Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Campus Divinópolis
Pós Graduação em Sistemas e Dispositivos Mecatrônicos

Ramon Antônio dos Santos

Análise da eficiência energética e viabilidade econômica de um condicionador de ar split inverter

Divinópolis
2021

Ramon Antônio dos Santos

Análise da eficiência energética e viabilidade econômica de um condicionador de ar split inverter

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Pós-Graduação em Sistemas e Dispositivos Mecatrônicos como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Especialista em Sistemas e Dispositivos Mecatrônicos.

Eixo de Formação: Processos Térmicos e Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva

CEFET-MG

Divinópolis

2021

(Catalogação - Biblioteca Universitária – Campus Divinópolis – CEFET-MG)

Santos, Ramon Antônio dos

S237a Análise da eficiência energética e viabilidade econômica de um condicionador de ar *split inverter* / Ramon Antônio dos Santos.- Divinópolis, 2021.

62f. : il.

Orientador: Prof. Evandro Fockink da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (especialização) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas, Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Sistemas e Dispositivos Mecatrônicos, 2021.

1. Processos térmicos. 2. Energia renovável. 3. Eficiência. 4. Condicionador de ar. 5. Payback. 6. Inverter. I. Silva, Evandro Fockink da. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU: 62(043)

Bibliotecária Responsável Maria Inês Passos Pereira Bueno CRB-6:2805

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEFET-MG / Divinópolis
Curso de Engenharia Mecatrônica

Monografia entitulada "Análise da eficiência energética e viabilidade econômica de um condicionador de ar split inverter", de autoria do(as) graduando(as) Ramon Antônio dos Santos, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício

Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva

Coordenador do Curso de Pós - Graduação em Sistemas e Dispositivos Mecatrônicos
Prof. Dr. Valter Júnior de Sousa Leite

Divinópolis

Setembro de 2021

A minha família, que sempre me incentivou a continuar meus estudos.

Agradecimentos

Agradeço,

aos meus pais e minha namorada Thalita Fernanda Pereira Santos por todo o apoio e confiança em mim depositados;

ao Prof. Evandro por ter me orientado e ser sempre objetivo em suas instruções e comentários;

aos colegas de curso: Rafael Caetano Paiva, Fábio Azevedo Prudêncio e Álvaro Carvalho Vieira que sempre me ajudaram nos momentos de dificuldade com disciplinas específicas;

ao amigo Thalisson Martins Rodrigues que sempre esteve junto comigo na graduação e contribuiu muito com o presente trabalho.

Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.

Isaac Newton

Resumo

O consumo de energia elétrica nas residências brasileiras cresceu mais de 60% no período de 2005 a 2017, os equipamentos de refrigeração são responsáveis por 36% do consumo total de energia elétrica. Os condicionadores de ar tem influência direta no aumento do consumo de energia elétrica, a utilização da tecnologia inverter nesses equipamentos tem aumentado a eficiência dos equipamentos gerando economia de energia elétrica e fornecendo um payback financeiro muito interessante. Muitos estudos foram analisados e reforçam que o equipamento supracitado é muito mais eficiente que o modelo convencional. Com a intenção de verificar a viabilidade econômica do condicionador de ar split inverter, foi calculada a carga térmica de uma área comercial com 250m^2, onde foi realizada uma comparação entre dois modelos de condicionadores de ar de fabricantes diferentes, onde um utiliza a tecnologia inverter e o outro a tecnologia convencional, considerando que o modelo inverter seja 20%, 30%, 40% e 50% mais econômico que o modelo convencional. No pior dos cenários, ou seja considerando 20% de economia de energia elétrica o payback foi de 5,76 anos, já no melhor dos cenários, considerando 50% de economia na energia elétrica, o retorno ocorreu em 2,21 anos.

Palavras-chave: Eficiência, condicionador de ar do tipo inverter, payback

Abstract

The consumption of electric energy in Brazilian homes grew by more than 60% in the period from 2005 to 2017, refrigeration equipment is responsible for 36% of the total consumption of electric energy. Air conditioners have a direct influence on the increase in electricity consumption, the use of inverter technology in these equipaments has increased the efficiency of the equipment, generating electricity savings and providing a financial payback of less than five years. Many studies were analyzed and reinforce that the equipment mentioned above is much more efficient than the conventional model. With the intention of verifying the economic viability of the inverter type air conditioner, a scenario with a 36m^2 room was analyzed comparing a conventional air conditioner with a model that uses the inverter technology, taking into account that the inverter equipment is 20% to 50% cheaper than conventional equipment. In the best scenario with 50% energy savings, the payback was 1.02 years, while in the worst scenario with 20% savings, the payback was 2.58 years. A 200m^2 scenario was also analyzed, taking into account the same criteria that was used in the 36m^2 room. Considering 20% of electric energy savings, the payback was greater than four years, considering 50% of savings, the return occurred in 2.18 years.

Keywords: Efficiency, inverter type air conditioner, payback

Sumário

1 Introdução **1**

1.1 Contextualização e definição do problema 1

1.2 Objetivos 4

1.2.1 Objetivo geral 4

1.2.2 Objetivos específicos 4

2 Fundamentos **5**

2.1 Revisão da literatura 5

2.1.1 Ciclo de refrigeração por compressão de vapor 5

2.1.2 Sistema de ar condicionado do tipo split 7

2.1.2.1 Unidade condensadora 7

2.1.3 Unidade evaporadora 8

2.1.3.1 Linhas frigoríficas 8

2.1.3.2 Instalações elétricas 8

2.1.3.3 Rede de drenagem 8

2.1.4 Compressor modelo convencional 9

2.1.5 Compressor de velocidade variável 10

2.1.6 Inversor de frequência 12

2.1.7 Válvula de expansão eletrônica 13

2.1.8 Comparação entre um condicionador de ar split inverter e um condicionador de ar split convencional 14

2.2 Metodologia 16

2.2.1 Realização do cálculo da carga térmica 17
2.2.2 Escolha dos condicionadores de ar 19
2.2.3 Tarifas de energia elétrica 21
2.2.4 Viabilidade econômica do condicionador de ar inverter 22
2.3 Fundamentação teórica 24
2.3.1 Cálculo da carga térmica de um ambiente 24
2.3.1.1 Formulário para cálculo simplificado de carga térmica de verão 24
2.3.2 Juro 26
2.3.3 Fluxo de caixa descontado 27
2.3.4 Valor presente liquido (VPL) 27
2.4 Taxa interna de retorno (TIR) 28
2.4.1 Estado da arte 28
3 Resultados 31
3.1 Análise financeira 31
3.2 Análise dos resultados 31
4 Conclusão 33
Referências 35

Lista de figuras

Figura 1.1 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. Fonte: INMETRO (2021). 2
Figura 1.2 – Selo Procel. Fonte: PROCEL (2021). 2
Figura 1.3 – Decomposição do consumo final de energia elétrica em 2017. Fonte: EPE (2018b). 3
Figura 1.4 – Consumo de energia elétrica por equipamento. Fonte: EPE (2018b). . . 3

Figura 2.1 – Ciclo de refrigeração baseado em quatro processos. Fonte: Borgnakke e Sonntag (2013). 6
Figura 2.2 – Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor. 6
Figura 2.3 – Unidade condensadora de um condicionador de ar split. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015). 7
Figura 2.4 – Unidade evaporadora de um condicionador de ar split. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015). 8
Figura 2.5 – Unidade condensadora de um condicionador de ar split. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015). 9
Figura 2.6 – Compressor de velocidade variável. Fonte: Danfoss (2021). 11
Figura 2.7 – Inversor de freqüência SINAMICS V20. Fonte: Siemens (2021). 12
Figura 2.8 – Funcionamento de um inversor de frequência. Fonte: Schneider Eletric (s.d.). 12
Figura 2.9 – Válvula de expansão eletrônica E2V Smart. Fonte: Carel (2011). . . . 14

Figura 2.10–Especificações técnicas da válvula de expansão eletrônica E2V Smart. Fonte: Carel (2011). 14
Figura 2.11–Comparativo entre sistema inverter e convencional. Fonte: Rangel (2020). 15
Figura 2.12–Consumo de potência dos compressores dos dois sistemas ao longo do dia. Fonte: Paiva et al. (2021). 15
Figura 2.13–COP dos sistemas ao longo do dia. Fonte: Paiva et al. (2021). 16
Figura 2.14–Consumo de energia elétrica dos dois sistemas ao longo do dia. Fonte: Paiva et al. (2021). 16
Figura 2.15–Croqui área de 250m^2. Fonte: Autor. 17
Figura 2.16–Condicionador de ar Agratto convencional. Fonte: Autor. 20
Figura 2.17–Condicionador de ar inverter da Carrier. Fonte: Autor. 20
Figura 2.18–Tabela para cálculo simplificado de carga térmica de verão conforme referência da norma ABNT NBR 5858/1983. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015). 25
Figura 2.19–Fator de correção por região. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015). 26

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Calculo da carga térmica. Fonte: Autor. 18
Tabela 2.2 – Especificações técnicas do condicionador de ar convencional de 56000 BTU/h. Fonte: Autor. 19
Tabela 2.3 – Especificações técnicas do condicionador de ar inverter de 54000 BTU/h. Fonte: Autor. 20
Tabela 2.4 – Valores do condicionador de ar convencional Agratto de 56000 BTU/h. 21
Tabela 2.5 – Valores do condicionador de ar inverter Carrier de 54000 BTU/h. . . . 21
Tabela 2.6 – Valor da tarifa de energia elétrica da CEMIG sem impostos. 21
Tabela 2.7 – Valor da tarifa de energia elétrica da CEMIG com impostos. 22
Tabela 2.8 – Economia anual do custo da energia elétrica do condicionador de ar inverter área de 250m². Fonte: Autor. 23
Tabela 2.9 – Economia anual do custo da energia elétrica do condicionador de ar inverter com fluxo de caixa área de 250m². Fonte: Autor. 23
Tabela 2.10–Benefícios acumulados área de 250m². Fonte: Autor. 24

Tabela 3.1 – Análise financeira. Fonte: Autor. 31

Lista de acrônimos e notações

COP	Coefficient of Performance, do inglês *Coeficiente de desempenho*
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MPPT	Maximum Power Point Tracker, do inglês *Rastreador de Máximo Ponto de Potência*
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Liquido

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização e definição do problema

No ano de 2021 o Brasil vive uma enorme crise de abastecimento de energia elétrica, a aquisição de equipamentos elétricos mais eficientes pode gerar economia de energia. O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) é um órgão responsável por fiscalizar e avaliar os eletrodomésticos brasileiros. Atualmente há duas selagens informativas para o consumidor anexadas nos eletrodomésticos, a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) Figura 1.1 e Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) Figura 1.2.

A função da Etiqueta Ence é informar ao consumidor o desempenho energético dos eletrodomésticos, veículos leves e edificações, com a finalidade de ajudar o consumidor a escolher o equipamento mais eficiente com relação ao consumo de energia. A classificação dos equipamentos segundo o selo ENCE vai de A até E para condicionadores de ar, sendo o equipamento com classificação A o mais eficiente e o equipamento classificado com E o menos eficiente com relação ao consumo de energia elétrica. O Selo Procel tem a finalidade de ser uma ferramenta simples e eficaz para o consumidor, permitindo-lhe conhecer os equipamentos mais eficientes disponíveis no mercado. O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica Procel segue um valor mínimo de eficiência energética que deve ser alcançado pelo produto para obter o selo anexado em sua carcaça.

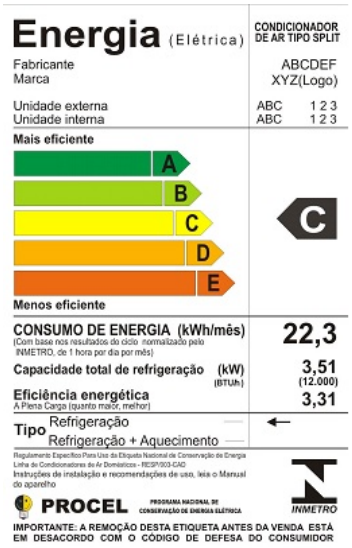

Figura 1.1 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. Fonte: INMETRO (2021).

Figura 1.2 – Selo Procel. Fonte: PROCEL (2021).

Segundo um levantamento feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2017, o setor comercial é responsável por 17% do consumo de energia elétrica do país Figura 1.3. Do ponto de vista dos serviços energéticos, de acordo com o Balanço de Energia Útil de 1984, 1994, e 2004, o consumo de energia elétrica no setor comercial, para fins de refrigeração, passou de 15% para 33%. Atualmente o serviço de climatização artificial demanda uma maior quantidade de energia.

Como pode ser observado na Figura 1.4, os condicionadores de ar são os equipamentos que mais consomem energia elétrica entre os eletrodomésticos e continuarão sendo os maiores consumidores de energia elétrica entre os equipamentos supracitados. A substituição

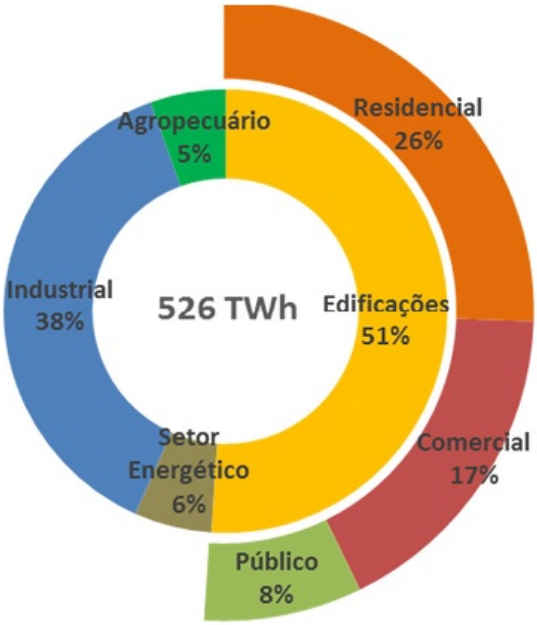

Figura 1.3 – Decomposição do consumo final de energia elétrica em 2017. Fonte: EPE (2018b).

dos equipamentos de ar condicionado convencionais pelos equipamentos com a tecnologia inverter deve ser avaliada, essa substituição pode gerar economia de energia elétrica além de gerar um payback financeiro rápido se o dimensionamento correto da carga térmica for realizado. A viabilidade econômica dos condicionadores de ar com a tecnologia inverter para o setor comercial pode ser extremamente interessante.

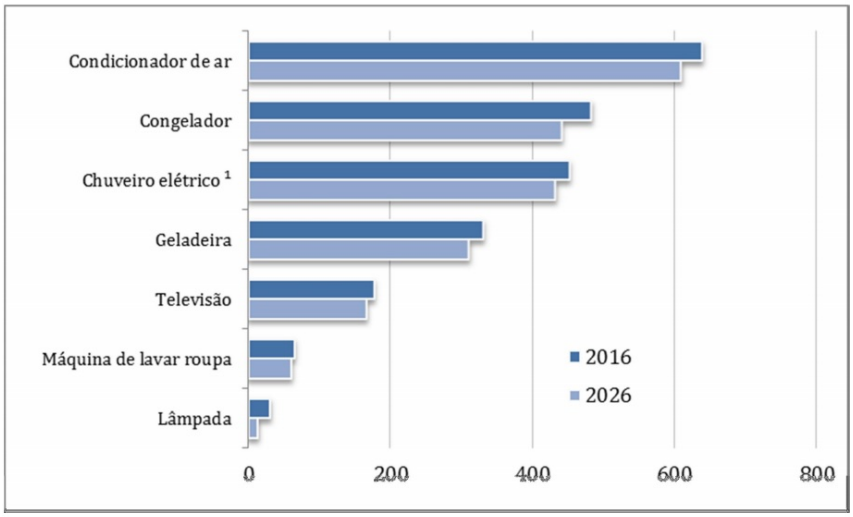

Figura 1.4 – Consumo de energia elétrica por equipamento. Fonte: EPE (2018b).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Verificar a eficiência energética de um condicionador de ar split inverter. Realizar uma comparação com relação à eficiência entre um condicionador de ar split inverter e um condicionador de ar split convencional além de avaliar viabilidade econômica do condicionador de ar inverter.

1.2.2 Objetivos específicos

Analisar os princípios de funcionamento dos condicionadores de ar inverter e convencional. Realizar o cálculo da carga térmica de uma área de 250m^2. Avaliar a viabilidade econômica do condicionador de ar inverter em uma área de 250m^2, considerando que ele consuma 20%, 30%, 40% e 50% menos energia elétrica que o convencional e calcular seu payback financeiro com fluxo de caixa descontado. .

Capítulo 2

Fundamentos

2.1 Revisão da literatura

2.1.1 Ciclo de refrigeração por compressão de vapor

O Ciclo de refrigeração por compressão de vapor é composto por quatro componentes principais: Condensador, evaporador, compressor e válvula de expansão além de um fluido refrigerante para realizar a troca de calor. Tomando como base o ciclo ideal de refrigeração, pode se notar que o estado 3 na Figura 2.1 corresponde a liquido saturado à temperatura do condensador e o estado 1 é vapor saturado à temperatura do evaporador. O processo de expansão isoentrópico do estado 3-4 ocorrerá na região bifásica com titulo baixo, nesse ponto encontra-se um dispositivo de estrangulamento, a válvula de expansão, que irá reduzir a pressão do fluído refrigerante que sai do condensador e vai para o evaporador.

Com isso, o ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor segue quatro processos (um isoentrópico, dois isobáricos e um isoentálpico) entre os quatro estados com oito propriedades. O compressor gera alta pressão, P2 = P3, e a temperatura baixa T4 = T1 é determinada pela transferência de calor do evaporador com o ambiente refrigerado.

O ciclo mostrado na Figura 2.2 pode ser utilizado como ciclo de refrigeração ou como bomba de calor. Utilizando ele como ciclo de refrigeração, o objetivo principal é manter um espaço refrigerado a uma temperatura T1 mais baixa que a temperatura do ambiente T3. A finalidade desse ciclo é transferência do calor ql. O desempenho de um ciclo de refrigeração é dado em função do coeficiente de desempenho, o COP, representado na

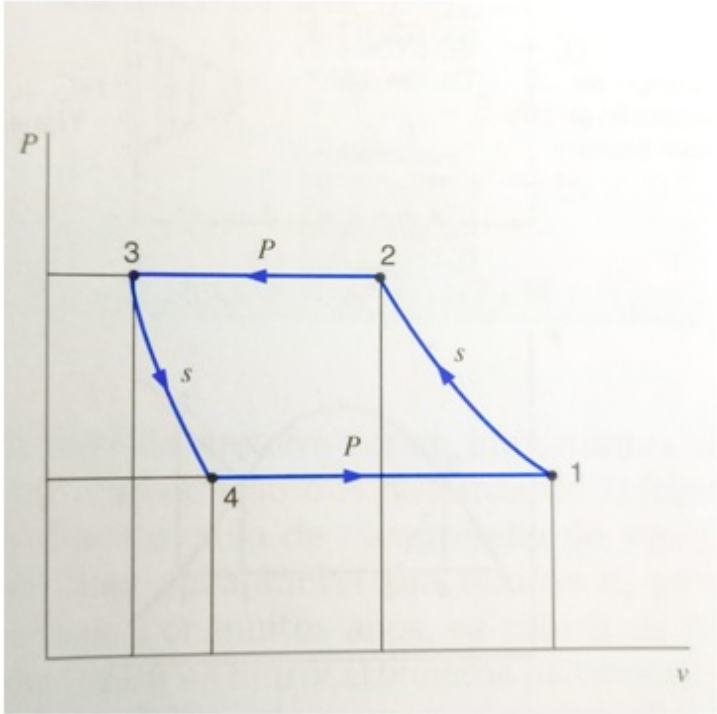

Figura 2.1 – Ciclo de refrigeração baseado em quatro processos. Fonte: Borgnakke e Sonntag (2013).

equação (2.1).

$$COP = \frac{ql}{|wc|} \tag{2.1}$$

onde:

ql= Calor total transferido no evaporador

wc= Potência consumida pelo compressor

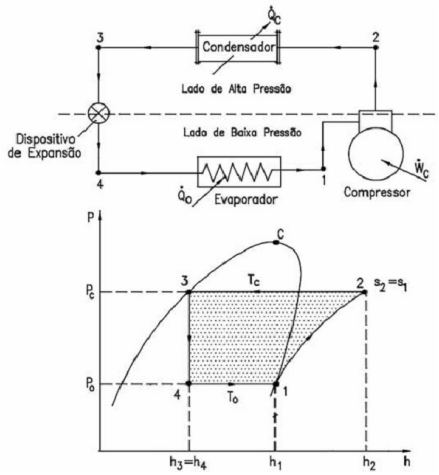

Figura 2.2 – Ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.

2.1.2 Sistema de ar condicionado do tipo split

O sistema de ar condicionado do tipo Split constitui-se de dois equipamentos interligados por meio de tubulações frigoríficas, sendo a unidade condensadora (externa) e a unidade evaporadora (interna). As distâncias entre as partes que o integram ao sistema, bem como desníveis a serem utilizados, dependem das características do sistema a ser instalado.

Vantagens do sistema:

i A unidade evaporadora interna pode ser administrada com uso de controle remoto;

ii Menor nível de ruído em virtude da distância em que se pode instalar a unidade condensadora externa;

iii Sua instalação é adaptável a ambientes em que não seja possível a instalação de um ar condicionado convencional (tipo janela).

Partes integrantes de um sistema de ar condicionado split: Unidade condensadora, unidade evaporadora, tubulação frigorífica, rede elétrica e dreno.

2.1.2.1 Unidade condensadora

Nesse componente o fluido refrigerante muda do estado físico de vapor para líquido, rejeitando o calor. Na unidade condensadora estão alojados o compressor e o condensador, devendo ser fixada na parte externa a uma distância entre a unidade interna variando de acordo com as especificações do fabricante.

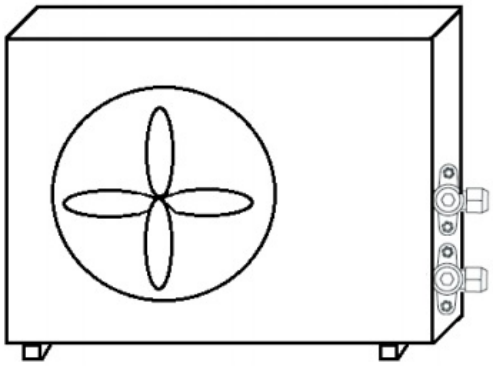

Figura 2.3 – Unidade condensadora de um condicionador de ar split. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015).

2.1.3 Unidade evaporadora

Essa unidade também é chamada de unidade interna, nela o fluido refrigerante muda de estado físico, de líquido para vapor, absorvendo o calor. Na unidade evaporadora está alojado o evaporador. A unidade deve ser fixada no ambiente interno com a utilização de suportes com dimensões recomendadas pelo fabricante.

Figura 2.4 – Unidade evaporadora de um condicionador de ar split. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015).

2.1.3.1 Linhas frigoríficas

As linhas frigoríficas que interligam as unidades internas e externas do sistema split devem ser executadas e instaladas em estrita obediência às instruções do fabricante, referentes ao dimensionamento das tubulações, comprimentos equivalentes, desníveis máximos, carga de fluido frigorífico e isolação térmica.

2.1.3.2 Instalações elétricas

O projeto e a execução da rede elétrica devem obedecer ao estipulado na ABNT NBR 5410 para as instalações em baixa tensão e na ABNT NBR 14039 para instalações em média tensão.

Recomenda-se que pequenas unidades split que utilizam um ventilador de recirculação, e outros componentes do sistema dispersos na edificação sejam alimentados a partir do quadro de distribuição do sistema; e não ligados a circuitos de iluminação ou outros existentes na edificação.

2.1.3.3 Rede de drenagem

São instaladas na unidade evaporadora do equipamento por meio de tubos de PVC para esgotar a água resultante do processo de evaporação. Os tubos normalmente ficam

alojados no interior das paredes. Para sistemas do tipo quente e frio há necessidade de instalar um dreno externo.

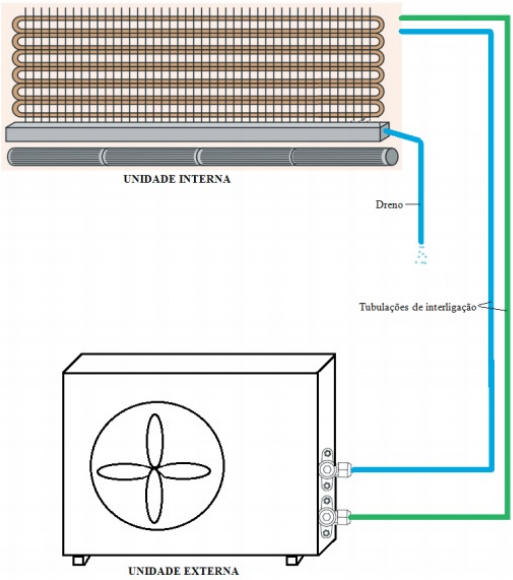

Figura 2.5 – Unidade condensadora de um condicionador de ar split. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015).

2.1.4 Compressor modelo convencional

O compressor de um condicionador de ar split modelo convencional, também chamado de compressor On/Off é ligado em sua rotação máxima enquanto o aparelho faz a climatização, e desligado assim que o ambiente atinge a temperatura desejada. Isso faz com que o aparelho atinja um pico de consumo muito grande quando o compressor é ligado

Sempre que a temperatura do ambiente tiver alguma interferência como por exemplo, quando a temperatura externa tem grande alteração a ponto de interferir na temperatura interna ou portas e janelas ficam abertas, o compressor volta a ligar para dar conta da necessidade do usuário de deixar o ambiente na temperatura desejada e esse pico de energia volta a acontecer.

O compressor é um dos principais componentes de um sistema de refrigeração. Ele tem como função aumentar a pressão do fluido refrigerante e fazer com que o fluido circule no sistema. Os principais tipos de compressores utilizados são: alternativo, centrífugo, de parafusos, palhetas e Scroll.

De acordo com as características do processo de compressão, os compressores utilizados em refrigeração podem ser classificados como: máquinas de deslocamento positivo ou

máquinas de fluxo. O compressor de deslocamento positivo aumenta a pressão do vapor de fluido refrigerante pela redução do volume interno de uma câmara de compressão por meio de uma força mecânica aplicada. Os compressores alternativos, de parafusos, de palhetas e Scroll são de deslocamento positivo. O único compressor classificado como máquina de fluxo em sistemas de refrigeração é o centrífugo. Nesse tipo de compressor o aumento de pressão se deve, principalmente, à conversão de pressão dinâmica em pressão estática.

Dependendo da concepção de construção, os compressores podem ser classificados como: herméticos, semi-herméticos e abertos. No compressor hermético, tanto o compressor propriamente dito quanto o motor de acionamento são alojados no interior de uma carcaça, apresentando como acesso de entrada e saída apenas as conexões elétricas do motor. Este tipo de compressor opera exclusivamente com refrigerantes halogenados e o vapor de fluido refrigerante entra em contato com o enrolamento do motor, resfriando-o.

Condicionadores de ar utilizam compressores alternativos herméticos (o compressor e seu motor de acionamento se encontram em uma mesma carcaça), esse equipamento tem a finalidade de succionar o fluido refrigerante, elevar sua pressão e direcioná-lo ao condicionador. Utilizando como base o ciclo ideal de refrigeração o processo supracitado ocorre adiabaticamente, pois as perdas de calor são relativamente baixas.

2.1.5 Compressor de velocidade variável

Segundo Pottker (2006), um sistema de refrigeração tem que ter sua capacidade devidamente controlada para que a temperatura dentro do ambiente refrigerado se mantenha dentro do valor desejado. Em sistemas com compressores convencionais, termostatos são utilizados para ligar e desligar o compressor, enquanto sistemas com compressores de velocidade variável a rotação do equipamento é ajustada de acordo com as necessidades do sistema.

Um compressor de velocidade variável ou inverter opera com um inversor de frequência que recebe sinal de sensores acoplados no ambiente refrigerado, o inversor consegue verificar as variações de temperatura do sistema, atuando diretamente no motor do compressor e variando sua rotação. Quando a temperatura no ambiente refrigerado se encontra dentro dos níveis ideais, a rotação do compressor é reduzida, já no momento em que a temperatura no interior do ambiente refrigerado sobe, a rotação do compressor aumenta para

reduzir essa temperatura o mais rápido possível.

A partida do motor do compressor inverter é suave, seu funcionamento é iniciado com uma velocidade de rotação mais baixa, diferente do compressor convencional. Depois de iniciado seu funcionamento, o compressor inverter ajusta continuamente a corrente consumida para fornecer a rotação adequada, de acordo com a aplicação requerida. Segundo a Embraco fabricante pioneira de compressores de velocidade variável, esse tipo de equipamento gera em média um consumo energético 25% menor em sistemas de refrigeração, se comparados com sistemas equipados com compressores convencionais do tipo on-off. A utilização desse tipo de equipamento contribui para que os equipamentos de refrigeração atinjam a eficiência energética estabelecidas por uma legislação mais rígida. A Figura 2.6 mostra um compressor de velocidade variável.

Figura 2.6 – Compressor de velocidade variável. Fonte: Danfoss (2021).

Outras vantagens foram levantadas por Potker (2006) com relação à utilização de compressores de velocidade variável, e são elas:

i Redução das flutuações da temperatura e da umidade no ambiente refrigerado;

ii Menor tempo de abaixamento de temperatura;

iii Redução nos ruídos gerados.

2.1.6 Inversor de frequência

O inversor de frequência é um equipamento elétrico/eletrônico que consegue proporcionar um controle mais avançado em motores e proporciona um acionamento suave aos motores. O equipamento recebe um sinal senoidal de amplitude fixa e o converte em um sinal modulado por Modulação por Largura de Pulso ou *Pulse Width Modulation* (PWM), em inglês, essa conversão de sinal torna possível a variação na velocidade do motor. A Figura 2.7 mostra um inversor de frequência. A Figura 2.8 mostra o funcionamento básico de um inversor de frequência.

Figura 2.7 – Inversor de freqüência SINAMICS V20. Fonte: Siemens (2021).

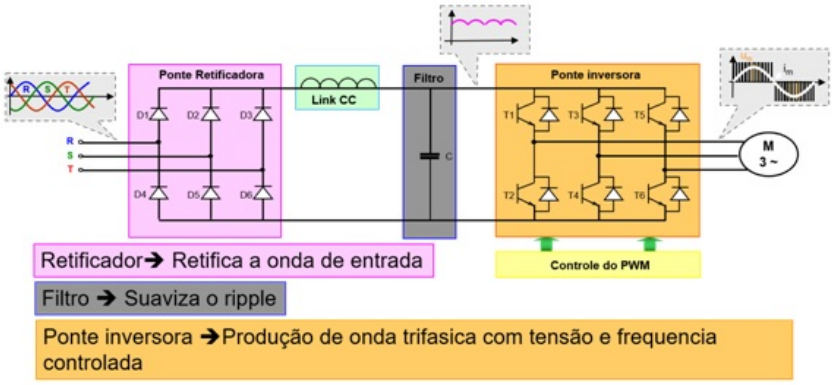

Figura 2.8 – Funcionamento de um inversor de frequência. Fonte: Schneider Eletric (s.d.).

A ponte retificadora é composta por uma associação de diodos que tem a função de retificar o semiciclo negativo do sinal, permitindo a passada do ciclo positivo. O filtro é

composto por uma associação de indutores e capacitores com a finalidade de transformar o sinal em um sinal mais próximo de Corrente Contínua ou *Direct Courent* (DC), em inglês, elevando assim a tensão de pico. A ponte inversora é formada pela associação de transistores Transistor Bipolar de Porta Isolada ou *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), em inglês onde eles recebem o sinal quase DC e o convertem para um sinal modulado por PWM. Pela largura que esses pulsos apresentam, ocorre uma variação na tensão/corrente e assim replicando na variação na velocidade de um motor. Ao se aumentar a frequência no chaveamento dos transistores, teremos um sinal mais limpo ao motor, reduzindo ruídos e distorções.

2.1.7 Válvula de expansão eletrônica

A válvula de expansão mecânica (convencional) é um dispositivo que fica entre o condensador e a entrada do evaporador, ela tem como funções:

- Reduzir a temperatura e pressão do fluido refrigerante proveniente do condensador, separando a parte de alta pressão da de baixa pressão.

- Garantir que na entrada do evaporador passe somente fluido refrigerante liquido, na vazão e velocidade suficiente para a evaporação completa.

Sendo assim, o fluído refrigerante vai se tornar vapor no evaporador a uma temperatura baixa o suficiente para trocar calor com ambiente refrigerado. No condensador o fluído vai condensar a uma temperatura alta para trocar calor com o ar externo.

As válvulas de expansão eletrônicas possuem ajustes muito mais precisos, o controle do fluxo fluido refrigerante para o evaporador também possui elevada precisão. Para a utilização desse tipo de válvula de expansão é necessário a utilização de um controlador para realizar o acionamento automático da válvula, além de sensor de temperatura e transdutor de pressão para medir o superaquecimento do sistema e enviar um sinal de controle apropriado para a válvula. A Figura 2.9 mostra uma válvula de expansão eletrônica, e a Figura 2.10 mostra as características da válvula de expansão da Figura 2.9.

Costa (2014) apontou algumas vantagens de se utilizar a válvula de expansão eletrônica em relação à válvula termostática, e são elas: promoção de um controle mais exato da temperatura e do superaquecimento com a variação de pressão operando em faixas de pressão de condensação relativamente menores, não necessitam de ajustes e resultam em economia de energia.

Figura 2.9 – Válvula de expansão eletrônica E2V Smart. Fonte: Carel (2011).

Compatibilidade	R22, R134a, R404A, R407C, R410A, R744, R507A, R417A
Máxima pressão de funcionamento (MOP)	até 45 bar (653 psi)
DP máx. de funcionamento (MOPD)	35 bar (508 psi)
P.E.D.	Gf. 2, art. 3, par. 3
Temperatura do refrigerante	-40T65 °C (-40T149 °F)
Temperatura ambiente	-30T50 °C (-22T122 °F)

Figura 2.10 – Especificações técnicas da válvula de expansão eletrônica E2V Smart. Fonte: Carel (2011).

2.1.8 Comparação entre um condicionador de ar split inverter e um condicionador de ar split convencional

Equipamentos de ar condicionado do tipo inverter utilizam um inversor de frequência para controlar a rotação do motor de seu compressor de acordo com a necessidade da temperatura no ambiente, e o compressor não é desligado, ele apenas tem a rotação de seu motor reduzida quando a temperatura requerida é atingida. A Figura 2.11 mostra a comparação do funcionamento de um sistema de condicionador de ar convencional e de um do tipo inverter.

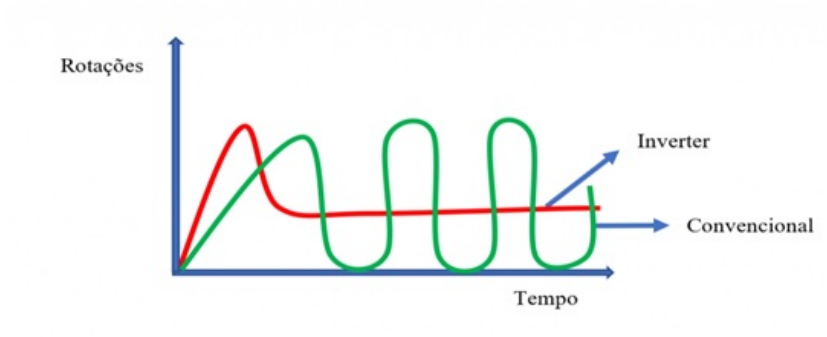

Figura 2.11 – Comparativo entre sistema inverter e convencional. Fonte: Rangel (2020).

A Figura 2.12 mostra a comparação da potência consumida por um condicionador de ar convencional e um do tipo inverter ao longo dia, no condicionador de ar convencional o ΔT para se obter a temperatura requerida é de valor mais elevado sempre que o compressor esteja ligado, o que eu faz com que a potência consumida pelo compressor seja maior. O condicionador de ar inverter opera o tempo todo ligado com baixo ΔT.

Figura 2.12 – Consumo de potência dos compressores dos dois sistemas ao longo do dia. Fonte: Paiva et al. (2021).

A Figura 2.12 não é suficiente para comprovar que o condicionador de ar inverter é mais econômico que o convencional, já a Figura 2.13 que compara o COP dos dois sistemas já comprova que o sistema inverter é mais econômico que o convencional. No momento de pico, momento em que os dois tipos de condicionadores de ar são mais solicitados, seus COPs tem uma diferença mínima, algo em torno de 5%, já no nos demais instantes o COP do sistema inverter é sempre mais elevado.

O calor total transferido nos dois equipamentos foi o mesmo, então o consumo de energia no equipamento inverter será menor devido ao seu COP médio ser mais elevado.

Figura 2.13 – COP dos sistemas ao longo do dia. Fonte: Paiva et al. (2021).

Figura 2.14 mostra claramente o consumo integralizado ao longo de um dia, que evidencia uma redução no consumo de energia em torno de 20% já que o equipamento convencional consumiu em media 6 KW/h e o inverter 4 KW/h.

Figura 2.14 – Consumo de energia elétrica dos dois sistemas ao longo do dia. Fonte: Paiva et al. (2021).

2.2 Metodologia

Para realizar a escolha correta de um condicionador de ar primeiramente deve ser calculada a carga térmica do local. Como o cálculo da carga térmica para o presente trabalho terá como objetivo principal a seleção de aparelhos de ar condicionado do tipo split e sua devida quantidade, com a finalidade de realizar uma comparação entre um condicionador de ar convencional e um condicionador de ar inverter, a norma ABNT NBR 5858/1983 apesar de estar cancelada será utilizada para realizar o cálculo simplificado da

carga térmica do local, a NBR 16655-3 está em vigor, o cálculo das duas se difere em alguns aspectos que não influenciam significativamente no resultado final.

2.2.1 Realização do cálculo da carga térmica

Considerando uma área de 250m^2 situada no centro de Divinópolis-MG, como representada pelo croqui da Figura 2.15, será realizado o cálculo da carga térmica de acordo com a tabela da Figura 2.18.

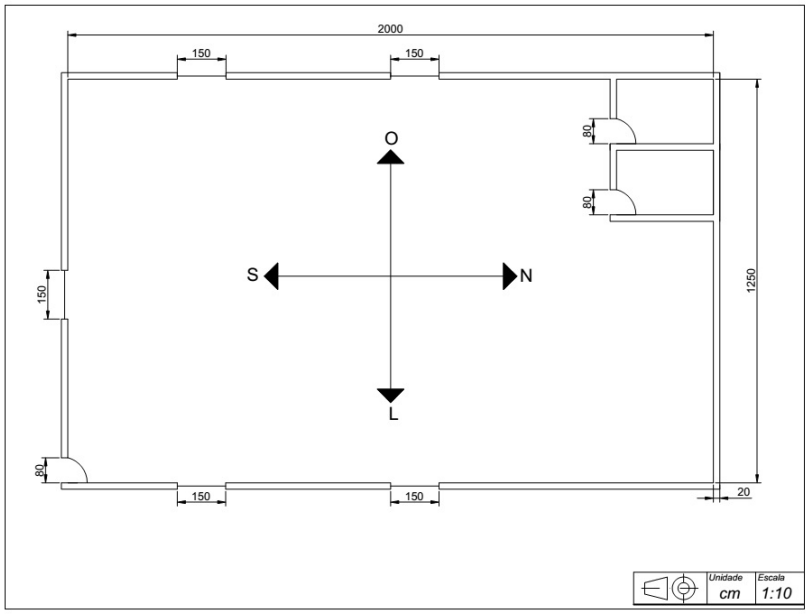

Figura 2.15 – Croqui área de 250m^2. Fonte: Autor.

Dados para calcular a carga térmica:

i 3 m (altura);

ii 6000 Watts;

iii 30 pessoas entram na loja em média por dia e trabalham 20 funcionários;

iv Paredes - construção pesada ;

v Janelas com cortina;

vi Janelas 1,5 x 1 m, Porta 0,8 x 2,1 m;

Calor recebido de:	Quantidade	Fatores				Kcal/h
1. Janelas: Insolação		Sem proteção	Com proteção interna	Sem proteção interna	(Quant. x Fator)	-
Norte	0m²	240	115	70	-	-
Nordeste	0m²	240	95	70	-	-
Leste	3m²	270	130	85	390	
Sudeste	0m²	200	85	70	-	-
Sul	0m²	0	0	0	-	-
Sudoeste	0m²	400	100	115	-	-
Oeste	1,5m²	500	220	150	225	
Noroeste	0m²	350	150	95	-	615
2. Janelas: Transmissão	-					-
Vidro comum	4,5m²	50				225
Tijolo de vidro	0m²	25				-
3. Paredes		Construção leve		Construção pesada		-
a) Paredes externas	-					-
Orientação - sul	0m²	13		10		-
Outra orientação	157,5m²	20		12		3150
b) Paredes internas	36m²	8				288
4. Teto	-					-
Em laje	250m²	75				18750
Em laje c/ 2,5 cm de insolação ou mais	0m²	60				-
Entre andares	0m²	13				-
Sob telhado isolado	0m²	13				-
Sob telhado sem isolação	0m²	40				-
5. Piso(exceto os diretamente sob o solo)	0m²	13				-
6. N° de pessoas	50	150				7500
7. Renovação do ar	50 pessoas	200				10000
8. Iluminação e aparelhos elétricos	5000	1				6000
9. Portas ou vãos abertos	0m²	150				-
10. Subtotal(somar todos os valores da coluna Quant. x Fator)	-	-				46528
11. Carga térmica total	-	-				

Tabela 2.1 – Calculo da carga térmica. Fonte: Autor.

A Tabela 2.1 apresenta o cálculo da carga térmica para o local supracitado. Basta multiplicar o valor da carga térmica por 0,85 fator de correção para o estado de Minas Gerais, em seguida multiplicar o valor por 4 para converter o valor encontrado para BTU/h, como está apresentado na Equação 2.2

$$CT = 46528 * 085 * 4 = 158195,2BTU/h \tag{2.2}$$

2.2.2 Escolha dos condicionadores de ar

Como será necessária uma carga térmica de 158195,2 BTU/h para refrigerar o local, dois tipos de equipamentos serão analisados em um cenário com 3 condicionadores de ar de 56000 BTU/h modelo convencional do fabricante Agratto e em outro cenário com 3 condicionadores de ar BTU/h de 54000 modelo inverter do fabricante Carrier. A Tabela 2.2 apresenta as características do condicionador de ar split da Agratto e a Tabela3.1 apresenta as características do condicionador de ar split inverter da Carrier.

Fabricante	Classificação Inmetro	COP	Capacidade de refrigeração (BTU/h)	Potência (W)	Consumo (KWh/mês) Uma hora por dia
Agratto	B	3,23	56000	5082	103,4

Tabela 2.2 – Especificações técnicas do condicionador de ar convencional de 56000 BTU/h. Fonte: Autor.

$$COP = \frac{56000 * 0,293}{5082} = 3,23 \tag{2.3}$$

Figura 2.16 – Condicionador de ar Agratto convencional. Fonte: Autor.

Fabricante	Classificação Inmetro	COP	Capacidade de refrigeração (BTU/h)	Potência (W)	Consumo (KWh/mês) Uma hora por dia
Carrier	A	3,24	54000	4890	102,5

Tabela 2.3 – Especificações técnicas do condicionador de ar inverter de 54000 BTU/h. Fonte: Autor.

$$COP = \frac{54000 * 0,293}{4890} = 3,24 \tag{2.4}$$

Figura 2.17 – Condicionador de ar inverter da Carrier. Fonte: Autor.

Para especificar o valor dos equipamentos serão considerados os valores de aquisição dos equipamentos por cinco vendedores diferentes e será calculada a média dos valores.

Loja 1	Loja 2	Loja 3	Loja 4	Loja 5
R$ 5592,41	R$ 6250,34	R$ 6579,31	R$ 5879,79	R$ 5921,37

Tabela 2.4 – Valores do condicionador de ar convencional Agratto de 56000 BTU/h.

Valor médio de um condicionador de ar split de 56000 BTU/h Agratto:

$$valor = \frac{5592,41 + 6250,34 + 6579,31 + 5879,79 + 5921,37}{5} = R\$6044,64 \tag{2.5}$$

Loja 1	Loja 2	Loja 3	Loja 4	Loja 5
R$ 12699,00	R$ 13143,68	R$ 14116,05	R$ 13080,00	R$ 12363,24

Tabela 2.5 – Valores do condicionador de ar inverter Carrier de 54000 BTU/h.

Valor médio de um condicionador de ar split inverter de 54000 BTU/h da Carrier:

$$valor = \frac{12699,00 + 13143,68 + 14116,05 + 13080,00 + 12363,24}{5} = R\$13080,39 \tag{2.6}$$

2.2.3 Tarifas de energia elétrica

Para calcular o consumo de energia elétrica do condicionador de ar split será utilizado o valor médio das tarifas de energia elétrica, representado pela Equação 2.7 da classe B3 em Minas Gerais, a Tabela 2.6 representa o valor das tarifas sem impostos, já a Tabela 2.7 apresenta o valor das tarifas com impostos aplicados

B3-DEMAIS CLASSES	BANDEIRA VERDE - CONSUMO R$/KWH	BANDEIRA AMARELA - CONSUMO R$/KWH	BANDEIRA VERMELHA 1 - CONSUMO R$/KWH	BANDEIRA VERMELHA 2 - CONSUMO R$/KWH
Residencial	0,64463	0,65803	0,68623	0,70703

Tabela 2.6 – Valor da tarifa de energia elétrica da CEMIG sem impostos.

Impostos incidentes no valor da conta de energia elétrica:

*ICMS = 30,00%

B3-DEMAIS CLASSES	BANDEIRA VERDE - CONSUMO R$/KWH	BANDEIRA AMARELA - CONSUMO R$/KWH	BANDEIRA VERMELHA 1 - CONSUMO R$/KWH	BANDEIRA VERMELHA 2 - CONSUMO R$/KWH
Residencial	0,86941	0,88748	0,92545	0,95357

Tabela 2.7 – Valor da tarifa de energia elétrica da CEMIG com impostos.

*PASEP = 0,87%

*COFINS = 4,00%

$$valor = \frac{0,86941 + 0,88748 + 0,92545 + 0,95357}{4} = R\$/KWh13080,39 \tag{2.7}$$

2.2.4 Viabilidade econômica do condicionador de ar inverter

Para realizar a viabilidade econômica do condicionador de ar inverter, o cálculo do consumo do condicionador de ar split modelo convencional será realizado, considerando que seu compressor fique ligado 6 horas por dia durante 30 dias em 1 ano, para estimar o consumo do condicionador de ar inverter será considerado que ele seja 20%, 30%, 40% e 50% mais econômico que o modelo convencional, a Equação 2.12 representa o cálculo. Logo em seguida será calculado o fluxo de caixa descontado.

$$V = c.t.tar.ec.n.n^{\circ} \tag{2.8}$$

Onde: V = Valor de economia anual;

c = Consumo do equipamento(KW/h);

t = tempo de funcionamento do equipamento (h);

tar = tarifa de energia elétrica (R$);

ec = Porcentagem de energia economizada;

n = Período de tempo (meses);

n° = Número de equipamentos.

20% de economia de energia elétrica:

$$V = 103,4 * 6 * 0,90898 * 0,2 * 12 * 2 = R\$4060,30 \tag{2.9}$$

30% de economia de energia elétrica:

$$V = 103,4 * 6 * 0,90898 * 0,3 * 12 * 3 = R\$6090,46 \tag{2.10}$$

40% de economia de energia elétrica:

$$V = 103,4 * 6 * 0,90898 * 0,4 * 12 * 3 = R\$8120,61 \tag{2.11}$$

50% de economia de energia elétrica:

$$V = 103,4 * 6 * 0,90898 * 0,2 * 12 * 5 = R\$10150,77 \tag{2.12}$$

Para realizar o cálculo de fluxo descontado será considerado o valor da diferença entre os valores de compra dos equipamentos split inverter e split convencional que é R$21107,25. A taxa de juros utilizada foi 4,25% acima da inflação. O fluxo de caixa descontado é calculado pela Equação 2.13.

Período (ano)	Projeto com 20% de economia na energia elétrica	Projeto com 30% de economia na energia elétrica	Projeto com 40% de economia na energia elétrica	Projeto com 50% de economia na energia elétrica
0	- R$ 21107,25	- R$ 21107,25	- R$ 21107,25	- R$ 21107,25
1	R$ 4060,30	R$ 6090,46	R$ 8120,61	R$ 10150,77
2	R$ 4060,30	R$ 6090,46	R$ 8120,61	R$ 10150,77
3	R$ 4060,30	R$ 6090,46	R$ 8120,61	R$ 10150,77
4	R$ 4060,30	R$ 6090,46	R$ 8120,61	R$ 10150,77

Tabela 2.8 – Economia anual do custo da energia elétrica do condicionador de ar inverter área de 250m². Fonte: Autor.

Período (ano)	Projeto com 20% de economia na energia elétrica	Projeto com 30% de economia na energia elétrica	Projeto com 40% de economia na energia elétrica	Projeto com 50% de economia na energia elétrica
0	- R$ 21107,25	- R$ 21107,25	- R$ 21107,25	- R$ 21107,25
1	R$ 3894,77	R$ 5842,16	R$ 7789,55	R$ 9736,95
2	R$ 3735,99	R$ 5603,99	R$ 7471,99	R$ 9339,99
3	R$ 3583,69	R$ 5375,54	R$ 7167,38	R$ 8959,23
4	R$ 3437,59	R$ 5156,39	R$ 6875,19	R$ 8593,99

Tabela 2.9 – Economia anual do custo da energia elétrica do condicionador de ar inverter com fluxo de caixa área de 250m². Fonte: Autor.

Período (ano)	Projeto com 20% de economia na energia elétrica	Projeto com 30% de economia na energia elétrica	Projeto com 40% de economia na energia elétrica	Projeto com 50% de economia na energia elétrica
1	R$ 3894,77	R$ 5842,16	R$ 7789,55	R$ 9736,95
2	R$ 7630,76	R$ 11446,15	R$ 15261,54	R$ 19076,94
3	R$ 11214,45	R$ 16821,69	R$ 22428,92	R$ 28036,17
4	R$ 14652,04	R$ 21978,08	R$ 29304,11	R$ 36630,16

Tabela 2.10 – Benefícios acumulados área de 250m^2. Fonte: Autor.

2.3 Fundamentação teórica

2.3.1 Cálculo da carga térmica de um ambiente

A carga térmica consiste em determinar a quantidade de calor que deve ser retirada ou acrescentada ao ambiente a ser condicionado para proporcionar as condições adequadas ao conforto térmico.

Com a definição da carga térmica é possível:

i Dimensionar a instalação;

ii Selecionar os equipamentos;

iii Avaliar o funcionamento dos equipamentos existentes ou a serem adquiridos;

iv Avaliar as alterações necessárias ao sistema que beneficia o ambiente, cuja finalidade venha ser alterada.

2.3.1.1 Formulário para cálculo simplificado de carga térmica de verão

A norma ABNT NBR 5858/1983 foi cancelada, mas para nível de cálculo de carga térmica para realizar a aquisição de equipamentos como condicionadores de ar split ela é muito utilizada, a Figura2.18 ainda é uma boa referência para o cálculo simplificado de carga térmica de verão em ambientes privados, residências e escritórios, devido aos bons resultados que podem ser obtidos para sistemas de pequena capacidade.

CLIENTE:_____

TÉCNICO RESPONSÁVEL:_____ DATA:___/___/____

Calor recebido de:	Quantidade	Fatores				Kcal/h Quantidade x Fator
1. Janelas: Insolação		Sem proteção	Com proteção interna	Com proteção externa	(Quantidade x Fator)	
Norte	m²	240	115	70		
Nordeste	m²	240	95	70		
Leste	m²	270	130	85		
Sudeste	m²	200	85	70		
Sul	m²	0	0	0		
Sudoeste	m²	400	100	115		
Oeste	m²	500	220	150		
Noroeste	m²	350	150	95		
2. Janelas: Transmissão						
Vidro comum	m²	50				
Tijolo de vidro	m²	25				
3. Paredes		Construção leve		Construção pesada		
a) Paredes externas						
Orientação – sul	m²	13		10		
Outra orientação	m²	20		12		
b) Paredes internas	m²	8				
4. Teto						
Em laje	m²	75				
Em laje c/ 2,5 cm de isolação ou mais	m²	60				
Entre andares	m²	13				
Sob telhado isolado	m²	13				
Sob telhado sem isolação	m²	40				
5. Piso (exceto os diretamente sobre o solo)	m²	13				
6. Número de pessoas		150				
7. Renovação do ar	nº pessoas	200				
8. Iluminação e aparelhos elétricos		1				
9. Portas ou vãos sempre abertos	m²	150				
10. Subtotal (somar todos os valores da coluna Quantidade x Fator)						
11. Carga térmica total						

Figura 2.18 – Tabela para cálculo simplificado de carga térmica de verão conforme referência da norma ABNT NBR 5858/1983. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015).

Para o preenchimento do formulário simplificado, o técnico precisa dos seguintes dados:

i Dimensão do ambiente a ser condicionado;

ii Dimensão das janelas, portas e vãos livres;

iii Tipo de parede (leve ou pesada);

iv Dimensão e tipo do piso;

v Orientação das paredes;

vi Número de lâmpadas e aparelhos elétricos, com suas respectivas potências elétricas consumidas;

vii Número de pessoas;

viii Tipo de teto.

Preencha o formulário com os dados solicitados de janelas, paredes, teto, piso, número de pessoas, iluminação, aparelhos elétricos, portas ou vãos sempre abertos. Em seguida, multiplique cada item pelos coeficientes correspondentes com a situação real encontrada no ambiente a ser condicionado. Após o correto preenchimento do formulário multiplique o valor obtido pelo fator de correção da Figura 2.19 , o resultado encontrado estará em Kcal/h, para converter para BTU/h basta multiplicar por 4.

Figura 2.19 – Fator de correção por região. Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015).

2.3.2 Juro

Pode ser definido como a remuneração do capital aplicado, considerando que o possuidor desse capital poderia fazer outros usos dele, que lhe trariam outros benefícios. Então, o juro seria um dos tipos de benefícios que o capital poderia proporcionar ao seu "dono". A comparação entre esses benefícios é também um modo de analisar a viabilidade do uso deste capital, ou a viabilidade de um determinado investimento, na linguagem comum no âmbito da engenharia econômica. Já a taxa de juros é a "razão entre o valor recebido (ou pago)ao final de um determinado tempo e o capital inicialmente aplicado (ou emprestado)" . Normalmente, é expressa em porcentagem e está sempre associada a uma

unidade de tempo. Exemplo: a taxa de juros para o financiamento de um automóvel é de X% ao ano, e escreve-se X% a.a.

2.3.3 Fluxo de caixa descontado

Considera-se o valor do dinheiro no tempo. Assim, é necessário considerar uma taxa de desconto, também chamada de "Custo de oportunidade", 'Custo de capital' ou 'Taxa mínima de atratividade'. Em linhas gerais, essa taxa pode ser entendida como a taxa paga por outra opção de aplicação com mesmo risco. A equação (2.13) é utilizada para calcular o fluxo direto de caixa.

$$FDCn = \frac{capital}{(i+1)^n} \tag{2.13}$$

onde:

capital = valor investido

i = taxa de juros anual

n = tempo em anos

Como exemplo, um valor de retorno de R$600,00 será descontado uma taxa de 12,00% ao ano.

$$\frac{600}{(0,12+1)^1} = R\$478,32 \tag{2.14}$$

A equação (2.14) mostra que R$600,00 dentro de um ano corrigidos com uma taxa de 12,00% ao ano valeriam R$478,32.

2.3.4 Valor presente liquido (VPL)

Neste método, o critério de decisão quanto à aceitação ou não da alternativa é a verificação se o VPL é maior que zero, sua equação está representada na equação (2.15) Como o valor presente líquido é definido como a soma algébrica do valor presente das entradas de caixa e dos investimentos ao longo da vida útil do projeto, seu significado é, caso esse projeto seja implementado, em quanto ele será capaz de aumentar o patrimônio líquido da empresa. Também é intuitivo o entendimento de que, no caso de alternativas excludentes mutuamente, aquela que apresenta o maior VPL deve ser priorizada, consi-

derando apenas a análise econômica. O "valor da empresa" ficará acrescido do VPL após o período considerado nessa análise econômica.

$$VPL = S_1^n * \frac{FCj}{(i+1)^j} \tag{2.15}$$

Onde: FC= Fluxo de caixa no período j; i= Taxa de desconto.

2.4 Taxa interna de retorno (TIR)

Taxa interna de retorno pode ser definida como taxa de desconto que anula o Valor presente liquido. A equção(**??**)

$$\sum_{1}^{n} \frac{FC_j}{(1+i)^j} = 0 \tag{2.16}$$

Quanto ao critério de decisão, se A TIR for igual ou superior à taxa mínima de atra tividade, aceita-se o projeto; caso contrário, ele deve ser rejeitado. A comparação entre duas soluções mutuamente excludentes é feita escolhendo-se aquela com o maior valor para a TIR.

2.4.1 Estado da arte

Um compressor de velocidade variável e uma válvula de expansão eletrônica foram adaptados em um refrigerador domestico por Matias (2017) estratégias são comparadas pelo autor, ambas utilizando um controlador proporcional integral PI para ajustar a rotação do compressor, porém uma técnica se baseia no grau de superaquecimento do evaporador e a outra utiliza a técnica Maximum Power Point Tracker, do inglês *Rastreador de Máximo Ponto de Potência* (MPPT) que utiliza como variável a máxima potencia do compressor. Como resultados, a estratégia que mensurou o grau de superaquecimento do evaporador conseguiu obter um consumo energético 5% menor que a outra estratégia, além de possuir regimes transitórios mais comportados.

Visando economia de energia e melhora no desempenho, utilizando compressor de velocidade variável e válvula de expansão eletrônica, Lago et al. (2016) criou uma bancada de refrigeração experimental, composta por duas subunidades. Seu sistema principal possuía uma unidade condensadora de ar, um evaporador, um compressor hermético de velocidade variável e elementos expansores (válvula de expansão eletrônica e válvula de expansão termostática), o segundo sistema é composto de uma bomba para circulação

de fluido secundário (álcool etílico) e um trocador de acondicionamento de ar. Dados dos fabricantes são analisados para se encontrarem os pontos ótimos de trabalho, logo em seguida é verificado o efeito da utilização do compressor de velocidade variável e da válvula de expansão eletrônica. Como resultado, o sistema montado com compressor de velocidade variável e válvula de expansão eletrônica se mostram mais eficientes que um mesmo sistema montado com uma válvula termostática e compressor de velocidade variável, pois operam em um ponto de máximo Coefficient of Performance, do inglês *Coeficiente de desempenho* (COP), e fornecem uma capacidade de refrigeração adequada.

Rangel (2020) propôs uma analise comparativa do consumo e qualidade de energia entre um condicionador de ar convencional e outro condicionador de ar do tipo inverter. Ambos os equipamentos foram submetidos a ensaios individuais á analise energética, para se gerar um diagnostico real do comportamento de cada equipamento, tornando possível analisar a qualidade dos equipamentos para se obter um melhor desempenho. O modelo inverter mostrou um desempenho melhor e um consumo menor quando comparado com o modelo convencional.

Uma comparação entre o sistema de ar condicionado convencional e o sistema de ar condicionado inverter foi realizada por Marangoni et al. (2015). Foram construídos cenários relacionados ao tempo de uso do aparelho e de seu compressor, em ambos os sistemas, foram analisadas as trocas imediatas do aparelho convencional pelo inverter, ou mediante a queima do equipamento, o tempo de funcionamento do equipamento e a economia proporcionada pelo inverter. A viabilidade econômica foi analisada em todos os casos e a troca não é interessante em todos eles, que ela é bastante motivada na queima do aparelho já instalado, dado que nesta situação a compra de um aparelho seria inevitável e tomada somente à diferença financeira do sistema inverter, especialmente se houver comprovação de que o compressor do equipamento convencional trabalhe por tempo não inferior a 50% do uso do aparelho e que o sistema inverter apresente economia não inferior a 30%, havendo constatação de indicadores Taxa Interna de Retorno (TIR) positivo, Payback inferior a 48 meses e Valor Presente Liquido (VPL) máximo de R$ 179.602,61.

Paiva et al. (2021) realizou simulações numéricas baseadas em modeles térmicos simples, feitas para os condicionadores de ar inverter e para os condicionadores de ar convencionais do tipo split on-off. O foco principal da analise foi à diferença de temperatura

nos trocadores de calor sobre o consumo diário de energia elétrica para operação em um ambiente com perfil de carga térmica típico. Como resultado o equipamento inverter se mostrou mais eficiente que o equipamento convencional.

Souza et al. (2016) utilizaram uma plataforma Arduino para realizar a comunicação do protótipo com o ar condicionado remotamente, assim não será necessário alterar as configurações originais do aparelho e sim apenas adequação da temperatura de seu "set point" às condições do ambiente. A decisão de ajuste é realizada por meio da lógica Fuzzy, que consegue definir a partir de condições prévias em quantos graus regular, para mais ou para menos a temperatura. O desempenho do equipamento dentro desse estudo, e a capacidade de controlar a temperatura de acordo com o conforto foram testados e avaliados neste projeto

Capítulo 3

Resultados

3.1 Análise financeira

	Projeto com 20% de economia na energia elétrica	Projeto com 30% de economia na energia elétrica	Projeto com 40% de economia na energia elétrica	Projeto com 50% de economia na energia elétrica
Retorno(anos)	5,76	3,84	2,82	2,21
VPL(R$)	-7860,27	-1236,76	5386,74	12010,25
TIR (%)	-13	2	15	27

Tabela 3.1 – Análise financeira. Fonte: Autor.

3.2 Análise dos resultados

Eficiência energética é um tema que sempre obteve destaque no cenário mundial. No Brasil, o Inmetro tem a função de controlar a qualidade e eficiência dos produtos e informar ao consumidor. Realizar a aquisição de um equipamento mais eficiente traz grande economia de energia elétrica e se a seleção do equipamento for correta o retorno financeiro (payback) pode ser relativamente rápido.

Para o local analisado, uma área de 250m^2 apenas o cenário que considera que o condicionador de ar split inverter seja 20% mais econômico que o modelo split convencional apresentou payback superior a 5 anos, em todos os outros cenários o payback foi inferior a 4 anos. Já o VPL foi positivo apenas nos cenários que consideravam uma economia superios a 30%, aproximadamente com 35% de economia a viabilidade econômica dos equipamentos

do tipo inverter começam a ter resultados positivos e o TIR também um indicativo que confirma os resultados do VPL, ou seja considerando cenários com ecomonomia acima de 35% seu valor é superior a taxa mínima de atratividade. recuperado em 2,21 anos.

Capítulo 4

Conclusão

O objetivo deste trabalho foi estabelecer uma comparação entre um condicionador de ar split inverter com um condicionador de ar split convencional com relação ao consumo de energia elétrica e avaliar seu payback financeiro. Foi realizado cálculo da térmica para um local com 250m^2 de área construída, dois equipamentos sendo um do modelo convencional e outro com a tecnologia inverter e sua respectivas quantidades foram selecionados com a finalidade de verificar sua viabilidade econômica. Para realizar a análise do payback financeiro com fluxo de caixa descontado de um condicionador de ar inverter foi considerado que o equipamento com a tecnologia inverter consuma 20%, 30%, 40% e 50% menos energia que o condicionador de ar inverter. Os valores de VPL e TIR indicam que a viabilidade da aquisição dos equipamentos do tipo inverter é valida considerando uma economia acima dos 35%.

Para realizar uma análise com maior precisão, a medição do consumo de energia elétrica dos equipamentos deve ser realizada. A substituição da válvula de expansão por uma válvula de expansão eletrônica poderia reduzir o consumo de energia de ambos os equipamentos.

Referências

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da termodinâmica**. [S.l.]: Editora Blucher, 2013.

CAREL. **Válvula de expansão eletrônica**. 2011. Disponível em: <https://www.carel.com.br/documents/10191/0/+3000025PT/f357b5e2-de9d-44be-b76e-f54fceb26562?version=1.0>. Acesso em: 26 jul. 2021.

CASTRO, A L B. **Estudo de Caso da Viabilidade Econômica do Uso de Condicionadores de Ar Inverter Versus Convencional no Varejo Brasileiro**. 2018. TCC – Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/45644>.

COSTA, F N. **Análise Comparativa da Válvula de Expansão Eletrônica e do Tubo Capilar em Sistemas de Refrigeração**. 2014. Tese (Mestrado) – Univrsidade Estadual de Campinas,Campinas. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265902>.

DANFOSS. **Compressor de velocidade variável**. Disponível em: <http://www.danfoss.com/pt-br/markets/refrigeration-and-air-conditioning/dcs/air-handling-units/#tab-overview>. Acesso em: 26 jul. 2021.

EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2027**. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2021.

EPE. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e Contribuições para o Avanço em Eficiência Energética**. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%5C%20EPE%5C%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2021.

INMETRO. **Etiqueta ENCE**. Disponível em: <https://www.inmetro.gov.br/consumidor/pdf/resp003.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2021.

LAGO T G, Silva do et al. Estudo Experimental de Um Sistema de Refrigeração com Compressor de Velocidade Variável e Válvula de Expansão Eletrônica. **Mercofrio Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação**, 2016.

MARANGONI, F et al. Comparativo Econômico Entre Condicionadores de Ar com Tecnologias Convencional e Inverter. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 35, 2015.

MATIAS, G. **Desenvolvimento de Estratégia de Controle para Compressor de Capacidade Variável e Válvula de Expansão Eletrônica em Um Sistema de Refrigeração Doméstico**. 2017. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/189322>.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Treinamento e Capacitação para Boas Práticas em Sistemas de Ar Condicionado do Tipo Split**. 2015. Disponível em: <https://boaspraticasrefrigeracao.com.br/upload/publicacao/publicacao-1591955146.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2021.

PAIVA, M A et al. Modelagem e simulação numérica de condicionadores de ar do tipo split inverter e on-off para avaliação de desempenho energético. **Abrava**, p. 28–34, fev. 2021. ISSN 2358-8926.

POTTKER, G. **Análise do Efeito Combinado de Compressores e Expansores de Ação Variável Sobre o Desempenho de Sistemas de Refrigeração**. 2006. Tese(Mestrado) – Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88777>.

PROCEL. **Selo Procel**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B88A19AD9-04C6-43FC-BA2E-99B27EF54632%7D>. Acesso em: 26 jul. 2021.

RANGEL, M S. **Análise do Consumo e Qualidade de Energia em Condicionadores de Ar Convencional e Inverter**. 2020. TCC – Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnólogia de Goiás, Itumbiara. Disponível em: <http://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/630>.

SCHNEIDER ELETRIC. Disponível em: <https://blog.se.com/br/automacao-industrial/2020/10/22/o-que-e-um-inversor-de-frequencia-e-como-escolher-a-melhor-opcao/>.

SIEMENS. **Inversor de frequência**. Disponível em: <https://new.siemens.com/br/pt/produtos/drives/inversores/sinamics-v20.html>. Acesso em: 26 jul. 2021.

SOUZA, Bruno Rodrigues de et al. CONTROLADOR AUTOMÁTICO REMOTO PARA AR CONDICIONADO VIA ARDUINO, APLICANDO A LÓGICA FUZZY. **Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, v. 2, n. 2, 2016.