

ANÁLISE ENERGÉTICA PREDIAL ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Data de submissão: 07/04/2023

Data de aceite: 02/05/2023

Guilherme Antonio dos Santos

Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo, Brasil
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2331-637X>

Lucas Francisco Rodrigues

Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo, Brasil
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2384-7445>

Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa

Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo, Brasil
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9673-9659>

Miriam Tvrzská de Gouvêa

Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo, Brasil
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6568-2634>

RESUMO: O presente trabalho apresenta a simulação da carga térmica das zonas climatizadas do 1º pavimento do edifício Alfred Cownley Slater (prédio 04) da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), em Higienópolis, utilizando o

simulador EnergyPlus™, interagindo com o programa de modelagem 3D SketchUp® por meio do *plug-in* Openstudio®. As cargas simuladas foram utilizadas como parâmetros de entrada para emular um sistema de compressão a vapor codificado no ambiente de programação do MATLAB®, que possibilita otimizar a operação do sistema de compressão a vapor. 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 do sistema VRV, da rotação do compressor e da vazão de ar externo para o condensador do sistema de compressão a vapor.

PALAVRAS-CHAVE: EnergyPlus™. Carga térmica predial. VRV. Otimização.

BUILDING ENERGY ANALYSIS THROUGH COMPUTATIONAL SIMULATION

ABSTRACT: The present work presents the simulation of the thermal load of the climatized zones of the 1st floor of the Alfred Cowmley Slater building (building 04) of Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), in Higienópolis, using the EnergyPlus™ simulator, interacting with the 3D modeling program SketchUp® via the Openstudio® plug-in. The simulated loads were used as input parameters for an emulator of the vapor compression system coded in the MATLAB® programming environment, which makes it possible to optimize the operation of the vapor compression system. The configuration in EnergyPlus™ was done using the project documents provided by the Coordination of Works and Maintenance (COMAN) of the UPM, comparing the simulated and projected thermal loads. The results attest that EnergyPlus™ reproduced the thermal conditions foreseen in the official pavement design and allow an evaluation of the effect of disturbances on the thermal load. Still, through MATLAB®, a reduction in energy consumption of around 13% was shown, which can be achieved with adapted manipulations of the opening of electronic expansion valves of the VRV system, the rotation of the compressor and the flow of external air to the condenser of the steam room system.

KEYWORDS: EnergyPlus™. Building thermal load. VRV. Optimization.

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 ar-condicionados pode crescer 5,4% ao ano e atingir 48,5 TWh em 2035 (EPE, 2018). A fim de realizar um processo de 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).

O cenário do consumo energético atual evidencia a necessidade de iniciativas de pesquisas no ramo de otimização energética. Nesse viés, 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. Para tanto, elaborou-se por meio dos programas EnergyPlus™ e MATLAB®, um ambiente de simulação que possibilita analisar e otimizar

o consumo energético do sistema de ar-condicionado do 1º pavimento do Edifício Alfred Cownley Slater da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Segundo Zhao e Yo (2017), estratégias de otimização da operação de sistemas de refrigeração não são comuns, mas que as iniciativas vigentes evidenciam a possibilidade de redução do consumo energético. 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 programa 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 simulador associado ao simulador MATLAB®, em que modelos de alta fidelidade do sistema de compressão a vapor podem ser programados, possibilita uma investigação mais acurada.

A fim de detalhar o objeto de estudo, destaca-se que o Edifício Alfred Cownley Slater, também denominado como prédio 04, está instalado no campus Higienópolis, na cidade de São Paulo, e contém salas de aula para estudantes e laboratórios. Seu primeiro pavimento, ilustrado na Figura 1, 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.

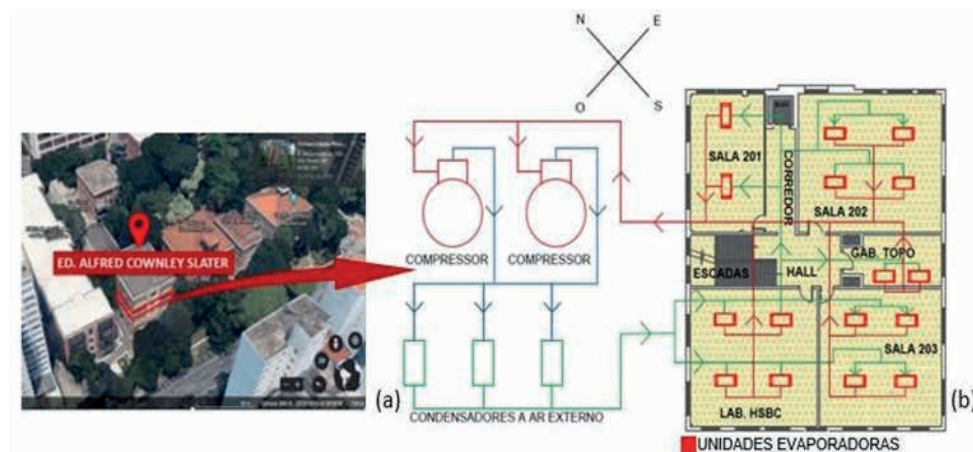


Figura 1 – Edifício Alfred Cownley Slater e o sistema de ar-condicionado do 1º pavimento
Fontes: Google Earth (2022) (a) e adaptado de documentos do setor COMAN da UPM (b)

A Tabela 1 sintetiza os dados de projeto do sistema de ar-condicionado do 1º

pavimento do prédio 04. 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 locais 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 considerada a temperatura externa de 32,2°C e as cargas térmicas são aquelas documentadas no memorial de cálculo do projetista do sistema de ar condicionado.

01 – Zonas climatizadas		SL. 201	SL. 202	GAB. TOPO	LAB. HSBC	SL. 203
02 - Área	m ²	40,10	78,90	18,10	69,20	66,60
03 - Pessoas	qtde.	28	95	1	27	74
04 - Iluminação	W/m ²	12	12	12	12	12
05 - Equipamentos	kW	5,8	1	6,5	10	2
06 - Ar Externo I	Portaria 3523/98 (m ³ /s)	0,211	0,712	0,015	0,203	0,556
07 – Ar Externo II	ABNT 16401-3 (m ³ /s)	0,164	0,538	0,016	0,177	0,275
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 – Vazão de Ventilação: Ar externo I						
11 - Sensível Interno	kW	12,326	15,352	8,213	17,407	13,095
12 - Latente Interno	kW	1,261	4,276	0,045	1,215	3,331
13 - Sensível Externo	kW	2,092	5,675	0,152	2,010	5,882
14 - Latente Externo	kW	4,921	14,742	0,357	4,726	12,948
Total	kW	20,600	40,045	8,767	25,358	35,256

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

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

Com relação à modelagem do sistema de compressão a vapor, essa 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. Demais detalhes da codificação e equacionamento do modelo de sistema de compressão a vapor são apresentados em Santos et al. (2023).

2 | METODOLOGIA

Os dados da Tabela 1 foram empregues para a configuração do simulador EnergyPlus™. Essa atividade corresponde à inserção de parâmetros que descrevem as zonas climatizadas e a se efetuar simulações que reproduzam as condições de projeto.

Inicialmente, 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. 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.

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 2.

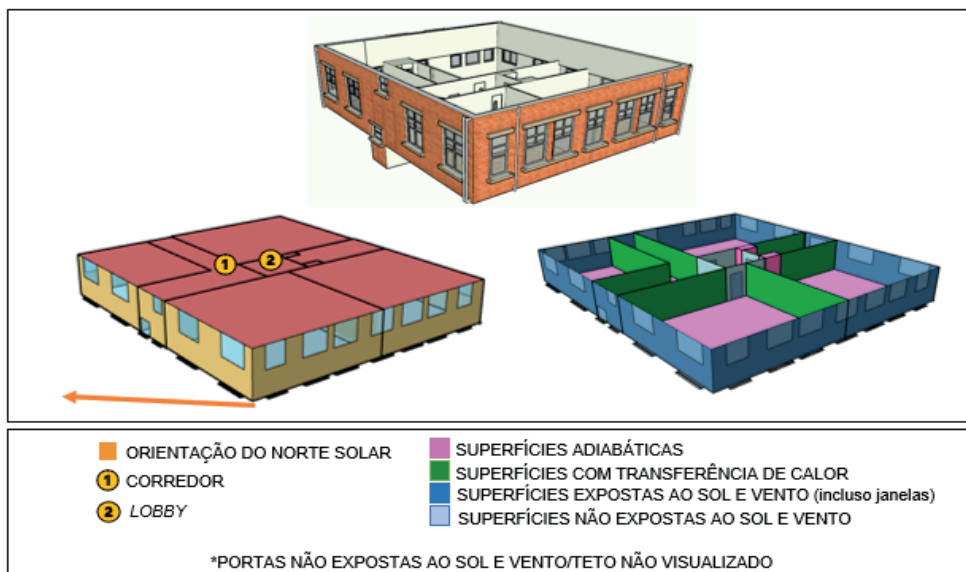


Figura 2 – modelo termo energético 3D do 1º pavimento completo

Fonte: própria (2022)

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. 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 *plenum*, o qual 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 sobre o *plenum* e o solo das zonas são adiabáticos, indicado com cor rosa na Figura 2, 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 2 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 COMAN, 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.

O programa Openstudio® foi usado como ambiente de interface entre o usuário e o simulador EnergyPlus™. Com relação às abas deste programa que permitem detalhar o modelamento, 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. Ainda nessa aba, foi selecionada a zona climática 1A correspondente à área da Flórida, sendo o clima considerado 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. 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.

Na aba “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 W/pessoa, conforme documentação do projeto.

Referente aos aspectos construtivos do pavimento, definiram-se os materiais e composição das paredes externas e internas, janelas, portas, teto e piso como apresentado na Tabela 2. 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 absorvidade, 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.

Parede externa	Tijolo maciço cerâmico aparente, tijolo maciço cerâmico de concreto e reboco claro
Parede interna	Reboco claro, tijolo maciço cerâmico de concreto e reboco claro
Piso	Concreto leve, bolsão de ar e layers acústicos
Teto	Concreto leve, bolsão de ar e layers acústicos
Janela	Vidro incolor
Porta	Madeira prensada

Tabela 2 – Aspectos construtivos do 1º Pavimento

Fonte: Santos et al. (2023), adaptado

Foram também configurados parâmetros para a avaliação das cargas internas relativas aos equipamentos contidos nas salas, iluminação e número de pessoas. Na aba “espaços”, referente à infiltração devido à ausência de informações nos documentos coletados, baseou-se nas recomendações de ASHRAE (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 a realização de uma série de simulações para a verificação das 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 para a validação do modelo com os dados de projeto. Nessa mesma seção de configuração, inseriu-se a temperatura de resfriamento do ar da zona (parâmetro do simulador denominado de *setpoint*) e a taxa de umidade do ar para que a umidade relativa fosse ajustada na simulação de acordo com o requerido. Os demais parâmetros em todas as abas não abordados foram deixados na forma padrão do programa. Na aba “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. 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 realizadas no programa de simulação da operação de um *chiller* do Edifício Moderno de Santos et al. (2022), alteraram-se as condições ambientais externas para aquelas do projeto do prédio 04, 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 130,026 kW, carga térmica total simulada pelo EnergyPlus™. As simulações do sistema de compressão a vapor realizadas neste trabalho tiveram por objetivo reduzir 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 incluiu 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®.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os resultados destacando a carga térmica de projeto e previstos pelo simulador EnergyPlus™. 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%). Dois comentários são pertinentes nesse momento. Primeiramente, deve-se ressaltar que a previsão da carga latente de ventilação pela projetista não leva em conta as propriedades termodinâmicas reais dos ares externo e interno, como será comentado adiante. O simulador EnergyPlus™ não disponibiliza nos relatórios as predições realizadas para a carga térmica latente. Dessa forma, nesse trabalho usou-se um recurso do programa Openstudio® para a obtenção da carga latente como será comentado no próximo parágrafo e para tanto os horários de pico adotados para a estimativa da carga latente 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.

Zona	Carga sensível(kW)		Erro(%)	Carga latente(kW)		Erro (%)	Erro da carga térmicatotal (%)
	Projeto	Open Studio®		Projeto	Open Studio®		
Sala201	14,418	14,664	1,7	6,181	5,435	12,1	2,4
Sala202	21,027	21,326	1,4	19,018	17,123	10,0	4,0
Sala203	18,978	19,885	4,8	16,278	14,384	11,6	2,9
Gab.Topo	8,366	8,033	4,0	0,402	0,368	8,7	4,2
Lab. HSBC	19,416	20,513	5,7	5,942	5,290	11,0	1,8

Tabela 3 – Cargas térmicas simuladas e comparativo

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 do prédio 04 foi realizado 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 simulador 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 (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.

Zona	Carga térmica de incidênciasolar (kW)			Ar exterior (infiltração eventilação) (kW)		
	Projeto	Simulador	Erro (%)	Projeto	Simulador	Erro (%)
Sala201	2,862	2,599	9,2	7,013	7,040	0,4
Sala202	5,279	4,529	14,2	20,418	20,072	1,7
Sala203	3,834	3,032	21,1	18,830	18,641	1,0
Gab.Topo	0,947	0,621	34,4	0,509	0,529	3,9
Lab. HSBC	3,203	3,679	14,7	6,736	6,868	2,0

Tabela 4 – Cargas associados a incidência solar e ar exterior

Fonte: própria (2022)

Na Figura 3, 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%.

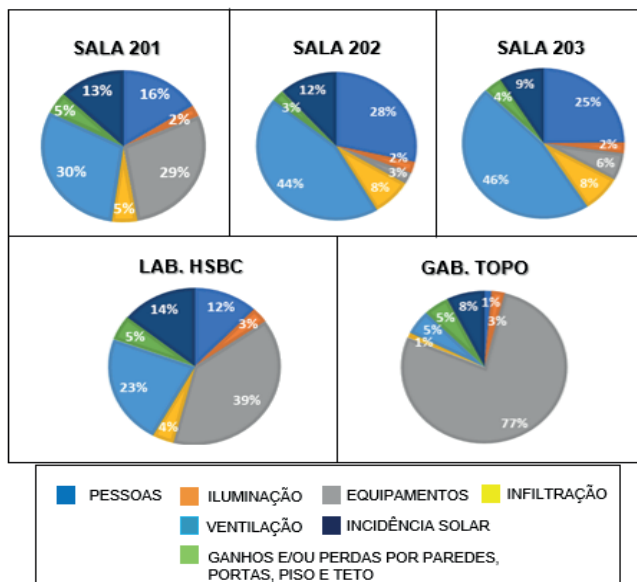


Figura 3 – Parcelas contribuintes das cargas térmicas simuladas

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 do gabinete de topologia na qual é próxima à norma citada, e assim na Tabela 5, mostram-se os valores 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 devido 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. Foram mantidas as configurações dos resultados simulados na Tabela 3, modificando apenas a vazão de ventilação e verificando a redução promovida pelo programa.

Zona	Carga sensível total (kW)	Redução com base nos dados da simulação (Tabela 3)(%)	Carga latente total (kW)	Redução com base nos dados da simulação (Tabela 3)(%)	Carga térmica total (kW)	Redução com base nos dados da simulação (Tabela 3) (%)
Sala 201	14,215	3,1	4,612	15,1	18,827	6,3
Sala 202	19,855	6,9	14,479	15,4	34,334	10,7
Sala 203	16,875	15,1	9,353	35,0	26,228	23,5
Lab. HSBC	20,277	1,2	4,819	8,9	25,096	2,7

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

Fonte: própria (2022)

A Tabela 5 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. Conseqüentemente, 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.

Zona	Carga sensível total (kW)	Redução com base nos dados na simulação (Tabela 3)(%)	Carga latente total (kW)	Redução com base nos dados na simulação (Tabela 3)(%)	Carga térmica total (kW)	Redução com base nos dados na simulação (Tabela 3) (%)
Sala 201	13,545	7,6	4,876	10,3	18,421	8,3
Sala 202	17,437	18,2	14,497	15,3	31,934	16,9
Sala 203	16,723	15,9	12,855	10,6	29,578	13,7
Lab. HSBC	19,472	5,1	4,768	9,9	24,240	6,1

Tabela 6 – Cargas térmicas simuladas e reduções associadas a pessoas

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.

Zona	Carga sensível total (kW)	Aumentoda carga térmica (%)	Carga latente total (kW)	Redução da carga térmica (%)	Carga térmica total (kW)	Aumento da carga térmica (%)
Sala 202	24,416	4,4	18,786	1,2	43,202	1,9

Cargas ajustadas na planilha oficial (kW): 23,387 (sensível), 19,019 (latente) e 42,406 (total)

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

Fonte: própria (2022)

A fim de mostrar que diferentes consumos energéticos são obtidos conforme a incorporação ou não da manipulação da rotação dos ventiladores, apresentam-se os resultados de simulação do modelo rigoroso para um sistema de compressão a vapor que emula o comportamento do sistema no 1º pavimento do prédio 04. As reduções percentuais da potência do compressor obtidos pela simulação realizada no MATLAB® foram de 0,2% na situação 1, que corresponde a um cenário onde a vazão de ar pelo condensador está constante, sendo manipuladas pelo programa as variáveis referentes a válvula de expansão eletrônica e a rotação do compressor, e 13,3% para a situação 2, que incluiu como variável de decisão do problema de otimização, a rotação dos ventiladores. Assim, conclui-se que é

importante a ampliação das variáveis manipuladas consideradas no sistema de automação do sistema de ar condicionado VRV e que a incorporação da etapa de otimização em tempo real da operação que consideraria inclusive dados de ocupação levaria a significativas reduções do consumo energético.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O simulador EnergyPlus™ foi capaz de prever o efeito de perturbações e possibilitou verificar que tipos de manipulações podem ser feitas visando minimizar o consumo energético. As pequenas discrepâncias entre os valores simulados pelo programa EnergyPlus™ e os dados de projeto são devidas a um maior rigor matemático da modelagem do simulador EnergyPlus™, que possibilita avaliar efeitos decorrentes de variações ambientais, além de ocupação. Viu-se que uma redução na ventilação e ocupação podem levar a uma diminuição da carga térmica considerável superior a 20%. A simulação e otimização da operação do chiller do 1º pavimento do prédio 04 mostrou a possibilidade de redução em cerca de 13% no consumo energético mediante a incorporação no sistema de automação como variável manipulada, a rotação dos ventiladores dos condensadores a ar do sistema de compressão a vapor do 1º pavimento.

AGRADECIMENTOS

O autor Guilherme Antonio dos Santos agradece a bolsa de Iniciação Científica na modalidade “MackPesquisa” concedida pela UPM. Ademais, a autora Míriam Trzská de Gouvêa agradece os recursos obtidos por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, por meio do processo 06/50049-2. Os autores de forma geral agradecem ao engo. Matheus Alvarenga Bernardi do setor de Coordenação de Obras e Manutenção (COMAN) da UPM pelo fornecimento dos documentos citados no projeto e pelas dúvidas retiradas com relação às considerações tomadas para o dimensionamento da carga térmica do 1º pavimento.

REFERÊNCIAS

ASHRAE - 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.

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

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.

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.

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.

SANTOS, G. A. dos, RODRIGUES, L. F., ROSA, M. T. de M. G., & GÔUVEA, M. T. de. (2023). **Simulação de carga térmica e otimização de sistema de ar-condicionado utilizando a integração EnergyPlus™ / MATLAB®**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, 9(2), 15337–01e. <https://doi.org/10.18540/jcecvl9iss2pp15337-01e>

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 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.