

Sensoriamento para controle de gasto mínimo energético no sistema ciber físico de eficiência energética e condicionamento ambiental

Rafael Ifanger Ribeiro¹, Thiago Maximo Pavão¹, Antonio Pestana Neto¹

riribeiro@cti.gov.br, tmpavao@cti.gov.br, antonio.pestana@cti.gov.br

¹Divisão de Robótica e Visão Computacional – DRVC
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP

Abstract. This study develops a robust system for monitoring and enhancing energy efficiency in environmental control systems. By measuring electrical consumption and harmonic distortion in devices like air conditioners, it aims to optimize energy use without compromising indoor comfort. Utilizing the ESP32, which offers real-time data acquisition, the system calculates key parameters such as RMS voltage, active and reactive power, and total harmonic distortion using the Fast Fourier Transform (FFT). Data is integrated into the ThingsBoard platform for comprehensive monitoring and control. This approach balances environmental comfort, evaluated through indices like the Predicted Mean Vote (PMV), and energy efficiency.

Resumo. Este estudo desenvolve um sistema robusto para monitorar e aprimorar a eficiência energética em sistemas de controle ambiental. Ao medir o consumo elétrico e a distorção harmônica da tensão em dispositivos como ar-condicionados, visa-se otimizar o uso de energia sem comprometer o conforto interno. Utilizando o ESP32, que oferece aquisição de dados em tempo real, o sistema calcula parâmetros como tensão RMS, potência ativa e reativa, e distorção harmônica total usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os dados são integrados à plataforma ThingsBoard para monitoramento e controle. Esta abordagem equilibra o conforto ambiental, avaliado por índices como o Predicted Mean Vote (PMV), e gasto energético.

1. Introdução

O controle ambiental em ambientes internos, como salas e escritórios, possui significativa relevância ao garantir condições ideais de conforto, saúde e produtividade para seus ocupantes. Este controle abrange a regulação precisa de fatores como temperatura, umidade e qualidade do ar, elementos que, quando adequadamente geridos, contribuem para a criação de um ambiente propício ao desempenho das atividades cotidianas. Paralelamente, a eficiência energética emerge como um elemento de elevada pertinência no contexto do controle ambiental, na medida em que a otimização do uso de energia, sem prejuízo do conforto ambiental, resulta em um equilíbrio delicado entre bem-estar dos usuários e a conservação dos recursos energéticos, promovendo, assim, a sustentabilidade e a redução de custos operacionais. Portanto, a sinergia entre o controle ambiental e a eficiência energética constitui uma estratégia essencial para a gestão de ambientes internos que priorizam tanto o conforto dos usuários quanto a sustentabilidade.

A análise de energia permite a busca pela eficiência energética em diversos sistemas, sendo de importante para identificar áreas de desperdício e oportunidades de otimização. A leitura de tensão e corrente de uma carga é uma prática para compreender o consumo energético de um dispositivo ou sistema. Com os módulos do projeto, pode-se medir a variação do consumo da carga e da tensão da rede elétrica utilizada. Este estudo também tem como resultado o cálculo da distorção harmônica da forma de onda da tensão, responsável por dano a equipamento ou mal funcionamento.

O cálculo da potência e das harmônicas em equipamentos elétricos é essencial para identificar o consumo energético e avaliar a qualidade da energia fornecida. A presença de harmônicas pode indicar distorções que afetam o desempenho dos dispositivos e a eficiência energética. Utilizar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite uma avaliação detalhada das componentes harmônicas presentes no sinal de tensão.

A ESP32 é um microcontrolador robusto com capacidade de processamento adequada para aplicações de medição e análise em tempo real. Seus conversores analógico-digitais (ADC) permitem a captura de sinais de tensão e corrente com transdutores dos respectivos sinais para posterior análise. Este projeto enfatiza na implementação de um sistema que mede a potência e realiza a análise harmônica do sinal de tensão usando a ESP32.

2. Interconexão entre módulos e plataforma ThingsBoard

O principal aspecto do projeto é a junção de ferramentas para atingir um estado ideal de controle ambiental - máximo de variáveis possíveis do PMV (Predicted Mean Vote discutido no artigo [2]) controladas - com a restrição de menor gasto energético dos equipamentos utilizados para tal fim. O início do desenvolvimento se deu na aquisição de dados de temperatura e umidade, mantendo outros parâmetros como metabolismo, por exemplo, em faixas de valores constantes [2].

O equipamento responsável por ler os sensores das variáveis ambientais foi denominado de “módulo ambiental” e consiste na periódica leitura - de 30 em 30 segundos a partir do tempo 0 do unix timestamp - dos sensores usando o protocolo NTP para sincronização do tempo [1].

A telemetria é enviada à plataforma ThingsBoard, que gerencia todos os dados de IoT (Internet of Things) do projeto, organiza a abstração da topologia e o fluxo de dados. Utilizando API REST do ThingsBoard, conseguimos montar um controle dos equipamentos atuadores da sala baseado nos dados salvos pela plataforma com a requisição da telemetria e atributos do banco de dados.

O módulo de controle do ar condicionado usa emissão infravermelho para o sinal de comando, o qual é definido nos scripts em python que conversam pela API REST e comandam o módulo por RPC (Remote Procedure Call).

Como mostra o diagrama da Figura 1, todos os módulos se comunicam com a plataforma Thingsboard, além dos algoritmos aplicados nos dados coletados. O módulo ambiental carrega a base de dados; algoritmo em python define um controle com as

últimas informações coletadas; por intermédio do ThingsBoard uma RPC é enviada ao módulo IR; e o resultado desse controle é observado na forma de consumo energético dos equipamentos com as medições do módulo de energia.

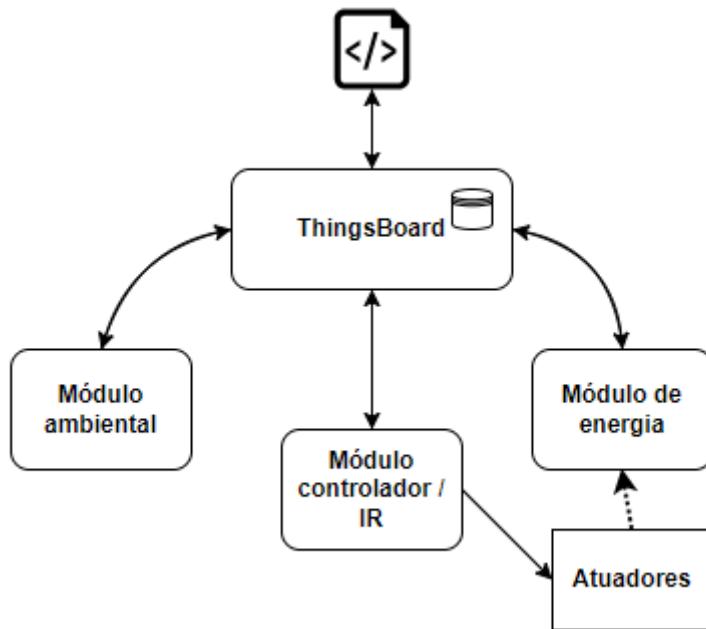


Figura 1. Diagrama de interconectividade do projeto.

3. Módulo de energia

A medição da potência dos equipamentos do ambiente usado para monitoramento e controle ambiental foi realizada utilizando um “módulo de energia”. Este consiste na leitura dos transdutores de tensão e corrente conectados à alimentação da carga, como o ar condicionado por exemplo. A leitura é analógica e dentro de uma faixa de tensão cujo a entrada dos ADCs (conversores analógico-digital) de cada microcontrolador permite. Medindo ponto a ponto no tempo, adquire-se dados como tensão e corrente rms, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, distorção harmônica e a frequência da rede, valores apresentados em [1]

A primeira versão foi desenvolvida com a placa de desenvolvimento STM32 Black Pill fazendo a leitura de dois canais do módulo ADC utilizando DMA (*Direct Memory Access*). O acesso direto à memória permite armazenar as leituras do registrador ADC_DR - que armazena um único valor de conversão para todos os canais - para que não sejam perdidos valores e se viabilize o cálculo do módulo de energia. Uma vez que se tem um número determinado de amostras necessárias de tensão e corrente, não há necessidade de interferência do processador durante as medições, sendo este destinado a outras atividades. O modo de buffer duplo circular, ou "double-buffer circular mode", é uma técnica utilizada em sistemas que utilizam DMA (*Direct Memory*

Access) para transferir dados entre dispositivos periféricos e a memória principal de forma eficiente e contínua.

Neste modo de operação, são utilizados dois buffers de memória em vez de apenas um. Enquanto um dos buffers está sendo preenchido com dados pelo dispositivo periférico, o outro buffer pode ser acessado pelo processador ou por outros dispositivos para leitura ou escrita. Quando o buffer em uso está cheio, a transferência DMA é automaticamente comutada para o outro buffer vazio, enquanto o primeiro é liberado para ser acessado. Essa técnica permite que a transferência de dados ocorra de forma contínua, sem interrupções, mesmo enquanto o processador ou outros dispositivos estão acessando os dados previamente transferidos ou enquanto o dispositivo periférico está gerando novos dados. Isso é especialmente útil em aplicações que exigem um fluxo constante de dados, como processamento de sinais em tempo real a partir dos dados dos sensores para aplicar a FFT.

O uso do modo contínuo no ADC com DMA, embora eficiente para aplicações que requerem uma coleta constante de dados, pode apresentar imprecisões no tempo entre as amostras. Essa imprecisão decorre do fato de que, em modo contínuo, as conversões ADC são realizadas sem a garantia de espaçamentos temporais rigorosamente iguais entre as leituras. Tal variação no tempo de amostragem pode comprometer a qualidade dos dados adquiridos, especialmente quando esses dados são destinados à execução da FFT, onde a uniformidade do tempo entre amostras é essencial para a precisão na análise das componentes de frequência.

Essa imprecisão de tempo entre as medidas no modo contínuo com DMA pode ocorrer devido à variabilidade nos tempos de conversão do ADC, que pode ser influenciada por fatores como a complexidade das operações internas do controlador, latências introduzidas pelo próprio DMA durante a transferência dos dados, ou a presença de interrupções no sistema que atrasem a execução das conversões subsequentes. Esses fatores podem resultar em desvios sutis no tempo entre as amostras, afetando a consistência temporal das leituras.

A alternativa de utilizar interrupções de timer para a amostragem do ADC oferece vantagens consideráveis em termos de precisão temporal. Ao configurar um timer para disparar interrupções em intervalos regulares, assegura-se que cada leitura do ADC ocorra em momentos exatamente espaçados, garantindo a regularidade temporal necessária para a correta execução da FFT. Essa abordagem, no entanto, traz consigo a necessidade de maior processamento, especialmente em frequências de amostragem elevadas.

Quando o timer é configurado para disparar interrupções a uma alta taxa, o processamento dessas interrupções pode consumir uma fração significativa do tempo de CPU. Em microcontroladores de núcleo único, essa carga pode impactar severamente a capacidade de executar outras tarefas, como o cálculo da FFT. Assim, em sistemas que utilizam altas taxas de amostragem, a utilização de microcontroladores com múltiplos núcleos, como o ESP32, se torna desejável. Um núcleo pode ser dedicado exclusivamente ao tratamento das interrupções e coleta dos dados do ADC, enquanto o outro núcleo realiza o processamento necessário, como o cálculo da FFT. Essa

separação de responsabilidades entre os núcleos garante que tanto a amostragem quanto o processamento dos dados sejam executados de maneira eficiente e sem comprometer a precisão e o desempenho do sistema.

O código mede a potência de uma carga bem como as harmônicas de seu sinal de tensão a partir da leitura dos canais do ADC da ESP32, utilizando uma interrupção periódica para iniciar e capturar os valores de leitura de um canal do ADC1 e do ADC2. A estrutura do firmware se baseia na execução de uma tarefa gerenciada pelo scheduler do FreeRTOS e uma interrupção atrelada ao timer. O período da interrupção é definido para a frequência de amostragem e, ao executar as leituras dos módulos ADC1 e ADC2, os valores são salvos em um buffer. Quando o buffer satura, é feita uma notificação à tarefa que, então, chama o método que calcula a FFT e, enquanto o buffer é usado para cálculo, outro buffer é preenchido na memória.

Desse modo, o armazenamento das leituras é alternada entre dois buffers quando o tamanho destes chega ao limite alocado. Com a chamada da FFT, os valores são utilizados para cálculo da distorção harmônica e os outros dados de tensão e corrente para os outros cálculos de potência. Quando os dados estão prontos, estes são enviados via serial ao módulo ESP01, baseado na ESP8266, haja visto a impossibilidade de usar WIFI e a chamada das leituras do ADC2 juntos. Assim, as mensagens são recepcionadas pela ESP01 e nela há a conexão com a plataforma Thingsboard bem como a transmissão MQTT e sincronização por protocolo SNTP.

Assim, com os dois ADCs realizando a leitura, não é necessário finalizar uma aquisição para começar outra e tomando um tempo médio de $25\ \mu s$. Esse resultado de aproximadamente 40kHz permitiu a procura de uma frequência de chamada que respeitasse a frequência máxima para essas duas leituras ($40\text{kHz}\sim$) e as condições para FFT - tamanho do buffer de entrada da FFT como uma potência de 2.

A FFT é um algoritmo utilizado para calcular a Transformada de Fourier Discreta (DFT) de um sinal discreto. Essa transformada converte um sinal no domínio do tempo em suas componentes de frequência, permitindo a análise da distribuição espectral do sinal, e a partir desta, utiliza-se a amplitude das harmônicas para calcular a Distorção Harmônica Total (DHT). A FFT é empregada para decompor o sinal em suas componentes harmônicas, um sinal sendo formado pelo somatório senóides de amplitude e fase calculadas, cuja verificação é dada no gráfico do domínio da frequência, facilitando a identificação e quantificação de distorções harmônicas.

Dessa forma, tem-se um divisor de frequência dos 80MHz para que se determine a frequência de amostragem f , sabendo que esta não pode passar de 40kHz . O número de leituras dentro de um ciclo (60Hz - frequência do sinal da rede) é dado por $f/60$. Para amostragem podemos tomar um número múltiplo de uma potência de 2, assim podemos fazer a média de N a N valores, sendo N a multiplicidade, e obtemos 2^n (n natural). Equacionando, $f/60 = N \cdot 2^n \Rightarrow f = N \cdot 2^n \cdot 60$.

No entanto, pode-se escolher capturar mais de um ciclo completo para a FFT e, por conseguinte, a frequência de p ciclos é dada por $60/p$. Reestruturando, tem-se $f = N \cdot 2^n \cdot (60/p)$. Seja k o divisor de frequência, $f = 80/k$:

$$\Rightarrow 80/k = N \cdot 2^n \cdot (60/p).$$

Portanto $k = 80/[N \cdot 2^n \cdot (60/p)]$, onde k é um número natural maior que 0. Tendo a equação e a restrição para k, um método numérico para determinar o conjunto de possibilidades de (N, n, p) é o teste dos valores dentro de uma faixa para N n e p salvando aqueles que respeitam as condições citadas. Com os resultados e a restrição da $f < 40 \text{ kHz}$, foi definido $N = 5$, $n = 9$ e $p = 12$ com $f = 25,6 \text{ kHz}$ e $k = 3125$.

No projeto, a configuração da FFT envolve a determinação dos parâmetros necessários para a correta aplicação do algoritmo, como o tamanho da janela de amostragem, a taxa de amostragem do sinal e a resolução espectral desejada. Essa configuração adequada da FFT garante uma análise precisa da DHT, cuja maior frequência de harmônica utilizada se dá na 42ª, proporcionando qualidade e integridade na análise do sinal elétrico analisado.

3. Módulos atuação (IR)

O módulo IR é um componente do sistema de controle do ar condicionado, operando através de sinais infravermelhos (IR) para ajustar o funcionamento do aparelho com base em comandos recebidos. Este módulo é projetado para interagir com a plataforma ThingsBoard, uma solução robusta de gerenciamento de dados de IoT. Ele recebe comandos via Remote Procedure Call (RPC) para alterar parâmetros do ar condicionado, como temperatura, modo de operação e velocidade do ventilador. A principal função do módulo é converter as instruções recebidas em comandos IR que são enviados ao ar condicionado, além de validar a execução bem-sucedida desses comandos através da detecção de sinais acústicos, conhecidos como "beeps", emitidos pelo aparelho.

O código do módulo IR segue um fluxo para garantir a precisão e a eficácia no controle do ar condicionado. Inicialmente, o módulo estabelece conexões essenciais com redes WiFi e com a plataforma ThingsBoard. O código é estruturado em duas tarefas e uma interrupção para otimizar o processamento e a resposta do sistema.

O módulo espera por RPCs que contêm os comandos para o ar condicionado. Quando um RPC é recebido, uma tarefa dedicada é notificada para processar o comando. Se o tempo desde o último comando for suficientemente longo, o módulo envia um comando IR ao ar condicionado e emite um "beep" para garantir que o comando foi recebido. Em paralelo, um timer configura uma interrupção para leitura periódica dos sinais do ADC (Conversor Analógico-Digital), armazenando os dados em um buffer. Quando o buffer está completo, uma notificação é enviada para uma tarefa de análise de áudio, que executa o algoritmo de Goertzel para detectar a frequência do beep. Se a frequência for confirmada, o módulo responde que o comando foi corretamente enviado e reconhecido pelo ar condicionado.

O algoritmo de Goertzel é uma técnica eficiente para detecção de frequências específicas em sinais digitais, especialmente útil quando o objetivo é analisar sinais com componentes de frequência distintas. Em vez de calcular a Transformada Rápida de

Fourier (FFT) para todo o espectro de frequências, o algoritmo de Goertzel é projetado para focar em uma única frequência de interesse, tornando-o mais eficiente para esse propósito específico. No módulo IR, ele é empregado para identificar a frequência do beep emitido pelo ar condicionado.

O funcionamento do algoritmo envolve o processamento do sinal amostrado com um filtro digital específico, que isola a frequência alvo. Ao aplicar o filtro, o algoritmo calcula a magnitude da frequência desejada, comparando-a com um limiar predefinido para determinar a presença ou ausência da frequência no sinal. A função dedicada ao goertzel escrita no código implementa este processo ao ajustar a magnitude calculada com um fator de escala, garantindo a precisão na detecção da frequência alvo. A magnitude resultante é então comparada com um limiar para validar se o beep foi detectado corretamente.

A comunicação entre o módulo IR e a plataforma ThingsBoard é facilitada através de chamadas de Procedimentos Remotos (RPCs), que permitem que um sistema execute funções ou comandos em um dispositivo remoto como se fossem locais. RPCs são uma forma de comunicação que permite que um cliente envie uma solicitação para um servidor para executar uma função específica e, em resposta, receba um resultado dessa execução.

O módulo IR é configurado para receber e processar RPCs dada por um script python de controle via a API REST do ThingsBoard, interpretando esses comandos conforme necessário. A RPC recebida é processada por uma função que realiza a validação dos dados e ajusta o estado do ar condicionado conforme os parâmetros especificados. Se houver inconsistências ou falhas na validação, a função gera e retorna uma mensagem de status de erro apropriada. Além disso, o módulo IR é responsável por manter uma conexão persistente com a plataforma ThingsBoard, gerenciar as assinaturas de RPCs e assegurar a comunicação contínua e eficaz entre o módulo e a plataforma.

4. Controle simples com PMV

Para entender como a temperatura e a umidade afetam o índice PMV em um ambiente específico, é essencial considerar um ambiente de teste padrão, como o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). Neste ambiente, supõe-se uma vestimenta padrão, definida pelo parâmetro de *clo* (unidade que representa a resistência térmica da roupa). A análise é feita com base em dados coletados de temperatura e umidade como entrada para o cálculo do PMV, como mostram os gráficos das Figuras 2-2 e 2-3. Nessas figuras, foram fixadas uma temperatura radiante média de 27°C, velocidade do ar de 0.4 m/s, atividade metabólica de um indivíduo que se encontra sentado digitando no computador e isolamento das roupas dada por 0.7 clo.

A relação entre a temperatura e a umidade em relação ao PMV é complexa e multifacetada. A temperatura do ambiente afeta diretamente a quantidade de calor trocada entre o corpo e o ambiente. Temperaturas elevadas geralmente aumentam a sensação térmica de calor, exigindo que o sistema de controle ajuste a temperatura para manter o PMV dentro de uma faixa aceitável. Por outro lado, temperaturas baixas podem resultar em uma sensação de frio, também necessitando ajustes para garantir o conforto térmico.

A umidade, por sua vez, impacta a eficiência da evaporação do suor e, portanto, a sensação de conforto. Altos níveis de umidade reduzem a taxa de evaporação, o que pode levar a uma sensação de abafamento e aumento do PMV para valores negativos, indicando desconforto. Em contraste, baixos níveis de umidade podem aumentar a taxa de evaporação, potencialmente resultando em uma sensação de ressecamento e também influenciando o PMV.

O comportamento do PMV com as variações de temperatura e umidade descrito é nitidamente exemplificado pelas Figuras 2-1 à 2-3, onde 2-1 apresenta o mudança do índice PMV para as alterações ambientais; 2-2 uma visão da projeção no plano Temperatura x Umidade, que é reminiscentemente semelhante ao comportamento de 3; e umidade 2-3 explicita as medidas usuais e esperadas de umidade entre 50 e 60% e apresenta quais os limites superiores e inferiores de temperatura dada a umidade lida pelo módulo ambiental. Desse modo, identifica-se a respeito do controle a região que, caso o estado atual dos sensores se encontre, dá-se como aceitável ao que se refere ao conforto para algum usuário que nesse ambiente se encontre. Além de, caso o estado atual esteja fora, qual o caminho que o ar condicionado deve tomar na temperatura para que se alcance o conforto em PMV nulo.

Para manter o PMV em um estado ideal próximo de zero, um algoritmo de controle é implementado, ajustando automaticamente a temperatura do ambiente para garantir o conforto térmico. O algoritmo opera requisitando periodicamente os últimos dados de telemetria do ThingsBoard, especificamente os valores de temperatura e umidade. Com base nesses dados, o PMV é calculado.

Caso o PMV esteja dentro da faixa aceitável, geralmente entre -0,5 e 0,5, nenhuma intervenção é realizada. Entretanto, se o PMV ultrapassar esses limites, o algoritmo ajusta a temperatura do ar condicionado com o objetivo de aproximar o PMV de zero. Esse ajuste é realizado com base nos valores de temperatura e umidade obtidos na última telemetria, considerando a resposta térmica esperada do ambiente. O sistema, então, atualiza as configurações do ar condicionado e aguarda a próxima requisição de dados de telemetria para assegurar que o PMV permaneça dentro da faixa ideal.

Este processo cíclico de monitoramento e ajuste garante a manutenção do conforto térmico, com o algoritmo controlando a temperatura em função das variáveis ambientais em tempo real. O resultado de controle simples pode ser verificado nas Figuras 4-1 à 4-5, que mostram o histórico de telemetria antes e depois de executar um controle de manutenção do PMV, tanto dos dados de energia dos equipamentos quanto o efeito prático no par (temperatura, umidade).

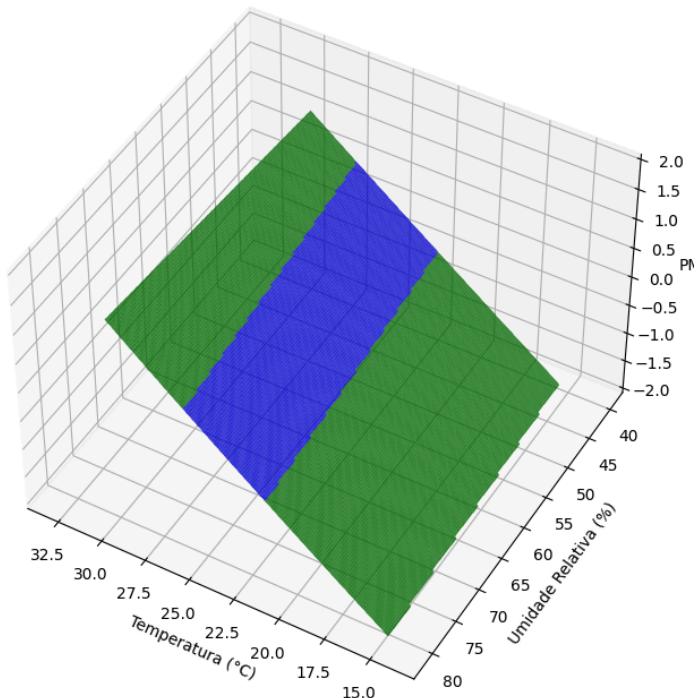


Figura 2-1. Gráfico do comportamento do índice PMV com a temperatura e umidade.

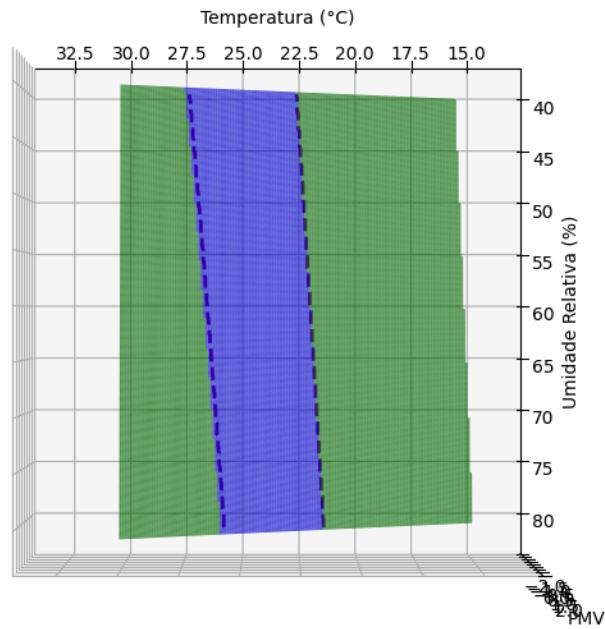


Figura 2-2. Vista do plano de umidade e temperatura.

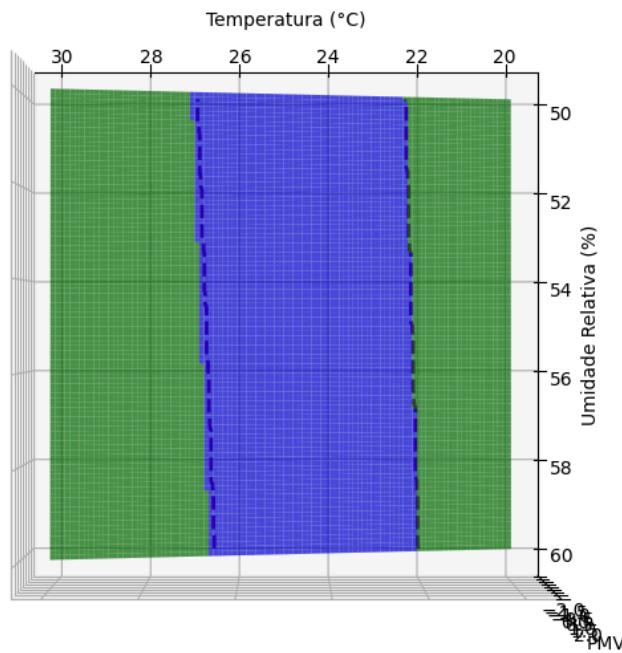


Figura 2-3. Região esperada para o controle do índice PMV.

5. Hipótese para controle com eficiência energética

Colocar uma estação na parte externa da sala monitorada do CTI (à céu aberto), mas ainda suficientemente próximo, traz o valor da diferença que cada sala monitorada tem com o ambiente externo, ou seja, como cada sala se regula a partir dessa referência. Caso não haja conexão com o WIFI, é possível usar uma comunicação de radiofrequência LoRa para o longo alcance, por exemplo.

A hipótese central do estudo surge da necessidade de entender como variáveis ambientais externas, como temperatura e umidade, influenciam o consumo energético de sistemas de climatização em ambientes fechados, como salas monitoradas. Considerando que as condições climáticas externas, especificamente a diferença de temperatura e umidade em relação ao ambiente interno, impactam diretamente o esforço necessário para manter o conforto térmico no interior, o estudo propõe uma função que correlaciona a potência do ar-condicionado com essas variações. Ao estabelecer essa relação, busca-se quantificar como diferentes faixas de temperatura e umidade externas afetam o consumo de energia em diferentes cenários, como dias frios ou quentes, e como isso pode ser representado matematicamente por meio de uma superfície discreta gerada a partir de dados reais coletados em campo.

O estudo se baseia na consideração que, para uma faixa de valores observador em ambiente comum (escritório), a potência do ar condicionado seja dada por uma função $p(\gamma, \delta)$, onde γ é a variação de temperatura da sala em relação à temperatura externa normalizada pela temperatura externa e δ , a variação de umidade da sala em relação à umidade externa normalizada pela umidade externa. $\gamma = \frac{\Delta T}{T_e}$ para ΔT a diferença de temperatura interna e externa e T_e a temperatura externa. $\delta = \frac{\Delta H}{H_e}$ para ΔH a diferença de umidade interna e externa e H_e a umidade externa. O que leva a pensar que diminuir/aumentar a temperatura em dias frios tem gasto energético por unidade de tempo diferente comparado com dias quentes. Por exemplo, se T_e for 27°C, para manter a temperatura da sala 21°C, espera-se que o trabalho realizado seja maior relativo ao caso de T_e 23°C.

O objetivo é definir um caminho $L / E(L) \leq E(L') \forall L \text{ e } L' \in C$. Onde $E(\cdot)$ é a função que representa o gasto energético para executar um caminho no plano C Umidade Relativa x Temperatura de bulbo seco pelo exemplo do gráfico [3] modificado da Thermal Comfort Tool - CBE (Center for the Built Environment) da Figura 3, cujas curvas representam os limites aceitáveis de temperatura e umidade dado os valores máximo e mínimo de PMV (Predicted Mean Vote) - [-0,5;+0,5] pela ASHRAE Standard 55-2023 - e os parâmetros fixados da formulação dessa estatística.

Na figura, L_a é o caminho dado pelo ar-condicionado presente no ambiente de estudo e a $\alpha_a \in [0, \pi]$, assumindo que este “roube” umidade do ambiente fechado. Para tornar mais prático e viável, pode-se considerar $\alpha_a \in \{0, \pi\}$, de modo que o ar-condicionado apenas aumente ou diminua a temperatura sem qualquer outra ação na

umidade. Para a consideração, em especial $\alpha_a \in \{0, \pi\}$, a aplicação se dá em ambiente fechado onde o único atuador é o ar-condicionado, como o controle simples com PMV discutido.

Para definição da superfície $p(\gamma, \delta)$, tem-se como método acumular em um banco de dados os valores dos módulos de energia conectados ao aparelho que se deseja conectar. Assim, atrela-se um valor lido T_e e T_i , gerando γ , e com um valor lido H_e e H_i , gerando δ , ao de potência adquirido, formando, então a superfície discretizada de $p(\gamma, \delta)$. Uma observação útil para se tirar dessa função, é a influência da umidade de 50 à 60% na potência, pois, caso seja desprezível, $p(\gamma, \delta)$ é dado apenas por γ - $p(\gamma, \delta) \approx p(\gamma)$ - o que simplifica de maneira considerável a análise de consumo.

A partir de $p(\gamma, \delta)$, a abordagem é empregar uma solução matemática/computacional para levar o ambiente de um estado a outro de temperatura e umidade considerando a minimização do gasto energético.

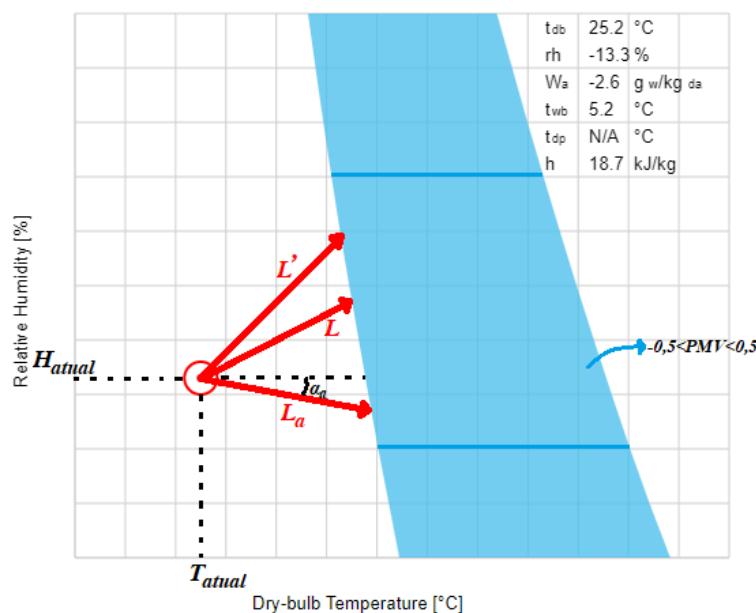


Figura 3. Gráfico modificado da CBE de conforto térmico.

7. Resultados

Com base no estudo desenvolvido, foram obtidos resultados expressivos no que tange à medição de potência e à identificação das componentes harmônicas nos sinais de tensão de equipamentos de controle ambiental. A implementação do módulo de energia, utilizando a ESP32 com ADCs e interrupção de Timer, permitiu medições em tempo real e análise contínua de parâmetros críticos, como distorção harmônica total (DHT), potência ativa e reativa, além do fator de potência. O uso do algoritmo FFT possibilitou uma decomposição detalhada dos sinais, proporcionando uma avaliação precisa das componentes de frequência e identificação de potenciais distorções. Com isso, foi possível otimizar o desempenho dos dispositivos monitorados, minimizando perdas e garantindo a eficiência energética.

Ademais, a integração com a plataforma ThingsBoard permitiu que os dados de consumo energético fossem transmitidos e gerenciados de forma remota, favorecendo a automatização do controle dos dispositivos e a implementação de estratégias de correção em tempo real. O uso de dois buffers na captura dos sinais assegura uma continuidade no fluxo de dados sem comprometer a qualidade das medições. A precisão alcançada, com uma taxa de amostragem de 25,6 kHz e a detecção de até a 42^a harmônica, assegurou uma análise robusta e detalhada do comportamento dos equipamentos, contribuindo tanto para o controle ambiental quanto para a redução de custos operacionais e desperdícios energéticos.

Uma demonstração do resultado de todo o sistema é o exemplo de controle cuja telemetria está na Figura 4-1 à 4-5, onde uma sala de laboratório se encontrava em aproximadamente 22°C de temperatura, como mostra a Figura 4-1 com dois sensores distintos, e o sinal de comando foi mandado com temperatura de aquecimento para 25°C. Pela Figura 4-4, identifica-se o ciclo de trabalho do ar-condicionado na potência instantânea em conjunto com a energia acumulada, valor que se deseja diminuir no caso de eficiência energética. Pelo gráfico, cada ciclo teve um consumo menor em relação ao anterior conforme se aproximou a temperatura da sala com a desejada.

O perfil indutivo do ar-condicionado passa a ser observado ao entrar em funcionamento pela Figura 4-3. Os componentes indutivos, como o motor, passam a ter uma energia reativa associada, o que torna parte da potência não sendo destinada totalmente para o aquecimento e tal relação pode ser analisada pelo fator de potência medido. A Figura 4-5 tanto mostra o comportamento RMS da tensão e corrente desse controle como o da frequência da rede que se manteve sutilmente abaixo de 60 Hz como um comportamento aceitável variando alguns centésimos. Como esperado, com o aumento da temperatura, o ar-condicionado resultou em diminuição da umidade.

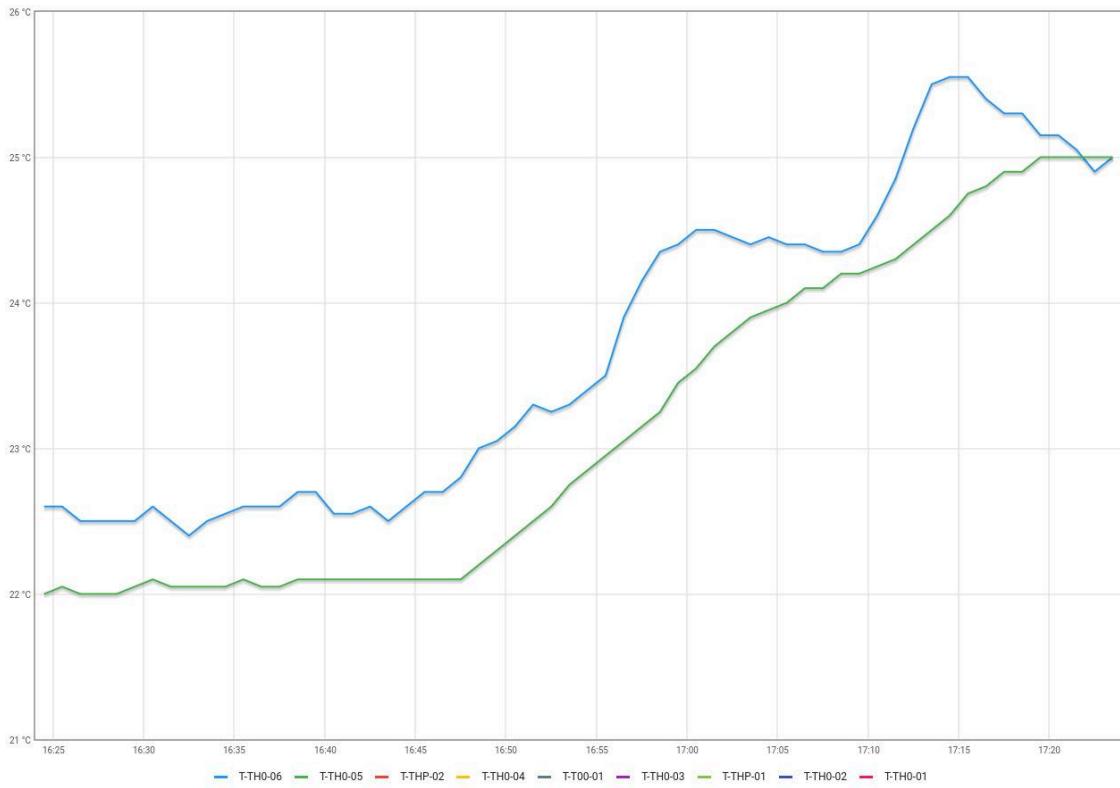


Figura 4-1. Telemetria de temperatura do exemplo de controle simples.

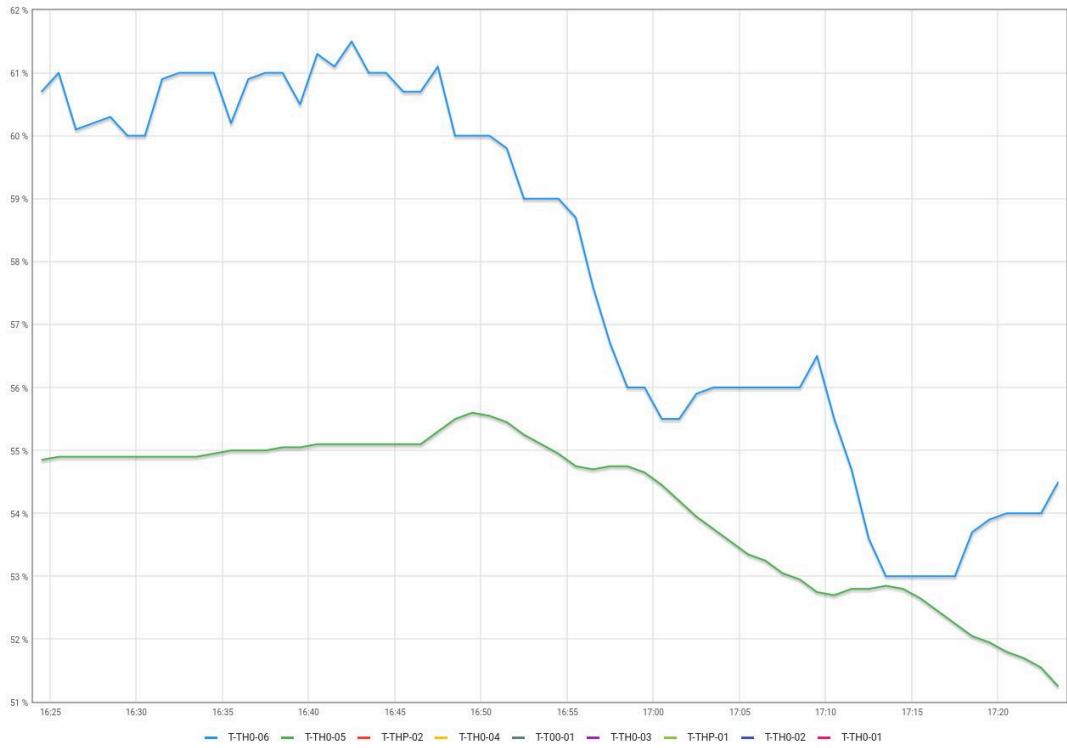


Figura 4-2. Telemetria de umidade do exemplo de controle simples.

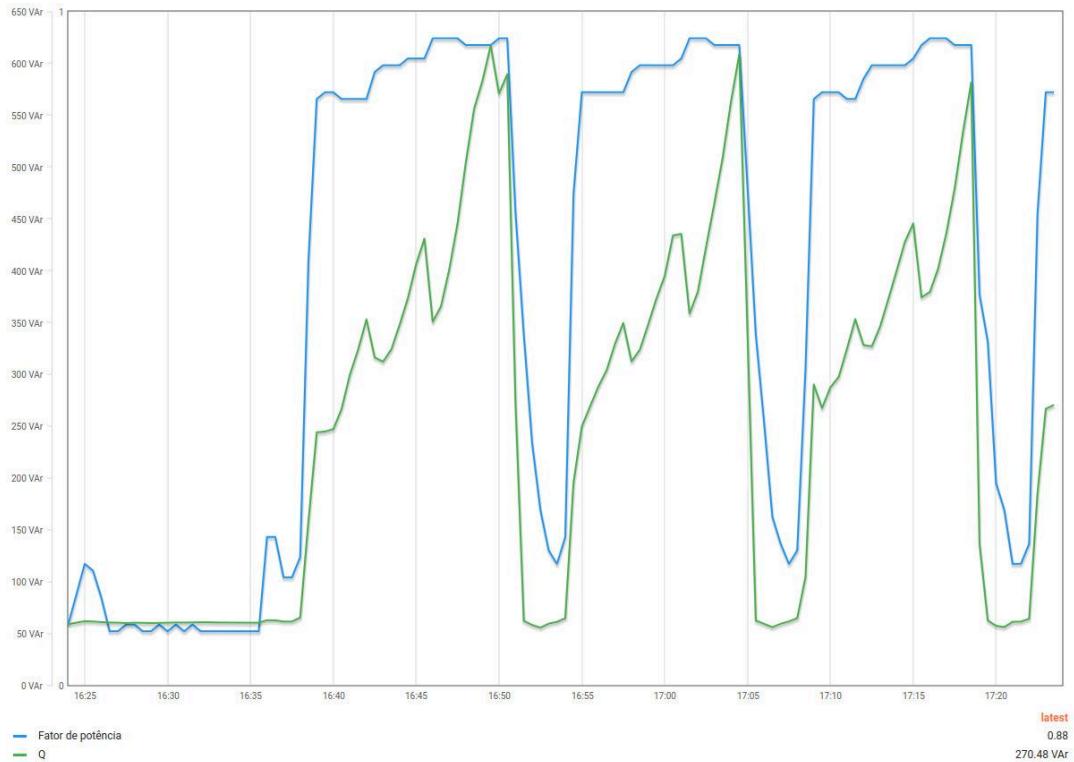


Figura 4-3. Telemetria de fator potência e potência reativa.

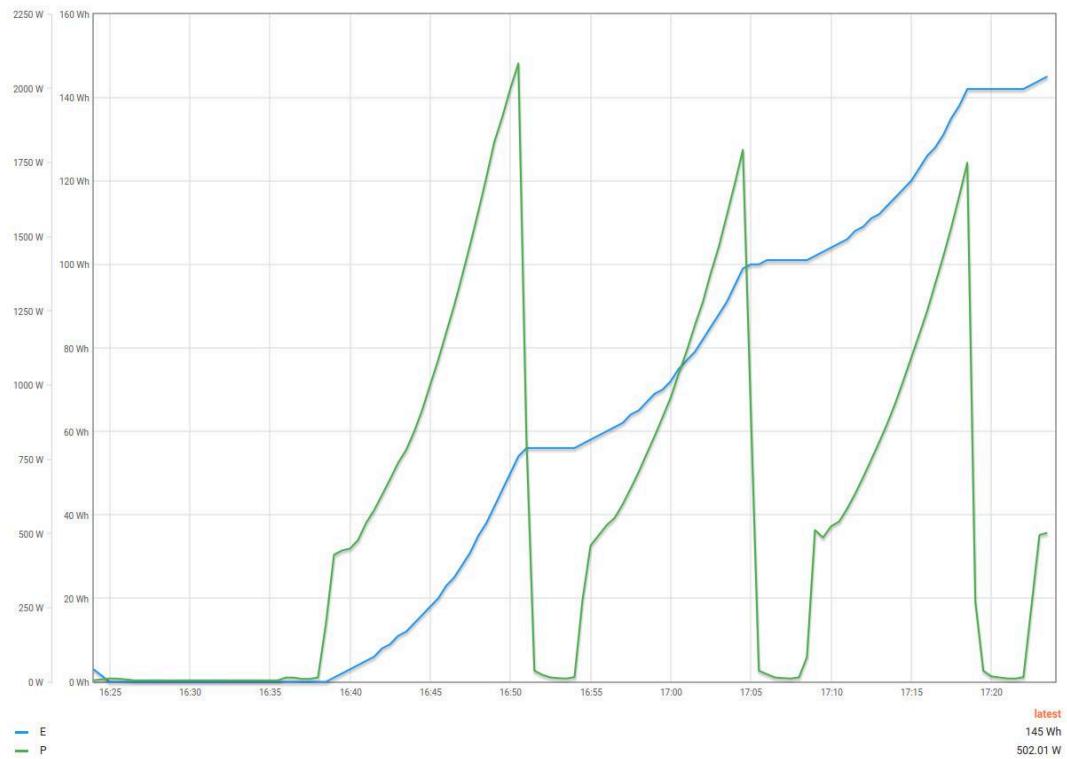


Figura 4-4. Telemetria de potência ativa e energia acumulada

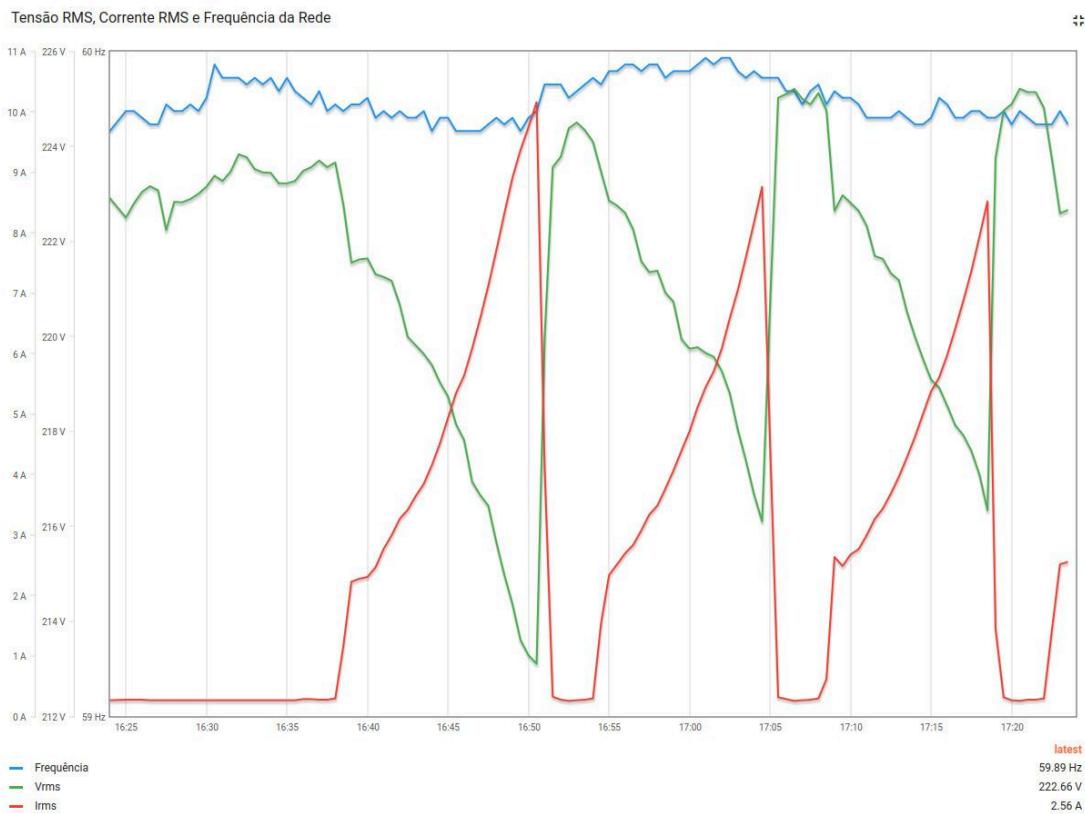


Figura 4-5. Telemetria de tensão e corrente RMS e frequência do sinal da rede.

8. Conclusão

O sistema desenvolvido permite a coleta contínua de dados de tensão e corrente de forma automatizada, proporcionando uma análise em tempo real do comportamento elétrico dos equipamentos monitorados. A partir desses dados, torna-se possível calcular grandezas como potência ativa, reativa e aparente, além do fator de potência e a distorção harmônica total (THD). Essa capacidade de monitoramento permite não apenas a identificação de padrões de consumo energético, mas também a detecção de anomalias relacionadas à qualidade da energia fornecida, como a presença de harmônicas que podem comprometer o desempenho dos equipamentos e a eficiência do sistema.

Além disso, o uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT) no processamento dos dados adquiridos pelo sistema oferece uma análise aprofundada das componentes de frequência presentes no sinal de tensão, facilitando a avaliação das distorções harmônicas. Com essa ferramenta, possibilita-se identificar com suficiente precisão quais frequências estão contribuindo para a degradação da qualidade da energia, permitindo ações corretivas eficazes. A integração com a plataforma ThingsBoard agrega valor ao sistema ao centralizar as informações coletadas, permitindo que o controle de equipamentos e a gestão do consumo energético sejam realizados de forma inteligente e automatizada.

No que se refere à controle, um algoritmo simples de ajuste da temperatura é eficaz para ambientes onde o conforto térmico é uma prioridade. A eficácia do controle depende da precisão dos sensores de temperatura e umidade, bem como da capacidade de resposta do sistema de climatização. O ajuste contínuo permite que o sistema mantenha o PMV próximo do ideal, mesmo em face de variações nas condições ambientais.

Testes realizados no ambiente CTI, utilizando valores de temperatura e umidade representativos, demonstram que o algoritmo consegue ajustar a temperatura do ar condicionado de maneira a manter o PMV dentro da faixa aceitável. A calibração do algoritmo pode exigir ajustes finos para considerar as particularidades do ambiente e as características da vestimenta típica, refletida pelo parâmetro *clo*.

Portanto, o controle simples descrito não só proporciona uma abordagem eficiente para manter o conforto térmico, mas também permite a adaptação dinâmica às mudanças nas condições ambientais, assegurando um ambiente de trabalho mais confortável e eficiente.

9. Agradecimentos

Quebrando o discurso em terceira pessoa, gostaria de agradecer ao CTI - Renato Archer pelo suporte técnico e infraestrutura que foram essenciais para a execução desta pesquisa. O CTI forneceu recursos e um ambiente propício para o avanço técnico e científico do projeto. Agradeço também ao meu orientador, Antonio Pestana, pela orientação valiosa e pelo apoio constante. Estas ajudas foram importantes para superar desafios técnicos e garantir um padrão de qualidade científica. Esta pesquisa contribui para o desenvolvimento de práticas avançadas na área de automação e sistemas embarcados, oferecendo compreensões significativas tanto para a indústria quanto para a academia.

10. Referências

- [1] RIBEIRO, Rafael. Aplicação do RTOS no projeto Sistema Cyber Físico de Eficiência Energética e Conforto Ambiental. XXIV Jornada de Iniciação Científica do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer - JICC'2022, [s. l.], 2022.
- [2] RIBEIRO, Rafael. Princípio de aplicação de índice de conforto térmico no sistema ciber físico de eficiência energética e condicionamento ambiental. XXV Jornada de Iniciação Científica do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer - JICC'2023, [s. l.], 2023.
- [3] CBE Thermal Comfort Tool: ASHRAE-55. [S. l.], 2023. Disponível em: <<https://comfort.cbe.berkeley.edu/>>. Acesso em: 14 ago. 2024.