

Princípio de aplicação de índice de conforto térmico no sistema ciber físico de eficiência energética e condicionamento ambiental

Rafael Ifanger Ribeiro¹, Antonio Pestana Neto¹

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

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

Abstract. *Environmental comfort as a subject of study presents several challenges, both in the acquisition of environmental data through sensors and in their subsequent analysis. This analysis requires a reliable reference to qualify the state of the enclosed environment in terms of estimating the thermal sensations experienced by the users of the space. In light of these needs, the project's continuity aims to apply thermal comfort indices - particularly the PMV (Predicted Mean Vote) - to the data obtained by the cyber-physical system - created using Espressif microcontrollers (ESP32 and ESP8266) using FreeRTOS - to assess the analysis environment and develop control logic. This article presents the key concepts of the addressed topic (thermal comfort) and how, using the created devices, it is possible to establish diagnostic and control logic to approach the ideal state of comfort satisfaction.*

Resumo. *O conforto ambiental como objeto de estudo oferece diversos obstáculos, tanto na aquisição dos dados ambientais por sensores quanto, em seguida, sua análise. Essa análise por sua vez requer uma referência confiável para qualificar o estado do ambiente fechado, no que se refere à estimativa das sensações térmicas experimentadas pelos usuários do local. Em vista dessas necessidades, a continuidade do projeto visa a aplicação de índices de conforto térmico - em especial o PMV (Predicted Mean Vote) - nos dados obtidos pelo sistema ciber físico - criado com os microcontroladores da Espressif (ESP32 e ESP8266) utilizando FreeRTOS - para qualificar o ambiente de análise e desenvolver lógicas de controle. Esse artigo apresenta as concepções principais do tema abordado (conforto térmico) e como, a partir dos dispositivos criados, pode-se criar uma lógica de diagnóstico e controle para se aproximar do estado ideal de satisfação deste conforto.*

1. Introdução

A relação do ser humano com o ambiente tem seu começo desde o período paleolítico, em que o desenvolvimento de técnicas - primitivas - proporcionou maiores chances de sobrevivência ao utilizar de artifícios para contrapor à natureza, desde o fabricacao de roupas até o domínio do fogo, que entre outras vantagens, alterava artificialmente as condições ambientais experimentadas.

Do início até a atualidade, desenvolveu-se, em consonância com métodos de controle dessas variáveis locais, a capacidade de poder medi-las. A inferência dos valores de grandezas físicas se torna um diferencial importante ao passo que, sabendo um estado que se deseja alcançar, seja a temperatura, por exemplo, pode-se aplicar

dispositivos de leitura dentro de um sistema para que se consiga aproximar do estado desejado, como um sistema ar condicionado e temperatura.

Esse artigo relata o estudo do controle de um sistema ciber físico utilizando o sistema operacional de tempo real FreeRTOS e um índice de conforto térmico como referência para que, ambos em consonância, possa se modificar o estado das variáveis de ambiente. Alterar uma variável, dessa forma, é viável - pelas suposições admitidas - tendo seu valor lido pelo sensores, no caso em tempo discreto. A estrutura do algoritmo para leitura periódica com RTOS (*Real-Time Operating System*) dos sensores foi tópico discutido no artigo anterior [1].

No presente documento, com o funcionamento dos módulos de leitura validados, para que haja um controle independente da ação humana a princípio, faz-se necessário o cálculo de um índice que retorne numericamente (de preferência) uma estimativa do conforto térmico dadas as condições medidas.

2. Índices de conforto térmico

Para análise do conforto térmico, faz-se necessário métodos que descrevam quantitativamente, a partir de um ou mais parâmetros físicos do ambiente, o estado de conforto de uma pessoa de modo a servir como referência. A confiabilidade nos valores lidos pelos sensores se torna importante ao passo que os erros na leitura são carregados no cálculo desses índices, resultando em uma fuga do controle esperado para os equipamentos que corrigem as variáveis ambientais.

2.1 PMV

Entre os índices, pode-se citar o PMV (*Predicted Mean Vote*), que engloba tanto variáveis do ambiente quanto de características físicas do indivíduo, o que ajuda a melhor compreender os fatores que influenciam o conforto e estimar de maneira mais precisa - em relação à diversos outros índices que levam em conta menos dados - o bem estar da pessoa em determinado espaço.

Dentro deste cálculo estão a velocidade do ar, que influencia na perda de calor do corpo; a taxa metabólica, que é uma resposta às reações bioquímicas do corpo do organismo de quebra de estruturas para manter as células em funcionamento. Parte dessa energia gerada é transformada em calor usado para manter a temperatura do organismo constante. Sendo assim, a taxa metabólica mede a quantidade de energia gasta em um período de tempo; temperatura radiante; temperatura do ar; isolamento térmico da roupa; e umidade relativa do ar.

Apenas por identificar os fatores envolvidos na equação do PMV (Equação I), compreende-se a complexidade da análise do conforto térmico de um indivíduo ou grupo. um dos obstáculos na sua implementação é a obtenção das variáveis, como por exemplo, a taxa metabólica, cuja estimativa depende do conhecimento das atividades do indivíduo. Se este estiver parado ou executando uma tarefa simples sentado em um escritório, estima-se uma taxa de 1 met (unidade de medida). A velocidade do vento é um fator que varia da posição do ambiente analisado e a medição pode não ser viável.

Além destas questões, há a propagação do erro, tanto das estimativas quanto dos valores medidos pelos sensores, como a temperatura e a umidade. Desse modo, o índice serve de referência considerando um ambiente próximo do ideal e assumindo que alterar os valores de temperatura e umidade para levar o índice à 0 é o suficiente para obter um ambiente confortável.

A equação foi desenvolvida a partir de modelos matemáticos em 1970 por Fanger junto com experimentos com grupos de pessoas que relataram seu nível de conforto a diferentes exposições de variáveis como temperatura, umidade e outras. Estes modelos matemáticos visavam relacionar essas variáveis do ambiente e características individuais com a sensação térmica. O 0 de sua escala representa o máximo de conforto estimado para um grupo aleatório de pessoas. Ao passo que a o índice fica mais positivo, indica-se maior desconforto em relação à sensação de calor e do contrário, de frio. Outros índices como humidex e NET (*Normal Effective Temperature*), utilizado pela meteorologia canadense para indicar o efeito da umidade na temperatura do ar, e por conseguinte, relacionar essas duas medidas para melhor descrever o conforto térmico. Estes também se mostram índices úteis, pois, como na forma de uso do PMV no projeto, os parâmetros que variam são a temperatura e a umidade.

No entanto, o emprego do PMV permanece descrevendo melhor o conforto em vista que pode-se variar os outros parâmetros tidos como fixos, como por exemplo, o isolamento térmico da roupa, que pode ser modificado conforme a época do ano ou, mais precisamente, de acordo com dados meteorológicos da temperatura informados pela Cepagri (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura) e pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). O problema, portanto, pode ser melhor modelado com o PMV, além deste trazer uma escala que descreve diretamente o conforto térmico como resultado de sua equação. Sua equação [2] é dada por:

Equação I

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3}[5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - t_r^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\}$$

Onde M representa a taxa metabólica; W o trabalho realizado; P_a a pressão de vapor de água; t_a a temperatura do ar; f_{cl} o fator da área de superfície da roupa; h_c o coeficiente de transferência de calor, que depende da diferença entre t_{cl} e t_a e da velocidade do vento; t_r a temperatura radiante média; e t_{cl} a temperatura da superfície da roupa.

O resultado obtido com o PMV pode ser usado para estimar a porcentagem de um grupo de pessoas que, dado o valor do índice de conforto térmico, está desconfortável com as condições do ambiente. O índice que calcula essa porcentagem é o PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), cuja equação [3] é :

Equação II

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)}$$

Para o caso estabelecido pela norma ASHRAE 55 - PMV variando em sua escala de -0,5 à 0,5 - menos de um quarto das pessoas se encontram desconfortáveis de acordo com o índice PPD.

Validar essa aplicação em seu funcionamento rotineiro também faz parte do escopo do projeto, bem como questionar a exatidão do índice.

Dos fatores, portanto, como explicado no artigo anterior [1], são lidos a temperatura e a umidade relativa do ar. Os outros dados são fixados em valores que se esperam descrever de maneira generalizada a situação típica encontrada em um ambiente fechado com escritório ou laboratório.

3. Controle de malha

Um controle de malha consiste em, dentro de um processo, estabelecer um valor de algum componente deste, ao qual será usado para regular um equipamento com objetivo de se aproximar do número computado, considerando o comportamento esperado do sistema. Esse conceito é amplamente visto em processos industriais, como um tanque de resfriamento numa indústria alimentícia, por exemplo, em que, sabendo a faixa de temperatura aceitável do fluido no tanque, controla-se válvulas para manter a variável fora de valores indesejáveis.

Conforme discutido, por uma questão de viabilidade, as variáveis medidas são temperatura e umidade, em vista que são grandezas com diversos sensores disponíveis no mercado e de baixo custo. Com estes dados adquiridos, o PMV é calculado como a saída do sistema.

No projeto, entende-se o controle do ar condicionado como a atuação na malha. Foram desenvolvidos os módulos de leitura com os microcontroladores esp32 e esp8266 para aquisição dos valores ambientais e do gasto energético dos equipamentos. Ao longo de 2022 e 2023 foram armazenados os dados de leitura de algumas implantações de módulos. Adquirir e armazenar esses dados permitiu um caráter analítico das informações, que, ao serem recebidas via protocolo MQTT do microcontrolador ao broker do Node-Red, passam pela chamada de um script python. Esse arquivo .py com a recém leitura calcula o índice PMV com a biblioteca *pythermalcomfort* e, em seguida, todas as informações são armazenadas no banco de dados, como mostra o fluxo da Figura 1.

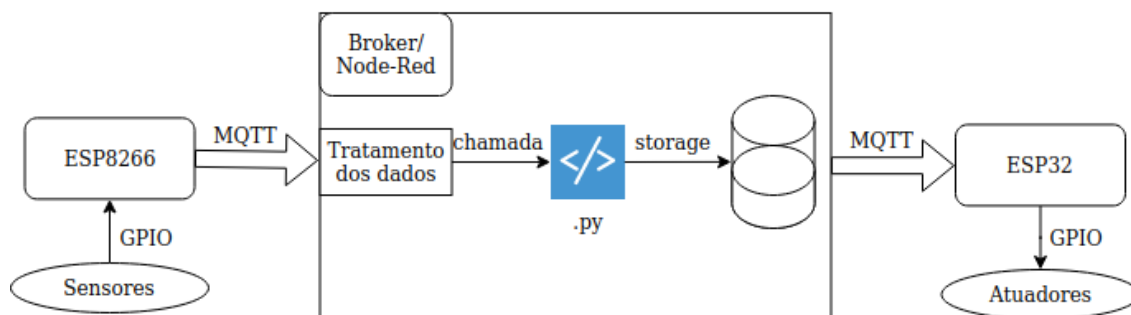


Figura 1. Diagrama de interconexão dos dispositivos do projeto.

A análise dos dados pode ser exemplificada pelo conjunto de gráficos da Figura 2 gerados com dados do dia 03/03/2023. Os sinais de temperatura e umidade nomeados por *Room* e *Outdoor* representam, respectivamente, as medições feitas pelos módulos ambientais e os dados fornecidos sobre as condições ambientais externas pela CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura) e pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Com a referência dessas instituições, estima-se o comportamento da temperatura interna da sala.

O sinal *Air cooling device real power consumption*, como o próprio nome sugere, são os valores discretos lidos pelos módulos de energia [1], os quais medem a corrente e a tensão para calcular, entre outros dados, a potência ativa do ar condicionado, que é amostrado no gráfico.

Os valores do PMV refletem o estado apresentado de temperatura e umidade e seu comportamento, estabilizado numa faixa aceitável de conforto térmico próxima da ideal quando o equipamento de refrigeração é ligado.

O PPD auxilia identificar com mais facilidade o quanto as condições estão fora de satisfação e os sinais do último gráfico com outros exemplos de índices de conforto térmico, estes que apenas usam a temperatura e umidade, obtiveram comportamento similar à função PMV, o que era esperado, mas como também discutido, apenas o retorno de uma temperatura ainda oferece muita subjetividade e a necessidade de aplicar uma ferramenta adicional de análise para que seja quantificado o conforto térmico.

Uma ferramenta útil usada no processo de verificação dos resultados obtidos nos cálculos foi a *CBE Thermal Comfort Tool* [4], em que o usuário entra com parâmetros ambientais para simular o resultado do índice e analisar, em um gráfico de temperatura por umidade (com todos os outros parâmetros fixados), a zona permitida pela a ASHRAE-55.

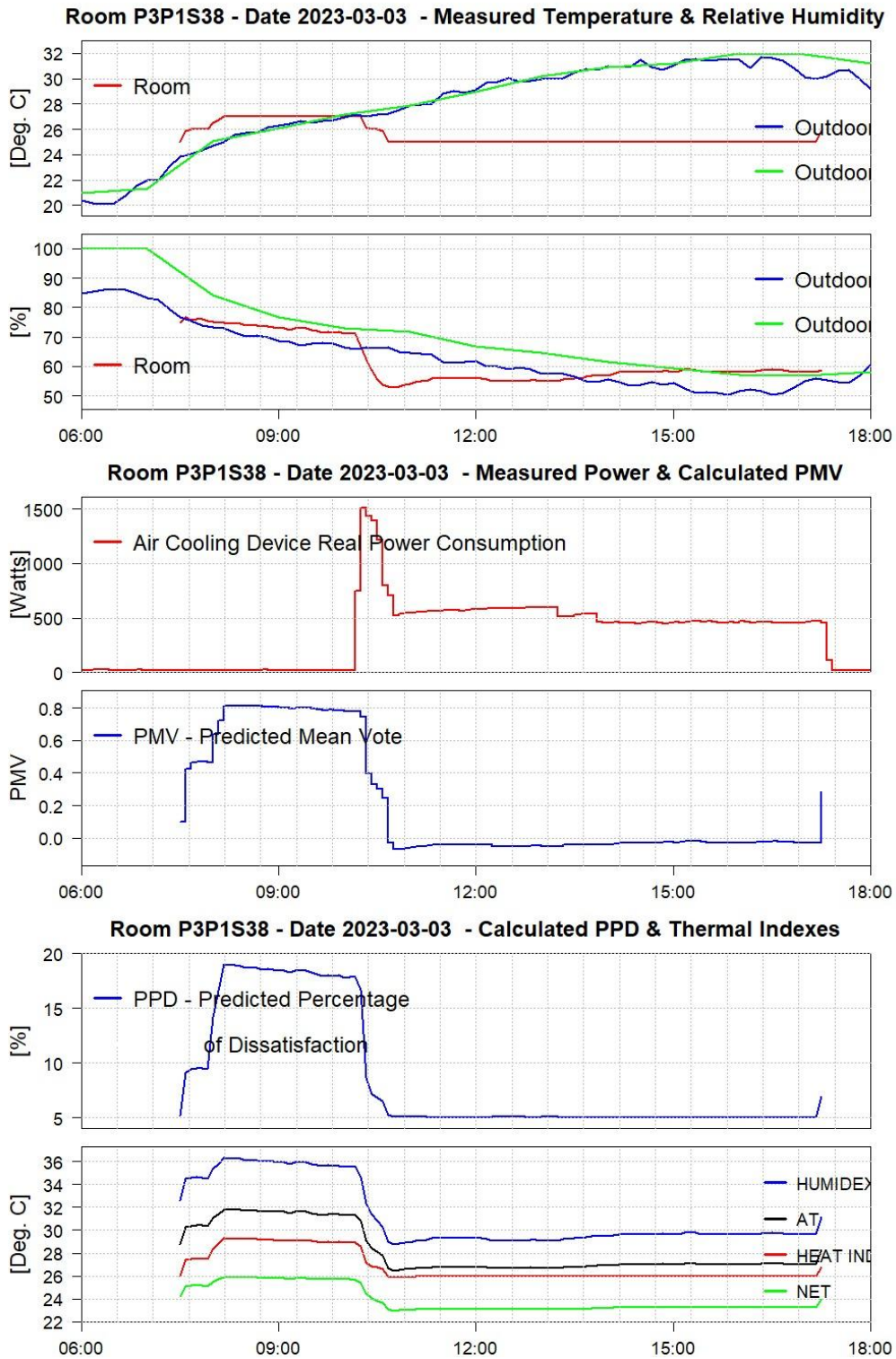


Figura 2. Medidas de umidade e temperatura associadas aos índices de conforto térmico e gasto energético do dia 01/03/2023.

A Figura apresenta o resultado dos dados armazenados. No primeiro e segundo gráfico observam-se três valores de temperatura e umidade, respectivamente. O sinal em vermelho representa os valores lidos pelos módulos ambientais

Com os dados brutos tratados e a informação necessária em posse, esta sendo o valor do PMV, resta fechar a malha com o controle de um atuador na variável desejada. Os equipamentos disponíveis e de acesso comum para o tipo de ambiente que o projeto procura generalizar são o ar condicionado e umidificador, uma vez que essas variáveis impactam diretamente o conforto térmico com grande peso e diferentes índices que expressam a condição térmica do ambiente utilizam o par no cálculo.

O bolsista e membro do projeto Sistema Ciber Físico de Eficiência Energética e Conforto Ambiental Ranulfo Acir desenvolveu os módulos atuadores responsáveis pelo envio do comando aos atuadores usando infravermelho. Com o valor do PMV desejado, encontra-se o valor da temperatura e, a partir desse valor, o comando do atuador seta a temperatura que torna o ambiente aceitável na norma ASHRAE 55 [4], fechando a malha de controle, cujo diagrama da Figura 3 representa em blocos o controle do sistema em questão.

3.1 PID

Uma das maneiras de controle vastamente explorado em controle é o controle PID (Proporcional Integral Derivativo). O controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) que combina três componentes para calcular o sinal de controle, o proporcional (P), componente proporcional ao erro no instante t , sendo o erro a diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor atual (medido) do sistema controlado. O termo proporcional é calculado multiplicando o erro pelo ganho proporcional (K_p). A saída proporcional age para reduzir o erro atual; o integral (I), considera a acumulação dos erros ao longo do tempo, que calcula a integral do erro multiplicada pelo ganho integral (K_i). Isso ajuda a eliminar erros de regime permanente, como os desvios constantes do setpoint; o derivativo (D), relacionado à taxa de variação do erro, que calcula a derivada do erro multiplicada pelo ganho derivativo (K_d). O termo derivativo ajuda a reduzir oscilações e a resposta transitória do sistema.

A equação geral de um controlador PID é expressa da seguinte forma:

Equação II

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Onde $u(t)$ é o sinal de controle a ser aplicado ao sistema. K_p , K_i e K_d são os ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente, e $e(t)$ é o erro no momento t , definido como a diferença entre o setpoint e a saída medida.

$\int_0^t e(\tau) d\tau$ representa a integral do erro ao longo do tempo. $\frac{de(t)}{dt}$ é a derivada do erro em relação ao tempo. Ajusta-se os três ganhos (K_p , K_i , K_d) para alcançar um desempenho desejado no sistema de controle, como uma resposta rápida sem oscilações excessivas ou erro de regime permanente. A escolha dos valores dos ganhos é uma parte crítica do projeto de controle e pode variar dependendo da aplicação específica.

Para tempo discreto, tendo em vista que a aquisição dos dados periodicamente em intervalo T :

Equação III

$$u[n] = k_p e[n] + K_i I[n] + K_d \{e[n] - e[n - 1]\}/T$$

Onde $I[n] = \{e[n] + e[n - 1]\}/2 \cdot T + I[n - 1]$

4. Dispositivo de simulação da malha fechada com PMV e PID

Apenas a título de exercício e estudo paralelo, foi realizada uma simplificação prática, o sistema apresentado nesse artigo foi resumido a um caixa isolada por uma camada metálica interna e de isopor externa. Dentro da caixa foram dispostos 4 sensores de temperatura, dentre eles três analógicos (LM35) e um digital (DHT22) que possui também um sensor de umidade embutido. Para executar o aquecimento e resfriamento foram utilizados dois pares de cooler e célula Peltier.

A célula [5] usa o efeito Peltier descoberto em 1834, que consiste em fornecer corrente a um circuito com dois diferentes semicondutores para gerar diferentes temperaturas na junção do componente. Este efeito é contrário ao efeito Seebeck comumente utilizado em sensores de temperatura, onde os semicondutores expostos a diferentes temperaturas geram uma diferença de potencial na saída.

O aquecimento ou resfriamento é ponderado pelo acionamento independente dos cooler conectados às células por PWM (*Pulse Width Modulation*), controle digital por largura de pulso. Para cada par cooler-célula, um lado da célula Peltier é fixado ao dissipador que a conecta ao cooler.

Por exemplo, se a temperatura é menor do que a esperada, o cooler do par cujo a face da célula que aquece está fixada ao dissipador é acionado. Conforme a diferença de temperatura diminui, também decresce a velocidade do cooler diminuindo o *duty cycle* do PWM, variando de 0 à 100%.

O intuito do sistema é mostrar uma malha fechada de controle utilizando um índice como referência que engloba uma variável do sistema e esta controlada pelo atuador. O diagrama da Figura 3 representa em blocos especificamente a malha criada. O dispositivo foi desenvolvido com o microcontrolador ESP32 e o sistema operacional de tempo real FreeRTOS.

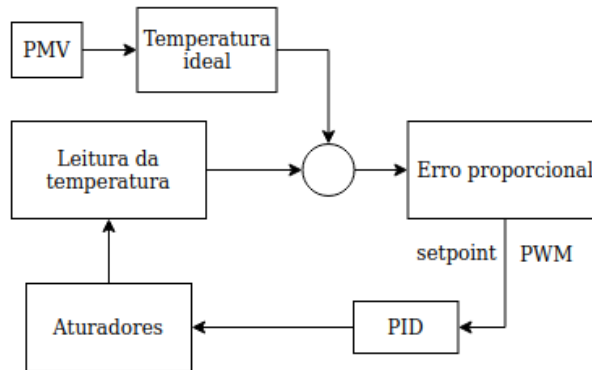


Figura 3. Diagrama de blocos da malha de controle da simulação.

A lógica inicializa obtendo os valores iniciais de temperatura com os 4 sensores, destes é feito uma média ($t_{média}$). Com o PMV, sabe-se a faixa de temperatura aceitável para o conforto respeitando a norma ASHRAE 55, que define aceitável a faixa de -0.5 à 0.5 do índice. O controle é feito ao sair dessa faixa e, portanto, ao passar a faixa de temperatura, calcula-se o erro da temperatura subtraindo $t_{média}$ do extremo mais próximo desta faixa. O set point do PWM dos coolers foi definido proporcionalmente (de modo linear) ao erro da temperatura. Desse modo, após a aquisição da média, calcula-se o set point do PWM, o qual é controlado por PID em tempo discreto.

Quando estabilizada a temperatura em um tempo $T_{estável}$ dentro da faixa da ASHRAE, a correção do set point para de ocorrer até que a temperatura saia do aceitável. Esse processo ocorre em loop indefinidamente. A Figura 4 apresenta uma representação do controle do PWM ao longo do tempo dado diferentes erros de temperatura, uma vez que os dois estão associados - variável e controle. No eixo da abscissa o tempo e da ordenada o valor do PWM, que varia de 0 a 100%.



Figura 4. Controle PID do PWM do cooler

5. Resultados

A quantificação do conforto térmico por meio de índices, em especial o PMV (Predicted Mean Vote), foi validada no que se refere à sua aplicação para controle do conforto em ambientes fechados. Os módulos instalados em algumas salas do CTI - Renato Archer acumularam dados - armazenados em um banco - ao longo do ano suficiente para observar graficamente amostras em um período de 12 horas que contemple por completo a carga horária de trabalho - período de interesse para análise de conforto térmico.

Inicialmente, em parte das salas, foram instalados apenas os módulos com sensores ambientais. Com os valores obtidos era possível descrever a variação dos parâmetros medidos no decorrer do dia, identificando o comportamento esperado para temperatura ambiente ao considerar a influência da temperatura externa.

O PMV acompanhou de maneira satisfatória a variação de temperatura para asunções feitas (valores fixados no cálculo), como apresenta a Figura 5, outro fragmento de análise similar ao realizado na Figura 2, que demonstra mesma relação de comportamento entre as grandezas amostradas (temperatura, conforto e consumo energético) e melhor descreve os resultados do projeto.

Observou-se nesse tipo de análise, como a realizada do dia 01/03/2023 em uma das instalações, que - de modo geral - a taxa de variação da temperatura dentro da sala possui mesmo sinal (ou é zero) da taxa de variação da temperatura do ambiente externo enquanto este é o único que influencia - consideravelmente - a temperatura interna.

Por conseguinte, até que o ar condicionado seja ligado, o ambiente interno acompanha o externo (representado pelos dados da CEPAGRI e do INMET), mas com valores estáveis, como é visto no gráfico (sinal Room), em que a temperatura permanece na maior parte do tempo num limiar constante com eventuais crescimentos no decorrer do dia até o acionamento do ar condicionado.

É nítido o momento em que o ar condicionado foi ligado devido sua potência (lida por um dos módulos de energia) que consta 0 e em um instante próximo das 15 horas ocorre um pico e permanece constante diferente de 0. Outro detalhe notado é a acentuada perda de umidade após o início do funcionamento do equipamento, aspecto esperado, uma vez que o tipo de ar condicionado utilizado retém a umidade do ar que entra no equipamento.

Dentro da faixa de tempo que ocorre o pico de potência do ar condicionado, ambos os gráficos do índice PMV e da temperatura interna da sala refletem a influência esperada do equipamento. Dessa maneira, aciona-se o equipamento para um offset abaixo da temperatura da sala e seu impacto se dá na estabilização do PMV próximo (quase constante 0) do estado ideal.

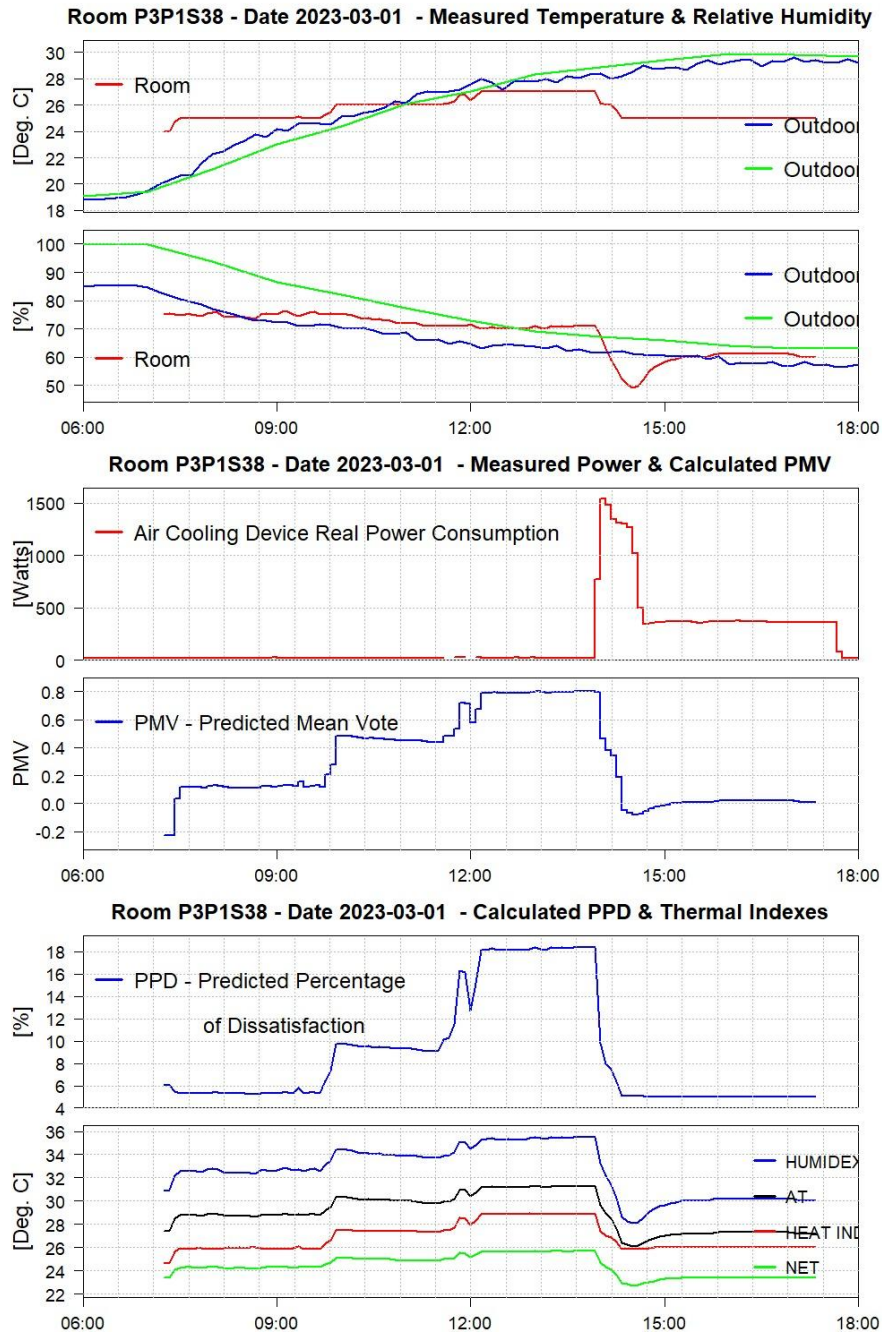


Figura 5. Medidas de umidade e temperatura associadas aos índices de conforto térmico e gasto energético do dia 01/03/2023.

6. Conclusão

O conforto ambiental, além de requerer uma grande massa de dados para que se retire amostras para análise, depende dos métodos de avaliação qualitativa e quantitativa desses valores armazenados. A escolha no projeto, como apresentado nos resultados,

portanto, se adequou ao objetivo proposto, uma vez que supre quantitativamente a necessidade de parametrizar o conforto ambiental.

Tal parametrização traz em sua escala uma qualificação do estado de conforto, esta que pode ser usada para estimar o percentual de insatisfação de um grupo de pessoas dado o cálculo do PMV. Por conseguinte, o uso do índice explora diversos requisitos de um sistema ciber físico de conforto ambiental, tendo em vista que, conforme citado, a partir de uma base de dados - tema do desenvolvimento anterior no projeto [1] - estima diretamente a sensação de uma pessoa dentro de um ambiente fechado.

Com este resultado, múltiplas ações podem ser tomadas conseqüentemente, entre elas: estabelecer o erro entre os parâmetros envolvidos, como a temperatura lida e a ideal por exemplo; tratar o banco para enriquecer a análise de dados; definir faixas aceitáveis de temperatura; e atuar nos aparelhos na sala com mais precisão.

Dentro da ciência de dados, a aplicação do índice torna as inferências mais complexas, haja visto o maior número de variáveis que qualificam o ambiente, como o simples exemplo apresentado do gasto energético do ar condicionado atrelado ao PMV. Melhores inferências permitem controles com menor erro e, desse modo, mais conforto ao usuário. No escopo do projeto, a simulação demonstrou um meio de controle do ambiente e principalmente que, dado um offset de estado aceitável com base em um índice - temperatura no caso - é factível uma malha fechada de controle.

Observou-se também que a flexibilidade deste índice possibilita estimar o conforto para qualquer situação que se queira tendo especificado as variáveis de sua equação. Ser flexível contribui para as interpretações dos motivos do estado calculado em determinado instante, e quais variações, além da temperatura, podem ser aplicadas para alcançar o estado ideal.

7. Agradecimentos

Novamente com o suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI); a orientação no projeto de Antonio Pestana Neto; a excepcional colaboração e o desenvolvimento do bolsista Ranulfo Acir de Oliveira Resende; e as discussões conceituais e práticas com Alex de Moura Lemes Ribeiro e Willian Lemes Ribeiro, foi possível o vasto aprendizado de técnicas e o aprimoramento pessoal dentro do referido ano de pesquisa.

8. Referências

- [1] 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'2022, [s. l.], 2022.

- [2] Navvab, Mojtaba & Varodompun, Jatuwat. (2006). Pedestrians' Comfort Index in Urban Settlements using CFD Analysis.
- [3] SILVA, Manuel. SPREADSHEETS FOR THE CALCULATION OF THERMAL COMFORT INDICES: PMV AND PPD. [S. l.], ? 20---. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Gameiro-Da-Silva/publication/255971260_SPREADSHEETS_FOR_THE_CALCULATION_OF_THERMAL_COMFORT_INDICES_PMV_AND_PPD/links/02e7e5212c2240b7c300000/SPREADSHEETS-FOR-THE-CALCULATION-OF-THERMAL-COMFORT-INDICES-PMV-AND-PPD.pdf?bitstream/123456789/34119/4/Utiliza%c3%a7%c3%a3oEfeitoPeltier.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- [4] CBE Thermal Comfort Tool: ASHRAE-55. [S. l.], ? 2023. Disponível em: <<https://comfort.cbe.berkeley.edu/>>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- [5] SILVA, Thaynara. Utilização do efeito Peltier para resfriamento de ambientes. [S. l.], 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34119/4/Utiliza%c3%a7%c3%a3oEfeitoPeltier.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2023.