

Identificação de Modelo Térmico e Otimização Bioinspirada Aplicada à Sintonia de Controladores PI: Uma Abordagem Visando Conforto Térmico dos Ocupantes

Pablo Pereira Almeida* Roberto Zanetti Freire*
Gilberto Reynoso-Meza*

* *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS. Escola Politécnica. Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Rua Imaculada Conceição, 1155, código postal 80215-901, Curitiba, PR, Brasil (e-mail: paperal21@gmail.com, roberto.freire@pucpr.br, g.reynosomeza@pucpr.br).*

Abstract: The vast majority of commercial air conditioning systems do not consider the issue of occupant's thermal comfort, and due to the different climatic conditions existing in Brazil, and the concern regarding the energy efficiency of the building sector, it becomes evident the need for distinct control mechanisms to improve thermal comfort conditions. This work is focused on the optimization of Proportional-Integral (PI) controllers focusing on thermal comfort. At first, a system identification procedure, based on batch least squares, is presented to reproduce the thermal behavior of an indoor environment. The model was validated considering a dataset obtained from a whole-building and energy simulation software. In the sequence, three distinct metaheuristic optimization methods: Differential Evolution, Particle Swarm Optimization, and Genetic Algorithm were adapted for PI tuning focusing on thermal comfort. Results showed the comparison among all tuning strategies indicated that similar results were obtained regarding the optimization methods in terms of thermal comfort.

Resumo: A grande maioria dos sistemas comerciais de condicionamento de ar não consideram a questão do conforto térmico dos ocupantes e, devido às diferentes condições climáticas existentes no Brasil e à preocupação com a eficiência energética do setor de construção, torna-se evidente a necessidade de mecanismos distintos de controle para melhorar as condições de conforto térmico. Este trabalho está focado na otimização de controladores Proporcional-Integral (PI) com foco no conforto térmico. Inicialmente, é apresentado um procedimento de identificação do sistema, com base no método dos mínimos quadrados, para reproduzir o comportamento térmico de um ambiente interno. O modelo foi validado considerando um conjunto de dados obtido a partir de um software completo de construção e simulação de energia. Na sequência, três métodos distintos de otimização meta-heurística: Evolução Diferencial, Otimização de Enxame de Partículas e Algoritmo Genético foram adaptados para o ajuste do PI, com foco no conforto térmico. Os resultados mostraram que a comparação entre todas as estratégias de ajuste indicou que resultados semelhantes foram obtidos com relação aos métodos de otimização em termos de conforto térmico.

Keywords: Thermal comfort; PMV; Optimization; PI control; Identification; Climatization systems.

Palavras-chaves: Conforto Térmico; PMV; Otimização; Controle PI; Identificação; Sistemas de Climatização.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte dos sistemas comerciais de condicionamento de ar não levam em conta a questão de conforto térmico dos ocupantes e, devido às adversidades climáticas existentes no Brasil, torna-se evidente a necessidade de pesquisa e desenvolvimento de mecanismos de controle ambiental a fim de minimizar o consumo de energia, sem prejudicar

questões de conforto térmico (Lamberts et al., 2014). Neste contexto, a cidade de Belém no estado do Pará, possui um clima tropical chuvoso, tipicamente equatorial. A média anual climatológica da temperatura do ar é de $26,0^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$, com máximas e mínimas variando de $31,5^{\circ}\text{C} \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ a $22,0^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A pluviosidade média anual é de $2.858,7 \pm 76,6$ mm/ano com maior volume no período chuvoso (dezembro a maio), correspondendo a 71,2% do total anual, enquanto os 28,8% restantes são distribuídos nos meses de junho a novembro (COSTA,

* This study was financed by the *Fundação Araucária* (FAPPR) - Brazil.

1998). Estas características climáticas da cidade de Belém torna o ambiente urbano na cidade desconfortável devido as altas temperaturas e, principalmente, devido a alta umidade. O que tem se observado, ao longo dos últimos anos, é que somente sistemas de condicionamento de ar tradicionais, estes baseados em *setpoints* de temperatura e controle *ON-OFF*, estão sendo utilizados. Desta forma, o problema a ser tratado neste artigo é tentar otimizar as condições de conforto térmico em ambientes de edificações, mais especificamente na cidade Belém, otimizando os ganhos de controladores Proporcional-Integral (PI), através de três técnicas de otimização bioinspiradas, Algoritmo Genético (GA), Evolução Diferencial (DE) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO), estas adotadas para verificar o melhor desempenho dentre as três.

Em Buonocore et al. (2020) é destacada a adoção de condicionadores de ar como estratégia de refrigeração em climas quentes e úmidos é prática comum. Nestes locais, o superaquecimento dos edifícios é uma preocupação, por levar à insatisfação os ocupantes e a um consumo desnecessário de energia de refrigeração. Já em Xu et al. (2020), ressalta-se a importância da economia de energia do condicionador de ar em detrimento da preservação da energia da construção, enquanto esta atende aos requisitos de conforto térmico do ambiente interno.

Este artigo está estruturado em 5 seções. Na seção 2 apresentam-se a revisão da literatura e a fundamentação teórica abordando os tópicos de conforto térmico, a ferramenta a ser utilizada para a simulação, controle de sistemas de climatização, modelagem matemática e o método de identificação utilizado. Por fim, apresenta-se como foi feita otimização dos parâmetros dos controladores, citando as técnicas de otimização adotadas. Na seção 3 propõe-se o estudo de caso, usando os conceitos apresentados na revisão da literatura descrita na seção anterior. Na seção 4, são apresentados os resultados das simulações, parâmetros utilizados, a estratégia de controle implementada e comparações entre as diferentes técnicas. Finalmente, na seção 5, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros associadas a esta pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção introduz os conceitos de conforto térmico e controle de sistemas, identificação de sistemas e otimização de parâmetros voltada à sintonia de controladores, trazendo as principais referências associadas ao tema deste artigo.

2.1 Conforto térmico

Neste artigo, o conforto térmico dos ocupantes no interior de edificações foi estimado fazendo uso do índice de conforto térmico conhecido por Voto Médio Estimado (PMV) proposto por Fanger (1972), o PMV leva em conta a combinação das variáveis ambientais: temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura radiante média, além de variáveis pessoais: neste caso a atividade metabólica, que está relacionada a atividade física que a pessoa está realizando no momento, e o índice de vestimenta, associado ao percentual do corpo coberto. O resultado do modelo de conforto proposto por Fanger consiste em um

valor numérico que traduz a sensibilidade humana ao frio e ao calor.

O PMV usa princípios de equilíbrio de calor para relacionar as seis variáveis envolvidas. O índice Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD) está relacionado ao PMV, conforme ilustrado na Figura 1 (ASHRAE, 2017).

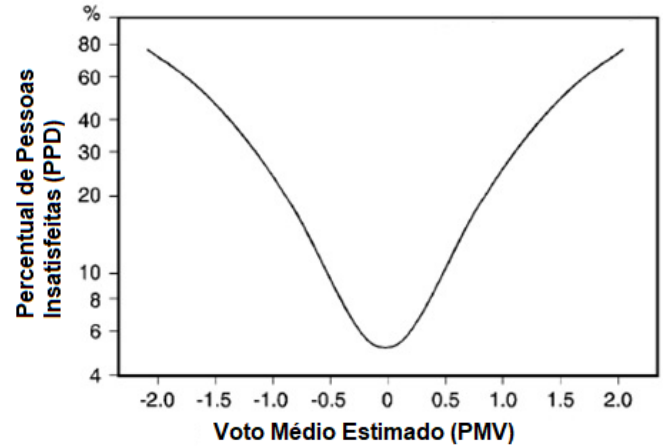


Figura 1. Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD) em função do Voto Médio Estimado (PMV).

Neste contexto, a expressão matemática que combina variáveis ambientais e parâmetros individuais foi proposta baseando-se em um modelo teórico combinado com os resultados de experimentos de aproximadamente 1300 indivíduos. Assim o valor do índice PMV pode ser calculado como (Fanger, 1972):

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3}[5733 - 6.99(M - W) - p_v]\}, \quad (1)$$

onde M é a taxa metabólica da pessoa, que representa a taxa de transformação de energia química em calor e trabalho mecânico por atividades aeróbicas e anaeróbicas do corpo humano (W/m^2), W é a potência mecânica efetiva (W/m^2). Já o termo p_v representa a pressão parcial de vapor (KPa) e pode ser relacionado com a temperatura de bulbo seco (temperatura ambiente) t_{bs} ($^{\circ}C$) e a umidade relativa ϕ (%) através da seguinte equação, onde P_{SAT} é a correlação da pressão de saturação de vapor da água (Freire, 2006):

$$p_v = \phi P_{SAT}(t_{bs}). \quad (2)$$

Assim, a equação 1 pode ser reescrita como:

$$PMV = -0.42[(M - W) - 58.15] - [1.7 \times 10^{-5}M(5867 - p_v)] - [0.0014M(34 - t_{bs})], \quad (3)$$

ou então:

$$PMV = -\{3.69 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4]\} - [f_{cl}h_c(t_{cl} - t_{bs})], \quad (4)$$

onde t_{cl} é a temperatura da superfície da vestimenta ($^{\circ}C$), t_{rm} é a temperatura radiante média ($^{\circ}C$) e h_c

é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/(m^2K)$), que pode ser calculado como apresentado na equação (5) para baixas velocidades do vento (v).

$$h_c = 10.4\sqrt{v}, \text{ para } v < 2,6 \text{ m/s.} \quad (5)$$

O fator de área f_{cl} corresponde à superfície do corpo coberta com as vestimentas e pode ser determinado através do índice de vestimentas conhecido como I_{cl} (Fanger, 1972).

Desta forma, pode-se definir o cálculo do PMV como função das seis variáveis mencionadas no início desta seção, sendo quatro delas referentes ao ambiente t_{bs} , ϕ , t_{rm} e v e duas referentes a condições pessoais do ocupante: I_{cl} e M , conforme descrito na equação (6).

$$PMV = f(t_{bs}, \phi, t_{rm}, v, I_{cl}, M). \quad (6)$$

Relacionado ao PMV, pode-se definir um novo índice que estima o percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) com a condição climática do ambiente em estudo, este índice pode ser calculado como demonstrado na equação (7):

$$PPD = 100 - 95e^{-0.03353PMV^2 + 0.2179PMV^2}. \quad (7)$$

2.2 Ferramenta de simulação térmica e energética de edificações

Existem duas formas de coletar dados para a elaboração de um modelo que represente as condições higrotérmicas no interior de ambientes. A primeira é através de experimentos, onde sensores são posicionados no interior, nas superfícies e no exterior de uma zona térmica com o objetivo de capturar as variáveis relevantes que afetam o conforto térmico dos ocupantes. A segunda forma é através de um modelo físico e analítico, normalmente associado a um modelo numérico, que simule as condições de conforto no interior de um ambiente. Este artigo leva em conta a segunda abordagem, a qual considera um programa validado para simulação das iterações térmicas de um ambiente com o meio externo.

Assim, de modo a gerar um modelo para o desenvolvimento da estratégia de controle proposta neste trabalho, foi utilizado o programa de simulação termo-energética de ambientes DOMUS, Mendes et al. (2003), que é um software voltado a profissionais de engenharia e de arquitetura, permitindo análise de diferentes condições de contorno aplicadas em uma zona térmica. O programa computacional atualmente é o software oficial para certificação energética de edificações através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica Brasileiras (2020).

2.3 Controle de Sistemas de Climatização

Considerando que um sistema de condicionamento de ar pode ser definido como um sistema multivariável, não linear e com parâmetros distribuídos, com tempo morto e de fase não mínima, o projeto de controladores do tipo PID para sistemas desse tipo deve ser feito de forma adequada, considerando as incertezas do modelo causadas

pelas variações nas características da planta, Kasahara et al. (1999). Como trata-se de um sistema térmico, foi atribuído o valor zero para k_d , uma vez que conforme descrito em Ogata (2010) a ação de controle derivativo trata-se da rápida resposta a uma taxa de variação ao erro atuante e, como sistemas térmicos são sistemas lentos, este parâmetro seria irrelevante. Neste contexto, a seleção da malha de controle apropriada deve levar em conta todo o conhecimento prévio disponível.

Quando pretende-se levar em conta o quesito de conforto térmico, técnicas que envolvem o índice de conforto na realimentação da malha de controle podem ser utilizadas. A partir do momento em que é possível mensurar a sensação de conforto térmico dos ocupantes, pode-se definir quais serão as ações do controlador aplicadas ao sistema de atuação, o qual pode ser mono ou multivariável, para que sejam obtidas as melhores condições de conforto no interior do ambiente Freire et al. (2008). Neste contexto, uma ideia é assumir um sensor de PMV, onde considera-se este parâmetro como uma variável mensurável e controlável através de uma estrutura clássica em malha fechada conforme apresentado na Figura 2.

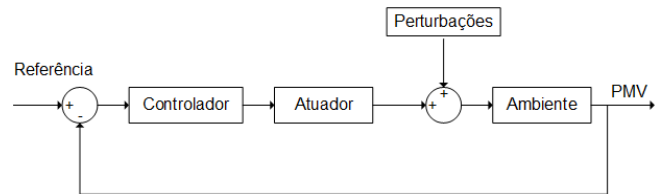


Figura 2. Esquema de controle onde o PMV é utilizado na realimentação.

2.4 Modelo Matemático da Edificação

Nas últimas décadas, diversos modelos vêm sendo desenvolvidos com a finalidade de compreender o comportamento das condições climáticas internas de edificações. A partir de uma infinidade de objetivos, modelos matemáticos vêm sendo estudados a fim de melhorar, de um modo geral, as condições climáticas no interior de um ambiente e reduzir o consumo de energia de equipamentos de climatização, estes muitas vezes superestimados (Freire et al., 2008).

Segundo Aguirre (2015), a identificação de sistema estuda maneiras de construir e implementar modelos de sistemas reais, dentre elas a modelagem ou identificação caixa preta, a qual modelos são construídos a partir da determinação de uma relação matemática entre os dados de entrada e saída, com pouco ou nenhum conhecimento físico a respeito da dinâmica do sistema.

Um zona térmica pode ser definida como um sistema com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), porém, associando-se as entradas a cada uma das saídas disponíveis, é possível obter-se dois sistemas com múltiplas entradas e apenas uma saída (MISO). Neste caso, as saídas de cada modelo foram definidas como sendo a temperatura e umidade relativa internas do ambiente em questão. As entradas utilizadas no processo de identificação são a potência do condicionador de ar, temperatura externa, umidade relativa externa e radiação solar total, seguindo a linha do modelo apresentado por Freire et al. (2008).

Para realizar o processo de identificação, primeiro deve-se coletar os dados de entrada, estes dados foram obtidos através de um arquivo climático do tipo TRY (*Test Reference Year*). Através destes dados climáticos e da simulação através do software Domus, pode-se gerar os dados de temperatura e umidade relativa internas. O experimento foi realizado em malha fechada, onde o algoritmo que comanda o condicionador de ar é baseado no sistema liga-desliga (ou ON-OFF).

Existem várias formas de representar o mesmo modelo matemático, algumas destas representações são as funções de transferência, as quais modelam o comportamento dinâmico de um par entrada-saída de um sistema (Aguirre, 2015). O modelo auto regressivo com média móvel e entradas exógenas (ARMAX) foi adotado neste artigo por possuir uma ponderação estendida no parâmetro do erro, com média não nula ao longo do tempo (Tavares, 2017).

Tendo obtido uma família de modelos, é necessário verificar se eles incorporam ou não as características de interesse do sistema original (Aguirre, 2015). Muitos testes podem ser utilizados para a validação de modelos, um destes testes avalia o erro do modelo e é conhecido como erro médio quadrático (*Mean Squared Error - MSE*). Este teste é dado pela seguinte equação:

$$MSE_i = \frac{\sum_{k=1}^N (y_i(k) - \hat{y}_i(k))^2}{N}, \quad (8)$$

onde $y(k)$ é a saída real, $\hat{y}(k)$ é a saída estimada, N representa o número de amostra e $i = T$ define o cálculo do erro médio quadrático para o modelo que estima a temperatura interna do ambiente e $i = H$ para o modelo de umidade relativa interna.

2.5 Otimização dos Ganhos do Controlador

A Otimização, sob o ponto de vista prático, trata do conjunto de métodos capazes de determinar as melhores configurações possíveis para a construção ou o funcionamento de sistemas de interesse para o ser humano (Ramirez et al., 2009). Neste trabalho foi utilizado como ferramentas de otimização os algoritmos de evolução diferencial (DE), pois destaca-se por sua eficiência, uma estratégia simples de busca e por ser baseado em populações, com implementações que possibilitam sua execução em mais de um processador. De acordo com Pulici (2017), o algoritmo DE possui simplicidade de implementação, eficiência, robustez e autoadaptação, em casos em que a busca pela melhor solução pode convergir para mínimos locais (Storn and Price, 1997).

O segundo algoritmo utilizado no processo de sintonia dos controladores com estrutura PI foi o algoritmo genético (GA). O GA tem por característica ser um algoritmo de otimização global, baseado nos mecanismos de seleção natural e da genética (Zames et al., 1981). Ele emprega uma estratégia de busca paralela e estruturada, a qual é voltada a busca de pontos buscando a minimização ou maximização da função objetivo (Freitas, 2012).

Por fim, o último algoritmo selecionado foi a otimização por enxame de partículas (PSO), o qual é um procedimento de otimização estocástico inspirado em princípios

de cooperação e comportamento em sociedade de enxames, cardume de peixes e bandos de pássaros (Kennedy and Eberhart, 1995).

3. ESTUDO DE CASO

A busca por um modelo de construção para identificação e análise das estratégias para sintonia dos controladores se baseou em informações obtidas no Anexo 41 da Agência Internacional de Energia (IEA) (IEA, 2009). Neste sentido, o modelo de edificação adotado foi o BESTest 600FF conforme ilustrado na figura 4, neste estudo foi considerada uma adaptação referente ao tamanho da janela esta direcionada para o sul. Neste caso, ainda foi considerado um sistema de condicionamento de ar de 3.200 W para os testes de controle em malha fechada. A figura 3 representa o diagrama de sinais do modelo elaborado neste trabalho.

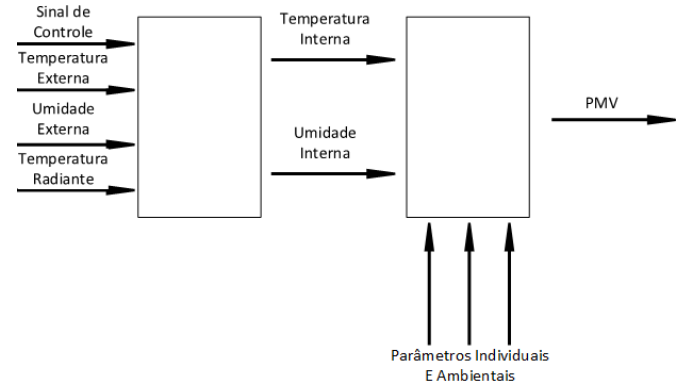


Figura 3. Diagrama de sinais que representa o modelo da edificação.

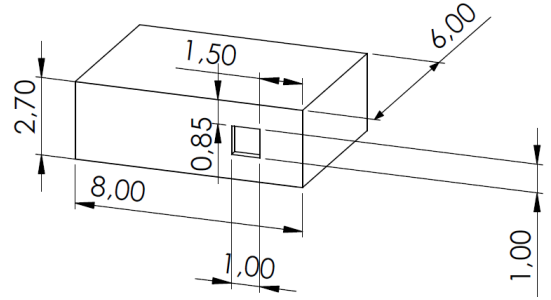


Figura 4. Modelo de edificação adotado.

Para obtenção do modelo matemático que representa o comportamento higratérmico da edificação, foi utilizado o algoritmo de mínimos quadrados recursivo (Aguirre, 2015) para estimar os coeficientes do modelo ARMAX. Como mencionado anteriormente, assume-se um par de modelos do tipo MISO para descrever o comportamento da temperatura e umidade internas do ambiente conforme equação (9).

$$\begin{aligned} y_i(k) + a_i y_i(k-1) + \dots + a_n y_i(k-n) = & \\ & b_1 u(k-1) + \dots + b_m u(k-m) + \\ & + c_1 T_{EXT}(k-1) + \dots + c_m T_{EXT}(k-m) + \\ & + d_1 H_{EXT}(k-1) + \dots + d_p H_{EXT}(k-p) + \\ & + e_1 S_{EXT}(k-1) + \dots + e_r S_{EXT}(k-r) + \\ & + \xi(k) + f_1 \xi(k-1) + \dots + f_s \xi(k-s), \end{aligned} \quad (9)$$

onde $y_i(k)$ pode ser $y_T(k)$, que representa a temperatura interna (em $^{\circ}C$) do ambiente ou $y_H(k)$ para a umidade relativa interna (variando de 0 a 1), T_{EXT} é a temperatura externa (em $^{\circ}C$), H_{EXT} a umidade relativa externa (variando de 0 a 1) e S_{EXT} representa a radiação solar total (em KW/m^2). Na equação 9, $u(k)$ é o sinal do atuador, ou seja, a potência aplicada ao condicionador de ar a qual pode variar entre $0KW$ e $3.2KW$, por fim, k é o instante em tempo discreto tal que $k \in Z$; e $\xi(k)$ é o termo referente ao erro.

Por fim é necessário um procedimento de validação com o objetivo de verificar se o modelo estimado se ajusta aos objetivos determinados. Os dados utilizados no processo de identificação foram coletados utilizando a ferramenta Domus, porém com o arquivo climático da cidade de Belém entre os dias 01 a 15 de julho. Utilizou-se 21.600 amostras de dados de entrada e saída com intervalo de amostragem de 60 segundos. O sistema de condicionamento de ar foi utilizado considerando um controlador ON-OFF durante o período de identificação do modelo. Os dados de entrada do processo de identificação podem ser vistos nas figuras 5 e 6.

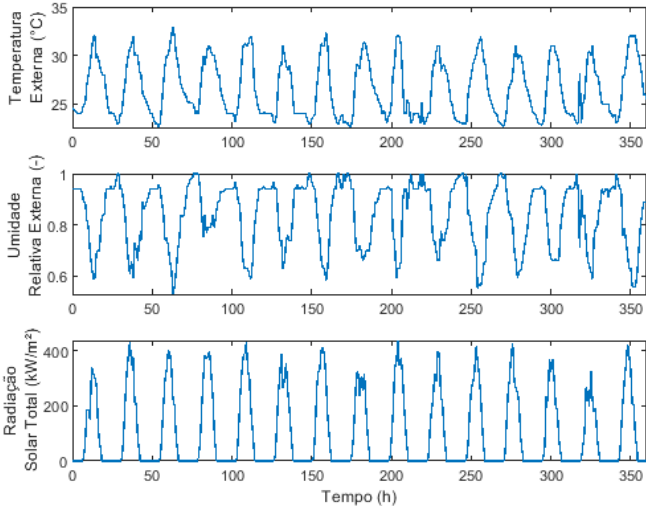


Figura 5. Temperatura externa, umidade relativa externa e radiação solar total em Belém de 1 à 15 de julho - Etapa de modelagem.

Os modelos obtidos para temperatura e umidade internas podem ser vistos nas equações (10) e (11).

$$(1 - 0.99762q^{-1})y_T(k) = (-0.018968q^{-1})u + (-8.13862 \times 10^{-5}q^{-1})T_{EXT}(k) + (0.08588q^{-1})H_{EXT}(k) + (1.04591 \times 10^{-4}q^{-1})S_{EXT}(k) + (1 + 0.012426q^{-1})\xi(k) \quad (10)$$

$$(1 - 0.99841q^{-1})y_H(k) = (2.660221 \times 10^{-4}q^{-1})u + (3.47902 \times 10^{-5}q^{-1})T_{EXT}(k) + (-5.52963 \times 10^{-4}q^{-1})H_{EXT}(k) + (-1.4502 \times 10^{-6}q^{-1})S_{EXT}(k) + (1 - 1.45979 \times 10^{-4}q^{-1})\xi(k) \quad (11)$$

Para o processo de validação do modelo da edificação, foram aplicados diferentes dados climáticos, desta vez do

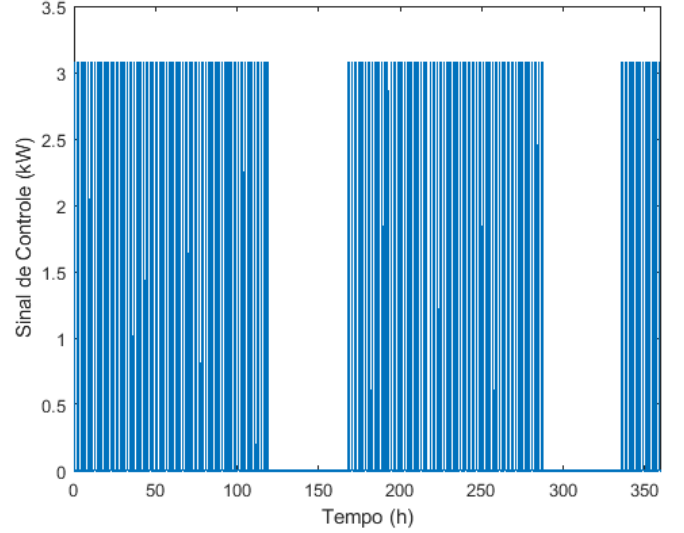


Figura 6. Sinal de controle durante a etapa de modelagem.

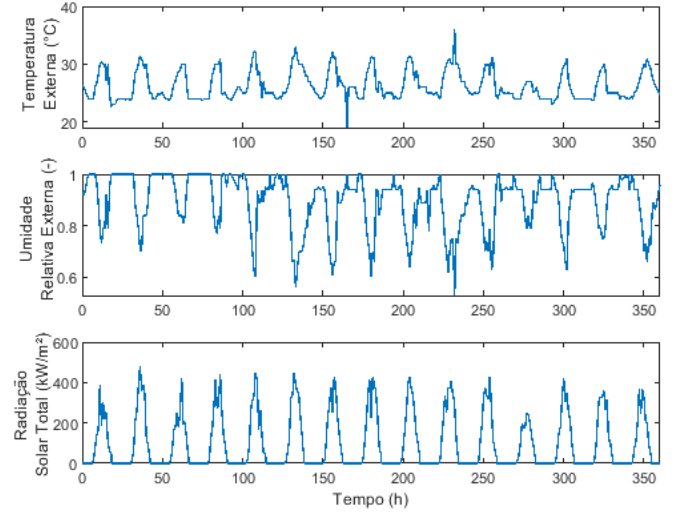


Figura 7. Temperatura externa, umidade relativa externa e radiação solar total em Belém de 1 à 15 de janeiro - fase de validação do modelo.

dia 1 ao dia 15 de janeiro, também relativos a cidade de Belém, a fim de analisar o comportamento do sistema em diferentes condições climáticas, conforme ilustrado na figura 7. O sinal de controle aplicado no processo de validação pode ser verificado na figura 8.

A tabela 1 apresenta os valores do MSE para as fases de estimação e validação do modelo.

Tabela 1. MSE para as fases de estimação e validação do modelo.

Modelo	MSE_{est}	MSE_{val}
Temperatura	$5,683 \times 10^{-2}$	$7,118 \times 10^{-2}$
Umidade	$1,397 \times 10^{-5}$	$2,931 \times 10^{-5}$

Os resultados da validação dos modelos apresentados nas figuras 9 e 10, demonstram uma boa concordância quando comparados com os resultados das simulações computacionais executadas no software Domus. O ajuste pode ser comprovado através do (MSE) para os modelos identificados e apresentados na tabela 1.

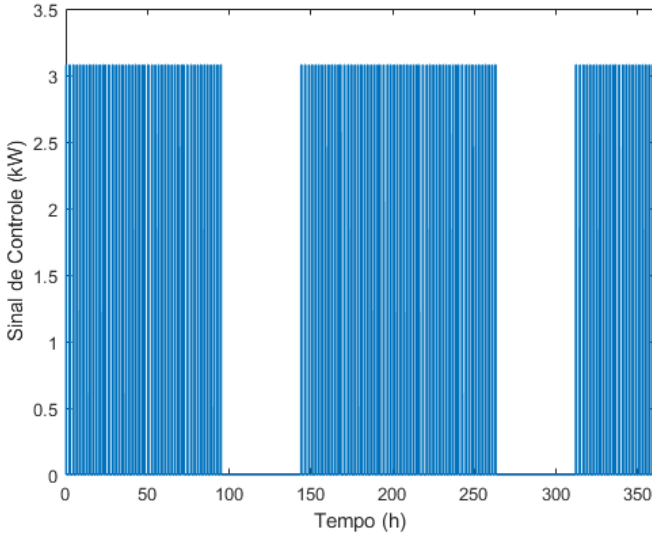


Figura 8. Sinal de controle utilizado no processo de validação do modelo.

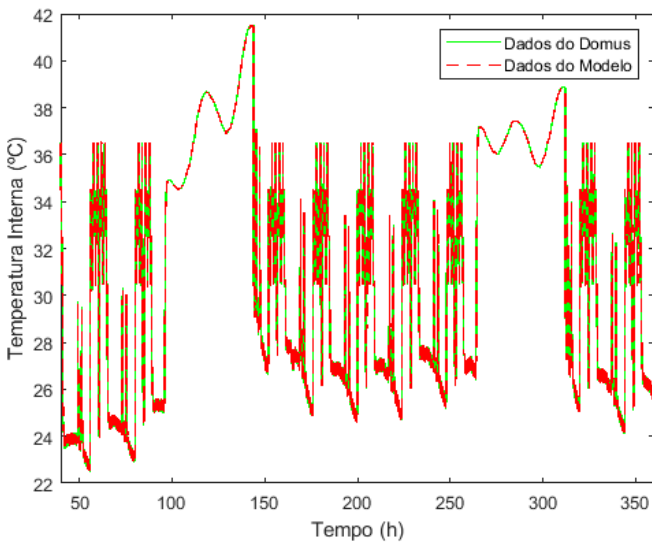


Figura 9. Dados de validação modelo para a temperatura interna.

4. OTIMIZAÇÃO DOS GANHOS DOS CONTROLADORES

Nesta seção apresentam-se resultados e análise do desempenho do sistema de controle obtidos após as otimizações nos ganhos dos controladores.

Para os resultados apresentados, foram adotados os 7 primeiros dias de julho para a simulação. O sistema de controle foi acionado no terceiro dia a fim de reduzir os efeitos das condições iniciais que são aplicadas ao sistema (temperatura de 20°C e 50% de umidade relativa). Os dados climáticos para estes 7 primeiros dias já foram apresentados na figura 5.

Em termos de análise da sensação de conforto térmico, recomenda-se o uso do PMV para valores entre $+3$ e -3 , e considera-se que quando o PMV está entre $-0,5$ e $+0,5$, pode-se dizer que a grande maioria dos ocupantes do ambiente está em condições satisfatórias de conforto térmico (Freire et al., 2008). Utilizaram-se os seguintes parâme-

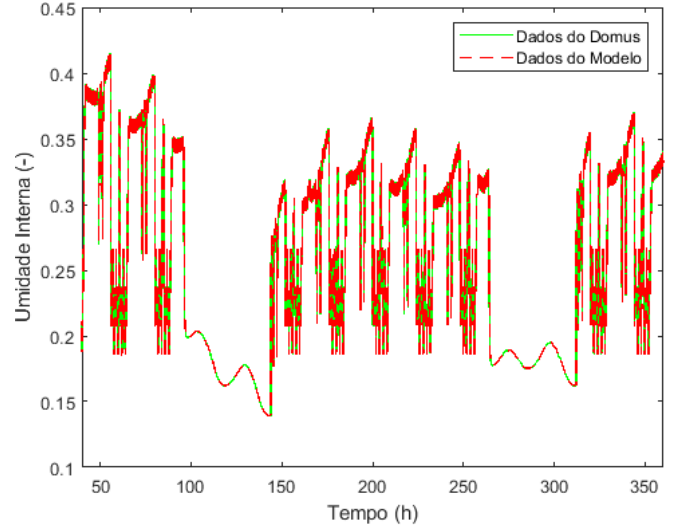


Figura 10. Dados de validação modelo para a umidade interna.

tros, velocidade do ar $v = 0,1\text{m/s}$, índice de vestimentas $I_{cl} = 0,66\text{clo}$ e taxa metabólica $M = 58,15\text{W/m}^2$, tais parâmetros procuram reproduzir as condições climáticas e pessoais de um ambiente de escritório (Freire et al., 2008).

Os parâmetros obtidos para o controlador PI foram K_p representando o ganho proporcional e K_i representando o ganho integral. Os parâmetros de configuração utilizados nos algoritmos foram: 100 gerações como critério de parada, 30 indivíduos no vetor solução e fator de mutação $F = 0,8$. Neste trabalho, a função custo a ser minimizada é dada pela equação (12) que representa a Integral do Erro Absoluto (IAE) porém utilizando o PMV como penalização.

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt \quad (12)$$

O *setpoint* de temperatura foi definido como 24°C . Na tabela 2 são apresentados os resultados após a realização de 25 experimentos de otimização para cada técnica, onde foram obtidos os ganhos proporcional e integral dos controladores. Nas figuras 11 e 12, percebe-se que a partir do momento em que o controlador é acionado, a temperatura mantém-se próximo do *setpoint* e o índice PMV fica muito próximo de zero, o que é considerado ideal em termos de conforto térmico.

Tabela 2. Melhores ganhos obtidos durante o processo de otimização.

	IAE	K_p	K_i
DE	$3,3114 \times 10^3$	97,5941	$1,3068 \times 10^{-6}$
GA	$3,3116 \times 10^3$	99,9901	$1,3111 \times 10^{-6}$
PSO	$3,3114 \times 10^3$	97,2765	$1,3090 \times 10^{-6}$

A seguir são apresentados os resultados e as comparações entre as saídas otimizadas em cada técnica de otimização bem como os respectivos sinais de controle. Na figura 11 apresenta-se a temperatura interna e umidade relativa interna do controlador otimizado pelos três algoritmos de otimização apresentados neste artigo, em escala de tempo dos dias 3 e 4, isso porque, como já foi dito antes, os dois

dias iniciais não trazem nenhuma informação relevante, já que o controlador não funciona e não serão apresentados os resultados para os 7 dias, levando-se em conta as similaridades dos controladores encontrados. Percebe-se que a temperatura manteve-se próxima à referência adotada de 24°C , entretanto a umidade relativa mostra-se baixa, o ideal seria em torno de 50% a 60% porém, como o foco deste artigo não é controlar a umidade relativa interna, e tendo em vista que para diminuir a temperatura o condicionador de ar retira umidade do ar do ambiente fazendo com que a umidade fique abaixo do ideal.

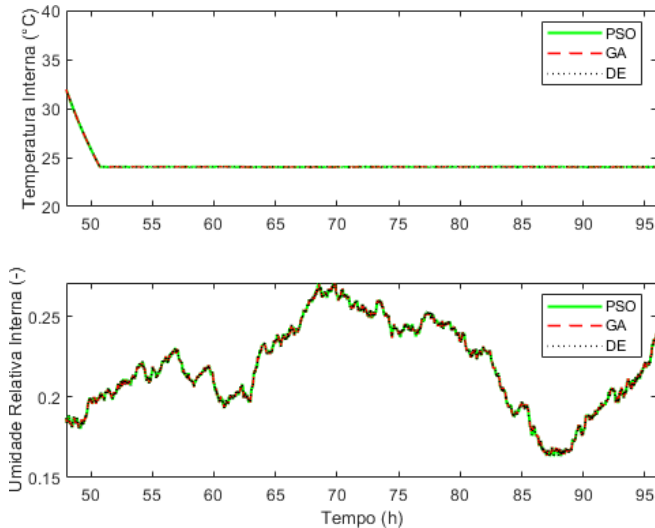


Figura 11. Sinais de temperatura e umidade após otimizações.

Em relação aos resultados apresentados pelos algoritmos, pode-se notar na figura 12 que o PMV ficou muito próximo de zero, isto se dá exatamente em consequência da umidade abaixo do ideal, também na figura 12 é ilustrado o índice PPD, onde percebe-se que o percentual de pessoas insatisfeitas está aproximadamente em 5%, o que é considerado excelente.

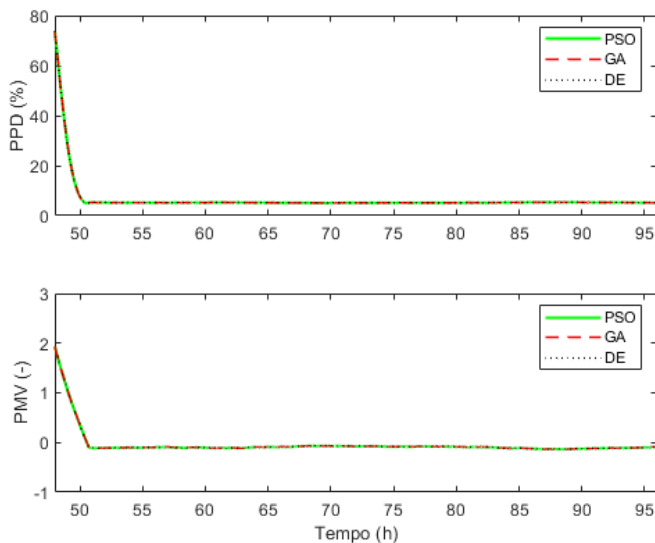


Figura 12. Índice PMV e PPD após as otimizações.

Por fim, na figura 13 ilustra-se a evolução do sinal de controle para as três técnicas de otimização. A tabela 3 descreve o consumo do controlador em cada técnica de otimização adotada e a variância do sinal de controle. Percebe-se que das três técnicas a que apresentou o melhor resultado em relação ao consumo de energia foi a GA e a que apresentou um maior consumo foi a DE, entretanto, compreende-se que todas obtiveram um resultado muito próximo umas das outras.

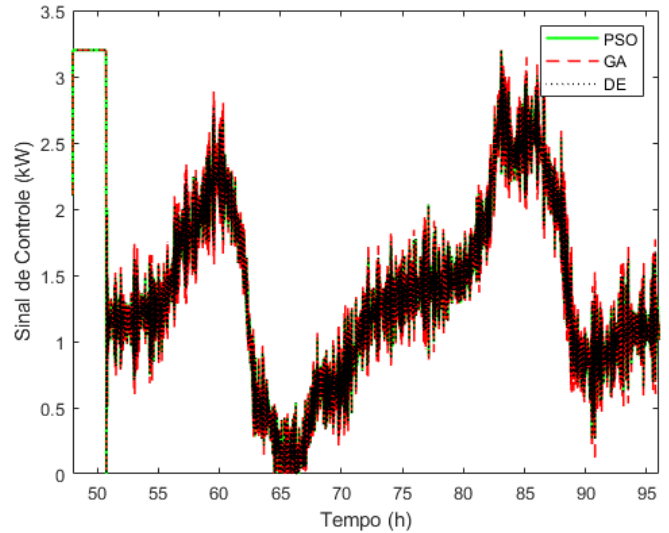


Figura 13. Evolução do sinal de controle.

Tabela 3. Consumo de energia do controlador.

Técnica de otimização	Variância	Consumo (kWh)
DE	0,65092	165,3606
GA	0,66232	165,3207
PSO	0,64988	165,3580

Com base nos resultados apresentados nas figuras anteriores, observa-se que os controladores PI otimizados apresentaram resultados semelhantes com uma mínima diferença entre eles, o que se justifica não só por ser a mesma estrutura de controle, mas também pelo princípio de ação dos algoritmos evolucionários ser similar. Nestes casos, os algoritmos alcançaram resultados similares na otimização da função custo IAE, atingindo praticamente os mesmos valores de ganhos.

5. CONCLUSÕES

Este artigo abordou o problema do conforto térmico em edificações na cidade de Belém estado do Pará, equipadas com sistema de condicionamento de ar, onde adotou-se o índice PMV para mensurar a condição de conforto térmico dos ocupantes, este sendo calculado em função de parâmetros ambientais como temperatura, umidade relativa, temperatura radiante média e a velocidade do ar e de parâmetros individuais, como a taxa metabólica e o índice de vestimentas. Uma estratégia de controle foi desenvolvida para um sistema de condicionamento de ar visando otimizar o conforto térmico das pessoas no interior de uma edificação teste.

Em relação aos métodos de controle, foi implementado o controlador PI, sendo que para calcular os ganhos dos controladores utilizaram-se técnicas de otimização bioinspiradas, nesse caso a Evolução Diferencial, Algoritmos Genéticos e Otimização por Enxame de Partículas, dentre as três técnicas a que apresentou o menor consumo de energia foi a GA porém a que proporcionou um melhor índice PMV foi a DE.

As características de resposta do sistema de controle, juntamente com os resultados de suas otimizações, mostraram a eficiência do controlador PI em conseguir alcançar a temperatura de *setpoint* e PMV desejados, porém não se pode concluir que a mesma resposta seria obtida em uma implementação real devido aos diversos fatores climáticos que influenciam os testes além dos considerados para a simulação. No entanto, concluiu-se que todos os testes obtiveram o desempenho esperado ou muito próximo do esperado, o que levaria os ocupantes das edificações a uma situação ideal de conforto térmico.

Para trabalhos futuros, sugere-se a adaptação da função custo para relacioná-la ao cálculo do PMV. Além disso, avaliar outros algoritmos e a adaptabilidade do modelo matemático proposto em simulações da mesma edificação em diferentes regiões do país, considerando diferentes arquivos climáticos, também podem ser considerados como etapas futuras desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo: 304783/2017-0) pelo suporte a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (2015). *Introdução à Identificação de Sistemas—Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. UFMG, Brasil.
- ASHRAE, S.. (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55-2013) Includes ANSI/ASHRAE Addenda Listed in Appendix N*. ASHRAE.
- Brasileiras, C.E. (2020). Procel programa nacional de conservação de energia elétrica. url - <http://www.pbeedifica.com.br/node/24>.
- Buonocore, C., De Vecchi, R., Scalco, V., and Lamberts, R. (2020). Thermal preference and comfort assessment in air-conditioned and naturally-ventilated university classrooms under hot and humid conditions in Brazil. *Energy and Buildings*, 211, 109783.
- COSTA, A.C.L.d. (1998). *Estudo de variações termohigrométricas de cidade equatorial devido ao processo de urbanização: o caso de Belém - PA*. Ph.D. thesis, Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São ...
- Fanger, P.O. (1972). Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- Freire, R.Z., Oliveira, G.H., and Mendes, N. (2008). Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings*, 40, 1353–1365.
- Freire, R. (2006). Técnicas avançadas de controle aplicadas a sistemas de climatização visando conforto térmico. *Curitiba: Dissertação (Mestrado em Engenharia)-PPGEPS/CCET/PUCPR, Pontifícia Universidade Católica do Paraná*.
- Freitas, J.G.d. (2012). Computação evolutiva aplicada ao problema da geração de grade horária: o caso do curso de análise e desenvolvimento de sistemas do iftm. *Universidade Federal de Uberlândia*.
- IEA (2009). Iea-ecbcs annex 41 whole building heat, air and moisture response. In *Nordic Building Physics Conference Copenhagen, June 19, 2008*.
- Kasahara, M., Matsuba, T., Kuzuu, Y., Yamazaki, T., et al. (1999). Design and tuning of robust pid controller for hvac systems. *ASHRAE Transactions*, 105, 154.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, volume 4, 1942–1948. IEEE.
- Lamberts, R., Dutra, L., and Pereira, F.O.R. (2014). *Eficiência Energética na Arquitetura*. ELETROBRAS/PROCEL, Rio de Janeiro.
- Mendes, N., Oliveira, R., and Santos, G.d. (2003). Domus 2.0: a whole-building hygrothermal simulation program. *Proceedings of Building Simulation 2003*, 863–870.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de controle moderno*. Pearson Prentice Hall.
- Pulici, A.S.V. (2017). Otimização dos parâmetros de controle do conversor do lado do rotor de um gerador de indução duplamente alimentado utilizando evolução diferencial. *Cornélio Procópio: Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Tecnológica do Paraná*.
- Ramirez, J., Campelo, F., Guimarães, F., and Takahashi, R. (2009). Notas de aula de otimização. Technical report, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Storn, R. and Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341–359.
- Tavares, M.F. (2017). *Utilização dos modelos ARX e ARMAX em plantas industriais ruidosas*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Xu, X., Liu, W., and Lian, Z. (2020). Dynamic indoor comfort temperature settings based on the variation in clothing insulation and its energy-saving potential for an air-conditioning system. *Energy and Buildings*, 220, 110086.
- Zames, G., Ajlouni, N., Ajlouni, N., Ajlouni, N., Holland, J., Hills, W., and Goldberg, D. (1981). Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. *Information Technology Journal*, 3(1), 301–302.