



ANÁLISE ENERGÉTICA E FINANCEIRA DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO PARA UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL: UMA COMPARAÇÃO ENTRE EXPANSÃO DIRETA E INDIRETA

PAPER 44

RESUMO

A climatização das residências brasileiras vem aumentando ao longo dos últimos anos de forma vertiginosa, fato que resulta em um aumento na demanda por energia elétrica e no crescimento do valor na conta de energia. Tendo isso em vista, este estudo visa à comparação entre sistemas de ar condicionado do tipo split e do tipo água gelada aplicada a um edifício de 12 andares, com 8 apartamentos por andar que está sendo construído em Teresina, Piauí. Devido ao clima quente e seco da cidade, é comum uma família possuir três ou quatro equipamentos split em suas residências. Em outros países, já é comum o uso do ar condicionado centrais para prédios de apartamentos, mas no Brasil, ainda é raro essa modalidade de climatização. Por isso, será analisada a viabilidade técnica da adoção de um chiller a compressão interligado a fancoletes em contrapartida dos tradicionais splits. A análise energética será realizada em termos de eficiência energética com o cálculo do fator de utilização de energia. Já a análise financeira será por meio do custo de instalação e do custo operacional ao longo de 5 anos. Observou-se que o sistema de expansão indireta com condensação a água gelada apresentou um melhor desempenho, porém o custo de instalação é muito alto, não garantindo o payback da instalação em um prazo de 5 anos.

Palavras-chave: Ar condicionado. Eficiência Energética. Carga Térmica.

ABSTRACT

The air conditioning of Brazilian homes has been increasing over the last few years, which results in an increase in the demand for electricity and an increase in the value of the energy bill. This study aims to compare split-type and chilled-water air conditioning systems applied to a building with 12 floors and 8 apartments per floor that is being built in Teresina, Piauí. Due to the hot and dry climate of the city, it is common for a family to have three or four split equipment in their homes. In other countries, it is already common to use central air conditioning for apartment buildings, but in Brazil, this modality of air conditioning is still rare. Therefore, the technical feasibility of adopting a compression chiller interconnected to fan-coils in contrast to traditional splits will be analyzed. The energy analysis will be carried out in terms of energy efficiency with the calculation of the energy utilization factor. The financial analysis will be through the installation cost and operating cost over 5 years. It was observed that the indirect expansion system with cooling tower presented a better performance, but the installation cost is very high, not guaranteeing the installation payback in a period of 5 years.

Keywords: Air conditioning. Energetic efficiency. Thermal load.

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2020, o mundo viu seus hábitos serem transformados devido a pandemia da Covid-19. Devido ao isolamento social imposto para regular a transmissibilidade do vírus, a maior parte da população mundial passou este ano em suas residências. Com isso, as pessoas passaram a se interessar mais em tornar a casa um local mais confortável. A temperatura, a umidade e a pureza do ar são características que influenciam diretamente no conforto humano. Esses parâmetros podem ser modificados por meio dos sistemas de climatização. Ademais, antes mesmo da pandemia, com o avanço da tecnologia e com os preços mais acessíveis dos equipamentos de ar condicionado, tornou-se cada vez mais comum uma casa de classe média possuir dois ou mais condicionadores de ar. Segundo dados da EPE (2018), a parcela de consumo de energia elétrica nas residências brasileiras devido ao ar condicionado triplicou em doze anos.

A climatização de ambientes é responsável por parcela significativa da conta de energia. Por isso, devido a esse crescimento na quantidade de equipamentos por residência, há um aumento na demanda energética da rede. Tendo isso em vista, há a necessidade de equipamentos e de sistemas mais eficientes para que haja o uso mais racional da energia e, por sua vez, dos recursos naturais. (Pereira *et al.*, 2013).

Zato *et al.*, (2019) realizou um trabalho em que a comparação entre três tipos de sistema, VRF, água gelada e package, foi analisada para diversas capacidades de equipamentos e em quatro localidades de regiões diferentes no Brasil. O estudo visou à elaboração de um guia para orientar o projetista na seleção de qual sistema de ar condicionado adotar. Os autores verificaram que a carga térmica da instalação tem papel fundamental na seleção dos equipamentos, bem como o custo inicial e operacional, que varia entre as cidades. Formiga (2014) comparou a utilização de um sistema de expansão direta e indireta para um prédio de 3 andares e verificou que o custo do sistema de água gelada era maior do que para o sistema com splits convencionais.

No tocante à literatura mundial, Seo *et al.* (2020), Khatri e Joshi (2017), Ozahi *et al.* (2016) e Liu *et al.* (2015) elaboraram estudos de análises comparativas de sistemas de ar condicionado incluindo sistemas convencionais e sistemas VRF para prédios comerciais.

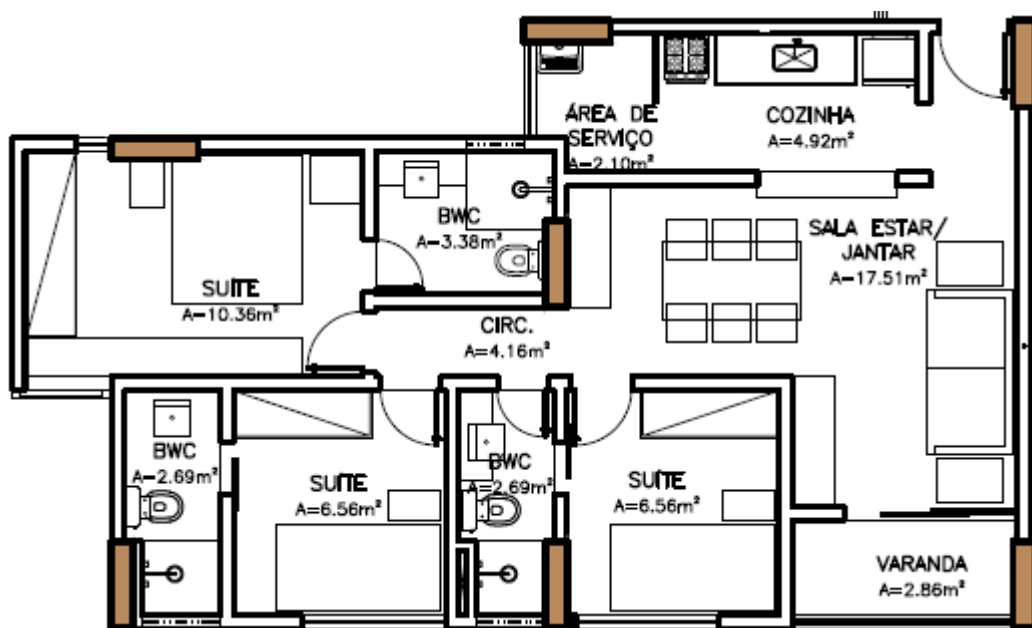
Existem sistemas de climatização por expansão direta e indireta. Nos sistemas de expansão direta, o fluido refrigerante troca calor diretamente com o ar, enquanto no sistema de expansão indireta, a transferência de energia ocorre entre o fluido refrigerante e um fluido intermediário, que, em geral, para instalações de climatização, é a água gelada. A água gelada passa por uma rede hidráulica e é distribuída para outros equipamentos nos quais ocorrem a troca de calor com o ambiente.

Neste artigo, buscou-se analisar comparativamente um sistema de expansão direta e um de expansão indireta para um edifício residencial em Teresina. Existem ainda poucos estudos desenvolvidos na área habitacional que possui um perfil de carga térmica diferente do âmbito comercial. Ademais, poucos trabalhos comparativos são realizados com as especificações das cidades do Nordeste Brasileiro, que possuem um clima, em sua maioria, com temperaturas mais altas e baixa umidade. A análise foi realizada por meio do consumo energético dos equipamentos e seu custo operacional e de instalação.

2 METODOLOGIA

Para este estudo, foi selecionado um prédio de apartamentos de 12 andares, com 8 apartamentos por andar. Cada unidade habitacional possui quatro cômodos a serem climatizados: a sala, dois quartos e uma suíte. Cada apartamento possui 70,60 m², uma área de um apartamento de médio padrão (Figura 1). A edificação ainda não foi construída e está na fase de projetos, sendo assim, na fase ideal para o estudo comparativo de sistemas de climatização.

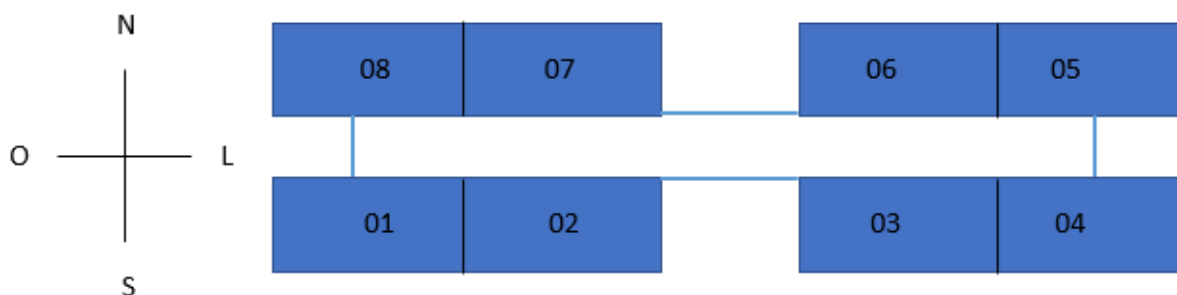
Figura 1 – Planta baixa do apartamento utilizado como objeto do estudo.



Fonte: Artes Construções, 2020.

Para iniciar o projeto de ar condicionado do edifício, é necessário levantar as características de construção da instalação para poder realizar o cálculo de carga térmica. O levantamento foi realizado para um andar em específico, de forma que cada cômodo teve sua carga térmica calculada. Na figura 2, pode-se ver a disposição dos apartamentos em um andar, informação fundamental para o cálculo da parcela de carga térmica referente à radiação em superfícies opacas e transparentes.

Figura 2 – Disposição das unidades habitacionais em um andar e orientação da fachada.



Fonte: Elaboração própria dos autores.

Após isso, os equipamentos foram selecionados com base em catálogos de fabricante. Para que os sistemas sejam analisados de modo mais equivalente, foi determinado que a climatização não será por dutos, mas por unidades individuais, de modo que cada ambiente será climatizado por um equipamento, sendo splits high wall para os sistemas de expansão direta e fancoletes também high wall para os sistemas de expansão indireta. Com o sistema definido, foi possível então, realizar a comparação entre a eficiência dos equipamentos, o seu consumo de energia e o respectivo custo de operação.

2.1 Cálculo de carga térmica

Primeiramente, a carga térmica é calculada para a condição de verão estabelecida pela NBR 16401. O fluxo de calor por condução foi calculado pela seguinte equação 1:

$$Q_{cond} = UA\Delta T \quad (1)$$

Sendo U o coeficiente global de transmissão de calor da superfície, A a área, e T a diferença entre a temperatura externa e interna. A parcela devido à radiação em superfícies opacas foi calculada com base na temperatura Sol-Ar que considera o efeito da radiação incidente e as trocas de energia de convecção e radiação. Para superfícies verticais, a temperatura Sol-Ar é calculada conforme a equação 2.

$$T_{sol-ar} = T_{ext} + \alpha * RS * R_{se} \quad (2)$$

Em que α é a absorvidade do material, RS é a radiação incidente na superfície e R_{se} é a resistência superficial externa. De modo que a parcela da carga devido à radiação para superfícies opacas foi calculada pela equação 3:

$$Q_{rad,opaca} = UA * (T_{ext} + \alpha * RS * R_{se} - T_{int}) \quad (3)$$

Para superfícies transparentes, tem-se a equação 4:

$$Q_{rad,transp} = A * RS * F_s \quad (4)$$

Sendo F_s o fator solar da superfície. As parcelas referentes à iluminação, às pessoas e aos equipamentos foram calculadas com base nas orientações da NBR 16401/2008. A renovação de ar, como se trata de um prédio residencial e não comercial, pode ser garantida pela infiltração de portas e de janelas. A infiltração foi calculada por meio do método das frestas.

2.2 Comparação entre os sistemas

Para comparar os sistemas, o critério energético e econômico é levado em consideração. Em equipamentos de refrigeração, a maneira mais comum de se verificar a eficiência de um equipamento é pelo seu COP, que é a razão entre a capacidade de refrigeração do equipamento e o seu gasto energético para isso, em unidades de potência. Como neste trabalho, busca-se avaliar dois sistemas, convém fazer uma análise global para efeitos comparativos. Tal relação é denotada por Fator de Utilização de Energia (Equação 5), definida em Arteaga (2010), que é a razão entre o somatório de toda a energia produzida, neste caso, todo o efeito frigorífico, e entre o total de energia fornecida, que no caso dos sistemas de expansão direta é a potência dos compressores e ventiladores e para os sistemas de expansão indireta é a potência dos fancoletes, dos chillers, das bombas e das torres de refrigeração, quando houver.

$$FUE = \frac{\Sigma \text{capacidade frigorígena}}{\Sigma \text{potência consumida}} \quad (5)$$

Pelo critério econômico, são considerados os custos de instalação dos dois sistemas e os custos operacionais. Pode ser realizada uma relação simples entre os sistemas. Para isso, organiza-se um quadro comparativo (Quadro 1).

Quadro 1 – Comparação de custos entre os sistemas

| Sistema | Expansão Direta | Expansão Indireta |
|-------------------|-----------------|-------------------|
| Custo inicial | A | B |
| Custo operacional | C | D |

Fonte: Elaborado pelos autores.

O custo inicial pode ser calculado por meio do valor de R\$/TR da cidade, isto é, quanto custa instalar um sistema, já incluindo material, mão de obra

e equipamentos em uma cidade. Esse valor é multiplicado pela capacidade do sistema em TR para que se defina o valor em reais.

O custo operacional pode ser calculado por meio do valor de R\$/kWh. O kWh é calculado com base na potência do equipamento multiplicada pelo número de horas de uso, dada pela equação 6. Esse valor é então multiplicado pela tarifa de energia e assim é obtido o custo em reais.

$$C_{op} = h * Pot \quad (6)$$

Como o custo inicial de sistemas de expansão indireta, devido a sua complexidade é maior do que os custos do sistema de expansão direta, $B > A$. Para que haja viabilidade econômica que justifique o investimento de um sistema de expansão indireta, o custo operacional deste deve ser menor do que o custo do outro, de modo que $D < C$.

Uma variável importante a ser definida é o tempo esperado para o payback do investimento, ou seja, para o retorno do valor investido. Um tempo médio e razoável para o retorno de uma instalação de climatização é de 5 anos, visto que a vida útil destes sistemas pode variar entre 10 a 15 para expansão direta e 15 a 20 para instalações de água gelada. Estabelecido esse prazo, a diferença de custo inicial ($B-A$) deve ser superada em 5 anos, de modo que a seguinte relação pode ser estabelecida pela equação 7.

$$C - D \geq \frac{B-A}{5} \quad (7)$$

Ou seja, a diferença do custo operacional em um ano ($C-D$) deve ser superior a diferença do custo de instalação naquele ano.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1, pode-se verificar os resultados do levantamento da carga térmica.

É interessante notar que a parcela mais significativa da carga térmica vai variar de acordo com o ambiente e com a sua orientação. Os quartos possuem uma parcela bastante significativa de ganho de calor por condução, enquanto o ganho de calor por radiação varia conforme a orientação da fachada. As suítes que possuem a fachada orientada para o oeste possuem um ganho de calor superior às que são orientadas para o leste ou que não sofrem radiação solar direta.

Tabela 1 – Resumo da carga térmica para cada ambiente em um andar típico da edificação em estudo.

| APT | AMBIENTE | Q condução (W) | Q radiação (W) | Q pessoas S+L (W) | Q iluminação (W) | Q equip S + L (W) | Q ar externo S + L (W) |
|-----|----------|----------------|----------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------------|
|-----|----------|----------------|----------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------------|

CONBRAVA 2021 – São Paulo Expo, 23 à 25 de novembro de 2021 - São Paulo, Brasil

| | | | | | | | |
|-----|--------------|---------|---------|---------|--------|-----------|----------------|
| 101 | SALA | 2009,67 | 323,32 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1687,75 | 1212,04 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |
| 102 | SALA | 2009,67 | 323,32 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1695,50 | 72,45 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |
| 103 | SALA | 2009,67 | 323,32 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1695,50 | 72,45 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |
| 104 | SALA | 2009,67 | 323,32 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 222,97 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1687,75 | 905,01 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |
| 105 | SALA | 2009,67 | 556,26 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1710,74 | 970,00 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |
| 106 | SALA | 2009,67 | 556,26 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1701,36 | 139,15 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |
| 107 | SALA | 2009,67 | 556,26 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1701,36 | 139,15 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |
| 108 | SALA | 2009,67 | 556,26 | 450+330 | 157,59 | 827,5+250 | 1504,35+1085,2 |
| | QUARTO 1 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | QUARTO 2 | 1082,10 | 325,76 | 150+110 | 59,04 | 155+0 | 158,52+97,26 |
| | SUÍTE MASTER | 1710,74 | 1286,59 | 225+165 | 93,06 | 155+0 | 216,01+121,39 |

Fonte: Próprio autor.

Na tabela 2, pode-se observar a carga térmica total para cada ambiente em duas unidades, W e Btu/h. Com base nesses valores, pode-se então selecionar equipamentos por meio da pesquisa em catálogos de fabricantes. Foram selecionados então equipamentos e um mesmo fabricante para que se houvesse uma padronização dos equipamentos. Notou-se que para os dois quartos menores, um ar condicionado de 7000 Btu/h seria suficiente. Porém, modelos dessa capacidade estão sendo

descontinuados no mercado é o modelo mais próximo é de 9000 Btu/h tanto para os splits comuns como para os fancoletes. Para a sala, como a carga térmica calculada foi mais e 23000 Btu/h, para expansão direta o modelo mais próximo foi e 24000 btu/h e de 25000 btu/h para a expansão indireta.

A maior diferença foi percebida nos equipamentos para a suíte master. Esse foi o ambiente com maior diferença entre os apartamentos. A carga térmica variou de 9355,04 Btu/h para 13547,20 Btu/h devido à influência da radiação solar. Por conta dessa diferença, se faz necessária a escolha de equipamentos inverter, os quais podem realizar a variação da frequência do compressor, possibilitando um menor consumo do equipamento. Nos fancoletes, esse controle pode ser feito por meio de uma válvula que regula a vazão de água gelada.

Tabela 2 – Resumo da carga térmica por ambiente, capacidade dos equipamentos selecionados e consumo elétrico dos equipamentos.

| APT | AMBIENTE | Q total (W) | Q total (BTU/h) | Capacidade ED (Btu/h) | Capacidade EI (Btu/h) | Consumo elétrico ED (W) | Consumo elétrico EI (W) |
|-----|--------------|-------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 101 | SALA | 6937,63 | 23657,32 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |
| | QUARTO 1 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 3875,24 | 13214,58 | 18000 | 14000 | 1613 | 50 |
| 102 | SALA | 6937,63 | 23657,32 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |
| | QUARTO 1 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 2743,41 | 9355,04 | 12000 | 14000 | 1065 | 50 |
| 103 | SALA | 6937,63 | 23657,32 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |
| | QUARTO 1 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 2743,41 | 9355,04 | 12000 | 14000 | 1065 | 50 |
| 104 | SALA | 6937,63 | 23657,32 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |
| | QUARTO 1 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2034,89 | 6938,97 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 3568,21 | 12167,60 | 12000 | 14000 | 1065 | 50 |
| 105 | SALA | 7170,57 | 24451,66 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |
| | QUARTO 1 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 3656,20 | 12467,63 | 12000 | 14000 | 1065 | 50 |
| 106 | SALA | 7170,57 | 24451,66 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |
| | QUARTO 1 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 2815,97 | 9602,46 | 12000 | 14000 | 1065 | 50 |
| 107 | SALA | 7170,57 | 24451,66 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |

| | | | | | | | |
|-----|--------------|---------|----------|-------|-------|------|-----|
| | QUARTO 1 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 2815,97 | 9602,46 | 12000 | 14000 | 1065 | 50 |
| 108 | SALA | 7170,57 | 24451,66 | 24000 | 25000 | 2080 | 162 |
| | QUARTO 1 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | QUARTO 2 | 2137,69 | 7289,51 | 9000 | 9000 | 800 | 40 |
| | SUÍTE MASTER | 3972,78 | 13547,20 | 18000 | 14000 | 1613 | 50 |

Fonte: Próprio autor

Na tabela 3, pode-se verificar a carga térmica total por andar e em todo prédio. A carga térmica de todo o edifício é de 1392,05 kW, ou seja, 395,5 TR. No caso de um sistema de expansão indireta com água gelada seria necessário um chiller de capacidade de 400 TR, ou então, dois chillers de 200 TR.

Tabela 3 – Resumo da Carga Térmica do Edifício

| Por Andar | |
|---|-------------|
| Carga Térmica (kW) | 116,004 |
| Carga Térmica (Btu/h) | 395.575,752 |
| Capacidade dos equipamentos Expansão Direta (Btu/h) | 444.000 |
| Capacidade dos equipamentos Expansão Indireta (Btu/h) | 456.000 |
| Em todo o prédio | |
| Carga térmica (kW) | 1392,055432 |
| Carga Térmica (TR) | 395,4702931 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com a carga térmica total determinada, foi possível selecionar os equipamentos do sistema de climatização. No sistema de expansão direta, há apenas os condicionadores de ar do tipo highwall, com capacidade e potência já definidos na tabela 2. Já no sistema de expansão indireta, além dos fancoletes já identificados na tabela 2, é necessário também a especificação de um chiller, equipamento responsável por resfriar a água a ser enviada para os fancoletes

Em um sistema de expansão indireta, a condensação pode ser a água ou a ar. Os sistemas com condensação a ar são mais compactos, porém menos eficientes, enquanto o sistemas com condensação a água são mais eficientes, mas possuem um custo de instalação maior porque necessitam de uma torre de arrefecimento e um sistema de bombas dedicadas a ela. Foram analisados estes dois tipos de equipamentos em comparação com os sistemas compostos por splits convencionais.

Como a carga térmica do sistema é de 395,47 TR, foram escolhidos dois chillers de 200 TR. O chiller selecionado com condensação a ar, possui uma potência nominal total, isto é, compressor mais ventilador, de 268,1 kW. Já o chiller selecionado com condensação a água, possui uma potência nominal de 150 kW. Observa-se que o consumo elétrico do chiller a água é bem menor do que o a ar. Outro consumo elétrico que deve ser levado em

conta, além dos fancoletes e do chiller é a potência das bombas. Para uma instalação deste porte, foi considerado uma potência de 18 kW para as bombas. No sistema com condensação a água, o consumo das torres e das bombas de condensação foi estimado em 35 kW. Com os dados da potência elétrica dos equipamentos e do efeito frigorígeno de cada sistema, foi possível calcular o fator de utilização de energia. Na tabela 4, pode-se verificar o fator de utilização dos sistemas de climatização.

Tabela 4 – Fator de utilização de energia para os três sistemas de climatização em estudo.

| Sistema | Efeito Frigorígeno (W) | Potência elétrica (W) | Fator de Utilização de Energia |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Expansão Direta | 1.557.894,737 | 468.672 | 3,32 |
| Expansão Indireta a ar | 1.600.000 | 582.232 | 2,75 |
| Expansão Indireta a água | 1.600.000 | 381.032 | 4,20 |

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Percebe-se que, do ponto de vista energético, o sistema mais eficiente é o sistema de expansão indireta com condensação a água, isto é, o sistema com o maior aproveitamento de energia. O segundo passo da análise é do ponto de vista financeiro. Primeiro, se compara o custo de instalação, que pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Custo de instalação para os sistemas de climatização

| Custo de instalação | Expansão Indireta a Ar | Expansão indireta a água | Expansão Direta |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|-----------------|
| Custo R\$/TR | 8800 | 10500 | 6800 |
| Custo em reais | 3520000 | 4200000 | 2720000 |

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Primeiramente, comparou-se o sistema de expansão direta com o de indireta a ar. A diferença de custo na instalação é de R\$ 800.000,00. Este custo dividido em 5 anos, dá R\$ 160.000,00 por ano. Ou seja, a diferença no custo operacional mensal deve ser maior ou igual a R\$13.333,33. Quando comparada a expansão direta com a indireta com condensação a água, percebeu-se uma diferença de custo superior, de R\$ 1.480.000,00, que dividido em 5 anos dá R\$ 296.000,00. Então a diferença de custo mensal para compensar o investimento deve ser de R\$ 24.666,67. Na tabela 6, pode-se verificar os custos operacionais dos equipamentos. Para estes cálculos, considerou-se um tempo médio de operação mensal de 300 horas para os splits e para os fancoletes, para as torres e para as bombas e de 240 horas para os chillers, já que o regime de operação desta máquina é diferente, podendo esta ser desligada enquanto os fancoletes permanecem ligados com a água gelada em recirculação.

Tabela 6 – Custo operacional dos sistemas de climatização

| Equipamento | Consumo de energia mensal (kWh) | Custo da energia mensal (R\$) | Consumo de energia anual (kWh) | Custo da energia anual (R\$) | Consumo ao longo de 5 anos (kWh) | Custo da energia ao longo de 5 anos (R\$) |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|
| Splits | 104659,2 | 60892,82 | 1255910,4 | 730713,7889 | 6279552 | 3.653.568,94 |
| Fancoletes | 5610,24 | 3264,15 | 67322,88 | 39169,79804 | 336614,4 | 195.848,99 |
| Chiller a Ar | 128688 | 74873,25 | 1544256 | 898479,0259 | 7721280 | 4.492.395,13 |
| Chiller a água | 72000 | 41891,04 | 864000 | 502692,48 | 4320000 | 2.513.462,4 |
| Bombas | 5400 | 3141,83 | 64800 | 37701,936 | 324000 | 188.509,68 |
| Torre + BAC | 10500 | 6109,11 | 126000 | 73309,32 | 630000 | 366.546,6 |
| Total CAG a Ar | 139698,24 | 81279,23 | 1676378,88 | 975350,76 | 8381894,4 | 4.876.753,8 |
| Total CAG a água | 93510,24 | 54406,13 | 1122122,88 | 652873,534 | 5610614,4 | 3.264.367,67 |

Fonte: Próprio Autor.

Com os dados da tabela 6, observou-se que o valor do sistema de expansão direta com condensação a ar tem o maior custo operacional, seguido do sistema de expansão direta. O sistema de água gelada com condensação a água possui o menor custo operacional, o que é coerente com o fato de esse ser o sistema de maior eficiência térmica. Porém, o custo de instalação deste sistema é bastante alto e a diferença no custo operacional (C-D) não é maior que a diferença no custo de instalação (B-A). Para que o investimento tivesse o payback em 5 anos, a diferença de custo operacional mensal entre a expansão direta e a indireta por água gelada deveria ser superior a R\$ 24.666,67. No entanto, essa diferença mensal é de R\$ 6486,88. Por isso, para uma instalação desse porte, não seria viável o sistema de expansão indireta, nem por condensação a água nem por condensação a ar.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, buscou-se comparar sistemas de expansão indireta e de expansão direta para um edifício residencial de um padrão médio com base no seu desempenho energético e econômico. O desempenho energético foi calculado com base no fator de utilização de energia e verificou-se que o sistema de expansão indireta de água gelada apresentava a melhor relação entre o efeito frigorígeno proporcionado e o consumo de energia.

Em relação ao aspecto econômico, o custo operacional do sistema de água gelada com expansão indireta também apresentou o menor custo. Porém, este sistema tem um valor de investimento muito alto e, dentro das variáveis propostas no trabalho, não seria possível um payback da instalação em menos de 5 anos.

Este estudo considerou o consumo dos equipamentos em carga total. No entanto, sabe-se que na maior parte do tempo, os equipamentos

trabalham em carga parcial. Dessa forma, uma sugestão para trabalhos futuros é a análise desses sistemas de climatização em carga parcial para um resultado mais preciso e detalhado do desempenho dos sistemas. Outra sugestão é a comparação de outros sistemas, dentre os quais outros sistemas como multisplit e VRF.

REFERÊNCIAS

ARTEAGA, J.A.F., 2010. Análise energética e exergética de um sistema de cogeração com motores de combustão interna. Dissertação de M.Sc., Unicamp, Campinas, SP, Brasil.

Arte Construções, Book Poty Boulevard, 2020. Disponível em <<http://www.arteconstrucoes.com/index.html>> Acesso 08 dez. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 16401/1**: Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários – Parte 1: Projetos das Instalações, 2008

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA: **Nota Técnica EPE 030/2018**: Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética, 2018. Disponível em<<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-epe-030-2018>>

FORMIGA, F. de L. Comparação entre dois sistemas de climatização para um mesmo ambiente. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

KHATRI, R., JOSHI, A. Energy Performance Comparison of Inverter based Variable Refrigerant Flow Unitary AC with Constant Volume Unitary AC, *Energy Procedia*, Volume 109, 2017, Pages 18-26, ISSN 1876-6102.

LIU, C., *et al.* Operational Electricity Consumption Analyze of VRF Air Conditioning System and Centralized Air Conditioning System Based on Building Energy Monitoring and Management System, *Procedia Engineering*, Volume 121, 2015, Pages 1856-1863, ISSN 1877-7058.

ÖZAHİ, E., ABUŞOĞLU, A., KUTLAR, A. İ. DAĞCI, O. A comparative thermodynamic and economic analysis and assessment of a conventional HVAC and a VRF system in a social and cultural center building. *Energy and Buildings*, Volume 140, 2017, Pag. 196-209, ISSN 0378-7788.

PEREIRA, C.D., LAMBERTS, R. GHISI, E. Nota técnica referente aos níveis mínimos de eficiência energética de condicionadores de ar no Brasil. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, 2013.

SEO, B., YOON, Y.B., YU, B.H., CHO, S. LEE, K.H. Comparative analysis of cooling energy performance between water-cooled VRF and conventional AHU systems in a commercial building. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 170, No 114992, 2020.

ZATO, J.O., *et al.* Guia De Aplicação De Sistemas De Ar Condicionado Conforme Capacidade, Custo, Localização E Eficiência – Água Gelada X VRF X Package. In: *Conbrava*, 2019, São Paulo.