

ANÁLISE ENERGÉTICA PREDIAL ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Guilherme Antonio dos Santos (IC) e Miriam Tvrzská de Gouvêa (Orientadora)

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

O projeto apresenta a simulação da carga térmica das cinco zonas climatizadas do 1º pavimento do edifício Alfred Cownley Slater (prédio 04) da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), em Higienópolis, utilizando o simulador EnergyPlus™ que interage com o programa de modelagem 3D SketchUp®, pelo *plug-in* Openstudio®. As cargas simuladas foram utilizadas como parâmetros de entrada na codificação do MATLAB® do sistema de compressão a vapor adaptado para o tipo VRV, com um modelo capaz de emular e otimizar seu comportamento. A configuração no EnergyPlus™ foi feita através do uso da documentação de projeto fornecida pela Coordenação de Obras e Manutenção (COMAN) da UPM, comparando as cargas térmicas simuladas e projetadas. Os resultados atestam que o EnergyPlus™ reproduziu as condições térmicas previstas no projeto oficial do pavimento e possibilita a avaliação do efeito de perturbações na carga térmica. Ainda, por meio do MATLAB®, mostrou-se a redução de consumo de energia da ordem de 13% que pode ser alcançada com adequadas manipulações da abertura de válvulas de expansão eletrônicas, da rotação do compressor e vazão de ar externo para o condensador.

Palavras-chave: EnergyPlus™. Carga térmica. VRV.

ABSTRACT

The project presents the simulation of thermal load of the five climatized zones of the first floor of Alfred Cownley Slater building (building 04) of Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), in Higienópolis, using EnergyPlus™ simulator that interacts with SketchUp® 3D modeling program, via Openstudio® plugin. The simulated loads were used as inputs parameters in the MATLAB® coding adapted for a VRV type in a vapor compression system, with a model capable of emulating and optimizing its behavior. The configuration in EnergyPlus™ was done using the project documentation provided by the Coordination of Works and Maintenance (COMAN) of UPM, comparing the simulated and projected thermal loads. The results attest that EnergyPlus™ reproduced the thermal conditions foreseen in the official design and makes it possible to evaluate the effect of disturbances on the thermal load. Still, through MATLAB®, the economic energetic gain of the order of 13% that can be achieved with appropriate manipulations of opening electronic expansion valves, compressor rotation and external air flow to the condenser was shown.

Keywords: EnergyPlus™. Thermal load. VRV.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com as condições de conforto humano promoveu nas últimas décadas uma crescente utilização dos equipamentos de ar-condicionado, acarretando um aumento da demanda energética no setor de refrigeração (MITCHELL et al., 2018). Segundo Vakiloroya et al. (2014), aproximadamente 50% do consumo de energia elétrica em edificações comerciais é devido aos sistemas de ar-condicionado. A elevada demanda por energia causa preocupações relacionados com a preservação do meio ambiente e do aumento do aquecimento global. Nesse viés, destacam-se dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), segundo a qual as edificações representam 50% do consumo de eletricidade do Brasil, projetando um cenário onde a demanda de eletricidade por conta dos ares-condicionados pode crescer 5,4% ao ano e atingir 48,5 TWh em 2035 (EPE, 2018). Desse modo, a fim de se promover uma avaliação e otimização do consumo energético, é fundamental uma adequada previsão da carga térmica, parâmetro definido como a quantidade de calor que deve ser retirada do ambiente por unidade de tempo (PEREIRA et al., 2020, pg. 2). Nessa vertente, simuladores reconhecidos na literatura, como o EnergyPlus™, cujos modelos são baseados em padrões estabelecidos pela ASHRAE (Associação Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-condicionado) constituem importantes ferramentas para a avaliação do consumo energético.

1.1 Problema de Pesquisa

O cenário do consumo energético atual, destacado no item precedente, evidencia a necessidade de iniciativas de pesquisas no ramo de otimização energética. Acrescenta-se dados da EPE do ano de 2020 ao fato de que o uso de energia para refrigeração corresponde a 32% no setor residencial e 33% para os edifícios comerciais (EPE, 2020). A problemática do presente trabalho corresponde à avaliação do consumo energético e da otimização da operação do sistema de ar-condicionado VRV do 1º pavimento do prédio 04 da UPM, localizado no campus Higienópolis, em São Paulo, por meio do emprego do simulador EnergyPlus™ somado ao ambiente de programação do MATLAB®.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é elaborar por meio dos programas EnergyPlus™ e MATLAB® um ambiente de simulação que possibilite analisar e otimizar o consumo energético do sistema de ar-condicionado do 1º pavimento do Edifício Alfred Cownley Slater da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

1.3 Justificativas

Como já destacado, o consumo de energia em edificações devido ao uso de ares-condicionados encontra-se em ascensão. De acordo com a Agência Nacional de Energia

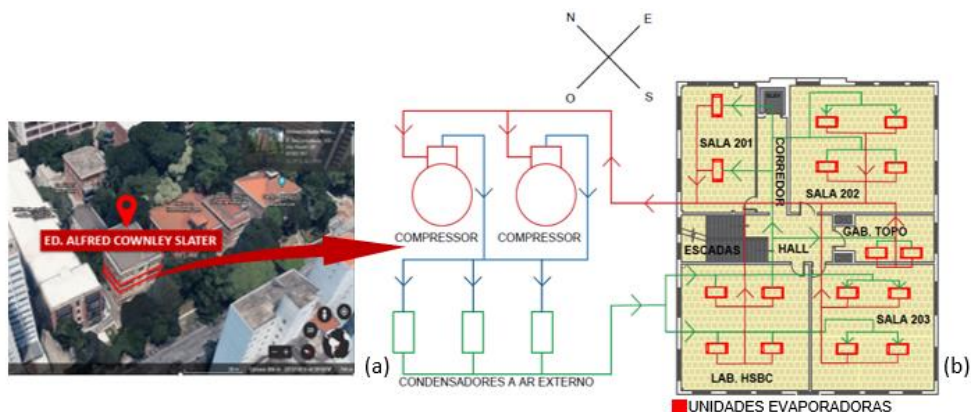
Elétrica (ANEEL) houve um reajuste no preço da energia elétrica no mês de junho de 2022 em todo o estado de São Paulo, com aumento em média de 12,07%, sendo 18,03% para alta tensão e 10,15% de baixa tensão (G1 GLOBO, 2022), comprometendo custos operacionais de setores da economia em que o consumo de energia por sistemas de refrigeração é significativo. Segundo Zhao e Yo (2017), táticas de otimização de operação em sistemas de refrigeração não são comuns, mas que as iniciativas vigentes apresentam grau assertivo de redução do consumo energético. Assim, o uso de programas acreditados na literatura possibilita a previsão do consumo energético com elevado grau de assertividade. Nesse sentido, salienta-se que o EnergyPlus™ é recomendado na literatura para a previsão da carga térmica (ENGINEERING ESSENTIALS, 2019). Contudo, esse apresenta limitações de modelagem no que tange ao sistema de compressão a vapor e não resolve problemas de otimização formulados como problemas da programação não linear. Assim, o uso desse programa associado ao simulador MATLAB®, em que modelos de alta fidelidade do sistema de compressão a vapor podem ser programados, possibilita uma investigação mais rebuscada, tornando as análises do presente trabalho importantes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Prédio 04 e o sistema de refrigeração do Edifício Moderno

O Edifício Alfred Cownley Slater, o prédio 04, está instalado no campus Higienópolis, na cidade de São Paulo, e contém salas de aula para estudantes e laboratórios. Seu primeiro pavimento é composto por 8 ambientes: salas de aula 201, 202 e 203, corredor com elevador, escadas, *hall*, gabinete de topologia e o laboratório de informática HSBC. Desses locais, as salas de aula, laboratório e gabinete são zonas climatizadas, sendo empregado um sistema do tipo VRV da fabricante Daikin™, dotado de 2 compressores e 3 condensadores a ar externos. Cada pavimento da edificação possui um sistema de ar-condicionado independente e no 1º pavimento há 16 unidades evaporadoras, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Edifício Alfred Cownley Slater e o sistema de ar-condicionado do 1º pavimento



Fonte: Google Earth (2022) (a) e setor COMAN da UPM (2017) (b), adaptado

A Tabela 1 sintetiza os dados de entrada do projeto (com exceção da carga térmica) do sistema de ar-condicionado do 1º pavimento do prédio 04 as quais são relevantes para a avaliação da carga térmica. Nesta tabela são considerados dois cenários de ventilação de ar externo, sendo no primeiro a vazão de ventilação obtida em conformidade com a portaria 3523/98 do Ministério da Saúde para qualidade do ar em ambientes climatizados e no segundo, a vazão de ar eficaz estimada pela norma ABNT 16401-3, utilizando como local estabelecimentos de ensino (salas de aula e laboratórios) nível 1 (correspondendo ao nível mínimo de vazão de ar exterior para ventilação). Para a sala 203 foi considerado a temperatura externa de 32,2°C e as cargas térmicas foram com base nas planilhas de cálculo recebidas ajustadas com suas ventilações do memorial.

Tabela 1 – Dados de entrada para a configuração do 1º pavimento do Edifício Alfred Cownley Slater

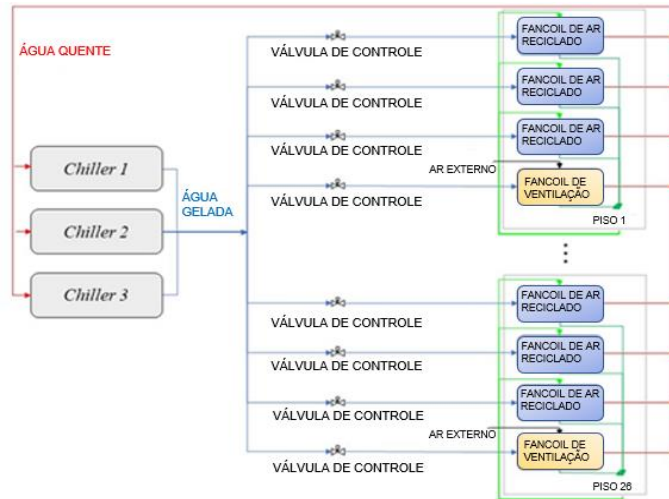
01 – Zonas climatizadas		SL. 201	SL. 202	GAB. TOPO	LAB. HSBC	SL. 203
02 - Área	m²	40,10	78,90	18,10	69,20	66,60
03 - Pessoas	qtde.	28	95	1	27	74
04 - Iluminação	W/m²	12	12	12	12	12
05 - Equipamentos	kW	5,8	1	6,5	10	2
06 - Ar Externo I	Portaria 3523/98 (m³/h)	760	2.565	55	730	2.000
07 – Ar Externo II	ABNT 16401-3 (m³/h)	590,6	1937,2	57,1	635,5	989,9
08 - Temp. Externa	°Cbs	32,2	32,2	32,2	32,2	32,9
09 - Temp. Interna	°Cbs	22	24	22	22	22
10 - UR Interna	%	50	50	50	50	50
CARGAS TÉRMICAS DE VERÃO – Ar externo I						
12 - Sensível Interno	kcal/h	10.598	13.200	7.062	14.967	11.260
13 - Latente Interno	kcal/h	1.084	3.677	39	1.045	2.864
14 - Sensível Externo	kcal/h	1.799	4.880	131	1.728	5.058
15 - Latente Externo	kcal/h	4.231	12.676	307	4.064	11.133
Total	kcal/h	17.711	34.433	7.538	21.804	30.315

Fonte: Coordenação de Obras e Manutenção da UPM (2017), adaptado

A modelagem do sistema de compressão a vapor é baseada no modelo proposto por Santos et al. (2022), o qual considera um sistema de ar-condicionado do tipo ar-água de um edifício comercial com área climatizada de 19.193,4 m², dotado de 3 *chillers* idênticos com carga nominal de 1064,4 kW. O fluido refrigerante empregado nos sistemas de refrigeração tanto do Edifício Moderno como do Edifício Alfred Cownley Slater é o R410-A e por esta razão, adaptou-se o modelo do *chiller* considerado pelos autores para a carga nominal total do pavimento considerado neste trabalho. O dimensionamento do sistema de ar-condicionado do Edifício Moderno, ilustrado na Figura 2, foi realizado pelo *software* de simulação comercial

Hourly Analysis Program (HAP) ® 5.10 e o simulador da operação de cada *chiller* foi programado por Santos et al. (2022) no MATLAB®.

Figura 2 – Esquema do sistema contido no Edifício Moderno



Fonte: Santos et. al. (2022, pg. 5), adaptado.

2.2 Sistemas de ar-condicionado VRV/VRF

Resumidamente, sistemas de ar-condicionado tem como função aquecer ou resfriar, umidificar ou desumidificar e circular ar externo no ambiente climatizado (STOECKER & JONES, 1985). Comercialmente, há uma vasta gama de ares-condicionados, sendo amplamente utilizados os equipamentos denominados *split* que emprega um sistema de compressão a vapor para a retirada de calor da zona climatizada. O fluido refrigerante que sai do evaporador adentra no compressor. Na sequência, esse é direcionado para o condensador onde o calor é expelido para o ambiente. Na região entre o condensador e evaporador existe uma válvula de expansão tendo como função reduzir a pressão no processo de resfriamento isoentálpico, fazendo com que a temperatura na entrada do evaporador esteja menor que a temperatura ambiente.

No prédio 04, o equipamento de ar-condicionado é do tipo VRV (volume de refrigerante variável) / VRF (vazão de refrigerante variável), o qual surgiu na década de 1980 no Japão como um sistema com elevada eficiência energética (AYNUR, 2010) e pode ser compreendido como um *multi-split* otimizado. Para os tipos VRF/VRV, há composição de múltiplas evaporadoras precedidas de válvulas de expansão eletrônica, minimamente dois compressores, sendo um de rotação variável e uma ou mais condensadoras (condensadoras usualmente a ar que podem conter ventiladores com rotação variável). A existência dos dispositivos (válvulas de expansão eletrônica e os dispositivos de rotação variável) passíveis de controle automático possibilitam a adoção de estratégias de controle automático, avançado e otimização, as quais permitem a redução do consumo energético. Assim, todos os sistemas

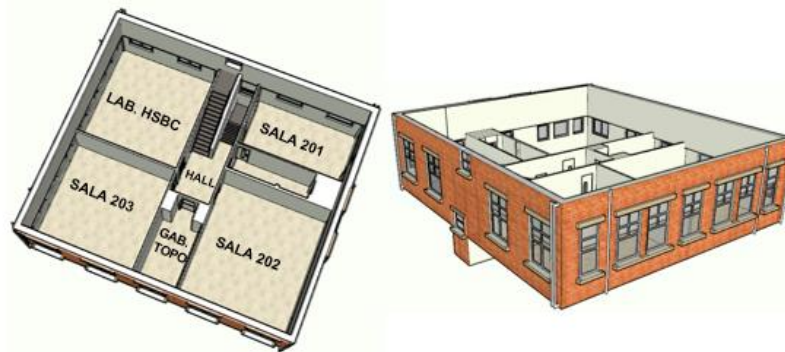
VRV/VRF do mercado são automatizados com manipulação automática das válvulas e minimamente da rotação do compressor minimizando o consumo energético. O sistema para o 1º pavimento do prédio 04 é automatizado, tendo como programa supervisor um *software* da empresa Daikin™.

2.3 Os programas EnergyPlus™ e Matlab®

O programa de avaliação energética e simulação de cargas térmica de edificações EnergyPlus™ é uma ferramenta gratuita (ENGINEERING REFERENCE, 2019) desenvolvido pelo Departamento de Energia do Estados Unidos (DOE), amplamente usado para avaliar o desempenho e consumo energético de edificações, sendo considerado um simulador de referência no setor. O EnergyPlus™ tem origem nos programas BLAST e DOE-2, criados no final dos anos de 1970 e começo de 1980 (ENGINEERING ESSENTIALS, 2019). Desta forma, o comportamento térmico do prédio 04 pode ser analisado haja vista que o programa é dotado de funções capazes de prever os efeitos dos mecanismos de transferência de calor de convecção e radiação, bem como a condução transiente em paredes, piso, teto, janelas e portas. A partir de parâmetros definidos pelo usuário, como por exemplo a quantidade e ocupação de pessoas nos ambientes, a dissipação térmica de equipamentos interiores e de sistemas de iluminação, a envoltória da edificação, os sistemas de refrigeração, ventilação e infiltração e, adicionalmente, com embasamento em dados climáticos, o programa simula de forma fidedigna os processos de transferência de energia, predizendo adequadamente a temperatura dos espaços simulados.

Em contrapartida ao parágrafo anterior, é válido mencionar algumas limitações do programa. O EnergyPlus™ não apresenta interface gráfica dificultando sua configuração a nível espacial, principalmente, em usuários que estão em primeiro contato com o simulador. Para contornar este aspecto, foram utilizadas ferramentas de modelamento 3D independentes e de interface entre o usuário e o programa EnergyPlus™. Nesse âmbito, destaca-se o Sketchup®, programa criado originalmente pela *At Last Software* e pertencente atualmente a Trimble® Navigation, possuindo versões gratuitas antigas, versões de teste e com funções limitadas, mas que atendem a demandas semelhantes ao presente trabalho. As opções de simulação termo energéticas do EnergyPlus™ podem ser integradas ao Sketchup® por meio do *plug in* gratuito Openstudio®. Na tela de modelagem do programa Sketchup®, as funções fundamentais relacionadas à previsão energética ficam separadas das opções arquitetônicas. No intuito de expor de forma clara o espaço analisado pelo trabalho, foi feita a construção do modelo 3D da parcela que compõe o 1º pavimento do Edifício Alfred Cowenly Slater, destacado na Figura 3, por meio dos recursos contidos na interface do Sketchup®. As versões utilizadas para os programas citados são o EnergyPlus™ 9.2, Openstudio® 2.9.1 e o Sketchup® 2017.

Figura 3 – Modelo 3D do 1º pavimento do prédio 04



Fonte: própria (2022)

Ainda referente às limitações do EnergyPlus™, seu relatório gerado não destrincha as parcelas contribuintes das cargas térmicas sensível e latente. Contudo, pode-se utilizar o pacote BCL (*The Building Component Library*) que funciona como uma biblioteca *online* de arquivos que podem ser inseridos no Openstudio®. A partir desse recurso, é possível a implementação da rotina *Zone Component Load Summary*, componente que introduz no relatório do simulador as contribuições térmicas, contornando a limitação do relatório emitido pelo EnergyPlus™ que apresenta apenas a carga sensível total (não os ganhos instantâneos de calor na zona, por exemplo). A rotina contém a ferramenta *The Estimated Cooling Peak Loads* que reporta valores de pico estimados e que também não fazem parte dos relatórios de balanço térmico do EnergyPlus™. Esta última ferramenta disponibiliza a visualização de uma coluna denominada *sensible – delayed* por meio da qual as estimativas das contribuições do calor sensível nos horários de pico podem ser obtidas, mostrando-se o efeito retardado. O algoritmo computacional empregado consiste na aplicação de um pulso radiante às 10 horas da manhã, efetuando-se simulações com e sem o pulso e comparam-se as cargas térmicas obtidas pelo EnergyPlus™, sendo a diferença nas cargas térmicas usada para estimar o atraso das cargas radiantes na troca térmica por convecção na zona. Isto permite verificar o efeito de acumulação de energia, por exemplo, nas paredes da edificação. Ademais, destaca-se também a possibilidade de uso do modelo da ASHRAE *clear sky* usado para estimar em dias claros a radiação solar por hora para qualquer mês dos Estados Unidos, sendo os cálculos do EnergyPlus™ estendidos para os hemisférios norte e sul (ENGINEERING REFERENCE, 2019) e a opção de *IdealAirLoads* que promove um modelo HVAC ideal baseado em uma unidade de ar-condicionado do tipo vazão de ar variável (VAV), a qual é descrita por Mitchell et al. (2018).

A versão do EnergyPlus™ utilizada apresenta modelos rigorosos e bastante completos para a simulação energética interior de edificações, mas ainda carece de modelos de alta fidelidade para descrever sistemas de compressão a vapor. Assim, uma alternativa é o

emprego de outros simuladores ou o desenvolvimento de modelos próprios. Uma ferramenta de programação importante na engenharia é o simulador MATLAB® (“Matrix Laboratory”) da MathWorks™. O programa, criado no final dos anos 70 por Cleve Moler tem uma linguagem baseada na linguagem de programação C e na manipulação de matrizes possuindo diversos algoritmos numéricos e aplicativos agrupados nas chamadas *toolboxes*, que são pastas com inúmeras rotinas numéricas ou de suporte de programação ao usuário. O MATLAB® é utilizado frequentemente pela comunidade acadêmica como ambiente de desenvolvimento e simulação de modelos de processos. Neste sentido, empregou-se o simulador desenvolvido no ambiente de programação do MATLAB® por Santos et al. (2022), o qual é baseado no simulador proposto por Pellegrini et al. (2018) para estimar e avaliar a possibilidade de se otimizar o consumo energético do sistema de compressão a vapor do prédio 04. É pertinente mencionar que a UPM detém licenças acadêmicas de aula e de pesquisa, nas versões 2018b e 7.3.0 (R2006b).

3. METODOLOGIA

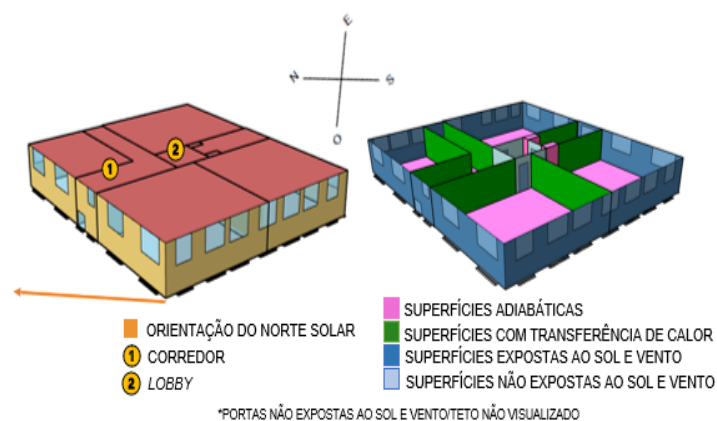
3.1 Levantamento de dados e configurações iniciais

O desenvolvimento do presente trabalho iniciou-se pela realização de revisão bibliográfica acerca dos sistemas de ar-condicionado VRV e de seu funcionamento, assim como das normas que permeiam o tema, sendo estudadas a ABNT NBR 16401-3 (ABNT, 2008) a respeito de instalações de ar-condicionado e a ABNT NBR 15220-2 (ABNT, 2003) sobre o desempenho térmico em edificações. Realizaram-se, também, estudos direcionados para o entendimento e uso dos programas EnergyPlus™, Openstudio® e SketchUp®. Saliencia-se que se pesquisaram as corretas versões dos programas a serem utilizadas para haver possibilidade de comunicação entre esses. Simultaneamente às ações destacadas, procedeu-se com a leitura e interpretação dos documentos do prédio 04, disponibilizados pela COMAN/UPM-Higienópolis dos quais constavam memoriais de cálculo com informações essenciais necessárias para o desenvolvimento do trabalho documentadas na Tabela 1 e planilha com o cálculo do projeto. Os dados contidos na Tabela 1 foram empregados para a configuração do simulador. Essa atividade corresponde à inserção de parâmetros que descrevem as zonas climatizadas e a se efetuar simulações que reproduzam as condições de projeto. Além dos documentos citados, foram disponibilizados desenhos técnicos da planta do pavimento nas extensões “pdf” e “dwg”. Em sequência, finalizou-se a etapa de coleta e levantamento de dados com duas visitas *in loco* ao prédio 04, em que se obteve uma noção espacial dos ambientes, sendo realizadas medidas complementares de cunho geométrico (e.g. caracterização do espaço *plenun*, de distâncias das janelas ao piso, pé direito das salas e medidas de altura, largura e espessura de janelas e portas) e registro dos ambientes por meio de fotos internas e externas.

Após completar a etapa descrita no parágrafo precedente, procedeu-se com a adaptação do desenho técnico fornecido pela COMAN considerando um contorno único, conservando as dimensões das áreas internas de cada ambiente do 1º pavimento por meio do programa Autocad® 2022 da Autodesk®, programa com licença de estudante dado pela UPM. Com isso, foi possível inserir o arquivo de Autocad® no programa SketchUp®. Este último programa, possibilitou a construção do modelo termo-energético 3D do pavimento estudado. Na janela inicial de predefinições do Openstudio® escolheu-se como base de premissas de modelagem aquelas correspondentes à norma ASHRAE 90.1.2010 que estipula os requisitos mínimos para eficiência energética em edificações. Para caracterizar as zonas climatizadas, selecionou-se a norma 169-2006 1A (ASHRAE, 2006) que emprega dados climáticos padrão e permite a escolha do tipo de construção. Para o tipo de edifício foi escolhida uma instituição de ensino médio americano, por ser esta a opção disponível mais próxima do ambiente acadêmico do prédio 04. Salienta-se que, posteriormente à etapa de configuração inicial, customizações foram feitas para a adequada adaptação do cenário real do prédio 04. As opções para criação de espaços e conjunto de construções foram habilitadas e, com isso, foi criado um arquivo com as predefinições necessárias para a simulação que foram feitas para esta pesquisa.

Imediatamente após os parâmetros iniciais configurados, especificou-se a geolocalização da aplicação. Conforme informações obtidas da COMAN, dados climáticos usados no projeto foram da região do aeroporto de Congonhas, São Paulo. Outrossim, a orientação do norte solar do prédio foi definida com base na rosa dos ventos adquirida nos desenhos técnicos disponibilizados, utilizando o *plug in* norte solar que obteve um ângulo de 46,83°, representado pela linha laranja na Figura 4. Em seguida, foi construído o modelo 3D termo energético da sala 201 para simulação a fim de avaliar os primeiros resultados e na sequência todos os ambientes do pavimento foram configurados.

Figura 4 – modelo termo energético 3D do 1º pavimento completo



Fonte: própria (2021)

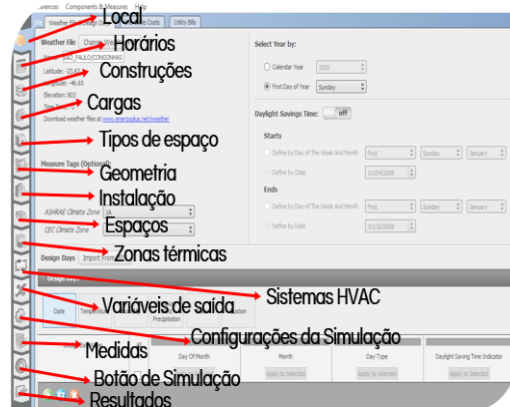
3.2 Configuração do modelo termo energético

O detalhamento da configuração do modelo se deu, primeiramente, pelas janelas consideradas como “*operable window*”, semelhantes às janelas basculantes presentes no edifício, seguindo a geometria obtida pela planta. Sua altura com referência ao piso foi de 1,4 m. Para as áreas contendo escadas, considerou-se que as janelas tinham 0,9 m de altura e largura representando a porção participante no 1º pavimento. As janelas de todo o edifício foram consideradas até um ponto extremamente próximo do teto, levando em conta, desse modo, sua parcela influente nas áreas. A exceção se deu para o ambiente gabinete de topologia onde a janela não seguia até o *plenun* e, assim, tomou-se 1 m de altura. O *plenun* foi considerado como um bolsão de ar na configuração dos materiais do teto. As portas foram padronizadas com 2,1 m de altura e 0,9 m de largura desconsiderando suas janelas, tendo como pé direito do pavimento 2,7 m. Como hipóteses simplificadoras, considerou-se que a superfície externa ao teto e o solo das zonas são adiabáticos, indicado com cor rosa na Figura 3, bem como as áreas de exaustão do gabinete de topologia, sendo assim, não relevantes para o simulador a configuração de seus componentes de construção. Ademais, não foram introduzidos elementos de sombreamento, como os edifícios vizinhos na simulação. As paredes internas evidenciadas em verde pela Figura 3 foram configuradas possuindo transferência de calor através de suas áreas. As zonas climatizadas dos pavimentos são as salas 201, 202, 203, laboratório HSBC e gabinete de topologia. As demais áreas não são refrigeradas e devido à consequente ausência de informações nos documentos disponibilizados pela CONAM, não foram consideradas fontes de calor e foram configuradas como espaço, sendo corredor e *lobby* do modelo de escola americana para que parâmetros de incidência solar influentes calculados pelo Energyplus™ nas zonas climatizadas não ficassem discrepantes.

A Figura 5 apresenta o leque de definições configuradas por meio do Openstudio®. Para a aba local, as informações pertinentes implementadas foram o arquivo climático de Congonhas, São Paulo do tipo SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) de 1978 disponibilizado no *site* oficial do EnergyPlus™ e que são recomendados para estudos de simulação energética. Os parâmetros considerados nos arquivos, visualizados pelo programa gratuito *Elements*®, versão 1.0.6, são temperatura de bulbo seco, bulbo úmido, temperatura de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, fator normal, global e difuso solar e velocidade do vento do ano completo. Ainda nessa aba, foi selecionada a zona climática 1A correspondente à área da Flórida, sendo o clima similar ao da localidade do prédio 04. Além disso, foi inserido o arquivo de dias de projeto, que leva em conta os dias com maior demanda térmica para verão e inverno. Esse contém em seu banco de dados a data, temperatura de bulbo seco e úmido, pressão atmosférica e velocidade do vento e possuem

frequências cumulativas ao longo do ano. Para o trabalho, esse arquivo de entrada foi adaptado para o período de verão na data de 28 de fevereiro, em que se observou uma maior demanda térmica no ano. Foi, ainda, atribuído como fator para o ASHRAE *clear sky* o valor de 1,2. A velocidade do vento média adotada após pesquisas de cunho climatológico para embasamento no verão de Congonhas, São Paulo, foi de 3,4 m/s.

Figura 5 – tela de detalhamento para configuração no Openstudio®



Fonte: própria (2022)

Na aba de horários, os tempos de operação para equipamentos, ocupação, dissipação térmica e temperatura interna e infiltração foram considerados todos como constantes para que os valores inteiros sejam contabilizados para a carga térmica total das zonas. Para a temperatura de resfriamento, colocou-se a temperatura das respectivas zonas e na atividade metabólica inseriu-se o valor de 115 Watts por pessoa, conforme documentação do projeto.

Referente aos aspectos construtivos do pavimento, foram definidos os materiais e composição das paredes externas e internas, janelas, portas, teto e piso. Conforme mencionado, a superfície externa ao teto e o solo foram considerados adiabáticos e, dessa forma, mantiveram-se as configurações padrão do simulador. Dado que a biblioteca do EnergyPlus™ contém materiais de construção americanos, foi necessária a criação de materiais definindo suas propriedades termo-físicas de acordo com a norma ABNT 15220-2, assim como a espessura de cada parede. Destaca-se que para o vidro foram alteradas apenas a espessura e condutividade térmica, sendo os demais parâmetros relacionados com a absortividade, emissividade e reflectância mantidos do modelo de ensino médio americano do programa. Os materiais e suas disposições em camadas compondo as paredes foram adaptados devido às poucas informações no âmbito construtivo do pavimento nos documentos recebidos. Para o piso e teto foram considerados a composição que o programa oferece, sendo concreto leve, bolsão de ar e *layers* acústicos. Ressalta-se que a rugosidade para todas as superfícies foi tomada como média. A Tabela 2 exemplifica os materiais utilizados para a simulação.

Tabela 2 – Resumo dos materiais configurados para o pavimento

ÁREA	CAMADAS	ESP. (m)	DEN. (kg/m ³)	CALOR ESPEC. (J/kg. K)	COND. TÉRMICA (W/m ² . K)	ABS. TÉR.	ABS. SOLAR	ABS. VISÍVEL
PAREDE EXTERNA	Tijolo maciço cerâmico aparente	0,09	1.600	920	0,9	0,7	0,65	0,85
	Tijolo maciço cerâmico de concreto	0,2	2.400	1.000	1,75	0,9	0,7	0,7
	Reboco claro	0,025	2.000	1.000	1,15	0,9	0,3	0,2
	Reboco claro	0,025	2.000	1.000	1,15	0,9	0,3	0,2
PAREDE INTERNA	Tijolo maciço cerâmico de concreto	0,2	2.400	1.000	1,75	0,9	0,7	0,7
	Reboco claro	0,025	2.000	1.000	1,15	0,9	0,3	0,2
JANELA	Vidro incolor "Clear"	0,003	-	-	0,9	-	-	-
PORTA	Madeira prensada	0,035	350	2.300	0,1	0,5	0,5	0,7

Fonte: própria (2022)

Foram também configurados parâmetros para a avaliação das cargas internas relativas aos equipamentos contidos nas salas, iluminação e número de pessoas. Como já salientado, os dados de entrada utilizados estão apresentados na Tabela 1. Na aba de espaços, especificaram-se adicionalmente parâmetros relacionados com a ventilação e infiltração. Para a infiltração devido à ausência de informações nos documentos coletados, baseou-se nas recomendações de ASHRAE *fundamentals* (2009) para edifícios comerciais que estipula um intervalo de 0,5 a 2 trocas de ar por hora, considerando para o trabalho os valores nessa mesma unidade de 1 (sala 201), 2 (sala 202), 1,6 (sala 203), 0,2 (gabinete de topologia) e 0,6 (laboratório HSBC) que ficaram condizentes com a vazão de ar exterior total do projeto. Em sequência, na divisão de espaços, foi necessário um estudo e uma série de simulações na qual foram verificadas as influências dos algoritmos do simulador para o cálculo da transferência de calor por convecção na carga térmica dos ambientes analisados, escolhendo-se as opções mais adequadas com o buscado. Nessa mesma seção de configuração inseriu-se a temperatura de resfriamento do ar da zona (*setpoint*) e a taxa de umidade do ar para que a umidade relativa fosse ajustada na simulação de acordo com o requerido. Salienta-se que se preocupou somente com o resfriamento, desprezando a análise do aquecimento das zonas. Os demais parâmetros em todas as abas não abordados foram deixados na forma padrão do programa. Na aba de zonas térmicas, os horários de operação da temperatura de resfriamento dos termostatos previamente configurados localizados em

cada área climatizada do pavimento foram inseridos. Ainda, habilitou-se o *IdealAirLoads* para todos os ambientes climatizados. Em configurações de simulação foram mantidas as considerações padrões do programa. Por fim, simulou-se a carga térmica de projeto do 1º pavimento do prédio 04 e com base em seu relatório, compararam-se as respostas simuladas aos dados de projeto disponibilizados pelo COMAN. Validada a carga térmica de projeto, procedeu-se com a aplicação de perturbações para avaliar a alteração na carga térmica modificando a vazão de ar exterior, o nível de ocupação e a temperatura interna da sala 202.

Com relação às adaptações no programa do Edifício Moderno pelo MATLAB®, alteraram-se as condições ambientais externas para aquelas do projeto, bem como procedeu-se à adequação dos coeficientes globais de troca térmica do condensador e evaporadora, além de se adequar a vazão de ar exterior para o condensador. Optou-se por se trabalhar com um modelo genérico, em que a evaporadora do sistema de compressão a vapor possui uma capacidade de 127,02 kW, carga térmica total simulada obtida. As simulações realizadas tiveram por objetivo otimizar a potência do compressor. Foram simulados cenários em que se manipularam a rotação do compressor e a abertura das válvulas de expansão eletrônica, mantendo-se a temperatura nas zonas controladas. Adicionalmente, foram feitas simulações em que se inclui a possibilidade de manipulação da vazão de ar para os condensadores. Os problemas de otimização foram resolvidos pelo método SQP, utilizando-se a função *fmincon* do MATLAB®. Por último, destaca-se que não foram realizadas comparações com valores de consumo energético real dado que o contrato da UPM com a empresa Daikin não possibilita a obtenção da potência do compressor em tempo real.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados destacando a carga térmica de projeto e preditos pelo simulador EnergyPlus™ e, ainda, pela rotina de pulsos do programa OpenStudio®. Os resultados mostram boa concordância entre os valores simulados e previstos no projeto para a carga térmica sensível, não sendo obtidos erros superiores a 6%. Embora tenha ocorrido para algumas zonas uma discrepância significativa da ordem de 12% na previsão da carga térmica latente, o erro de previsão na carga térmica total é pequeno ou adequado (inferior a 5%) para todas as zonas simuladas, sendo os maiores desvios da ordem de 4% observados para o gabinete de topologia e na sala 202, dado para esta última a contribuição do calor latente muito significativa (da ordem de 45%). Destaca-se também a excepcional concordância entre as previsões de carga térmica sensível obtida diretamente do simulador EnergyPlus™ e indiretamente pelo método de pulsos aplicado ao EnergyPlus™ por meio da execução da ferramenta *The Estimated Cooling Peak Loads* do OpenStudio®. Os horários de pico obtidos pela execução da rotina de pulsos são, respectivamente, para as salas 201, 202, 203, Gabinete de Topologia e Laboratório HSBC: 16:40, 9:30, 17:30, 9:00 e 17:20.

Tabela 3 – Cargas térmicas simuladas e comparativo

Zona	Carga sensível (kcal/h)		Erro (%)	Carga latente (kcal/h)		Erro (%)	Erro da carga térmica total (%)	Carga sensível pelo EnergyPlus™ (kcal/h)
	Projeto	Open Studio®		Projeto	Open Studio®			
Sala 201	12.397	12.609	1,7	5.315	4.673	12,1	2,4	12.602
Sala 202	18.080	18.337	1,4	16.353	14.723	10,0	4,0	18.315
Sala 203	16.318	17.098	4,8	13.997	12.368	11,6	2,9	17.080
Gab. Topo	7.193	6.907	4,0	346	316	8,7	4,2	6.906
Lab. HSBC	16.695	17.638	5,7	5.109	4.549	11,0	1,8	17.632

Fonte: própria (2022)

Contribuem para a carga térmica latente as cargas térmicas devidas à ventilação, infiltração e dissipação térmica de pessoas (por meio da respiração e transpiração). O cálculo da contribuição latente no projeto é feito de forma simplificada a exemplo do equacionamento apresentado por Creder (2003), não se levando em conta as reais umidades absolutas do ar externo ou interno às zonas, ou seja, a carga térmica latente predita não é dependente do efetivo estado termodinâmico do ar. Para o EnergyPlus™, efetuaram-se perturbações na umidade relativa do ar externo e constatou-se que havia alteração na carga latente e que a previsão realizada pelo simulador por meio do emprego da rotina de pulsos do programa OpenStudio® é coerente com o equacionamento rigoroso baseado na Termodinâmica em que a entalpia do estado intermediário é avaliada na temperatura de bulbo seco do ar externo e umidade absoluta do ar interno. As entalpias específicas são avaliadas conforme descrito em ASHRAE *fundamentals* (2009) e assim, considera-se mais precisa a previsão efetuada pelo simulador EnergyPlus™ por meio do uso da rotina de pulsos pelo programa OpenStudio®.

Embora as diferenças de previsão entre a carga térmica sensível prevista pelo simulador e a considerada pelo projetista sejam pequenas, destaca-se que há consideráveis diferenças de previsão nas parcelas que compõem a carga térmica sensível, ocorrendo um cancelamento de erros. A Tabela 4 apresenta as principais diferenças de previsão nas parcelas que contribuem para as cargas térmicas sensível e latente. Com relação à carga

térmica sensível, há um significativo desvio nas parcelas devidas à radiação térmica, sendo que os cálculos efetuados no projeto são simplificados e o simulador efetua cálculos rigorosos levando em conta o ângulo de incidência da radiação, horário, época do ano e geolocalização da edificação. Com relação à carga latente, como já comentado anteriormente, a maior discrepância também é devida ao cálculo simplificado realizado no projeto. As transmissões em superfícies internas não foram comparadas dado que o projeto apenas considera parede e teto, sendo o modelo simulado mais rigoroso contemplando ainda portas e piso.

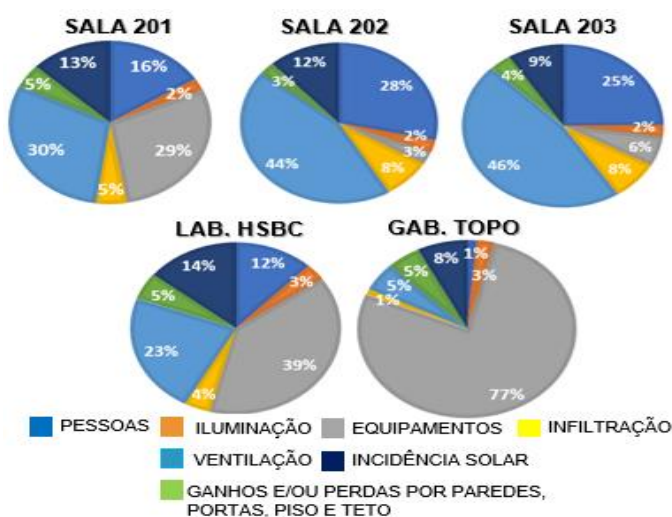
Tabela 4 – Cargas associadas a incidência solar e ar exterior

Zona	Carga térmica de incidência solar (kcal/h)			Ar exterior (infiltração e ventilação) (kcal/h)		
	Projeto	Simulador	Erro (%)	Projeto	Simulador	Erro (%)
Sala 201	2.461	2.235	9,2	6.030	6.053	0,4
Sala 202	4.539	3.894	14,2	17.556	17.259	1,7
Sala 203	3.297	2.607	21,1	16.191	16.028	1,0
Gab. Topo	814	534	34,4	438	455	3,9
Lab. HSBC	2.754	3.163	14,7	5.792	5.905	2,0

Fonte: própria (2022)

Na Figura 6, para as parcelas de cargas térmicas das zonas, percebe-se que as zonas com menos equipamentos e maior ocupação, a contribuição das parcelas devidas à ventilação e metabolismo humano são mais expressivas, onde nas salas de aula 202 e 203, a contribuição ultrapassa 50%.

Figura 6 – Parcelas contribuintes das cargas térmicas simuladas



Fonte: própria (2022)

O projeto do sistema de ar-condicionado do prédio 04 considera dois valores para a vazão de ar externo, sendo para fins de dimensionamento do sistema, considerado o maior valor, o qual foi usado nos resultados apresentados anteriormente. A vazão de ar de ventilação obtida a partir do procedimento de avaliação da norma ABNT 16401-3 (ABNT, 2008) é menor, com exceção ao gabinete de topologia na qual é próxima à norma citada, e assim na Tabela 5, mostram-se os dados de carga térmica obtidos pelo simulador para esta vazão menor e avalia-se a redução na carga térmica em relação aos valores simulados anteriormente na Tabela 3. Não se apresentam os resultados para o gabinete de topologia, uma vez que devida à baixa ocupação, mínima é a alteração na vazão de ventilação, não ocorrendo uma efetiva redução na carga estudada. Uma observação pertinente é que a redução na vazão de ventilação afeta tanto a carga térmica latente como sensível. Foi mantido as configurações dos resultados simulados na Tabela 3, modificando apenas a vazão de ventilação e verificando a redução promovida pelo programa.

Tabela 5 – Cargas térmicas simuladas para vazões de ventilação pela ABNT 16401-3 e reduções

Zona	Carga sensível total (kcal/h)	Redução com base nos dados da simulação (Tabela 3) (%)	Carga latente total (kcal/h)	Redução com base nos dados da simulação (Tabela 3) (%)	Carga térmica total (kcal/h)	Redução com base nos dados da simulação (Tabela 3) (%)
Sala 201	12.223	3,1	3.966	15,1	16.189	6,3
Sala 202	17.072	6,9	12.450	15,4	29.522	10,7
Sala 203	14.510	15,1	8.042	35,0	22.552	23,5
Lab. HSBC	17.435	1,2	4.144	8,9	21.579	2,7

Fonte: própria (2022)

A Tabela 4 evidencia que a redução do consumo de energia ao se adotar o padrão ABNT para o cálculo da vazão de ar externo é mais significativa para as salas em especial para as maiores salas de aula, em que há na condição de projeto mais estudantes. Consequentemente, percebe-se que é recomendado não se operar o sistema de ar-condicionado com uma vazão de ar de renovação constante, como atualmente ocorre e que a vazão de ar de renovação deveria ser obtida conforme a real ocupação prevista para a sala, ou seja, com base no número de alunos matriculados numa dada disciplina. Nesse sentido, o sistema de automação do sistema VRV poderia ajustar a vazão de ar de renovação para cada

horário de aula. Nota-se que apenas a redução na premissa de cálculo da vazão de ar exterior levou a uma redução de energia na sala 203 de 23,5%.

Para se avaliar o efeito da ocupação na carga térmica de refrigeração, efetuaram-se simulações com os seguintes números de pessoas recomendadas na pandemia do vírus SARS-CoV-2 nas zonas em que as aulas são ministradas: 13 (sala 201), 38 (sala 202), 33 (sala 203), 13 (laboratório HSBC). Mais uma vez, mantiveram-se os parâmetros da simulação da Tabela 3, modificando apenas o número de pessoas. Os resultados são apresentados na Tabela 6. A maior redução na carga térmica de 16,9% foi encontrada na sala 202 para a qual o projeto considera uma ocupação de 95 pessoas, número muito superior ao efetivo número de estudantes matriculados nos cursos de engenharia para a sala de aula. No gabinete de topologia, devido ao número de 1 pessoa considerada em projeto, não foi feita modificação.

Tabela 6 – Cargas térmicas simuladas e reduções associadas a pessoas

Zona	Carga sensível total (kcal/h)	Redução com base nos dados na simulação (Tabela 3) (%)	Carga latente total (kcal/h)	Redução com base nos dados na simulação (Tabela 3) (%)	Carga térmica total (kcal/h)	Redução com base nos dados na simulação (Tabela 3) (%)
Sala 201	11.647	7,6	4.193	10,3	15.840	8,3
Sala 202	14.993	18,2	12.465	15,3	27.458	16,9
Sala 203	14.379	15,9	11.053	10,6	25.432	13,7
Lab. HSBC	16.743	5,1	4.100	9,9	20.843	6,1

Fonte: própria (2022)

O simulador EnergyPlus™ pode ser usado para se avaliar o efeito de alterações nos *setpoints* de temperatura das zonas climatizadas. Na Tabela 7, há resultados de uma simulação, em que para a sala 202, alterou-se a temperatura interna de 24°C para 22°C, mantendo-se a temperatura de insuflamento de ar de 20°C, conforme documentado no projeto. Percebe-se que enquanto ocorre um aumento da carga térmica sensível, como esperado, há uma diminuição da carga térmica latente, fenômeno que aparece reportado na literatura por Stocker et al. (1985) ocasionando uma diminuta alteração no aumento da carga térmica total. Assim, promover uma fixação do *setpoint* por instâncias gerenciais não trará reduções no consumo de energia tão significativas como aquelas promovidas pela regulação da vazão de ar externo.

Tabela 7 – Mudanças na sala 202 pelo parâmetro de temperatura interna

Zona	Carga sensível total (kcal/h)	Aumento da carga térmica (%)	Carga latente total (kcal/h)	Redução da carga térmica (%)	Carga térmica total (kcal/h)	Aumento da carga térmica (%)
Sala 202	20.994	4,4	16.153	1,2	37.147	1,9
Cargas ajustadas na planilha oficial (kcal/h): 20.109 (sensível), 16.353 (latente) e 36.462 (total)						

Fonte: própria (2022)

Os resultados evidenciam o uso de modelos rigorosos pelo simulador EnergyPlus™ e atestam a sua capacidade de previsão da carga térmica predial. Os dados simulados mostram a potencialidade de uma ferramenta computacional que emprega modelos fenomenológicos rigorosos para avaliar o consumo energético. A fim de mostrar que diferentes consumos energéticos são obtidos conforme a incorporação ou não da manipulação da rotação dos ventiladores, apresenta-se os resultados de um modelo rigoroso para um sistema de compressão a vapor que emula o comportamento do sistema no 1º pavimento do prédio 4. Na Tabela 8 a situação 1 corresponde a um cenário onde a vazão de ar pelo condensador está constante, tendo como manipulação pelo programa a válvula de expansão eletrônica e a rotação do compressor. Para a situação 2 incluiu-se a rotação dos ventiladores na otimização.

Tabela 8 – Reduções percentuais da potência do compressor no MATLAB®

Carga térmica total simulada das evaporadoras	
Situação 1 - Redução do consumo elétrico do compressor em (%):	
	0,2
Situação 2 - Redução do consumo elétrico do compressor em (%):	
	13,3

Fonte: própria (2022)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O EnergyPlus™ associado à ferramenta SketchUp® por meio do *plug-in* Openstudio® se apresentou como uma importante ferramenta para a avaliação de cargas térmicas, prevendo o efeito de perturbações e possibilitando verificar que tipos de manipulações podem ser feitas visando minimizar o consumo energético. Viu-se que uma redução na ventilação e ocupação comparado com o projeto podem levar a uma diminuição da carga térmica considerável. O método de pulsos utilizado no componente *Zone Load Component Summary* destacou-se por dividir de forma condizente, em porcentagem, as parcelas térmicas de todas

as zonas além de estar alinhado com o EnergyPlus™. A presente pesquisa agradece ao Engenheiro Matheus Bernardi da COMAN no fornecimento dos dados de projeto reproduzidos pelo simulador. As pequenas discrepâncias são devidas a um maior rigor matemático da modelagem pelo simulado, que possibilita avaliar efeitos decorrentes de variações ambientais e de ocupação. O simulador do Edifício Moderno foi adaptado a fim de emular o comportamento do sistema de compressão a vapor do 1º pavimento do prédio 4 para verificar se há vantagens com a realização da otimização da operação. Os resultados mostram, de forma qualitativa, a possibilidade de redução em cerca de 13% no consumo energético.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 169-2006**: Wheather Data for Buildings Design Standarts. Atlanta/Geórgia: ASHRAE, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 90.1-2010**: Energy Standard for Buildings Except Low Rise Residential Buildings. Atlanta/Geórgia: ASHRAE, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook Fundamentals**, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401-3**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AYNUR, Tolga N. Variable refrigerant flow systems: A review. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 42, n. 7, p.1106-1112, jul. 2010.

CREDER, H. **Instalações de Ar Condicionado**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 6ª Edição. 2003.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN INTERATIVO: 5.1**. Centrais Elétricas – Total (Serviço Público + Autoprodução). Rio de Janeiro, 2020. EPE. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>. Acesso em: 30 mai. 2022. EPE –

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial Brasileiro**: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética, Rio de Janeiro: EPE, 2018.

G1 GLOBO. Conta de luz: Aneel aprova reajuste para tarifas da Enel SP, com aumento médio para o consumidor de 12,04%. [S.l., 2022]. **G1 GLOBO**. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/06/28/conta-de-luz-aneel-aprova-reajuste-para-tarifas-da-enel-sp-com-aumento-medio-para-o-consumidor-de-1204percent.ghmtl>.

Acesso em: 28 jun. 2022.

MITCHELL, John W.; BRAUN, James E. **Princípios de Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar em Edificações**. São Paulo: Grupo GEN, 2018. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521635086/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

PELLEGRINI, R.L.S; DE ARAÚJO, N.M.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M. Modelling a water-air conditioning system of a large commercial building for energy consumption evaluation. **Computer Aided Chemical Engineering**. Elsevier, v. 44, Part C, p. 1963-1968, 2018

PEREIRA, M. D. OLIVEIRA, A. S. Análise do cálculo de carga térmica de uma câmara de resfriamento de carcaças bovinas com capacidade de 42 toneladas. **The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC, Vol. 06 N. 05 (2020)**. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cp/n118/16834.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2022.

SANTOS, Catarina G.; RUIVO, Júlia P.; GASPARINI, Letícia B.; ROSA, Maria T. M. G.; ODLOAK, Darci; GOUVÊA, Míriam T. Steady-state simulation and optimization of an air-cooled chiller. **Case Studies in Thermal Engineering**. v. 36, p. 5-24. 2022.

STOECKER, W. F.; JONES, J.W. **Refrigeração e ar condicionado**. McGraw-Hill, 1985.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus™ version 9.2.0 Documentation: Engineering Reference**. University of Illinois and The Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus™ version 9.2.0 Documentation: Engineering Essentials**. University of Illinois and The Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019.

VAKILOROAYA, V.; SAMALI, B.; FAKHAR, A.; PISHGHADAM, K. A review of different strategies for HVAC energy saving. **Energy Conversion and Management**, v. 77, p. 738-754, 2014.

ZHAO, Z.; YU, N. The application of advanced control technologies in air conditioning system – a review. **Advances in Building Energy Research**, [S.l.], v.11, n. 1, p. 52-66, 2017.

Contatos: guilherme.leandrin@gmail.com e miriam.gouvea@mackenzie.br