

SÍNTESE DE UM CONTROLADOR MPC PARA O CONDICIONAMENTO DE AR DO EDIFÍCIO MODERNO

Catarina Gomes dos Santos e Miriam Tvrzská de Gouvêa

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

Este trabalho apresenta a síntese de um controlador preditivo para controlar a temperatura de operação de 35 zonas do Edifício Moderno, pela manipulação da abertura da válvula de expansão eletrônica e rotação do *chiller* e das frações de *bypass* de água fria para os *fancoils* que fornecem água gelada para as zonas. O controlador preditivo foi modelado como um problema de programação não linear sujeito a restrições, dentre as quais se incluem as faixas de operação da rotação do compressor e da temperatura da água que sai do evaporador. Para avaliar a operação do controlador proposto, considerou-se a sua capacidade de implementar alterações no *setpoint* das temperaturas das zonas e de rejeitar perturbações na edificação devidas a variações na ocupação e ambientais. O desempenho do controlador preditivo proposto foi comparado ao de um controlador tradicional do tipo PID sintonizado pela técnica de controle por modelo interno (IMC). Mostra-se, no trabalho, que o uso da tecnologia de controle avançado é viável para este tipo de sistema e permite controlar a operação em condições fora do projeto (*off-design*), diferentemente do que ocorre com o controlador PID. Contudo, o procedimento de sintonia do controlador preditivo não é trivial e alguns cenários simulados mostram a necessidade de uma melhoria na sintonia. Este estudo foi realizado por simulações da planta virtual do Edifício Moderno no ambiente de programação do simulador MATLAB® R2006b.

Palavras-chave: Controle Preditivo. Ar condicionado. PID-IMC

ABSTRACT

This work presents the synthesis of a predictive controller that controls the operating temperatures of 35 zones of Edifício Moderno by manipulating the opening of the electronic expansion valve and the rotation of the compressor of the chiller and the water bypass fraction to each fancoil used to control the air temperature of each zone. The predictive controller was modeled as a nonlinear programming problem subjected to constraints, including operational bounds on the rotation of the compressor and bounds on the temperature of the cold water from the evaporator. In order to evaluate the operation of the controller, the setpoint tracking capability of the controller was analyzed as well as its capacity to reject disturbances due to variations in thermal occupancy load and ambient external conditions. The performance of the proposed controller was compared with a

traditional PID controller tuned by the IMC technique. It is shown that the usage of the proposed advanced control technology is viable for this kind of system and enables controlling off-design conditions, differently from what happens with the PID controller. However, the tuning procedure of the predictive controller is not trivial and some scenarios show the necessity of improving the tuning. For this study, simulations of the virtual plant of Edifício Moderno were performed using MATLAB® R2006b.

Keywords: Model Predictive Control. Air conditioning. PID-IMC.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente está tornando cada vez mais relevante a redução do consumo de energia elétrica nos sistemas de climatização em edifícios. Vakiloroyaya *et al.* (2014) informam que quase 50% da demanda de energia nessas edificações é usada para suportar condições de conforto térmico interno.

Em países desenvolvidos, sistemas de climatização consomem de 10% a 20% da energia total do país (ALI, 2013). No Brasil, em 2017, o consumo de energia elétrica alcançou o patamar de 528 TWh (IEA, 2019), sendo o consumo estimado de energia correspondente aos condicionadores de ar em residências de 18,7 TWh e estima-se que em 2035 irá para 48,5 TWh, um crescimento de 5,4% ao ano (EPE, 2018). Estes dados evidenciam que é preciso aderir às políticas de eficiência energética com estratégias de controle apropriadas.

Para Caiado (2016) os principais desafios da eficiência energética são: a falta de prioridade para esse aspecto nas empresas; gestores incapazes de entender os benefícios da eficiência energética tanto no contexto de economia de riqueza quanto no ganho social; e a dificuldade em conscientizar indivíduos que nunca tiveram contato com esse tipo de política. As emissões de CO₂ nos edifícios aumentaram em 2018, resultado, entre outros fatores, das mudanças climáticas que fizeram a demanda de energia para aquecimento e resfriamento crescer. Destaca-se, ainda, o baixo investimento em edifícios sustentáveis (IEA, 2020).

A nível de projeto, uma das formas de se aumentar a eficiência energética em sistemas de refrigeração é desenvolver sistemas que apontem melhores configurações dos componentes do sistema de ar condicionado, reconfigurando-se sistemas tradicionais de ar condicionado e combinando diferentes tecnologias de condicionamento de ar (VAKILOROAYA *et al.*, 2014). Para sistemas já existentes, a melhoria da eficiência energética pode ser alcançada pela implementação de estratégias de controle avançado e/ou de otimização que mesmo em um sistema já eficientes, permite a redução do consumo de energia, a detecção de erros e a realização de diagnósticos (LI *et al.*, 2013, ZHAO; YU, 2017). O emprego de técnicas de controle avançado no setor de ar condicionado é, no entanto, ainda incipiente (KILLIAN; KOZEK, 2016, ZHAO; YU, 2017).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema de pesquisa consiste em implementar um controlador avançado do tipo Controle Preditivo por Modelos (MPC) para controlar a operação do sistema de ar condicionado de uma parte do Edifício Moderno, uma edificação comercial de grande porte.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é sintetizar um controlador preditivo para controlar a operação de 35 zonas do Edifício Moderno e comparar o desempenho deste controlador com um controlador PID sintonizado pela técnica IMC.

1.3 JUSTIFICATIVA

Hoje, ainda predominam no setor de ar condicionado, o emprego de estratégias clássicas de controle, como o uso de controladores Proporcional Integral Derivativo (PID) ou até mesmo o uso de técnicas *on-off* (AFRAM; JANABI-SHARIFI, 2014). Razões para isto, são o elevado custo para a implementação das estratégias de controle preditivo com base em modelos e a complexidade matemática destes controladores, os quais requerem a utilização de mão de obra especializada.

Como o consumo de energia no setor de ar condicionado é muito elevado, é necessário mostrar que o emprego de controladores preditivos, amplamente usados na indústria química é factível no setor de ar condicionado, contribuindo-se, desta forma, para a disseminação desta importante tecnologia. Ou seja, é imperativo que estudos sejam feitos mostrando a viabilidade técnica da implementação de estratégias de controle avançado e mostrando os benefícios que podem ser alcançados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O condicionamento de ar submete o ar de um ambiente a uma temperatura e a um nível de umidade desejados (YAMANE; SAITO, 1986). No contexto da eficiência energética, almeja-se garantir o controle das condições nas zonas a serem climatizadas e simultaneamente reduzir o consumo energético, o que pode ser alcançado mediante um adequado controle do sistema ou efetivamente incorporando-se no objetivo de controle a minimização energética.

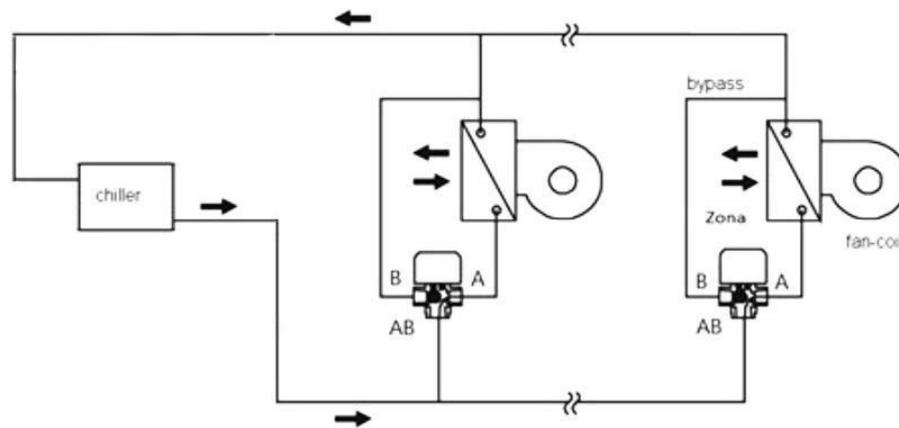
2.1 O EDIFÍCIO MODERNO

O sistema de ar condicionado do Edifício Moderno foi concebido por Araújo (2016). O Edifício Moderno é uma edificação de grande porte localizada na cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais. O sistema de ar condicionado atende uma área de 19193,4 m² e considerou-se no projeto do sistema de ar condicionado apenas o controle da temperatura sem levar em consideração o controle da umidade relativa, prática comum que visa à redução de custos fixos. O condicionamento do ar no Edifício Moderno é realizado por um sistema de ar condicionado central do tipo ar-água, que é um dos tipos de sistemas de ar condicionado mais eficaz que existe (ZHAO; YU, 2017). O projeto do sistema de ar condicionado do tipo ar-água foi dimensionado por Araújo (2016) por meio do software de

simulação comercial *Hourly Analysis Program* (HAP) ® 5.10. O projeto contempla o uso de 3 *chillers* para fornecer água gelada para *fancoils* que fornecem ar frio a ser insuflado nas diversas zonas do edifício. Cada *chiller* tem carga nominal de 1064,4 kW.

Pellegrini *et al.* (2018) propuseram um modelo matemático para representar a operação do sistema de ar condicionado do Edifício Moderno, elaborando um simulador de processos. Salienta-se que Pellegrini *et al.* (2018) elaboraram um modelo parcial do edifício completo que contempla a operação de um *chiller* que fornece água fria a 35 *fancoils*, sendo que cada *fancoil* fornece ar frio a uma grande zona. No modelo de Pellegrini *et al.* (2018), as zonas foram modeladas como regiões homogêneas que recebem ar frio com vazão constante de *fancoils*. Ou seja, a temperatura da corrente de ar varia de modo a controlar a temperatura do ar nas zonas. Água gelada proveniente dos *chillers* é enviada por meio de uma tubulação para os *fancoils* onde ocorrerá o resfriamento do ar. Na entrada de cada *fancoil*, há uma válvula de três vias e por meio do controle do *bypass* de água é possível controlar a temperatura da corrente de ar que entra em cada *fancoil*, ou seja, o controle da temperatura das zonas climatizadas é feita pela manipulação da fração de *bypass*, como apresentada na Figura 1 a seguir. Este esquema de controle para o sistema de ar condicionado foi proposto por Pellegrini *et al.* (2018). Os autores consideraram 34 zonas idênticas e uma diferente em tamanho.

Figura 1: Esquema do sistema de ar condicionado



Fonte: Adaptado de Pellegrini (2018)

O modelo de capacitância global proposto por Pellegrini *et al.* (2018) para a modelagem das zonas foi aprimorado por Silva (2020), sendo apresentado na Equação (1). A carga térmica de equipamentos, iluminação e de ocupação das pessoas foi arbitrada por Silva (2020) como sendo 40% da carga térmica total de cada zona projetada por Araújo (2016). Empregaram-se, também, modelos de capacitância global para representar a operação dos *fancoils*, sendo o coeficiente global de transferência de calor nestes, assumido constante.

$$\frac{dT_{ret}}{dt} = \frac{\dot{m}_{ar}(cp_{AS} + ua \cdot cp_{va})(T_{in} - T_{ret}) + U_z A_z (BS - T_{ret}) + q_z}{m_z (cv_{AS} + ua \cdot cv_{va})} \quad (1)$$

Em que:

\dot{m}_{ar} = Vazão mássica de ar insuflado na zona (kg/s)

cp_{AS} = Calor específico a pressão constante para o ar seco (kJ/kgK)

ua = Umidade absoluta do ar insuflado (kg de água/kg de ar seco)

cp_{va} = Calor específico a pressão constante para o vapor de água (kJ/kgK)

T_{in} = Temperatura da corrente de ar insuflada (K)

T_{ret} = Temperatura da corrente de ar de retorno (K)

q_z = Carga térmica devida a equipamentos, iluminação e às pessoas (kW)

m_z = Massa de ar na zona (kg)

cv_{AS} = Calor específico a volume constante para o ar seco (kJ/kgK)

cv_{va} = Calor específico a volume constante para o vapor de água (kJ/kgK)

U_z = Coeficiente global de troca térmica entre a zona e o ambiente externo (W/(m²·K))

A_z = Área de troca térmica através das paredes da zona (m²)

BS = Temperatura de bulbo seco do ar ambiente externo (K)

Para avaliar o volume de ar nas zonas e a massa de ar e de água nos trocadores de calor Pellegrini *et al.* (2018) empregaram informações presentes no trabalho de Araújo (2016) e em catálogos comerciais. O modelo do sistema de compressão a vapor de Pellegrini *et al.* (2018) é bastante rigoroso, tendo como principais restrições as hipóteses de se ter controle perfeito da pressão de operação do condensador, coeficientes globais de transferência de calor no evaporador e condensador constantes e o emprego da hipótese de gás ideal para o fluido refrigerante na condição de vapor saturado ou superaquecido.

Silva (2020) incorporou ao simulador desenvolvido por Pellegrini *et al.* (2018) controladores do tipo PID para controlar a operação do sistema de ar condicionado. No trabalho dele, consideraram-se dois tipos de malhas de controle: O primeiro tipo corresponde à malha de controle da temperatura da água na saída do evaporador, para a qual a ação de controle é a abertura da válvula de expansão eletrônica (EEV). O outro tipo corresponde a 35 malhas idênticas em estrutura que relacionam a temperatura das zonas com a vazão de *bypass* nos *fancoils*. Silva (2020) mostrou que o desempenho dos controladores PID era adequado enquanto o sistema operava dentro da faixa de projeto.

Contudo para condições fora do projeto (*off-design*), os controladores PID não conseguiram manter a temperatura das zonas controladas.

2.2 CONTROLADORES

Pode-se assegurar as condições ambientais em diversas zonas através da manipulação de algumas variáveis chamadas, na teoria de controle, de variáveis manipuladas, que são ajustadas pelo controlador para minimizar os erros entre as medições das variáveis controladas e o valor referencial. Essa forma de controle corresponde ao conceito de controle por retroalimentação. Nos itens 2.2.1 e 2.2.2 trata-se de dois tipos de controladores distintos empregados neste trabalho.

2.2.1 Controladores PID

Controladores do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) são ainda hoje amplamente utilizados em sistemas modernos de controle (ZHAO; YU, 2017). Esse controlador tem como objetivo calcular ações de controle que correspondem aos valores que serão acrescentados ou decrescidos das variáveis manipuladas a partir do cálculo do erro entre o valor estimado e o valor de referência, chamado de *setpoint*.

Existem diversas formas de implementação de um controlador PID. Pode ser mais simples com apenas a ação proporcional sendo implementada, porém quando os erros persistem ao longo do tempo pode ser necessária uma abordagem mais complexa, passa-se então a utilizar a ação de integrar e derivar o erro entre a variável controlada e o seu *setpoint* para manter o sistema adequadamente sob controle. Segundo Zhao e Yu (2017) os controladores PID são simples, de fácil implementação e usualmente de forte robustez. Para Visioli (2004), essa simplicidade agregada a resultados satisfatórios, sobretudo quando técnicas de sintonia aprimoradas são utilizadas, levam esse controlador a ser o mais utilizado no setor industrial.

Dentre os procedimentos de sintonia desenvolvidos destaca-se a metodologia de síntese baseada nos Controladores de Modelo Interno (IMC) proposta por Garcia e Morari (1982) e posteriormente por Riviera *et al.* (1986). Nesse método o primeiro passo é identificar um modelo linear do processo e depois, empregando-se a metodologia de sintonia IMC obtêm-se os parâmetros do controlador. No segmento de ar condicionado, essa técnica passou a ser utilizada recentemente para controle da temperatura e da umidade em uma zona (XIAOCHEN; CHUNXUAN, 2014).

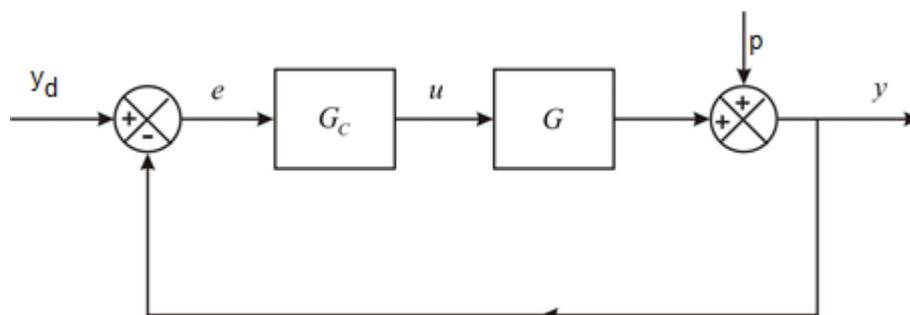
Uma forma tradicional de se implementar controladores analógicos PID é apresentada pela Equação (2), que é chamada de Lei de Controle do Controlador PID e observa-se que nela a ação de controle (Δu) é proporcional ao erro ($e(t_a)$) avaliado num

instante t_a , à integral do erro e à derivada do erro. Nesta equação, os parâmetros K_c , τ_I e τ_d são os parâmetros sintonizáveis do controlador PID, sendo, respectivamente, denominados de ganho proporcional, integral e derivativo que devem ser estabelecidos na etapa de síntese do controlador. O erro é definido como sendo a diferença entre a medida da variável que se quer controlar e o valor desejado para ela, chamado de valor de referência ou *setpoint*. A ação de controle é normalmente definida como sendo a variável manipulada menos um valor de referência, o qual pode ser, por exemplo, o valor da variável no ponto nominal de projeto.

$$\Delta u = K_c \left(e(t_a) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^{t'} e(t) dt + \tau_d \frac{de}{dt} \Big|_{t=t_a} \right) \quad (2)$$

Em uma malha convencional de controle, como a representada da Figura 2, a função de transferência G_c corresponde à lei de controle dada pela Equação (2) no domínio de Laplace e G a função de transferência no domínio de Laplace do processo a ser controlado. O procedimento de obtenção dos parâmetros do controlador PID é bem documentado na literatura para modelos simples de processo G_m (SEBORG, 2004), os quais representam o processo real descrito por G . A Tabela 1 apresenta os parâmetros de sintonia do controlador PID para modelos de 1ª ordem, como documentado na literatura (SEBORG, 2004). As expressões para os parâmetros dos controladores PID apresentam um grau de liberdade para a síntese dos controladores, dado pelo parâmetro λ . A metodologia IMC para a síntese de controladores PID consiste assim, na identificação de um modelo de ordem baixa, como um modelo de 1ª ordem. Para este, a etapa de identificação do modelo G_m corresponde à determinação dos parâmetros K e τ , denominados de ganho do processo e constante de tempo. Estabelecidos estes, obtêm-se os parâmetros do controlador PID em função do parâmetro ajustável λ . Simulam-se as respostas em malha fechada, determinando-se o valor do parâmetro λ que fornece o desempenho considerado adequado.

Figura 2: Esquema de uma malha convencional de controle



Fonte: Própria (2020)

Tabela 1: Parâmetros de controladores PID sintonizados pelo procedimento IMC

Constantes do controlador			
Modelo do processo	Proporcional	Integral	Derivativa
$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K\lambda}$	τ	-

Fonte: Adaptado de Seborg (2004)

2.2.2 Controladores MPC

Controladores preditivos, usualmente representados pela sigla MPC (*Model Predictive Control*) são estratégias de controle avançado que fazem uso de um modelo matemático para a predição de erros futuros entre as variáveis controladas e seus *setpoints*, os quais são minimizados pela predição de como se deve manipular o processo, tendo, usualmente, um melhor desempenho do que as estratégias convencionais de controle como os controladores PID (ZHAO; YU, 2017).

Existem muitas formulações de controladores preditivos. As diferenças residem tanto na formulação da função objetivo que se será minimizada para o cálculo das ações de controle, como na estrutura do modelo de predição. Empregam-se, em geral, modelos lineares identificados do processo de baixa ordem. Algumas variáveis são controladas por faixas, enquanto outras são controladas em *setpoints* fixos. Tanto as variáveis manipuladas, como as ações de controle e variáveis controladas ou monitoradas são sujeitas a restrições de limites. Há formulações em que o efeito de distúrbios é incorporado nas predições e também existem controladores MPC que incorporam na função objetivo do controlador, parâmetros econômicos associados normalmente a variáveis que medem o consumo energético no processo. O controlador MPC proposto neste trabalho é descrito no item de Metodologia.

3. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foi feita inicialmente uma revisão bibliográfica para compreensão dos diferentes tipos de sistemas de condicionamento de ar e de controladores e estudaram-se os trabalhos de Araújo (2016), Pellegrini et al. (2018) e Silva (2020). Este trabalho continua os estudos iniciados pelos autores citados a partir de uma pesquisa experimental envolvendo a modelagem matemática e simulação do sistema de ar condicionado do Edifício Moderno e de seu sistema de controle no ambiente de programação do simulador MATLAB® R2006b.

Após o estudo dos trabalhos citados no parágrafo precedente, procedeu-se com a identificação de modelos lineares de 1ª ordem adequados à formulação do controlador MPC proposto neste trabalho. Optou-se pela representação do modelo de 1ª ordem no domínio

do tempo, sendo os modelos empregados tanto para a sintonia do controlador PID como pelo controlador preditivo apresentados na Equação (3) e na Equação (4).

$$y(t) = K_{bp}M_{bp} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{bp}}}\right) + K_{eev}M_{eev} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{eev}}}\right) + K_{rpm}M_{rpm} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{rpm}}}\right) \quad (3)$$

Sendo:

$y(t)$ = Variável controlada num instante t menos o seu valor de referência.

K_{bp}, K_{eev}, K_{rpm} = Ganhos do processo

M_{bp}, M_{eev}, M_{rpm} = Magnitude da perturbação aplicada na variável manipulada

t = Instante de tempo

$\tau_{bp}, \tau_{eev}, \tau_{rpm}$ = Constante de tempo do modelo de 1ª ordem

$$T_{ag}(t) = K_{a,bp}M_{a,bp} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{a,bp}}}\right) + K_{a,eev}M_{a,eev} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{a,eev}}}\right) + K_{a,rpm}M_{a,rpm} \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_{a,rpm}}}\right) \quad (4)$$

Sendo:

$T_{ag}(t)$ = Temperatura da água predita num instante t menos o seu valor de referência.

$K_{a,bp}, K_{a,eev}, K_{a,rpm}$ = Ganhos do processo

$M_{a,bp}, M_{a,eev}, M_{a,rpm}$ = Magnitude da perturbação aplicada na variável manipulada

t = Instante de tempo

$\tau_{a,bp}, \tau_{a,eev}, \tau_{a,rpm}$ = Constante de tempo do modelo de 1ª ordem

Para a obtenção dos ganhos de processo e constantes de tempo, perturbaram-se separadamente as variáveis manipuladas e a partir das respostas, os modelos foram identificados, minimizando-se a integral do erro quadrático (ISE) entre a resposta do processo e aquela predita pelo modelo de 1ª ordem. A integral do erro quadrático (ISE) é apresentada na Equação (5). Salienta-se que se perturbaram simultaneamente todas as frações de *bypass* e assim, tendo-se em vista a premissa de comportamento linear para o processo, o ganho do processo para a resposta da temperatura da água foi dividido pelo número de zonas, abordagem que diferiu de Silva (2020).

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (5)$$

Em que:

$e(t)$ = Erro no instante t , sendo o erro avaliado como a medida da variável do processo menos o valor predito pelo modelo.

Os ganhos e constantes de tempo identificados neste trabalho foram empregados para se obter os parâmetros do controlador PID, conforme procedimento descrito no referencial teórico. Os valores do parâmetro ajustável λ usados para a determinação dos parâmetros do controlador foram de 100 e 2000, respectivamente, para a malha de controle da água na saída do evaporador e para as malhas de controle das temperaturas de ar nas zonas. Todos os controladores de todas as 35 malhas de controle da temperatura do ar foram sintonizados da mesma forma, não obstante a 35ª zona ser menor.

Em seguida, formulou-se o controlador MPC deste trabalho, o qual foi incorporado ao simulador desenvolvido por Pellegrini *et al.* (2018). Neste trabalho, empregaram-se os mesmos métodos numéricos usados por Pellegrini *et al.* (2018) para simular o modelo matemático, a saber o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para a resolução das equações diferenciais ordinárias com passo de integração máximo de 1 segundo e o método de Programação Quadrática Sucessiva (SQP) para a resolução de sistemas de equações algébricas não lineares. Este método também foi usado para a resolução do problema de otimização do controlador preditivo.

Neste trabalho, considerou-se para a função objetivo do controlador MPC a Equação (6), a qual foi adaptada da proposta de Wallace *et al.* (2012). A primeira parcela tem a função de minimizar o erro quadrático ponderado pelo parâmetro α_i entre as previsões da temperatura do ar das 35 zonas e seus valores de referência. A segunda parcela é para suavizar as ações, objetivando a estabilização do controlador, evitando-se mudanças bruscas no sistema e a última parcela, adaptada de Wallace *et al.* (2012) visa eliminar o *offset*, tendo assim uma função semelhante à ação integral dos controladores PID. São, desta forma parâmetros de sintonia do controlador MPC: ρ , α_i , γ_i e δ_i , além do período de intervenção, denotado como T_s neste trabalho. Este último corresponde ao intervalo de tempo transcorrido entre as chamadas do controlador MPC.

$$\min_{\Delta u(k)} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^{nc} \alpha_i (y_i(k) - y_i^{sp} + erro_{pr,i})^2 + \sum_{i=1}^{nu} \gamma_i \Delta u_i^2 + \sum_{i=1}^{nc} \delta_i erro_{ac,i} \quad (6)$$

Sendo:

p = Horizonte de previsão, corresponde ao número de instantes futuros em que as variáveis controladas são preditas (s)

nc = Número de variáveis controladas

nu = Número de variáveis manipuladas

$y_i(k)$ = Resposta da variável predita pelo modelo linear para a temperatura da zona i no instante k (°C) conforme o modelo dado pela Equação (3)

y_i^{sp} = Temperatura de referência (°C) para a $i^{ésima}$ variável controlada

Δu_i^2 = Variação na $i^{ésima}$ variável manipulada

α, γ, δ = Parâmetros de sintonia do controlador

$erro_{pr,i}$ = erro entre o valor predito para o instante atual e o valor medido da variável calculada

$erro_{ac,i}$ = erro acumulado para cada variável controlada i . Ou seja, a cada instante em que as ações de controle são calculadas, acrescenta-se ao erro acumulado a diferença entre o valor medido da variável controlada e o seu *setpoint*.

Observando-se a Equação (6), percebe-se que para se minimizar a função objetivo, calculam-se as ações de controle. Ao problema de otimização do controlador MPC, incorporam-se também restrições. Na Equação (7) e na Equação (8) são apresentadas restrições que se repetem para cada variável manipulada considerada, quais sejam, frações de *bypass*, abertura da EEV e rotação do compressor. Assim, as ações de controle são restritas e bem como o valor da variável manipulada de modo que limitações físicas não sejam violadas. As frações de *bypass* foram limitadas entre os seus limites físicos, ou sejam entre 0 e 1. A fração de abertura da EEV foi limitada entre 0,4 ou 0,5 e 1 e a rotação foi limitada entre 40 e 60 Hz. Limitou-se o valor mínimo da EEV de modo a não propiciar uma redução do superaquecimento do fluido refrigerante na saída da evaporadora, o que poderia ocasionar a presença de líquido na entrada do compressor, comprometendo a sua integridade física. Os limites na rotação do compressor foram estabelecidos arbitrariamente.

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max} \quad (7)$$

Sendo:

u_{min} = Limite inferior

u_{max} = Limite superior

$$|\Delta u(k)| \leq \Delta u_{max} \quad (8)$$

Em que:

Δu = Variação na variável manipulada

Δu_{max} = Variação máxima permitida

Os valores empregados para se limitar as ações de controle são documentados no item de resultados. Por meio da Equação (9), limitam-se os valores para a temperatura da água na saída do evaporador. Algumas razões justificam este procedimento. Diferentemente de uma prática comum de se controlar a temperatura da água em um valor fixo como feito,

também, por Wallace (2012), optou-se por deixar esta variável livre de modo que o controlador tivesse graus de liberdade para se adaptar a diferentes condições operacionais do sistema de ar condicionado, inclusive a condições *off-design* (fora de projeto). Desta forma, para se evitar o congelamento da água ou valores de temperatura da água que ocasionariam a existência de líquido refrigerante na entrada do compressor, limitaram-se valores da temperatura da água em dois instantes de tempo k , quais sejam, no 1º instante futuro e no $p^{\text{ésimo}}$ instante futuro predito pelo controlador a partir de cada chamada do mesmo. Os limites máximos e mínimos adotados no trabalho foram 6,9°C ou 6,7°C e 5,5°C. A predição para os valores da temperatura da água é feita pela Equação (9).

$$Tag_{min} \leq Tag(k) \leq Tag_{max} \quad (9)$$

Em que:

Tag_{min} = Temperatura mínima da água

Tag_{max} = Temperatura máxima da água

Assim, percebe-se que a estrutura do controlador MPC concebida neste trabalho difere da formulação de Wallace (2012). Corresponde a um controlador multivariável formulado como um problema da programação não linear que permite que diferentes variáveis do processo sejam usadas conjuntamente para manter o sistema controlado.

Após concluir a programação do controlador, efetuaram-se simulações em malha fechada para observar os resultados do controlador proposto, variando-se seus parâmetros de sintonia. As respostas dos controladores PID e MPC foram comparadas. Os resultados foram organizados na forma de gráficos, em que podem ser avaliadas as variáveis de interesse e a capacidade de controle do sistema pelos dois controladores PID e MPC. E por fim, a partir da discussão do desempenho comparativo de ambos os controladores, efetuaram-se a conclusão do trabalho, apresentando-se sugestões para trabalhos futuros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PARÂMETROS DOS MODELOS IDENTIFICADOS E DO CONTROLADOR PID

Os parâmetros identificados em relação à temperatura do ar das zonas e em relação à temperatura da água fria que sai do evaporador estão na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 2: Parâmetros da temperatura do ar nas zonas para o modelo de 1ª ordem

Parâmetros	Temp. do ar nas zonas em relação à abertura da EEV	Temp. do ar nas zonas relação à fração do bypass	Temp. do ar nas zonas relação à rotação
$K(^{\circ}\text{C})$	-2,7928	0,3197	-0,0476
τ (s)	539,8	569,6	543,8
M	0,018	0,1	1,5

Fonte: Própria (2020)

Tabela 3: Parâmetros da temperatura da água para o modelo de 1ª ordem

Parâmetros	Temp. da água em relação à abertura da EEV	Temp. da água em relação à fração do <i>by-pass</i>	Temp. da água em relação à rotação
$K(^{\circ}\text{C})$	-6,4199	-0,0740	-0,1093
τ (s)	186,4	4	191,6
M	0,018	0,1	1,5

Fonte: Própria (2020)

Na Tabela 4 apresentam-se os parâmetros do controlador PID empregados neste trabalho.

Tabela 4: Novos parâmetros identificados para o controlador PID

Critério de erro	Malha de controle da temperatura da água na saída do evaporador			Malhas de controle da temperatura de ar que entra em cada <i>fancoil</i>		
	Kc	Ti	Td	Kc	Ti	Td
ISE	0,29035	37,28	-	-0,8907	113,92	-

Fonte: Própria (2020)

4.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS CONTROLADORES PID E MPC

Para as simulações alguns valores foram fixados como, por exemplo, o número de zonas controladas, o número de variáveis manipuladas, a temperatura do ar inicial e de *setpoint*. Os valores dos pesos de normalização também foram fixados e são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores fixos nas simulações

Variável	Valores
α	10000000
γ_{bypass}	0
γ_{EEV}	1000
$\gamma_{rotação}$	1000
δ	1000
$T_{S_{mpc}}$	30

Fonte: Elaborada pela autora

Para a sintonia do controlador MPC efetuaram-se várias simulações com parâmetros de sintonia diferentes. Na Tabela 6 apresentam-se três conjuntos de parâmetros de sintonia usados para avaliar o desempenho do controlador MPC. Outros parâmetros de sintonia foram testados, mas por problemas de limitação de espaço, não serão apresentados.

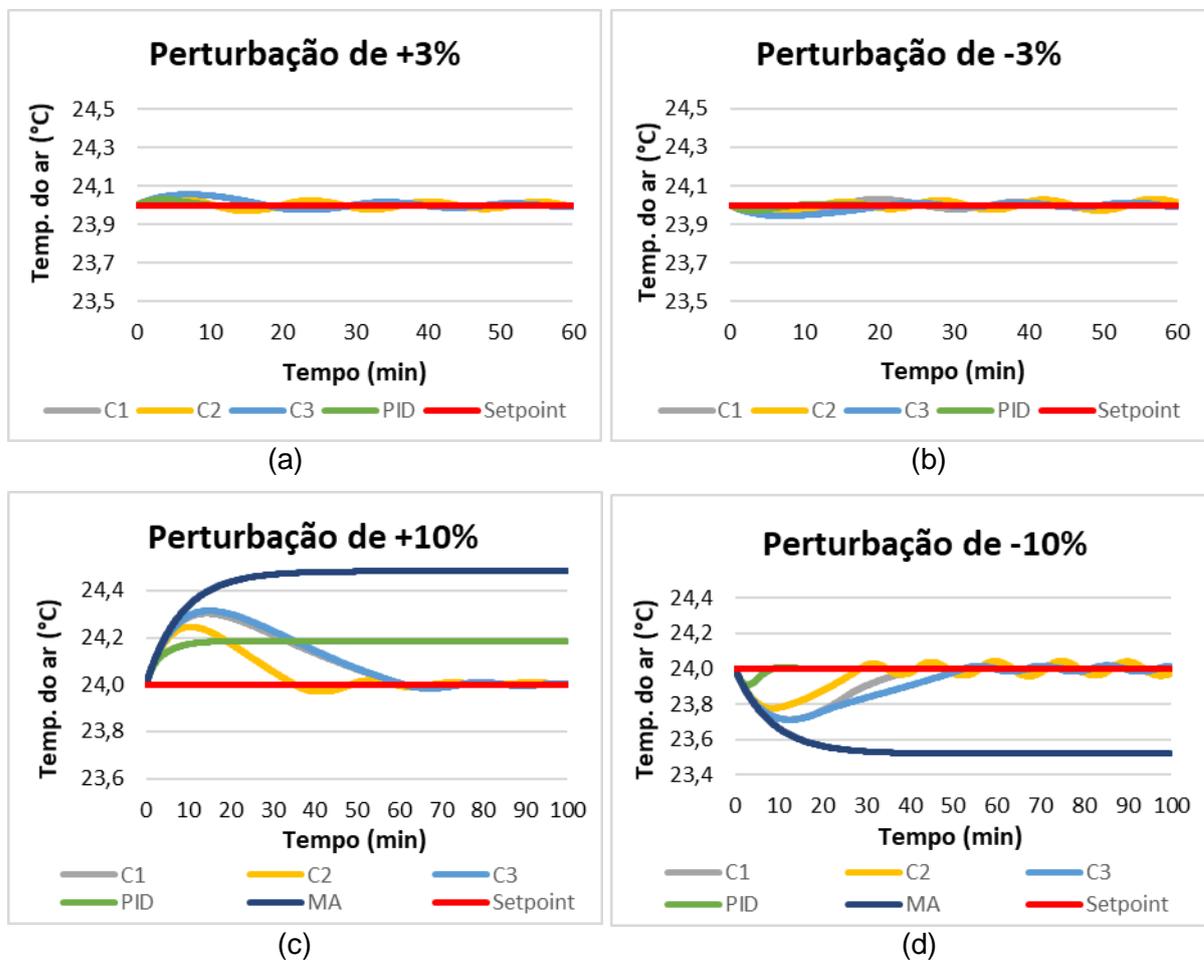
Tabela 6: Parâmetros para sintonia do MPC

Conjunto	p	$\Delta u_{bypass_{max}}$	$\Delta u_{EEV_{max}}$	$\Delta u_{rotação_{max}}$	$T_{ag_{min}}$	$T_{ag_{max}}$
C1	45	0,002	0,002	0,02	5,5	6,9
C2	40	0,004	0,004	0,04	5,5	6,7
C3	15	0,002	0,002	0,02	5,5	6,7

Fonte: Própria (2020)

Para as simulações do comportamento do sistema em malha fechada, consideraram-se três cenários, como feito em Silva (2020). No primeiro cenário foram feitas perturbações de $\pm 3\%$ e $\pm 10\%$ na carga térmica gerada por equipamentos, iluminação e pessoas. Nessas simulações o *setpoint* da temperatura do ar das zonas foi mantido em 24°C . No controlador PID, o *setpoint* da água do evaporador foi mantido no valor de projeto em $6,7^{\circ}\text{C}$. Os resultados da temperatura do ar nas zonas para perturbações de $\pm 3\%$ são mostrados na Figura 3 (a) e na Figura 3 (b) e as de $\pm 10\%$ na Figura 3 (c) e Figura 3 (d).

Figura 3: Temperatura da água com perturbações devidas à ocupação nas zonas de $\pm 3\%$ e $\pm 10\%$



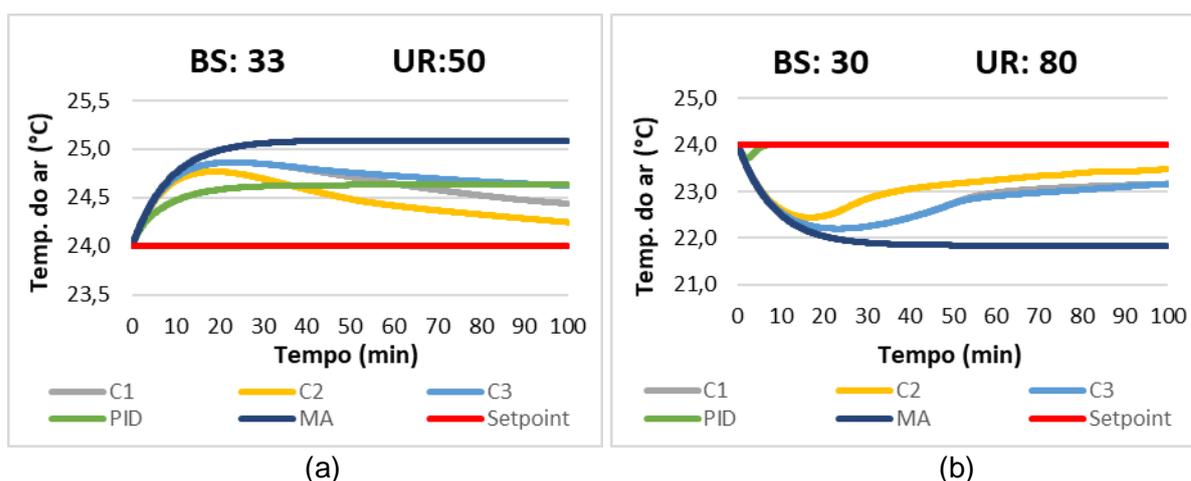
Fonte: Própria (2020)

Observando-se a Figura 3, percebe-se que os controladores MPC e PID conseguem acomodar as perturbações de $\pm 3\%$ e de -10% na carga térmica devidas à ocupação e apenas o controlador MPC consegue manter as zonas na temperatura especificada para a

perturbação *off-design* de +10%. Embora, observam-se oscilações nas respostas do controlador preditivo sintonizado de diferentes formas, que parecem sugerir que a operação esteja no limite de estabilidade, deve-se atentar para a pequena variação no valor da temperatura das zonas. As oscilações devem, assim, ser devidas a problemas numéricos e não a questões de estabilidade do controlador. Percebe-se que o projeto do sistema de ar condicionado foi feito a naturalmente rejeitar pequenas perturbações na ocupação. Os parâmetros de sintonia do controlador MPC apresentados visaram minimizar oscilações e assim levaram a respostas relativamente lentas, contudo a máxima amplitude de variação da temperatura ocorreu nos primeiros 20 min de operação, sendo inferior a $0,4^{\circ}\text{C}$, valor este aceitável.

No segundo cenário foi avaliado o efeito das condições ambientais no desempenho do sistema de ar condicionado. Nessas simulações o *setpoint* da temperatura do ar das zonas também foi mantido em 24°C e para o controlador PID, manteve-se o *setpoint* da água do evaporador em $6,7^{\circ}\text{C}$. Para isso foram consideradas duas situações, uma em que a temperatura de bulbo seco do ar ambiente é de 33°C com uma umidade relativa de 50% e outra em que a temperatura de bulbo seco é 30°C com a umidade relativa de 80%. Ambas as condições correspondem a dias em que a entalpia específica do ar é superior à da condição de projeto. O primeiro caso considerado é relacionado a um dia que estará mais quente e menos úmido que o dia considerado como sendo a pior situação no ano no projeto e, no segundo caso, tem-se um dia quente com uma temperatura elevada, mas inferior ao do projeto e muito úmido. É um dia que causa uma sensação térmica bastante desagradável, sendo desejável o condicionamento das zonas. Os resultados da temperatura do ar na situação de 33°C com 50% de umidade é apresentado na Figura 4 (a) e na situação de 30°C e 80% de umidade na Figura 4 (b). São apresentadas, também nas figuras, as respostas em malha aberta e as respostas para os dois controladores.

Figura 4: Temperatura do ar frente às perturbações nas condições ambientais

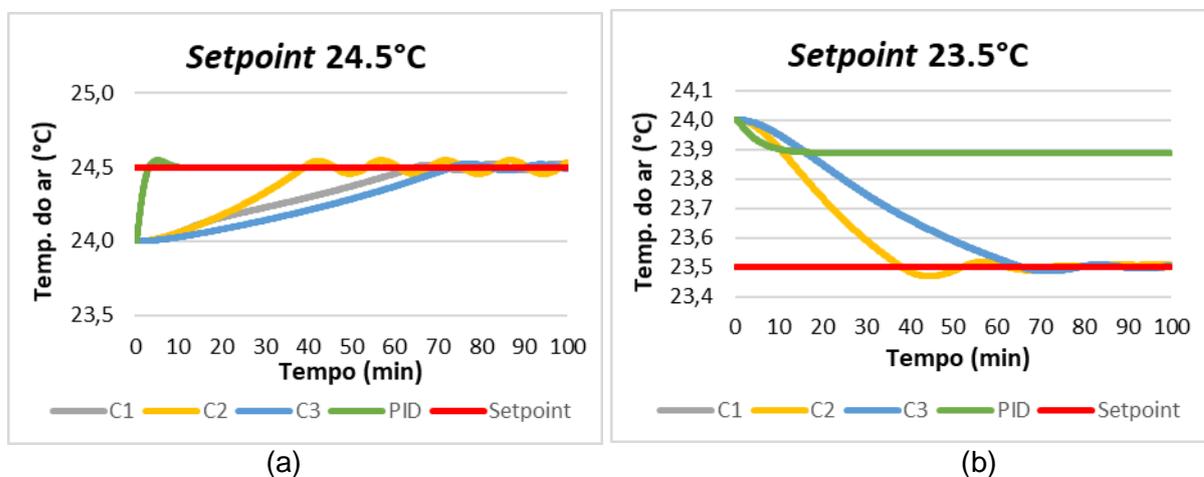


Fonte: Própria (2020)

Para a condição de temperatura externa de 33°C e 50% de umidade relativa, o controlador PID parece estabilizar em torno de 24,6°C enquanto os controladores MPC continuam diminuindo a temperatura, estabilizando-a em torno de 24,2°C. Na condição de 30°C e 80% de umidade relativa, o PID se mostra bem mais rápido e estabiliza em 24°C enquanto o MPC vai estabilizando com temperaturas mais baixas em torno de 23,4°C após 80 minutos. A abertura da EEV e a rotação do compressor encontram-se em seus limites para este cenário, o que juntamente com a dinâmica lenta e ganhos pequenos das zonas, pode contribuir para esta queda de desempenho.

Para o terceiro cenário foi feita uma mudança na temperatura de *setpoint* do ar de 24°C para 23,5°C e 24,5°C. Objetivou-se verificar a capacidade dos controladores de atenderem a demandas de variação dos *setpoints* das zonas. Os resultados da temperatura do ar nas zonas são mostrados na Figura 5 (a) e na Figura 5 (b).

Figura 5: Temperatura do ar nas zonas com mudanças no *setpoint*



Fonte: Própria (2020)

Na mudança de setpoint para 24,5°C pode-se observar que o PID estabiliza rapidamente atingindo a temperatura de setpoint e o MPC tem uma resposta mais lenta, mas consegue alcançar os 24,5°C. Já na mudança para 23,5°C observa-se que o PID não consegue atender a demanda de variação e estabiliza em 23,9°C enquanto o MPC atinge os 23,5°C em torno de 1 hora.

Com relação à análise comparativa das três sintonias empregadas para o controlador preditivo, percebe-se que o horizonte de controle de 15 não é suficiente. Isto faz sentido porque tendo-se em mente o período de amostragem de 30s, não se alcança o tempo de estabilização previsto pelas constantes de tempo do processo. Comparando-se os horizontes de predição de 40 e 45, percebe-se que o horizonte de controle de 40 promove a estabilização necessária.

Salienta-se que na estrutura do controlador proposto neste trabalho, não se incorporou a predição de distúrbios medidos e assim, espera-se poder melhorar o desempenho do atual controlador incorporando-se modelos de predição do efeito da variação da ocupação e das condições ambientais. Finalmente, ressalta-se que o período de amostragem grande de 30s possibilita a execução do controlador preditivo e reduz o número de manipulações no processo, minimizando-se o desgaste dos elementos finais de controle.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste projeto, foi realizada a síntese de um controlador MPC para o controle da temperatura em 35 zonas climatizadas por um sistema de ar condicionado de uma edificação comercial de grande porte chamada de Edifício Moderno. Estruturou-se o controlador preditivo como um problema da programação não linear e restrições operacionais foram explicitamente modeladas. O controlador foi configurado para controlar 35 temperaturas das zonas em *setpoints* fixos e a temperatura da água do evaporador por faixas, manipulando 37 variáveis simultaneamente.

O desempenho simulado do controlador MPC proposto foi comparado ao do controlador PID, sintonizado pela técnica IMC. As simulações foram feitas empregando-se a modelagem do Edifício Moderno proposta por Pellegrini *et al.* (2018) e Silva (2020).

Os resultados mostram que o controlador preditivo desempenhou-se adequadamente para todas as situações a que foi exposto, inclusive condições fora de projeto, diferentemente do controlador PID que não conseguiu acomodar grandes perturbações na ocupação ou nas condições ambientais. As simulações mostram também que há espaço para se melhorar a sintonia do controlador preditivo. A enorme quantidade de parâmetros sintonizáveis do controlador preditivo torna a sua síntese um processo não é trivial.

6. REFERÊNCIAS

AFRAM, A.; JANABI-SHARIFI, F. **Review of modeling methods for HVAC systems.** Applied Thermal Engineering, [S.l.], v.67, p. 507-519, 2014

ALI, M.; VUKOVIC, V.; SAHIR, M. H.; FONTANELLA, G. **Energy analysis of chilled water system configuration using simulation based optimization.** Energy and Building, [S.l.], v.59, p. 111-112, 2013.

ARAÚJO, N. M. **Estudo comparativo do projeto de um sistema VRF com um sistema ar-água para o condicionamento de ar em um edifício comercial de grande porte.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

CAIADO, L. **Desafios da eficiência energética no Brasil.** Disponível em: <<https://cebds.org/desafios-eficiencia-energetica-no-brasil/#.XoPT-4hKjIU>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

EPE. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética.** EPE, 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2020.

GARCIA, C. E.; MORARI, M. **Internal Model Control I: A unifying review and some new results.** Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., [S.I.], v. 21, n.21, p. 308-323, 1982.

IEA. **Tracking Buildings 2020.** IEA, Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

IEA Data Services. **Electricity consumption, Brazil 1990-2017.** IEA, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics?country=BRAZIL&fuel=Energy%20consumption&indicator=Electricity%20consumption>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

KILLIAN, M.; KOZEK, M. **Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings.** Buildings and Environment, [S.I.], v. 105, p. 403-412, 2016.

LI, X.; LI, Y.; SEEM, J.E.; LI, P. **Dynamic modeling and self optimizing operation of chilled water systems using extremum seeking control.** Energy Buildings, [S.I.], v. 58, p. 172-182, 2013

LJUNG, L. **System identification: theory for the user.** 2nd ed. Prentice Hall, 1998, 511 p.

PELLEGRINI, R.L.S.; DE ARAÚJO, N.M.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M. **Modelling a water-air conditioning system of a large commercial building for energy consumption evaluation.** Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, v. 44, Part C, p. 1963-1968, 2018

RIVIERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. **Internal Model Control 4: PID Controller Design.** Ind. Eng. Proc. Des. Dev., [S.I.], v. 25, n. 1, p. 252-265, jan. 1986.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics and control.** 2nd ed., NJ: John Wiley & Sons, 2004. 736 p.

SILVA, A. F. **Aplicação da sintonia IMC em controladores PID do sistema de ar condicionado do Edifício.** Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

VAKILOROAYA, V.; SAMALI, B.; FAKHAR, A.; PISHGHADAM, K. **A review of different strategies for HVAC energy saving.** Energy Conversion and Management, [S.I.], v.77, p. 738-754, 2014.

VISIOLI, A. **A new design for a PID plus feedforward controller.** Journal of Process Control, [S.I.], v. 14, n.4, p. 457-463, jun. 2004.

XIAOCHEN, Z.; CHUNXUAN, Y. **Multivariable IMC-PID within air-conditioned room temperature and relative humidity control system.** In: 33rd. CHINESE CONTROL CONFERENCE., p. 3609-3613. Nanjing, 2014, Proceedings.

WALLACE, M.; McBRIDE, R.; AUMI, S.; MHASKAR, P.; HOUSE, J.; SLASBURY, T. **Energy efficient model predictive building temperature control.** Chemical Engineering Science, [S.I.], v. 69, p. 45-58, 2012.

YAMANE, E.; SAITO, H. **Tecnologia do condicionamento de ar**. Ed. Edgard Blucher LTDA., São Paulo, 1986.

ZHAO, Z.; YU, N. **The application of advanced control technologies in air conditioning system – a review**. Advances in Building Energy Research, [S.I.], v.11, n. 1, p. 52-66, 2017.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. **Optimum settings for automatic controllers**. Trans. ASME, [S.I.], v. 64, p. 759-765, nov. 1942.

Contatos: catarinags97@gmail.com e miriam.gouvea@mackenzie.br