energética de um equipamento, comparando-o com outros similares.

Os rótulos fornecem informações sobre a quantidade de energia consumida pelos produtos, os classificando de acordo com cinco níveis de eficiência (VIEIRA; NOGUEIRA; HADDAD, 2018). A intenção é influenciar a decisão dos consumidores e incentivá-los a comprar e usar produtos de alta eficiência. Os rótulos pretendem, além disso, influenciar os fabricantes a aumentar a eficiência de seus produtos e incentivar o desenvolvimento tecnológico. A rotulagem no Brasil ocorre desde 1996 para ACs de janela e 2004 para unidades divididas (ou *split*).

Outro método que não deve ser ignorado para economia de energia é o corte subsídios ou o aumento de impostos sobre energia elétrica. Os consumidores estão pouco preocupados em comprar um equipamento eficiente, pois os baixos preços da eletricidade podem reduzir a atratividade da economia de energia e do investimento nesses equipamentos (IEA, 2018) No geral, a comercialização de equipamentos mais eficazes pode impedir a crescente tendência geral da demanda de energia elétrica por ar condicionado e reduzir seu impacto no pico da demanda de eletricidade.

Outra regulamentação importante relacionada aos ACs é o uso de HCFCs e HFCs. O Brasil assumiu o compromisso de eliminar o consumo de HCFCs até 2040 sob o Protocolo de Montreal, e os esforços atuais são usados para eliminar o consumo de HCFC da linha de base (consumo médio para os anos 2009-2010) em 39,30% em 2020 e 51,60% em 2021 (MMA, 2019). Cerca de 37% já foram abolidos como resultado de esforços conjuntos entre governo, o setor produtivo e sociedade (MMA, 2018).

Os HFCs têm sido utilizados como substitutos de substâncias que destroem a camada de ozônio (isto é, HCFCs) sob os cronogramas de eliminação gradual do Protocolo de Montreal. No entanto, os HFCs são gases de efeito estufa potentes que absorvem a radiação infravermelha e têm uma vida útil atmosférica relativamente longa (RIVM COMMITTED TO HEALTH AND SUSTAINABILITY, 2018) (CICONKOV, 2018). Diversos países concordaram em alterar o Protocolo de Montreal em 2016 a fim de incluir uma lista de HFCs como substâncias controladas a serem reduzidas. A Emenda Kigali pode evitar um aumento de temperatura de até 0,5 °C até o final do século, e a produção e o consumo de HFCs devem ser gradualmente reduzidos, entre 80% a 85% entre 2019 e o final da década de 2040. Espera-se que o Brasil congele o uso de HFCs até 2024 e uma redução de 10% da linha de base (média em 2020-2022) até 2029, enquanto uma redução de 80% da linha de base deve ser alcançada em 2045 (BIRMPILI, 2018).

Um dos principais impulsionadores da demanda de ACs é o clima, níveis de temperatura e umidade, que desempenham um papel importante no consumo de energia dos ACs. Métodos de resfriamento estão se tornando comum no Brasil especialmente em áreas com temperaturas elevadas durante o ano todo, como nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Enquanto nas regiões Sul e Sudeste têm-se elevações climáticas principalmente durante a primavera e o verão. Na região sul, o aquecimento se torna necessário principalmente durante o inverno onde a temperatura diurna pode cair para até 5 °C, mas raramente por mais de alguns dias ao ano. No entanto, a maioria dos lares na região sul não está equipada com sistemas de aquecimento como os disponíveis na Europa, por exemplo, que acabam por dar preferência a outras técnicas como o uso de aquecedores elétricos, fogões a lenha, lareiras e, mais recentemente, ACs se tornaram a maneira mais comum de aquecimento em frentes frias.

A quantidade de eletricidade para atender à demanda de refrigeração varia de acordo com a eficiência dos ACs, com a frequência em que eles são usados e com a eficiência térmica dos edifícios, e as decisões dos usuários nas configurações de uso referentes à temperatura também têm um impacto considerável na demanda de eletricidade. As famílias brasileiras equipadas com ACs têm pelo menos um equipamento nos quartos, ativado durante a noite em períodos quentes, e, quando mais de uma unidade está disponível, os ativam quando estão dentro de um mesmo cômodo ou incomodados com a questão térmica. Essa maneira de usar o ar-condicionado é conhecida como “meio período, meio espaço”, e consome cerca de cinco vezes menos eletricidade em comparação com os ACs que permanecem em funcionamento por tempo integral (IEA, 2018). Infelizmente, o acesso aos ACs ainda é limitado para a parcela de brasileiros que não podem arcar com os custos do produto e as demandas elétricas necessárias para gerenciá-lo, espera-se, no entanto, uma redução de valores para próximos anos e, conseqüentemente, maior acessibilidade.

3 METODOLOGIA

Através dos dados fornecidos pelo INMET, foram obtidas as temperaturas diárias compensadas médias (T_{med}), além das umidades relativas médias (UR) durante os anos de 2015 a 2018, para todas as 264 estações meteorológicas convencionais cadastradas no BDMEP (INMET, 2019). A plataforma de coleta está ilustrada na Figura 12.



Fonte: INMET – BDMEP (2019).

Os dados anuais das estações meteorológicas foram arquivados no formato de texto (.txt) com a finalidade de serem trabalhados, posteriormente, em um algoritmo elaborado, facilitando assim o cálculo e processamento de alguns parâmetros de interesse.

3.1 MÉTODO ON/OFF CLIMATIZAÇÃO

Através do *software* Matlab[®] elaborou-se um método ON/OFF Climatização segundo a norma *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017*(2017). Esse método consiste em, por meio de dados climáticos diários de uma dada região ao longo de um ano, primeiramente calcular a temperatura média interna ($T_{med(in)}$) de três exemplos de tipologias construtivas de baixo custo em uso, citadas no método das Equações Preditivas de Krüger e Givoni (2004). Assim, efetuaram-se os cálculos dos índices *PMV* e *PPD* pelo Modelo Estático, apresentado por Fanger (1970). Em seguida, verificou-se através do índice *PPD* se é ou não necessário a utilização de um aparelho de climatização para garantir o conforto térmico segundo os parâmetros da norma internacional. Além dos índices de conforto térmico *PMV* e *PPD*, o método também executa o cálculo dos índices *CDD* e *HDD* para as T_{med} , oferecendo assim uma maior e, conseqüentemente, melhor margem de análise. O algoritmo é descrito a seguir por meio de um fluxograma (Figura 13).

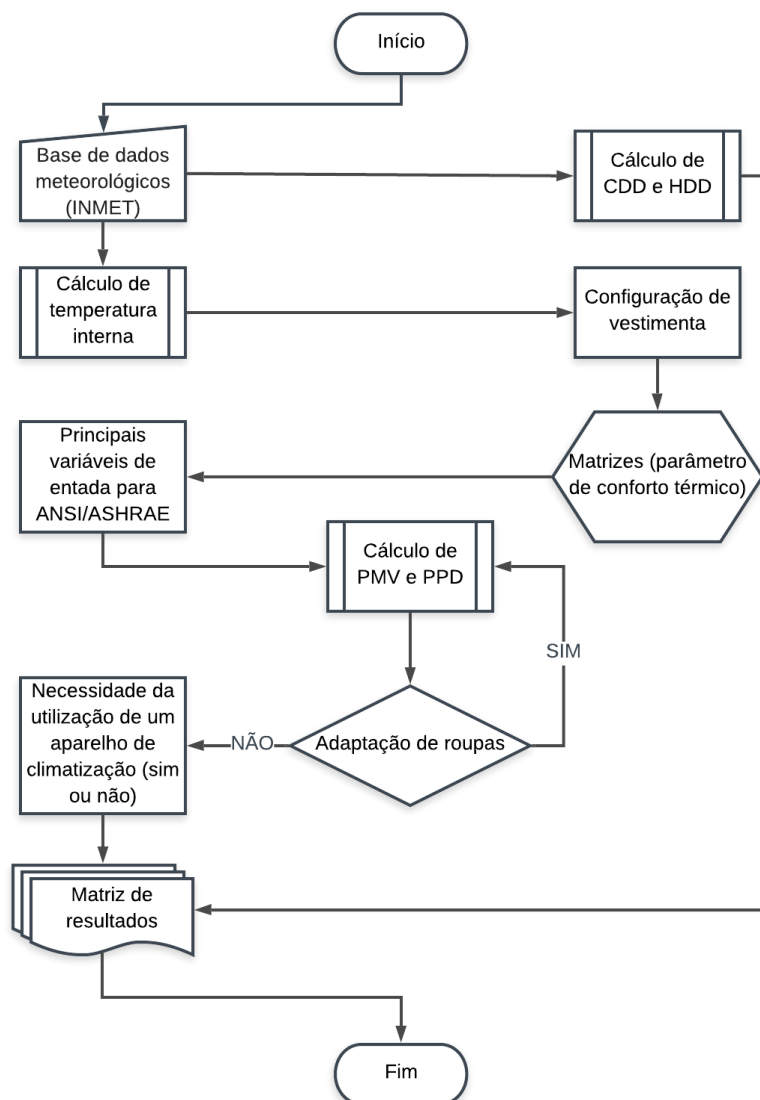
No fluxograma (Figura 13) é ilustrado o diretório de entrada, onde os arquivos no formato *txt* das estações meteorológicas estão ordenados por ano e região. Através de um comando de input cada arquivo é aberto e convertido em matrizes que em seguida são verificadas, refinadas e reorganizadas para futuros cálculos de parâmetros de interesse.

Para o cálculo do *CDD* e *HDD* utilizou-se os dados de T_{med} de cada estação meteorológica. A partir dos valores de T_{med} , são calculadas as $T_{med(in)}$ para as três moradias de baixo custo abordadas no Método das Equações Preditivas, formando assim para cada arquivo três novos vetores. Nesta etapa é criado um vetor responsável pela variável humana roupa (*Clo*), onde para dias de inverno valores iguais a 1 clo (roupas ‘pesadas’) são atribuídos e, para os demais dias do ano, são atribuídos valores iguais a 0,5 clo (roupas ‘leves’). Tentando representar, de uma forma natural, o comportamento humano na questão da vestimenta.

Por meio de um comando de agrupamento os vetores das $T_{med(in)}$ e o vetor *Clo* juntamente dos valores diários de UR são armazenados em três matrizes de interesse (M.I.) de tamanho 365 x 3, representando o cenário ambiente local para cada tipologia. Neste processo são fixados valores constantes para as variáveis ambientais V_{ar} , P_{atm} e para a variável humana M , a fim de representar um cenário

onde os integrantes das residências estão em um estado sedentário estabelecidos pela norma.

Figura 13 - Método ON/OFF Climatização.



Fonte: Autoria própria.

Através das M.I., é então calculado o valor de *PMV* e *PPD* para cada tipologia construtiva, durante o período de um ano. A partir dos valores de *PPD*, são analisados os que excedem 0,2 (20%), pois estes possuem uma necessidade de climatização segundo a *Standard 55-2017*.

O que pode ocorrer em um dia de verão onde a vestimenta está ajustada para 0,5 clo é uma queda brusca de temperatura. Quando isso ocorre, o usuário na prática opta por se vestir com uma roupa de inverno (1,0 clo), antes mesmo de

pensar em ligar o aparelho de climatização. Portanto, o primeiro critério ajusta a vestimenta de 0,5 clo para 1,0 clo caso necessário, e assim são recalculados os valores de *PMV* e *PPD*. O segundo critério ocorre ao contrário, ajusta a vestimenta de 1,0 clo para 0,5 clo, a fim de se evitar a utilização do aparelho de climatização de forma desnecessária. A partir dos valores de *PPD* ajustados, esses são novamente analisados e os que excederem 0,2 (20%) realmente possuem uma necessidade de climatização artificial. Dessa forma, é criado um vetor que vai armazenar valores 0 e 1, onde 0 significa *OFF* (aparelho desligado no dia) e 1 *ON* (aparelho ligado no dia) para cada residência.

O número de dias necessários para o resfriamento e aquecimento durante um ano é chamado de dias de resfriamento (*CD*, ou *Cooling Days*) e dias de aquecimento (*HD*, ou *Heating Days*), como descritos posteriormente na Eq (11) e Eq (12).

$$CD_{Anual} = \sum_{i=1}^{365} CD_i \begin{cases} CD_i = 1; & \text{se } PPD_i \geq 0.2 \text{ e } PMV_i \geq 0.85 \\ CD_i = 0; & \left\{ \begin{array}{l} \text{se } PPD_i \geq 0.2 \text{ e } PMV_i < 0.85 \\ \text{ou } PPD_i < 0.2 \end{array} \right. \end{cases} \quad (11)$$

$$HD_{Anual} = \sum_{i=1}^{365} HD_i \begin{cases} HD_i = 1; & \text{se } PPD_i \geq 0.2 \text{ e } PMV_i \leq -0.85 \\ HD_i = 0; & \left\{ \begin{array}{l} \text{se } PPD_i \geq 0.2 \text{ e } PMV_i > -0.85 \\ \text{ou } PPD_i < 0.2 \end{array} \right. \end{cases} \quad (12)$$

A saída dos dados é executada por um comando output onde os valores dos vetores *ON/OFF* juntamente com os valores de *CDD* e *HDD*, para cada estação meteorológica, são convertidos em um arquivo Excel (xls).

3.2 CÁLCULO CONSUMO SETOR RESIDENCIAL BRASILEIRO E PROJEÇÕES

Uma projeção da demanda por energia elétrica no setor residencial brasileiro referente à utilização de aparelhos de ar condicionado foi realizada para o período entre 2018 e 2035. Com o número de dias de aquecimento reduzido, as estimativas de demanda de eletricidade são realizadas apenas com base no *CD*.

Outro motivo para excluir o *HD* das projeções é que outras técnicas de aquecimento são comumente usadas no país.

Uma etapa inicial é calcular o *CD* médio (\overline{CD}) entre 2015 a 2018 para as cinco regiões considerando as três tipologias construtivas predominantes no Brasil. O número de domicílios de cada região é definido de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)(MME; EPE, 2018a). As projeções são calculadas usando um percentual de posse de AC de 16% como configuração inicial, com uma capacidade média de resfriamento de 4,21 kW (14.379 BTU / h) e EER de 2,98(MME; EPE, 2018b)(MME; EPE, 2014). O Gabinete Brasileiro de Pesquisa Energética (EPE), na Nota Técnica 030/2018(MME; EPE, 2019b), estima um crescimento anual no número de famílias em 1,8%, enquanto a propriedade de ACs deve aumentar cerca de 3,12% anualmente até o ano de 2035. A Eq (13) é usada para estimar o consumo anual de eletricidade em TWh:

$$E = \frac{1}{10^8} \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 \overline{CD}_{i,j} \cdot \left(\frac{\dot{Q}_L}{EER} \right) \cdot h \cdot f \cdot n_{i,j} \cdot P_o \quad (13)$$

Onde, $\overline{CD}_{i,j}$ é a média dos dias de resfriamento entre 2015 e 2018, $n_{i,j}$ é o número de lares para cada região brasileira (subscrito i) e o tipo de construção (subscrito j). \dot{Q}_L é a capacidade média de refrigeração em kW, EER é a taxa de eficiência energética, h é o horário de operação, f é o fator consumo de eletricidade e P_o é a porcentagem de propriedade do AC.

De acordo com a Nota Técnica 030/2018, dois cenários também são avaliados: em um cenário base, estima-se um aumento anual de EER em 1,5% até 2020 e em 0,5% de 2021 a 2035. Em um cenário alternativo, são consideradas políticas energéticas mais rigorosas, e aplica-se um aumento anual de EER em 2,3% por todo o período. As primeiras previsões consideram os ACs operando 8 horas por dia com um fator de consumo de eletricidade de 0,75 (ou seja, a energia é consumida pelo compressor durante 75% do tempo), conforme proposto na Nota Técnica 030/2018 (MME; EPE, 2019b).

Um estudo paramétrico também foi realizado a fim de avaliar rapidamente o impacto de alguns parâmetros usados na equação 10 para cenários tanto base quanto alternativo. De acordo com os valores típicos relatados na literatura (MME;

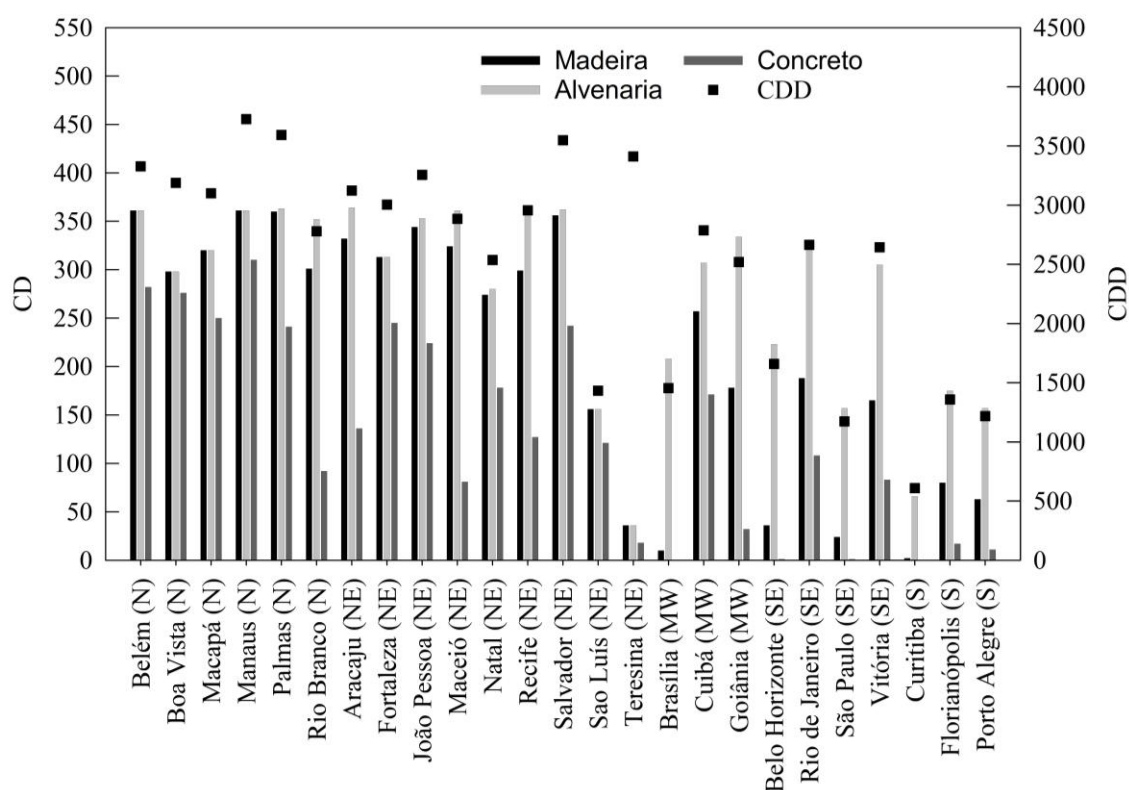
EPE, 2018b), o *EER* varia entre 2,81 e 3,69. A capacidade média de resfriamento no domicílio vai de 2,05 kW (7.000 BTU/h) a 3,45 kW (22.000 BTU/h), enquanto a operação diária varia entre 4 e 12 horas. Cada parâmetro varia em 5 níveis diferentes e, portanto, 125 combinações diferentes são avaliadas no estudo paramétrico. O crescimento anual do número de famílias (1,8%) e da posse de ACs (3,12%) é mantido inalterado.

Para completar, as estimativas de emissão de CO₂ relacionadas ao ar-condicionado também são consideradas de acordo com a análise de consumo de eletricidade do setor residencial brasileiro. A partir de um relatório recente do governo (MME; EPE, 2019a), pode-se supor que 104,6 kg de CO₂ sejam emitidos na atmosfera por MWh de energia elétrica consumida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Figura 14 representa o número médio anual de dias de resfriamento (*CD*) e o grau de dias de resfriamento (*CDD*) calculados para as capitais brasileiras, que são também as maiores cidades de seus respectivos estados, com exceção de Florianópolis (Santa Catarina) e Vitória (Espírito Santo).

Figura 14 - Média anual de CD e de CDD das capitais estaduais brasileiras entre os anos de 2015 a 2018 para os três tipos de tipologia construtiva predominantes.



Fonte: Autoria própria.

Capitais estaduais localizadas nas regiões Norte e Nordeste têm o *CD* mais alto, ou seja, Belém, Manaus, São Luís e Palmas têm um maior número de dias, cujos valores de *PPD* são superiores a 20%. Nessas capitais, a necessidade de ACs para lares construídos de madeira e alvenaria é muito próxima de 365 dias. Duas capitais localizadas no norte (Boa Vista e Macapá) e três capitais localizadas no nordeste (Fortaleza, São Luís e Teresina) indicam um número subestimado de *CD* em comparação com outras capitais localizadas na mesma região. Isso ocorre devido à falta de dados climáticos, que excedem 10% dos dias monitorados entre

2015 e 2018. Além disso, os dados meteorológicos de Porto Velho não estão disponíveis no banco de dados do INMET.

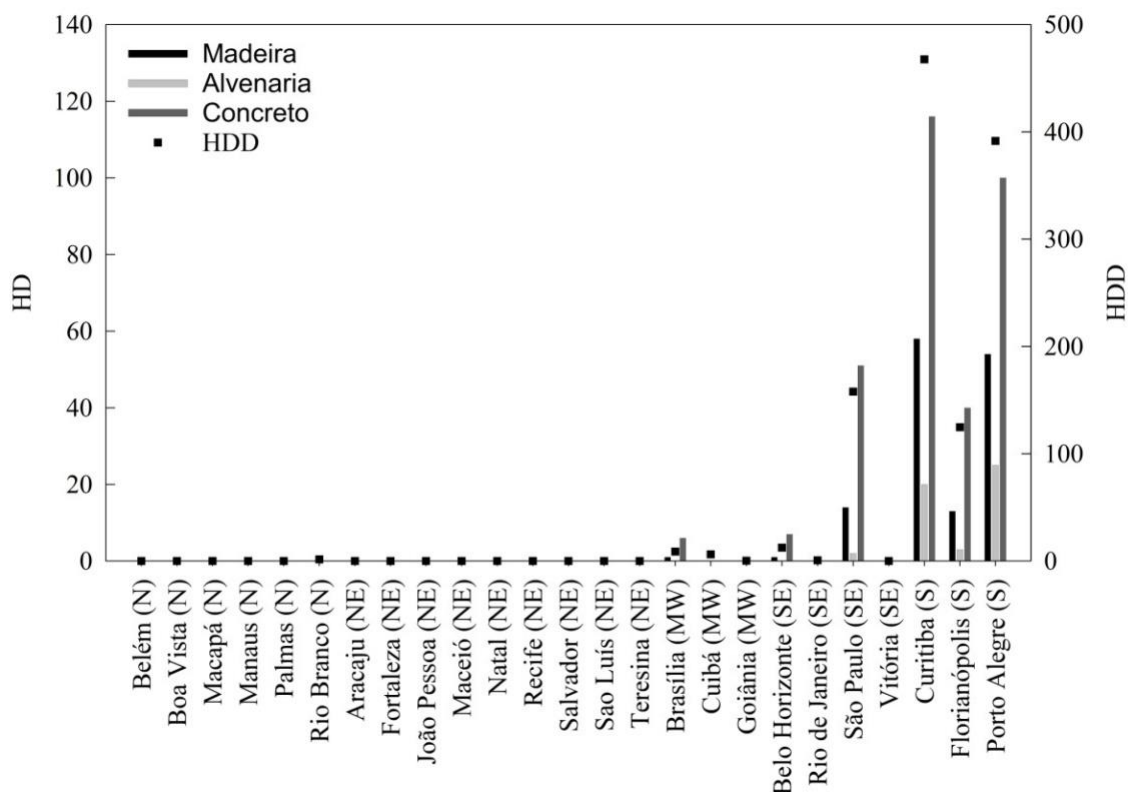
São Paulo e Rio de Janeiro são as maiores cidades do Brasil classificadas por população e as duas capitais estão no Sudeste. A necessidade de refrigeração do espaço para edifícios de alvenaria no Rio de Janeiro é de em média 326 dias, enquanto em São Paulo é estima-se 157 dias; ou seja, a necessidade de AC para resfriamento no Rio de Janeiro é cerca de duas vezes maior que em São Paulo. Já nas capitais estaduais do Centro-Oeste, a demanda de ACs para resfriamento de espaço é de, em média, 283 dias por ano. No entanto, esse valor tende a ser maior devido à falta de dados meteorológicos de Campo Grande (Mato Grosso do Sul) no banco de dados do INMET.

Capitais brasileiras localizadas no Sul exigem o menor uso de AC para resfriamento de espaço em comparação com outras capitais. Os domicílios localizados em Florianópolis demandam resfriamento de espaço 175 dias por ano, em média, e em Porto Alegre, em torno de 157 dias por ano. O número médio de *CD* em Curitiba é um pouco menor, ou seja, 66 dias, devido à sua alta altitude de cerca de 900 m acima do nível do mar e à falta de dados meteorológicos em 5% dos dias entre 2015 e 2018.

Figura 14 também indica que o *CD* mostra uma tendência semelhante em comparação com o conhecido parâmetro *CDD*. O maior desvio entre *CDD* e *CD* ocorre em Teresina devido à falta de umidade relativa em mais de 23% dos dias entre 2015 e 2018. Vale mencionar que o uso do *CD* é preferível por se basear no número de dias, e não no *CDD* sem dimensão. O uso de uma unidade de tempo ajuda a prever o consumo de energia elétrica com maior facilidade, como mostrado na literatura.

A Figura 15 mostra os dias médios de aquecimento (*HD*) e os graus-dias de aquecimento (*HDD*) para as capitais brasileiras. O aquecimento é necessário apenas nas capitais localizadas no sul do Brasil, como Curitiba, Florianópolis e Porto Alegre e São Paulo. A capital com o maior número de *HD* é Porto Alegre, com média de 25 dias por ano, seguida por Curitiba, estimando 20 dias. O *HD* calculado em São Paulo é de cerca de 2 dias por ano, ou seja, o aquecimento do ambiente é necessário principalmente nas frentes frias. Outro aspecto a se notar é a tendência semelhante entre o *HD* e o *HDD*, confirmando a capacidade do *HD* em prever a demanda por aquecimento.

Figura 15 - Média anual de HD e de HDD das capitais estaduais brasileiras entre os anos de 2015 a 2018 para os três tipos de tipologia construtiva predominantes.



Fonte: Autoria própria.

Os números médios anuais de *CD*, *CDD*, *HD* e *HDD* para todas as estações meteorológicas localizadas em cada região são indicados na Tabela 2. Por serem mais comuns no Brasil, os resultados apresentados servem apenas para edifícios de alvenaria. As regiões com maior necessidade de refrigeração no país são o Norte e Nordeste, chegando a cerca de 320 dias por ano, seguidas pelo Centro-Oeste, Sudeste e Sul. Por outro lado, a região sul do Brasil é a que retém maior demanda por aquecimento, calculando cerca de 84 dias por ano.

A Figura 16 indica a parcela da demanda de eletricidade por refrigeração de cada região. Estima-se uma demanda atual de energia elétrica para refrigeração no setor residencial de 21,7921 TWh, que corresponde a quase 16% do total de eletricidade consumida no setor residencial em 2018, que foi de 136,2 TWh. A região Sudeste é responsável por 37,68% do consumo de eletricidade, seguida pela região Nordeste (37,26%). Embora as estimativas de *CD* médio nas regiões Norte e Nordeste sejam as mais altas (vide Tabela 2), o número de domicílios no Sudeste é 1,6 vezes maior que no Nordeste e 5,9 vezes maior que no Norte, e apesar do número de domicílios no Centro-Oeste do Brasil ser aproximadamente

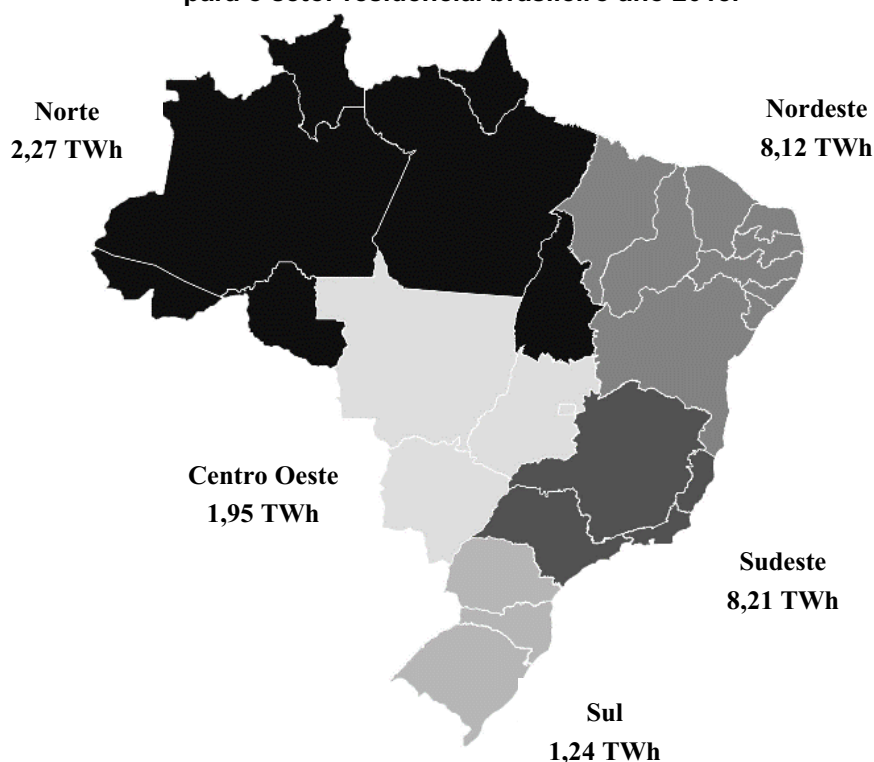
metade do Sul, o número de dias de resfriamento é 3,5 maior, o que explica o maior valor da demanda de eletricidade para resfriamento interno.

Tabela 2- Valores médios anuais de *CD*, *CDD*, *HD* e *HDD* das regiões brasileiras edifícios de alvenaria.

Regiões	CD [dias]	CDD [-]	HD [dias]	HDD [-]
Norte	320,00	3021,42	0,00	0,00
Nordeste	317,13	2786,25	0,00	0,00
Centro-Oeste	297,25	2116,75	0,00	2,08
Suldeste	194,42	1443,49	0,00	11,95
Sul	83,75	724,55	24,50	437,63

Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Consumo médio regional referente a utilização de aparelhos de ar condicionado para o setor residencial brasileiro ano 2018.

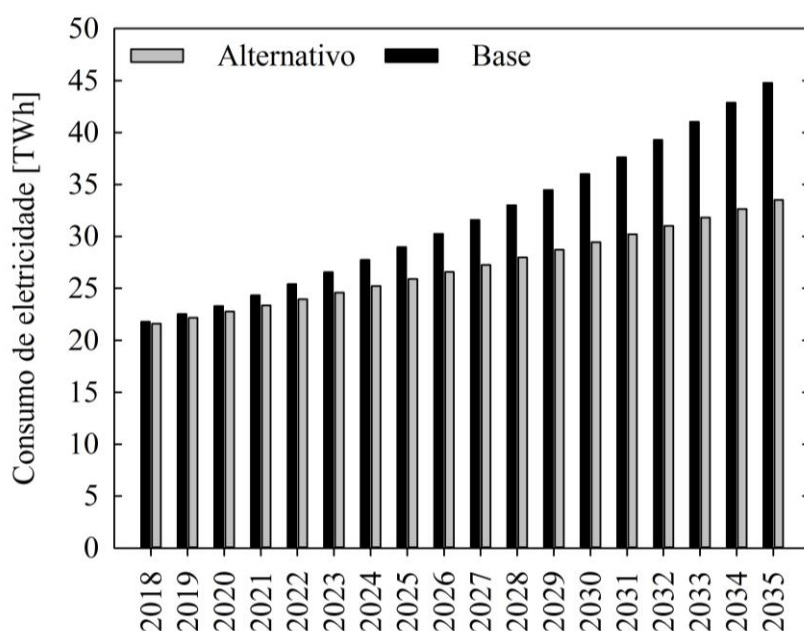


Fonte: Autoria própria.

A previsão do consumo elétrico proveniente da utilização de ACs para o setor residencial considerando um cenário base e um alternativo é mostrado na Figura 17. Espera-se um aumento na demanda de eletricidade entre 2018 e 2035 de 105,6% para consumo no cenário base e de 55,1% para o cenário alternativo.

As estimativas indicam um consumo de energia elétrica em 2035 de 44,77 TWh para o cenário base e 33,51 TWh para o cenário alternativo em 2035. Isso significa que o uso de políticas energéticas mais rigorosas no cenário alternativo pode economizar até 11,26 TWh em 2035. Para compensar essa diferença, é necessária uma usina com capacidade de fornecimento de aproximadamente 2700 MW, equivalente à usina de Jirau (capacidade instalada de 3500 MW) no rio Madeira, no estado de Rondônia. Para fins de comparação, esta usina está equipada com 50 turbinas hidroelétricas e o reservatório criado pela barragem ocupa uma área de 421,56 km² (IBGE, 2018).

Figura 17 - Projeção da demanda total de eletricidade entre 2018 e 2035 para dois cenários.

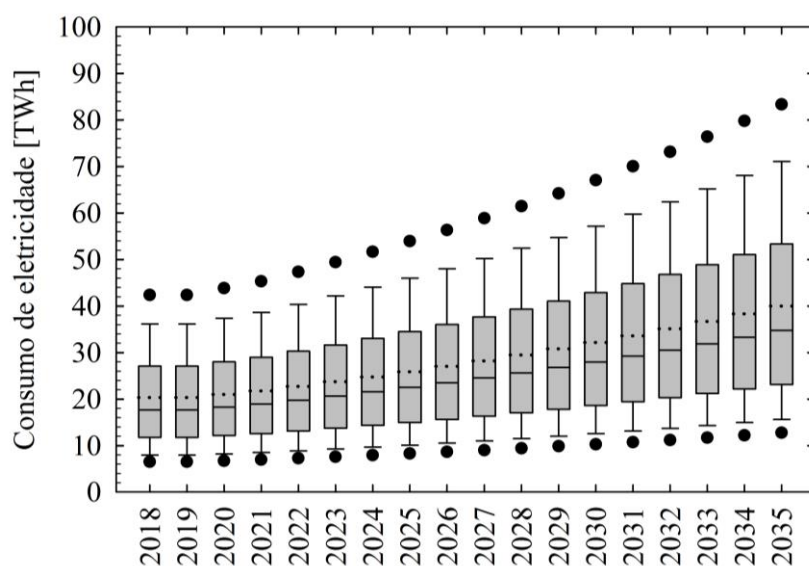


Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 e Figura 19 mostram os resultados do estudo paramétrico, que inclui 125 combinações para avaliar o impacto do EER, capacidade de refrigeração e horas diárias de operação no consumo de eletricidade apresentados como *Box plot* para os cenários base e alternativo.

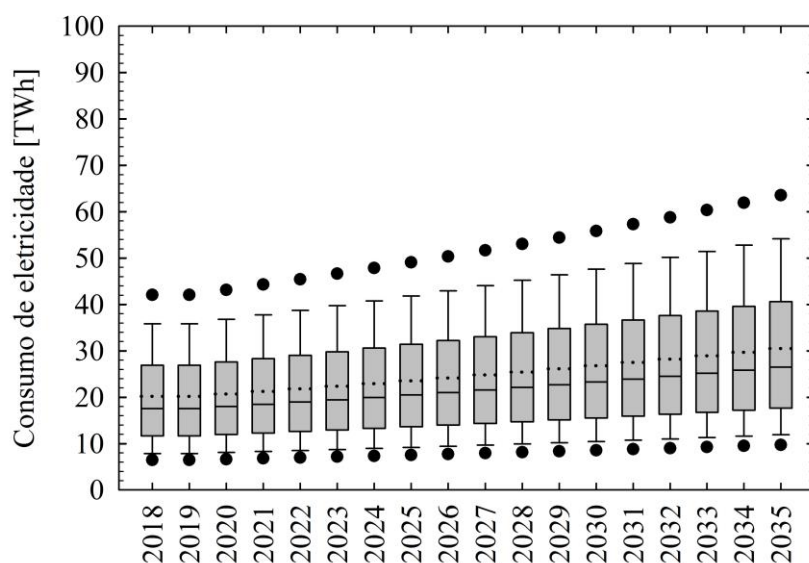
Os valores médios indicam um consumo de eletricidade para resfriamento de um ambiente externo de 40,16 TWh no cenário base e 30,58 TWh no cenário alternativo em 2035. Ambos os valores são ligeiramente inferiores aos apresentados na Figura 19.

Figura 18 - Estudo paramétrico cenário base.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Estudo paramétrico cenário alternativo.



Fonte: Autoria própria.

As caixas (50% dos dados) apontam para um consumo de eletricidade entre 23,32 a 53,52 TWh no cenário base e 17,78 a 40,82 TWh no cenário alternativo. O percentil 90 indica que o consumo de eletricidade pode chegar a 54,28 TWh no cenário alternativo e 71,25 TWh no cenário base. Os resultados indicam claramente não apenas que um número crescente de famílias e a posse de ACs têm uma forte influência sobre a demanda de eletricidade por ACs, mas outros

aspectos como eficiência média e capacidade de refrigeração e, obviamente, horas diárias de utilização desempenham um papel crucial.

Estima-se que a demanda esperada por eletricidade no setor residencial, de acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 varia entre 16 e 20 Mtep em 2030 (MME; EPE, 2018). Neste estudo, uma média de 18 Mtep (equivalente a 209,34 TWh) é usado para fins de comparação. O valor médio da demanda por eletricidade para resfriamento de espaço calculado no estudo paramétrico para 2030 varia entre 32,46 TWh (cenário base) e 26,82 TWh (cenário alternativo), e a participação no consumo de eletricidade vai entre 15,5% e 12,8%. Os dados indicam que a parcela de ACs na demanda de energia elétrica usando valores médios pode ser menor que de 2018, estimada em 16%. No entanto, de acordo com as parcelas, a participação do AC na demanda de eletricidade no setor residencial poderia ser maior, atingindo a margem de 17,8 – 20,6% para 50% e 22,8 – 27,5% para 90% em ambos cenários base e alternativo.

5 CONCLUSÕES

O crescimento econômico, juntamente com suas mudanças estruturais associadas, teve forte influências no consumo de energia elétrica no Brasil, e a demanda por energia aumenta de acordo com a renda per capita e qualidade de vida. Apesar do aumento geral nas vendas de ACs nos últimos anos, a posse desses aparelhos no setor residencial brasileiro é relativamente baixa em comparação com outros países, sugerindo uma demanda reprimida. No entanto, são escassas as informações sobre o mercado de ar condicionado, desempenho energético e demanda de energia elétrica por refrigeração do espaço no Brasil. Esta pesquisa visa preencher essa lacuna e fornecer informações básicas necessárias para subsidiar planos e programas futuros de uso racional da eletricidade no país.

É proposta uma metodologia para prever a demanda de energia proveniente a utilização de ACs no setor residencial baseada em dados climáticos monitorados por várias estações meteorológicas espalhadas por todo o país, correlações empíricas para determinar a temperatura interna de lares brasileiros típicos e no padrão ANSI / ASHRAE para conforto térmico humano. São propostos dois novos parâmetros denominados dias de resfriamento (*CD*) e dias de aquecimento (*HD*), que representam o número médio anual de dias para resfriamento ou aquecimento do espaço. Os resultados indicam que ambos os parâmetros mostram um comportamento semelhante em comparação com os parâmetros graus-dia de refrigeração (*CDD*) e graus-dia de aquecimento (*HDD*). No entanto, as principais vantagens no uso de *CD* e *HD* são que ambos os parâmetros são calculados para condições internas e os resultados são expressos em unidade de tempo (dias).

O Norte e o Nordeste do Brasil são as regiões com maior número de dias de resfriamento para edifícios residenciais de alvenaria, com aproximadamente 320 dias por ano. Por outro lado, o sul do Brasil exige resfriamento de espaço por apenas 84 dias, em média, enquanto a região Centro-Oeste exige resfriamento de espaço por 297,25 dias e a região sudoeste exige 194,42 dias. A região sul requer aquecimento ambiente durante 25 dias, em média, devido ao seu clima temperado. O sudeste do Brasil, com a maior densidade populacional do país, é a região com maior consumo de energia elétrica por espaço, consumindo atualmente 8,21 TWh.

Embora o Nordeste tenha um número maior de dias de resfriamento em comparação ao Sudeste, estima-se que a demanda de eletricidade por resfriamento de espaço seja um pouco menor, ou seja, 8,12 TWh.

Esta pesquisa mostra que o uso de ACs deve representar um importante uso final de eletricidade no setor residencial no futuro próximo, mostrando um cenário de demanda de eletricidade apenas para arrefecimento interno no setor residencial de 44,77 TWh em 2035. No entanto, quando um cenário mais rígido em termos de eficiência de equipamentos é considerado, a demanda de eletricidade é reduzida para 33,51 TWh até 2035. Portanto o estabelecimento de índices mínimos mais rigorosos de eficiência para os ACs é um mecanismo importante para reduzir o consumo de eletricidade por este tipo de aparelho no Brasil, especialmente considerando um aumento na aquisição pelas famílias a longo prazo.

O estudo paramétrico indica que a influência do EER, horário diário de operação e capacidade de refrigeração dos ACs no consumo de eletricidade não é apenas secundário. Esforços para o uso racional de ACs e níveis mais rigorosos de EER devem ser considerados em futuras políticas energéticas, e os cenários avaliados indicam que ACs podem colocar maior pressão no sistema de geração de eletricidade. Uma combinação de uso intenso de AC, maior capacidade de refrigeração e menor EER, pode levar a um consumo entre 40,82 TWh (cenário alternativo) e 53,52 TWh (cenário base) em 2035, quando é avaliado os 75% superior. Embora improvável, percentis muito extremos de combinação indicam uma demanda de eletricidade de 63,86TWh (cenário alternativo) e 83,46TWh (cenário base) no percentil de 95%.

Como sugestão para trabalhos futuros, são necessárias pesquisas atualizadas sobre estoque, unidades vendidas e a vida útil dos ACs, além de conhecimentos referentes a hábitos de uso, como número de unidades por residência, capacidade e tempo de refrigeração e tempo de uso da capacidade também são fatores importantes para melhor compreensão e realização de projeções futuras mais precisas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, O. et al. Measurement and classification of energy efficiency in HVAC systems. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 408–419, 15 out. 2020.

ANSI/ASHRAE 55-2017. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Disponível em: <<https://webstore.ansi.org/Standards/ASHRAE/ANSIASHRAE552017?source=blog>>. Acesso em: 30 out. 20.

ARMSTRONG, M. **Infographic: Growing Demand for Air Conditioning - and Energy**. Disponível em: <<https://www.statista.com/chart/14401/growing-demand-for-air-conditioning-and-energy/>>. Acesso em: 30 out. 2020.

BIRMPILI, T. Montreal Protocol at 30: The governance structure, the evolution, and the Kigali Amendment. **Comptes Rendus Geoscience**, 30th Anniversary of the Montreal Protocol: From the safeguard of the ozone layer to the protection of the Earth Climate. v. 350, n. 7, p. 425–431, 1 nov. 2018.

CARDOSO, R. B. **Estudo dos impactos energéticos dos Programas Brasileiros de Etiquetagem Energética: Estudo de caso em refrigeradores de uma porta, condicionadores de ar e motores elétricos**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, set. 2012.

CHUA, K. J. et al. Achieving better energy-efficient air conditioning – A review of technologies and strategies. **Applied Energy**, v. 104, p. 87–104, 1 abr. 2013.

CICONKOV, R. Refrigerants: There is still no vision for sustainable solutions. **International Journal of Refrigeration**, v. 86, p. 441–448, 1 fev. 2018.

CLASP (THE COLLABORATIVE LABELING AND APPLIANCE STANDARDS PROGRAM). **Cooling benchmarking study report**. Disponível em: <<https://storage.googleapis.com/clasp-siteattachments/RAC-benchmarking-Report.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2020.

CORRÊA DA SILVA, R.; DE MARCHI NETO, I.; SILVA SEIFERT, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 328–341, 1 jun. 2016.

EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). **International Energy Outlook 2016** U.S. Energy Information Administration, , 2016. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)>. Acesso em: 30 out. 2020

GOETZLER, W. et al. **The Future of Air Conditioning for Buildings Report**. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/07/f33/The%20Future%20of%20AC%20Report%20-%20Full%20Report_0.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - Características gerais dos**

domicílios e dos moradores 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101566_informativo.pdf>.

IEA. **Future of cooling.** Disponível em: <<https://www.iea.org/futureofcooling/>>. Acesso em: 30 out. 2020.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). **World Energy Outlook 2016.** Disponível em: <<https://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html>>. Acesso em: 30 out. 2020.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). **World Energy Outlook 2018.** Disponível em: <<https://www.iea.org/weo2018/>>. Acesso em: 30 out. 2020.

KRÜGER, E.; GIVONI, B. Predicting thermal performance in occupied dwellings. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 3, p. 301–307, 1 mar. 2004.

MCNEIL, M. A.; LETSCHERT, V. E. Future Air Conditioning Energy Consumption in Developing Countries and what can be done about it: The Potential of Efficiency in the Residential Sector. p. 15, 2008.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima.** Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao>>. Acesso em: 30 out. 2020.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Eliminação de HCFCs no Brasil supera expectativas.** Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/15091-dia-mundial-da-camada-de-oz%C3%B4nio.html>>. Acesso em: 30 out. 2020.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs - PBH.** Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/protecao-da-camada-de-ozonio/acoes-brasileiras-para-protecao-da-camada-de-ozonio/programa-brasileiro-de-eliminacao-dos-hcfc-pbh>>. Acesso em: 30 out. 2020.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Consumo de Energia no Brasil - Análises Setoriais.** Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil[1].pdf)>. Acesso em: 30 out. 2020.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balanco Energético Nacional 2018 - Relatório Síntese.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 30 out. 2020a.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balanco Energético Nacional 2018.** Disponível em:

<<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 30 out. 2019b.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balço Energético Nacional 2019**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2020a.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2020b.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Nota Técnica EPE 030/2018 - Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020c.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Nota Técnica EPE 030/2018 - Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

PEREIRA, C. D.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. **Nota técnica referente aos níveis mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar no Brasil**. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/nota-tecnica-niveis-minimos-ar-condicionado.pdf>>.

RIVM COMMITTED TO HEALTH AND SUSTAINABILITY. **Contribution of HFCs to the greenhouse effect RIVM**. Disponível em: <<https://www.rivm.nl/en/hydrofluorocarbons/contribution-of-hfcs-to-greenhouse-effect>>. Acesso em: 30 out. 2020.

SCHIERMEIER, Q. Clear signs of global warming will hit poorer countries first. **Nature**, v. 556, p. 415–416, 20 abr. 2018.

SHAH, N.; WAIDE, P.; PHADKE, A. **Cooling the Planet: Opportunities for Deployment of Superefficient Room Air Conditioners**.

SHAHBAZ, M. et al. Dynamics of electricity consumption, oil price and economic growth: Global perspective. **Energy Policy**, v. 108, p. 256–270, 1 set. 2017.

SHE, X. et al. Energy-efficient and -economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: A comprehensive review. **Applied Energy**, v. 232, p. 157–186, 15 dez. 2018.

SIVAK, M. Potential energy demand for cooling in the 50 largest metropolitan areas of the world: Implications for developing countries. **Energy Policy**, v. 37, n. 4, p. 1382–1384, 1 abr. 2009.

SIVAK, M. **Will AC Put a Chill on the Global Energy Supply?** Disponível em: <<https://www.americanscientist.org/article/will-ac-put-a-chill-on-the-global-energy-supply>>. Acesso em: 30 out. 2020.

SLADE, M. Opportunities for energy-efficient air conditioning. **International Energy Agency**, p. 12, 2018.

SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

STATE GRID CORPORATION OF CHINA. **Welcome to State Grid Corporation of China_Science and Technology Daily: How Power Grids Cope with Record-breaking Peak Load in 20**. Disponível em: <<http://www.sgcc.com.cn/ywlm/mediacenter/corporatenews/08/341409.shtml>>. Acesso em: 30 out. 2020.

UNFCCC (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE). **Nationally Determined Contributions (NDCs)**. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>>. Acesso em: 30 out. 2020.

VIEIRA, N. D. B.; NOGUEIRA, L. A. H.; HADDAD, J. An assessment of CO₂ emissions avoided by energy-efficiency programs: A general methodology and a case study in Brazil. **Energy**, v. 142, p. 702–715, 1 jan. 2018.

WAITE, M. et al. Global trends in urban electricity demands for cooling and heating. **Energy**, v. 127, p. 786–802, 15 maio 2017.

WU, Y.; ZHU, Q.; ZHU, B. Comparisons of decoupling trends of global economic growth and energy consumption between developed and developing countries. **Energy Policy**, v. 116, p. 30–38, 1 maio 2018.

YALE ENVIRONMENT 360. **Cooling a Warming Planet: A Global Air Conditioning Surge**. Disponível em: <https://e360.yale.edu/features/cooling_a_warming_planet_a_global_air_conditioning_surge>. Acesso em: 30 out. 2020.