XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

ESTUDO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E DE ESTRATÉGIAS PARA A GERAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO EM REFEITÓRIO ESTUDANTIL

Matheus de Andrade Duarte (1); Frederico R. Silveira Lima (2); Raquel Diniz Oliveira (3)
(1) Estudante, Graduando em Engenheira Mecânica, matheusdeandradeduarte@gmail.com, CEFETMG, Departamento de Engenharia Mecânica
(2) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, fredericolima@cefetmg.br, CEFETMG, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Amazonas, 7675. Prédio 06, Campus II. Belo Horizonte–MG, 30510-000, Tel.: (31) 3319 6850
(3) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, raqueldiniz@cefetmg.br, CEFETMG, Departamento de Engenharia Civil, Av. Amazonas, 7675. Prédio 12, Campus II, Gabinete 221. Belo Horizonte–MG, 30510-000, Tel.: (31) 3319 6810

RESUMO
No cenário brasileiro, de modo geral, verifica-se temperaturas internas elevadas, bem como, desconforto térmico dos usuários em espaços com aglomeração de pessoas e fontes significativas de geração de calor, tais como refeitórios. Além disso, edificações brasileiras muitas vezes não foram concebidas visando suas eficiências energéticas e, portanto, sua performance pode ser melhorada visando o racionamento do consumo de energia elétrica para climatização. O objetivo do presente trabalho consistiu na análise de sistemas de ventilação mecânica e condicionamentos de ar capazes de propiciarem condições adequadas de conforto térmico aos usuários. Neste contexto, a eficiência energética de exaustores eólicos e condicionadores de ar do tipo *Split* e Fluxo de Gás Refrigerante Variável (VRF) etiquetados com melhor eficiência para a categoria, classe A, foram analisados por meio de simulação computacional, via EnergyPlus, considerando o restaurante estudantil do CEFET-MG Campus II, localizado em Belo Horizonte-MG, como referência. Verificou-se que a utilização de exaustores, em complemento a ventilação natural, não proporcionou condições aceitáveis de conforto térmico, aos usuários, conforme faixa de conforto adaptativa estabelecida pela ASHRAE 55/2010, para 80% de aceitabilidade. Analisou-se, também, a viabilidade econômica do uso de condicionadores de ar do tipo *Split* e VRF. O sistema *Split* do ponto de vista financeiro apresentou viabilidade econômica melhor do que o sistema VRF, apesar de possuir gasto energético significativamente maior. O presente trabalho apresentou, portanto, uma solução de climatização que possibilitaria garantir condições adequadas de conforto térmico aos usuários de refeitório estudantil além de atender aos parâmetros de eficiência energética e comprovada viabilidade financeira.
Palavras-chave**:** Exaustores eólicos, Sistema VRF, Sistema *Split*, Conforto Térmico, Desempenho energético.

ABSTRACT
In Brazil, human thermal discomfort and high indoor temperatures can be observed in crowded spaces characterized by significant sources of heat, such as school cafeteria. Besides, Brazilians edifications were not normally built aimed its energy efficiency, therefore, their performance can be upgraded aiming the electric energy consumption rationing to air conditioning. The authors aimed at analyzing exhaust and air conditioner systems that under RTQ-C/2013 energy efficiency criteria are able to provide human thermal comfort in the school cafeteria of CEFETMG (Belo Horizonte, Brazil). Were analyzed three systems through EnergyPlus thermal simulation: eolic exhaust fan, VRF and *Split*. Eolic Exhaust Fan was not able to provide thermal comfort according to ASHRAE 55/2010, 80% acceptability range. In a financial perspective, *Split* system was a better option than VRF, even though its bigger energy consumption. In summary, this paper offers, an efficiency and financially viable, conditioning solution that provide human thermal comfort conditions for a student cafeteria.
Keywords: Eolic Exhaust Fan, VRF system, *Split* system, Thermal Comfort, Thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

O projeto de edificações naturalmente ventiladas, muitas vezes, pode não ter sido concebido para garantir condições adequadas para conforto térmico dos seus usuários. Neste sentido, durante o uso e operação de edificações existentes deverão ser analisados meios para garantir tal condição com reduzido consumo de energia elétrica. Estudos prévios diagnosticaram, por meio de simulação computacional, situações de desconforto térmico de usuários em diferentes tipos de edificações, em variadas cidades do território nacional. Castro (2018) verificou que no verão os níveis de temperatura na biblioteca universitária no Campus Santa Bárbara D'oeste da Universidade Metodista de Piracicaba ultrapassavam os limites de conforto térmico estabelecidos pela ABNT NBR 6401 /1980 e Trinkley (2001). Em Alagoas, verificaram-se altos percentuais anuais de desconforto térmico em creches padronizadas do programa proinfância (Araújo, 2018). Já em Belo Horizonte-MG, o restaurante estudantil do CEFET/MG localizado no campus II apresentou temperaturas internas elevadas durante o seu período de funcionamento sendo que no horário do almoço, quando ocorre maior incidência solar, a temperatura interna pode ultrapassar 30°C (DUARTE *et al*, 2018). A alta incidência solar sobre o prédio, o intenso fluxo de pessoas e a quantidade de equipamentos elétricos e a gás fazem com que o calor dissipado no local seja acentuado, aumentando significativamente a sensação de desconforto térmico pelos usuários. Logo, se faz necessário o estudo do seu desempenho energético de edificações, bem como, de estratégias para condicionar seus ambientes internos.

Cumpre destacar que as estratégias artificiais de condicionamento além de proporcionarem ambientes confortáveis termicamente aos usuários, devem operar dentro dos limites de eficiência energética. A demanda elevada por eletricidade impacta de forma negativa o meio ambiente e a economia do país. A produção de energia elétrica pode ser nociva ao meio ambiente devido à emissão de gases de efeito estufa (no caso das termoelétricas) ou ao impacto social e ambiental do represamento do rio (no caso das hidroelétricas). Na área econômica, o Brasil possui a 14º energia elétrica mais cara do mundo e a segunda maior carga tributária cobrada sobre as tarifas de energia elétrica (IEA, 2016). Este cenário se mostra determinante para viabilizar ou não a implementação de sistemas elétricos para climatização artificial nas edificações, entre outras tecnologias. Diante dessas informações, verifica-se a importância do estudo da eficiência energética e de estratégias para atingir o conforto térmico em edificações, melhorando a qualidade de vida das pessoas e contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Neste contexto, alguns autores fizeram uso da estimativa do Período de Retorno do Capital para analisar a viabilidade financeira de estratégias de climatização de edifícios utilizando condicionadores de ar (Carneiro, 2012).

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar o desempenho termoenergético de modelo computacional calibrado representativo de um refeitório estudantil e verificar as estratégias de condicionamento mais econômicas e eficientes do ponto de vista energético.

3. MÉTODO

O método proposto nesse trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Caracterização do modelo de referência selecionado para o estudo de caso.
2. Análise da viabilidade técnica de três estratégias de climatização (exaustor eólico, *Split* e VRF) aplicáveis ao modelo de referência.
3. Análise da viabilidade financeira dos sistemas elétricos de condicionamento de ar (*Split* e VRF) simulados para o modelo de referência.

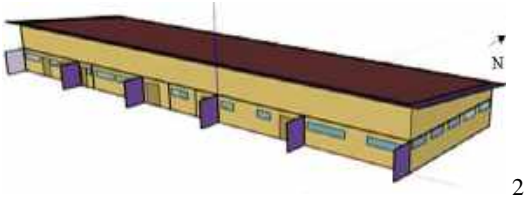
Dentro dessas três etapas, busca-se analisar se o uso de exaustão eólica permite ao refeitório atingir níveis de conforto térmico aceitáveis, simular a carga térmica que incide no refeitório para estimar a capacidade de resfriamento necessária para que a edificação atinja níveis de conforto térmico adequados, analisar qual sistema de condicionamento de ar possui a melhor viabilidade do ponto de vista econômico.

3.1. Caracterização do modelo de referência do presente estudo de caso

A edificação objeto deste estudo foi o refeitório estudantil do CEFET-MG campus II localizado na cidade de Belo Horizonte-MG. O modelo termoenergético para simulação foi definido com características semelhantes a edificação existente no que tange a volumetria, orientação solar, materiais, componentes construtivos e aberturas, conforme se observa na Figura 1 e 2. Para a sua elaboração foi utilizado o *software* SketchUp Make 2017, versão gratuita, associado ao *plugin* Euclid, a partir da definição das zonas térmicas do modelo.

O prédio possui aproximadamente 681m² e é composto por cozinha (84,0m²), almoxarifado (32,0m²), sala dos laváveis (SL) (9,0m²), sala de nutricionista (SN) (4,0m²), salão de refeições (190,0m²), recepção (54,0m²), além do Diretório Central dos Estudantes (9,8m²) e demais espaços conjugados como xerox, sala de jogo, entre outros (298,2m²). Desta forma, a edificação foi modelada com sete zonas térmicas conforme se observa na Figura 3.


1



2

Figura 1 e 2 - Vista Isométrica da Edificação (Autoria Própria, 2018).



Figura 3 - Vista Superior da Edificação (Autoria Própria, 2018).

O estudo termoenergético foi realizado para o salão de refeições, pois é o cômodo no qual há maior fluxo pessoas e dissipação de calor. O pé direito é de 2,85m. A envoltória da edificação é caracterizada por diferentes tipos de vedação vertical e uma opção de vedação horizontal conforme pode ser observado na Tabela 1. A absortância à radiação solar das superfícies externas foi de 0,7, para a parede e 0,4, para a cobertura obtida por meio de cálculo (SANGOI; RAMOS; LAMBERTS; 2010), a partir de medição realizada com auxílio de espectrômetro de refletância ALTA II, da marca Vernier. As portas do tipo venezianas e esquadrias são de alumínio com acabamento na cor preta e janelas são do tipo máximo ar, com vidros simples de 4mm.

Tabela 1 - Composição da vedação horizontal e vertical do estudo de caso.

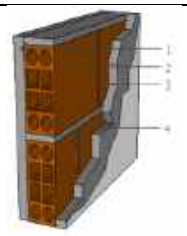
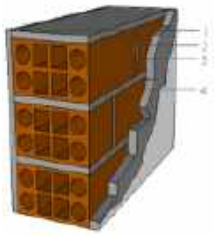
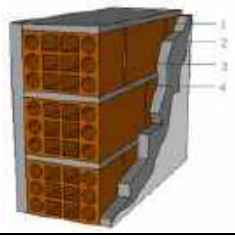
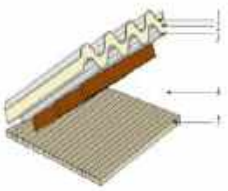
Tipologia	Vedação	Composição	U (w/m²K)	CT (kJ/m²K)
Parede (15cm)		1) Revestimento cerâmico (8mm) 2) Argamassa externa (3,0cm) 3) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 29,0cm) 4) Argamassa interna (3,0cm) 5) Revestimento cerâmica (8mm)	2,28	186
Parede (20cm)		1) Argamassa externa (2,5cm) 2) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 29,0cm) 3) Argamassa interna (2,5cm) 4) Revestimento cerâmica (8mm)	2,00	185
Parede (25cm)		1) Revestimento cerâmica (8mm) 2) Argamassa externa (2,5cm) 3) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 29,0cm) 4) Argamassa interna (2,5cm) 5) Revestimento cerâmica (8mm) 6) Pedra (1,5cm)	1,49	462

Tabela 1 - Composição da vedação horizontal e vertical do estudo de caso – Continuação.

Tipologia	Vedação	Composição	U (w/m²K)	CT (kJ/m²K)
Cobertura		1) Telha metálica 0,43mm 2) Poliestireno Expandido (30mm) 3) Telha metálica 0,5mm 4) Câmara de Ar (> 5 cm) 5) Forro de madeira (1,5 cm)	0,85	15

Fonte: Adaptado de NBR 15220 (ABNT, 2005).

Em relação ao número de pessoas considerou-se 120 no salão de refeições, 10 na cozinha e 15 na recepção para o horário de funcionamento do prédio, das 8h00 às 20h00 para a cozinha e das 10h45 às 13h30 e das 17h45 às 19h00 para o salão de refeições. Atribuiu-se para o salão a taxa de liberação de calor por área de 120 W/m² por pessoa, para a atividade de repouso e sentada e, 175 W/m² por pessoa, para a atividade de cozinhar, na cozinha (ASHRAE, 2010). Quanto à dissipação de calor devido aos equipamentos elétricos, o somatório da potência de todos os equipamentos é de 26.175 W e a fração radiante considerada foi igual a 1,0.

O arquivo climático utilizado foi do tipo *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) para a cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais (ENERGYPLUS, 2017). A temperatura do solo foi estimada subtraindo 2°C a temperatura média mensal indicada no arquivo climático conforme recomendação estabelecida no manual do próprio *software* utilizado (DOE, 2016).

A calibração do modelo termoenergético foi feita com base nos resultados obtidos para a temperatura interna via simulação em comparação com os valores aferidos por medições realizadas no ano de 2017, por dois *data loggers* modelo HOBO U12 da marca ONSET (DUARTE *et al*., 2018). Os valores de temperatura de bulbo seco do arquivo climático foram substituídos pelos dados aferidos pela estação meteorológica (*Hobo Remote Monitoring System da Marca Onset*), localizada a um raio de aproximadamente 120m do estudo de caso. Por meio de simulação complementar, verificou-se correlação linear dos valores das temperaturas internas simuladas e medidas entre 0,82 e 0,96, sendo, portanto consideradas fortes conforme Costa (1998).

3.2. Análise da viabilidade técnica das estratégias de climatização

Para a análise da viabilidade técnica adotou-se o método de simulação computacional por meio do *software* EnergyPlus, versão 8.7.0. Desta forma, avaliou-se o desempenho termoenergético de três estratégias de climatização (exaustores eólicos, condicionador de ar do tipo *Split* e VRF) para o modelo calibrado do refeitório estudantil selecionado.

3.2.1. Simulação do Sistema de Exaustão Eólico

A escolha do sistema de exaustão foi motivada pela eficiência dos modelos disponíveis no mercado. Para a sua estimativa considerou-se a ASHARE (2010), bem como, a taxa de renovação de ar de 20 trocas/horas, definida para restaurantes. Considerando a limitação do EnergyPlus para caracterizar o exaustor eólico de telhado, utilizou-se diretamente a taxa de renovação do volume do ar por hora para simular o efeito deste sistema no ambiente. Para a simulação deste sistema, considerou-se a contribuição do sistema de exaustão eólico associado a ventilação natural (janelas). As janelas e portas permanecem abertas durante o período de funcionamento do refeitório. No restante do tempo considerou-se as aberturas fechadas. O funcionamento do exaustor foi de 24h. Como dado de saída obteve-se os valores de temperatura operativa para avaliação do atendimento das condições de conforto térmico para 80% de aceitação dos usuários conforme a ASHRAE 55/2010.

3.2.2. Simulação dos Sistemas elétricos de Condicionamento de Ar

Para o sistema de condicionamento do ar foi realizada duas simulações. Na primeira utilizou-se as entradas dos módulos relacionados ao sistema de condicionamento de ar em *autosize* para o *software* dimensionar a potência de resfriamento demandada pelo sistema. Nessa simulação o coeficiente de performance do equipamento (COP) foi definido considerando a carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento. Além do valor do COP, a taxa de renovação de ar de 17 m³/horas/pessoa necessária para o conforto térmico na zona definida pela ANVISA (2003) foi utilizada como entrada na simulação *autosize*

para estimar a carga ideal de resfriamento para a zona em estudo. O valor da potência de resfriamento do sistema foi definido como semelhante a carga térmica na zona. Com base nesse valor estimado, escolheu-se um COP dentro do nível A de eficiência energética indicado pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INMETRO, 2013). A capacidade máxima de resfriamento calculada pelo *software* foi usada como base para a escolha dos equipamentos nos catálogos da linha de condensadores e evaporadoras VRF e *Split* com classe A na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). A segunda simulação foi realizada para estimar o consumo energético dos sistemas durante o uso.

O EnergyPlus não permite a simulação de mais de um sistema de condicionamento de ar na mesma zona. Em razão disso, a segunda simulação exigiu que a zona que representa o salão do refeitório fosse dividida em três zonas menores, pois a potência de resfriamento a ser retirada do ambiente é maior que as capacidades nominais das evaporadoras do VRF e dos aparelhos tipo *Split* apresentadas pelos catálogos. Destaca-se que essa modificação não altera carga térmica total dissipada no modelo simulado uma vez que a entrada dessa variável no *software* na primeira simulação se deu pela energia dissipada por unidade de área. Por consequência, na segunda simulação foram inseridas as cargas térmicas totais dissipadas em cada uma das três zonas resultantes. Na Figura 3 apresenta-se a divisão que foi feita no salão de refeições do refeitório estudantil com auxílio do programa *SketchUp Make* 2017 associado ao *Plugin Euclid*.

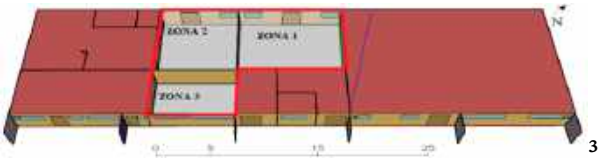


Figura 4 - Divisão da área do refeitório.

A temperatura de *setpoint* definida foi de 23°C, respeitando os limites de temperatura para conforto térmico em restaurantes estabelecidos pela ANVISA, que utiliza a norma NBR 16401 (ABNT, 2008) como referência (ANVISA, 2003). Como dado de saída obteve-se o consumo anual dos sistemas analisados.

3.3. Análise da viabilidade econômica dos Sistemas elétricos de Condicionamento de Ar

Analisou-se a viabilidade econômica dos dois sistemas de climatização elétricos simulados: condicionador de ar do tipo *Split* e VRF. Para tanto, considerou-se o Período de Retorno do Capital baseado nas equações 1 a 4. A análise de custos não foi realizada para os exaustores eólicos, uma vez que estes não consomem energia elétrica tendo sido, portanto, analisado o seu potencial para garantir condições adequadas de conforto térmico aos usuários. O método Período de Retorno do Capital estima o investimento inicial, o custo operacional, receitas do investimento e o tempo de retorno do capital (REBELATTO, 2004), sendo:

(I) Investimento Inicial: Cálculo da diferença do custo de instalação dos dois projetos, mostrado na Equação 1:

$$I_i = C_1 - C_2 \quad (1)$$

Onde: I_i = Investimento inicial
C = Custo do projeto

(II) Custo Operacional: Cálculo do custo operacional anual do projeto levando em conta basicamente o gasto de energia do projeto, conforme a Equação 2:

$$C_O = C_e \times E \quad (2)$$

Onde: Co = Custo Operacional
Ce = Custo de energia elétrica
E = Energia elétrica consumida

(III) Receitas do Investimento: Receita anual que considera o custo da diferença de energia gasta entre os equipamentos, conforme a Equação 3:

$$R_i = C_{01} - C_{02} \quad (3)$$

(IV) Tempo de Retorno Capital: Segundo Carneiro (2012), "é tempo no qual a soma das receitas de um projeto reproduz o total do capital investido para sua implantação". A relação está mostrada na Equação 4:

$$T_{RC} = \frac{I_i}{R_i} \quad (4)$$

Este método considera o investimento inicial, os custos do projeto e da energia elétrica, a quantidade de energia consumida e o tempo de retorno do capital. O valor do quilowatt-hora foi considerado para o período de ponta, das 17h00 às 20h00, e fora de ponta, segundo tarifário vigente para a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) para o ano de 2018 (CEMIG, [201-]). O custo dos equipamentos foi estimado por consulta de preços junto a empresas locais e *sites* especializados. A vida útil dos sistemas foi extraída de informações técnicas prestadas (ASSISTÊNCIA TÉCNICA MG, [201-]), sendo de 10 a 15 anos, para ambos os sistemas, dependendo das condições de conservação e manutenção do aparelho. Para efeito deste estudo considerou-se, hipoteticamente, a vida útil de 15 anos para ambos os equipamentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise de viabilidade técnica do Sistema de Exaustão eólico

Para o sistema de exaustão eólico, selecionou-se o equipamento industrial da marca Marivent (MARIVENT, 2019) com diâmetro de 610 mm e vazão máxima de 4.000 m³/h (aproximadamente 1,11 m³/s). Desta forma, obteve-se o valor de 10.830 m³/h de renovação para o volume de 451,5 m³ do refeitório (ASHARE, 2010). Considerando a vazão do exaustor escolhido, foi estimado o uso de três exaustores no salão de refeições, dois na cozinha e um no *hall* de entrada.

Na Figura 5 verificam-se as temperaturas operativas do ar simulada no salão de refeições, sem e com o sistema de exaustão eólico, em contraste com a faixa de temperatura de conforto térmico adaptativa para 80% de aceitação dos usuários (ASHRAE, 2010), calculada pelo *software* para Belo Horizonte-MG, além da temperatura externa de bulbo seco estabelecida no arquivo climático utilizado. A simulação foi realizada para 6625 horas de um ano letivo[21]. Nota-se que utilização de exaustores eólicos para climatização do restaurante foi insuficiente para proporcionar condições adequadas de conforto térmico aos usuários. Em períodos mais frios do ano a utilização de exaustores tende a diminuir a temperatura da zona. Os exaustores aumentam a renovação de ar na edificação, retirando com mais frequência a massa de ar quente que é gerada pela dissipação de calor dentro da zona e colocando massa de ar frio exterior.

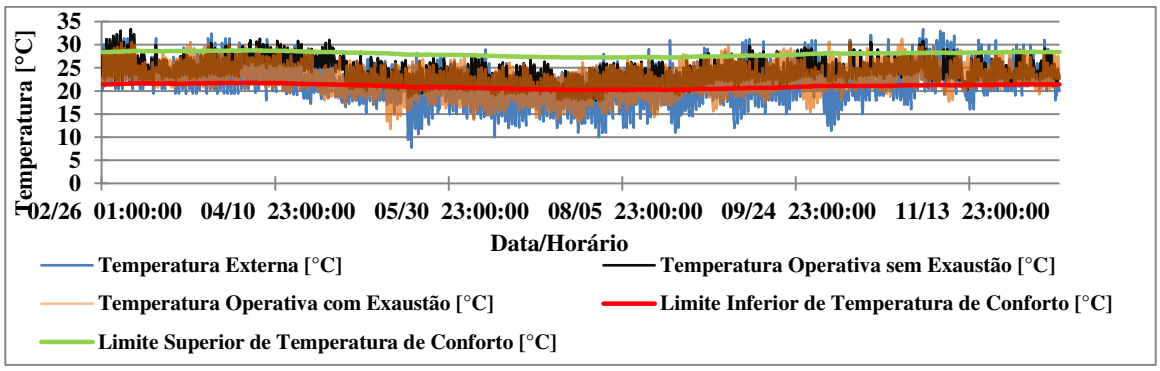


Figura 5 - Comparação entre temperaturas relacionadas ao salão de refeição.

A porcentagem de horas de desconforto térmico considerando a teoria adaptativa (ASHRAE, 2010) para a simulação com e sem o uso de exaustão foi de 41,17% e 32,54%, respectivamente. Pode-se afirmar, portanto, que não houve uma melhorar significativa das condições de conforto no refeitório com a utilização de exaustores eólicos.

4.2. Análise de viabilidade técnica dos Sistemas elétricos de Condicionamento de Ar

A análise da viabilidade técnica dos condicionadores de ar foi feita considerando a carga térmica total da zona como base para estimar a capacidade de resfriamento dos condicionadores de ar, obtendo, assim, um COP dimensionado para atender aos critérios de eficiência energética do RTQ-C (INMETRO, 2013).

A Figura 6 apresenta a taxa de carga térmica total na zona obtida na simulação anual. A carga térmica analisada consiste na parcela de calor sensível, que pode ser dividido em ganho de calor radiante, e ganho de calor convectivo e latente. A carga térmica máxima obtida na simulação foi de 22.600 W. Tal valor incidiu de forma predominante sobre a zona do salão de refeição na simulação ao longo do ano. O RTQ-C

[21] O ano letivo considerado foi o de 2018 que compreende do dia 26 de fevereiro ao dia 15 de dezembro, com recesso escolar do meio de ano entre 14 de julho a 1 de agosto. Foi considerada as 24 horas de um dia letivo na simulação, com os sistemas de condicionamento funcionando durante o horário de funcionamento do prédio.

(INMETRO, 2013) define que para capacidade de resfriamento entre 19 e 45 KW o COP mínimo para o nível A de eficiência energética deve ser de 3,28 para o modelo *Split* e 3,22 para o sistema VRF.

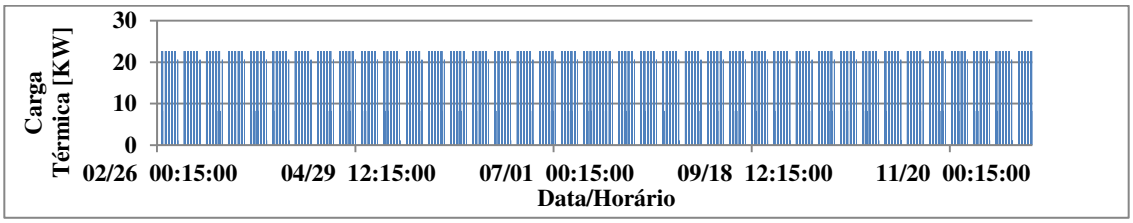


Figura 6 - Carga térmica anual para o refeitório estudantil.

Para sistema VRF, na Figura 7 verifica-se a carga térmica total do sistema em comparação a capacidade de resfriamento estimada pelo *software* no modo *autosize* para o dia 27 de abril. Foi escolhido esse dia pois é o que apresenta maior incidência de carga térmica. A relação para o sistema *Split* está na Figura 8. Nota-se que enquanto a carga térmica da zona se mantém constante, a potência de resfriamento exigida de ambos os sistemas aumenta gradativamente durante o horário de operação. Isso pode ser explicado pelo atraso que o calor externo tem para ser convertido em calor interno. A energia solar que é a principal responsável pelo nível de temperatura na zona é absorvida pela superfície externa do prédio e só depois é transferida para o interior. Além disso, o calor sensível responsável pelo aumento da temperatura do ar se dá por radiação e convecção. A parcela convectiva é imediatamente convertida em carga térmica, enquanto a maior parcela que é a devido à radiação requer algum tempo para ser convertida em carga térmica. Logo, a temperatura do ar não aumenta de forma instantânea com a incidência da carga térmica, necessita-se de certo tempo para o aumento da temperatura do ar, exigindo, portanto, uma maior potência de refrigeração para climatizar a zona. Outro fato a se observar é que parte da carga térmica no prédio corresponde ao calor latente que não é responsável pelo aumento de temperatura do ar.

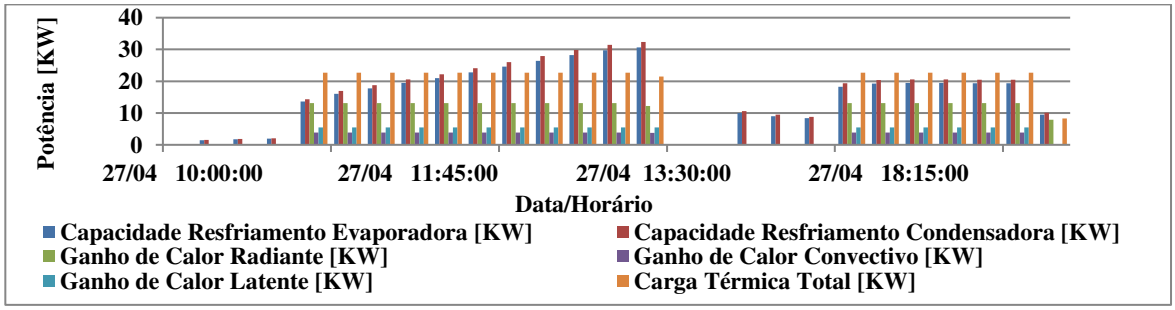


Figura 7 - Capacidade de resfriamento VRF no dia mais extremo.

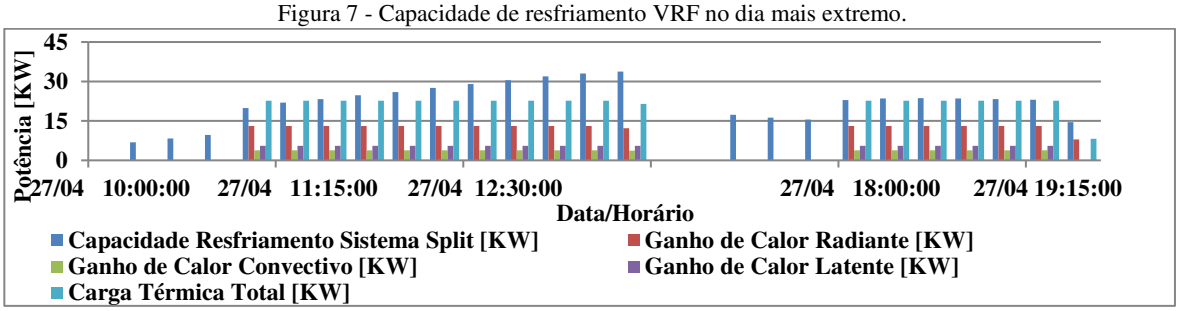


Figura 8 - Capacidade de resfriamento *Split* no dia mais extremo.

A Tabela 2 apresenta a capacidade de resfriamento máxima calculada pelo *software* considerando a simulação de um ano letivo para o sistema *Split* e VRF, respectivamente. Esses valores foram utilizados para a escolha dos equipamentos. Assim, para o sistema elétrico de condicionamento de ar selecionou-se as condensadores e evaporadoras VRF SET FREE Σ, bem como, o equipamento da linha *Split* Utopia R-410, ambos da Hitachi (ENCE Classe A), conforme especificações técnicas obtidas nos seus respectivos catálogos técnicos (HITACHI, 2019).

Tabela 2 - Capacidade de Resfriamento dos Equipamentos Escolhidos

Equipamento	**Potência Evaporadora VRF [KW]**	**Potência Condensadora VRF [KW]**	**Potência *Split* KW]**
Indicado pelo *Software*	32,32	34,17	35,52
Escolhido em Catálogo	33,6	40,0	39,57

O modelo para a condensadora do sistema VRF foi o RAS14FSNS(5/7)B da linha SetFree da Hitachi com capacidade nominal de resfriamento de 40 KW. O modelo abaixo desse, o RAS12FSNS(5/7)B, possui capacidade de resfriamento de 33,5 KW, que não atenderia as demandas do sistema. Considerando o volume a ser resfriado foram escolhidas três evaporadoras do modelo RPC4,0FSN3B4 cada uma com capacidade nominal de resfriamento de 11,2 KW. Para o sistema *Split* foram escolhidas três unidades do conjunto evaporadora e condensadora RCI48CP/ RAP48CQ com capacidade de refrigeração nominal de 13,19 KW, cada unidade.

4.3. Análise da viabilidade econômica dos Sistemas elétricos de Condicionamento de Ar

O custo do quilowatt-hora fornecido pela CEMIG depende da bandeira vigente na cobrança de energia elétrica conforme o horário do uso e cenário da Companhia para a geração de energia. A instituição de ensino público objeto do presente estudo possui isenção dos seguintes impostos: PIS/PASEP, IRPJ, COFINS e CSLL. Assim, considerando o valor médio do quilowatt-hora cobrado em 2018, tem-se para o horário fora de ponta e de ponta (das 17h00 às 20h00) a tarifa de R$ 0,40 e R$ 1,60, respectivamente. O sistema de condicionamento de ar projetado funcionará no horário das 10h45 às 13h30 e das 17h45 às 19h30. Desta forma, o consumo energético de ambos os sistemas foi separado entre o horário fora de ponta e de ponta. As Tabelas 3 e 4 apresentam o consumo energético do sistema VRF e *Split*, respectivamente, além do custo do consumo de eletricidade para cada horário, além do consumo total.

Tabela 3 - Consumo VRF de um Ano Letivo Completo.

Horário	Preço do QuiloWatt-Hora [R$]	Consumo de Energia [KWh]	Valor a ser pago por cada horário [R$]	Valor total a ser Pago [R$]
Fora de Ponta	0,40	1.412,36	564,94	2.240,30
De Ponta	1,60	1.047,10	1.675,36	

Tabela 4 - Consumo *Split* de um Ano Letivo Completo.

Horário	Preço do QuiloWatt-Hora	Consumo de Energia [KWh]	Valor a ser pago por cada horário [R$]	Valor total a ser Pago [R$]
Fora de Ponta	0,40	2.883,62	1.153,45	3.997,00
De Ponta	1,60	1.777,21	2.843,54	

Nota-se que o consumo de energia do sistema *Split* é significativamente maior comparado com o consumo do sistema VRF. Isso pode ser explicado pela capacidade de refrigeração de ambos os equipamentos. O COP do equipamento VRF escolhido foi de 4,15 enquanto o do sistema Split foi de 3,28. Tal fato faz com que o VRF seja mais econômico. Na Tabela 5 apresenta-se o custo médio para aquisição dos equipamentos analisados nesse trabalho.

Tabela 5 - Custo Equipamentos

Equipamento	Preço Unitário [R$]	Unidades	Preço Total [R$]
Condensadora VRF	50.000,00	1	50.000,00
Evaporadora VRF	5.000,00	3	15.000,00
Modelo *Split*	6.000,00	3	18,000,00

Na Tabela 6 são apresentados os valores calculados de acordo com as equações 1 a 4. O custo do investimento inicial considerado foi o preço de aquisição de cada equipamento. O preço de instalação depende das condições do edifício em que será instalado o sistema de condicionamento de ar e é obtido por meio de vistoria de um técnico especializado no local. Diante disto, não foi considerado nos cálculos do presente estudo o custo da instalação dos sistemas analisados. Considerou-se, hipoteticamente, uma vida útil de 15 anos, para ambos os sistemas (VRF e *Split*), em um cenário de boas condições de uso, conservação e manutenção dos aparelhos.

Tabela 6 - Viabilidade Financeira

Investimento Inicial [R$]	Custo de Operação do Sistema VRF [R$]	Custo de Operação Sistema *Split* System [R$]	Custo de Energia Evitada [R$]	Tempo de Retorno do Capital [Anos]
47.000,00	2.240,30	3.997,00	1.756,70	26,45

Neste contexto, considerando o período de duração estimada dos equipamentos em uso, verificou-se que, não haverá tempo hábil para a recuperação do investimento feito com a aquisição do sistema VRF em detrimento do *Split*, conforme Tempo de Retorno do Capital obtido. O tempo necessário para se ter retorno financeiro pela economia de energia elétrica ao escolher o sistema VRF será maior que o tempo de vida (15 anos) de ambos os equipamentos. Logo, pode-se afirmar que economicamente a instalação do sistema *Split* é mais vantajosa do que a do sistema VRF, apesar de esse apresentar menor consumo de energia para operação.

4.4. Discussão dos resultados

Diferentemente dos sistemas VRF e *Split*, que apresentam custo de operação referente ao consumo de energia elétrica, os exaustores eólicos, apresentam apenas o custo de aquisição, instalação e manutenção. Desta forma, esta estratégia apresenta potencial para melhorar a circulação do ar por meio da movimentação natural das massas de ar quentes internas e/ou correntes de vento externas. Entretanto, nas condições analisadas, este sistema não proporcionou resultado significativo para melhoria das condições de conforto térmico no refeitório. A simplificação do modelo computacional por meio da renovação do volume do ar por hora pode não ter sido suficiente para emular o efeito chaminé proporcionado pelos exaustores de cobertura. Ademais, as simulações mostraram que a temperatura interna do restaurante tende a ser igual à temperatura externa em períodos mais frios do ano, gerando desconforto térmico no ambiente, em dias muito quentes ou frios.

Quanto aos sistemas elétricos de condicionamento de ar, apenas o sistema *Split*, apesar de apresentar maior consumo de energia que o VRF, se mostrou, viável economicamente, para garantir condições adequadas de conforto térmico aos usuários. O maior consumo energético do sistema *Split* se deve ao fato de que o seu coeficiente de desempenho na refrigeração foi menor do que para o VRF. O COP considerado para o equipamento do tipo *Split* foi de 3,28, enquanto que o do VRF em carga nominal foi de 4,15. Tal fato fez com que o consumo energético do sistema *Split* fosse consideravelmente maior durante o horário fora de pico, quando a edificação possui cargas térmicas mais elevadas e os equipamentos escolhidos têm que funcionar próximo a suas capacidades de refrigeração nominal. Tal estratégia, portanto, não se mostrou uma solução eficiente do ponto de vista do desenvolvimento sustentável em comparação com o VRF. Entretanto, o sistema VRF possui um custo de aquisição elevado. Considerando um tempo de vida útil para ambos os sistemas de 15 anos, a análise de investimento baseada no Método do Período de Retorno do Capital indicou que a recuperação do investimento feito no VRF em detrimento do *Split* seria de 26 anos, tempo que supera a vida útil dos equipamentos. Tal resultado diverge dos obtidos por Carneiro (2012), cujo trabalho indicou que a recuperação no capital inicial investido no VRF levaria 5 anos, sendo uma opção mais viável economicamente que o *Split*. A diferença entre a potências dos equipamentos e regime de funcionamento podem explicar essa diferença. Portanto, do ponto de vista financeiro, a sistema *Split* se mostrou uma melhor opção. Em síntese, no quesito técnico ambos possibilitariam climatizar o ambiente de forma eficiente uma vez que apresentam ENCE nível A além de terem sido dimensionados sobre medida para refrigerar volume de ar do refeitório. Contudo, as soluções propostas para o modelo de referência não abarcaram alterações nos sistemas construtivos da envoltória, variação do pé-direito, mudança na dimensão da abertura das janelas, inclusão de dispositivos de sombreamento, ajuste da orientação da edificação, entre outros, por se tratar de imóvel existente. Complementarmente, verificou-se, carga térmica significativa (pessoas e equipamentos elétricos), fato que contribuiu para aumentar a demanda de equipamentos de condicionamento do ar e, consequentemente, aumentar o investimento inicial. Logo, o diagnóstico da edificação deve realizado previamente a sua construção possibilitando o estudo conjunto de soluções e estratégias que propiciem comportamento termoenergético adequado e reduzido consumo de energia para a manutenção das condições de conforto térmico dos usuários.

5. CONCLUSÕES

Por meio de modelo termoenergético calibrado de restaurante estudantil foi possível simular a viabilidade técnica da adoção de exaustores eólicos e de condicionadores de ar para garantir condições adequadas de conforto térmico aos usuários. Complementarmente, avaliou-se dentre os sistemas elétricos de condicionamento testados (VRF e *Split*) aquele mais viável do ponto de vista financeiro. Como resultado apenas o sistema *Split* apresentou viabilidade técnica e econômica para prover condições adequadas de conforto térmico aos usuários de refeitório estudantil em Belo Horizonte-MG. O presente trabalho apresentou, portanto, uma solução de climatização que possibilitou garantir condições adequadas de conforto térmico aos usuários para um modelo de referência calibrado que emula as condições de uma edificação existente. Ademais, os parâmetros de eficiência energética foram atendidos além de ter sido comprovada a sua viabilidade financeira também. Contudo, em edificações existentes, o estudo isolado de estratégias de condicionamento pode não privilegiar soluções passivas e/ou com menor custo de investimento. Recomenda-se, neste sentido, aplicação de outras soluções que possam se aplicar em casos semelhantes, além de estudos complementares tais como a análise da influência do entorno e/ou da umidade no comportamento termoenergético da edificação, análise do escoamento do ar e/ou ganhos internos, quantificação da vazão de insuflamento dos sistemas de condicionamento de ar, verificação do potencial de melhoria nas condições de

conforto dos usuários a ser obtido por meio de alterações na envoltória e/ou no aproveitamento do espaço, análise de outras soluções de ventilação natural, artificial ou híbrida, bem como o estudo de outras normas e critérios tanto de conforto térmico quanto de eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 16401**. Parte 2: Parâmetros de Conforto Térmico. Rio de Janeiro, 2008.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003. Diário Oficial da União (DOU) – Seção 1, 20 de Janeiro de 2003. Brasília. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RE_09_2003.pdf/f4af80d4-8516-4f9c-a745-cc8b4dc15727>. Acesso em 26 Março 2019.

ARAÚJO, M.L.T., SCALCO, V.A. Desempenho térmico de creches padronizadas do programa Proinfância em diferentes cidades alagoanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO,17, 2018, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2010**. Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc., Atlanta, 2010.

ASSISTÊNCIA TÉCNICA MG. Home - Assistência Técnica - Assistência Técnica Hitachi BH. Belo Horizonte, [201-]. Disponível em: <https://www.assistenciatecnicamg.com.br/assistencia-tecnica/assistencia-tecnica-hitachi-bh/>. Acesso em nov 2018.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanço Energético Nacional 2017**: Ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em 15 de Mar. 2018.

CARNEIRO, Manuela C. Arouca, Laura P. B. Costa, Taís da C. Almeida, Antânio Gabriel. Análise técnica e econômica de um sistema de ar condicionado com fluxo de refrigerante Variável. 8. 2012.VII CONNEPI. Palmas, Tocantis. VII CONNEPI: 2012.

CASTRO, A.P.A.S., RANCURA, R.L., MATHEUS, C., NOVOLETTI, A. L. Conforto térmico em biblioteca universitária: estudo de caso no campus Santa Bárbara D'Oeste da Universidade Metodista de Piracicaba. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Atendimento - Valores de Tarifa e Serviços. Belo Horizonte, [201-]. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>. Acesso em nov 2018.

COSTA, Sergio Francisco. **Introdução Ilustrada a Estatística**. São Paulo: Harbra, 1998. 3ed.

DOE - UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Plus™ Version 8.7 Documentation: Input Output Reference. Washington DC: U.S. Department of Energy, 2016.

DUARTE, Matheus de Andrade; FREITAS, Ludmylla Faria de; LIMA, Frederico Romagnoli Silveira; OLIVEIRA, Raquel Diniz. Modelo termoenergético calibrado do restaurante estudantil do CEFETMG Campus II. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

ENERGYPLUS. Weather Data - South America WMO Region 3 – Brazil – Belo Horizonte. Golden, 2017. Disponível em <https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA%20%20>. Acesso em 19 mar. 2018.IEA-International Energy Agency. Relatório técnico. Paris, França 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em 15 Mar. 2018.

HITACHI. Produtos. Brasília, Canoas, Rio de Janeiro e São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.hitachiaircon.com.br/Produtos>. Acesso em nov 2018.

IEA. International Energy Agency. 2016. Disponível em: < https://www.iea.org/>. Acessado em: 15 de Março de 2018.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos** (RTQ-C). Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/comercial/regulamentos>. Acesso em: 26 nov. 2017.

MARIVENT. Exaustores Eólicos. Marília, 2019. Disponível em: <https://www.marivent.com.br/exaustores/exaustores-eolicos-marivent.html>. Acesso em nov 2018.

NAVIGATION, Trimble. SketchUp Make 2017.Acesso em: 1 mar. 2017. Disponível em: < https://www.sketchup.com/pt-BR/download/all>

REBELATTO, D. A. do N. Projeto de Investimento: com estudo de caso completo na área de serviços. Ed. Manoli, 2004.

SAGOI, J. M.; RAMOS, G.; LAMBERTS, R. Análise das medições de absortância através do Espectrômetro alta II. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), 2010, Canela. **Anais**... Canela: ANTAC, 2010.

UNITED STATES DEPARTAMENT OF ENERGY - DOE. **EnergyPlus™ Version8.7 Documentation**: Input Output Reference. Wahsington DC: U.S. Departament of Energy, 2016.

TRINKLEY, M. Considerações sobre preservação na construção e reforma de bibliotecas: planejamento para preservação. Rio de Janeiro: Projeto Conservação Preventiva em Bibliotecas e Arquivos: Arquivo Nacional, 2001.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao CEFETMG pelo auxílio ao desenvolvimento deste trabalho. À Ares Arquitetura pelo empréstimo do espectrofotômetro de Refletância Alta II e ao LABCON da EAUFMG pelo empréstimo dos Hobos utilizados nesta pesquisa.