



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS**  
**Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**DISSERTAÇÃO**

**WESLEY CECILIO SILVA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE  
CONDICIONADORES DE AR TIPO SPLIT FIXO E  
INVERTER EM HABITAÇÕES DE INTERESSE  
SOCIAL**

Belo Horizonte  
2022

Wesley Cecilio Silva

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE CONDICIONADORES DE AR TIPO SPLIT  
FIXO E INVERTER EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Raquel Diniz Oliveira

**Coorientador:** Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

**Linha de Pesquisa:** Eficiência Energética

Belo Horizonte  
2022

Silva, Wesley Cecilio  
S586a Análise do desempenho energético de condicionadores de ar tipo split fixo e inverter em habitações de interesse social / Wesley Cecilio Silva. – 2022.  
94 f. : il., gráfs, tabs.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientadora: Raquel Diniz Oliveira.

Coorientador: Frederico Romagnoli Silveira Lima.

Banca examinadora: Frederico Romagnoli Silveira Lima, Paulo Eduardo Lopes Barbieri e Aldomar Pedrini.

Bibliografia: f. 69-74.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Refrigeração – Teses. 2. Ventilação – Teses. 3. Termodinâmica – Simulação por computador – Teses. 4. Habitação popular – Aspectos sociais – Teses. 5. Edifícios – Aspectos sociais – Teses. 6. Energia Elétrica – Consumo – Teses. 7. Eficiência energética – Índice – Teses. I. Oliveira, Raquel Diniz. II. Lima, Frederico Romagnoli Silveira. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDD 621.57

Wesley Cecilio Silva

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE CONDICIONADORES DE AR TIPO SPLIT  
FIXO E INVERTER EM HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Linha de Pesquisa:** Eficiência Energética

Belo Horizonte, 29/03/2022

Resultado, aprovado.

Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



---

Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente



ALDOMAR PEDRINI

Data: 29/03/2022 16:43:22-0300

Verifique em <https://verificador.itl.br>

---

Prof. Dr. Aldomar Pedrini  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

## DEDICATÓRIA

*Esta dissertação dedico aos meus pais, que com muita paciência e amor me motivou a continuar o desenvolvimento desta pesquisa nos dias mais difíceis que vivi.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores por sempre me fazer pensar e questionar sobre o tema do meu trabalho de pesquisa.

Sou grato aos professores Paulo Barbieri e Aldomar Pedrini pelo apoio técnico prestado no desenvolvimento do projeto.

Agradeço também ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio ao desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo analisar o desempenho de condicionadores de ar do tipo *Split inverter* em relação a equipamentos do tipo *Split* convencional, considerando um cenário hipotético para uma edificação residencial de interesse social (HIS), em clima quente e úmido. Selecionou-se, como referência, uma edificação existente localizada na cidade de Jacarepaguá, Rio de Janeiro. Simulações termo energéticas, utilizando o programa ©EnergyPlus e o aplicativo, ©OpenStudio foram empregadas para a obtenção de resultados, um modelo de referência da edificação real selecionada foi elaborado a partir dos procedimentos estabelecidos no método de simulação do Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética (RTQ-R, 2012). Por meio do método consideraram-se também padrões de uso e ocupação. Como resultado, obteve-se o modelo virtual da edificação e, concomitantemente, foram inseridos dados dos componentes construtivos, do padrão de uso e ocupação, das cargas energéticas do sistema de iluminação artificial, dos equipamentos elétricos, do condicionamento de ar e respectivas curvas de desempenho, conforme disponibilizado por fornecedores, bem como informação sobre a infiltração do ar, conforme disposto na norma NBR 16555-3 (2018). Estimou-se a carga térmica das habitações e, conseqüentemente, o desempenho energético foi analisado por meio do consumo de energia elétrica mensal e do *EER* operacional anual simulado desses equipamentos. Por meio da simulação foi possível verificar a diferença no desempenho operacional dos condicionadores comparados além dos fatores que influenciam no consumo de energia, no que diz respeito às condições climáticas. Desta forma, a substituição hipotética de Split fixo por aparelhos Split inverter, possibilitou redução de até 41% no consumo de eletricidade anual, bem como aumento da eficiência energética, por meio do alcance de valores superiores a 30%, comparando às duas categorias de condicionadores. Os resultados obtidos nessa pesquisa ainda retratam que a opção por utilizar condicionadores do tipo inverter reduziriam o consumo operacional consideravelmente, proporcionado uma economia mínima anual de R\$ 3.000,00 independente da habitação analisada, tornando-se assim uma escolha atrativa a longo prazo.

Palavras-chave: Climatização artificial; Simulação termo energética; Edificação multifamiliar popular; Consumo de energia elétrica; índice de eficiência energética.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF THE ENERGY PERFORMANCE OF FIXED AND INVERTER SPLIT TYPE AIR CONDITIONERS IN SOCIAL INTEREST HOUSING

The present work aims to analyze the performance of split inverter air conditioners relative to conventional split air conditioners, considering a hypothetical scenario of social interest housing (HLS) in hot and humid climates. An existing building in the city of Jacarepaguá, Rio de Janeiro, was chosen as a reference. To obtain the results, the program ©EnergyPlus and the application ©OpenStudio used thermal energy simulation to create a reference model of the chosen real building according to the procedure specified in the simulation method of the Technical Quality Regulation for Energy Efficiency Levels (RTQ-R, 2012). The method also considers usage and employment patterns. As a result, a virtual model of the building and performance curves provided by suppliers, usage and occupancy patterns, energy loads of artificial lighting systems, electrical equipment, air conditioning, etc., as well as information on air infiltration are obtained, Information provided in the Brazilian standard 16555-3 (2018). The residential heat load was estimated, so energy efficiency was analyzed using the monthly electricity usage of these devices and the simulated annual operating EER. In addition to factors affecting energy consumption, the simulations also verified differences in the operating behavior of the air conditioning units compared to climatic conditions. In this way, it is assumed that replacing fixed split with split inverter equipment can reduce electricity consumption by up to 41% per year, while improving energy efficiency, reaching values of over 30% compared to both types of regulators. The results obtained in the study also show that, regardless of the houses analyzed, the option of using inverter air conditioners will significantly reduce operational consumption and provide savings of at least R\$ 3,000.00 per year, making them an attractive option in the long run.

Keywords: Air conditioners; Thermo-energy simulation; Social interest housing; Electric power consumption; energy efficiency indicator.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Comparação entre Split fixo e inverter (a) rotação compressor (b) economia de energia .....	29
Figura 2- Controle de temperatura .....	29
Figura 3 - Posicionamento geográfico.....	44
Figura 4- Blocos de apartamentos Parque Carioca.....	45
<i>Figura 5- Planta apartamento tipo 2 quartos. ....</i>	<i>45</i>
Figura 6 – Fluxograma do método modelagem termoenergética.....	47
Figura 7- Padrão de ocupação dos dormitórios.....	49
Figura 8 - Padrão de ocupação da sala .....	49
Figura 9 – Configuração do Split Inverter.....	51
Figura 10- Modelo Simulado .....	55
Figura 11 - Classificação elementos de sombra.....	55
Figura 12- Influência da altura na estimativa térmica .....	56
Figura 13- Consumo operacional Split fixo.....	58
Figura 14-Consumo operacional Split Inverter .....	58
Figura 15-Consumo Anual condicionadores .....	59
Figura 16 - Comparação EER.....	60
Figura 17 - Comparação UR e temperatura .....	61
Figura 18 - Histograma RTF .....	63
Figura 19 - Perfis de operação de condicionadores de ar (Split fixo e inverter) .....	63
Figura 20 - Viabilidade operacional dos condicionadores de ar .....	65
Figura 21 - Configurações de Computador utilizado na simulação da presente pesquisa ....	80
Figura 22 - Modelo virtual 3D da edificação .....	81
Figura 23 - Inspeção condição de contorno .....	81
Figura 24- Categorização dos espaços.....	82
Figura 25 - Classificação de zonas térmicas.....	82
Figura 26- Orientação geográfica dos apartamentos .....	82
Figura 27 - Atribuição dos coeficientes às curvas de operação.....	83
Figura 28 - Inspeção das zonas térmicas.....	84
Figura 29- Atribuição dos sistemas AVAC às zonas térmicas –(a) PTAC, (b) Inverter .....	84
Figura 30 - Configuração dos sistemas AVAC .....	85
Figura 31 - Relatórios de resultados .....	85
Figura 32 - Guia de medidas.....	86
Figura 33 – Curvas de operação - AVAC split convencional,(a),(b),(c),(d),(e),(f) .....	87
Figura 34 - Curvas de operação- AVAC Split inverter ,(a),(b),(c),(d),(e),(f),(g),(h) .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Representatividade de consumo para equipamentos elétricos.....	23
Tabela 2- Posse de condicionadores de ar .....	26
Tabela 3 - Percentual de posse equipamento tipo janela. ....	26
Tabela 4-Propriedades dos elementos construtivos da edificação .....	48
Tabela 5-Estimativa de carga térmica de resfriamento.....	56
Tabela 6-Influência da altura na carga térmica .....	57
<i>Tabela 7- Comparação EER.....</i>	<i>64</i>
Tabela 8 - Inputs do Ventilador do sistema de climatização .....	75
Tabela 9- Curva Quadrática fixo .....	76
Tabela 10 - Curva bi quadrática fixo.....	76
Tabela 11 - Curva linear <i>inverter</i> .....	76
Tabela 12 - Curva quadrática <i>inverter</i> .....	77
Tabela 13 - Curva cúbica <i>inverter</i> .....	77
Tabela 14 - Curva bi quadrática <i>inverter</i> .....	78
Tabela 15- Variáveis do arquivo climático.....	79

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Configuração de <i>Input</i> do arquivo.....	75
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BESTEST - Teste de Simulação de Energia de Edifícios

DOE – *Department Of Energy* (Departamento de Energia dos Estados Unidos)

HIS - Habitação de Interesse Social

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

IEA – *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil

IPCC -*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)

LCOE - *Levelized cost of energy* (Custo Nivelado de Energia)

ONU - Organizações das nações unidas

PMCMV - Programa Minha casa Minha vida

RTQ-R - Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais

## LISTA DE SÍMBOLOS

CLF – *Cooling Load Factor* (Fator de carga de resfriamento)

CLTD - *Cooling Load Temperature Difference* (Método de cálculo da diferença de temperatura da carga de resfriamento)

CAPFT - Fator de correção da capacidade em função da temperatura

EIR - *Energy Input Ratio* (Taxa de entrada de energia)

EIRFPLR - *Energy Input Ratio* (Relação de entrada de energia dependendo da carga parcial)

EIRFT - *Energy Input Ratio* (Relação de entrada de energia dependendo da carga parcial)

EER – Índice de Eficiência Energética

EUI - Intensidade de Uso de Energia

PLF - Fração de Carga Parcial

PLR - Relação de Carga Parcial

PTAC - *Packaged Air Conditioning Terminal*

RTF - Fração de tempo de execução

TBS - Temperatura de bulbo seco do ar [°C]

TBS<sub>e(exterior)</sub> - Temperatura de bulbo seco do ambiente externo [°C]

TBS<sub>i(interior)</sub> - Temperatura de bulbo seco do ambiente interno [°C]

TBU - Temperatura de bulbo úmido do ar [°C]

TBU<sub>e</sub> - Temperatura de bulbo úmido do ambiente externo [°C]

TBU<sub>i</sub> - Temperatura de bulbo úmido do ambiente interno [°C]

SPREI - Sistema Passivo de Resfriamento Evaporativo Indireto;

TRY - Ano de referência do teste

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
2	DESENVOLVIMENTO .....	22
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL .....	22
2.1.1	CENÁRIO NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA E PERIFIS DE USO RESIDÊNCIAL .....	22
2.1.2	HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL .....	23
2.1.3	PESQUISA DE POSSE DE CONDICIONADORES DE AR.....	25
2.2	FUNDAMENTOS BÁSICOS E TIPOLOGIA DE CONDICIONADORES DE AR.....	27
2.3	POLÍTICA DE DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR.....	30
2.4	SIMULAÇÕES TERMO ENERGÉTICAS .....	33
2.4.1	Softwares empregados em simulações termo energéticas .....	34
2.4.2	Arquivo Climático.....	35
2.4.3	Curvas de desempenho dos sistemas AVAC.....	37
2.4.4	Curvas de desempenho.....	39
2.5	ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROPOSTAS PARA REDUÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL DE CONDICIONADORES DE AR.....	40
3	METODOLOGIA.....	43
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	43
3.2	MATERIAIS .....	43
3.2.1	Objeto de estudo .....	44
3.2.2	Estação de trabalho.....	46
3.3	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	46
3.3.1	Método de modelagem termo energética.....	46
3.4	PRESSUPOSTOS DE SIMULAÇÃO .....	47
3.4.1	Materiais construtivos .....	48
3.4.2	Padrões de uso e ocupação .....	49
3.4.3	Dados de projeto .....	50
3.5	MODELAGEM DE CONDICIONADORES DE AR.....	51
3.5.1	Simulação em velocidade fixa.....	53

3.5.2	Simulação em velocidade variável .....	53
3.6	ANÁLISE OPERACIONAL DE VIABILIDADE ECÔNOMICA.....	54
4	RESULTADOS .....	55
4.1	ESTIMATIVA DE CARGA TÉRMICA .....	55
4.2	SIMULAÇÃO CONSUMO OPERACIONAL DOS CONDICIONADORES DE AR ...	57
4.3	SIMULAÇÃO EER .....	59
4.4	VARIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS CONDICIONADORES DE AR .....	60
4.5	ANÁLISE EER EM RELAÇÃO AOS ÍNDICES IDRS .....	64
4.6	VIABILIDADE ECONÔMICA OPERACIONAL DE UM CONDICIONADOR DE AR SPLIT INVERTER .....	65
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
5.1	SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE NOVOS TRABALHOS .....	68
	REFERÊNCIAS .....	69
	ANEXO A.....	75
	APÊNDICE A .....	79
	APÊNDICE B.....	80
	APÊNDICE C.....	81
	APÊNDICE D.....	87
	APÊNDICE E .....	94

# 1 INTRODUÇÃO

Mundialmente, o uso da energia elétrica para climatização artificial no setor de edificações cresce mais rápido do que qualquer outro consumo final, tendo mais do que triplicado entre 1990 a 2016 (BIROL, 2018). Na União Europeia o consumo relativo às edificações perfaz 40% do total demandado de energia elétrica.

O Brasil é o nono maior consumidor de energia elétrica do mundo e estudos projetam um cenário em constante crescimento (PEREIRA; LAMBERTS;GHISI, 2013). Grande parte dessa energia é destinada ao condicionamento artificial do ar. A utilização de climatizadores artificiais contribui de maneira significativa ao percentual de consumo e estima-se um aumento de 237% destes sistemas, considerando o período de 2005 a 2017, conforme estudo realizado pelo Ministério de Minas e Energia. Nota-se ainda, uma representatividade maior de consumo elétrico do condicionador de ar em relação aos outros aparelhos eletrodomésticos (BEN, 2021).

A inadequação de edificações não adaptadas ao clima tendencia intensa demanda de energia elétrica por parte de sistemas de iluminação artificial, e de sistemas mecânicos de refrigeração e/ou aquecimento. Em padrões construtivos utilizados pelo programa Minha Casa Minha Vida (MCMV)<sup>1</sup>, atualmente conhecido como Casa Verde e Amarela, essa não adaptação ocorre com maior frequência. Reclamações relacionada a habitabilidade dessas residências foram registradas, conforme pesquisa de satisfação dos beneficiários do programa (Brasil, 2014).

O rendimento de sistemas mecânicos de refrigeração e/ou aquecimento pode variar, visto que, são sistemas capazes de retirar ou adicionar carga térmica ao ambiente, e como esta carga depende do desempenho térmico da habitação e é variável com o tempo, conseqüentemente o desempenho do sistema AVAC (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) dependerá também do comportamento térmico da edificação. Dado que o rendimento do sistema pode variar, a energia elétrica consumida também irá variar, visto que, o desempenho do sistema é obtida pela razão entre a capacidade total de refrigeração ou aquecimento pela potência elétrica demandada (DAVIS,2021).

O comportamento térmico de um edifício está atrelado com a respectiva carga térmica que pode sofrer mudanças ao longo do dia e do ano. Esta variação está relacionada com as

---

<sup>1</sup> Programa do Governo Federal que visa a redução do déficit habitacional.

características dos materiais construtivos, à forma de construção, a ocupação e às mudanças climáticas (PEREIRA; LAMBERTS; GHISI, 2013).

A eficiência energética de condicionadores de ar não é dependente somente do comportamento térmico da habitação. O tipo de operacionalidade também apresenta uma parcela considerável na relação consumo e rendimento. Há sistemas AVAC sendo dotados de tecnologias para minimizar o custo operacional e manter o rendimento operacional o mais próximo do rendimento nominal, esses são denominados *split's inverter* (DAVIS, 2021).

Os *split's inverter* são equipamentos dotados de um módulo de alimentação inteligente (IPM), um dispositivo eletrônico capaz de modular a velocidade do compressor em função da temperatura do ambiente. Com a utilização do IPM o compressor trabalha conforme a demanda de carga térmica a ser retirada ou adicionada, ou seja, o compressor não é desligado, ele apenas tem a rotação de seu motor reduzida quando a temperatura requerida é atingida. Contudo, essa modulação atenua os picos de energia elétrica demanda, consequentemente minimiza o custo operacional do sistema AVAC. Esses modelos apresentam essa diferença em seu funcionamento quando comparado ao modelo convencional, *Split* fixo. (MARANGONI et al., 2015).

Neste contexto, é necessário avaliar o desempenho desses equipamentos *inverter's* em habitações não adaptadas ao clima, visto que os aparelhos de condicionamento de ar são cada vez mais encontrados em residências sendo dotados de tecnologia para minimizar o custo operacional. Na era do racionamento de energia, o mercado busca cada vez mais aparelhos que sejam mais eficientes energeticamente, principalmente os condicionadores de ar que consomem menos energia sem perder sua capacidade de funcionamento.

A simulação termo energética é uma ferramenta capaz de criar cenários hipotéticos em que se torna possível avaliar e analisar desde comportamentos térmicos de edificações à (perfis) operacionais de sistemas AVAC. Os modelos de energia construídos em *software*, fundamentado em modelos de referências apresentam excelente confiabilidade quando calibrados. Contudo, torna-se possível avaliar o impacto e o retorno financeiro associado a cada medida de redução de custo simulada.

Portanto, a presente pesquisa busca analisar por meio de simulações termoenergéticas o desempenho de condicionadores de ar do tipo *Split inverter* em relação a equipamentos do tipo *Split* fixo (convencionais) em uma habitação de interesse social (HIS).

## 1.1 – OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo geral

A pesquisa tem o objetivo analisar o desempenho de condicionadores de ar do tipo *Split*, de dois modelos distintos, fixo e *inverter* utilizando coeficientes comerciais de desempenho para caracterizá-los e, conseqüentemente, empregá-los em uma simulação termo energética no ©*EnergyPlus* para apartamentos de uma habitação de interesse social (HIS)

### 1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Estimar a carga térmica de resfriamento e aquecimento dos ambientes da edificação de referência;
- ✓ Analisar as características da edificação de referência que possam impactar na estimativa de carga térmica;
- ✓ Analisar e comparar o desempenho operacional de condicionadores do tipo *Split* fixo e *inverter* por meio do *EER* e do consumo mensal dos equipamentos;
- ✓ Realizar análise de viabilidade econômica operacional

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Em países de clima quente, sempre que possível, a solução primária e direta encontrada pelos ocupantes para se alcançar condições térmicas adequadas ocorre por meio da utilização de condicionadores de ar (tecnologias ativas). Muitas pesquisas objetivam alcançar condições térmicas adequadas de forma passiva. Contudo, essas propostas demandam tecnologias que são, em grande parte, inacessíveis as habitações de interesse social, seja pelo custo e qualidade do material utilizado na construção do edifício ou até mesmo pela ausência de um estudo ambiental para avaliar a adequação do projeto ao clima local na fase projetual. Essas habitações comumente são ocupadas por moradores com baixo poder aquisitivo que em grande parte possuem barreiras em adquirir um sistema de climatização artificial e até mesmo dificuldades de custear operacionalmente o equipamento (AZEVEDO; ANDRADE, 2011).

A carga térmica retirada ou adicionada aos ambientes pela operação normal dos sistemas de climatização artificial é comumente inferior à carga parcial, dessa forma a utilização de tecnologia capaz de controlar a capacidade do compressor é relevante, visto que, se tentará ajustar a carga efetiva de calor removido ou de calor a ser adicionado, conseqüentemente haverá menor dispêndio de energia elétrica. O desempenho de sistemas de climatização artificial está diretamente relacionado com o consumo de energia elétrica, visto que, é uma razão da carga térmica demandada pela potência elétrica utilizada.

Pesquisas nacionais como, por exemplo, a nota técnica EPE 030/2018 e a Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial de 2019 detalham um rápido e alto crescimento na demanda de energia elétrica devido à utilização de condicionadores de ar. Desta forma, será necessário buscar alternativas para se evitar oscilações extremas entre a oferta e demanda de energia elétrica. Verifica-se que a escassez de oferta implica em *déficit* no suprimento ao mercado, o que, além de elevar os preços da energia no mercado de curto prazo, causa prejuízos para a economia e a sociedade que cada vez mais dependem de energia elétrica (EPE, 2018;ELETROBRÁS, 2019).

Espera-se que a presente pesquisa direcione por análises comparativas, sistemas condicionadores de ar que sejam eficientes energeticamente para climatizar artificialmente habitações de interesse social. Visto que, o custo operacional para proporcionar condições de térmicas necessárias é uma limitação para algumas classes sociais, especialmente para famílias habitando em projetos/edifícios não adaptados para o clima (ELETROBRÁS, 2019).

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O primeiro capítulo abordou um breve cenário acerca do contexto mundial e nacional sobre o consumo de energia elétrica de condicionadores de ar, aplicados ao setor residencial. Abordaram-se também assuntos relacionados a eficiência energética desses equipamentos, além do problema, dos objetivos e da justificativa do estudo.

O segundo capítulo apresenta a revisão teórica sobre as partes do tema escolhido, abordando o desempenho térmico de edificações sociais, o cenário nacional de energia elétrica, a política de desempenho de condicionadores de ar, posse de tecnologias ativas, fundamentos de funcionamento, tipologias de condicionadores de ar e regulamentações brasileiras acerca do dimensionamento e instalação. Também são avaliados nesse capítulo,

estudos que utilizaram as simulações computacionais como ferramenta para alcançar melhores índices de eficiência energética de sistemas de climatização artificial e, conseqüentemente, a redução do custo operacional desses sistemas.

O terceiro capítulo descreve o método empregado para o desenvolvimento da presente pesquisa, além da especificação dos materiais e equipamentos utilizados.

O quarto capítulo discorre sobre os resultados obtidos decorrentes das simulações computacionais realizadas. E, por fim, destaca-se no último capítulo as considerações finais e conclusões acerca da pesquisa. A bibliografia que fundamentou a presente pesquisa está listada no tópico de Referências. Adicionalmente apresenta-se Anexos e Apêndices que reúnem Informações adicionais acerca dos métodos utilizados.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Inicialmente apresenta-se o contexto do cenário nacional de energia elétrica e perfis de uso residencial, habitação de interesse social, pesquisa de posse de condicionadores de ar. Em seguida fundamenta a tipologia dos condicionadores de ar e funcionamento básico. Posteriormente levantaram-se informações sobre a política de desempenho de condicionadores de ar, regulamentação específica acerca do dimensionamento dos sistemas de climatização e simulação computacional para embasamento teórico desta pesquisa.

### 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL

#### 2.1.1 CENÁRIO NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA E PERIFIS DE USO RESIDÊNCIAL

No cenário brasileiro, o consumo de eletricidade do segmento de edificações é cerca de 43,50%, segundo levantamento feito pela Empresa de Pesquisa Energética em 2019 (EPE, 2019). Em 2020 este segmento foi responsável por consumir 283,60 TWh de energia elétrica atingindo patamares aquém apenas daqueles industriais (BEN, 2021). O setor residencial se mostra o mais representativo dentre os setores comercial e público. No ano de 2019 o consumo era equivalente a 142,60 TWh, em contrapartida, no ano de 2020 apresentou um avanço de 5,8 TWh (+4,0%). O aumento neste período pode ser justificado devido a maior frequência das pessoas em casa, visto que foram adotadas medidas de isolamento social para minimizar a transmissão do vírus da COVID-19. Com a presença frequente das pessoas nas residências o uso dos equipamentos eletroeletrônicos se tornou mais intenso. Contudo, independentemente do fator pandêmico relatórios anteriores ao ano de 2020 já retratam o aumento do consumo de energia elétrica deste setor (BEN, 2021).

A previsão de 5,4% do consumo de energia elétrica para o setor residencial pode ser entendida por meio da Tabela 1. Observa-se que ao longo dos anos alguns equipamentos tiveram uma redução de consumo considerável, tais como o chuveiro elétrico, iluminação, geladeira e freezers. Em contrapartida, outros equipamentos tiveram um aumento tímido em seu consumo, com exceção do ar condicionado que apresentou um aumento considerável com o decorrer dos anos.

O constante aumento no consumo de energia e poluição atmosférica são consequência do aumento populacional, do rápido desenvolvimento econômico e de estilos de vida com níveis mais exigentes de conforto, o que, conseqüentemente, inclui o uso intensivo de unidades de ar condicionado. A Índia, por exemplo, já é responsável por 10% das emissões mundiais totais de CO<sub>2</sub> do setor de resfriamento as quais, sem ações imediatas, aumentará exponencialmente (BAJENARU; DAMIAN; FRUNZULICA, 2015).

Tabela 1- Representatividade de consumo para equipamentos elétricos

<b>Equipamentos elétricos</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2017</b>
Ar condicionado	6,0%	10,0%	14,0%
Chuveiro elétrico	22,5%	17,8%	14,8%
Iluminação	19,2%	17,6%	12,8%
Freezer	7,2%	5,3%	4,6%
Geladeira	21,0%	21,5%	18,5%
Máquina de lavar roupa	2,5%	2,0%	2,3%
Televisão	16,5%	16,0%	16,3%

Fonte: Adaptado de (EPE, 2018)

O aumento populacional denota também uma lacuna na obtenção da propriedade habitacional, padrões construtivos, como, por exemplo, habitações de interesse social tem servido como solução para preencher essa lacuna, entretanto a qualidade de habitabilidade dessas soluções construtivas são contestáveis, principalmente em habitações não adaptadas ao clima (LOGSDON, 2012).

### 2.1.2 HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL

A definição de habitação popular é aquela destinada à população com renda mensal média de até 3 salários mínimos. Contudo, não fica condicionada somente as pessoas de baixa renda, é também caracterizada por outras particularidades, como situações de risco, preservação ambiental ou cultural (DAMICO, 2011).

Nos últimos doze anos, desde que o Governo Federal criou o PMCMV (Programa Minha casa Minha vida) em 2009, reformulado em 16 junho de 2011 pela Lei n.º12.424 hoje conhecido como Casa Verde e Amarela o número de habitações sociais tem aumentado, permitindo que pessoas de baixa renda tenham sua própria habitação por subsídio feito pelo

poder público.

Nagali (2012) apontam que a solução adotada no âmbito governamental consiste em diminuir a lacuna na obtenção da propriedade habitacional. Desta forma, outros problemas poderão surgir neste processo. O problema numérico de acesso à moradia, por exemplo, precisa ser resolvido na fase do projeto, mas esta solução quantitativa reflete a redução de custos do processo de implementação do projeto. Portanto, uma solução eficaz é usar padrões de construção que economizem recursos e gerenciem procedimentos de referência.

As edificações financiadas pelo governo federal recebem inúmeras reclamações e alterações após a entrega das chaves aos moradores, conforme pesquisa de satisfação dos beneficiários do programa Minha Casa Minha Vida (Brasil, 2014). Grosso modo, problemas construtivos e condições inadequadas de habitabilidade no que tange à iluminação dos ambientes, condições termo-higrométricas, acústicas, de ventilação, entre outras são encontradas.

Com a redução de custos, pessoas de baixa renda tem uma maior facilidade de aquisição a moradia, entretanto, ocorre também uma redução na qualidade das edificações, sendo ignoradas, muitas vezes, as condicionantes ambientais da região de implantação das mesmas e as necessidades de seus futuros usuários. Em consequência, padrões construtivos genéricos são destinados à população de baixa renda. Neste contexto, considerando os resultados da política habitacional, soluções habitacionais com espaços reduzidos, qualidade plástica contestável, disposto em edificações projetadas de forma inadequada para atender as suas funções primordiais relacionada a habitabilidade são comuns (LOGSDON, 2012).

O conforto térmico é uma condição básica para que o ambiente tenha a melhor habitabilidade. Sua importância não está relacionada apenas as condições de conforto ambiental do usuário, mas também ao desempenho no trabalho e à saúde. Portanto, embora para classe média alta, a qualidade térmica do edifício seja insatisfatória, o que significa que o consumo de energia é aumentado por sistemas artificiais, para pessoas com menor poder de financeiro, a inadequação térmica denota apenas o desconforto já que muitas vezes não é possível incorporar uma estratégia na edificação para minimizar este problema (BAVARESCO et al., 2021).

Um projeto inadequado às características climáticas locais interfere no desempenho térmico da edificação, tendenciando à utilização intensa de equipamentos mecânicos de refrigeração e sistemas artificiais de iluminação para garantir as devidas condições de conforto ambiental dos usuários podendo resultar, portanto, em um consumo de energia elevado. Consequentemente, classes com menor recurso financeiro ficam prejudicadas

devido ao custo para obtenção de tecnologia nova e também ao custo de operação desses sistemas mecânicos (AZEVEDO; ANDRADE, 2011).

Logsdon, (2012). Concluiu que o minguamento na qualidade dos materiais construtivos utilizados na construção dos imóveis do programa MCMV é diretamente proporcional ao valor do imóvel. A redução no valor do imóvel facilita a aquisição pela população de baixa renda. Entretanto, essa proporcionalidade pode se tornar inversa ao longo dos anos, visto que o morador buscará uma melhor habitabilidade, conseqüentemente haverá um dispêndio financeiro para custear adaptações passivas e/ou ativas.

O consumo de energia elétrica de equipamentos que conseguem modificar valores termodinâmicos do ar é inerente ao comportamento térmico da edificação, localização, entorno, radiação solar e ocupação. Em projetos que não consideram essas variáveis, o consumo desses sistemas é cerca de 25% a 45% a mais do que o esperado, considerando o cenário brasileiro (MASCARO; MASCARO; STORCHI, 1992).

Além desses fatores que impactam o consumo dos condicionadores de ar, outro ponto a se considerar é a tipologia dos equipamentos, visto que, há equipamentos com o custo de aquisição mais acessível, entretanto o desempenho fica comprometido, visto que a performance dependerá não somente do desempenho térmico da edificação, mas também das características e capacidade dos componentes do sistema AVAC (SOUZA, 2010).

### 2.1.3 PESQUISA DE POSSE DE CONDICIONADORES DE AR

Conforme pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial 2019) a utilização da climatização artificial está presente em cerca de 16,69% lares brasileiros, considerando uma amostra de 18.755 domicílios. Os dados ainda apontam que 17,99% destes sistemas localizam-se na região sudeste (ELETROBRÁS, 2019). O potencial crescimento de renda da população brasileira a longo prazo e as condições ambientais presentes no país, sugerem aumento da demanda potencial por condicionamento de ar e, conseqüentemente, um maior consumo de energia elétrica que deverá ser atendida no futuro para esta finalidade (EPE, 2018).

A posse e o tipo dos equipamentos são relativas às classes sociais, conforme levantamento de dados apresentados na Tabela 2. As classes econômicas que detêm a maior propriedade são representadas pela classe A, B, C e D em ordem alfabética. Observa-se que

a utilização do condicionador de ar tipo *Split*<sup>2</sup> se mostra mais presente nas classes A, B e tem sua quantidade minimizada na classe C e, inexistente na D (ELETROBRÁS, 2019).

No Brasil cerca 58,33% de condicionadores de ar são do tipo *Split* considerando uma amostra 4053 (equipamentos). Na região sudeste a representatividade dessa categoria de equipamento é equivalente a 29,86%, analisando uma amostra 864 (equipamentos). Apesar de mais da metade dos equipamentos ser do tipo *Split*, o ar condicionado de janela (ACJ), por se tratar da opção mais econômica, no que tange a aquisição, devido ao menor investimento dos fabricantes na melhoria do desempenho, ainda é muito difundido no país (PEREIRA; LAMBERTS; GHISI, 2013; FORTES; JARDIM; FERNANDES, 2015)

Tabela 2- Posse de condicionadores de ar

Classe econômica	Representatividade [%]	Total unidades	Tipo de equipamentos
A	61,16	466,00	SPLIT
B	37,68	1850,50	SPLIT
C	15,75	4218,50	SPLIT / ACJ
D	5,22	6171,00	ACJ

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2019).

.Cerca de 30,08% dos domicílios brasileiros possuem essa categoria de condicionador de ar (ACJ), considerando o montante nacional (ELETROBRÁS, 2019). Na região sudeste esta categoria de equipamento apresenta 61,69% de representatividade. O condicionador de ar do tipo janela tem sua utilização acrescida pelas classes, B, C, D, E, conforme a Tabela 3. Diferentemente do ar condicionado tipo “Split”, o equipamento de janela (ACJ)<sup>3</sup> é projetado em uma única estrutura, em que a condensadora (unidade que rejeita calor para o meio externo) e a evaporadora (unidade que coleta energia excedente no espaço interno) compartilham o mesmo espaço interno.

Tabela 3 - Percentual de posse equipamento tipo janela.

Classes	B	C	D	E
%	24,83	34,71	39,91	42,74
Amostra	850	850	654	351

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2019).

<sup>2</sup> O tipo *split* é um sistema particionado em duas unidades, uma condensadora que fica na parte externa ao ambiente a ser climatizado e uma evaporadora instalada na parte interna ao recinto.

<sup>3</sup> Ar condicionado de janela - Equipamento único, capaz de abrigar a unidade evaporadora e unidade condensadora no mesmo compartimento.

Apesar de o ACJ ter sua representatividade acrescida pelas classes apresentadas na Tabela 3 devido à economia no que tange a aquisição, esses equipamentos se mostram menos eficientes cerca de 40% a 70% quando comparado ao modelo Split com tecnologia inverter, segundo um levantamento realizado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel). A comparação considerou equipamentos do tipo ACJ menos econômicos (FERNANDES, 2015).

## 2.2 FUNDAMENTOS BÁSICOS E TIPOLOGIA DE CONDICIONADORES DE AR

O condicionamento de ar é um processo que visa controlar simultaneamente a temperatura, a umidade, e renovação, e a qualidade do ar de um ambiente interno. O processo implica em determinar valores termodinâmicos de interesse para variáveis indicadas a seguir, em função de valores representativos do conjunto de condições locais. Desta forma, equipamentos que conseguem comportar tal processo são denominados condicionadores de ar (ABNT-NBR/16655, 2018).

- a) Temperatura de bulbo seco [°C];
- b) Temperatura de bulbo úmido [°C]
- c) Umidade relativa [%];
- c) Deslocamento de ar [kg/s];
- d) Grau de pureza do ar;

O princípio de funcionamento dos condicionadores de ar para a refrigeração e/ou aquecimento se fundamenta em uma troca espontânea de energia (calor). Para processos de refrigeração, o ar é succionado para a serpentina do evaporador que cede calor ao equipamento devido a sua maior temperatura e, em processos de aquecimento, o ar recebe calor devido a sua menor temperatura. O compressor desliga-se quando se alcança os valores termodinâmicos desejados. O equipamento continua deslocando o ar pelo evaporador e, qualquer variação no que tange a temperatura interna do ambiente o compressor é novamente acionado para refrigerar ou aquecer o ambiente (DOSSAT,2004).

O tempo de operação de condicionadores de ar apresenta um perfil instável devido à carga térmica da edificação estar em função das variações climáticas, ou melhor, o sistema de condicionamento de ar funcionará em condições de carga parcial (condições fora do ponto

de potência de resfriamento e/ou aquecimento nominal), em grande parte do tempo (DING et al., 2010).

### 2.2.1 *Split* fixo e *Split Inverter*

O sistema de ar condicionado *Split* fixo é composto por uma unidade interna (evaporadora) e uma unidade externa (condensadora). A evaporadora é responsável pela troca de calor com o ambiente, para realizar esse trabalho, esta unidade conta com uma serpentina de resfriamento acoplado a um dispositivo de expansão, uma voluta responsável pelo insuflamento de ar no espaço a ser climatizado e sensores para realizar a comunicação do ambiente com a máquina e a comunicação entre as unidades interna e externa. A unidade condensadora armazena o compressor, moto-ventilador e válvulas para realizar a troca de calor com o meio externo. Para este modelo o compressor opera somente em duas opções, ligado e desligado (MARANGONI et al., 2015).

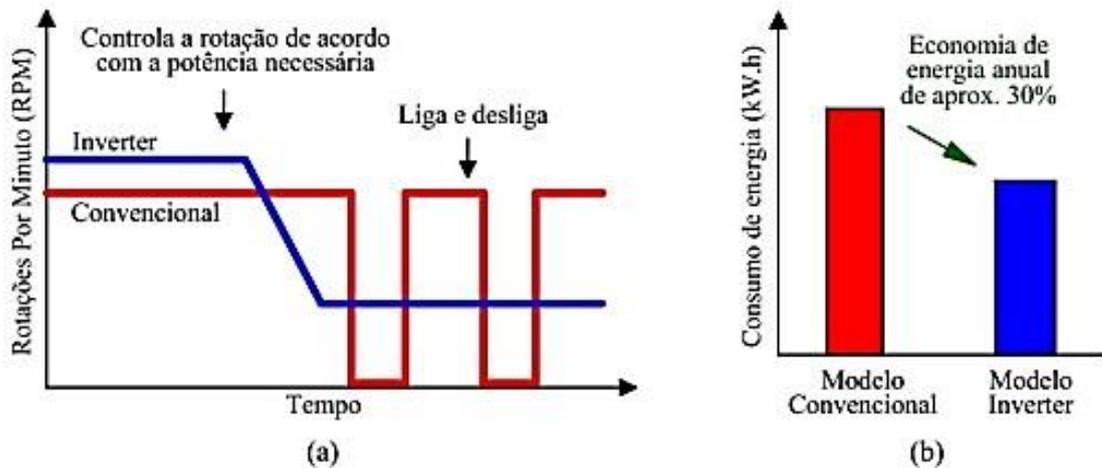
O sistema do tipo inverter também é composto pelas mesmas partes do sistema fixo, contudo, são equipamentos capazes de controlar a rotação do compressor pelo qual se torna possível variar o volume de refrigerante<sup>4</sup> expandido e, conseqüentemente, variar a potência elétrica fornecida ao compressor. Por meio da Figura 1(a), observa-se uma comparação realizada pelo fabricante de compressores trabalhando em regimes diferentes, sendo o que apresenta a menor rotação no início (Veja linha vermelha, figura 1) está em um regime convencional e o que inicia o funcionamento com maior rotação (Veja linha azul, figura 1) está com regime operacional do tipo inverter. A utilização de equipamentos com tecnologia inverter pode gerar uma economia de até 30% quando comparado aos modelos em regimes convencionais (MARANGONI et al., 2015). Contudo, o que caracteriza os condicionadores de ar inverter é justamente a possibilidade de regular o fluxo de energia do sistema, alterando a velocidade do compressor e reduzindo o consumo de energia quando se detecta que o ambiente precisa de menos refrigeração ou aquecimento.

Por outro lado, na Figura 1 (b), observa-se que há uma economia de 30% no consumo operacional de energia elétrica utilizando o modelo do tipo *inverter*, quando comparado ao modelo convencional.

---

<sup>4</sup> Segundo (MARTINELLI, 2003), o refrigerante é um fluido que absorve o calor de uma substância do ambiente a ser resfriado e o transporta até a sua rejeição no condensador.

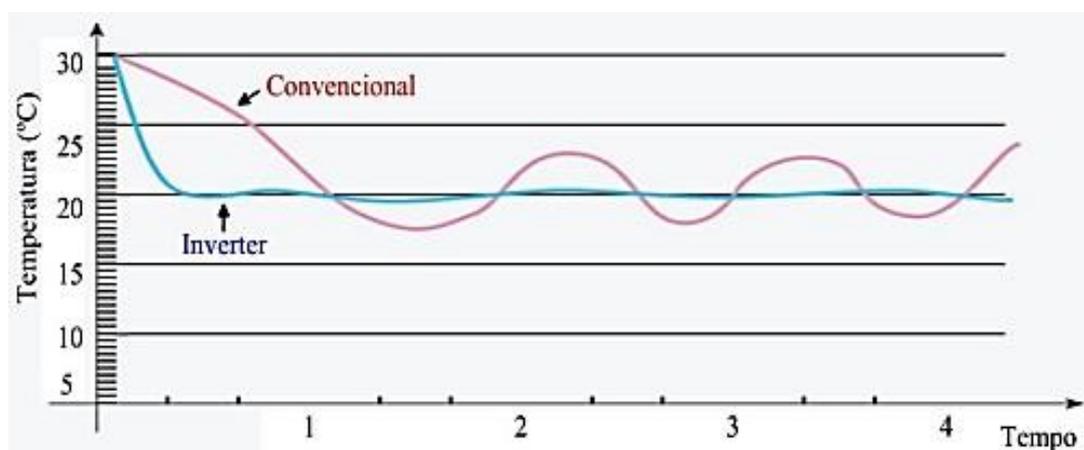
Figura 1- Comparação entre *Split* fixo e *inverter* (a) rotação compressor (b) economia de energia .



Fonte: MARANGONI *et al*, (2015)

Marangoni et al. (2015) descreve que a variação no controle de temperatura do split fixo varia até 3 °C. Em contrapartida, a precisão para sistemas do tipo inverter a variação é menor, sendo seis vezes mais exato que o sistema convencional (*split* fixo). Por meio da Figura 2, observa-se que o modelo inverter consegue reduzir a temperatura ambiente mais rapidamente, chegando a utilizar apenas 30% do tempo necessário para o aparelho fixo. Essas características abordadas comprovam a maior eficiência do modelo inverter em relação ao modelo fixo. Fabricantes relatam que seus equipamentos com tecnologia *inverter* economizam de 30% à 40% no consumo de energia elétrica em relação aos equipamentos convencionais. Alguns aparelhos possuem um recurso chamado inversor inteligente e pode economizar até 60% em relação aos modelos tradicionais.

Figura 2- Controle de temperatura



Fonte: MARANGONI et al., (2015)

## 2.3 POLÍTICA DE DESEMPENHO DE CONDICIONADORES DE AR

A eficiência dos climatizadores de ar está diretamente relacionada com a carga térmica disposta no ambiente com a tecnologia agregada para seu funcionamento. Requisitos para um correto dimensionamento e instalação são extremamente necessários, dado que, sistemas mal dimensionados e instalados incorretamente podem resultar em diminuição de capacidade e eficiência energética da ordem de 20% além de reduzir a vida útil superior a 50% em relação aos valores típicos estabelecidos pelo fabricante (PEREIRA et al., 2017).

O Brasil possui recursos legais para conduzir uma política nacional de conservação e uso racional de energia a datar de 17 de outubro de 2001, fundamentada pela Lei n.º 10 295. Apesar disso, a aprovação da regulamentação específica para consentimentos de níveis mínimos de coeficiente de eficiência energética foi firmada apenas em 2007. O coeficiente de eficiência energética é determinado pela razão entre a capacidade total de refrigeração (expressa em *Watts*) e a potência elétrica demandada (também expressa em *Watts*). Em 2018 foi publicada uma portaria interministerial n.º 234, de 29 de junho de 2020 alterando as exigências para condicionadores de ar, no sentido de elevar os índices mínimos (JARDIM; RAUL, 2018).

Os índices mínimos mais atualizados de desempenho de condicionadores de ar exigidos pela regulamentação brasileira em vigor desde a década de 2010 é inferior aos limites estabelecidos em outros países, como Europa e os Estados Unidos. Em uma pesquisa realizada em 2011 pela CLASP (Collaborative Labeling & Appliance Standards Program) comparando informações de desempenho energético de condicionadores de ar de oito economias (Austrália, China, União Europeia, Japão, Índia, Coreia, Taiwan e os Estados Unidos) foi possível concluir que os níveis mínimos exigidos desde 2011 no Brasil (pela Portaria Interministerial MME/MCT n.º 323/2011) são similares aos da Índia e da China no ano de 2004.

O aumento de desempenho dos aparelhos condicionadores de ar é uma imposição evidente, tendo em vista o cenário energético nacional. Entretanto, os níveis máximos de consumo específico de energia estabelecido pela regulamentação brasileira ainda é tênue quando comparado com outros países (SHAH et al., 2017).

Os estudos de regulamentações de outros países pontua que o coeficiente de eficiência energética de condicionadores de ar não é a melhor ferramenta de avaliação para todas as categorias de aparelhos (SHAH et al., 2017). O coeficiente de eficiência energética sazonal fornece uma medida mais representativa do desempenho do equipamento submetido à demanda do clima local. Alguns países já utilizam o coeficiente de eficiência energética sazonal na definição de níveis mínimos de eficiência em normas e regulamentos (PEREIRA; LAMBERTS; GHISI, 2013).

A utilização do índice de eficiência energética sazonal é favorável especialmente para avaliação de equipamentos com tecnologia *inverter*. Em mercados mais sólidos de condicionamento ar, como o Japão, Estados Unidos e União Europeia, os *splits inverter's* estão amplamente acessíveis. O mercado japonês é denominado por condicionadores do tipo *inverter* com ciclo reverso, que fornecem tanto resfriamento e aquecimento (CLASP, 2011).

O INMETRO publicou a portaria n.º 234, de 29 de junho de 2020 para o perfeccionamento do Programa brasileiro de Etiquetagem (PBE) para aparelhos condicionadores de ar. Com a nova portaria a metodologia de cálculo de eficiência energética passa a ser realizada pelo método de carga parcial e métrica sazonal (IDRS). Com as novas diretrizes em vigor os condicionadores do tipo fixo e *inverter* são ensaiados da mesma forma e classificados com os mesmos critérios referentes aos aparelhos que operam em carga total. A adoção da métrica sazonal para o cálculo da eficiência energética do condicionador de ar é muito importante, visto que considera cálculos baseados nas temperaturas que ocorrem ao longo do ano e na frequência de utilização do aparelho para cada temperatura, conseqüentemente espera-se coeficientes de eficiência energéticas mais fidedignos em relação aos índices anteriores.

Além da nova metodologia de cálculo para os coeficientes de eficiência energética, os níveis serão ajustados, para obtenção de selo "A", os fabricantes terão até dezembro de 2022 para se ajustarem aos novos critérios que anteriormente era de 3,23 e, com a aplicação da nova portaria, passa a ser 5,5, ou seja, um aumento de 35,4%. A elevação das exigências relacionadas à eficiência energética de equipamentos é uma necessidade evidente, tendo em vista o atual panorama energético nacional.

A agência Internacional de Energia (IEA) afirma que a forma mais rápida e econômica para lidar com a segurança energética e os desafios ambientais e econômicos seria por meio do aumento da eficiência energética. A IEA (2011) apresenta, ainda, um relatório com recomendações em que é possível reduzir cerca de 17% do consumo anual de energia no mundo.

A utilização e aplicação correta das normas orienta o dimensionamento adequado dos equipamentos de climatização artificial. Sistemas superdimensionados (tipicamente superiores a 30% da carga térmica real), além de mais caros, consomem em média, 20% a mais de energia elétrica. A definição de disposição para instalação apropriada dos equipamentos é muito importante, visto que espaços confinados podem resultar em diminuição de capacidade e eficiência energética da ordem de 30%. Requisitos para uma correta instalação são extremamente necessárias, dado que, sistemas mal instalados podem resultar em diminuição de capacidade e eficiência energética da ordem de 20% e redução da sua vida útil superior a 50% em relação aos valores típicos estabelecidos pelo fabricante (PEREIRA et al., 2017).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT possui uma série de padrões técnicos que podem orientar e determinar os requisitos mínimos para projetos de condicionadores de ar. Assim, além de calcular os requisitos para a correta instalação dos equipamentos, também inclui o cálculo dos parâmetros de carga térmica, conforto (não apenas o "resfriamento" do ambiente) e qualidade do ar.

As principais normas disponíveis na ABNT aplicáveis a projetos de condicionadores de ar são:

**ABNT NBR 16401-1:2008** - Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 1: projetos das instalações. Nesta parte determinam-se os parâmetros básicos e requisitos mínimos de projeto para sistemas de ar condicionado central e unitário. Adequado para qualquer categoria de sistema de ar condicionado.

**ABNT NBR 16401-2:2008** - Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 2: parâmetros de conforto térmico. Nesta parte estipularam-se os parâmetros ambientais internos, de modo a proporcionar conforto térmico para os ocupantes em ambientes internos condicionados.

**ABNT NBR 16401-3:2008** - Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 3: qualidade do ar interior. Nesta parte especificaram-se os parâmetros básicos e requisitos mínimos do sistema de ar condicionado, visando obter uma qualidade do ar interior aceitável para melhorar o conforto.

**ABNT NBR 11215:2016** - Equipamentos unitários de ar-condicionado e bomba de calor - Determinação da capacidade de resfriamento e aquecimento. Esta norma específica, métodos para determinar a capacidade de resfriamento de equipamento de ar condicionado integral e a capacidade de resfriamento e aquecimento de equipamento de bomba de calor integral.

**ABNT NBR 16655-1:2017** - Instalação de sistemas residenciais de ar-condicionado - Split e compacto Parte 1: projeto e instalação. Nesta parte descreveram-se os requisitos mínimos para o projeto, fabricação e instalação de suportes fixos para equipamentos externos em qualquer aplicação de equipamentos compactos e divididos com capacidade de até [18 kW (60.000 BTU / h)]. Adicionalmente descreve, ainda, a utilização de parâmetros para garantir a instalação, desempenho, operação adequada e a confiabilidade necessária para satisfazer o usuário final.

**ABNT NBR 16655-2:2017** - Instalação de sistemas residenciais de ar-condicionado - Split e compacto Parte 2: procedimento para ensaio de estanqueidade, desidratação e carga de fluido refrigerante. Nesta parte descreveram-se os requisitos mínimos para os procedimentos de teste de vazamento, desidratação e carga de refrigerante da linha de refrigerante usada para conectar a unidade interna à unidade externa do equipamento de ar condicionado em qualquer aplicação com capacidade não superior a 18 [kW] (60.000 BTU / h) e procedimentos para garantir a instalação, desempenho, operação e confiabilidade para a satisfação do usuário final.

**ABNT NBR 16655-3:2017** - Instalação de sistemas residenciais de ar-condicionado - Split e compacto Parte 3: método de cálculo da carga térmica residencial. Nesta parte é fornecido um procedimento simplificado para o cálculo da carga térmica de ar condicionado instalado em edifícios residenciais.

## 2.4 SIMULAÇÕES TERMO ENERGÉTICAS

A utilização de simulações computacionais têm estimulado pesquisas na área de economia de energia em sistemas de ar condicionado e ganhado importante significado ambiental e econômico. Essas simulações quando calibrados, podem reproduzir o consumo de energia conforme precisão e nível de confiança desejado, com base dos dados de entrada obtidos relacionados às características da edificação real de referência. Sob condições climáticas representativas ou reais, todas as 8760 horas do ano podem ser analisadas (CHONG et al, 2021).

Ni e Bai (2016) concluíram que a ineficiência de condicionadores de ar está fortemente relacionada ao super dimensionamento, dado que as condições termodinâmicas internas têm um impacto muito significativo no consumo de energia elétricas desses sistemas. Os

condicionadores de ar controlam a temperatura, a umidade e, neste caso, o contaminante do ar nos data centers. Apesar do sistema estudado por eles apresentar um desempenho energético relativamente eficiente, o consumo de energia elétrica pode ser reduzido em até 40%. A simulação termo energética é uma forma eficaz de examinar o consumo de energia de condicionadores de ar. Em uma comparação realizada no estudo levantado pelos autores, o ©EnergyPlus e o DOE-2 mostrou que o EnergyPlus tem vantagens em relação ao DOE-2 na simulação de desempenho energético de edifícios do semelhante à data center.

Paiva et al. (2021) realizou simulação energética baseada em um modelo térmico simples para condicionadores de ar inverter e condicionadores de ar split convencionais. O foco principal da análise é a diferença entre a diferença de temperatura no trocador de calor e o consumo diário de energia elétrica necessário para operar em um ambiente com perfil típico de carga térmica. O equipamento dotado de inversor é mais eficiente que o equipamento convencional.

#### 2.4.1 Softwares empregados em simulações termo energéticas

O ©EnergyPlus é um programa de simulação de análise termo energética, baseado em dois programas já existentes, o *BLAST* e o *DOE-2*, que já eram utilizados na década de 1980 como ferramentas para simulação energética. A lógica computacional e a distribuição do “software” é financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. O ©EnergyPlus atende aos requisitos estabelecidos pelo *BESTEST* (*Building Energy Simulation Test*) e, por isto, trata-se de um programa validado para realizar simulação de energia térmica. Este procedimento foi desenvolvido pela *International Energy Agency* (IEA) para testar “softwares” de simulação de energia tendo sido incluído na norma *ASHRAE 140* como um método padrão para verificar programas de simulação de energia térmica (BRACKNEY et al., 2018).

O programa possibilita calcular as cargas térmicas, o consumo energético dos equipamentos em funcionamento nos ambientes associados ao uso e ocupação do edifício. Para isso o ©Energy Plus usa como entradas o arquivo climático da localização do edifício, as condições de uso e ocupação bem como os parâmetros geométricos e construtivos da edificação. O cálculo de cargas térmicas é baseado no balanço de calor, permitindo o cálculo simultâneo dos efeitos radiantes e convectivos, tanto nas superfícies internas quanto nas externas para cada passo de tempo, passo esse que pode ser horário ou fração de hora. A transferência de massa também é considerada com a transferência de calor para gerar os

dados de movimentação de ar entre as zonas térmicas. Os cálculos de fenestração, relacionados as aberturas, incluem controles de sombreamentos nas janelas e balanços de calor, camada a camada, para considerar de forma apropriada a energia solar absorvida nas janelas. Modelos de conforto térmico considerados pelo ©Energy Plus são baseados na rotina de uso e ocupação, além das condições de temperatura, umidade, etc. Os relatórios de saída gerados pelo programa podem ser customizados conforme a aplicação, podendo variar de anual para frações de hora, além de gerar dados para diferentes equipamentos e parâmetros que fazem parte do sistema de climatização (BIGLADDER, 2020).

O software ©Sketchup é uma ferramenta utilizada para a criação de modelos tridimensionais assistida por computador, no formato *Computer-Aided Design* (CAD). Este trabalho utilizará a versão *make* 2017, por ser uma versão gratuita e apresenta boa estabilidade na aplicação conjunta com o ‘software’ de simulação energética ©Energy Plus. Esta interação entre ambos os softwares podem ser realizada por meio do *Plug-in* Euclid ou ©Open Studio, que permitiram a obtenção do modelo termo energético do objeto da presente pesquisa (BIGLADDER, 2020).

O ©Open Studio é um programa de código aberto, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis do Departamento de Energia dos Estados Unidos, que reúne uma coleção de ferramentas que facilitam a modelagem energética de construções. O programa foi criado para facilitar o desenvolvimento e aplicação de soluções para melhorar o desempenho energético de edifícios ainda em fase de projeto. O aplicativo do ©Open Studio para ©Sketchup reconhece as formas 3D e dá significados físicos para elas, considerando portas e janelas como objetos de fenestração e iluminação e, objetos externos, como sombreamentos. O material das paredes, portas e janelas são definidas no ©Open Studio, assim como o padrão de utilização do prédio: rotina de uso e ocupação, rotina de abertura de janelas (BRACKNEY et al., 2018). Todos os cálculos relacionados ao balanço energético realizados no ©Open Studio são feitos utilizando o ©Energy Plus como motor de cálculo. O ©Open Studio funciona como uma “interface” aprimorada de utilização do ©Energy Plus, facilitando assim a definição da geometria, materiais de construção, equipamentos internos, iluminação e ocupação do edifício.

#### 2.4.2 Arquivo Climático

O conhecimento e compreensão do clima regional é essencial para o desenvolvimento

do projeto de climatização artificial. Para obter essas informações, estações meteorológicas aferem diariamente condições climáticas e registram os dados obtidos em bancos de dados climáticos. As informações coletadas pelas estações meteorológicas ao longo dos anos fornecem dados para a produção de arquivos climáticos (GRIGOLETTI; FLORES; SANTOS, 2016).

A utilização de dados climáticos em simulações numéricas é imprescindível, visto que os “softwares” necessitam deste tipo de dados de entrada para simular. No que tange a utilização, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) converteu estes arquivos para a extensão.epw para o uso no programa ©Energy Plus (SCHELLER et al., 2018).

O arquivo climático do tipo TRY (*Test Reference Year*) representa a média de dados de um ano inexistente para referência, a partir da junção de meses característicos de diferentes anos para um local específico, sem temperaturas extremas. Consta nesse tipo de arquivo, variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho e umidade relativa;, direção e velocidade dos ventos, nebulosidade, pressão barométrica, radiação solar, entre outros. Esses arquivos possuem uma consistência de cerca de 30 anos em pesquisas de campo e tem sua disponibilidade para 14 cidades (SUN; LI; XIAO, 2017).

O *Typical Meteorological Year* (TMY) diferentemente do TRY seleciona o ano mais representativo entre vários anos. Essa metodologia seleciona os meses mais característicos de vários anos distintos para compor um ano típico. A construção de um TMY fundamenta-se na variável temperatura e consiste em filtrar sucessivamente os meses mais quentes e mais frios, excluindo-os até considerar um mês típico do local. O TMY é composto por 12 meses reais, podendo ser, estes meses, de diferentes anos, desde que o mês selecionado seja representativo dos mesmos meses observados no período de 30 anos (de preferência) ou, no mínimo, 10 anos (SCHELLER et al., 2018).

O projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment* ou Avaliação de Recursos de Energia Solar e Eólica) foi criado em 2001 para fornecer informações sobre energia solar e eólica. Desta forma, o SWERA começou com um estudo piloto financiado conjuntamente por empresas e parceiros globais. O objetivo deste projeto consiste em fornecer informações sobre dados de recursos de energia renovável em diferentes regiões do mundo e ferramentas para aplicar esses dados. Os dados são fornecidos gratuitamente e se destinam a apoiar “*designers*”, analistas e investidores. Atualmente o projeto disponibiliza arquivos para 20 cidades brasileiras (SCHELLER et al., 2018).

O Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET) disponibilizou 411 arquivos climáticos de municípios brasileiros, elaborados pelo professor Maurício Roriz, baseado na

estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de 2000 a 2010 (NEVES; RORIZ, 2012). O arquivo original do banco de dados do INMET mostra as seguintes variáveis: temperatura do ar, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do ar (vento), precipitação e irradiância global no plano horizontal, entre outros. Contudo, durante a investigação, muitas lacunas e interrupções de medição foram observadas. Desta forma, foi feito o preenchimento e substituição desses dados e, posteriormente, a conversão para o formato.epw. Com isso foi possível estimar outras variáveis por cálculo e do aplicativo Weather Converter do programa ©Energy Plus (SCHELLER et al., 2018).

A escolha de qual arquivo utilizar é determinante para a eficácia e eficiência do projeto, seja na atribuição de tecnologias ativas ou até mesmo passivas. A precisão dos arquivos climáticos ainda é bastante discutida, visto que as estações meteorológicas se concentram em aeroportos, localidades relativamente distantes de centros urbanos em que não é possível, muitas vezes, o registro de dados climáticos locais além de desconsiderar as particularidades inerentes a região imediata do objeto de estudo bem como os possíveis efeitos das ilhas de calor na localidade em questão (LEITE et al., 2020). Desta forma, caso haja mais de uma opção de arquivo climático para uma determinada localidade sugere-se avaliar diversas questões tais como o tipo de formato (TRY, SWERA, etc.), a distância da estação de referência que deu origem ao arquivo, entre outros parâmetros que poderão influenciar o grau de incerteza dos resultados.

### 2.4.3 Curvas de desempenho dos sistemas AVAC

A utilização dos coeficientes é necessária para corrigir a capacidade e o consumo em função das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar externo dos condicionadores de ar. A correção também é aplicável ao consumo em função do *Part Load Ratio* (PLR), variável que considera a rotação do compressor em cargas parciais.

A potência do equipamento é ajustado de acordo com as seguintes curvas *CAPFT* (*Capacity as a function of temperature*), *EIRFT* (*Energy input ratio as a function of temperature*) e *EIRFPLR* (*Energy input ratio as a function of PLR - part load ratio*), conforme Equação (2.1), apresentada no manual de referência de engenharia do ©EnergyPlus (LBNL, 2010):

$$POT = \left[ \frac{CAP \cdot CAPFT}{COP} \right] \cdot EIRFT \cdot EIRFPLR \quad (2.1)$$

Em que POT é a potência de refrigeração, CAP é a capacidade de refrigeração nominal, COP é o coeficiente de performance, CAPFT é o fator de correção da capacidade em função das temperaturas de operação, EIRFT é o EIR (*Energy Input Ratio*) em função das temperaturas de operação e o EIRFPLR é o EIR em função das cargas parciais.

A curva bi quadrática CAPFT é representada pela Equação (2.2), de acordo com as referências do EnergyPlus (LBNL, 2010):

$$CAPFT = a + [bTBU_I] + [bTBU_I^2] + [dTBS_E] + [eTBU_e^2] + [fTBU_I TBS_E] \quad (2.2)$$

O ajuste dos coeficientes de *a* a *f* da Equação (2.2) é realizado por meio de regressão polinomial, a partir de informações do fornecedor. Os dados foram obtidos com o compressor operando com frequência de 52 Hz, considerada a frequência nominal para este equipamento, TBS<sub>i</sub> de 26,7 °C e variando a temperatura de bulbo úmido interna (TBU<sub>i</sub>) e a temperatura de bulbo seco do ambiente externo (TBS<sub>E</sub>).

O EIR é a razão entre a potência consumida pela capacidade do equipamento operando no modo refrigeração. O comportamento do EIR em função das temperaturas de operação é caracterizado pela curva bi quadrática do EIRFT e é representada pela Equação (2.3).

$$EIRFT = a + [bTBU_I] + [bTBU_I^2] + [dTBS_E] + [eTBU_e^2] + [fTBU_I TBS_E] \quad (2.3)$$

Em que o EIRFT é o fator de correção de EIR em função das temperaturas de operação, as letras de “*a*” e “*f*” representam os coeficientes da equação, obtidos da mesma forma que para o CAPFT.

O *Part Load Ratio* (PLR) representa a relação entre a capacidade apresentada e a capacidade nominal. Também é caracterizado pelo PLR o comportamento do EIR em função das cargas parciais e é representado pela curva EIRPLR, conforme representado pela Equação (2.4) (LBNL, 2010).

$$EIRFPLR = \left[ \frac{POT}{POT_{Nominal} COP_{Nominal}} \right] \quad (2.4)$$

Em que o EIRFPLR é o EIR em função de cargas parciais, POT é a potência consumida em refrigeração,  $POT_{Nominal}$  é potência nominal consumida em refrigeração e o  $COP_{Nominal}$  é o coeficiente de performance nominal.

Deve se observar que quando:

$PLR < 1 \rightarrow$  o comportamento da EIR em função das cargas parciais será representado pela curva (EIRLowPLR);

$PLR > 1 \rightarrow$  o comportamento da EIR em função das cargas parciais será representado pela curva do tipo (EIRHiPLR);

Todas as duas curvas são cúbicas e está representadas pelas as Equação (2.5) e Equação (2.6), conforme referência do (LBNL, 2010).

$$EIR_{LowPLR} = a + [bPLR] + [cPLR^2] + [dPLR^3] \quad (2.5)$$

Em que EIRLowPLR é o EIR em função do PLR quando  $PLR < 1$ , as letras de “a” a “d” são os coeficientes da equação e o PLR é a razão entre a capacidade apresentada e a capacidade nominal.

$$EIR_{HiPLR} = a + [bPLR] + [cPLR^2] + [dPLR^3] \quad (2.6)$$

Em que o EIRHiPLR é o EIR em função do PLR quando  $PLR > 1$ , as letras de e a h são os coeficientes da equação e o PLR é a razão entre a capacidade apresentada e a capacidade nominal. A definição dos coeficientes de “a” a “h” também é realizado por meio de regressão polinomial por meio de dados técnicos de fabricantes.

#### 2.4.4 Curvas de desempenho

As curvas de desempenho são utilizadas para representar o comportamento de operação de sistemas AVAC. Essas curvas são geradas por regressão em dados tubulares para métricas de desempenho específico. A análise de regressão determina os coeficientes da equação que são as entradas primárias para todos os objetos da curva de desempenho. Para a geração das curvas é necessário o uso de métodos experimentais para coletar dados e, posteriormente, a aplicação de tratamento estatístico, visto que, são dados empíricos derivados de informações coletadas por observações.

A interpretação de que uma variável dependente, caracteriza a resposta de um sistema com entrada específica, ou seja, a resposta à variável independente é válida para o ©EnergyPlus Essa resposta gerada é condicionante ao desempenho do sistema de climatização e as características que provocaram alterações. Essas características, por

exemplo, podem representar alterações na capacidade ou potência, condicionado a uma mudança de temperatura ou a relação de carga parcial.

## **2.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO E PROPOSTAS PARA REDUÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL DE CONDICIONADORES DE AR**

Os condicionadores de ar causam grande impacto no consumo de energia elétrica de edificações e a determinação dos seus requisitos mínimos de desempenho são essenciais no que tange à eficiência energética. Essa representatividade considerável no consumo de energia está vinculado ao desempenho térmico, a variação climática, os diferentes hábitos do perfil de ocupação, operação e as tipologias desses sistemas frente a complexidade técnica para elaboração e padronização desses sistemas (PÉREZ-LOMBARD et al., 2011).

Pozza (2011) estimou o consumo de energia elétrica de toda edificação considerando condicionadores de ar do tipo *Split* de ciclo reverso e variação do fluxo de refrigerante por meio do *software* ©EnergyPlus. A modelagem do sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) contou com adaptação do módulo de simulação de serpentinas de expansão direta com compressores de velocidade variável para quatro faixas de capacidade do compressor (60, 80, 100 e 120%), tendo sido inserida as correlações de desempenho de capacidade e potência elétrica de aquecimento e refrigeração. Os resultados obtidos mediante a adaptação apresentaram uma redução de 32,85% no consumo de energia elétrica quando comparado a um condicionador de ar do tipo *Split* com velocidade fixa.

Marangoni et al. (2015) realizaram uma comparação entre o sistema de ar condicionado convencional e o sistema de ar condicionado inverter. Em ambos os sistemas são estabelecidos cenários relacionados ao tempo de uso do equipamento e seus compressores, ou seja, mudanças imediatas do equipamento convencional para o inversor, ou através da combustão do equipamento, o tempo de operação do equipamento, e pelo inversor analisado. A viabilidade econômica foi analisada em todos os casos e em todos os casos não foi feita nenhuma troca, pois foi motivado a queima de equipamentos instalados, pois neste caso a compra de equipamentos é inevitável e só pode ser revertida no sistema. A diferença financeira do inversor, especialmente se houver evidência de que o tempo de operação do compressor do equipamento convencional não é inferior a 50% do uso do equipamento, e o sistema inverter economiza não menos que 30%, o indicador de taxa interna de retorno (TIR) é

positivo, o retorno período é inferior a 48 meses e o valor presente líquido (VPL) máximo é de R\$ 179.602,61.

Lago et al. (2016) elaboraram uma bancada de refrigeração experimental visando economia de energia e melhora do desempenho dos sistemas AVAC. O experimento contou com dois sistemas AVAC. O primeiro sistema contava com uma unidade condensadora de ar, um evaporador, um compressor hermético de velocidade variável e elementos expansores (válvula de expansão eletrônica e válvula de expansão termostática), o segundo sistema é composto de uma bomba para circulação 28 2.4. Taxa interna de retorno (TIR) de fluido secundário (álcool etílico) e um trocador de acondicionamento de ar. Dados dos fabricantes foram analisados para se encontrarem os pontos ótimos de trabalho Na análise dos resultados experimentais, os testes mostraram que o sistema equipado com compressor de velocidade variável (CVV) e válvula de expansão eletrônica (VEE) é mais eficiente que o sistema equipado com compressor de velocidade variável (CVV) e válvula de expansão termostática (VET), pois operam no ponto COP máximo e fornecem capacidade de refrigeração na demanda de carga de calor necessária ou próxima dela.

Cella, Silveira e Westphal (2020) avaliaram como a variação do padrão de uso da edificação comercial pode afetar o desempenho de estratégias de eficiência energética. Para tal, foi simulado no *software* "EnergyPlus" quatro possibilidades de padrão de ocupação com duas tipologias de fachadas envidraçadas (vidros laminados e insulados). Os resultados demonstraram uma variação de consumo entre as estratégias adotadas quando variado o padrão de ocupação, além disso, observou-se que em rotinas de uso somente diurno apresentou um consumo inferior se comparado a edificação ocupada em dois períodos. Contudo, o consumo de energia de sistemas de condicionamento de ar pode sofrer grande variação de acordo com a rotina de ocupação da edificação.

Kočí, Foit e Cerný (2020) avaliaram o efeito de placas de gesso modificados por PCM (*Phase change material*) na base de *diatomita* e *dodecanol* no desempenho energético de envoltória de edifícios, tendo em consideração várias cargas climáticas e composições de materiais características dos países europeus. Obteve-se como resultado uma economia anual em aquecimento e resfriamento que variou entre 3,7 e 6,5 [kWh] por metro quadrado de fachada. A eficiência dos sistemas de armazenamento de calor latente analisados são muito sensíveis a uma combinação de composição de material e localizações geográficas. No entanto, a maioria dos sistemas baseados em PCM deve ser considerada com cautela, pois a viabilidade econômica e ambiental não é inequívoca.

Rangel (2020) apresentou uma análise comparativa do consumo de energia e qualidade de um ar condicionado tradicional e outro ar condicionado inverter. Ambos os dispositivos são testados individualmente para análise de energia para gerar um diagnóstico verdadeiro do comportamento de cada dispositivo, permitindo que a qualidade do dispositivo seja analisada para melhor desempenho. Os modelos inversores apresentam melhor desempenho e menor consumo em relação aos modelos convencionais.

Trepci, Maghelal e Azar (2021) propuseram uma modelagem energética de edifícios com ampla variação paramétrica e esquema de análise estatística, avaliando sistematicamente o impacto do contexto urbano construído na energia de resfriamento e no desempenho de edifícios sujeitos a condições climáticas extremas. Observou-se uma quantificação direta do sombreamento entre edifícios no desempenho energético, com ênfase nos padrões na demanda de resfriamento para edifícios de diferentes tipos e tamanhos. A combinação dos efeitos da altura, distância e orientação do contexto urbano podem levar a reduções significativas no resfriamento demanda, chegando a até 26% para cargas de resfriamento totais e 24% para cargas de resfriamento de pico. A economia de energia observada é particularmente significativa para edifícios residenciais, tornando-se um alvo ideal para estratégias de desenvolvimento urbano que visam usar o efeito de sombreamento entre edifícios para atingir fins de economia de energia. Além disso, uma análise aprofundada dos picos de carga ilustra como a densidade e a compactação das formas urbanas podem ser usadas como uma estratégia de projeto passiva para reduzir a carga, reduzindo assim o tamanho do sistema de ar condicionado.

As pesquisas realizadas por Pozza (2011), Marangoni et al. (2015), Lago et al. (2016), Cella, Silveira e Westphal (2020), Kočí, Foit e Cerný (2020), Rangel (2020) e Trepci, Maghelal e Azar (2021), tiveram como objetivo principal a redução do custo operacional dos condicionadores de ar, sejam por modificações na própria tecnologia do sistema ou em alterações que envolva o material construtivo que compõe a construção. Outro ponto a ser observado nas pesquisas é baixa aplicabilidade de estratégias para a redução de energia elétrica por partes dos sistemas AVAC no cenário residencial. Contudo, se faz necessário realizar pesquisas que objetiva a redução do custo operacional dos condicionadores de ar no setor residencial, especificamente em habitações não adaptadas ao clima e de cunho social, visto que o aumento do consumo de energia elétrica no setor residencial é crescente para a manutenção das condições de conforto ambiental.

### 3 METODOLOGIA

Para uma melhor compreensão da pesquisa, primeiramente descreveu-se o método de abordagem, os materiais utilizados e os procedimentos abordados.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho se caracteriza como uma pesquisa exploratória, pois, avalia um objeto de estudo existente visando propor soluções a partir dessa avaliação. A abordagem desta pesquisa pode ser classificada como quali-quantitativa, visto que se considera a subjetividade humana, e recorre a técnicas estatísticas para avaliar os resultados qualitativos de um fenômeno. Neste caso serão analisados os impactos de variáveis correlacionadas ao consumo energético para climatização tais como parâmetros construtivos, características do sistema de climatização, entre outros. A natureza desta pesquisa é classificada como Aplicada, pois dedica à geração de conhecimento para solução de problemas específicos sendo dirigida à busca da verdade para determinada aplicação prática em situação particular. O procedimento técnico presente nesta pesquisa é de caráter Quase-experimental, dado que, foi determinado um objeto de estudo e características que influencia significativamente sobre o objeto pesquisado (KÖCHE, 2016).

#### 3.2 MATERIAIS

A presente pesquisa visa comparar o desempenho de tecnologias ativas em uma edificação residencial existente de modo a apontar o equipamento com menor custo operacional. Para alcançar os objetivos propostos foram utilizados os seguintes materiais:

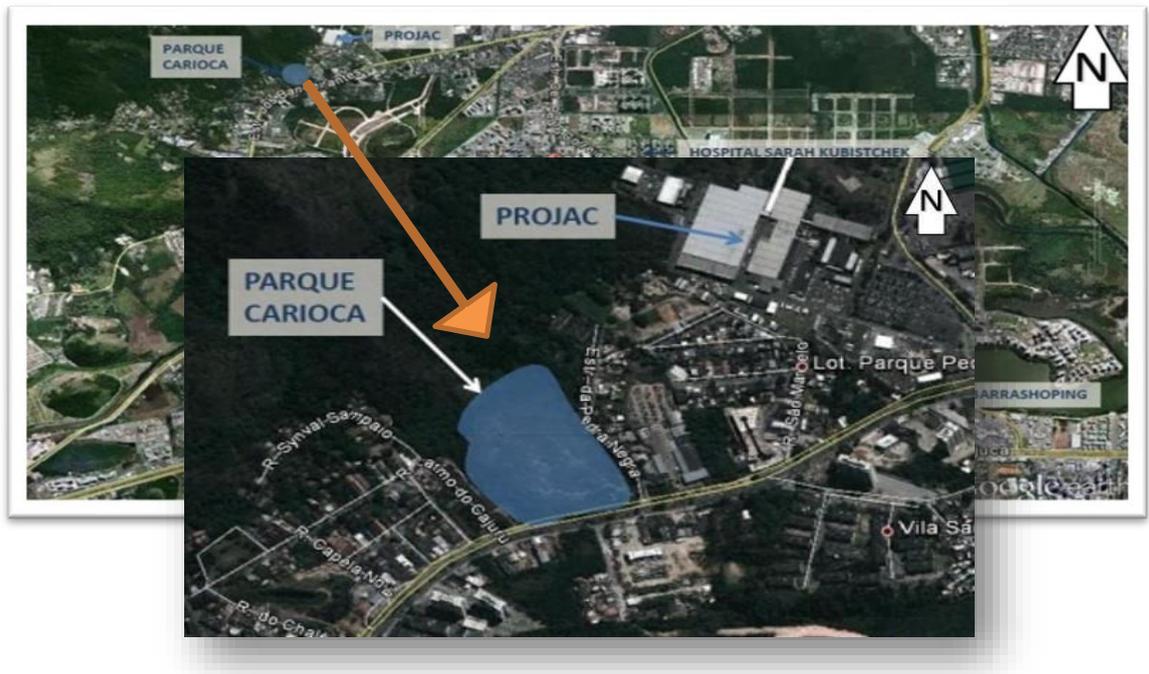
- Objeto de estudo que serviu para fundamentar a base de dados desta pesquisa;
- Estação de trabalho caracterizado por um computador, para suporte para a modelagem, simulação e tratamento dos resultados;

### 3.2.1 Objeto de estudo

Para o presente estudo selecionou-se a partir da pesquisa de Oliveira (2019) o empreendimento de interesse social denominado Complexo Parque Carioca. Este empreendimento pertence ao programa Minha casa Minha Vida sendo entregue no ano de 2013 aos moradores. A construção localiza-se na cidade do Rio de Janeiro, no bairro de Jacarepaguá. Por meio da Figura 3 observa-se geograficamente seu posicionamento e o entorno que circunda o projeto. Nota-se também a presença de área verde e corpo d'água nas proximidades. Ademais, considerou-se, também, a facilidade de acesso à informação e aos materiais necessários para a realização deste estudo.

O complexo Parque Carioca é composto de 900 apartamentos, sendo 700 de 2 quartos e 200 de 3 quartos. Do total de apartamentos, 5% são adaptados para o uso de portadores de necessidades especiais (35 de 2 quartos e 10 de 3 quartos). Os apartamentos são dispostos em 4 blocos de condomínios, conforme indicado na Figura 4. A disposição dos cômodos para os apartamentos de 2 quartos pode ser observada na Figura 5.

Figura 3 - Posicionamento geográfico



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019)

Figura 4- Blocos de apartamentos Parque Carioca



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019)

Figura 5- Planta apartamento tipo 2 quartos.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019)

### 3.2.2 Estação de trabalho

A estação de trabalho se caracteriza em um equipamento de informática utilizado na fase de desenvolvimento, desde da modelagem do objeto de estudo até as simulações. O mesmo equipamento também foi utilizado para tratar os dados obtidos via simulação, registrar as informações e realizar pesquisas teóricas acerca do objetivo desta pesquisa. Para a presente pesquisa utilizou-se um notebook operando com Windows® 10, equipado com processador Intel® Core I7, 8 gigabytes de memória RAM do tipo DDR4 e uma placa de vídeo Intel® UHD graphics 620. Entretanto, para realizar todos os procedimentos mencionados não são exclusivamente necessários que o equipamento de informática tenha essa configuração. Os requisitos mínimos do equipamento físico requerido são um Processador 1 [GHz]. 4 gigabytes de memória RAM. 16 [gb] de espaço total em disco (BRACKNEY et al., 2018). No apêndice B encontram-se mais informações acerca do equipamento físico utilizado nesta pesquisa.

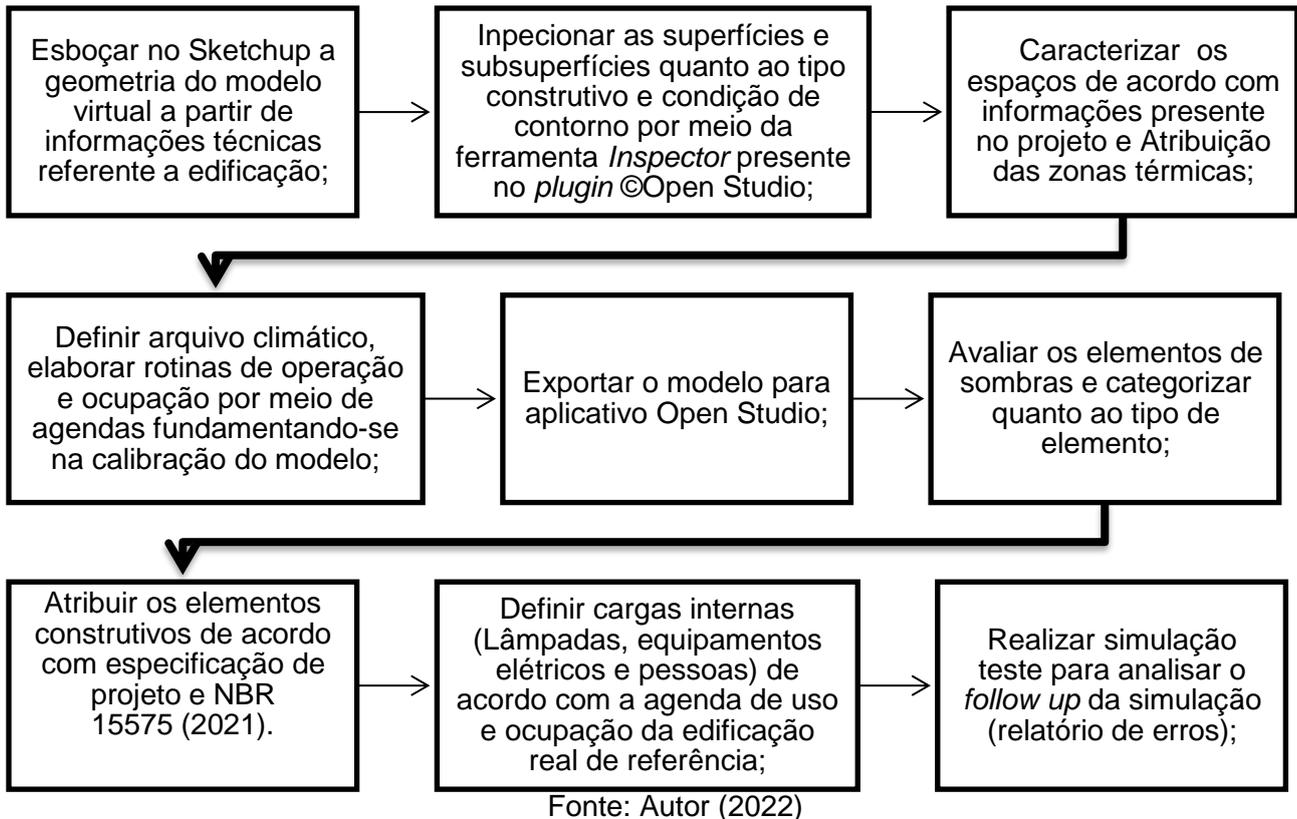
## 3.3 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os programas a serem utilizados são o ©Sketchup, o ©EnergyPlus e o *plugin* ©Open Studio. A escolha desses *softwares* se fundamentou primeiramente na interação mútua que há entre os programas e na capacidade em possibilitar a avaliação horária da carga térmica total da edificação, a condição de contorno de todas as zonas térmicas características e o desempenho termoenergético do modelo de referência utilizado (BRACKNEY et al., 2018).

### 3.3.1 Método de modelagem termo energética

Para a construção do modelo virtual para simulação considerou-se os passos mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do método modelagem termoenergética



No Apêndice C encontra-se o resultado do método de modelagem termoenergética aplicada ao objeto de estudo desta pesquisa.

### 3.4 PRESSUPOSTOS DE SIMULAÇÃO

O modelo virtual da edificação foi geo-localizado e posicionado exatamente na cidade do Rio de Janeiro. O posicionamento do modelo virtual se deu por meio do fornecimento das coordenadas geográficas ao ©Sketchup, em que foi possível sobrepor o modelo virtual ao real posicionamento geográfico do conjunto habitacional escolhido. Também foram inseridos alguns elementos no entorno da edificação, visto que esses elementos influenciam diretamente no comportamento energético da edificação. O posicionamento dos elementos circundantes foi realizado também por coordenadas geográficas.

Para a simulação da presente pesquisa utilizou-se o arquivo climático do tipo TMY para cidade em que a edificação está localizada, disponível de forma gratuita (CLIMATE ONE BUILDING ORGANIZATION, 2021). Optou-se por esse arquivo devido os dados

apresentarem condições de projeto anuais e mensais do Capítulo 14, ASHRAE Handbook-Fundamentals (2017), atualizações frequentes conforme novos conjuntos de dados meteorológicos e condições de design e de projeto anuais calculadas a partir de dados meteorológicos de origem. Por meio do Software Climate Consult 6.0, foi analisada a consistência dos dados climáticos antes da inserção no “software” ©Energy Plus, avaliando possíveis incongruências relacionadas as amplitudes térmicas. Na Tabela 16 encontram-se os dados mensais de algumas variáveis presentes no arquivo climático.

### 3.4.1 Materiais construtivos

Todas as características termo-físicas presentes na Tabela 4 foram representadas no modelo conforme dados estabelecidos na NBR 15220 (ABNT, 2005). O sistema de vedação vertical do edifício é caracterizado por paredes compostas de superfícies maciças de concreto com 0,025 m de espessura. A fachada é revestida por pintura texturizada alternando entre as cores, cinza, bege e branco com valores de absorvância de 0,9, 0,9 e 0,3 respectivamente, estimados por Oliveira (2019) a partir de medição realizada em 2019 com auxílio de um espectrômetro de refletância Alta II. As superfícies internas são revestidas com pintura branca. O piso consiste em concreto e revestimento cerâmico e a cobertura é composta por telha de fibrocimento câmara de ar não ventilada com uma resistência térmica equivalente a 0,2100 m<sup>2</sup>k/W e laje de concreto maciça de 0,1 m. As portas externas e internas são de madeira e as janelas de vidro comum incolor de 4 mm, considerando-se operáveis, abertas sem a utilização do ar condicionado e fechadas com a utilização do equipamento. Tal situação foi registrada conforme a rotina de funcionamento do sistema de climatização.

Tabela 4-Propriedades dos elementos construtivos da edificação.

<b>Propriedades</b>	<b>Concreto</b>	<b>Fibrocimento</b>	<b>Cerâmica</b>	<b>Vidro</b>
Espessura [m]	0,100	0,006	0,008	0,004
Condutividade [W/m.K]	1,750	0,950	0,900	0,900
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2400	1800	1300	2500
Calor Específico [J/kg.K]	1000	840	920	840
Absortância	0,900	0,900	0,700	0,800

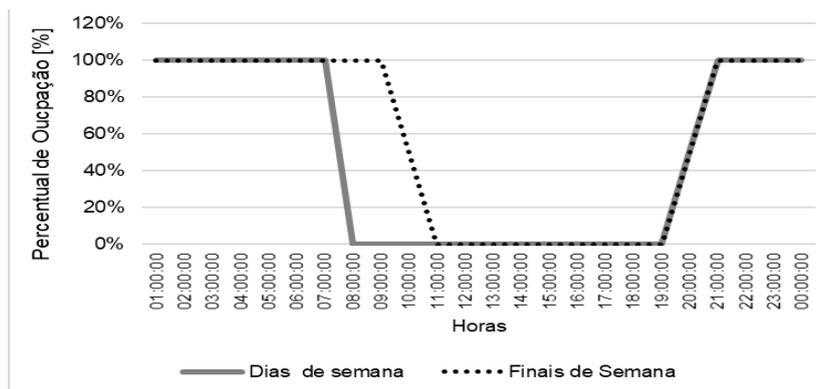
Fonte: Adaptado de ABNT, 2005

### 3.4.2 Padrões de uso e ocupação

De modo a possibilitar a comparabilidade com outras pesquisas, definiu-se o uso e ocupação do edifício de referência conforme o padrão recomendado pelo RTQ-R (2012), sendo 2 pessoas por dormitório e a sala sendo utilizada por todos os ocupantes dos dormitórios. O fluxo de calor considerado foi baseado em valores recomendados da ASHRAE *Handbook of Fundamentals* (2009), considerando uma área de pele média de 1,80 m (equivalente à área de pele de uma pessoa média), sendo 60 (W/m<sup>2</sup>) para pessoas sentadas ou assistindo TV e 45 (W/m<sup>2</sup>) para pessoas descansando ou dormindo.

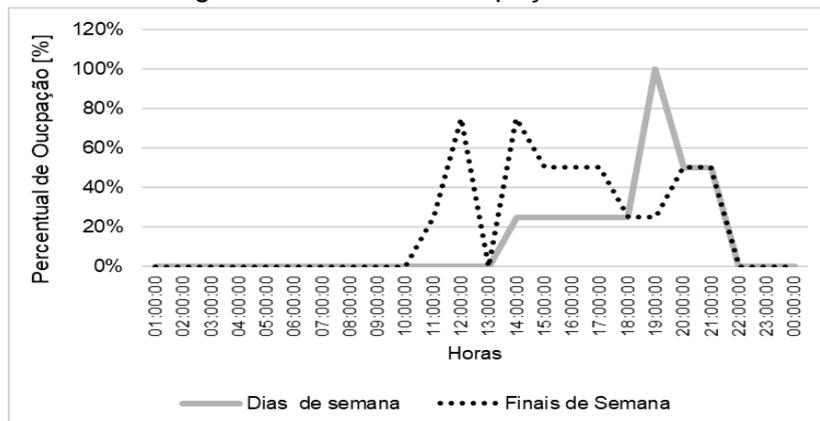
O padrão de ocupação dos dormitórios e da sala foi modelado para os dias de semana e para os finais de semana. Na Figura 7, observa-se o padrão de ocupação dos dormitórios e na Figura 8, o padrão de ocupação da sala. Esses padrões são similares aos padrões dispostos no RTQ-R (2012).

Figura 7- Padrão de ocupação dos dormitórios



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Figura 8 - Padrão de ocupação da sala



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Para a densidade de potência de iluminação (DPI), adotou-se o valor arbitrado pelo RTQ-R (2012), o qual é estipulado 5,0 (W/m<sup>2</sup>) para dormitório e 6,0 (W/m<sup>2</sup>) para a sala, seguindo a rotina de ocupação.

### 3.4.3 Dados de projeto

A temperatura de projeto do ambiente condicionado foi estabelecida conforme a Tabela 3 da ABNT NBR 16655-3 (2018), sendo aplicável a condição 1 para a localidade na qual a edificação de referência situa-se. Desta forma, considera-se o valor de temperatura de bulbo seco equivalente a 24 (°C) com uma umidade relativa de 50% a uma pressão atmosférica de 100,73 (kPa), umidade absoluta de 0,0094 (kgvapor/ kgar seco) a um volume específico de 0,860 (m<sup>3</sup>/kg) e entalpia de 47,92 (kJ/kg). Essas características foram definidas para a estação de verão, visto que esta seria a situação mais frequente no que tange a utilização dos condicionadores de ar. Os recintos adjacentes não condicionados analisados na edificação consistem nos corredores (área comum). Desde modo, considerou-se 3 (°C) a mais na temperatura de bulbo seco do ar externo para esses espaços. A parcela não controlada da infiltração do ar por frestas e ventilação externa ficou em função do valor mínimo recomendado pela norma ABNT NBR 16655-3 (2018), 3,6 (m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>).

A temperatura do solo foi tratada pela extensão SLAB, ferramenta acoplada ao ©EnergyPlus a partir de dados de pesquisa prévia (OLIVEIRA, 2019). Os valores corrigidos de temperatura do solo foram alterados no arquivo climático com o auxílio da ferramenta *Notepad ++*. Essas alterações foram necessárias, visto que a temperatura do solo afeta diretamente a temperatura da edificação, especialmente dos andares térreos. Ainda analisando a Tabela 15 presente no Apêndice A observou-se diferença entre a temperatura média presente no arquivo climático em relação ao tratamento realizado no “Slab”.

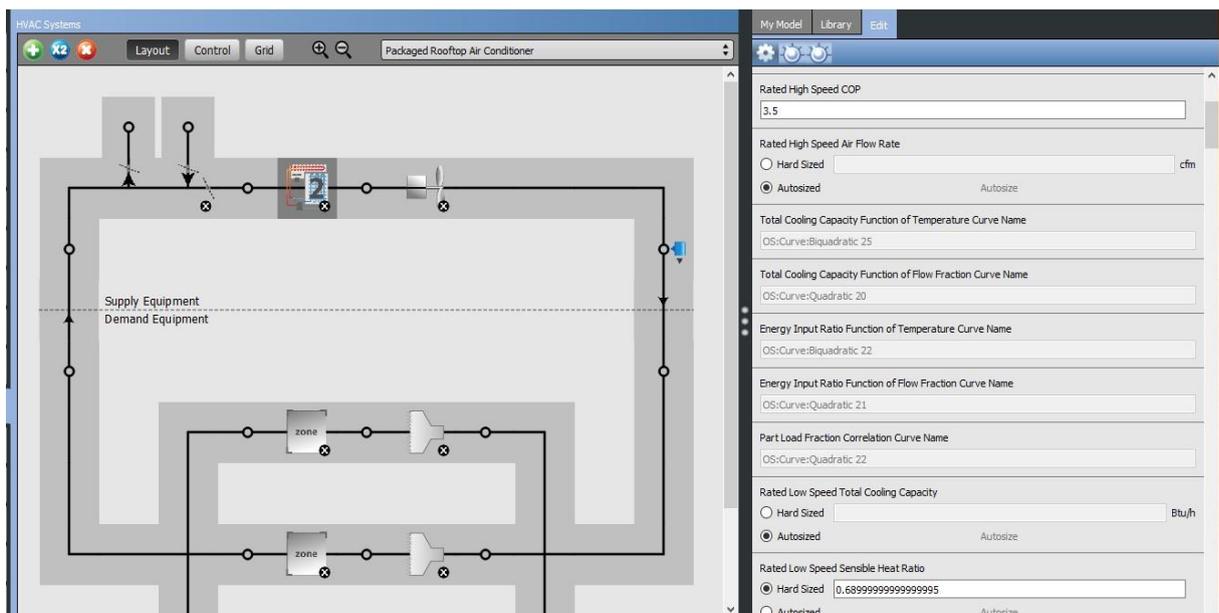
A carga térmica de aquecimento não foi estimada, visto que a necessidade por aquecimento em localidades de zona bioclimática 8 é desnecessária. Cada cômodo da habitação foi modelado como uma zona térmica específica, afim de se considerar todas as trocas térmicas possíveis. Os resultados foram tratados e somou-se as estimativas de cada cômodo até alcançar a estimativa térmica da habitação.

### 3.5 MODELAGEM DE CONDICIONADORES DE AR

Foi adotado como modelo de referência, um sistema condicionador de ar com aplicabilidade residencial para analisar o consumo de energia elétrica dos ambientes ao longo de um ano. Esse sistema caracteriza-se pela razão de eficiência energética (EER) equivalente a 3,5, ventiladores que possuem pressão estática total de 250 Pa, 70% de eficiência e 90% de eficiência do motor. A rotina utilizada na simulação para este sistema compreende o período das 21h às 08h. Para o presente trabalho utilizou-se dados disponibilizados pelos fabricantes dos equipamentos condicionadores de ar, tanto as curvas do *Split* fixo como o *Split Inverter*. Os dados estão presentes no Anexo A.

Para representar o *Split* Fixo utiliza-se o *Packaged Terminal Air Conditioner (PTAC)*, o qual é equipado com ventilador de volume de ar constante e resfriamento por expansão direta. Para este sistema houve alteração das curvas quadráticas e bi quadráticas. A representação do modelo *inverter* utilizou-se o *DX: Variable Refrigerant Flow*, sistema composto por serpentinas de expansão direta e compressores de velocidade variável. Para este sistema houve alteração das curvas lineares, quadráticas, cúbicas e bi quadráticas. Por meio da Figura 9, observa-se a modelagem feita no Open Studio para algumas zonas térmicas, atribuindo as curvas de desempenho ao equipamento.

Figura 9 – Configuração do *Split Inverter*



Fonte: Gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Para analisar a comparação do desempenho dos condicionadores de ar por meio do consumo de energia elétrica e do EER operando em apartamentos de uma HIS, foi necessário

modelar a edificação conforme a metodologia de simulação estabelecida no RTQ-R (2012). O cálculo do *EER* (Índice de Eficiência de Energia) obteve-se por meio da extração dos valores horários da taxa de resfriamento total (*total cooling rate*), expressa em *watts* e, a energia elétrica despendida no resfriamento (*cooling electric power*) também expressa em *watts*.

Para análise do consumo de energia elétrica dos condicionadores de ar nos apartamentos da Habitação de interesse social, foi necessário modelar os sistemas AVAC no software Open Studio utilizando a metodologia descrita no item 3.5 conforme os coeficientes de desempenho obtidos por fabricantes. O consumo total foi contabilizado pela somatória em cada hora de simulação e estimado mensalmente para as habitações analisadas. A rotina de uso e operação dos equipamentos foi equivalente para todas as habitações. Cabe relatar também que o consumo dos condicionadores de ar foi obtido pela subtração do consumo total de cada habitação simulada.

A análise das diferenças entre o consumo de energia elétrica do sistema do tipo *split* fixo e *inverter*, baseou-se na mesma rotina de uso e operação do modelo de referência, bem como a razão de eficiência energética, ou seja, 3,5. Os valores de desempenho das unidades internas e externas, os coeficientes das curvas de desempenho serão inseridos no programa ©EnergyPlus com o auxílio do Open Studio. Os termos COP (coeficiente de desempenho) e EER (razão de eficiência energética), representados pelas Equações (3.1) e (3.2) respectivamente descrevem a eficiência de aquecimento e resfriamento dos sistemas condicionadores de ar sendo definido como sendo a relação entre a capacidade de aquecimento ou refrigeração e a potência utilizada (Beyer, 2009).

$$COP = \frac{Q_{aquecimento}}{W_{con}} \quad (3.1)$$

$$EER = \frac{Q_{arrefecimento}}{W_{con}} \quad (3.2)$$

Em que  $Q_{aquecimento}$  é a capacidade aquecimento,  $Q_{arrefecimento}$ , é a capacidade de refrigeração e  $W_{con}$  é a potência elétrica utilizada.

A análise operacional do EER abordada entre os condicionadores das habitações do primeiro, terceiro e quinto pavimento, ocorreu por uma observação comparativa dos índices disponibilizados pelo INMETRO para avaliar se os equipamentos atenderiam a faixa de classificação "A" da ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia) conforme a estimativa de carga térmica para o dimensionamento dos equipamentos.

### 3.5.1 Simulação em velocidade fixa

Para simular equipamentos condicionadores de ar de velocidade fixa são utilizadas as seguintes curvas: CAPFT, EIRFR e PLF (*Part Load Fraction*), já definidas anteriormente. Essas são curvas bi quadráticas e seus coeficientes são inseridos manualmente no ©EnergyPlus. A ineficiência do compressor devido aos ciclos realizados é descrita pela fração de carga parcial (PLF) sendo descrito pela Equação (3.3) (LBNL, 2010):

$$PLF = 0,85 + 0,15 PLR \quad (3.3)$$

### 3.5.2 Simulação em velocidade variável

A simulação para condicionadores de ar com velocidade variável é similar a simulação de velocidade fixa, quando operam em condições de carga plena (*Full Load Condition*). Entretanto, para situações em que o condicionador de ar opera em condições de carga parcial (*Part Load Condition*) o comportamento do equipamento é descrito pelas Equações. (2.4), (2.5) e (2.6).

De acordo com Raustad (2012), os sistemas que operam em velocidade variável apresentam comportamentos atípicos quando submetidos a altas temperaturas externas em comparação com baixas temperaturas. Contudo, recomenda-se o emprego das curvas que descrevem essa anormalidade. As curvas recomendadas para sistemas com velocidade variável são:

- CAPFT *Boundary*: Curva limite da capacidade em função das temperaturas de operação;
- CAPFLowT: Capacidade em função das temperaturas de operação para baixas temperaturas de ambiente externo;
- CAPFHiT: Capacidade em função das temperaturas de operação para altas temperaturas de ambiente externo;
- EIRFT *Boundary*: Curva limite do EIR em função das temperaturas de operação;
- EIRLowT: EIR em função das temperaturas de operação para baixas temperaturas de ambiente externo;

- EIRFHIT: EIR em função das temperaturas de operação para altas temperaturas de ambiente externo.

Os coeficientes das curvas cúbicas EIRLowPLR, conforme Equação (2.5) e EIRHiPLR, conforme Eq. (2.6), devem ser inseridas no ©EnergyPlus para cada simulação.

No Apêndice D, encontram-se as etapas utilizadas na modelagem dos condicionadores de ar, split convencional e *inverter* e os modelos utilizados no Energy Plus.

### 3.6 ANÁLISE OPERACIONAL DE VIABILIDADE ECÔNOMICA

A análise de viabilidade econômica operacional do condicionador *inverter* se fundamenta no percentual da diferença do consumo operacional comparado entre os dois tipos de equipamentos. A Equação 3.4 representa o cálculo.

$$V_{EO} = C t_{operação} T_e R_e \quad (3.4)$$

Em que,

$V_{EO}$ = Valor de economia anual (R\$);

$C$ = Consumo do equipamento *split* convencional (kWh)

$t_{operação}$ = horas;

$T_e$ = Tarifa de energia elétrica cobrada pela concessionária da região (R\$/kWh);

$R_e$ = Percentual de redução do consumo operacional (%)

A tarifa de energia elétrica utilizada se fundamentou no valor real cobrado pela concessionária de energia elétrica da cidade do Rio de Janeiro. Considerou-se o valor de R\$ 0,69582 (R\$/kWh), já com os tributos do PIS<sup>5</sup>, CONFINS<sup>6</sup> e ICMS<sup>7</sup> da região. Considerou-se também a classe de consumo de até 220 kWh, visto que o maior valor de consumo operacional mensal foi equivalente a 213,08 kWh, considerando somente o consumo do sistema AVAC. No Apêndice E, pode ser observado mais valores para outras classes de consumo.

<sup>5</sup> Tributo Federal - Programa de Integração Social.

<sup>6</sup> Tributo Federal - Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social.

<sup>7</sup> Tributo Estadual - Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços.

## 4 RESULTADOS

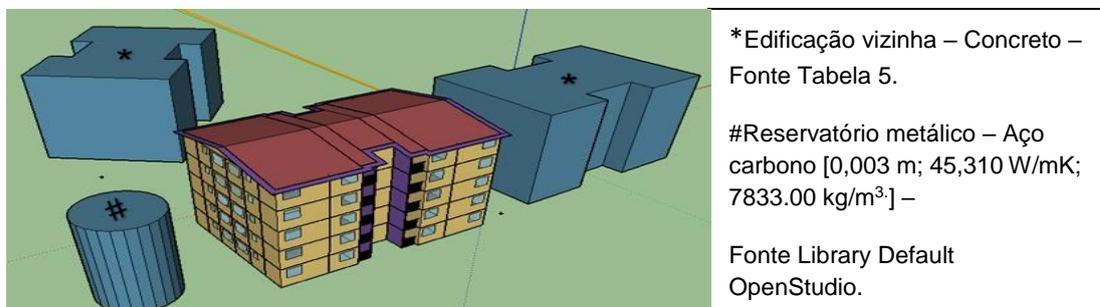
O entorno foi modelado como um elemento de sombra do tipo local, visto que são elementos fixos em relação a edificação modelada e foram caracterizados construtivamente, conforme pode ser observado na Figura 10 e na Figura 11. Esses elementos influenciam de forma significativa na troca térmica do conjunto habitacional.

Figura 10- Modelo Simulado



Fonte: Gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Figura 11 - Classificação elementos de sombra



Fonte: Gerado pelo o autor no ©Open Studio.

### 4.1 ESTIMATIVA DE CARGA TÉRMICA

Na Tabela 5 observa-se a estimativa térmica de todos os apartamentos que constitui a edificação em análise. Os apartamentos com fachadas voltadas para norte e oeste apresentaram maior carga térmica em relação aos demais apartamentos. Por outro lado, os apartamentos 102, 202, 302, 402 e 502 apresentaram a menor carga de resfriamento, devido às janelas estarem voltadas para a orientação sul e as paredes laterais para leste. Esse

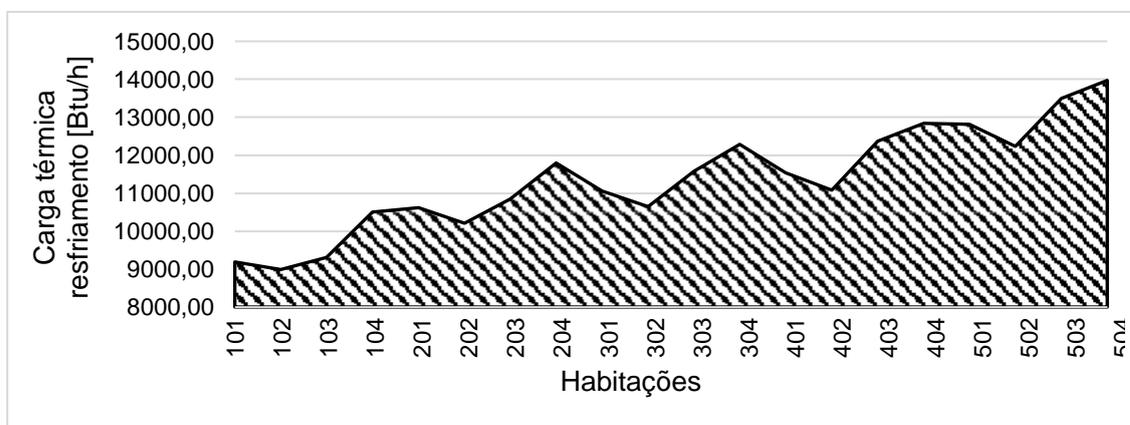
comportamento térmico decorre da baixa intensidade da radiação solar direta pelas janelas e pela incidência da radiação solar no período matutino. Entretanto, para os apartamentos 104, 204, 304, 404 e 504 a condição é completamente oposta, ou seja, janelas voltadas para a direção norte, recebendo forte incidência de radiação solar direta e superfícies laterais orientadas a oeste, presença intensa de radiação solar no período vespertino.

Tabela 5-Estimativa de carga térmica de resfriamento

Apartamento	Orientação Fachadas	kW	Btu/h	TBS (externa)
101	Norte/Leste	2,69	9193,81	33,58
102	Sul/Leste	2,63	8988,60	33,50
103	Sul/Oeste	2,73	9306,54	33,46
104	Norte/Oeste	3,08	10500,93	32,74
201	Norte/Leste	3,11	10613,94	32,31
202	Sul/Leste	2,99	10208,20	33,35
203	Sul/Oeste	3,18	10847,16	32,16
204	Norte/Oeste	3,46	11791,78	36,16
301	Norte/Leste	3,24	11055,74	33,46
302	Sul/Leste	3,12	10641,88	32,59
303	Sul/Oeste	3,39	11571,73	33,59
304	Norte/Oeste	3,60	12281,66	32,44
401	Norte/Leste	3,38	11533,58	33,58
402	Sul/Leste	3,25	11077,21	33,35
403	Sul/Oeste	3,62	12362,56	33,35
404	Norte/Oeste	3,76	12836,30	33,35
501	Norte/Leste	3,75	12809,41	33,55
502	Sul/Leste	3,59	12235,25	32,75
503	Sul/Oeste	3,95	13487,37	33,46
504	Norte/Oeste	4,09	13967,97	31,46

Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Figura 12- Influência da altura na estimativa térmica



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Identifica-se na Figura 12 a influência do posicionamento vertical dos apartamentos. Avaliando os apartamentos em relação a sua distância do nível térreo (cota 0 de projeto). Analisando essa influência por meio da Tabela 6, para a edificação na totalidade, verificou-se que o aumento de carga térmica, em média, foi equivalente a 7,71% ao passo que para os apartamentos localizados na segunda laje de piso (2,60m) o aumento foi de 12,58% e para aqueles posicionados na terceira (5,20m) e quarta laje de piso (7,80m) verificou-se um aumento de 16,60% e 20,64%, respectivamente. Observa-se ainda, na Tabela 6, que o maior aumento de carga térmica ocorre na transição para a altura de 10,80m, uma diferença percentual de cerca de 27,0% em relação aos apartamentos do primeiro pavimento. Essa condição é justificável devido à altura que pavimento se encontra, visto que a incidência da radiação solar é mais abrangente posicionamento geográfico.

Tabela 6-Influência da altura na carga térmica

Pavimento	Distância solo [m]	Carga térmica Total [kW]
1	0,00	11,13
2	2,60	12,74
3	5,20	13,35
4	7,80	14,01
5	10,80	15,39

Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

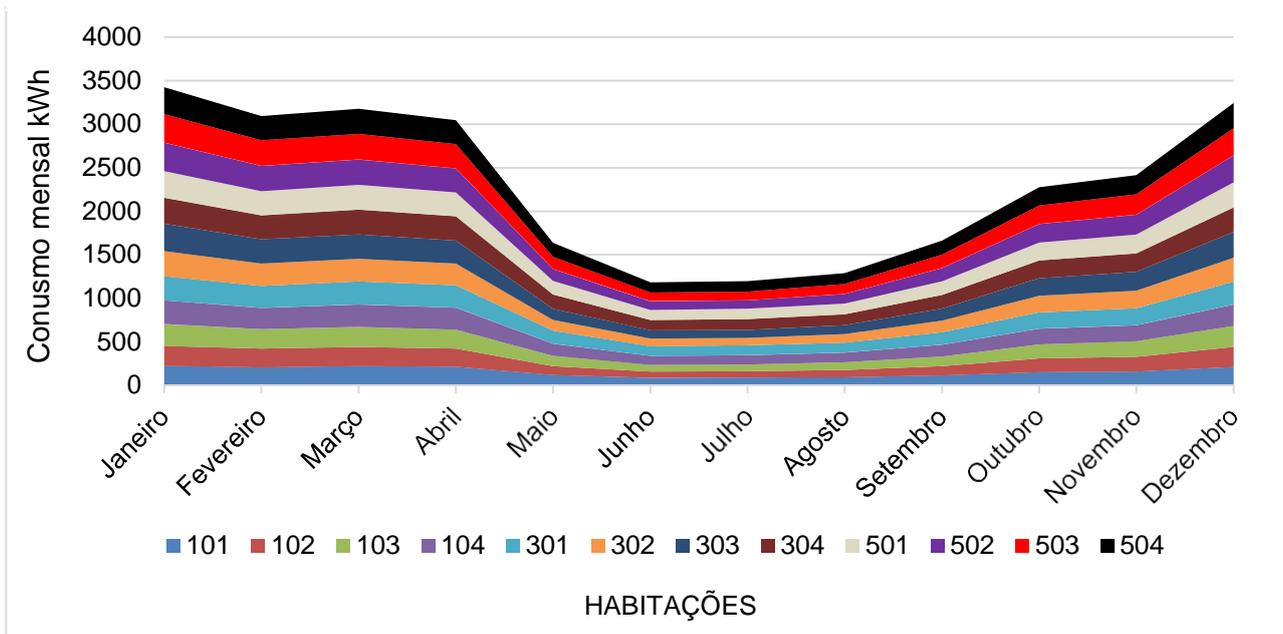
Os proximos resulttados foi considerado somente as habitações localizadas no primeiro, terceiro e quinto pavimento, dado que esses pavimentos se mostram mais representativos quando comparado o valor da diferença percentual de carga térmica, conforme observado na Tabela 6.

#### 4.2 SIMULAÇÃO CONSUMO OPERACIONAL DOS CONDICIONADORES DE AR

Observa-se por meio da Figura 13 o consumo de energia elétrica mensal dos condicionadores do tipo *Split* Fixo. Nota-se ainda um comportamento similar ao comportamento apresentado pela Figura 12, o maior consumo operacional dos equipamentos ocorre em habitações que possuem maior carga térmica. Por fim, observa-se também que os maiores consumos ocorrem nos meses de verão, momento que as temperaturas se mantiveram, em média, acima de 23,55°C ao longo do dia. O consumo dos equipamentos para o mês de janeiro totalizou 3424,21 kWh para as 12 habitações simuladas. O menor consumo ocorreu em junho, cerca de 1183,19 kWh.

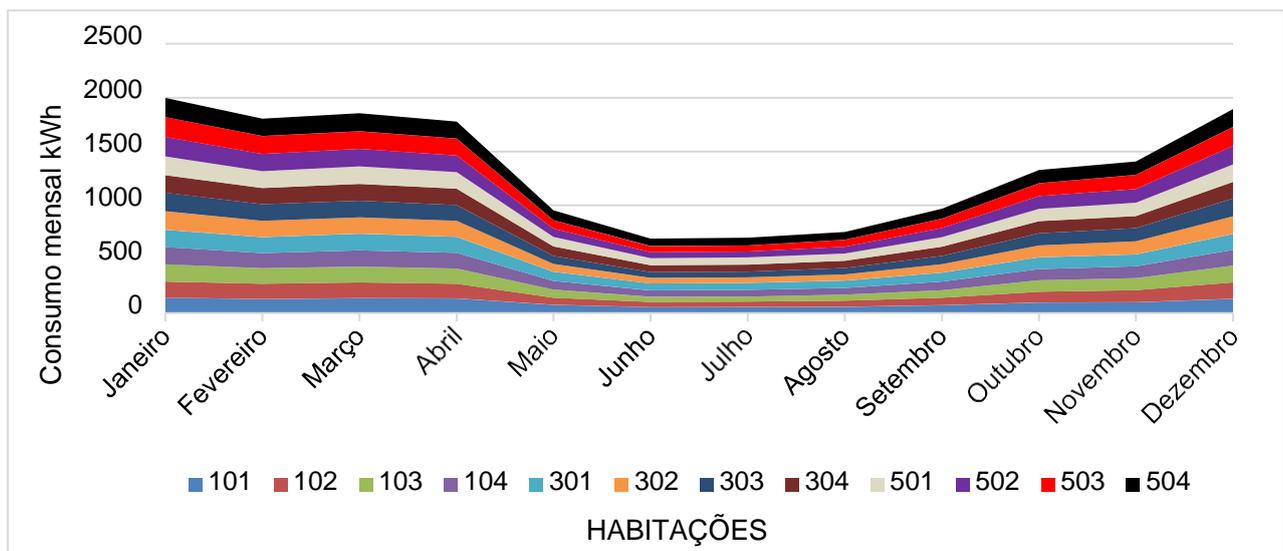
A mesma análise foi realizada para o condicionador do tipo Split *Inverter* e observou-se por meio da Figura 14 que o maior consumo de energia elétrica ainda é relativo as habitações que ofertam maior carga térmica. Nota-se ainda uma redução de energia elétrica considerável, cerca de 45,62% na habitação 304, sendo a maior redução registrada e 34,53% na habitação 102, caracterizando a menor redução observada. O consumo dos equipamentos para o mês de janeiro totalizou 1997,18 kWh para as 12 habitações simuladas. O menor consumo ocorreu em junho, cerca de 689,34 kWh.

Figura 13- Consumo operacional *Split* fixo



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

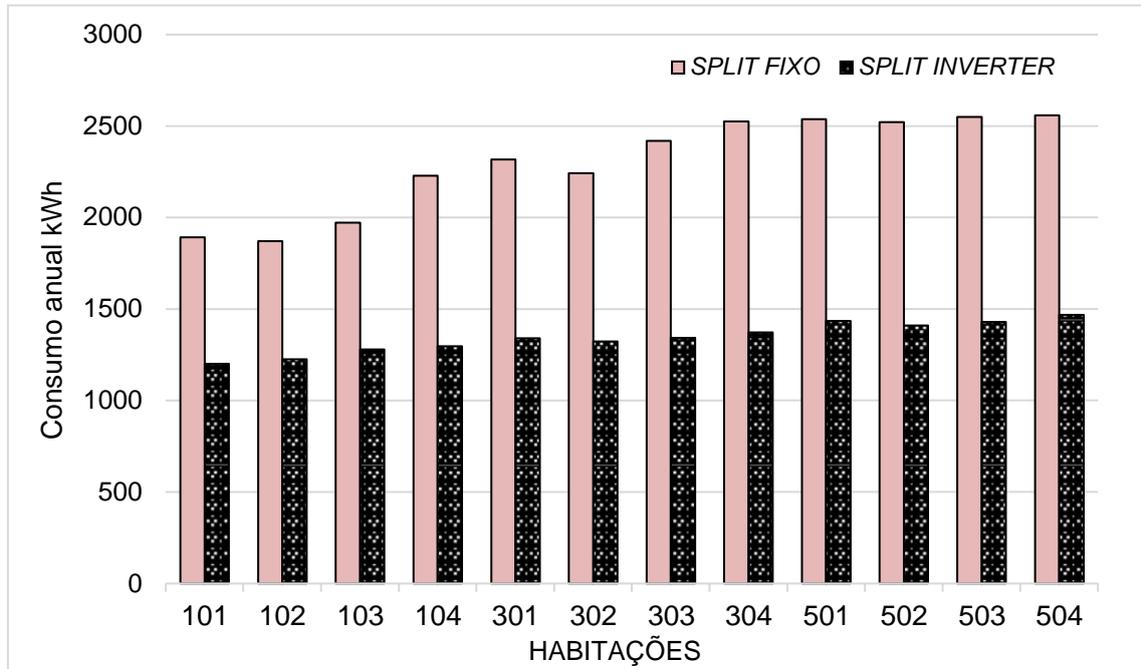
Figura 14-Consumo operacional *Split Inverter*



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Após realizar uma comparação mensal do consumo operacional dos equipamentos *Split* Fixo e *inverter* atentou-se em quantificar uma redução em média anual e observou-se uma redução 41,28% no consumo de energia elétrica, conforme abordado pela Figura 15

Figura 15-Consumo Anual condicionadores



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

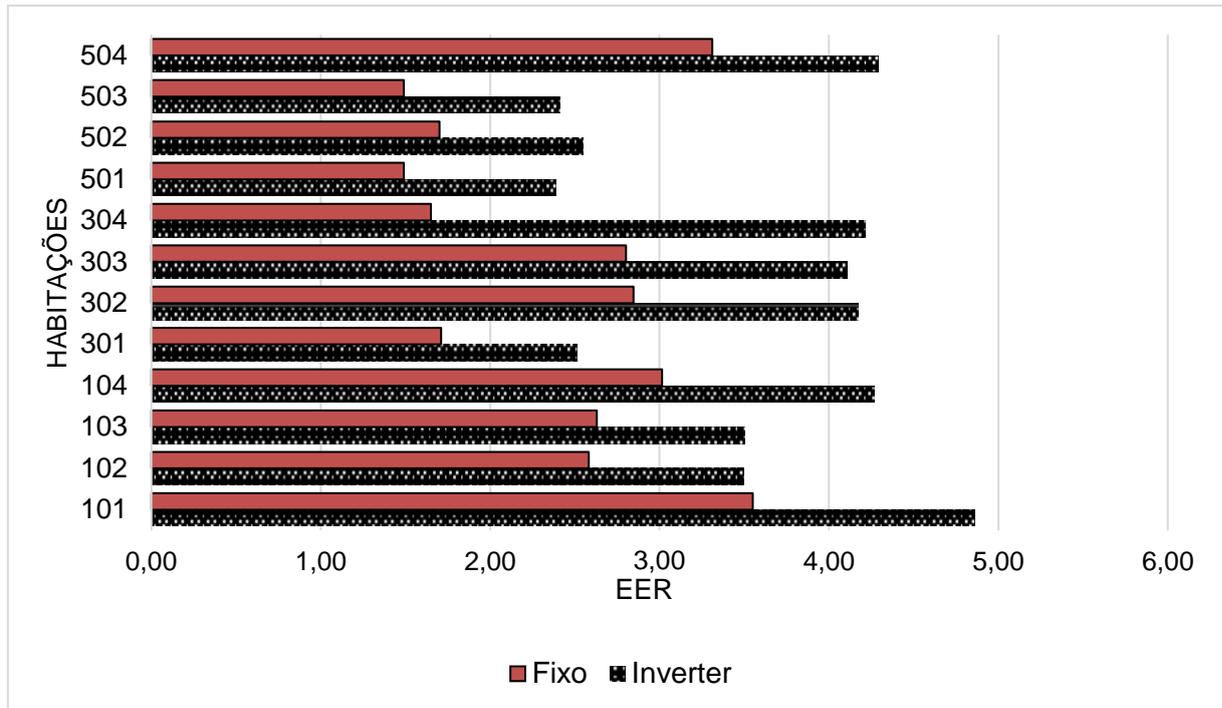
#### 4.3 SIMULAÇÃO EER

Contabilizando os dados de simulação, fazendo uma média anual e comparando, observa-se um aumento considerável nos índices de eficiência energética por parte dos equipamentos do tipo *inverter*, cerca em média de 25,22%.

O equipamento do tipo *Split* Fixo apresentou seu melhor rendimento nas habitações 101,104 e 504, sendo 3,55, 3,01 e 3,31 respectivamente. Observa-se que dentre às três habitações citadas, duas estão em contato com o solo e a habitação 504 está a 10,80 m do solo. Contudo, há de se considerar uma tendência de o melhor rendimento ocorrer quando há uma oferta maior de carga térmica, conforme ocorre para as habitações 104 e 504, mostrado na Figura 16. Contabilizando os dados de simulação para o condicionador do tipo *inverter* e fazendo uma média anual, observa-se que esse tipo de equipamento apresenta seu melhor rendimento em habitações que possuem a maior carga também, conforme ocorre para as habitações 101,104, 302, 303, 304 e 504, sendo 4,86, 4,27, 4,17, 4,11, 4,22 e 4,29

respectivamente, conforme mostrado na Figura 16. Entretanto, a habitação 101 não apresenta maior carga térmica ofertada dentre as habitações comparadas., conforme a estimado na Tabela 5, mas apresenta melhor rendimento, devido a variáveis climáticas.

Figura 16 - Comparação EER



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Na habitação 101 onde os equipamentos apresentaram maior índice de rendimento a diferença entre eles é cerca de 27%. Em contrapartida, na habitação 501 os equipamentos apresentaram menor índice de eficiência energética, cerca de 38%, conforme observado na Figura 16. A maior diferença do EER acontece na habitação 304, cerca de 61%.

#### 4.4 VARIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS CONDICIONADORES DE AR

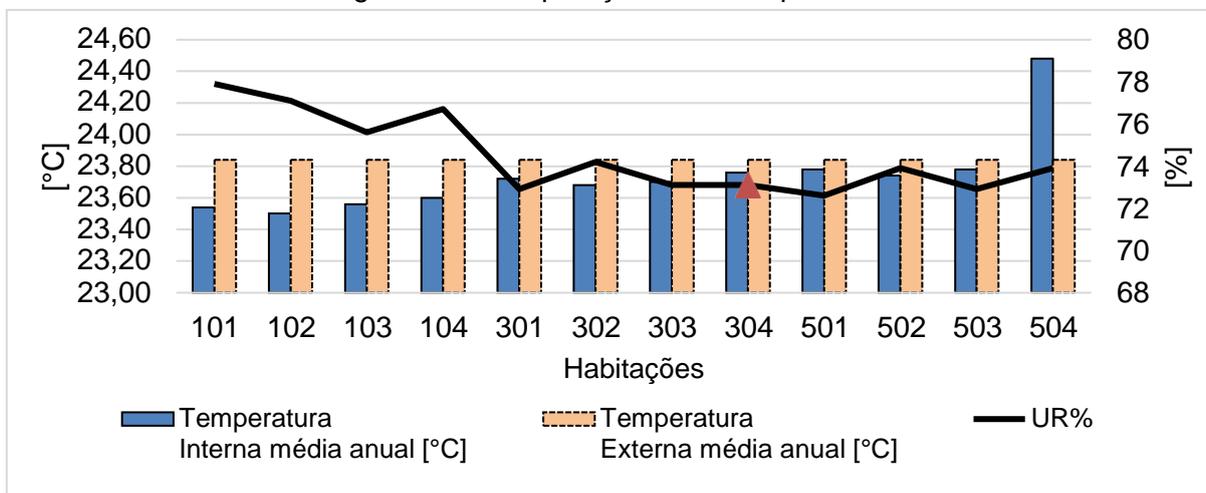
As variações de consumo operacional e desempenho observadas nos tópicos 4.2 e 4.3 são justificadas por serem inerentes ao comportamento térmico das habitações. Entretanto, há outros fatores que desencadeiam essas variações, visto que são equipamentos com condensação a ar e tem sua capacidade de refrigeração dependente principalmente da temperatura do ar ambiente e da vazão de ar pelo condensador, dado que a temperatura de condensação aumenta com o aumento da temperatura ambiente, a capacidade de

refrigeração diminui devido à redução da vazão de refrigerante, conforme abordado por Stoecker (2002). Ainda há de se considerar a influência da umidade relativa [UR] no desempenho desses sistemas, em situações de baixa umidade o rendimento dos sistemas pode apresentar uma queda de até 75%, conforme testes experimentais realizados por Sobrinho e Tuna (2013).

A umidade relativa (UR) favorece a transferência de calor entre o ambiente e a serpentina da evaporadora e, conseqüentemente, favorece o desempenho do equipamento. Entretanto, o contato do ar externo com o ar interno modifica o valor da UR. Essa alteração termodinâmica afeta a operacionalidade dos condicionadores de ar. Nos resultados obtidos por Sobrinho e Tuna (2013) identificou-se que o desempenho de condicionadores de ar não sofre grandes alterações quando a UR varia entre (40 a 65%), fora desse intervalo o rendimento do sistema pode ser comprometido de forma significativa. Entretanto, não se pode afirmar que UR externa é única influência que altera o comportamento do aparelho. No caso descrito, o experimento realizado teve a limitação de operar com UR interna e externa idênticas, pois a condensadora e a evaporadora foram ensaiadas no mesmo ambiente. Contudo, não é possível afirmar a influência da temperatura, visto que a UR não teve seu valor fixado.

Considerando a variação de temperatura, para a cidade do Rio de Janeiro em fevereiro são alcançadas as temperaturas externas mais altas, que variam entre 27°C a 20,1°C, considerando a média mensal. Neste sentido, observou-se que quando se fixa o valor de UR, tem-se a menor temperatura bem como a maior a capacidade dos condicionadores de ar. Em contrapartida, quando se fixa o valor de temperatura, maior é o valor de UR e maior também é o desempenho dos equipamentos.

Figura 17 - Comparação UR e temperatura



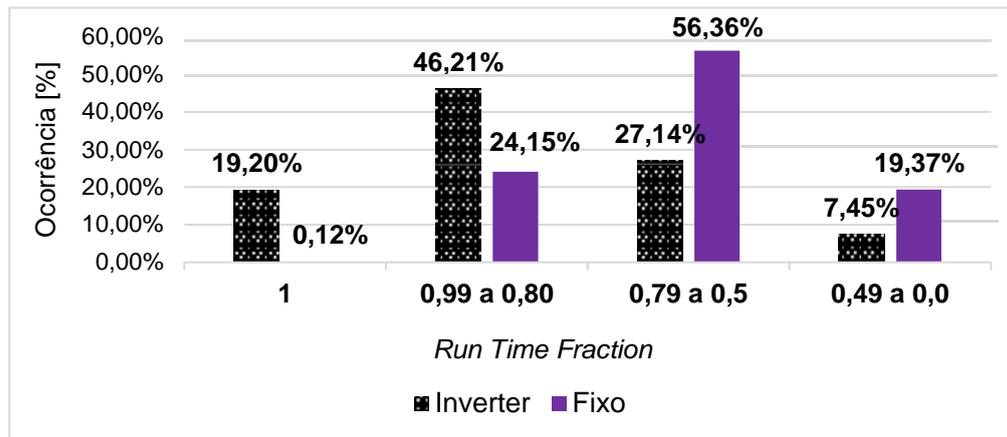
Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Por meio da Figura 17 observa-se a relação inversa significativa entre UR e temperatura para as habitações 101, 104 e 504. Essa relação proporciona melhor rendimento aos condicionadores de ar, conforme foi abordado na Figura 16. Observa-se ainda na Figura 17 que as menores médias anuais de temperaturas são das habitações do primeiro pavimento e as maiores médias pertencem às habitações do quinto pavimento devido às condições de exposição e trocas térmicas de cada uma destas unidades.

Fundamentando-se no teste experimental realizado por Sobrinho e Tuna (2013) e analisando a Figura 17, observou-se que todas as habitações apresentam UR interna superior ao intervalo levantado por Sobrinho e Tuna (2013), 40 a 65%. Em grandes partes dos processos de resfriamento, a temperatura do ponto de orvalho do ar que adentra o ambiente está acima da temperatura da superfície da serpentina de resfriamento. Dessa forma, o vapor de água presente na massa de ar que adentrou o ambiente é condensado. Aparentemente a presença de condensado proporciona o aumento de transferência de calor latente do ar para a serpentina da evaporadora do equipamento. Assim, verifica-se que os coeficientes de transferência de calor aumentam com o aumento da umidade relativa apontando que a transferência de calor latente é uma parcela muito significativa em condições de desumidificação. Em geral, o consumo de energia de condicionamento diminui com o aumento da umidade média do ar (BOURABAA et al, 2011; WANG et al, 1999).

Além do comportamento térmico das habitações e do fator climático apresentarem forte influência na operacionalidade dos condicionadores de ar, a característica de regular a rotação do compressor também afeta diretamente no comportamento desses sistemas. Por meio da variável *Run Time Fraction* (RTF) avaliou-se o percentual do tempo que o sistema realmente esteve em operação para atender a demanda de carga térmica disposta na habitação 304. Para valor de RTF equivalente a 1, o sistema está em carga nominal e não apresenta perdas em função de ociosidade. Por meio do Histograma apresentada pela Figura 18, observa-se que o condicionador do tipo *inverter* alcança o valor 1 com maior ocorrência, ou seja, o compressor se adapta mais frequentemente para operar a carga nominal demanda pelo ambiente, visto que trabalha em carga parcial. Em contrapartida, o condicionador do tipo fixo tem somente 0,12% de ocorrência, conseqüentemente, ocorre uma ciclagem maior nesse tipo de equipamento. Optou-se por analisar o RTF somente na Habitação 304, visto que foi a maior diferença no EER abordada.

Figura 18 - Histograma RTF

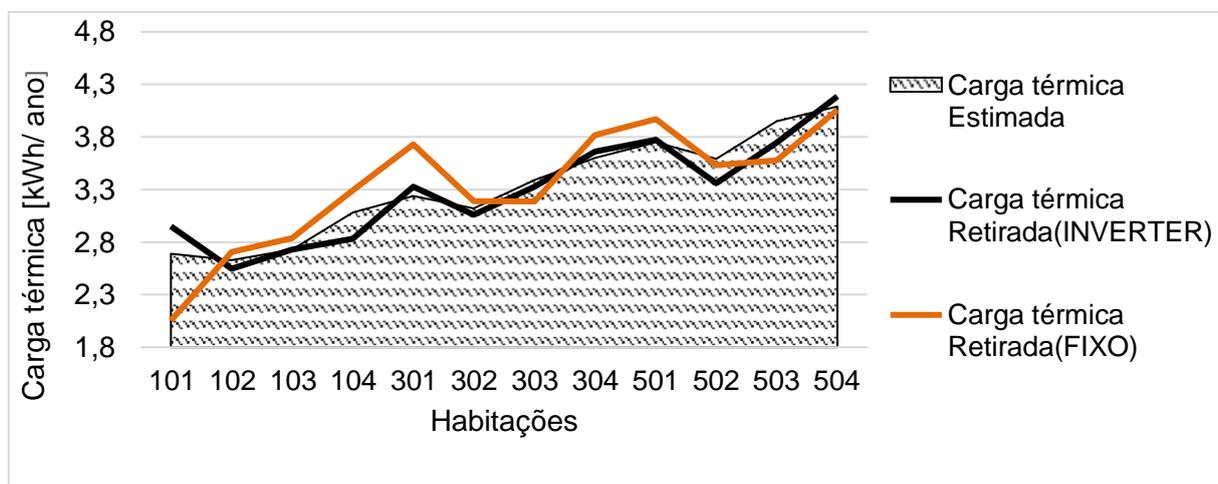


Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Compressores e condensadores tem sua concepção fundamentada em atender a capacidade máxima necessária (PEREIRA et al., 2017). Contudo, em quase 95% do tempo o sistema está operando com carga reduzida e os compressores de velocidade fixa cicla para tentar alcançar a carga, conseqüentemente, o consumo de energia é maior que o necessário.

De forma complementar, buscou-se também avaliar anualmente o comportamento dos condicionadores de ar por meio da carga térmica retirada dos ambientes simulados. O valor de carga térmica retirada foi obtida por meio da Equação 3.2, visto que, o valor de consumo operacional mensal foi estimado por simulação. Por meio da Figura 19 observa-se que o perfil de operação do condicionador do tipo inverter tende ao perfil de estimativa de carga térmica simulada, ou seja, nota-se um comportamento operacional mais preciso, quando comparado ao comportamento operacional do condicionador de ar do tipo fixo. Essa observação também foi abordada por Marangoni et al (2015) em seu trabalho

Figura 19 - Perfis de operação de condicionadores de ar (Split fixo e inverter)



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

Em geral, contudo que foi esplando e comparado, o equipamento *split* inverter apresentam resultados melhores que o *split* fixo, no que tange a ter um gasto operacional menor e conseqüentemente um melhor desempenho. Cabe ressaltar que essa análise comparativa, utilizou-se de cenários hipotéticos para a obtenção dos resultados. A aplicação dessa análise comparativa ocorreu para uma edificação de interesse social.

#### 4.5 ANÁLISE EER EM RELAÇÃO AOS ÍNDICES IDRS

Por meio da Tabela 7, nota-se que todos os equipamentos do tipo *inverter* atenderiam satisfatoriamente aos limites mínimos do coeficiente de eficiência energética ainda praticado (CCE), conforme dispõe a Portaria Interministerial nº 364, de 24 de dezembro de 2007. Contudo, se comparamos os mesmos índices extraídos da simulação em relação aos novos índices propostos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), nota-se em média um potencial de melhora de até 35.19% do coeficiente de eficiência energética, ou seja, maior economia de energia elétrica com o novo índice proposto (IDRS).

Tabela 7- Comparação EER

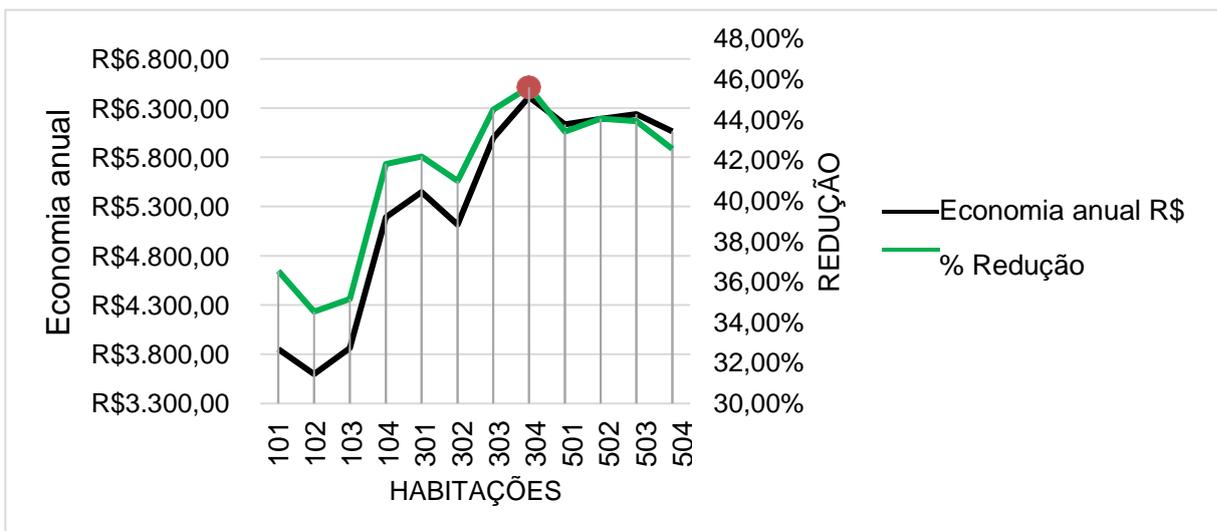
Habitação	Orientação Fachadas	Carga térmica [Btu/h]	EER inverter	CCE 3.23	IDRS* 5.5
101	Norte/Leste	9193,81	4,86	150%	88%
102	Sul/Leste	8988,6	3,50	108%	64%
103	Sul/Oeste	9306,54	3,50	108%	64%
104	Norte/Oeste	10500,9	4,27	132%	78%
301	Norte/Leste	11055,7	2,51	78%	46%
302	Sul/Leste	10641,9	4,17	129%	76%
303	Sul/Oeste	11571,7	4,11	127%	75%
304	Norte/Oeste	12281,7	4,22	131%	77%
501	Norte/Leste	12809,4	2,39	74%	43%
502	Sul/Leste	12235,3	2,55	79%	46%
503	Sul/Oeste	13487,4	2,41	75%	44%
504	Norte/Oeste	13968	4,29	133%	78%

\*Índice de desempenho de resfriamento sazonal / Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

#### 4.6 VIABILIDADE ECONÔMICA OPERACIONAL DE UM CONDICIONADOR DE AR SPLIT INVERTER

Por meio da Equação 3.10 descrito no subcapítulo 3.6 da metodologia, com os valores de consumo operacional obtidos por simulação termo energética, foi possível avaliar por habitação a economia anual e o percentual de redução do consumo de energia elétrica, quando os equipamentos são comparados, essa análise se passa em um cenário hipotético. Observa-se por meio da Figura 20 que para todas as habitações o valor de economia anual é superior a R\$ 3.300,00. A habitação que registrou a maior economia e também o maior percentual de redução com a operação do sistema inverter foi a habitação 304, onde ocorreu a maior diferença do EER, conforme a Figura 16. Cabe ressaltar que a análise compreende somente o custo operacional do sistema *inverter* em relação ao sistema *split* fixo (convencional).

Figura 20 - Viabilidade operacional dos condicionadores de ar



Fonte: Gerado pelo o autor no Excel.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa fundamentou-se em uma análise comparativa de desempenho operacional considerando a tipologia de condicionadores de ar, split fixo e inverter, aplicados em habitações de interesse social, localizada na cidade do Rio de Janeiro. Para a comparação utilizaram-se simulações termo energéticas, atribuindo aos softwares coeficientes de desempenho dos condicionadores de ar, objeto do presente estudo. Assim, com base em uma edificação existente elaborou-se um modelo de referência desta edificação, a partir da consideração do levantamento geográfico, fotográfico, características de materiais construtivos e perfis de uso e ocupação respaldados pela pesquisa de Oliveira (2019) e pelo RTQ-R (2012) respectivamente.

Neste contexto, o desempenho dos condicionadores de ar foi comparado ao longo de um ano por meio do consumo operacional e pelo EER. Os resultados obtidos por simulações termo energéticas apontaram diferentes perfis de consumo, considerando o mesmo equipamento para diferentes habitações, ocorrência essa apresentada pelo *split* fixo e inverter. Em virtude dessa variação foi avaliado a influência da umidade relativa e da temperatura do ar no rendimento dos sistemas, visto que na literatura, para sistemas de condicionamento de ar, ambos os itens são relevantes. Neste sentido, observou-se que, para a presente pesquisa, o rendimento do sistema tende a ser maior quando a UR e a temperatura da zona térmica são inversas e menor, quando a temperatura de ar externo é mais elevada. Desta forma, foi possível qualificar a influência destas variáveis climáticas no desempenho e, conseqüentemente, no consumo operacional dos condicionadores de ar.

Com base nos resultados obtidos também foi possível notar cerca de 41% de redução média anual no consumo de energia elétrica, considerando 8760 horas simuladas, quando o condicionador do tipo *split inverter* está operando. A habitação 304 localizada no terceiro pavimento com fachadas voltadas para norte e oeste, apresentou o maior percentual de redução no consumo operacional, cerca de 45%. A combinação das propriedades termodinâmicas temperatura de bulbo seco e umidade relativa proporcionaram a habitação 304 um valor de temperatura de ponto de orvalho inferior à temperatura de bulbo úmido, conseqüentemente houve maior parcela de condensado. A presença de condensado proporciona o aumento de transferência de calor latente do ar para a serpentina da evaporadora do equipamento. Assim, verifica-se que os coeficientes de transferência de calor aumentam com o aumento da umidade relativa. Contudo, o consumo de energia de condicionamento diminui com o aumento da umidade média do ar. Complementarmente,

avaliou-se o “Índice de Eficiência energética” por meio da taxa de resfriamento total (*total cooling rate*, em watts), e pela energia elétrica despendida no resfriamento (*cooling electric power*, em watts). Em geral, a utilização da tecnologia *inverter* possibilitaria um aprimoramento na eficiência energética em cerca de 110%, na média geral.

O uso de condicionadores do tipo *inverter* nas habitações objeto da presente pesquisa se mostrou promissor do ponto de vista da redução do consumo de energia elétrica, considerando os níveis de eficiência energéticas vigentes, pois em todas as habitações os equipamentos receberiam ENCE “A”. Entretanto, considerando os novos níveis a serem aplicados pelo INMETRO por meio da Portaria n.º234, esses mesmos equipamentos sofreriam uma reclassificação, não sendo mais considerados com selo “A”, visto que, os índices simulados apresentam uma defasagem média geral de 35,12%.

Com a pesquisa, foi possível identificar a relevância na utilização equipamentos *inverters*, reduzindo o consumo de energia elétrica e assegurando o ganho da eficiência energética para as condições simuladas. Em todas as habitações avaliadas foram apresentados ganhos superiores a 30 % de economia de energia elétrica. Os valores indicam que habitações com variação diária de temperaturas mais elevadas como ocorre em algumas unidades com um grau de exposição mais crítico (apartamentos de cobertura ou voltados para a fachada norte, oeste), garantem um maior ganho com a utilização dos aparelhos com tecnologia *inverter*, visto que as ciclagens realizadas são menores quando comparadas aos aparelhos fixos. Expresso pelo valor RTF, identifica-se que o aparelho com rotação fixa apresenta valor unitário em menos de 0,12% do tempo total de operação do aparelho para habitação 102 tomada como exemplo, ou seja, opera sempre abaixo da sua carga nominal para atender a oferta de carga térmica disposta no ambiente.

Por fim, torna-se cada vez mais relevante o entendimento e aplicação de simulações termo energéticas na fase de pré-projeto à *retrofits*, visto que é possível prever cenários de desempenho operacional para condições específicas climáticas e de projetos, além de apresentar alternativas para as escolhas mais coerentes para a tomada de decisão priorizando assim o ganho de eficiência energética. Essas escolhas conseguem minimizar o consumo de energia elétrica, despendida por condicionadores de ar e tornar acessível hipoteticamente a utilização de equipamentos mais eficientes as classes menos favorecidas, visto que o consumo operacional seria em média 41,29% menor e o valor de economia de energia seria superior a R\$ 3 000,00, considerando um ano de consumo.

## 5.1 SUGESTÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE NOVOS TRABALHOS

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos propõe-se avaliar os impactos energéticos atribuído a nova Portaria n.º 234, de 29 de junho de 2020 que trata do Aperfeiçoamento parcial dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Condicionadores de Ar, estabelecendo o Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS). Pode-se avaliar também o impacto desses índices em cada zona bioclimática brasileira, visto que o índice proposto é padronizado para todas as regiões.

Avaliar o custo de manutenção preventiva e corretiva em relação a economia anual dos condicionadores do tipo *split inverter*.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401** - Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais -Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 11215** - Equipamentos unitários de ar-condicionado e bomba de calor - Determinação da capacidade de resfriamento e aquecimento. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 16655** - Instalação de sistemas residenciais de ar-condicionado - Split e compacto. Rio de Janeiro, 2018.

ABRAINCO.-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS. Análise das Necessidades Habitacionais e suas Tendências para os Próximos Dez Anos. **Fundação Getúlio Vargas**, 2018.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução nº 9, de 16 de janeiro de 2003. **Orientação Técnica Elaborada Por Grupo Técnico Assessor Sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo**. Disponível em:

[https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2003/rdc0009\\_16\\_01\\_2003.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2003/rdc0009_16_01_2003.html). Acesso em: 21 maio 2021.

AMORIM, RAFAEL P. L, LEDER, SOLANGE M, GONZÁLEZ-CRUZ, E. Avaliação do potencial de resfriamento evaporativo indireto no clima quente e úmido e semi- árido. In: ENCAC - XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído.Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais, n. 2009, p. 10. a 2020. **Anais...** João Pessoa: ANTAC, set. 2019.

AZEVEDO, S., ANDRADE, LAG. Bibliografia. In: Habitação e poder: da Fundação da Casa Popular ao Banco Nacional Habitação [online]. Rio de Janeiro: **Centro Edelstein de Pesquisas Sociais**, 2011, pp. 111-116. ISBN: 978-85-7982-055-7.

BAJENARU, Nicolae; DAMIAN, Andrei; FRUNZULICA, Rodica. Evaluation of the energy performance for an NZEB office building under specific climatic conditions. **Sustainable Solutions for Energy and Environment**, Bucharest, n. 85, p.26-34, 20 Nov. 2015.

BAVARESCO, M. V., Cuchivague, H. Y. O., Schinazi, A., & Ghisi, E. (2020). Aspectos

impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, 21, 263-292.

BEYER, P. O.; “**Apostila de Aquecimento Ambiental**”, Departamento de Engenharia Mecânica (DMEC), UFRGS, 2009

BIROL, F. The future of cooling: opportunities for energy-efficient air conditioning. **International Energy Agency**, (www.iea.org) OECD/IEA (2018)

BRACKNEY, L., Parker, A., Macumber, D., & Benne, K. (2018). **Building energy modeling with OpenStudio**. New York: Springer International Publishing.

BRASIL. Ministério das Cidades/Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Pesquisa de satisfação dos beneficiários do Programa Minha Casa Minha Vida/editado por Fernando Garcia de Freitas e Érica Negreiros de Camargo – Brasília, DF: MCIDADES; SNH; SAE-PR; IPEA, 2014.

BOURABAA, A., SAIGHI, M., BELAL, I. The influence of the inlet conditions on the air side heat transfer performance of plain finned evaporator. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 59 (2011).

CELLA, A. M.; SILVEIRA, V. C.; WESTPHAL, F. S. Avaliação do Efeito da Variação do Padrão de Uso no Consumo de Ar Condicionado em Edifícios de Escritório. **In: XVIII Econtro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 8, 2020. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, set. 2017.

CHUA, K. J.; CHOU, S. K. Energy performance of residential buildings in Singapore. **Energy**, v. 35, n. 2, p. 667–678, 2010.

CLASP – Collaborative Labeling & Appliance Standards Program. Cooling Benchmarking Study Report. Washington: CLASP, 2011. Disponível em: <<http://clasponline.org/Resources/Resources/StandardsLabelingResourceLibrary/2012/CoolingBenchmarking-Study#files>> Acesso em: 14 Dez. 2021.

CHONG, Adrian; GU, Yaonan; JIA, Hongyuan. Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. **Energy and Buildings**, v. 253, p. 111533, 2021.

DAIKIN. **Low-Impact Products**. Disponível em:<<http://www.daikin.com/csr/environment/production/index.html>>. Acesso em 04 de fevereiro de 2022.

D’OTTAVIANO, C. Política habitacional no Brasil e Programa de Locação Social paulistano.

**Caderno CRH**, v. 27, n. 71, p. 255–266, ago. 2014.

D'AMICO, F.. O Programa Minha Casa, Minha Vida e a Caixa Econômica Federal. En Universidad Caixa & Centro Internacional Celso Furtado de políticas para el desarrollo (Ed.), *O desenvolvimento econômico brasileiro e a Caixa: Trabalhos premiados* (pp. 33-54). Rio de Janeiro: Centro Internacional Celso Furtado de políticas para el desarrollo. 2011

DAVIS, L. et al. Air conditioning and global inequality. **Global Environmental Change**, v. 69, n. July 2020, p. 102299, 2021.

DOSSAT, R.J., Princípios de Refrigeração, São Paulo: Emus, 2004, 896 p.

ELETROBRÁS (Brasil). PPH. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial**, [S. l.], p. 1-48, 20 nov. 2019. Disponível em: [https://eletrobras.com/pt/SiteAssets/Paginas/PPH-019/RESUMO\\_EXECUTIVO\\_BRASIL\\_BR.pdf](https://eletrobras.com/pt/SiteAssets/Paginas/PPH-019/RESUMO_EXECUTIVO_BRASIL_BR.pdf). Acesso em: 21 abr. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019)**. Série Estudos da Demanda – Nota Técnica DEA 14/10. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. BEN. **Relatório Síntese Balanço Energético Nacional Relatório Síntese - Empresa de Pesquisa Energética - Balanço nacional de energia**Balanço nacional de energia. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

EPE. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro**: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota Técnica EPE 030/2018. Ministério de Minas e Energia, p. 43, 2018.

IEA – International Energy Agency. 25 **Energy Efficiency Policy** – Recommendations – 2011 Update. OECD/IEA, 2011.

JARDIM, T.; RAUL, J. PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 2, DE 31 DE JULHO DE 2018. **Diário oficial da União - Portaria Interministerial nº 14**, p. 7042, 2018.

KÖCHE, José Carlos. O fluxograma da pesquisa científica. In: JOSÉ CARLOS, Köche. Fundamentos de metodologia científica: Teoria da ciência e iniciação à pesquisa. 1. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2011. cap. 5, p. 1-48. ISBN Petrópolis, RJ.

LAGO T G, Silva do et al. Estudo Experimental de Um Sistema de Refrigeração com Compressor de Velocidade Variável e Válvula de Expansão Eletrônica. Mercofrio **Congresso**

**Internacional de Ar Condicionado**, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação, 2016.

LBNL - LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **EnergyPlus Engineering Reference** – The Reference to EnergyPlus Calculations, US Department Of Energy, Version 5.0, USA, 2010.

Leite, E. F. W., Garcia, J., Henning, E., & Hackenberg, A. M. (2020). ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS CLIMÁTICOS DAS CIDADES DE JOINVILLE/SC E NITERÓI/RJ. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 9, 207-223.

LOGSDON, L. **O Programa Minha Casa, Minha Vida em Cuiabá-MT: Uma Análise da Qualidade dos Projetos Destinados às Famílias de Baixa Renda**. 2012. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (POSARQ).

MARANGONI, F., Tellini, T., Moreno, R. P. R., Ferreira, S. D. O., & KONOPATPZKI, E. (2015). Comparativo econômico entre condicionadores de ar com tecnologias convencional e inverter. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 35.

MASCARÓ, J. L., MASCARÓ, L. E., Storchi, C., CAMARGO, E., MACIEL, Â., GUTERRES, H., & FRANARIN, A. (1992). Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios. Porto Alegre: Sagra: DC Luzzatto.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Plano Nacional de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em: 02 Mar. 2021.

NAGALI, A. Comparativo técnico e econômico entre obras comerciais com características sustentáveis e convencionais. In: Revista **Téchne**. Ed.: 179. 20 de fevereiro de 2012, p.60-78.

NEVES, L. DE O.; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 177–192, 2012.

OLIVEIRA, F. M. D. **Impacto da adoção de estratégias bioclimáticas na eficiência energética de edificações residenciais condicionadas**. 2019. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Centro Federal de Educação

Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

PAIVA, M A et al. Modelagem e simulação numérica de condicionadores de ar do tipo split inverter e on-off para avaliação de desempenho energético. **Abrava**, p. 28–34, fev. 2021. ISSN 2358-8926.

PEREIRA, B. E. A. et al. Método Aplicado vs. Direto: dimensionamento de um sistema de distribuição de ar para instalações HVAC. **Scientia Plena**, v. 13, n. 6, p. 1–16, 2017.

PEREIRA, C. D.; LAMBERTS, R.; GHISI, E. Nota técnica referente aos níveis mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar no Brasil. 2013.

<http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/pereira24.pdf>. Acesso em 27 Nov 2021, São Paulo.

RANGEL, M S. **Análise do Consumo e Qualidade de Energia em Condicionadores de Ar Convencional e Inverter**. 2020. TCC – Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara. Disponível em: <http://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/630>

SOBRINHO, P. M., TUNA, E. C. Experimental research on the influence of the air humidity conditions in an air conditioning system. **Experimental Thermal and Fluid Science**. 49, 152–159 (2013).

SOUZA, Edson Palhares de; CARDOSO, Rafael Balbino; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Energy efficiency and energy saving air conditioners window and split type; Eficiência energética e economia de energia de condicionadores de ar tipo janela e split. 2010.

SAMSUNG. **Recurso Smart Inverter**. Disponível em:

<<http://www.samsung.com/br/consumer/home-appliances/air-conditioners/inverter/ASV09PSBTXAZ>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2022.

SCHELLER, C. et al. Análise de arquivos climáticos para a simulação do desempenho energético de edificações. **Arquivos climáticos**, v. 5, n. 3.1, p. 1, 2018.

SCHELLER, C. et al Análise de Arquivos Climáticos Para a Simulação do Desempenho Energético de Edificações Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. 2015. Relatório técnico.

SHAH, N. et al. Opportunities for Simultaneous Efficiency Improvement and Refrigerant Transition in Air Conditioning. **Lawrence Berkeley National Lab**, n. July, p. 18, 2017.

SUN, J.; LI, Z.; XIAO, F. Analysis of Typical Meteorological Year selection for energy simulation of building with daylight utilization. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 3080–3087, 2017.

TREPCI, E.; MAGHELAL, P.; AZAR, E. Urban built context as a passive cooling strategy for buildings in hot climate. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110606, 2021.

Westphal, F.S. and Lamberts, R. . Building simulation calibration using sensitivity analysis. In IBPSA: Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association Conference, Montréal, Canada, pages 1331–1338, 2005.

WANG, Chi-chuan; LIN, Yur-tsai; LEE, Chi-juan. Heat and momentum transfer for compact louvered fin- and-tube heat exchangers in wet conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Taiwan, v. 2000, n. 43, p.3443-3452, 31 maio 1999.

ZHANG, Y., Cheng, R., Long, E., Wang, X.: Climatic cooling potential evaluation and ventilation strategies optimization for city buildings in China. In: 16th IEEE International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), pp. 692–696 (2019)

## ANEXO A

Quadro 1- Configuração *Input*

Nome	AVAC
Agenda operacional	Rotina_temperatura
Suprimento fluxo de ar operação arrefecimento	Auto dimensionando [m <sup>3</sup> /s]
Suprimento fluxo de ar operação aquecimento	Não operante
Taxa fluxo ar externo (arrefecimento)	Auto dimensionando [m <sup>3</sup> /s]
Taxa fluxo ar externo (aquecimento)	Não operante
Agenda operacional suprimento de ar	Rotina_temperatura

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Tabela 8 - Inputs do Ventilador do sistema de climatização

Nome	FAN - PTAC
Agenda operacional	Rotina temperatura
Eficiência total	0.8
Aumento de pressão	250 [Pa]
Taxa de fluxo	Auto dimensionado [m <sup>3</sup> /s]
Eficiência motor	0.8
	Curva desempenho exponencial
Coeficiente 1	1,000
Coeficiente 2	0,000
Coeficiente 3	0,000
Mínimo valor de X	0,000
Máximo valor de X	1,000
	Curva desempenho cúbica
Coeficiente 1	1,000
Coeficiente 2 [X]	0,000
Coeficiente 3 [X**2]	0,000
Coeficiente 4 [X **3]	0,000
Mínimo valor de X	0,000
Máximo valor de X	1,000

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Tabela 9- Curva Quadrática FIXO

Coeficientes	Cooling Coil CAP - FF	Cooling Coil ERI -FF	Cooling Coil PLF
Constante	1	1	0,88
2x	0	0	0,15
3x**2	0	0	0
Mínimo valor de X	0,5	0,5	0
Máximo valor de X	1,5	1,5	1

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Tabela 10 - Curva bi quadrática FIXO

Coeficientes	Cooling Coil CAP - FT	Cooling Coil ERI -FT
Constante	2,25452787	-0,658159052
2x	-0,10103296	0,117729325
3x**2	0,00482478	-0,003030569
4 y	-0,01148338	0,006482818
5 y**2	0,000066729	0,000812854
6x*y	-0,00111539	-0,001062934
Mínimo valor de X	17	17
Máximo valor de X	22	22
Mínimo valor de y	25	25
Máximo valor de y	40	40

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Tabela 11 - Curva linear - INVERTER

Coeficientes	Cooling CombRatio	Heating CombRatio
Constante	1	0
2x	0	0
Mínimo valor de X	1	1
Máximo valor de X	1,5	1,5
Saída de curva mínima	1	1
Saída de curva Máxima	1,2	1,3

Fonte: Adaptado de DAIKIN e gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Tabela 12 - Curva quadrática - INVERTER

Coeficientes	<i>VRFCPLFFPLR</i>	<i>Heating EIRHiPLR</i>	<i>VRFACoolCapFFF</i>
Constante	1	0	1
2x	0	0	0
3X**2	0	0	0
Mínimo valor de X	0	1	0,5
Máximo valor de X	1	1,5	1,5
Saída de curva mínima	0,75	-	-
Saída de curva Máxima	1	-	-

Fonte: Adaptado de DAIKIN e gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Tabela 13 - Curva cúbica - INVERTER

Coeficientes	<i>VRFCoolCapFT Boundary</i>	<i>RFCoolEIR FT Boundary</i>	<i>CoolingEIRLow PLR</i>	<i>VRFHeatCapFT Boundary</i>	<i>VRFHeatEIR FT Boundary</i>	<i>HeatingEIRLow PLR</i>	<i>CoolingEIRHi PLR</i>	<i>VRFTU HeatCapFT</i>
Constante	1	1	2,532940	6	1	1	0,8898	1
2x	0	0	-	7,595183	0	0	3,1226	0
3X**2	0	0	7,696563	7	0	0	1	0
4X**3	0	0	-	2,633514	0	0	1,6716	0
Mínimo valor de X	12	14	0,62	14	14	0	0,4388	0
							3	
							0,89	
Coeficientes	<i>VRFCoolCapFT Boundary</i>	<i>VRFCoolEIR RFT Boundary</i>	<i>CoolingEIR Low PLR</i>	<i>VRFHeatCapFT Boundary</i>	<i>VRFHeatEIR RFT Boundary</i>	<i>HeatingEIR Low PLR</i>	<i>CoolingEIR Hi PLR</i>	<i>VRFTU HeatCapFT</i>
Saída de curva mínima	30	22	1	25	25	1	1,3	50
Saída de curva máxima				-19				0,6
				16				1,2

Fonte: Adaptado de DAIKIN e gerado pelo o autor no ©Open Studio.

Tabela 14 - Curva bi quadrática - *INVERTER*

<i>Coeficientes</i>	<i>VRFCool</i> <i>IEIRFT</i>	<i>VRFHeatC</i> <i>ap</i> <i>FT</i>	<i>VRFHeat</i> <i>at</i> <i>CapFT</i> <i>Hi</i>	<i>VRFHeatE</i> <i>IR</i> <i>FT</i>	<i>VRFHeatE</i> <i>IR</i> <i>FTHi</i>	<i>CoolingL</i> <i>en</i> <i>gthCorre</i> <i>cti</i> <i>onFactor</i>	<i>VRFTUC</i> <i>oolCapFT</i>
Constante	0,6581590 52	1	1	1	1	1	2,254527 87
2x	0,1177293 25	0	0	0	0	0	0,101032 96
X**2	0,0030305 69	0	0	0	0	0	0,004824 78
y	0,0064821 88	0	0	0	0	0	0,011483 38
5y*2	0,00081285 4	0	0	0	0	0	0,0000667 29
6Xy	0,00106293 4	0	0	0	0	0	0,0011153 9
Mínimo valor de X	17	15	15	15	15	2	17
Máximo valor de X	22	27	27	27	27	30	22
Mínimo valor de Y	25	-20	-10	-20	-10	0,6	25
Máximo valor de y	40	15	15	12	15	1,5	40

Fonte: Adaptado de DAIKIN e gerado pelo o autor no ©Open Studio.

## APÊNDICE A

Tabela 15- Variáveis do arquivo climático

Variáveis	TBS [°C] (média)	UR [%] (média)	Temperatura solo [°C ] (média)	Temperatura solo_slab [°C ]	Velocidade vento [m/s] (média)	Direção vento [°] (média)
Janeiro	26,00	76,00	24,00	22,37	2,00	180
Fevereiro	26,00	74,00	25,00	22,41	2,00	0
Março	26,00	79,00	25,00	22,36	2,00	0
Abril	25,00	80,00	25,00	22,26	2,00	0
Mai	22,00	79,00	25,00	22,09	1,00	30
Junho	21,00	78,00	23,00	22,00	2,00	0
Julho	20,00	79,00	22,00	21,94	1,00	0
Agosto	22,00	73,00	22,00	21,95	2,00	0
Setembro	21,00	79,00	21,00	22,04	2,00	180
Outubro	23,00	77,00	21,00	22,06	2,00	190
Novembro	24,00	78,00	22,00	22,17	2,00	180
Dezembro	25,00	78,00	23,00	22,27	2,00	0

Fonte: Adaptado de *Software Climate Consultant e Slab-©EnergyPlus* .

## APÊNDICE B

Figura 21 - Configurações de Computador utilizado na simulação da presente pesquisa

The figure displays four screenshots of the CPU-Z software interface, showing various system specifications:

**CPU Screenshot:** Processor Name: Intel Core i7, Code Name: Kaby Lake-R, Max TDP: 15.0 W, Package: Socket 1356 FCBGA, Technology: 14 nm, Core VID: 0.922 V, Specification: Intel® Core™ i7-8565U CPU @ 1.80GHz, Family: 6, Model: E, Stepping: C, Ext. Family: 6, Ext. Model: 8E, Revision: C0, Instructions: MMX, SSE, SSE2, SSE3, SSSE3, SSE4.1, SSE4.2, EM64T, VT-x, AES, AVX, AVX2, FMA3.

**Clocks (Core #0) Screenshot:** Core Speed: 2693.41 MHz, Multiplier: x 27.0 (4 - 46), Bus Speed: 99.76 MHz, Rated FSB: [blank], Cache: L1 Data: 3 x 32 KBytes, 8-way; L1 Inst.: 3 x 32 KBytes, 8-way; Level 2: 3 x 256 KBytes, 4-way; Level 3: 8 MBytes, 16-way.

**Memory Screenshot:** General: Type: DDR4, Channel #: Single, Size: 8 GBytes, DC Mode: [blank], Uncore Frequency: 2593.0 MHz.

**Timings Screenshot:** DRAM Frequency: 665.2 MHz, FSB:DRAM: 1:10, CAS# Latency (CL): 10.0 dlocks, RAS# to CAS# Delay (tRCD): 10 dlocks, RAS# Precharge (tRP): 10 dlocks, Cycle Time (tRAS): 28 dlocks, Row Refresh Cycle Time (tRFC): 234 dlocks, Command Rate (CR): 1T, DRAM Idle Timer: [blank], Total CAS# (tRDRAM): [blank], Row To Column (tRCD): [blank].

**Caches Screenshot:** L1 D-Cache: Size: 32 KBytes x 3, Descriptor: 8-way set associative, 64-byte line size; L1 I-Cache: Size: 32 KBytes x 3, Descriptor: 8-way set associative, 64-byte line size; L2 Cache: Size: 256 KBytes x 3, Descriptor: 4-way set associative, 64-byte line size; L3 Cache: Size: 8 MBytes, Descriptor: 16-way set associative, 64-byte line size.

**SPD Screenshot:** Memory Slot Selection: Slot #1: DDR4, Module Size: 8 GBytes, Max Bandwidth: DDR4-2666 (1333 MHz), SPD Ext.: [blank], Module Manuf.: Smart Modular, Week/Year: 47 / 19, DRAM Manuf.: Smart Modular, Ranks: Single, Part Number: SF4641G8CK8IEHLSBG, Correction: [blank], Serial Number: 06AD2DA2, Registered: [blank].

**Timings Table Screenshot:**

	JEDEC #8	JEDEC #9	JEDEC #10	JEDEC #11
Frequency	1236 MHz	1309 MHz	1333 MHz	1333 MHz
CAS# Latency	17.0	18.0	19.0	20.0
RAS# to CAS#	17	18	19	19
RAS# Precharge	17	18	19	19
tRAS	40	42	43	43
tRC	57	60	61	61
Command Rate				
Voltage	1.20 V	1.20 V	1.20 V	1.20 V

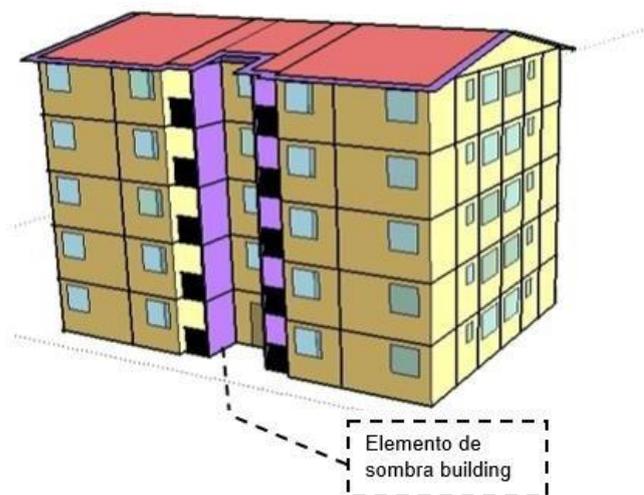
**Mainboard Screenshot:** Motherboard Manufacturer: Dell Inc., Model: 0DXF6K, A01, Chipset: Intel Coffee Lake, Rev.: 0C, Southbridge: Intel Coffee Lake-U/Y PCH, Rev.: 30, BIOS Brand: Dell Inc., Version: 1.11.0, Date: 06/03/2020, Graphic Interface Version: PCI-Express, Link Width: [blank], Max. Supported: [blank], Side Band Addressing: [blank].

**Graphics Screenshot:** Display Device Selection: Intel(R) UHD Graphics 620, Perf Level: Perf Level 0, GPU Name: Intel® UHD Graphics 620, Board Manuf.: Dell, Code Name: [blank], Revision: 2, Technology: [blank], TDP: [blank], Clocks: Core: [blank], Shader: [blank], Memory: [blank], Memory Size: [blank], Type: [blank], Vendor: [blank], Bus Width: [blank].

## APÊNDICE C

Para estruturação do modelo termoenergético considerou-se resultados de pesquisa prévia (OLIVEIRA, 2019). Caracterizou-se, portanto, os dados referentes ao projeto técnico e o memorial descritivo das unidades habitacionais. De posse de todas as informações técnicas referente a edificação tornou-se possível a construção virtual do objeto de estudo. A construção do modelo virtual foi feita somente para um único bloco do lote 1, considerando a tipologia dos apartamentos de 2 quartos. Na Figura 22 é mostrado o modelo 3D feito em “software” ©Sketchup com o auxílio do plugin do ©Open Studio.

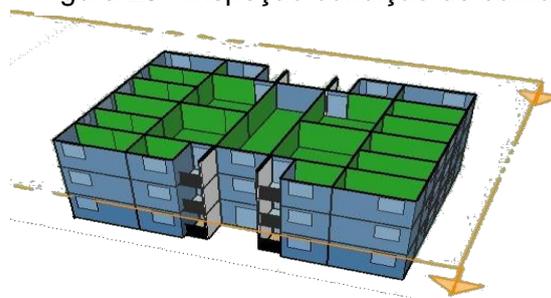
Figura 22 - Modelo virtual 3D da edificação



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Todas as superfícies e subsuperfícies foram inspecionadas quanto ao tipo construtivo e condição de contorno por meio da ferramenta *Inspector* presente no *plugin* ©Open Studio, conforme mostrado na Figura 23 Para essa análise foi necessário utilizar a ferramenta de corte presente no *software* ©Sketchup.

Figura 23 - Inspeção condição de contorno

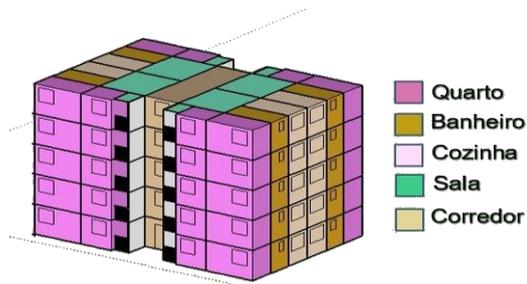


Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Os espaços foram representados de acordo com a disposição apresentada na Figura

24 são considerados 5 ambientes por apartamento.

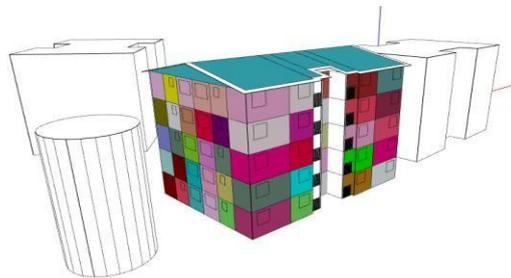
Figura 24- Categorização dos espaços.



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Na Figura 25 apresenta-se a classificação das zonas térmicas por apartamento. Nota-se na mesma figura a equivalência de cores para alguns apartamentos, isso ocorreu devido a pouca disponibilidade de cor na paleta do programa, porém, independente dessa igualdade de cor cada apartamento é considerado como uma zona térmica específica.

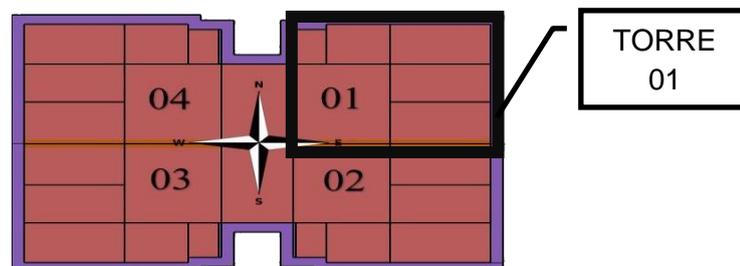
Figura 25 - Classificação de zonas térmicas



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Por meio da Figura 26 destaca-se a disposição dos apartamentos em relação à orientação geográfica, considerando um pavimento tipo.

Figura 26- Orientação geográfica dos apartamentos



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

## APÊNDICE D

Para estruturação dos modelos de climatizadores de ar PTAC e *DX: Variable Refrigerant Flow* consideraram-se os coeficientes apresentados no ANEXO A.ajustados conforme as equações apresentadas na revisão desta pesquisa. Caracterizou-se, cada curva de operação à seu respectivo coeficiente por meio do *software* Note pad++ Conforme pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Atribuição dos coeficientes às curvas de operação

```

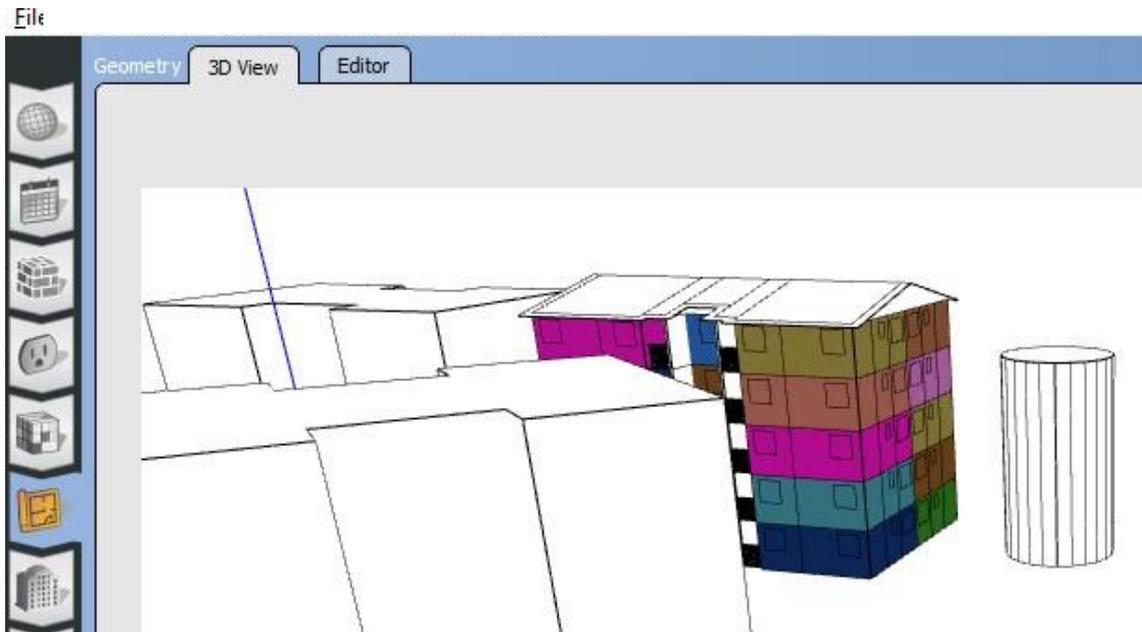
8955 43.3,                !- Maximum Value of y
8956 ,                  !- Minimum Curve Output
8957 ,                  !- Maximum Curve Output
8958 Temperature,       !- Input Unit Type for X
8959 Temperature,       !- Input Unit Type for Y
8960 Dimensionless;      !- Output Unit Type
8961
8962 OS:Curve:Cubic,
8963 {acf38361-dcb9-43e9-95ae-8cde69f1543b}, !- Handle
8964 VRF System CoolingEIRLowPLR 2,         !- Name
8965 0.4541226192,                          !- Coefficient1 Constant
8966 -0.1729687081,                         !- Coefficient2 x
8967 1.0828661347,                          !- Coefficient3 x**2
8968 -0.3618480897,                         !- Coefficient4 x**3
8969 0.5,                                    !- Minimum Value of x
8970 1,                                       !- Maximum Value of x
8971 ,                                       !- Minimum Curve Output
8972 ,                                       !- Maximum Curve Output
8973 Temperature,                          !- Input Unit Type for X
8974 Temperature;                          !- Output Unit Type
8975
8976 OS:Curve:Cubic,
8977 {2bfc9bcbf-ba5d-4464-b564-d47bb072df09}, !- Handle
8978 VRF System CoolingEIRHiPLR 2,         !- Name
8979 1,                                       !- Coefficient1 Constant
8980 0,                                       !- Coefficient2 x
8981 0,                                       !- Coefficient3 x**2
8982 0,                                       !- Coefficient4 x**3
8983 1,                                       !- Minimum Value of x
8984 1.5,                                    !- Maximum Value of x
8985 ,                                       !- Minimum Curve Output
8986 ,                                       !- Maximum Curve Output
8987 Dimensionless,                        !- Input Unit Type for X
8988 Dimensionless;                        !- Output Unit Type
8989
8990 OS:Curve:Cubic,
8991 {863f014b-85a8-48d5-a548-5ea238e1289e}, !- Handle
8992 VRF System CoolingCombRatio 2,       !- Name

```

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Notepad++

Foi realizado a inspeção de todos os espaços quanto a validação do zoneamento térmico por meio do '*software*' OpenStudio utilizando a guia geometria conforme observado na Figura 28.

Figura 28 - Inspeção das zonas térmicas



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Posteriormente estabeleceu-se agendas de temperaturas fundamentadas na NBR 16655, condição 1 e em seguida elaborou-se agendas de operação para os climatizadores operarem no interior das habitações, fundamentando-se no RTQ-R conforme observado na Figura 29.

Figura 29- Atribuição dos sistemas AVAC às zonas térmicas –(a) PTAC, (b) *Inverter*

File Preferences Components & Measures Help

**a**

Thermal Zone	Color	System	Control	Temperature	Humidity	CO2	Other
Thermal Zone 101	Light Blue	g PTAC DX Clg Elec Htg 21	Temperatura				
Thermal Zone 102	Yellow	g PTAC DX Clg Elec Htg 13	Temperatura				
Thermal Zone 103	Dark Blue	g PTAC DX Clg Elec Htg 15	Temperatura				
Thermal Zone 104	Green	g PTAC DX Clg Elec Htg 20	Temperatura				

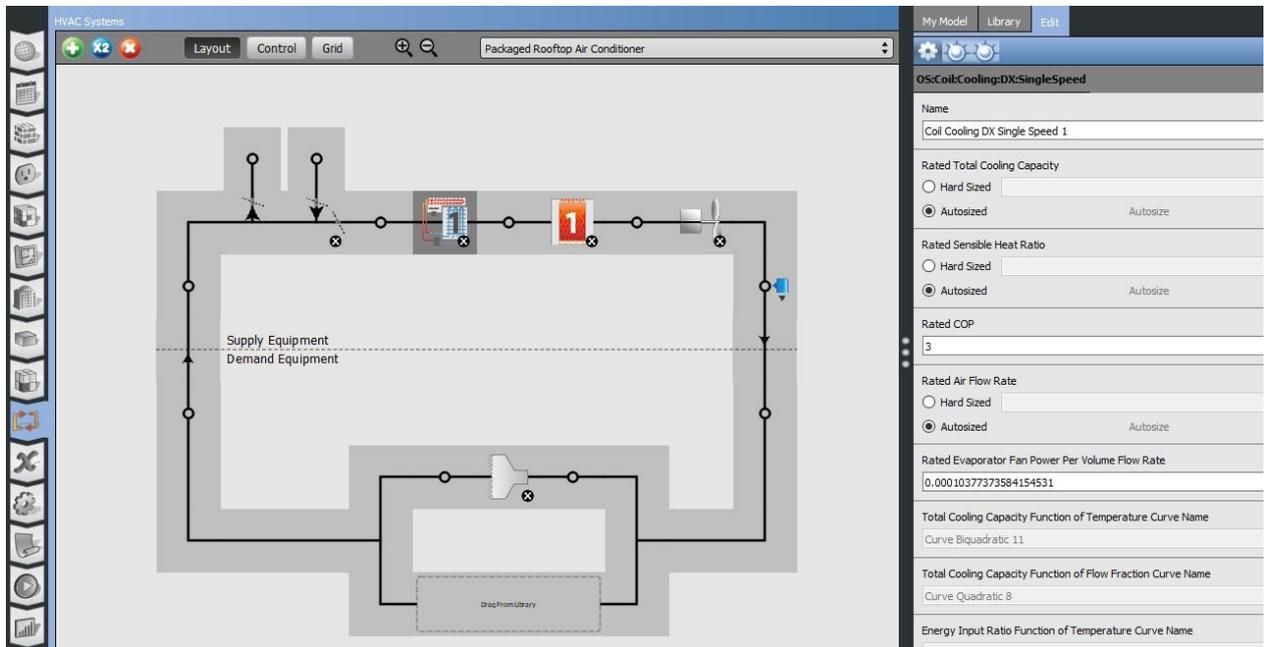
**b**

Thermal Zone	Color	System	Control	Temperature	Humidity	CO2	Other
Thermal Zone 101	Light Blue	Air Loop HVAC 1	Diffuser	Temperatura			
Thermal Zone 102	Yellow	Air Loop HVAC 1	Diffuser 1	Temperatura			
Thermal Zone 103	Dark Blue	Air Loop HVAC 1	Diffuser 2	Temperatura			
Thermal Zone 104	Green	Air Loop HVAC 1	Diffuser 3	Temperatura			

Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Em seguida na guia HVAC Systems, presente no ©Open Studio, selecionou-se as curvas de operação prontadas anteriormente especificamente para climatizadores do tipo PTAC e DX: *Variable Refrigerant Flow*, conforme abordado na Figura 30.

Figura 30 - Configuração dos sistemas AVAC



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Finalmente ainda no software ©Open Studio na guia *Out Put Variables* selecionaram-se os relatórios do ©Energy Plus para obtenção de resultados. Conforme pode ser observado na Figura 31.

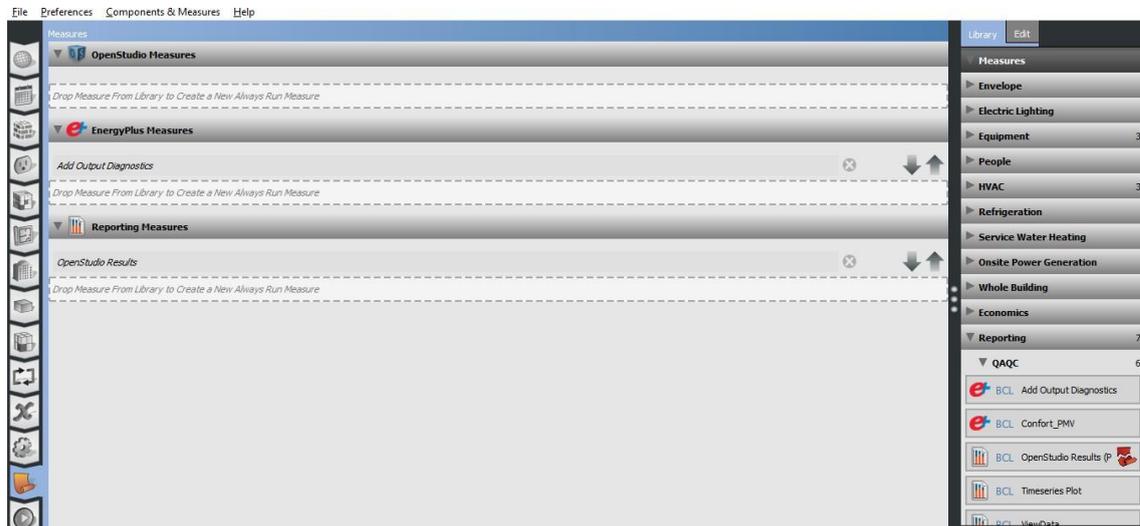
Figura 31 - Relatórios de resultados



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Selecionou-se ainda na guia *Measures* os relatórios específicos para análise mais aprimorada do perfil operacional e de rendimento dos equipamentos, conforme observado na Figura 32.

Figura 32 - Guia de medidas



Fonte: Gerado pelo o autor no ©OpenStudio.

Figura 33 – Curvas de operação - AVAC *split* convencional,(a),(b),(c),(d),(e),(f)

```

OS:Schedule:Day,
{ff73b08d-0d5b-45e5-9dfe-d8130f98b593}, !- Handle
Cycling PTAC Fan Mode Sch Default, !- Name
{9e3214cc-47b8-4cb5-a47a-71e17026ac7d}, !- Schedule Type Limits Name
, !- Interpolate to Timestep
24, !- Hour 1
0, !- Minute 1
0; !- Value Until Time 1

OS:Curve:Biquadratic,
{7773d10e-cbd2-4c83-88e9-7e4284952dce}, ! Handle
OS:Curve:Biquadratic 11, ! Name
0.758746000000000003, ! Coefficient1 Constant
0, ! Coefficient2 x
0, ! Coefficient3 x**2
0.0276260000000000001, ! Coefficient4 y
0.00014871599999999999, ! Coefficient5 y**2
0, ! Coefficient6 x*y
0, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1, ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
0, ! Minimum Value of y {BasedOnField A3}
1; ! Maximum Value of y {BasedOnField A3}

OS:Curve:Quadratic,
{9b9287e6-3bc0-484e-adcb-299964c22c2d}, ! Handle
OS:Curve:Quadratic 14, ! Name
0.83999999999999997, ! Coefficient1 Constant
0.16, ! Coefficient2 x
0, ! Coefficient3 x**2
0.5, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1.5; ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}

```

```

OS:Curve:Quadratic,
{9b9287e6-3bc0-484e-adcb-299964c22c2d}, ! Handle
OS:Curve:Quadratic 14, ! Name
0.83999999999999997, ! Coefficient1 Constant
0.16, ! Coefficient2 x
0, ! Coefficient3 x**2
0.5, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1.5; ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}

OS:Curve:Biquadratic,
{2446387f-b987-4746-973d-3efelc6edcc4}, ! Handle
OS:Curve:Biquadratic 12, ! Name
1.19248, ! Coefficient1 Constant
-0.030043799999999999, ! Coefficient2 x
0.00103745000000000001, ! Coefficient3 x**2
0, ! Coefficient4 y
0, ! Coefficient5 y**2
0, ! Coefficient6 x*y
-20, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
20, ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
0, ! Minimum Value of y {BasedOnField A3}
1; ! Maximum Value of y {BasedOnField A3}

OS:Curve:Quadratic,
{1163f491-deff-48d9-868c-3846cb4b9a64}, ! Handle
OS:Curve:Quadratic 15, ! Name
1.382400000000000001, ! Coefficient1 Constant
-0.43359999999999999, ! Coefficient2 x
0.0512000000000000002, ! Coefficient3 x**2
0, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1; ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}

```

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Energy plus.

```
OS:Curve:Quadratic,
{4589e392-a030-4181-ac42-7f236d145835}, ! Handle
OS:Curve:Quadratic 16, ! Name
0.8499999999999999, ! Coefficient1 Constant
0.1499999999999999, ! Coefficient2 x
0, ! Coefficient3 x**2
0, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1; ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
```

(c)

```
OS:Curve:Biquadratic,
{6e49c587-99c8-4b24-833c-b484c585e8df}, ! Handle
OS:Curve:Biquadratic 9, ! Name
0.4241500000000000, ! Coefficient1 Constant
0.0442600000000000, ! Coefficient2 x
-0.0004200000000000, ! Coefficient3 x**2
0.0033300000000000, ! Coefficient4 y
-8.000000000000000e-05, ! Coefficient5 y**2
-0.0002100000000000, ! Coefficient6 x*y
17, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
22, ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
13, ! Minimum Value of y {BasedOnField A3}
46; ! Maximum Value of y {BasedOnField A3}
```

```
OS:Curve:Quadratic,
{32c3fa97-a374-4516-9ae7-be60529926c7}, ! Handle
OS:Curve:Quadratic 11, ! Name
0.7713600000000000, ! Coefficient1 Constant
0.34053, ! Coefficient2 x
-0.1108800000000000, ! Coefficient3 x**2
0.7591799999999999, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1.1387700000000000; ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
```

```
OS:Curve:Biquadratic,
{fc6ab73f-1e56-458f-88ad-866119cbebca}, ! Handle
OS:Curve:Biquadratic 10, ! Name
1.2364900000000000, ! Coefficient1 Constant
-0.0243099999999999, ! Coefficient2 x
0.0005699999999999, ! Coefficient3 x**2
-0.01434, ! Coefficient4 y
0.0006300000000000, ! Coefficient5 y**2
-0.0003800000000000, ! Coefficient6 x*y
17, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
22, ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
13, ! Minimum Value of y {BasedOnField A3}
46; ! Maximum Value of y {BasedOnField A3}
```

(d)

```
OS:Curve:Quadratic,
{58774301-9467-4066-9ff4-8f3747544e13}, ! Handle
OS:Curve:Quadratic 12, ! Name
1.2055, ! Coefficient1 Constant
-0.3295299999999999, ! Coefficient2 x
0.1230799999999999, ! Coefficient3 x**2
0.7591799999999999, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1.1387700000000000; ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
```

```
OS:Curve:Quadratic,
{ca976900-80be-4451-81a3-8852b6bacca7}, ! Handle
OS:Curve:Quadratic 13, ! Name
0.7710000000000000, ! Coefficient1 Constant
0.2290000000000000, ! Coefficient2 x
0, ! Coefficient3 x**2
0, ! Minimum Value of x {BasedOnField A2}
1; ! Maximum Value of x {BasedOnField A2}
```

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Energy plus.

```

OS:Curve:Biquadratic,
{7bd3b8a6-fa25-4e35-b5ff-34b35755e288}, !- Handle
Curve Biquadratic 1, !- Name
0.258, !- Coefficient1 Constant
0.0389, !- Coefficient2 x
-0.000217, !- Coefficient3 x**2
0.0469, !- Coefficient4 y
-0.000943, !- Coefficient5 y**2
-0.000343, !- Coefficient6 x*y
5, !- Minimum Value of x
10, !- Maximum Value of x
24, !- Minimum Value of y
35; !- Maximum Value of y

OS:Curve:Biquadratic,
{7bc42be3-4ffb-403b-b70e-08b60fa930fa}, !- Handle
Curve Biquadratic 2, !- Name
0.934, !- Coefficient1 Constant
-0.0582, !- Coefficient2 x
0.0045, !- Coefficient3 x**2
0.00243, !- Coefficient4 y
0.000486, !- Coefficient5 y**2
-0.00122, !- Coefficient6 x*y
5, !- Minimum Value of x
10, !- Maximum Value of x
24, !- Minimum Value of y
35; !- Maximum Value of y

```

(e)

```

OS:Curve:Linear,
{d270975f-d040-4e60-8164-a8476f397859}, !- Handle
Refrigeration Condenser Air Cooled HR Curve, !- Name
0, !- Coefficient1 Constant
22000, !- Coefficient2 x
5, !- Minimum Value of x
22.2, !- Maximum Value of x
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
, !- Input Unit Type for X
; !- Output Unit Type

OS:Curve:Bicubic,
{5089695b-676a-4c08-9f8d-1ec5816ae62c}, !- Handle
Refrigeration Compressor Power Curve, !- Name
4451.46, !- Coefficient1 Constant
-166.108, !- Coefficient2 x
-5.35664, !- Coefficient3 x**2
263.553, !- Coefficient4 y
-0.958849, !- Coefficient5 y**2
8.09252, !- Coefficient6 x*y
-0.0239354, !- Coefficient7 x**3
0.000633306, !- Coefficient8 y**3
0.0778798, !- Coefficient9 x**2*y
-0.0167386, !- Coefficient10 x*y**2
-23.3, !- Minimum Value of x
7.2, !- Maximum Value of x
10, !- Minimum Value of y
60, !- Maximum Value of y
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature, !- Input Unit Type for Y
Power; !- Output Unit Type

```

(f)

Figura 34 - Curvas de operação- AVAC *Split inverter* ,(a),(b),(c),(d),(e),(f),(g),(h)

```

OS:Curve:Quadratic,
{b77db912-2515-402a-ba6e-012e94779ec4}, !- Handle
Coil Heating DX Variable Refrigerant Flow 1 VRFACCoolCapFFF, !- Name
0.8, !- Coefficient1 Constant
0.2, !- Coefficient2 x
0, !- Coefficient3 x**2
0.5, !- Minimum Value of x
1.5, !- Maximum Value of x
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
, !- Input Unit Type for X
; !- Output Unit Type
OS:ThermostatSetpoint:DualSetpoint,
{f9874e26-5b80-4d21-a6f2-e2aa57ddcb10}, !- Handle
Thermostat Setpoint Dual Setpoint 1, !- Name
, !- Heating Setpoint Temperature Schedule Name
{107f3e60-4a10-465d-a35c-alb58bc24bed}; !- Cooling Setpoint Temperature Schedule Name
OS:ThermostatSetpoint:DualSetpoint,
{b4a91e25-55a5-42a7-b679-ae45f5e6ed26}, !- Handle
Thermostat Setpoint Dual Setpoint 2, !- Name
, !- Heating Setpoint Temperature Schedule Name
{107f3e60-4a10-465d-a35c-alb58bc24bed}; !- Cooling Setpoint Temperature Schedule Name
OS:Curve:Bicubic,
{2dc205ae-6dcf-4e40-a9c1-e32c509e8982}, !- Handle
Refrigeration Compressor Capacity Curve, !- Name
83249.9, !- Coefficient1 Constant
3147.96, !- Coefficient2 x
44.9276, !- Coefficient3 x**2
-1035.51, !- Coefficient4 y
3.74692, !- Coefficient5 y**2
-37.3907, !- Coefficient6 x*y
0.179897, !- Coefficient7 x**3
-0.0199971, !- Coefficient8 y**3
-0.481641, !- Coefficient9 x**2*y
0.0428673, !- Coefficient10 x*y**2
-23.3, !- Minimum Value of x
7.2, !- Maximum Value of x
10, !- Minimum Value of y
60, !- Maximum Value of y
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature, !- Input Unit Type for Y
Capacity; !- Output Unit Type

```

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Energy plus.

```

OS:Curve:Bicubic,
{ce9a7df2-34aa-4e08-b287-2a00fbb0671e}, !- Handle
Refrigeration Compressor Power Curve 1, !- Name
4451.46, !- Coefficient1 Constant
-166.108, !- Coefficient2 x
-5.35664, !- Coefficient3 x**2
263.553, !- Coefficient4 y
-0.958849, !- Coefficient5 y**2
8.09252, !- Coefficient6 x*y
-0.0239354, !- Coefficient7 x**3
0.000633306, !- Coefficient8 y**3
0.0778798, !- Coefficient9 x**2*y
-0.0167386, !- Coefficient10 x*y**2
-23.3, !- Minimum Value of x
7.2, !- Maximum Value of x
10, !- Minimum Value of y
60, !- Maximum Value of y
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature, !- Input Unit Type for Y
Power; !- Output Unit Type

```

(c)

```

OS:Curve:Bicubic,
{4a334944-e75c-4367-add7-355df1811106}, !- Handle
Refrigeration Compressor Capacity Curve 1, !- Name
83249.9, !- Coefficient1 Constant
3147.96, !- Coefficient2 x
44.9276, !- Coefficient3 x**2
-1035.51, !- Coefficient4 y
3.74692, !- Coefficient5 y**2
-37.3907, !- Coefficient6 x*y
0.179897, !- Coefficient7 x**3
-0.0199971, !- Coefficient8 y**3
-0.481641, !- Coefficient9 x**2*y
0.0428673, !- Coefficient10 x*y**2
-23.3, !- Minimum Value of x
7.2, !- Maximum Value of x
10, !- Minimum Value of y
60, !- Maximum Value of y
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature, !- Input Unit Type for Y
Capacity; !- Output Unit Type

```

(d)

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Energy plus.

```

OS:Curve:Cubic,
{e2ecalc7-435a-4c83-8433-6a0930834a3b}, !- Handle
Refrigerated Case Latent Credit Curve, !- Name
0.026526281, !- Coefficient1 Constant
0.001078032, !- Coefficient2 x
-6.02558e-05, !- Coefficient3 x**2
1.23732e-06, !- Coefficient4 x**3
-35, !- Minimum Value of x
20, !- Maximum Value of x
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
, !- Input Unit Type for X
; !- Output Unit Type

```

```

OS:Curve:Cubic,
{e962c824-a169-4919-aalf-a97668db50cb}, !- Handle
Refrigerated Case Defrost Modifier Curve, !- Name
1, !- Coefficient1 Constant
0, !- Coefficient2 x
0, !- Coefficient3 x**2
0, !- Coefficient4 x**3
0, !- Minimum Value of x
1, !- Maximum Value of x
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
, !- Input Unit Type for X
; !- Output Unit Type

```

(e)

```

OS:Curve:Biquadratic,
{9383f7cf-a544-49ff-93ff-3eb7e4b18009}, !- Handle
VRF System VRFCoolCapFT 2, !- Name
0.576882692, !- Coefficient1 Constant
0.017447952, !- Coefficient2 x
0.000583269, !- Coefficient3 x**2
-1.76324e-06, !- Coefficient4 y
-7.474e-09, !- Coefficient5 y**2
-1.30413e-07, !- Coefficient6 x*y
15, !- Minimum Value of x
24, !- Maximum Value of x
-5, !- Minimum Value of y
23, !- Maximum Value of y
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature, !- Input Unit Type for Y
Dimensionless; !- Output Unit Type

```

(f)

```

OS:Curve:Cubic,
{4b185940-5b87-4b38-bc4b-51be789bed38}, !- Handle
VRF System VRFCoolCapFTBoundary 2, !- Name
25.73, !- Coefficient1 Constant
-0.03150043, !- Coefficient2 x
-0.01416595, !- Coefficient3 x**2
0, !- Coefficient4 x**3
11, !- Minimum Value of x
30, !- Maximum Value of x
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature; !- Output Unit Type

```

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Energy plus.

```

OS:Curve:Biquadratic,
{6daab162-b059-4502-9ea7-bf3aa7905560}, !- Handle
VRF System VRFCoolCapFTHi 2, !- Name
0.6867358, !- Coefficient1 Constant
0.0207631, !- Coefficient2 x
0.0005447, !- Coefficient3 x**2
-0.0016218, !- Coefficient4 y
-4.259e-07, !- Coefficient5 y**2
-0.0003392, !- Coefficient6 x*y
15, !- Minimum Value of x
24, !- Maximum Value of x
16, !- Minimum Value of y
43, !- Maximum Value of y
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature, !- Input Unit Type for Y
Dimensionless; !- Output Unit Type

```

(g)

```

OS:Curve:Biquadratic,
{4e5ed536-51dc-4728-9ef3-b25dd81bd5af}, !- Handle
VRF System VRFCoolEIRFT 2, !- Name
0.989010541, !- Coefficient1 Constant
-0.02347967, !- Coefficient2 x
0.000199711, !- Coefficient3 x**2
0.005968336, !- Coefficient4 y
-1.0289e-07, !- Coefficient5 y**2
-0.00015686, !- Coefficient6 x*y
15, !- Minimum Value of x
24, !- Maximum Value of x
-5, !- Minimum Value of y
23, !- Maximum Value of y
, !- Minimum Curve Output
, !- Maximum Curve Output
Temperature, !- Input Unit Type for X
Temperature, !- Input Unit Type for Y
Dimensionless; !- Output Unit Type

```

(h)

Fonte: Gerado pelo o autor no ©Energy plus.

## APÊNDICE E

TARIFAS DE BAIXA TENSÃO - R\$/kWh - Fevereiro/2022					
Classe de consumo	Tarifa com PIS/COFINS e ICMS				
	Faixa consumo				
	até 50 kWh	de 51 até 300 kWh	até 300 kWh	de 301 até 450 kWh	acima de 450 kWh
	Residencial (isento de ICMS)	Residencial (ICMS de 18%)	Demais Classes (ICMS de 20%)	Todas as Classes (ICMS de 31%)	Todas as Classes (ICMS de 32%)
<b>Residencial</b>	<b>0,71892</b>	<b>0,88369</b>	-	<b>1,05897</b>	<b>1,07538</b>
<b>Tarifa Social</b>					
· até 30 kWh	0,22014	-	-	-	-
· 31 até 50 kWh	0,37739	0,46388	-	-	-
· 51 até 100 kWh					
· 101 até 220 kWh	-	0,69582	-	-	-
· acima de 220 kWh	-	0,77313	-	0,92649	0,94084
<b>Não residencial</b>	-	-	<b>0,90678</b>	<b>1,05897</b>	<b>1,07538</b>
<b>Rural</b>	-	-	<b>0,79796</b>	<b>0,93189</b>	<b>0,94633</b>
<b>Coop. Eletrificação Rural</b>	-	-	<b>0,79796</b>	<b>0,93189</b>	<b>0,94633</b>
<b>Serv. Público de Irrigação Rural</b>	-	-	<b>0,76168</b>	<b>0,88952</b>	<b>0,90330</b>
<b>Iluminação Pública</b>					
· Rede de Distribuição	-	-	0,49872	0,58242	0,59145
· Bulbo da Lâmpada	-	-	0,54406	0,63537	0,64521

[https://www.enel.com.br/pt/Para\\_Voce/Bandeira\\_Tarifaria.html](https://www.enel.com.br/pt/Para_Voce/Bandeira_Tarifaria.html) <Acesso em 10/02/2022>