

“INOVAÇÃO TECNOLÓGICA: Os novos rumos da Engenharia Mecânica e Industrial.”

CÁLCULO SIMPLIFICADO DE CARGA TÉRMICA EM EDIFICAÇÕES

Daniele Marques Ferreira ⁽¹⁾ (danieleferreira075@gmail.com), Tiago de Freitas Paulino ^(1,2) (tiagopaulino@cefetmg.br), Willian Moreira Duarte ⁽³⁾ (willianmoreiraduarte@gmail.com), Alex Henrique Coutinho Santos ⁽²⁾ (alexhcsantos@gmail.com), Paulo Eduardo Lopes Barbieri ⁽²⁾ (barbieri@cefetmg.br)

⁽¹⁾ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Materiais

⁽²⁾ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

⁽³⁾ Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

RESUMO: *Para o bom uso do sistema de ar condicionado é necessário o adequado dimensionamento da carga térmica. A carga térmica (taxa de transferência de calor a ser removida do ambiente climatizado) depende de diversos fatores como: as dimensões do ambiente, número de pessoas presentes, condições climáticas, entre outros. Esse cálculo pode ser realizado em softwares comerciais gratuitos ou licenciados. Neste trabalho buscou-se aperfeiçoar uma metodologia utilizando a linguagem de programação Python realizando-se o cálculo para dois ambientes localizados em três diferentes cidades. Os cálculos foram baseados nas normas ABNT NBR 15220 e ABNT NBR 16401. Para efeito comparativo utilizou-se o software comercial Block Load. Observou-se, que o perfil de carga térmica mensal para ambos os ambientes, obtidos pelo Python e Block Load apresentaram linha de tendência similar. No que se refere a carga térmica máxima considerando uma variação de +/-20% ocorreu uma adequação de 67% dos pontos para o ambiente 1 e 78% para o ambiente 2.*

PALAVRAS-CHAVE: *Cálculo de carga térmica, Simulação, Sistema de refrigeração.*

SIMPLIFIED CALCULATION OF COOLING CAPACITY IN BUILDINGS

ABSTRACT: *The proper use of air conditioning system requires cooling capacity calculation due to thermal load. The cooling capacity (heat transfer rate to be removed from the environment) depends on several factors such as: size of environment, number of people on it, weather conditions among others. This calculation can be performed on free or licensed commercial software. In this work, we sought to improve a methodology using the Python programming language, performing the calculation for two environments located in three different cities. The calculations were based on ABNT NBR 15220 and ABNT NBR 16401 standards. For comparative purposes, the commercial software Block Load was used. It was observed that the cooling capacity for both environments, obtained by Python and Block Load, showed a similar trend line. Regarding the maximum cooling capacity considering a variation of +/-20%, there was an adequacy of 67% of the analyzed points for environment 1 and 78% for environment 2.*

KEYWORDS: *Calculation of cooling capacity, Simulation, Refrigeration system.*

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Estar em um ambiente bem climatizado é uma das preocupações do homem. Antigamente em períodos de frio intenso, o fogo era utilizado para o aquecimento. Porém, quando o problema era o calor excessivo não havia meios de resfriar o local. A primeira máquina de climatização de ambiente, foi criada pelo engenheiro Wills Carrier, em 1902, que tinha como objetivo reduzir a umidade do ambiente, e funcionava pelo princípio da retirada de calor do interior de um local e levando-o para o ambiente externo. Atualmente, esse processo foi aperfeiçoado. Os sistemas de ar condicionado atuais são mais rápidos, gastam menos energia, e são mais silenciosos (TÔRRES, 2019).

O ar condicionado nada mais é que um sistema com o objetivo proporcionar conforto térmico, a pessoas ou obter condições climáticas especiais exigidas por equipamentos ou processos em um ambiente fechado. O condicionamento do ar é o tratamento do ar que controla temperatura do ar, humidade, distribuição e pureza. Seu funcionamento consiste na troca de temperatura do ar ambiente, que passa pela serpentina do evaporador, neste contato, tem sua temperatura modificada podendo ter queda ou aumento de acordo com ciclo utilizado, reduzindo a umidade relativa do ar. (ARAUJO, 2011).

Para dimensionamento do sistema de refrigeração é essencial realizar o cálculo de carga térmica, e para isso leva-se em conta diversos fatores como: orientação da edificação, ganhos e perdas térmicas, a ventilação, e insolação (STORTI, 2015).

A carga térmica corresponde tanto ao calor sensível quanto ao calor latente que deve ser retirado do ambiente. Calor sensível é a energia térmica retirada ou acrescentada de um ambiente, em função da diferença de temperatura entre os meios, podendo ser produzida por condução, convecção e radiação. Calor latente é o calor presente na mudança de estado de uma substância, sem alteração em sua temperatura (PENA, 2002; STORTI, 2015).

Geralmente esse cálculo é realizado em softwares comerciais gratuitos ou licenciados. Como resultado do cálculo, o sistema de ar condicionado é escolhido para atender a condição crítica de verão. Ocorre, porém, que em alguns trabalhos de pesquisa, faz-se necessário o conhecimento da carga térmica a ser removida do ambiente em cada hora do ano e esta informação precisa estar disponibilizada na ferramenta de modelagem do sistema de refrigeração. Para atender a esse requisito, neste trabalho a carga térmica de resfriamento foi calculada usando as normas ABNT NBR 15220 e ABNT NBR 16401 como referências. O cálculo foi desenvolvido em linguagem de

programação Python. O modelo calculou a carga térmica para dois diferentes ambientes (ambiente 1 e ambiente 2), cada um localizado em três cidades do Brasil (Belém/PA, Porto Alegre/RS e São Paulo/SP).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O cálculo da carga térmica foi desenvolvido tendo como base as normas ABNT NBR 15220 e ABNT NBR 16401 e já havia sido previamente apresentado (Duarte *et al.* 2020a, Duarte *et al.* 2020b). As áreas do ambiente foram obtidas pelas Equações 1, 2 e 3. A Equação 1 apresenta o cálculo da área de parede (A_{Pa}) em metros quadrados (m^2), nela L representa a largura (m) e C o comprimento (m). A Equação 2 apresenta o cálculo da área do teto (A_T) em metros quadrados (m^2) e por fim, pela Equação 3 obtém-se a área do piso (A_{Pi}) em metros quadrados (m^2).

$$A_{Pa} = 2. (L. C) \quad (1)$$

$$A_T = L. C \quad (2)$$

$$A_{Pi} = L. C \quad (3)$$

O cálculo do calor gerado por pessoas (\dot{Q}_{pes}) em Watts é obtido pela Equação 4 onde N é o número de pessoas e F a energia gerada por pessoa.

$$\dot{Q}_{pes} = N. F \quad (4)$$

A Equação 5 fornece o calor gerado pela iluminação (\dot{Q}_{ilu}) em Watts. Nela, I_{lu} representa a carga térmica gerada pela iluminação por metro quadrado de edificação.

$$\dot{Q}_{ilu} = I_{lu}. (L. C) \quad (5)$$

A carga térmica imputada pelo sol (\dot{Q}_{sol}) em Watts é obtida pela Equação 6, onde F_{S_C} e F_{S_P} são o fator solar de cobertura e da parede, respectivamente. I representa a radiação solar horária e foi obtida no site do INMET. Por fim, a variável horário representa o horário real no qual a radiação

solar alcançou a edificação e a variável φ representa o atraso demandado para que a radiação produza efeito na carga térmica (atraso térmico).

$$\dot{Q}_{sol} = (F_{s,c} \cdot A_T + F_{s,p} \cdot A_{Pa}) \cdot I[\text{horário} - \varphi] \quad (6)$$

A Equação 7 apresenta o cálculo de carga térmica devida à taxa de renovação de ar (\dot{Q}_{ra}) em Watts. O fator de renovação de ar por pessoa ((m³/s)/pessoa) e por área ((m³/s)/m²) são representados por F_a e F_p , respectivamente. Quanto às propriedades do ar, a massa específica (kg/m³) é representada por ρ_{ar} e a entalpia (J/kg) no ambiente externo e interno por $i_{ar,ext}$ e $i_{ar,int}$, respectivamente. Para obtenção das propriedades do ar o *CoolProp* é linkado ao Python.

$$\dot{Q}_{ra} = \rho_{ar} (F_p \cdot N + F_a \cdot A_{Pa}) \cdot (i_{ar,ext} - i_{ar,int}) \quad (7)$$

A transferência de calor por condução (\dot{Q}_{pt}) em Watts é obtida a partir da Equação 8. As taxas de transferência de calor (W/(m²K)) pelas paredes, piso e teto são representadas por U_{Pa} , U_{Pi} e U_T , respectivamente. As temperaturas do ar nos ambientes (K) externo e interno por $T_{ar,ext}$ e $T_{ar,int}$. Os dados climáticos referentes à temperatura externa foram obtidos no site do INMET.

$$\dot{Q}_{pt} = (U_{Pa} \cdot A_{Pa} + U_{Pi} \cdot A_{Pi} + U_T \cdot A_T) \cdot (T_{ar,ext} - T_{ar,int}) \quad (8)$$

Por fim, a carga térmica horária (\dot{Q}_e) em Watts é obtida pela Equação 9. Nela \dot{Q}_{ele} em Watts representa a taxa de transferência de calor por equipamentos.

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_{pes} + \dot{Q}_{ilu} + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{ra} + \dot{Q}_{pt} + \dot{Q}_{ele} \quad (9)$$

Os dados de entrada gerais para o cálculo da carga térmica estão apresentados na Tabela 1. Dados específicos do Ambiente 1 seguem apresentados na Tabela 2 enquanto dados específicos do Ambiente 2 estão apresentados na Tabela 3.

De forma complementar, cabe mencionar que o Block Load apresenta resultados de calor sensível em cada hora para todos os meses do ano. Porém, os dados de calor latente são apresentados somente para o mês de maior carga térmica. O valor médio de calor latente foi obtido para cada ambiente / cidade e os dados adicionados ao calor sensível nos outros meses de a forma a se obter a carga térmica total horária.

TABELA 1. Dados de entrada gerais.

Dado de Entrada	Dado de Entrada	Referência
Cidades analisadas	Belém/PA, Porto Alegre/ RS e São Paulo/SP	INMET (dados climáticos de 2019 para cálculo em Python)
Taxa transferência de calor das paredes (U_{Pa})	2.58 W/(m ² K)	ABNT, 2005. NBR15220-3
Taxa transferência de calor do piso (U_{Pi})	1.59 W/(m ² K)	ABNT, 2005. NBR15220-3
Taxa transferência de calor do teto (U_T)	1.92 W/(m ² K)	ABNT, 2005. NBR15220-3
Absortância para parede com pintura branca (α_w)	0,2	ABNT, 2005. NBR15220-2
Absortância para telhado chapa de aço galvanizado (α_c)	0,25	ABNT, 2005. NBR15220-2
Capacitância termal do ambiente interno (C_{in})	750.000 J/K	
Atraso térmico (φ)	3 h	ABNT, 2005. NBR15220-3
Fator solar cobertura (F_{S_c})	0,065	ABNT, 2005. NBR15220-3
Fator solar parede (F_{S_p})	0,035	ABNT, 2005. NBR15220-3
Fator renovação de ar por pessoa (F_p)	3,8 (m ³ /s)/pessoa	ABNT, 2008. NBR16401-1
Fator de renovação de ar por área (F_a)	0,5 (m ³ /s)/m ²	ABNT, 2008. NBR16401-1
Carga térmica gerada pela iluminação por metro quadrado de edificação (llu)	16 W/m ²	ABNT, 2008. NBR16401-1
Carga térmica gerada em um computador	55 W	ABNT, 2008. NBR16401-1
Carga térmica gerada em uma impressora de pequeno porte	130 W	ABNT, 2008. NBR16401-1
Carga térmica gerada em uma impressora de grande porte	550 W	ABNT, 2008. NBR16401-1
Monitor adicional	55 W	ABNT, 2008. NBR16401-
Máquina de café	1500 W	ABNT, 2008. NBR16401-
Energia gerada por pessoa (F)	130 W	ABNT, 2008. NBR16401-1

Fonte: Elaboração própria (2022).

TABELA 2. Dados de entrada - Ambiente 1

Dado de Entrada	Valor
Largura do ambiente (L)	3 m
Comprimento do ambiente (C)	4 m
Altura do ambiente (H)	2,8 m
Quantidade de computadores	2
Quantidade de impressoras de pequeno porte	1
Quantidade de pessoas (N)	2

Fonte: Elaboração própria (2022).

TABELA 3. Dados de entrada - Ambiente 2

Dado de Entrada	Valor
Largura do ambiente (L)	12,2 m
Comprimento do ambiente (C)	12,9 m
Altura do ambiente (H)	2,8 m
Quantidade de computadores	38
Quantidade de monitores adicionais para computadores	35
Quantidade de impressoras de grande porte	2
Quantidade de máquinas de café	1
Quantidade de pessoas (N)	38

Fonte: Elaboração própria (2022).

Por fim, os dados climáticos software Block Load (Carrier) são referentes ao ano de 2001. Infelizmente não há disponibilização de dados deste ano na plataforma do INMET. Diante disso, serão utilizados na programação em Python dados referentes ao ano de 2019.

3. RESULTADOS

Os resultados da análise comparativa entre a metodologia proposta e os resultados obtidos pelo Block Load são apresentados nessa seção. Foram gerados dados comparativos em cada um dos dois ambientes para as três cidades analisadas. Para o ambiente 1 são apresentadas análises

comparativas para a cidade de Belém/PA em janeiro (Figura 1), para a cidade de Porto Alegre/RS no mês de março (Figura 2) e ainda no mês de março, na cidade de São Paulo (Figura 3). As Figuras apresentam em seu eixo das abscissas a hora do dia e no eixo das ordenadas as cargas térmicas (em Watts) calculadas pelo Python e pelo Block Load. Nas Figuras apresentadas, a carga térmica horária calculada pelo Block Load é maior que a carga térmica calculada pelo Python. Essa tendência inverte-se próxima aos horários de carga térmica máxima onde a carga térmica calculada pelo Python é maior.

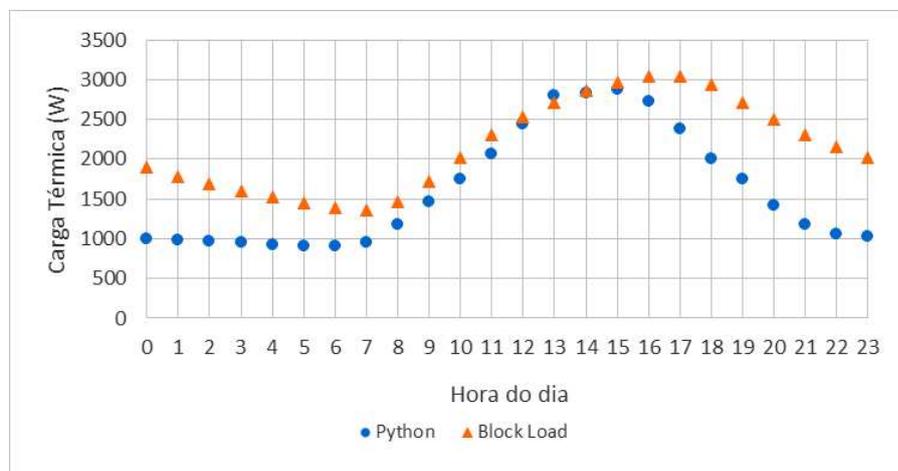


FIGURA 1. Belém/PA, ambiente 1, mês de janeiro. Figura do autor (2022).

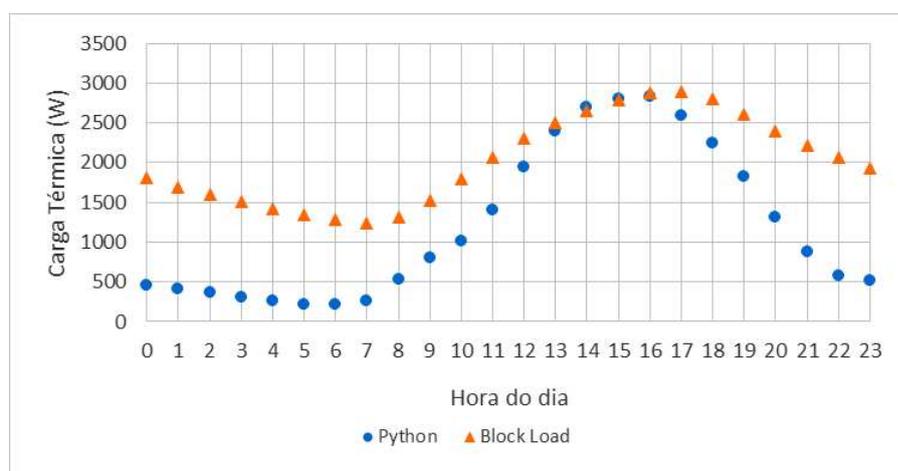


FIGURA 2. Porto Alegre/RS, ambiente 1, mês de março. Figura do autor (2022).

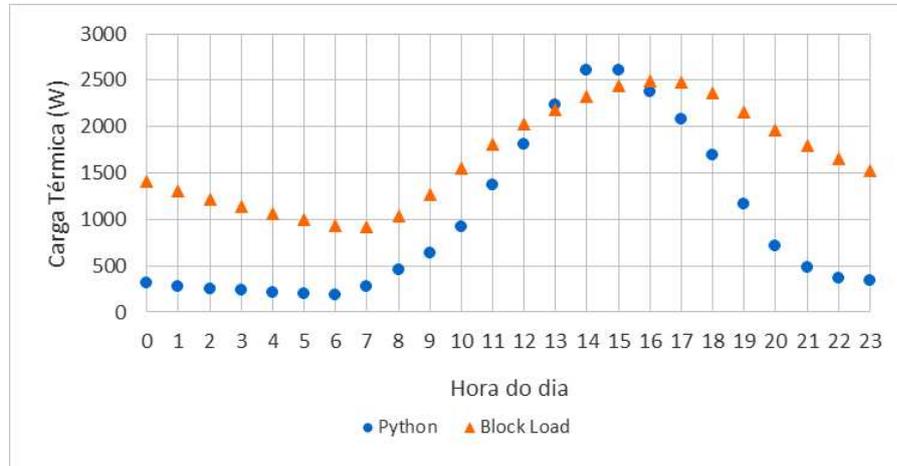


FIGURA 3. São Paulo/SP, ambiente 1, mês de março. Figura do autor (2022).

Para o ambiente 2 foram realizadas análises comparativas similares conforme apresentado na Figura 4 (Belém/PA, janeiro), Figura 5 (Porto Alegre/RS, janeiro), Figura 6 (São Paulo/SP, julho). Para as Figuras aqui apresentadas, a carga térmica horária calculada pelo Block Load é maior que a carga térmica calculada pelo Python. Essa tendência inverte-se próximo aos horários de carga térmica máxima para a cidade de Porto Alegre/RS no mês de janeiro. Há, porém, para o ambiente 2 maior proximidade entre o cálculo de carga térmica para as duas ferramentas analisadas.

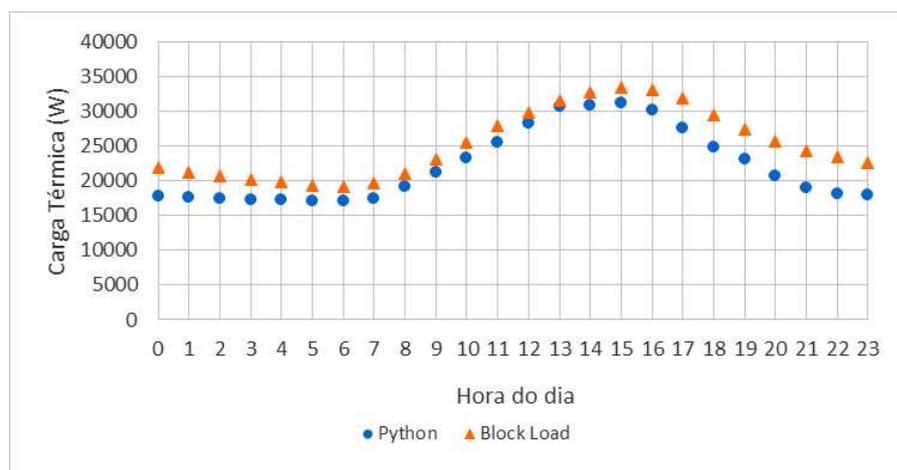


FIGURA 4. Belém/PA, ambiente 2, mês de janeiro. Figura do autor (2022).

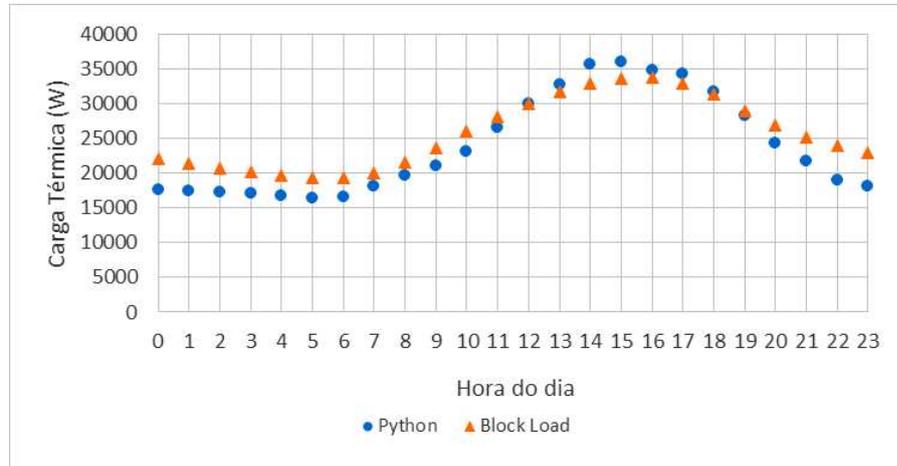


FIGURA 5. Porto Alegre/RS, ambiente 2, mês de janeiro. Figura do autor (2022).

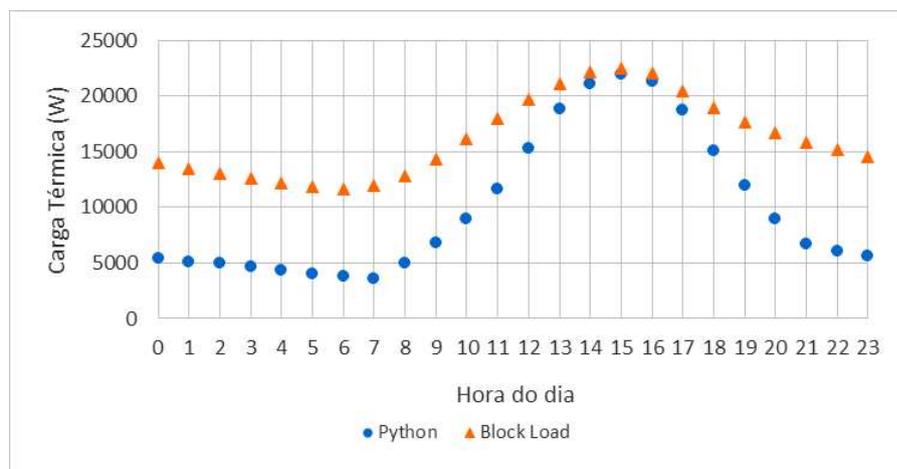


FIGURA 6. São Paulo/SP, ambiente 2, mês de julho. Figura do autor (2022).

Para sumarizar os resultados das 18 análises comparativas realizadas incluiu-se análise das cargas térmicas médias e máximas. Na Tabela 4 pode-se observar os valores de carga térmica média e máxima para o ambiente 1, de forma similar pode-se observar na Tabela 5 os dados para o ambiente 2. Como já destacado nas de Figuras 1 a 6 haveria grande variação na média comparativa da carga térmica entre as duas ferramentas de cálculo. Ocorre, porém, que as ferramentas de cálculo de carga térmica são desenvolvidas para avaliação do cálculo da carga térmica no ponto de máxima. Para esta, os valores estão mais próximos.

TABELA 4 - Variação da Carga Térmica Média e Máxima - Ambiente 1

Cidade	Mês	Variação de carga térmica média	Variação de carga térmica no ponto de máxima
Belém/PA	Janeiro	26%	6%
	Março	23%	11%
	Julho	-31%	69%
Porto Alegre/RS	Janeiro	20%	11%
	Março	41%	2%
	Julho	143%	60%
São Paulo/SP	Janeiro	18%	-31%
	Março	-40%	5%
	Julho	102%	3%

Fonte: Elaboração própria (2022).

TABELA 5 - Variação da Carga Térmica Média e Máxima - Ambiente 2

Cidade	Mês	Variação de carga térmica média	Variação de carga térmica no ponto de máxima
Belém/PA	Janeiro	12%	7%
	Março	11%	11%
	Julho	14%	-32%
Porto Alegre/RS	Janeiro	-7%	7%
	Março	19%	1%
	Julho	65%	33%
São Paulo/SP	Janeiro	3%	-20%
	Março	15%	-3%
	Julho	38%	2%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Por fim, as Figuras 7 e 8 apresentam a comparação para os ambientes 1 e 2 considerando um intervalo de variação de +/- 20%. Para o ambiente 1 observa-se que seis dos nove pontos analisados estão contidos dentro do intervalo estabelecido. Para o ambiente 2, por sua vez, sete dos nove pontos analisados estão dentro da faixa de +/- 20%. Cabe ainda mencionar que caso os dados climáticos do Python e Block Load fosse do mesmo ano os resultados poderiam apresentar maior convergência.

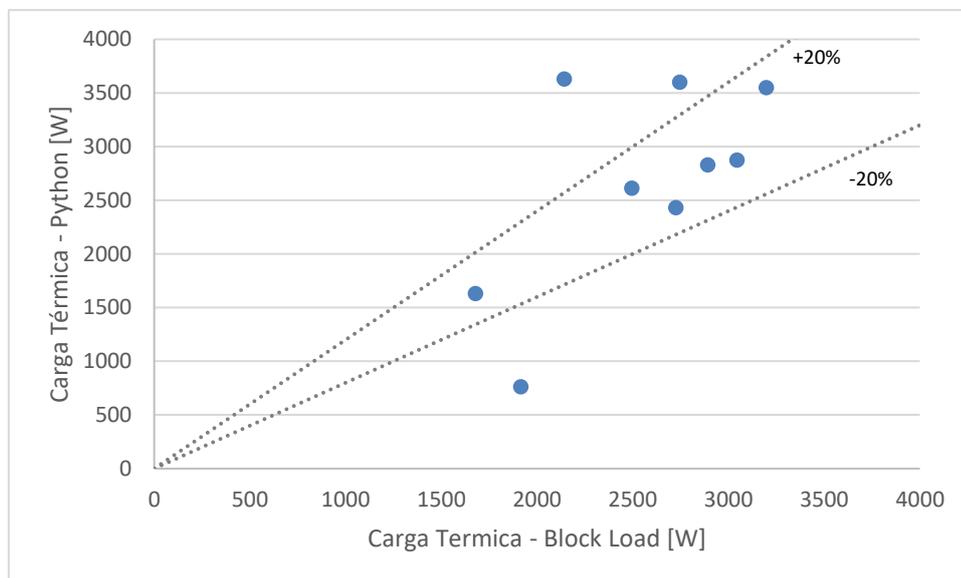


FIGURA 7. Análise comparativa para carga térmica máxima, ambiente 1 – Python x Block Load. Figura do autor (2022).

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho buscou-se calcular a carga térmica de uma edificação utilizando a ferramenta de simulação Python. A metodologia foi proposta de modo a facilitar a integração da ferramenta de cálculo de carga térmica com programas de simulação desenvolvidos para reprodução de sistemas de condicionamento de ar. Utilizou-se como referência dados fornecidos nas normas ABNT NBR 15220 e ABNT NBR 16401 e pela plataforma do INMET. Os resultados obtidos foram comparados com resultados obtidos através do software Block Load. Observou-se para carga térmica calculada ao longo dos meses de janeiro, março e julho curva de tendência similar entre os softwares com variação média total de 17% e variação média na carga térmica máxima de -1%.

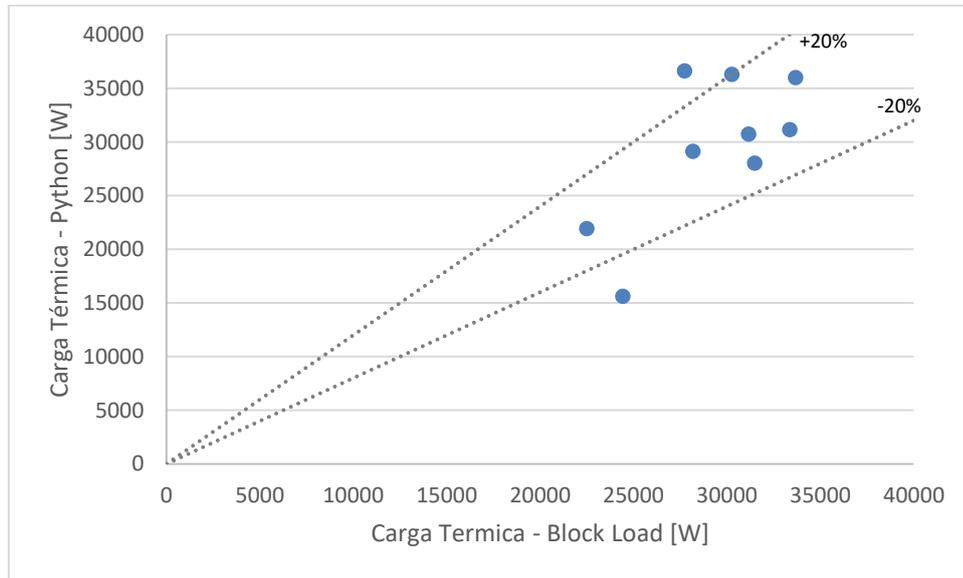


FIGURA 8. Análise comparativa para carga térmica máxima, ambiente 2 – Python x Block Load. Figura do autor (2022).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-1. Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2. Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-1. Instalações de ar-condicionado— Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das Instalações. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-2. Instalações de ar-condicionado— Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, ABNT, 2008



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

ARAUJO, E. P. Apostila de ar condicionado e exaustão. Centro Universitário de Brasília. 2011

DUARTE, Willian Moreira; DUTRA, Clarice Martins Lima Campanha; PAULINO, Tiago de Freitas; OLIVEIRA, André Gonçalves; MACHADO, Luiz. Feasibility of thermal storage for air conditioner: a case of study for office applications. 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. ENCIT, 2020a.

DUARTE, Willian Moreira; PAULINO, Tiago de Freitas; TAVARES, Sinthya Gonçalves; OLIVEIRA, André Gonçalves; MACHADO, Luiz. Comparative study of geothermal and conventional air conditioner: a case of study for office applications. 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. ENCIT, 2020b.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 04 de outubro de 2021.

PENA, S. M. Sistemas de ar condicionado e refrigeração. Eletrobrás/PROCEL. 1ª ed. 2002.

STORTI, Eduardo Vinicius. Seleção e especificação de um sistema de condicionamento de ar para suprir a demanda térmica de um auditório. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Toledo, Araçatuba, 2015.

TÔRRES, Érica Valeska Gurgel. Levantamento de carga térmica: Novo software nacional incluindo renovação de ar (ABNT 16401). 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).