

## Análise energética de condicionadores convencionais e inverter em habitações não adaptadas ao clima

### Energy analysis of conventional conditioners and inverters in houses not adapted to the climate

<sup>1</sup>Wesley Cecilio Silva 1, <sup>2</sup>Raquel Diniz Oliveira 2, <sup>3</sup>Frederico Romagnoli Silveira Lima 3

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Mecânica – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (wesleycecis@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor Associado do Programa de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (raqueldo@gmail.com)

<sup>3</sup>Professor Associado do Programa de Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (fredericoromagnoli@gmail.com)

---

**RESUMO:** O consumo de energia de condicionadores de ar em edificações em regiões quentes e úmido se mostra relevante, em especial, naquelas não adaptadas ao clima. O presente trabalho teve por objetivo comparar o consumo e o rendimento de condicionadores de ar do tipo *Split inverter* e *Split* convencional. A análise foi realizada por meio de Simulações termo energéticas, utilizando o programa ©Energy Plus e o aplicativo, ©Open Studio. Condições operacionais e características técnicas dos sistemas foram embasadas na norma NBR 16555. Considerou-se uma Habitação de interesse social real como modelo referência, fundamentando em parâmetros de uso e ocupação do Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética (RTQ-R). Obteve-se o modelo virtual da edificação e o comportamento operacional dos sistemas condicionadores de ar por meio de curvas de desempenho. Concluiu-se que, o uso de condicionadores do tipo *inverter* nas habitações não adaptadas ao clima, objeto da presente pesquisa se mostrou eficiente quando comparado a condicionadores convencionais. Assume-se que a substituição do equipamento *split convencional por split inverter* pode reduzir o consumo de eletricidade em até 41% ao ano, considerando os níveis de eficiência energética vigentes. Os condicionadores do tipo *inverter* conseguem minimizar o consumo de energia elétrica, o que tornaria acessível hipoteticamente a utilização de equipamentos mais eficientes as classes menos favorecidas.

**Palavras Chave:** Climatização artificial. Simulação termo energética. Edificação popular. Consumo de energia elétrica. Índice de eficiência energética.

**ABSTRACT:** In buildings in hot and humid environments, the energy consumption of air conditioning systems is significant, particularly in those that are not suited for the climate. The purpose of this work is to evaluate the performance of split inverter air conditioners relative to conventional split air conditioners, considering a hypothetical scenario of social interest housing in hot and humid climates. An existing building in the city of Jacarepaguá, Rio de Janeiro, was chosen as a reference. 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. 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.

**Keywords:** Thermo-energy simulation. Social interest housing. Electric power consumption. Energy efficiency indicator.

---

## 1. INTRODUÇÃO

O rendimento de sistemas mecânicos de refrigeração e/ou aquecimento pode variar, visto que, são sensíveis à carga térmica do ambiente. 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 características dos materiais construtivos, à forma de construção, a ocupação e às mudanças climáticas (PEREIRA, LAMBERTS e GHISI, 2013).

Trepci, Maghelal e Azar (2021) propuseram uma modelagem energética de edifícios utilizando o *software Energy Plus* com ampla variação paramétrica e esquema de análise estatística, avaliando 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 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 de aquecimento, ventilação e ar condicionado (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 de refrigeração 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. 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* convencionais. (MARANGONI et al., 2015).

Dado que o rendimento do sistema pode variar, a energia elétrica consumida também irá variar, visto que, o desempenho do sistema é obtido pela razão entre a capacidade total de refrigeração ou aquecimento pela potência elétrica demandada (DAVIS, 2021).

Rangel (2020) realizou uma análise comparativa do consumo de energia elétrica de condicionadores inverter e convencionais. Os equipamentos foram submetidos à ensaios individuais por meio de um analisador de energia permitindo, então, um diagnóstico real do comportamento de cada equipamento, tornando possível avaliar os quesitos de qualidade para obtenção do melhor desempenho do equipamento. Os modelos *inverter's* apresentaram melhor desempenho e menor consumo em relação aos modelos convencionais.

Almogbel (2020), conduziu um experimento em que, o consumo de energia foi medido por cerca de 108 dias, que é de 16 de julho a 31 de outubro, 24 horas por dia, 7 dias por semana, e comparado. O experimento considerou equipamentos de mesma capacidade (18.000 BTU). Por meio da análise dos resultados verifica-se que na utilização diária normal da energia, o inverter economizará até 44% do consumo elétrico em comparação com um convencional de 3.471 kWh/ano e 6.230 kWh/ano, respectivamente. Além disso, a análise do *Total Equivalent Warming Impact* (TEWI) mostra que os inversores podem economizar 49% das emissões de CO<sub>2</sub>.

Gupta (2021) conclui que a tecnologia inverter pode economizar energia elétrica de 12 a 22,4% em comparação com um ar condicionado convencional. A análise considerou os custos

do produto ( $C_p$ ), os custos de reparo ( $C_R$ ), os custos de manutenção ( $C_M$ ) e os custos de energia ( $C_E$ ) são tomados como parâmetros de decisão para avaliar os períodos de retorno (PPs).

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 residência, comércio e indústria. 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.

Além do mais, o Brasil é o nono maior consumidor de energia elétrica do mundo e estudos projetam um cenário em constante crescimento (PEREIRA, LAMBERTS e 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 (EPE, 2018).

Portanto, nessa pesquisa tem-se como objetivo analisar e comparar o desempenho de condicionadores de ar do tipo *Split*, de dois modelos distintos, convencionais e *inverter*, utilizando curvas de desempenho comerciais para caracterizá-los e, conseqüentemente, empregá-los em uma simulação termo energética no ©EnergyPlus para apartamentos de uma habitação de interesse social (HIS).

## 2. MATERIAIS E MÉTODO

Na pesquisa desenvolvida neste trabalho visa-se comparar o desempenho de tecnologias ativas em uma edificação residencial existente de modo a apontar o equipamento com menor consumo operacional. Para alcançar os objetivos propostos foram utilizadas cinco etapas, a descrição e caracterização do objeto de estudo, os programas utilizados e métodos de simulação computacional, os perfis de uso e ocupação, os dados de projeto, no que tange as variáveis para caracterizar os condicionadores de ar e por fim a modelagem dos condicionadores de ar.

### 2.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho foi selecionado 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 1 observa-se geograficamente seu posicionamento e o entorno que circunda a edificação. 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.

Figura 1- Posicionamento geográfico



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019)

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 lotes de condomínios, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 - Disposição dos lotes do Parque Carioca



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

Os apartamentos de 2 quartos possuem área útil de 43,95 m<sup>2</sup> e os de 3 quartos possuem área útil de 60,83 m<sup>2</sup>, conforme ilustrado nas Figura 3.

Figura 3 - Planta apartamento tipo 2(a) e 3(b) quartos



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019)

O condomínio utilizado nesta pesquisa está localizado no lote 1, conforme mostrado na Figura 4. A área demarcada como “Área de pesquisa” corresponde a área modelada virtualmente para a simulação numérica.

Figura 4 - Localização do objeto de estudo



Fonte: (Google Earth, 2023) Jacarepaguá, RJ. Coordenadas 22°57'55" S e 43°24'33" W

Figura 5 - Fotos do objeto de estudo



Fonte: Oliveira (2019)

Por meio da Figura 5 é possível observar fotos do bloco de apartamentos, tratado nesta pesquisa como objeto de estudo. Observa-se que cada bloco possui 5 pavimentos e cada pavimento possui 4 apartamentos, totalizando 20 apartamentos por bloco. Nesta pesquisa os 20 apartamentos do bloco escolhido foram submetidos a simulação numérica. Os apartamentos foram categorizados por pavimento e por orientação geográfica, conforme denotado pela Tabela 1.

Tabela 1 - Categorização dos apartamentos

| Pavimento  | Apartamentos  |             |             |               |
|------------|---------------|-------------|-------------|---------------|
| 1          | 101           | 102         | 103         | 104           |
| 2          | 201           | 202         | 203         | 204           |
| 3          | 301           | 302         | 303         | 304           |
| 4          | 401           | 402         | 403         | 404           |
| 5          | 501           | 502         | 503         | 504           |
| Orientação | Norte - Leste | Sul - Leste | Sul - Oeste | Norte - Oeste |



Todas as características termo físicas presentes na Tabela 2 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 2 - Propriedades dos elementos construtivos da edificação

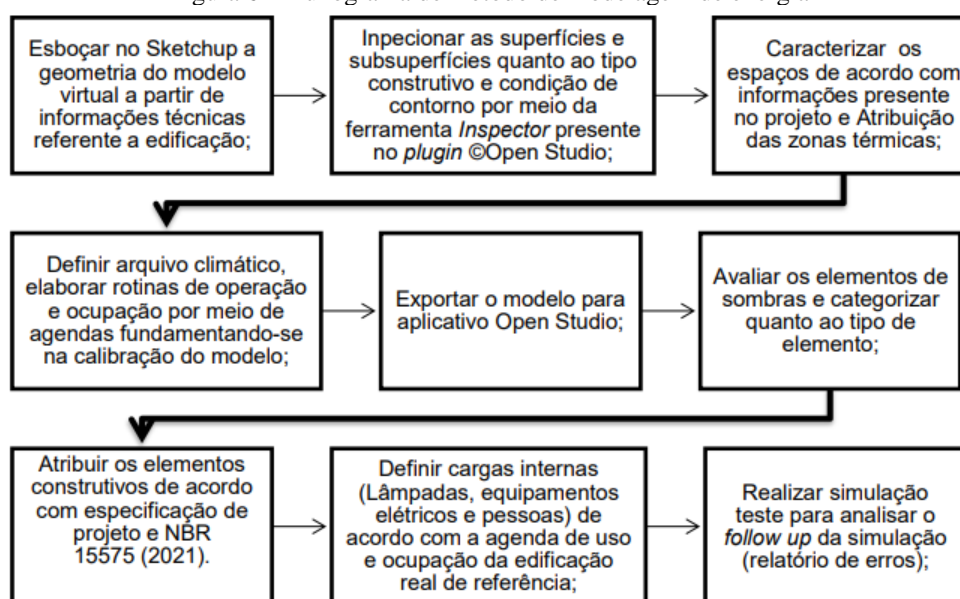
| Propriedades                   | Concreto | Fibrocimento | Cerâmica | Vidro |
|--------------------------------|----------|--------------|----------|-------|
| Espessura [m]                  | 0,1      | 0,006        | 0,008    | 0,004 |
| Condutividade [W/m.K]          | 1,75     | 0,95         | 0,9      | 0,9   |
| Densidade [kg/m <sup>3</sup> ] | 2.400    | 1800         | 1.300    | 2500  |
| Calor Específico [J/kg.K]      | 1.000    | 840          | 920      | 840   |
| Absortância                    | 0,9      | 0,9          | 0,7      | 0,8   |

Fonte: Adaptado de NBR 15220 (ABNT, 2013)

## 2.2 Simulação Computacional

Os programas utilizados são o ©Sketchup, o ©Energy Plus 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 termo energético do modelo de referência utilizado (BRACKNEY et al., 2018). Para a construção do modelo virtual para simulação considerou-se os passos mostrados na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma de método de modelagem de energia



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.

O entorno foi modelado como um elemento de sombra do tipo local, visto que são elementos convencionais em relação a edificação modelada e foram caracterizados construtivamente, conforme pode ser observado na Figura 7. Esses elementos influenciam de forma significativa na troca térmica do conjunto habitacional.

Figura 7 - Modelo simulado



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*). Optou-se por esse arquivo devido os dados apresentarem condições de projeto anuais e mensais do Capítulo 14, *ASHRAE Handbook-Fundamentals* (2009), 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.

### 2.3 Perfis 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, 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-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 (INMETRO, 2010).

O padrão de ocupação dos dormitórios e da sala foi modelado para os dias de semana e para os finais de semana. Na Figura 8, observa-se o padrão de ocupação dos dormitórios e na

Figura 9, o padrão de ocupação da sala. Esses padrões são similares aos padrões dispostos no RTQ-R (INMETRO, 2010).

Figura 8 - Padrão de ocupação dos dormitórios

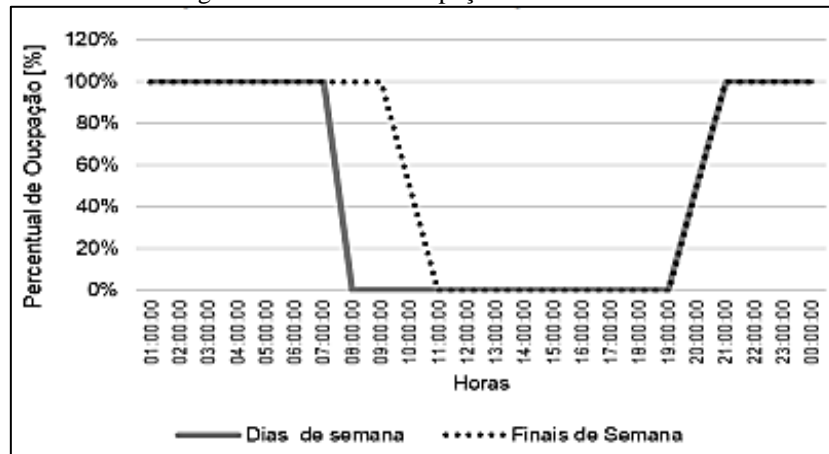


Figura 9 - Padrão de ocupação da sala



Para a densidade de potência de iluminação (DPI), adotou-se o valor arbitrado pelo RTQ-R, 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 (INMETRO, 2010).

#### 2.4 Dados de projeto

A temperatura de projeto do ambiente condicionado foi estabelecida conforme a Tabela 3 da NBR 16655 (ABNT, 2018), sendo aplicável a condição 1 para a localidade na qual a edificação de referência situa-se. Desta forma, considerou-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 [kg<sub>vapor</sub>/kg<sub>ar seco</sub>] 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 NBR 16655 (ABNT, 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. 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.

### 2.5 Modelagem dos 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 com 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* convencional como o *Split Inverter*.

Para representar o *Split* Convencional utilizou-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. Na representação do modelo *inverter* utilizou-se o modelo DX: *Variable Refrigerant Flow*, sistema composto por serpentinhas de expansão direta e compressores de velocidade variável. Para este sistema houve alteração das curvas lineares, quadráticas, cúbicas e bi quadráticas.

Para analisar a comparação do desempenho dos condicionadores de ar por meio do consumo de energia elétrica e do EER, foi necessário modelar a edificação conforme a metodologia de simulação estabelecida no RTQ-R (INMETRO, 2010). 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 os coeficientes de desempenho comerciais. 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* convencional 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 foram 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 (2.1) e (2.2) 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).

$$COP = \frac{Q_{aquecimento}}{W_{con}} \quad (2.1)$$

$$EER = \frac{Q_{arrefecimento}}{W_{con}} \quad (2.2)$$

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, 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.

### 2.5.1 Curvas de desempenho dos sistemas AVAC

As curvas de desempenho são utilizadas para representar o comportamento de operação de sistemas AVAC. Essas curvas foram 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.

A potência do equipamento é ajustada 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 (2.3), apresentada no manual de referência de engenharia do ©EnergyPlus (LBNL, 2010):

$$POT = \left( \frac{CAP * CAPFT}{COP} \right) EIRFT EIRFPLR \quad (2.3)$$

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 (2.4), de acordo com as referências do ©EnergyPlus (LBNL, 2010):

$$CAPFT = a + [bTBU_1] + [bTBS_1^2] + [dTBS_E] + [eTBU_e^2] + [fTBU_1TBS_E] \quad (2.4)$$

O ajuste dos coeficientes de  $a$  à  $f$  da Equação (2.4) 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,  $TBS_I$  de 26,7 °C e variando a temperatura de bulbo úmido interna ( $TBU_I$ ) e a temperatura de bulbo seco do ambiente externo ( $TBS_E$ ).

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 (2.5).

$$EIRFT = a + [bTBU_I] + [bTBS_I^2] + [dTBS_E] + [eTBU_e^2] + [fTBU_I TBS_E] \quad (2.5)$$

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 (2.6) (LBNL, 2010).

$$EIRFPLR = \frac{POT}{POT_{nominal} COP_{nominal}} \quad (2.6)$$

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 representada pelas as Equação (2.7) e Equação (2.8), conforme referência do (LBNL, 2010).

$$EIRlowPLR = a + [bPLR] + [cPLR^2] + [dPLR^3] \quad (2.7)$$

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.

$$EIRhiPLR = e + [fPLR] + [gPLR^2] + [hPLR^3] \quad (2.8)$$

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 “e” a “h” também é realizada por meio de regressão polinomial por meio de dados técnicos de fabricantes.

### 2.5.2 Simulação em velocidade fixa

Para simular equipamentos condicionadores de ar de velocidade fixa (convencionais) são utilizadas as seguintes curvas: CAPFT, EIRFR e PLF (*Part Load Fraction*), já definidas anteriormente. Essas são curvas bi quadráticas e seus coeficientes foram inseridos manualmente no ©EnergyPlus. A ineficiência do compressor devido aos ciclos realizados é descrita pela fração de carga parcial (PLF) sendo descrito pela Equação (2.9) (LBNL, 2010):

$$PLF = 0,85 + 0,15 PLR \quad (2.9)$$

### 2.5.3 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. (2.6), (2.7) e (2.8).

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 (2.7) e EIRHiPLR, conforme Equação (2.8), devem ser inseridas no ©EnergyPlus para cada simulação.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Estimativa de carga térmica

Observa-se a estimativa térmica de todos os apartamentos que constitui a edificação em análise, conforme mostrado na Tabela 3. 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 3 - 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         |

Avaliando os apartamentos em relação a sua distância do nível térreo (cota 0 de projeto) e analisando essa influência por meio da Tabela 4, 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 (2,60 m) o aumento foi de 12,58% e para aqueles posicionados na terceira (5,20 m) e quarta laje de piso (7,80 m) verificou-se um aumento de 16,60% e 20,64%, respectivamente. Observa-se ainda, na Tabela 4, que o maior aumento de carga térmica ocorre na transição para a altura de 10,80 m, 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 4 - 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                    |

Os próximos resultados foram fundamentados somente nas habitações localizadas no primeiro, terceiro e quinto pavimento, dado que, esses pavimentos se mostram mais

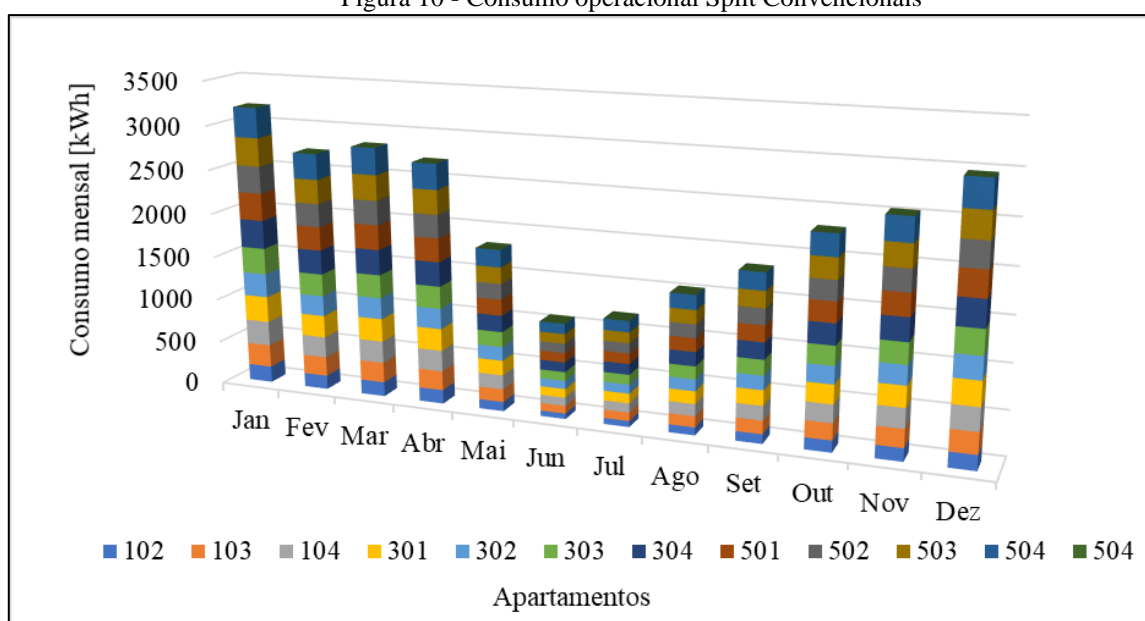


representativos quando comparado o valor da diferença percentual de carga térmica, conforme observado na Tabela 3.

### 3.2 Simulação do consumo operacional dos condicionadores de ar

Observa-se por meio da Figura 10 o consumo de energia elétrica mensal dos condicionadores do tipo *Split* Convencionais. Nota-se ainda um comportamento similar ao comportamento apresentado pela Tabela 3, 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.

Figura 10 - Consumo operacional Split Convencionais



A mesma análise foi realizada para o condicionador do tipo *Split Inverter* e observou-se por meio da Figura 11 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.

Após realizar uma comparação mensal do consumo operacional dos equipamentos *Split* Convencionais 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 12.

Figura 11 - Consumo operacional Split inverter

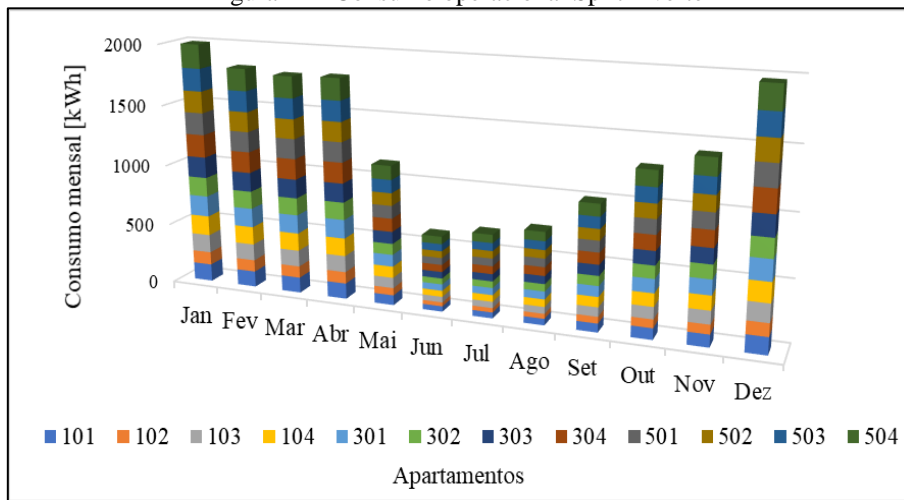
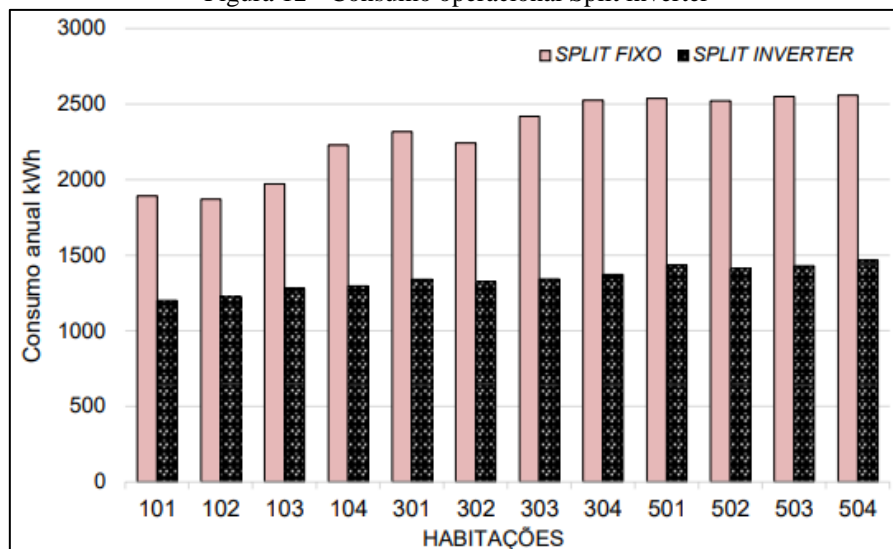


Figura 12 - Consumo operacional Split inverter



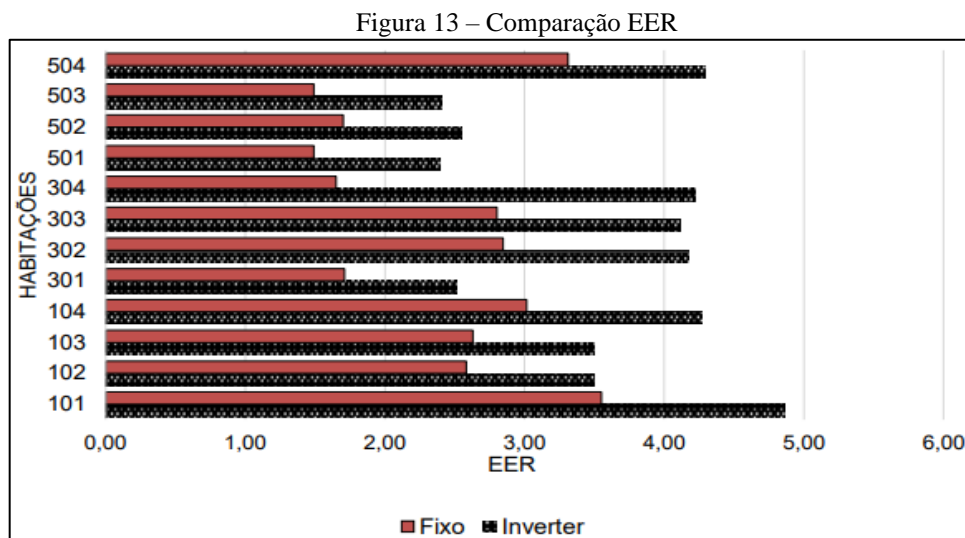
### 3.3 Simulação EER

Contabilizando os dados de simulação, calculando 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%.

O equipamento do tipo Split Convencional 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 13.

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 13. Entretanto, a habitação 101 não apresenta maior carga térmica

ofertada dentre as habitações comparadas., conforme a estimado na Tabela 3, mas apresenta melhor rendimento, devido a variáveis climáticas.



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 13. A maior diferença do EER acontece na habitação 304, cerca de 61%.

### 3.4 Variação do desempenho dos condicionadores de ar

As variações de consumo operacional e desempenho observadas nos tópicos 3.2 e 3.3 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 se eleva 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).

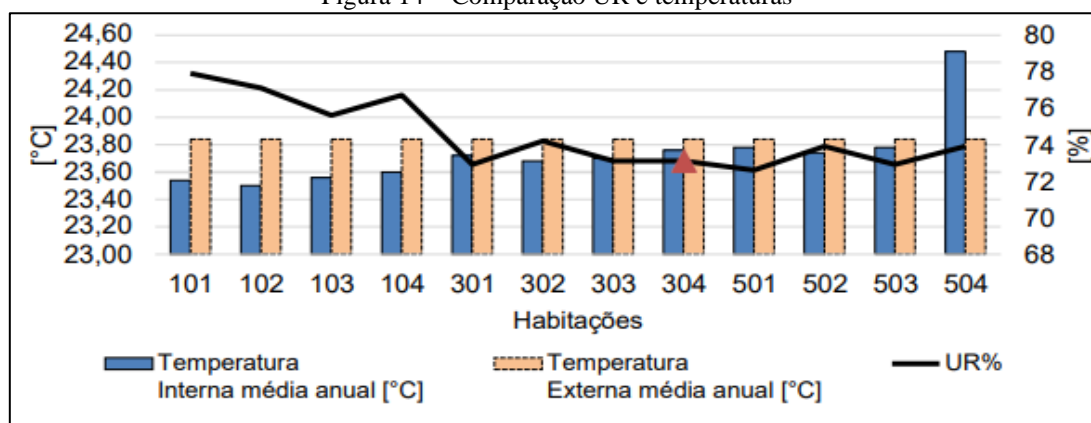
A umidade relativa (UR) favorece a transferência de calor entre o ambiente e a serpentina da evaporadora e, conseqüentemente, favorece o desempenho do equipamento. Entretanto, o contato do ar externo com o ar interno modifica o valor da UR. Essa alteração termodinâmica afeta a operacionalidade dos condicionadores 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.

Por meio da Figura 14 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 13. Observa-se ainda na Figura 14 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.

Figura 14 – Comparação UR e temperaturas

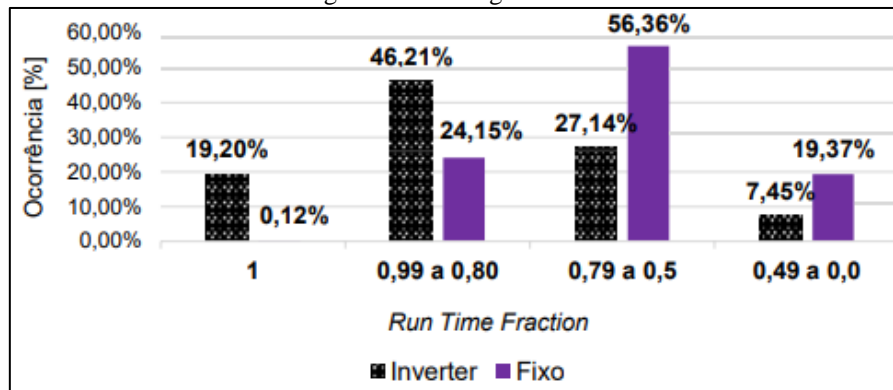


Fundamentando-se no teste experimental realizado por Sobrinho e Tuna (2013) e analisando a Figura 14, observou-se que todas as habitações apresentam UR interna superior ao intervalo levantado por Sobrinho e Tuna (2013), 40 a 65%. Em grandes partes dos processos de resfriamento, a temperatura do ponto 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 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).

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 15, 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 convencionais 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.

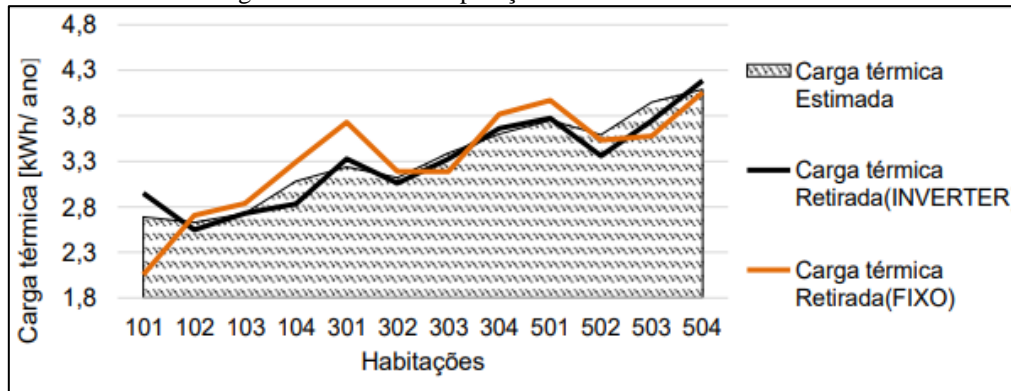
Figura 15 – Histograma RTF



Compressores e condensadores têm 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 obtido por meio da Equação 2.1, visto que, o valor de consumo operacional mensal foi estimado por simulação. Por meio da Figura 16 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 convencionais. Essa observação também foi abordada por Marangoni et al (2015) em seu trabalho.

Figura 16 – Perfis de operação de condicionadores de ar



Em geral, contudo que foi analisado e comparado, o equipamento *split inverter* apresentam resultados melhores que o *split* convencionais, 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. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa de desempenho operacional considerando a tipologia de condicionadores de ar, *split* convencionais 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 (INMETRO, 2010) 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* convencionais 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.

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 convencionais.

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos propõe-se um estudo de viabilidade econômica, considerando, variantes de investimento inicial e custos de manutenções, com o intuito de gerar informações essenciais para a tomada de decisões estratégicas.

## 5. REFERÊNCIAS

ALMOGBEL, Ahmed et al. Comparison of energy consumption between non-inverter and inverter-type air conditioner in Saudi Arabia. **Energy Transitions**, v. 4, p. 191-197, 2020.

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.

\_\_\_\_\_. **NBR 16655** - Instalação de sistemas residenciais de ar-condicionado - Split e compacto. Rio de Janeiro, 2018.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. p. 30.12. Atlanta, 2009.

BEYER, P. O.; “**Apostila de Aquecimento Ambiental**”, Departamento de Engenharia Mecânica (DMEC), UFRGS, 2009. <Belo horizonte>. Acesso em: 13 fev. 2023.

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).

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

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

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. <Belo horizonte>. Acesso em: 20 fev. 2023.

Google Earth website. <http://earth.google.com><Rio de Janeiro>. Acesso em: 08 jun. 2023.

GUPTA, Sunil Kumar; ARORA, B. B.; ARORA, Akhilesh. Economics-Based Payback and Life Cycle Cost Savings Assessment of Inverter Type Air Conditioners. In: IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2021. p. 012023.

LBNL - **LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY**. EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations, US Department Of Energy, Version 5.0, USA, 2010. <Belo horizonte>. Acesso em: 12 dez. 2022.

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 Tecnológica de Goiás, Itumbiara. Disponível em: <http://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/630>.

RAUSTAD, Richard. Creating performance curves for variable refrigerant flow heat pumps in EnergyPlus. **Florida Solar Energy Center**, 2012.

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

INMETRO – **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial**. Anexo da Portaria n. 449/2010: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais - RTQ-R. INMETRO, 2010. <Belo horizonte>. Acesso em: 10 jan. 2023.

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.

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>. <Belo horizonte> Acesso em 27 nov. 2022.

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.

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).

STOECKER, W.F., SainzJabardo, J.M., **Refrigeração industrial**. Ed. Edgard Blücher, 2002.

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.

## AGRADECIMENTOS

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos também a Fernanda Mourão Dutra de Oliveira por ter cedido fotos do empreendimento, objeto de estudo desta pesquisa.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.