



**MODERNIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS CONDICIONADORES DE AR MODELO JANELA  
MECÂNICO VISANDO A MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**MODERNIZATION OF MECHANICAL WINDOW-TYPE AIR CONDITIONING EQUIPMENT FOR  
ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT**

**Diogo Pereira Peres<sup>1, i</sup>**  
**Leandro Poloni Dantas<sup>2, ii</sup>**  
**Marcones Cleber Brito da Silva<sup>3, iii</sup>**  
**Luis Carlos Canno<sup>4, iv</sup>**  
**Fernando Simplicio de Sousa<sup>5, v</sup>**

Data de submissão: (20/5/2023) Data de aprovação: (27/07/2023)

**RESUMO**

Devido à crescente demanda por energia elétrica no Brasil, em especial a advinda do setor residencial, buscaram-se alternativas que auxiliem a suprir tal necessidade. Segundo dados fornecidos pela Empresa de Pesquisa Elétrica (EPE), instituição responsável pelo planejamento energético brasileiro, sabe-se que o aumento de demanda por parte do consumidor residencial se dá em sua maioria por conta do uso em larga escala de aparelhos condicionadores de ar. Com base nisso, o presente trabalho teve como objetivo a modernização de um condicionador de ar mecânico modelo janela, visando a melhoria da eficiência energética. Para isso, houve a reformulação do sistema de controle de refrigeração, anteriormente realizado através de termostato mecânico e de chaves seletoras, sendo agora efetuado por meio de um aplicativo para smartphones e uma placa eletrônica de IoT especialmente projetada, atuando em conjunto com um inversor de frequência. Com isso, obteve-se uma redução média de 50 % no consumo de energia elétrica nesses aparelhos e um retorno financeiro do investimento feito em até 9 meses para o caso estudado.

**Palavras-chave:** eficiência energética; modernização; condicionador de ar mecânico.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Eletricista pós-graduado em Sistemas Embarcados pela Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: diogo.peres@sp.senai.br

<sup>2</sup> Professor Doutor na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta” e no INSPER. E-mail: leandro.poloni@sp.senai.br

<sup>3</sup> Professor Mestre na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta” e na FESA. E-mail: marcones.silva@sp.senai.br

<sup>4</sup> Professor Especialista na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: luis.canno@sp.senai.br

<sup>5</sup> Professor Mestre na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: fernando.simplicio@sp.senai.br

## ABSTRACT

Due to the increasing demand for electrical energy in Brazil, particularly from the residential sector, alternatives are being sought to help meet this need. According to data provided by the Electric Research Company (EPE), the institution responsible for Brazilian energy planning, it is known that the majority of the increased demand from residential consumers is due to the widespread use of air conditioner. Based on this, the present study aimed to modernize a mechanical window-type air conditioner model, with the objective of improving energy efficiency. To achieve this, the refrigeration control system was redesigned, previously operated through a mechanical thermostat and selector switches, and is now performed through a smartphone application and a specially designed IoT electronic board, working in conjunction with a frequency inverter. As a result, an average reduction of 50% in electricity consumption was achieved for these appliances, with a financial return on investment within 9 months for the case study.

**Keywords:** energy efficiency; modernization; mechanical air conditioner.

## 1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, o uso da energia elétrica é primordial para sustentar o modo de vida de que a sociedade desfruta, tornando-se evidente a total dependência atrelada a este recurso. Além disso, a quantidade de energia elétrica requerida para suprir as necessidades da população como um todo aumenta a cada ano.

No Brasil, de acordo com estudos formulados pela EPE, órgão responsável pelo estudo do planejamento energético brasileiro, a taxa anual média do aumento da demanda de energia elétrica brasileira até 2023 será de 4,3 % ao ano (OLIVEIRA, 2014).

De acordo com outro estudo realizado pela EPE, intitulado “Demanda de Energia 2050”, o consumo energético brasileiro irá triplicar até o ano de 2050, alcançando a impressionante quantia de 1.624 terawatt-hora (TWh) (PLATONOW, 2014).

Esse cenário traz a preocupação de encontrar soluções que tornem possível lidar com o problema que será suprir essa crescente demanda de energia elétrica.

O aumento da demanda energética não é causado por apenas um fator. Segundo a ANEEL, os consumidores de energia elétrica no Brasil são divididos em cinco classes: residencial, industrial, comercial, rural e poder público. No entanto, cada uma dessas classes será responsável por uma porcentagem do futuro aumento da demanda energética brasileira (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

Ao analisar os indicadores, percebe-se que a demanda de energia elétrica residencial cresce proporcionalmente aos meses mais quentes do ano. Isso leva à conclusão de que o principal causador do aumento da demanda no setor residencial são os aparelhos dedicados ao controle de temperatura nas residências, mais especificamente os condicionadores de ar.

Este trabalho tem como objetivo obter melhor eficiência energética de um aparelho condicionador de ar mecânico, do modelo janela, através da redução do consumo de energia elétrica.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A refrigeração é uma tecnologia amplamente utilizada para controlar a temperatura e umidade do ar em ambientes fechados, proporcionando conforto e bem-estar às pessoas. Os condicionadores de ar são dispositivos comumente empregados para esse fim (CREDER, 2004; MILLER e MILLER, 2019).

O princípio de funcionamento dos condicionadores de ar baseia-se no ciclo de refrigeração por compressão de vapor. Esse ciclo envolve quatro etapas principais: compressão, condensação, expansão e evaporação. Primeiramente, o compressor do condicionador de ar comprime o refrigerante gasoso, aumentando sua pressão e temperatura. Em seguida, o refrigerante passa pelo condensador, onde ocorre a troca de calor com o ambiente externo. Nesse processo, o refrigerante se condensa, liberando calor e se transformando em líquido de alta pressão. O líquido de alta pressão segue para a válvula de expansão, onde ocorre uma queda brusca de pressão. Essa queda de pressão provoca uma diminuição da temperatura do refrigerante, que passa para o estado de líquido de baixa pressão. O refrigerante de baixa pressão, agora frio, entra no evaporador, onde é exposto ao ar quente do ambiente a ser refrigerado. O calor do ar é transferido para o refrigerante, que evapora e se transforma novamente em gás. O gás refrigerante é, então, redirecionado para o compressor, onde o ciclo se reinicia. Esse ciclo contínuo de compressão, condensação, expansão e evaporação permite a remoção do calor do ambiente interno, proporcionando o resfriamento desejado.

Além do resfriamento, os condicionadores de ar também podem realizar a desumidificação do ar. Durante o processo de evaporação do refrigerante, a umidade presente no ar condensa-se nas aletas do evaporador, sendo posteriormente drenada.

Dentre os modelos de aparelhos de condicionadores de ar, o modelo janela, também conhecido como ar-condicionado de janela, é um tipo mais empregado em ambientes pequenos como quartos ou escritórios, e é especialmente comum em edifícios residenciais. Ele é projetado para ser instalado em uma abertura de janela ou parede. Possui uma unidade compacta que contém todos os componentes essenciais, incluindo o compressor, o condensador, o evaporador, o ventilador e os controles. Geralmente, a parte interna do aparelho fica voltado para o ambiente a ser resfriado e a parte externa fica exposta ao ar externo e é responsável pela dissipação do calor gerado durante o processo de refrigeração.

Embora os modelos de janela possam ser mais limitados em termos de capacidade e eficiência energética em comparação com outros tipos de sistemas de ar-condicionado, eles ainda são amplamente utilizados em muitas residências e escritórios devido à sua facilidade de instalação e custo relativamente baixo.

Ainda sobre o modelo janela, existem dois tipos de sistema de controle aplicados ao seu funcionamento, o tipo mecânico e o tipo popularmente chamado *inverter* (baseado no uso de inversores de frequência). Segue um breve comparativo entre as principais características dos dois tipos de sistemas (ARRIFANO et al., 2020):

- Eficiência energética: Os modelos *inverter* são conhecidos por sua alta eficiência energética. Eles ajustam continuamente a velocidade do compressor para atender à demanda de resfriamento ou aquecimento do ambiente, resultando em um consumo de energia mais eficiente. Por outro lado, os modelos mecânicos operam em velocidade fixa, o que pode levar a picos de

consumo de energia.

- Temperatura e conforto: Os modelos inverter são capazes de manter uma temperatura mais estável e consistente no ambiente, ajustando automaticamente a capacidade de resfriamento ou aquecimento conforme necessário. Isso proporciona um maior conforto, evitando flutuações bruscas de temperatura. Os modelos mecânicos podem ter variações de temperatura mais perceptíveis, pois ligam e desligam o compressor em intervalos regulares.
- Ruído: Os modelos inverter tendem a ser mais silenciosos em comparação aos modelos mecânicos. Isso ocorre porque os sistemas inverter ajustam a velocidade do compressor para atender às necessidades de resfriamento ou aquecimento do ambiente, evitando a operação em altas velocidades e, conseqüentemente, reduzindo o ruído produzido.
- Manutenção: Ambos os tipos de sistemas requerem manutenção regular para garantir seu bom funcionamento. No entanto, os modelos inverter podem ter uma vida útil mais longa e exigir menos manutenção, devido ao seu funcionamento suave e contínuo, com menos desgaste em componentes como o compressor.
- Preço: Geralmente, os modelos inverter têm um preço inicial mais elevado do que os modelos mecânicos. No entanto, ao longo do tempo, devido à sua eficiência energética superior, os modelos inverter podem resultar em economia de energia e, conseqüentemente, redução dos custos operacionais.

Outro aspecto importante na refrigeração é a capacidade de resfriamento. A capacidade de resfriamento de um condicionador de ar é medida em unidades térmicas, sendo a unidade mais comum o BTU (*British Thermal Unit*). O BTU é uma medida de energia térmica necessária para elevar a temperatura de uma libra de água em um grau Fahrenheit. Dessa forma, a capacidade de resfriamento é indicada pela quantidade de BTUs que um condicionador de ar pode remover do ambiente em um determinado período de tempo. Quanto maior o número de BTUs, maior a capacidade de resfriamento do aparelho (CREDER, 2004).

Para determinar a capacidade de resfriamento necessária para um determinado espaço, é importante considerar fatores como a área do ambiente, o número de pessoas presentes, a exposição solar, a qualidade do isolamento térmico e a existência de equipamentos eletrônicos ou fontes de calor adicionais.

Em geral, a capacidade de resfriamento de um condicionador de ar é expressa em BTUs por hora (BTU/h). Como exemplo, na próxima seção, é apresentada a capacidade de 10.000 BTU/h para o condicionador de ar utilizado nos experimentos.

Existem tabelas e cálculos específicos disponíveis para ajudar a determinar a capacidade adequada para diferentes tamanhos de ambientes, levando em consideração os fatores mencionados anteriormente. Porém, esses cálculos não fazem parte dos objetivos deste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

A ideia principal deste projeto consiste em submeter o compressor de ar a um ciclo de funcionamento de forma que sua eficiência energética aumente durante a operação.

Nos modelos convencionais de condicionadores de ar (mecânicos), os compressores operam de maneira pouco eficiente, sendo ligados e desligados constantemente durante o ciclo de funcionamento por meio de um termostato. Em certos casos, quando a chave seletora de potência do aparelho está na posição máxima, o compressor pode funcionar constantemente.

Esse método de controle arcaico resulta em um consumo desnecessário de energia elétrica, já que o funcionamento é baseado em ligar e desligar, fazendo com que o compressor opere constantemente na potência nominal.

Este trabalho propõe uma alternativa que busca eliminar as adversidades mencionadas acima.

A escolha do condicionador de ar foi baseada na disponibilidade, no entanto, a modernização proposta neste trabalho pode ser aplicada a qualquer modelo de aparelho mecânico de janela, independentemente do fabricante.

O aparelho escolhido para este trabalho é o modelo CCB10DB-Frio, com capacidade de resfriamento de 10.000 BTU/h, fabricado pela Consul. Trata-se do modelo mais básico da categoria (CONSUL, [s.d.]).

A Tabela 1 foi retirada do manual do usuário e demonstram os dados técnicos do aparelho.

Tabela 1 – Dados técnicos do condicionador de ar e grifado o modelo CCB10DB

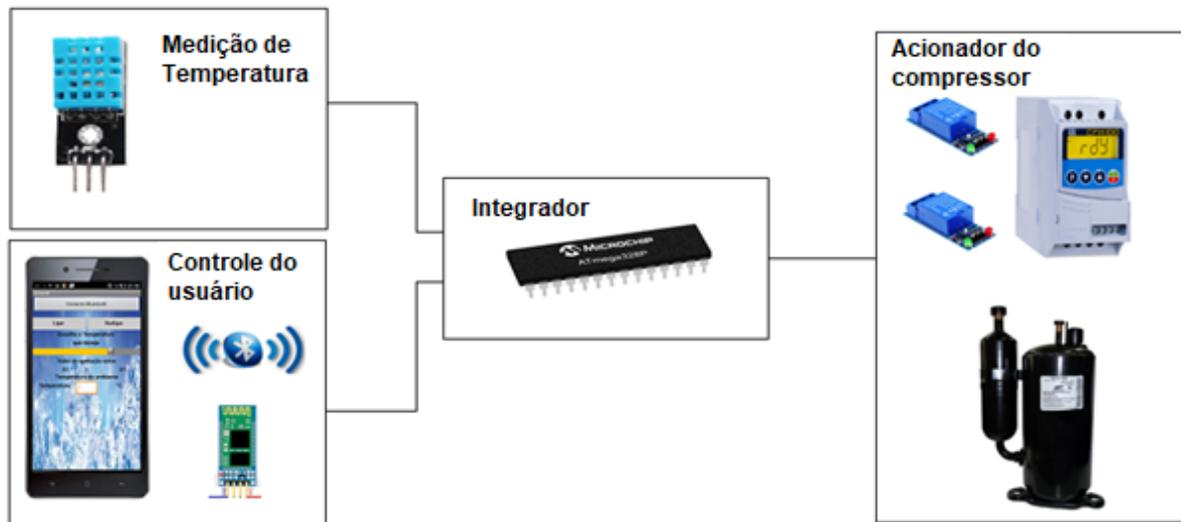
MODELO	CCB07DBA	CCB07DBB	CCS07DBB	CCN07DBA	CCN07DBB	CCO07DBB	CCB10DBA	CCB10DBB	CCS10DBB	CCN10DBA	CCN10DBB	CCO10DBB
Capacidade (kW)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93	2,93
(BTU/h)	7500	7500	7500	7500	7500	7500	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Ciclo	Frio	Frio	Reverso									
Tensão (V)	127	220	220	127	220	220	127	220	220	127	220	220
Frequência (Hz)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Potência (W)	748	748	748	748	748	748	964	964	964	964	964	964
Corrente (A)	6,1	3,5	3,5	6,1	3,5	3,5	7,8	4,5	4,5	7,8	4,5	4,5
Vazão de ar (m <sup>3</sup> /h)	420	420	420	420	420	420	530	530	530	530	530	530
Peso sem embalagem (kg)	23	23	23,5	23	23	23,5	27	27	28	27	27	28
Peso com embalagem (kg)	24	24	24,5	24	24	24,5	28	28	29	28	28	29
Compressor	Rotativo											
Eficiência energética (W/W)	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	2,94	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04
Disjuntor (A)	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15

Fonte: Consul (s.d.)

### 3.1 Sistema de controle de refrigeração proposto

O controle de refrigeração modernizado é composto por quatro sistemas menores denominados de subsistemas, são eles: integrador, acionador do compressor, medição de temperatura e controle do usuário. A Figura 1, apresenta um diagrama relacionando os componentes supracitados.

Figura 1 - Diagrama de componentes do sistema de controle de refrigeração proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir os subsistemas apresentados são detalhados.

### 3.1.1 Subsistema integrador

O subsistema responsável por executar todo o algoritmo do sistema de controle de refrigeração é conhecido como subsistema integrador. Esse componente é de extrema importância, pois é responsável por integrar os demais subsistemas como um todo.

Atualmente, no mercado, há diversos modelos de microcontroladores com diferentes características, dos quais podemos citar os seguintes: PIC18F452, ATMEGA328P e 8051. Embora todos atendam às necessidades, optou-se pelo ATMEGA328P devido à familiaridade com o componente e compilador (ATMEGA328P, 2023).

O microcontrolador ATMEGA328P foi desenvolvido pela ATMEL Corporation (atualmente Microchip). Trata-se de um circuito integrado (CI) composto por 28 pinos, dos quais 23 são destinados a entradas e saídas digitais, sendo 4 deles para PWM, 2 para recepção e transmissão de dados, e 4 para entradas analógicas. Ele requer alimentação externa de 1,8 a 5,5 V e tem uma frequência de operação de 20 MHz. Possui uma memória Flash de 32 kB, memória SRAM de 2 kB e memória EEPROM de 1 kB.

### 3.1.2 Subsistema acionador

O subsistema acionador tem a responsabilidade de fornecer a energia necessária ao compressor do equipamento, controlando a frequência entregue a ele e, conseqüentemente, a velocidade nominal, além de garantir uma partida suave.

A escolha do inversor de frequência foi baseada na disponibilidade. Optou-se pelo modelo CFW500 fabricado pela WEG S.A., uma empresa nacional. Destacam-se como principais características desse inversor a facilidade de parametrização e sua capacidade de atender motores de até 10 CV. Além disso, ele possui entradas digitais, o que atende perfeitamente às necessidades deste projeto (WEG, 2023).

### 3.1.3 Subsistema de medição de temperatura

O subsistema de medição de temperatura desempenha a função de fornecer dados precisos sobre a temperatura ambiente por meio de sinais elétricos.

Para essa finalidade, foi escolhido o sensor DHT11, classificado como um sensor digital. Esse sensor utiliza um protocolo de comunicação serial próprio e possui uma faixa de operação de 0 a 50 °C, com uma incerteza de  $\pm 1$  °C (ADA; DiCOLA; REMBOR, 2012).

A escolha desse sensor é justificada pelo fato de ser amplamente utilizado em projetos que envolvem a medição de temperatura com microcontroladores. Além disso, ele é capaz de fornecer medidas precisas dentro da faixa de temperatura de 15 a 40 °C, que é comumente utilizada em sistemas de refrigeração.

### 3.1.4 Subsistema de controle do usuário

Por fim, o subsistema de controle do usuário desempenha o papel de conectar o usuário ao condicionador de ar, permitindo a operação do mesmo. É através desse subsistema que todas as ações pertinentes ao uso do aparelho são realizadas, como ligar, desligar, definir a temperatura desejada ou simplesmente verificar a temperatura ambiente.

A comunicação entre os subsistemas de controle do usuário e integrador deve ser realizada de forma sem fio e utilizando uma tecnologia comum aos diversos dispositivos de *smartphones* disponíveis no mercado.

Na automação residencial, existem várias tecnologias de comunicação sem fio disponíveis, como módulos *Bluetooth*, *Wi-Fi* e *ZigBee*. Para este projeto, optou-se pelo uso do módulo *Bluetooth* HC-05, devido ao seu protocolo de comunicação padrão presente em todos os *smartphones*, além de ter um baixo custo de aquisição (ITEADSTUDIO, 2010).

## 3.2 Apresentação da montagem do sistema proposto

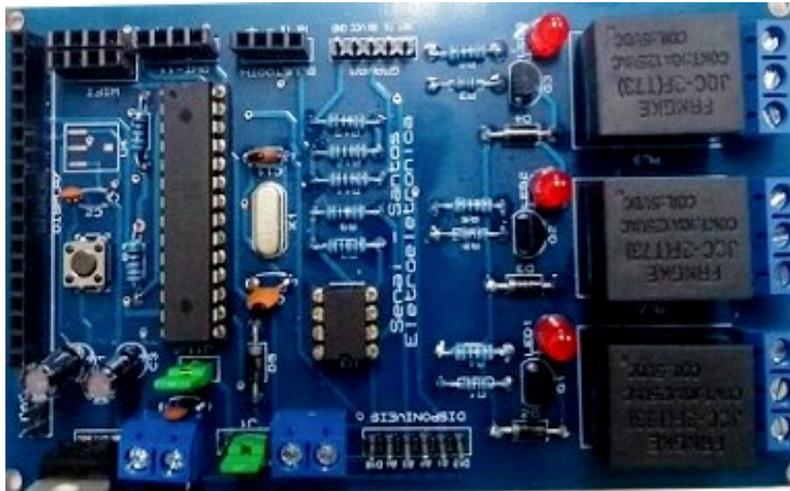
A seguir, é apresentado o processo completo de fabricação do projeto, incluindo a integração dos subsistemas mencionados na seção anterior.

### 3.2.1 Placa de controle

A placa de circuito impresso (PCI) é composta por todos os subsistemas e seus componentes. Foi projetada utilizando o software Proteus versão 8.0.

A Figura 2 ilustra a placa de controle já confeccionada em processo industrial específico de PCI (DANTAS, 2023).

Figura 2 - Placa de controle confeccionada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3, podemos observar as conexões entre a placa de controle e o inversor, além do destaque para o sensor de temperatura e o módulo *Bluetooth*.

Figura 3 - Placa de circuito impresso conectada ao inversor CFW 500.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Aplicativo para celular

Um aplicativo para *smartphone* foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar ao usuário do condicionador de ar, opções práticas para o seu manejo (DANTAS, 2023).

Este aplicativo foi desenvolvido utilizando a ferramenta MIT App Inventor.

Figura 4 - Leiaute do aplicativo para *smartphone*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3 Condição dos testes realizados

Os testes foram conduzidos em um ambiente controlado por um período total de quatro horas, divididos em três estágios com temperaturas iniciais diferentes, e foram registradas várias medidas em tempo real.

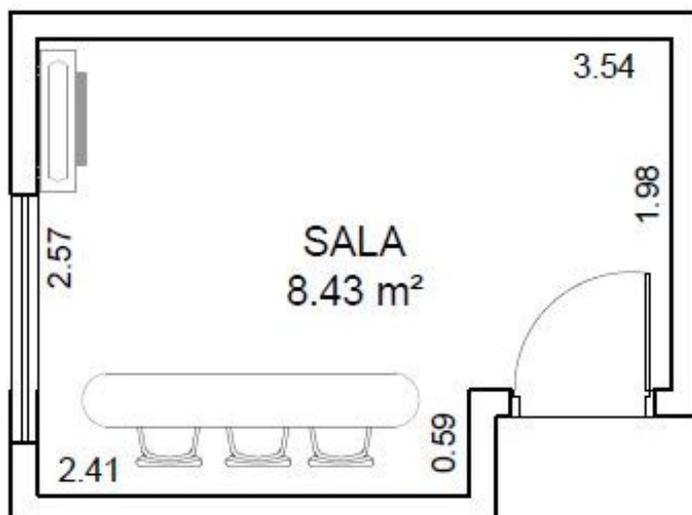
O primeiro estágio corresponde à fase inicial de resfriamento do ambiente, quando este ainda não está refrigerado, e tem duração de uma hora.

O segundo estágio consiste na manutenção do resfriamento alcançado no primeiro estágio e tem duração de uma hora e trinta minutos.

O terceiro estágio é dedicado à continuação da manutenção do resfriamento, porém, o condicionador de ar é ajustado para a posição *confort* (conforto) na chave seletora, e tem duração de uma hora e trinta minutos.

Para a realização dos testes de consumo de energia, um espaço específico foi designado. Trata-se de uma sala com dimensões descritas no leiaute representado na Figura 5, a qual conta com uma janela, uma porta, três cadeiras, um armário e uma mesa.

Figura 5 - Planta baixa do ambiente de teste em metros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o ensaio, foram utilizados três dispositivos distintos: um termômetro digital, dois termômetros de bulbo seco e um analisador portátil de redes elétricas.

O termômetro digital utilizado foi o modelo IR250, fabricado pela Extech. Os termômetros de bulbo seco utilizados foram do modelo 5203.03.0.00, fabricados pela Incoterm. O analisador portátil de redes elétricas utilizado foi o modelo MAR80, fabricado pela empresa nacional MEGABRAS.

Os termômetros de bulbo seco foram empregados para medir a temperatura interna e externa ao ambiente de teste.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são conduzidos testes de funcionamento e desempenho elétrico do condicionador de ar, em condições tanto convencionais quanto modernizadas.

### 4.1 Ensaios de comportamento do compressor de ar em diferentes frequências

Para determinar a faixa de valores de frequência elétrica que o compressor de ar é capaz de operar, foi necessário realizar um ensaio para observar o seu comportamento.

#### 4.1.1 Ensaios do compressor de ar a uma frequência de 60 Hz

Inicialmente, procedeu-se o ensaio do compressor em sua velocidade nominal utilizando o inversor de frequência, com uma tensão elétrica de 220 V e frequência de 60 Hz.

Por meio de uma inspeção visual, pôde-se observar que, um segundo após a partida da máquina, formou-se uma fina camada de gelo sobre as serpentinas de cobre da unidade condensadora. Essa camada de gelo persistiu por aproximadamente dois segundos antes de desaparecer completamente.

O valor máximo registrado para a corrente elétrica durante o ensaio foi de 3,89 A, próximo ao valor nominal do compressor. Além disso, a temperatura da carcaça do compressor de ar foi medida utilizando um termômetro digital, sendo registrados 70 °C.

#### 4.1.2 Ensaio do compressor de ar a uma frequência de 40 Hz

Após a realização dos ensaios em parâmetros nominais, procedeu-se à análise do comportamento do compressor de ar em frequências inferiores. Verificou-se que a menor frequência viável para operação eficiente é de 40 Hz, com tensão elétrica de 220 V.

Durante os ensaios operacionais a 40 Hz, o compressor de ar apresentou um comportamento semelhante ao observado durante a operação a 60 Hz. Uma fina camada de gelo foi formada e desapareceu brevemente sobre as serpentinas de cobre da unidade condensadora, como anteriormente registrado. Além disso, a temperatura interna do compressor apresentou um leve aumento, atingindo 71 °C. Em relação à corrente elétrica, com o inversor de frequência operando em modo vetorial, os valores permaneceram dentro dos parâmetros nominais, registrando uma corrente de 3,95 A.

Esses resultados corroboram a capacidade do compressor de operar de forma eficiente e estável em frequências mais baixas, proporcionando um melhor entendimento de seu desempenho em diferentes condições de operação. Essas informações são relevantes para a otimização do projeto e operação do equipamento, garantindo uma operação adequada e eficiente em frequências de até 40 Hz.

#### 4.1.3 Parâmetros utilizados no inversor de frequência CFW 500

Após identificar a faixa de frequência de trabalho adequada para o compressor, é necessário realizar a parametrização do inversor de frequência CFW 500. Para isso, utilizamos os principais parâmetros listados na Tabela 2, que compõem o sistema de modernização.

**Tabela 2 – Parâmetros do inversor CFW 500 utilizados para o controle do compressor de ar.**

Parâmetros	Função	Faixa de valores
P0124	Ref. 1 Multispeed	40 Hz
P0125	Ref. 2 Multispeed	60 Hz
P0134	Velocidade Máxima	60 Hz
P0202	Tipo de Controle	5 = VVW
P0220	Seleção Fonte LOC/REM	1 = Sempre REMOTO
P0222	Sel. Referência REM	8 = Multispeed
P0263	Função da Entrada DI1	2 = Habilita Geral
P0264	Função da Entrada DI2	13 = Multispeed
P0265	Função da Entrada DI3	13 = Multispeed
P0297	Freq. de Chaveamento	3000 Hz

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Levantamento das características e análise do consumo energético

Nesta etapa, foram levantadas e analisadas as características relacionadas ao consumo energético do aparelho condicionador de ar modelo janela mecânico operando na forma convencional e modernizada, quando o compressor passou a ser controlador por inversor de frequência. Os testes foram conduzidos em três estágios previamente mencionados e em um ambiente controlado.

A Tabela 3 apresenta os três estágios dos ensaios e o tempo correspondente para cada um deles. Durante esses estágios, foram coletados dados relevantes utilizados na análise do consumo energético do aparelho.

**Tabela 3 - Características dos ensaios.**

1º Estágio	2º Estágio	3º Estágio
Resfriamento inicial do ambiente. Chave seletora do aparelho na posição máxima.	Manutenção do resfriamento. Chave seletora na posição máxima.	Manutenção do resfriamento. Chave seletora na posição <i>confort</i> .
00:00 até 01:00	01:00 até 02:30	02:30 até 04:00

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.1 Teste de desempenho do 1º estágio

O primeiro estágio se refere ao período de resfriamento inicial do ambiente. Este teste teve a duração de uma hora.

Condições iniciais:

- Condicionador de ar no modo convencional com a chave seletora na posição máxima.
- Condicionador de ar no modo modernizado com seleção de temperatura desejada em 23 °C via aplicativo de celular.
- Temperatura inicial no ambiente em 29 °C.

A Tabela 4 apresenta os dados coletados para os dois modos de operação, fornecendo informações sobre o tempo decorrido, temperatura medida, potência ativa e energia consumida. Para a obtenção dos dois últimos dados mencionados, foi utilizado um analisador portátil de redes elétricas MAR80, conectado diretamente à tomada utilizada pelo aparelho condicionador de ar.

Ao analisar os dados da Tabela 4, é evidente a redução no consumo de energia elétrica já na primeira hora do teste, quando comparado o modelo convencional com a opção modernizada. Embora não tenha havido variação de frequência no compressor em nenhum momento do experimento, tanto antes quanto após a modernização, e o compressor tenha operado continuamente, foi observada uma diferença nos valores de potência ativa registrados. Essa redução foi resultado da utilização do modo de controle vetorial VVW (Voltage Vector WEG) do inversor, o qual apresenta um desempenho significativamente

superior ao controle V/F (Voltagem por Frequência). Essa melhoria se deve à estimativa do torque de carga e ao controle do fluxo magnético no entreferro do motor. Essa estratégia de controle considera as perdas, o rendimento, o escorregamento nominal e o fator de potência do motor, resultando em um aprimoramento da performance de controle.

Conforme apresentado na Tabela 4, a potência ativa registrada durante a primeira hora do teste após a modernização situou-se entre 500 e 550 W, refletindo a alteração do fator de potência da máquina, que se aproximou de 98%. Essa melhoria no fator de potência contribuiu para a redução do consumo de energia elétrica, resultando em um funcionamento mais eficiente e econômico do condicionador de ar após a modernização.

**Tabela 4 - Comparativo do primeiro estágio de testes antes e após a modernização.**

Modo de Operação	Tempo (horas)	Temperatura Interna (°C)	Potência Ativa (W)	Consumo (Wh)
Convencional	00:00	28	812	0
Modernizado		29	540	0
Convencional	00:15	25	856	221
Modernizado		25	550	144
Convencional	00:30	25	846	424
Modernizado		24	531	273
Convencional	00:45	24	835	616
Modernizado		24	542	397
Convencional	01:00	23	819	837
Modernizado		23	500	510

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses resultados destacam a importância da implementação de estratégias de controle avançadas, como o controle vetorial VVW, na busca por uma maior eficiência energética e um melhor desempenho dos condicionadores de ar.

Com base nos valores extraídos da Tabela 4, podemos aplicar as equações (1) e (2) a seguir para calcular a economia gerada (EG) em termos de energia elétrica consumida, tanto em Wh quanto em porcentagem, ao subtrair os valores antes e após a modernização:

$$EG = 837 - 510 = 327 \text{ Wh} \quad (1)$$

Em porcentagem:

$$EG = \frac{837-510}{837} \cdot 100 = 39,06 \% \quad (2)$$

É observado que a simples aplicação do inversor de frequência resultou em uma economia de 39% no consumo energético durante o primeiro estágio de teste.

#### 4.2.2 Teste de desempenho do 2º estágio

O segundo estágio se refere ao período de manutenção resfriamento do ambiente. Este teste teve a duração de uma hora e trinta minutos.

Condições iniciais:

- Condicionador de ar no modo convencional com a chave seletora na posição máxima.
- Condicionador de ar no modo modernizado com seleção de temperatura desejada em 23 °C via aplicativo de celular.
- Temperatura inicial no ambiente em 23 °C.

A Tabela 5 apresenta os dados coletados para os dois modos de operação, fornecendo informações sobre o tempo decorrido, temperatura medida, potência ativa e energia consumida.

**Tabela 5 - Comparativo do segundo estágio de testes antes e após a modernização.**

Modo de Operação	Tempo (horas)	Temperatura Interna (°C)	Potência Ativa (W)	Consumo (Wh)
Convencional	00:00	23	794	0
Modernizado		23	486	0
Convencional	00:15	22	810	200
Modernizado		22	12	82
Convencional	00:30	21	778	401
Modernizado		23	12	177
Convencional	00:45	21	791	600
Modernizado		23	485	245
Convencional	01:00	20	800	801
Modernizado		22	408	330
Convencional	01:15	20	789	996
Modernizado		23	12	417
Convencional	01:30	23	510	1193
Modernizado		23	510	480

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os dados da Tabela 5, pode-se observar que o comportamento do condicionador de ar antes da aplicação da automação permaneceu o mesmo, operando sempre na frequência de 60 Hz, e a potência ativa instantânea permaneceu em torno de 800 W.

Já nos dados obtidos após a modernização, é possível identificar o impacto do controle de frequência elétrica fornecida ao compressor de ar ao longo do tempo de ensaio, resultado do sistema de controle de refrigeração em ação. Ao subtrair os valores de consumo elétrico obtidos na Tabela 4 (510 Wh) e na Tabela 5 durante a primeira hora (330 Wh), nota-se uma diferença de 180 Wh, o que representa uma redução de 35%.

Essa economia de energia foi alcançada devido ao controle adequado do ciclo de funcionamento do compressor de ar, implementado pelo sistema de controle de refrigeração.

Esses resultados ressaltam a eficácia da automação na melhoria da eficiência energética do condicionador de ar.

No que diz respeito à comparação do consumo antes e após a modernização, ao subtrair os valores extraídos da Tabela 5 durante uma hora e meia de ensaio, podemos aplicar as equações (3) e (4) para calcular a economia gerada. Esses cálculos nos fornecem uma estimativa da redução no consumo de energia alcançada com a modernização do sistema.

$$EG = 1193 - 480 = 713 \text{ Wh} \quad (3)$$

Em porcentagem:

$$EG = \frac{1193-480}{1193} \cdot 100 = 59,97 \% \quad (4)$$

É evidente que a solução proposta resultou em uma significativa economia de consumo energético durante o segundo estágio de teste, alcançando uma redução de 59,97%.

#### 4.2.3 Teste de desempenho do 3º estágio

O terceiro estágio se refere ao segundo período de manutenção resfriamento do ambiente. Este teste teve a duração de hora e trinta minutos.

Condições iniciais:

- Condicionador de ar no modo convencional com a chave seletora na posição *comfort*.
- Condicionador de ar no modo modernizado com seleção de temperatura desejada em 23 °C via aplicativo de celular.
- Temperatura inicial no ambiente em 23 °C.

A Tabela 6 apresenta os dados coletados para os dois modos de operação, fornecendo informações sobre o tempo decorrido, temperatura medida, potência ativa e energia consumida.

**Tabela 6 - Comparativo do terceiro estágio de testes antes e após a modernização.**

Modo de Operação	Tempo (horas)	Temperatura Interna (°C)	Potência Ativa (W)	Consumo (Wh)
Convencional	00:00	23	790	0
Modernizado		23	508	0
Convencional	00:15	22	818	215
Modernizado		23	378	111
Convencional	00:30	20	147	354
Modernizado		23	378	160
Convencional	00:45	23	810	508
Modernizado		22	405	236
Convencional	01:00	20	146	713
Modernizado		22	12	340
Convencional	01:15	23	809	831
Modernizado		22	12	396
Convencional	01:30	21	510	970
Modernizado		23	510	470

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os dados da Tabela 6, é possível observar uma mudança no comportamento do condicionador de ar antes da aplicação da automação. Ao analisar os dados coletados nos períodos de trinta e sessenta minutos de teste, verifica-se que a potência ativa registrada nesses momentos é menor em relação aos demais momentos (147 e 146 W respectivamente). Essa variação ocorre devido à atuação do termostato mecânico presente no sistema.

Em contrapartida, ao analisar os dados após a modernização, verifica-se que o condicionador de ar apresenta um comportamento praticamente igual ao do segundo estágio, com uma pequena alteração no valor do consumo de apenas 10 Wh. Isso se justifica pela manutenção do modo de funcionamento e temperatura inicial do sistema.

Ao comparar o consumo antes e após a modernização, ao subtrair os valores extraídos da Tabela 6 durante uma hora e meia de ensaio, obtém-se um valor total de 500 Wh, o que representa uma economia de 51,54%. Esses cálculos foram realizados com base nas equações (5) e (6).

$$EG = 970 - 470 = 500 \text{ Wh} \quad (5)$$

Em porcentagem:

$$EG = \frac{970-470}{970} * 100 = 51,54 \% \quad (6)$$

Esses resultados encorajadores destacam o potencial da solução proposta para promover uma operação mais sustentável e econômica dos condicionadores de ar, beneficiando tanto os usuários quanto o meio ambiente.

### 4.3 Análise da eficiência energética

## 5 CONCLUSÃO

A modernização proposta no sistema de condicionamento de ar apresentou resultados positivos significativos, tanto em termos de eficiência energética quanto em economia financeira. Ao analisar os dados coletados nos testes realizados nos três estágios, observou-se uma redução entre 39,06 % e 59,97 % no consumo de energia elétrica após a aplicação da automação. Além disso, o índice de eficiência energética do aparelho teve aumento estimado de 1,63 vezes até 2,48 vezes nos três estágios estudados.

A análise financeira feita em cenários hipotéticos demonstrou que é possível obter uma economia significativa no consumo de energia elétrica e um retorno financeiro em curto prazo. Em cenário residencial com dois aparelhos obteve-se uma economia de R\$ 113,26 por mês e o seu retorno financeiro antes de 9 meses. Já no cenário comercial com trinta refrigeradores, verificou-se que, de um modo geral, quanto maior o número de aparelhos destinado a refrigeração, maior será a economia gerada e o seu retorno financeiro será em menor tempo. No estudo obteve-se uma economia de R\$ 3397,97 por mês e um retorno financeiro antes de 5 meses.

Com base nos resultados e dados apresentados, é possível afirmar que este trabalho oferece uma série de contribuições importantes no campo do condicionamento de ar e eficiência energética. Algumas das principais contribuições são:

1. Desenvolvimento de uma solução de modernização: O trabalho propõe uma solução eficaz para melhorar a eficiência energética dos condicionadores de ar, por meio da modernização do sistema de controle. A implementação de inversores de frequência, sensores de temperatura e sistemas avançados de controle demonstraram ser estratégias eficazes para otimizar o consumo energético sem a necessidade de se alterar o compressor existente.

2. Resultados quantitativos: Os testes realizados e os dados coletados permitiram uma análise detalhada dos efeitos da modernização nos condicionadores de ar. Os resultados demonstraram reduções significativas no consumo de energia elétrica, evidenciando a eficácia da solução proposta.

3. Impacto ambiental: A redução no consumo de energia elétrica resultante da modernização dos condicionadores de ar contribui para a diminuição do impacto ambiental. A diminuição das emissões de gases de efeito estufa e o uso mais eficiente dos recursos energéticos são aspectos essenciais para a sustentabilidade ambiental.

4. Benefícios econômicos: Além do impacto ambiental positivo, o trabalho também apresentou benefícios econômicos significativos. A economia de energia resultante da modernização dos condicionadores de ar proporcionou uma redução nos custos mensais de energia elétrica, gerando um retorno financeiro atrativo em um período relativamente curto.

5. Aplicabilidade em diferentes cenários: O estudo abordou tanto o cenário residencial quanto o comercial, demonstrando que a solução proposta pode ser aplicada em diferentes contextos. Isso amplia o alcance e a relevância do trabalho, pois as melhorias na eficiência energética podem ser implementadas tanto em residências quanto em estabelecimentos comerciais.

Em suma, este trabalho contribui para a área de condicionamento de ar ao apresentar uma solução eficaz de modernização que resulta em melhorias significativas na eficiência energética. Além disso, as implicações ambientais positivas e os benefícios econômicos destacam a importância da implementação de práticas sustentáveis no campo do condicionamento de ar.

## REFERÊNCIAS

ADA, Lady; DiCOLA; Tony, REMBOR, Kattni. **DHT11, DHT22 and AM2302 sensors overview**. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/dht/overview> . Acesso em: 16 mai. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Classes de consumo**. 24 fevereiro 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/classes-de-consumo> . Acesso em: 14 mai. 2023.

ARRIFANO, R. C. et al. Análise de sistemas de climatização para obtenção de ganhos com eficiência energética de centrais de ar condicionado da Estácio Belém. **Revista Multidisciplinar Pey Këyo Científico**, v. 6, n. 4, p. 38–56, 2020.

ATMEGA328P. 2023? Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328P#> . Acesso em: 16 mai. 2023.

CONSUL. **Manual do Consumidor**. [s.d.]. Disponível em: [https://static.bemol.com.br/bol/manuais/1/6/9/169345/117693277\\_1399900173090.pdf](https://static.bemol.com.br/bol/manuais/1/6/9/169345/117693277_1399900173090.pdf). Acesso em: 14 maio. 2023.

CREDER, H. **Instalações de ar condicionado**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

DANTAS, L. P. **Desenvolvimento do aplicativo**. 2023. Disponível em: <https://github.com/LePoloni/CondicionadorAr/tree/main/APP> . Acesso em: 27 jul. 2023.

DANTAS, L. P. **Desenvolvimento da placa eletrônica**. 2023. Disponível em: <https://github.com/LePoloni/CondicionadorAr/tree/main/PCI> . Acesso em: 27 jul. 2023.

ITEADSTUDIO. **HC-05 -Bluetooth to serial port module**. 2010. Disponível em: [https://components101.com/sites/default/files/component\\_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf) . Acesso em: 16 mai. 2023.

MILLER, R.; MILLER, M. R. **Ar-condicionado e refrigeração**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

OLIVEIRA, N. DE. EPE: demanda de energia crescerá 4,3% por ano até 2023. 23 janeiro 2014. **Agência Brasil**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2014-01/epe-demanda-de-energia-crescera-43-por-ano-ate-2023> . Acesso em: 14 maio. 2023.

OPOKU, R.; EDWIN, I. A.; AGYARKO, K. A. Energy efficiency and cost saving opportunities in public and commercial buildings in developing countries—The case of air-conditioners in Ghana. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 937–944, 2019.

PLATONOW, V. **Demanda por eletricidade no Brasil vai triplicar até 2050**. 19 agosto 2014. **Agência Brasil**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2014-08/consumo-de-eletricidade-vai-triplicar-no-pais-ate-2050-indica-estudo-da-epe> . Acesso em: 14 maio. 2023.

WEG. **Inversor de frequência CFW500**. 2023. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Drives-para-OEMs-e-Usos-Gerais/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_PRODUCT\\_INVERTER\\_CFW500](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Drives-para-OEMs-e-Usos-Gerais/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_INVERTER_CFW500) . Acesso em: 16 mai. 2023.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por essa grande obra.  
 À minha família por compreender minha ausência.  
 À Escola SENAI Antônio Souza Noschese por todo apoio e pela rica oportunidade de fazer o curso.  
 À esta Faculdade de Tecnologia SENAI “Anchieta”, com a excelência de seu corpo docente, direção e administração.

## SOBRE O(S)AUTOR(ES)

### i **DIOGO PEREIRA PERES**



Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Santa Cecília (2017). Em seu currículo lattes o termo mais frequente na contextualização da produção científica, tecnológica e artístico-cultural são: eletroeletrônica, redes industriais, automação industrial e microcontroladores. Desde 2010, vem lecionando em cursos de nível técnicos em diferentes instituições na baixada santista. <http://lattes.cnpq.br/0356141842027445>

### ii **LEANDRO POLONI DANTAS**



Engenheiro (2004) e Doutor (2018) em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI. Atuou por 15 anos na indústria eletrônica no desenvolvimento de novos produtos. Desde 2009, vem lecionando em cursos de pós-graduação, graduação e de nível técnico em diferentes instituições paulistas. Atualmente é professor na Faculdade de Tecnologia SENAI e no Insper. <https://orcid.org/0000-0003-3674-336X>.

### iii **MARCONES CLEBER BRITO DA SILVA**



Tecnólogo em Mecatrônica Industrial (2011), Engenheiro Mecatrônico (2013) e Especialista em Engenharia de Manutenção Industrial pela Centro universitário Eniac (2013). Mestre em Tecnologia Nuclear (2020) pela Universidade de São Paulo. Desde 2011, vem lecionando em cursos de nível técnicos e de graduação. Atualmente é professor da Faculdade de Tecnologia SENAI e na FESA. <https://orcid.org/0000-0002-3690-1682>

### iv **LUIZ CARLOS CANNO**



Graduado em Tecnologia de Automação Industrial (2009) com Especialização em Gestão Empresarial pela Universidade Nove de Julho (2012), e Especialização em Docência na Educação Profissional e Tecnológica pelo SENAI CETIQT (2015). Professor na Faculdade de Tecnologia SENAI do curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial e Pós-graduação em Sistemas Embarcados. <https://orcid.org/0000-0001-9331-9309>

**▼ FERNANDO SIMPLICIO DE SOUSA**

Professor da Faculdade SENAI no curso de Pós-Graduação em Sistemas Embarcados. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do ABC (UFABC) e Pós-Graduado (Lato Sensu) pela Universidade Mackenzie. Graduado em Gestão de Pequenas e Médias Empresas pela UNIP e em Projetos Mecânicos pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (UNESP/FATEC-SP). <http://lattes.cnpq.br/4579382987984065>.  
<https://orcid.org/0009-0009-5760-4845>