

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM CONTROLADOR PREDITIVO EM UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO DE UM PRÉDIO COMERCIAL<sup>1</sup>**

Catarina Gomes dos Santos – catarinags97@gmail.com

Míriam Tvrzská de Gouvêa (Orientadora) – miriam.gouvea@mackenzie.br

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta a síntese de um controlador preditivo para controlar a temperatura de operação de 8 andares do Edifício Moderno, uma edificação comercial de grande porte. O sistema de ar condicionado considerado é do tipo ar-água com vazão de água variável e possui *fancoils* específicos para condicionar o ar externo empregado para a renovação do ar nos andares climatizados. O controlador preditivo foi modelado como um problema da programação quadrática, fazendo uso de um modelo linear do processo representado na forma de espaço de estados. Ao todo são controladas 16 temperaturas em *setpoints* fixos e uma temperatura por faixa e há 35 variáveis manipuladas. Para avaliar a operação do controlador proposto, considerou-se a sua capacidade de implementar alterações no *setpoint* das temperaturas das zonas. O desempenho do controlador preditivo proposto foi analisado e mostra-se, no trabalho, que o uso da tecnologia de controle avançado é viável para este tipo de sistema. Este estudo foi realizado por simulações da planta virtual do Edifício Moderno no ambiente de programação do *software* MATLAB<sup>®</sup> R2006b.

Palavras-chave: Controle preditivo. Ar condicionado. Controle convencional.

## **PERFORMANCE EVALUATION OF A PREDICTIVE CONTROLLER IN AIR CONDITIONING SYSTEMS IN COMMERCIAL BUILDINGS**

### **ABSTRACT**

This work presents the synthesis of a predictive controller to control the operating temperature of 8 floors of Edifício Moderno, a large commercial building. The air conditioning system is an air-water system with variable water flow and possesses specific fan-coils to condition external air used to ventilate and renovate the air of the controlled floors. The predictive controller was modeled as a quadratic programming and uses a linear state space model of the process. There are 16 temperatures controlled at fixes setpoints and one controlled with allowable operating range and there are 35

---

<sup>1</sup> Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia de Produção, EE, UPM, São Paulo, 2021.

manipulated variables. In order to evaluate the operation of the proposed controller, its ability to implement changes in the setpoint of the zone temperatures was considered. It is shown, in the work, that the use of advanced control technology is feasible for this type of system. This study was carried out by simulations of the virtual building of the Edifício Moderno in the programming environment of the MATLAB® R2006b software.

Keywords: Predictive control. Air conditioning. Conventional control.

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente está tornando cada vez mais relevante a redução do consumo de energia elétrica dos sistemas de climatização em edifícios. Vakiloroyaya *et al.* (2014) informam que quase 50% da demanda de energia em edificações comerciais é usada para suportar condições de conforto térmico interno. Segundo o relatório de resfriamento da *International Energy Agency* sem melhorias na eficiência dos equipamentos de resfriamento, a demanda de eletricidade para resfriamento nos edifícios pode aumentar em até 50% globalmente até 2030 (IEA, 2020).

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 quem nunca teve contato com esse tipo de política.

Uma das formas de aumentar a eficiência energética em sistemas de refrigeração é desenvolver sistemas que apontem melhores configurações de seus componentes (VAKILOROAYA *et al.*, 2014). Para sistemas já existentes, a melhoria da eficiência pode ser alcançada pela implementação do controle avançado e/ou de otimização que mesmo em um sistema já eficiente, permite a redução do consumo de energia, a detecção de erros e a realização de diagnósticos (LI *et al.*, 2013, ZHAO; YU, 2017).

### 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Apesar do êxito de controladores preditivos na indústria química, em edificações o seu emprego é incipiente e raro (KILLIAN; KOZEK, 2016; ZHAO; YU, 2017). A eficiência dos equipamentos de refrigeração de ar instalados nos edifícios não está melhorando apesar de tecnologias eficientes e acessíveis estarem disponíveis (IEA, 2020). Estratégias de controle tradicionais apresentam desempenho satisfatório, mas não possibilitam a otimização do processo ao mesmo tempo em que controlam a operação. Os benefícios dos controladores preditivos nos processos químicos, especialmente a capacidade de diminuir o consumo de energia ao mesmo tempo em que um desempenho adequado do controle das condições ambientais é assegurado, motivam o problema de pesquisa deste trabalho que consiste na implementação de um controlador preditivo para controlar a operação do sistema de ar condicionado do Edifício Moderno e a análise de seu desempenho.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é implementar um controlador avançado do tipo Controle Preditivo por Modelos (MPC) para controlar a operação do sistema de ar-condicionado em oito andares do Edifício Moderno e analisar a sua capacidade de assegurar o controle da operação frente a perturbações.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) desenvolver um modelo dinâmico fenomenológico da operação do sistema de ar condicionado de oito andares do Edifício Moderno, servido pela água gelada de um *chiller* a ar de potência nominal de 1064,4 kW.
- b) analisar o comportamento dinâmico do sistema do edifício, estabelecendo-se modelos lineares identificados de 1ª ordem, capazes de reproduzir o seu comportamento frente a perturbações.
- c) selecionar uma estrutura do controlador preditivo baseada na representação do processo em modelos de espaços de estado e estabelecer a sintonia dos parâmetros desse controlador para a síntese do sistema de controle do sistema de ar-condicionado do Edifício Moderno.
- d) programar o controlador preditivo proposto no simulador do Edifício Moderno, programado no ambiente de simulação do MATLAB®.
- e) analisar o desempenho do controlador proposto, verificando a sua capacidade de manter as zonas controladas em *setpoints* especificados.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Segundo Afram e Janabi-Sharifi (2014) o emprego de estratégias clássicas de controle ainda predomina no setor de ar-condicionado. As principais 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 e de dispositivos de *hardware* e *softwares* de maior custo.

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

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Garriga e Sourosh (2010) o primeiro passo para a síntese de um controlador é desenvolver um modelo matemático do processo. A partir do modelo matemático diferentes estratégias de controle podem ser testadas. Para tanto, deve-se estabelecer qual o melhor tipo de estratégia de controle e como sintonizar o controlador escolhido.

A presente revisão bibliográfica trata destas temáticas. Na seção 2.1 serão apresentadas as formas de representação de um processo por meio de sistemas lineares, focando as representações empregadas neste trabalho. A seção 2.2 trata do controlador preditivo empregado neste trabalho e no item 2.3 apresentam-se procedimentos de sintonia sugeridos na literatura para controladores preditivos.

### 2.1 FORMAS DE REPRESENTAÇÃO DE UM MODELO VISANDO AO ESTABELECIMENTO DE CONTROLADORES DE PROCESSO

Em problemas de controle ótimo é vantajoso utilizar representações na forma de espaço de estados. Para o desenvolvimento de controladores preditivos, a representação do processo em modelos de espaço de estados também tem sido preferida (OGATA, 2010; ZHANG *et al.*, 2017). Por outro lado, para a análise da resposta transitória ou da resposta no domínio da frequência de um sistema linear, invariante no tempo, de entrada e de saída únicas, a representação por modelos de função de transferência pode ser a mais conveniente (OGATA, 2010). Também é frequente o uso de funções de transferência para a identificação de modelos lineares de ordem reduzida relacionando o efeito da variação em uma variável de entrada em uma ou mais variáveis de saída que devem ser controladas ou monitoradas (CAPRON; ODLOAK, 2018). Estes modelos identificados são então empregados para a elaboração da representação do modelo do sistema a ser controlado na forma de espaço de estados, como será feito no presente trabalho.

#### 2.1.1 Representação pela Função de Transferência

Um sistema dinâmico é dito linear se o princípio da superposição e o princípio da homogeneidade se aplicarem a ele (OGATA, 2010). Um sistema linear pode ser representado em tempo contínuo ou em tempo discreto. Quando se trabalha em tempo contínuo, pode-se usar a representação em funções de transferência no domínio de Laplace, quando em tempo discreto utiliza-se o domínio  $Z$ , que leva em conta o tempo de amostragem do sistema.

A função de transferência de um sistema representado por uma equação diferencial linear invariante no tempo é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada admitindo-se todas as condições iniciais nulas (OGATA, 2010).

A transformada de Laplace representa uma transformação matemática, onde um sistema linear no domínio do tempo,  $t$ , pode ser colocado no domínio de Laplace,  $s$ . A transformação para o domínio de Laplace se dá na forma da Equação 1.

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (1)$$

Sendo  $F(s)$  a função no domínio de Laplace,  $f(t)$  a função no domínio do tempo e 0 o tempo inicial.

A transformada Z, também usada para representar sistemas lineares, é a correspondente da transformada de Laplace para sinais discretos. Relacionam-se sinais discretos no domínio do tempo com o domínio Z através da transformação da Equação 2 (ASTRÖM; WITTENMARK, 2011).

$$F(z) = Z[f(t_k)] = \sum_{k=0}^{\infty} f(t_k) z^{-k} \quad (2)$$

Sendo  $F(z)$  a função no domínio Z e  $f(t_k)$  a função discreta no domínio do tempo.

Com o uso de técnicas de eletrônica digital, presentes hoje em dia na maioria dos processos de engenharia, o uso desta representação tem se tornado muito útil pela facilidade de associação entre um domínio e outro. Na Equação 2,  $t_k$  é um múltiplo do período de amostragem,  $T_s$ , em que medições na planta são feitas, ou seja,  $t_k = kT_s$ .

### 2.1.2 Representação na forma de espaço de estados

A modelagem de sistemas dinâmicos é feita, tipicamente, por equações diferenciais originadas das equações de balanço que descrevem Leis de Conservação, como a conservação de massa ou energia (BIRD *et al.*, 2004). A este tipo de representação dá-se o nome de descrição em espaço de estados e genericamente pode ser representada para sistemas lineares como na Equação 3, em que  $u$  representa as entradas do processo, ou seja, as variáveis que podem ser manipuladas ou distúrbios medidos ou não,  $x$  os estados do sistema,  $t$  o tempo,  $y$  as variáveis que se deseja controlar ou monitorar. Enquanto  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são matrizes não dependentes do tempo, o sistema é dito linear invariante no tempo. A matriz  $A$  é chamada de matriz de estados, a matriz  $B$  é a matriz de entradas, a matriz  $C$  é a matriz de saídas e a matriz  $D$  é a matriz de transmissão direta comumente nula para processos químicos (ASTRÖM; WITTENMARK, 2011).

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (3)$$

Com a necessidade do uso de estratégias de controle na indústria química que garantam um bom desempenho, a modelagem de sistemas complexos exige a representação do processo em espaços de estado (OGATA, 2010; ZHANG *et al.*, 2017). Como sua obtenção não é um processo

trivial, na prática obtêm-se funções de transferências representativas do processo entre as entradas e saídas e, destas, faz-se uma montagem para se obter a representação em variáveis de estado.

Para sistemas multivariáveis, em que o processo real apresenta múltiplas entradas e saídas, o projetista do sistema de controle deve inicialmente, obter as funções de transferência que relacionam cada entrada com cada saída como exemplificado na Equação 4 e para cada uma delas, uma representação em espaço de estados é calculada para um sistema com  $nc$  saídas e  $nm$  entradas. Em seguida, uma vez que para sistemas lineares vale o princípio da superposição, escolhe-se como proceder no posicionamento das diferentes variáveis de entrada e saída de acordo como se arbitra a montagem do vetor de variáveis de estado e do vetor das entradas. Para uma representação do processo por meio de um modelo de 1ª ordem, cada função de transferência  $G_{i,j}$  na Equação 4 pode ser representada como na Equação 5.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \dots & G_{1,nm} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \dots & G_{2,nm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{nc,1} & G_{nc,2} & \dots & G_{nc,nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G_{i,j} = \frac{K_{i,j}}{\tau_{i,j}s + 1} \quad (5)$$

Em que,  $K_{i,j}$  e  $\tau_{i,j}$  são, respectivamente, o ganho e a constante de tempo do modelo do processo relacionando o efeito da  $j$ ésima entrada na  $i$ ésima saída.

As formas de representação dadas nas Equações 3 e 4 são conhecidas como forma posicional, pois se considera a posição da entrada  $u$ . Uma outra forma comumente usada é a incremental, onde se escreve o modelo em função das ações de controle, ou seja, dos incrementos  $\Delta u$  a serem aplicados nas entradas  $u$  (ODLOAK, 2004). Além de se escrever o modelo de processo na forma incremental, é de interesse obter a representação na forma discreta. Para obtenção da representação do sistema em espaço de estados discretos a partir das funções de transferência obtidas no domínio de Laplace, é necessário transformar as matrizes A e B nas matrizes  $\Phi$  e  $\Gamma$  do modelo discreto, obtendo-se, por exemplo, o modelo discreto na forma incremental dado pela Equação 6. Para se obter a relação entre as matrizes A e B e  $\Phi$  e  $\Gamma$ , pode-se fazer uso da Equação 7 e da Equação 8, sendo  $T_s$  o período de amostragem, onde se utilizou um *holder* de ordem 0 no procedimento de discretização, bastante empregado na conversão de sinais discretos e analógicos (SEBORG *et al.*, 2011).

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ I \end{bmatrix} \Delta u_k \quad (6)$$

$$y_k = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix}$$

$$\Phi = e^{AT_s} \quad (7)$$

$$\Gamma = \int_0^{T_s} e^{As} ds B \quad (8)$$

Na estrutura apresentada,  $y_k$ ,  $x_k$ ,  $u_k$  e  $\Delta u_k$  são vetores, sendo que a Equação 9 e a Equação 10 mostram como as matrizes da estrutura da Equação 6 podem ser obtidas a partir dos modelos identificados como nas Equações 4 e 5.

$$\begin{bmatrix} x_{1,1,k+1} \\ \vdots \\ x_{1,nu,k+1} \\ \vdots \\ x_{nc,1,k+1} \\ \vdots \\ x_{nc,nu,k+1} \\ u_{1,k} \\ \vdots \\ u_{nu,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{T_s}{\tau_{1,1}}} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{1,1} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{1,1}}} - 1 \right) & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & e^{-\frac{T_s}{\tau_{1,nu}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{1,nu} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{1,nu}}} - 1 \right) \\ 0 & \dots & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_{nc,1}}} & 0 & 0 & 0 & -K_{nc,1} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{nc,1}}} - 1 \right) & 0 & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_{nc,nu}}} & 0 & 0 & 0 & -K_{nc,nu} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{nc,nu}}} - 1 \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1,k+1} \\ \vdots \\ x_{1,nu,k+1} \\ \vdots \\ x_{nc,1,k+1} \\ \vdots \\ x_{nc,nu,k+1} \\ u_{1,k} \\ \vdots \\ u_{nu,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{1,1} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{1,1}}} - 1 \right) & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & -K_{1,nu} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{1,nu}}} - 1 \right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -K_{nc,1} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{nc,1}}} - 1 \right) & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & -K_{nc,nu} \left( e^{-\frac{T_s}{\tau_{nc,nu}}} - 1 \right) \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{1,k} \\ \vdots \\ \Delta u_{n,k} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} y_{1,k} \\ \vdots \\ y_{nc,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \ddots & 0 & \dots & 0 & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1,k} \\ \vdots \\ x_{1,nu,k} \\ \vdots \\ x_{nc,1,k} \\ \vdots \\ x_{1,nu,k} \\ u_{1,k-1} \\ \vdots \\ u_{nu,k-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Redefinindo-se novos estados  $x_k$  como  $x_k = \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix}$ , o modelo dado pelas Equações 9 e 10, pode ser escrito de forma compacta como o da Equação 11.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + B\Delta u_k \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.2 SÍNTESE DE CONTROLADORES DE PROCESSO

A síntese de controladores é o estabelecimento de uma estratégia de manipulação da entrada que não é distúrbio de processo de forma que a resposta do processo atenda a algum critério de desempenho. Este último compreende normalmente a eliminação do erro de estado estacionário e um rápido tempo de reposta do processo.

Segundo Mariano (2007) a sintetização moderna do controlador em malha fechada envolve as seguintes etapas, as quais foram adaptadas para o procedimento empregado neste trabalho:

- a) etapa 1: Estabelecer as variáveis manipuladas, controladas e caracterizar os distúrbios no processo;
- b) etapa 2: Obter um modelo ou um conjunto de modelos dinâmicos lineares do processo na forma de funções de transferência, a partir dos quais um modelo linear em espaço de estados incremental e discreto seja obtido;
- c) etapa 3: Escolher a estrutura do controlador e efetuar a sua síntese usando o modelo linear identificado;
- d) etapa 4: Avaliar o desempenho do controlador por meio de sua simulação.

Salienta-se que quando da implementação do controlador em uma unidade real, deve-se proceder com uma avaliação contínua do desempenho do controlador implementado e manter-se o modelo identificado atualizado, de forma que ele continue a representar o processo.

No item seguinte, é tratada especificamente a etapa 3, em que se descreve a estrutura do controlador preditivo empregado neste trabalho.

### 2.2.1 Controladores MPC

Os controladores preditivos baseados em modelos - MPC (*Model Predictive Control*) são estratégias de controle baseadas em um modelo do processo que determinam a amplitude das ações de controle pelo cálculo da minimização dos erros futuros entre os valores de referência e as variáveis de processo preditas por um modelo matemático (SEBORG *et al.*, 2011). Além da capacidade de previsão de erros futuros, outro grande mérito destes controladores é devido à sua natureza multivariável. Por outro lado, esta concepção torna a formulação e análise dos controladores preditivos complexa, a qual envolve cálculos matriciais e resolução de problemas de otimização.

Existem hoje vários tipos de controladores preditivos na literatura, havendo também diferentes formas para a representação dos sistemas. Essas formas variam quanto à especificidade para diferentes tipos de processos e quanto a uma adequação da estrutura do controlador que privilegie uma diminuição do tempo de processamento do cálculo das ações de controle.



Na seção 2.2.1.1 é apresentado um apanhado geral de representações encontradas na literatura, e na seção 2.2.1.2 é apresentada a representação empregada neste trabalho baseada na representação da função objetivo proposta por Wallace *et al.* (2012).

### 2.2.1.1 Procedimento de Representação de Controladores MPC por meio de Modelos de Espaços de Estado

O controlador preditivo mais simples que poderia ser projetado, seria aquele em que a função objetivo da Equação 12 seria minimizada. Nesta função objetivo, deseja-se minimizar a somatória ponderada dos erros entre os valores de referência  $y^{sp}$  e os preditos pelo modelo do processo em instantes  $k+j$ , sendo  $k$  o instante atual e  $j = 1, \dots, p$  os instantes futuros. Dá-se a  $p$  o nome de horizonte de predição, sendo este um parâmetro a ser definido pelo projetista. A matriz  $Q$  é montada de forma diagonal, dessa forma se associa a cada elemento da diagonal o peso correspondente a cada saída. Assim, a ponderação é feita somente para cada variável e esta é constante ao longo do horizonte de predição.

$$J_k = \sum_{j=1}^p (y(k+j) - y^{sp})^T Q (y(k+j) - y^{sp}) \quad (12)$$

Sendo,  $J_k$  a função a ser minimizada calculada no instante  $k$ ,  $y$  e  $y^{sp}$  o vetor das  $ny$  saídas e o vetor com os valores de referências para as respectivas saídas e  $Q$  a matriz de pesos dos erros entre as saídas e seus *setpoints*.

O controlador preditivo calcula  $m$  ações futuras de controle, onde  $m$  é chamado de horizonte de controle, e é um parâmetro de sintonia do controlador MPC determinado na fase de projeto. Das  $m$  ações calculadas, apenas a primeira é implementada, ou seja, a função objetivo é calculada a cada instante de intervenção do controlador, reavaliando-se assim as condições do processo. A cada instante as ações de controle serão novamente calculadas para minimizar a função objetivo e sempre será implementada a primeira e as demais descartadas. O horizonte de controle é importante para se determinar se as ações de controle serão mais bruscas, no caso de ele ser pequeno, ou mais suaves, no caso de ele ser grande, uma vez que as ações serão distribuídas ao longo do tempo. Algumas variáveis manipuladas influenciam fortemente o processo, estas em geral, devem ser ponderadas para suavizar sua ação. Contudo, se o controle de uma dada variável tem maior importância para o processo, a ponderação do erro entre ela e seu respectivo valor de referência deve ser maior.

Pode-se sintetizar controladores preditivos adicionando outros termos à função objetivo. Usualmente, acrescenta-se à função objetivo, um termo de ponderação dos incrementos das entradas, ao invés de se acrescentar as variáveis manipuladas, o que é mostrado na Equação 13, escrita de forma compacta. A razão para isso é que esta ponderação exerce um efeito estabilizante, sendo assim os elementos da matriz  $R$ , chamada de matriz de supressão de movimentos, também são parâmetros de

sintonia. Da mesma forma que a matriz  $Q$ , a matriz  $R$  é montada de forma diagonal, para se ter assim um menor número de parâmetros de sintonia podendo-se ponderar todas as entradas do processo. O número de elementos da diagonal principal de  $R$  é dada por  $nu \times m$ , sendo  $nu$  o número de entradas do processo. Percebe-se que a dimensão da matriz pode se tornar bem grande se o número de variáveis manipuláveis for elevado e se o horizonte de controle for grande. Ressalta-se que o horizonte de controle deve ser menor ou igual ao horizonte de predição.

$$J_k = ([y^c]_k - y^{sp})^T \bar{Q} ([y^c]_k - y^{sp}) + \Delta u_k^T \bar{R} \Delta u_k \quad (13)$$

Sendo  $y^{sp}$  o vetor de valores de referência,  $\Delta u$  a matriz das entradas ao longo de  $m$ ,  $[y^c]_k$  é o vetor de predições das saídas ao longo de  $p$  levando em conta as ações de controle ao longo do horizonte de controle,  $\bar{Q}$  e  $\bar{R}$  são matrizes de pesos definidas como blocos de matrizes, sendo  $\bar{Q} = \text{diag} \left[ \underbrace{Q \ \dots \ Q}_p \right]$  de dimensão  $ny.p$  contendo os pesos das variáveis controladas e  $\bar{R} = \text{diag} \left[ \underbrace{R \ \dots \ R}_m \right]$  de dimensão  $nu.m$  com os pesos das ações de controle.

Na Equação 13,  $J_k$  é uma função quadrática que será minimizada numericamente com o uso de uma rotina computacional. Por exemplo, no *software* MATLAB<sup>®</sup>, pode-se empregar a rotina *quadprog* para se resolver o problema de otimização da programação quadrática. Deve-se então escrever a função objetivo levando-se em conta a predição a partir do modelo do processo. Adicionalmente, as ações de controle são calculadas ao longo de um horizonte de controle  $m$ , para os instantes  $k = 0, \dots, m - 1$ , sendo assim, todas as ações posteriores ao instante  $k+m-1$  terão o mesmo valor e usualmente assume-se que novas ações de controle não ocorrerão. No modo incremental cada ação  $\Delta u(k+j)$  é quanto seria acrescido na atual variável manipulada. Desta forma, equivale a dizer que a partir do instante  $m$ , nenhuma nova ação de controle será implementada e que cada entrada terá o seu valor inalterado, como mostrado na Equação 14. Quando a partir do instante  $k+m$  todas as ações de controle a serem implementadas serão iguais à do instante  $k+m-1$ , tem-se a Equação 15.

$$\Delta u(k+p-1) = \Delta u(k+p-2) = \dots = \Delta u(k+m+1) = \Delta u(k+m) = 0 \quad (14)$$

$$\Delta u(k+p-1) = \Delta u(k+p-2) = \dots = \Delta u(k+m+1) = \Delta u(k+m) = \Delta u(k+m-1) \neq 0 \quad (15)$$

Assim, o modelo de predição para o caso em que se assume a condição da Equação 14 é dado pela Equação 16, como apresentado por exemplo em Zhang *et al.* (2017) e quando se assume a condição da Equação 15 é escrito como na Equação 17.

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ y(k+3) \\ \vdots \\ y(k+p) \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^p \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{p-1}B & CA^{p-2}B & \ddots & CA^{p-m}B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+m) \\ y(k+m+1) \\ y(k+m+2) \\ \vdots \\ y(k+p) \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^m \\ CA^{m+1} \\ CA^{m+2} \\ \vdots \\ CA^p \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ CA^{m-1}B & CA^{m-2}B & \cdots & CB \\ CA^mB & CA^{m-1}B & \cdots & C\tilde{A}_1B \\ CA^{m+1} & CA^mB & \cdots & C\tilde{A}_2B \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{p-1}B & CA^{p-2}B & \cdots & C\tilde{A}_{p-m}B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+m-1) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Onde,  $\tilde{A}_1 = A + I$ ;  $\tilde{A}_2 = A^2 + A + I$ ; ...  $\tilde{A}_{p-m} = A^{p-m} + A^{p-m-1} + \cdots + I$

Representando os termos da Equação 16 ou da Equação 17 que multiplicam  $x(k)$  por  $\psi$  e os termos que multiplicam  $\Delta u_k$  por  $\theta$  obtém-se a Equação 18.

$$[y^c]_k = \psi x(k) + \theta \Delta u_k \quad (18)$$

Define-se o erro entre o valor de referência e o valor atual da variável de estado como na Equação 19.

$$e = \psi x(k) - y^{sp} \quad (19)$$

Substituindo as Equações 18 e 19 em 13, chega-se à Equação 20 como sendo a função objetivo do controlador.

$$J_k = (e + \theta \Delta u_k)^T \tilde{Q} (e + \theta \Delta u_k) + \Delta u_k^T \tilde{R} \Delta u_k \quad (20)$$

Definem-se nas Equações 21 a 23 as matrizes  $H$ ,  $C_f^T$  e  $C$ , para uma representação mais compacta e a partir destas, reescreve-se a função objetivo do controlador  $J_k$  na Equação 24. Esta última representação é a forma usual usada para se definir problemas da programação quadrática. O termo  $C$  na Equação 24 é constante. Assim, na programação da função objetivo, apenas a matriz  $H$  e o vetor  $C_f$  precisam ser fornecidos, de forma que podemos escrever a função objetivo do controlador simplesmente como na Equação 25.

$$H = \theta^T \tilde{Q} \theta + \tilde{R} \quad (21)$$

$$C_f^T = e^T \tilde{Q} \theta \quad (22)$$

$$C = e^T \tilde{Q} e \quad (23)$$

$$J_k = \Delta u^T H \Delta u + 2C_f^T \Delta u + C \quad (24)$$

$$J_k = \Delta u^T H \Delta u + 2C_f^T \Delta u \quad (25)$$

A operacionalidade do sistema físico depende de que sejam respeitadas restrições nos valores de entrada e nos incrementos dessas ações. Então a solução do problema de minimização da função da Equação 25 deve ser calculada sujeita a restrições de máximos e mínimos para os valores das entradas. Da mesma forma, que as ações de controle foram explicitamente restringidas, é possível se

desejado, reformular-se o cálculo da lei de controle, restringindo-se explicitamente as predições das variáveis controladas, como mostrado na Equação 26.

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta u_k} \Delta u_k^T H \Delta u_k + 2C_f^T \Delta u_k \\ \text{s. a. } & u_{\min} \leq u(k+j) \leq u_{\max} \quad ; j = 0 \dots, m-1 \\ & -\Delta u_{\max} \leq \Delta u(k+j) \leq \Delta u_{\max}; j = 0, \dots, m-1 \\ & y_{\min} \leq y(k+j) \leq y_{\max} \quad ; j = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (26)$$

Outras variantes podem ser feitas à formulação da Equação 26, como por exemplo acrescentar um termo econômico na função objetivo ou restringir as variáveis de saída apenas no último instante do horizonte de predição  $p$  de forma a minimizar o custo computacional ou introduzir dificuldades de resolução numérica do problema da programação quadrática. (SOUZA *et al.*, 2010).

Nas leis de controle apresentadas é necessário calcular os estados no instante atual, a saber  $x(k)$ . Isto é feito a partir do conhecimento das últimas ações de controle implementadas. Cumpre salientar que na formulação apresentada até o momento, não existe a incorporação do efeito de distúrbios ou erros no modelo do processo. Medições da planta não são consideradas. Assim, o controlador da Equação 26 não conseguirá rejeitar perturbações no processo. Diferentes alternativas de se corrigir o efeito de perturbações e erros de modelagem existem. Uma possibilidade de realimentação em controladores preditivos pode ser considerada inserindo as medidas das variáveis controladas da planta na equação de estado do modelo ou na função objetivo.

Levando-se em conta, o erro entre a atual previsão de um estado e o valor medido, o estado atual das variáveis pode ser estimado, levando-se em conta a medição do processo real, através da Equação 27.

$$\hat{x}(k) = A\hat{x}(k-1) + B\Delta u(k-1) + E\{\tilde{y}(k) - C[A\hat{x}(k-1) + B\Delta u(k-1)]\} \quad (27)$$

Onde  $A$ ,  $B$  e  $C$  são as mesmas matrizes já apresentadas anteriormente,  $\hat{x}(k)$  o vetor com os estados estimados,  $\tilde{y}(k)$  o vetor das variáveis controladas medidas na planta no instante  $k$  e  $E$  a matriz com os ganhos para a realimentação.

A Equação 27 pode ser escrita como na forma da Equação 28, a qual é mais adequada para a proposição da lei de controle.

$$\hat{x}(k) = (I - EC)A\hat{x}(k-1) + (I - EC)B\Delta u(k-1) + E\tilde{y}(k) \quad (28)$$

Para colocar o estado estimado nas equações do controlador, pode-se definir as matrizes  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$  e  $\hat{E}_y$  como nas Equações 29 a 31 e  $\hat{C} = C$  para chegar-se a uma outra representação em espaços de estado apresentada no sistema da Equação 32.

$$\hat{A} = (I - EC)A \quad (29)$$

$$\hat{B} = (I - EC)B \quad (30)$$

$$\hat{E}_y = E\tilde{y}(k) \quad (31)$$

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = \hat{A}\hat{x}(k) + \hat{B}\hat{x}(k) + \hat{E}_y \\ \hat{y}(k) = \hat{C}\hat{x}(k) \end{cases} \quad (32)$$

Sendo  $\hat{y}(k)$  o vetor do cálculo das variáveis controladas levando-se em conta a realimentação do sistema.

### 2.2.1.2 Proposta de formulação do controlador MPC usada nesse artigo

A formulação do controlador MPC de Wallace *et al.* (2012) baseia-se em modelos lineares do tipo ARX não incrementais. Embora Wallace *et al.* (2012) tratem do controle de um sistema de ar condicionado, o controlador proposto controla somente uma variável em *setpoint* fixo e uma segunda por faixas. A função objetivo  $J_k$  para cada instante de amostragem  $k$  considerada por Wallace *et al.* (2012), reescrita para  $nc$  variáveis controladas é dada pela Equação 33.

$$J_k = \sum_{j=1}^p (y_{k+j}^* - y_{sp})^T Q (y_{k+j}^* - y_{sp}) + \|u_1\|_r + \|\Delta u\|_R \quad (33)$$

Sendo,  $u_1$  uma das variáveis manipuladas por Wallace *et al.* (2012) e  $\Delta u$  a variação a ser aplicada nas variáveis manipuladas (ações de controle),  $Q$  e  $R$  são, respectivamente, as matrizes de ponderação de erros e supressão de movimentos,  $p$  o horizonte de predição,  $y_{sp}$  o vetor contendo os *setpoints* para as variáveis controladas,  $y_{k+j}^*$  é a estimativa das variáveis controladas, calculada na formulação de Wallace *et al.* (2012) como na Equação 34.

$$y_{k+j}^* = y_{k+j} + k_\alpha(\tilde{y}_k - y_k) + \beta_{k+j} \quad (34)$$

Sendo,  $y_{k+j}$  a estimativa das variáveis controladas pelo modelo linear identificado,  $k_\alpha$  um peso,  $\tilde{y}_k$  o vetor com as medições das variáveis controladas no instante atual  $k$  e  $\beta_{k+j}$  avaliado como na Equação 35, sendo  $k_\beta$  um peso.

$$\beta_{k+j} = \beta_{k+j-1} + k_\beta(\tilde{y}_k - y_{sp}) \quad (35)$$

A ideia do emprego da Equação 35 é introduzir um efeito análogo aos termos proporcional e integral nos controladores PID, eliminando erros estacionários. Na Equação 34, o termo intermediário,  $k_\alpha(\tilde{y}_k - y_k)$ , corresponde a uma correção na estimativa dos estados a partir da comparação da previsão da resposta do modelo identificado com a do processo real.

Em Wallace *et al.* (2012) a equação para o fator  $\beta$  é aplicada apenas para a variável com *setpoint* fixo, para a variável controlada por faixa a Equação 35 é substituída pela Equação 36.

$$\beta_{k+j} = \beta_{k+j-1} + k_{\beta,min} \max\{0, \tilde{y}_{min} - \tilde{y}_k\} + k_{\beta,max} \max\{0, \tilde{y}_k - \tilde{y}_{max}\} \quad (36)$$

Wallace *et al.* (2012) incorporam apenas uma variável manipulada no termo  $\|u\|_R$  e executam a programação quadrática para determinar o valor das variáveis manipuladas. Assim, escolheu-se

fazer uma adaptação na proposta de Wallace *et al.* (2012) para ser incorporada ao controlador MPC em desenvolvimento. As seguintes premissas são assumidas:

- modelo assumido perfeito, assim:  $k_\alpha = 0$ .
- para a variável controlada por faixa (temperatura da água na saída do evaporador), assumiu-se o peso na matriz de ponderação de erros nulo de forma que não se implementou a Equação 36.
- não se considerou a ação integral, de forma que a Equação 35 não tem o termo  $\beta_{k+j-1}$ .
- implementou-se a função objetivo da Equação 37 na formulação do controlador preditivo, tendo como variáveis de decisão as variações nas variáveis manipuladas.

$$J = \sum_{j=1}^p \left( y_{k+j} - y_{sp} + k_\beta (\tilde{y}_k - y_{sp}) \right)^T Q \left( y_{k+j} - y_{sp} + k_\beta (\tilde{y}_k - y_{sp}) \right) + \|\Delta u\|_R \quad (37)$$

Desta forma, a programação quadrática foi implementada como na Equação 38.

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta u_k^c} (\Delta u_k^c)^T H \Delta u_k^c + 2C_f^T \Delta u_k^c \\ \text{s. a. } & u_{min} \leq u_{k+j} \leq u_{max} ; j = 1, \dots, m-1 \\ & -\Delta u_{max} \leq \Delta u_k^c \leq \Delta u_{max} \\ & y_{min} \leq y_k^c \leq y_{max} \end{aligned} \quad (38)$$

Sendo, o modelo de predição dado pelas Equações 39 a 44 a seguir.

$$y_k^c = \psi x_k + \theta \Delta u_k^c \quad (39)$$

$$H = \theta^T \bar{Q} \theta + \bar{R} \quad (40)$$

$$C_f^T = e^T \bar{Q} \theta \quad (41)$$

$$e = \psi x_k - y_{sp} + k_\beta (\tilde{y}_k - y_{sp}) \quad (42)$$

$$y_k^c = \begin{bmatrix} y_{k+j} \\ y_{k+j+2} \\ \vdots \\ y_{k+j+p} \end{bmatrix}; \Delta u_k^c = \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+m-2} \\ \Delta u_{k+m-1} \end{bmatrix}; \psi = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^p \end{bmatrix}; \theta = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ CA^{m-1}B & CA^{m-2}B & CA^{m-3}B & \dots & CB \\ CA^m B & CA^{m-1}B & CA^{m-2}B & \dots & C\tilde{A}_1 B \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^p B & CA^{p-1}B & CA^{p-2}B & \dots & C\tilde{A}_{p-m} B \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$\tilde{A}_1 = A + I; \tilde{A}_2 = A^2 + A + I; \dots; \tilde{A}_{p-m} = A^{p-m} + A^{p-m-1} + A + I \quad (44)$$

### 2.3 MÉTODOS DE SINTONIA DE CONTROLADORES MPC DA LITERATURA

A sintonia de um controlador preditivo é feita por ajustes em parâmetros que influenciam o controle do sistema. Na literatura, pode-se encontrar muitas referências e técnicas desenvolvidas e que funcionaram em um sistema, mas a verdade é que para cada sistema existe um valor ótimo para os parâmetros de sintonia e, em geral, inexistente um valor fixo que serve para todos.

Segundo Garriga e Soroush (2010) dentre os principais parâmetros de sintonia dos controladores MPC, destacam-se os parâmetros abordados nos itens a seguir.

### 2.3.1 Horizonte de predição ( $p$ )

O horizonte de predição define o limite de tempo futuro que o controlador tem para induzir o sistema a uma resposta desejada para as saídas. Esse parâmetro deve ser ajustado de forma que o sistema esteja estável em malha fechada. Maurath *et al.* (1988) sugerem que o parâmetro  $p$  seja escolhido de modo que esteja entre os intervalos de tempo de 80% a 90% do tempo requerido para a estabilização do processo, sugerindo para que  $p$  seja escolhido como mostrado na Equação 45.

$$p = \frac{t_{80} + t_{90}}{2T_s} \quad (45)$$

### 2.3.2 Horizonte de controle ( $m$ )

O horizonte de controle é o parâmetro que define se a ação de controle será mais agressiva ou mais conservadora. Um horizonte de controle maior gera ações mais suaves enquanto um horizonte de controle menor gera ações mais bruscas no sistema, uma vez que quanto menor o horizonte de controle, em menos tempo o *setpoint* deverá ser alcançado. Inúmeros autores trabalham com o horizonte de controle igual a 1, o que reduz o tempo computacional empregado para resolver o problema de otimização do controlador preditivo (GARRIGA; SOROUSH, 2010). Georgiou *et al.* (1988) propõem que o horizonte de controle seja calculado baseando-se no tempo que leva para que a resposta de saída alcance 60% do processo em estado estacionário, conforme mostra a Equação 46, enquanto Trierweiler e Farina (2003) propõem o uso da Equação 47.

$$m = \frac{t_{60}}{T_s} \quad (46)$$

$$m = \text{int} \left( \frac{p}{4} \right) \quad (47)$$

### 2.3.3 Pesos das saídas ( $Q$ )

Os pesos das saídas são usados para direcionar os esforços nas saídas mais importantes para obter um controle mais rígido nessas saídas. Nem todas as variáveis de saídas precisam estar controladas em *setpoints* fixos, sendo que algumas variáveis do processo podem estar controladas por faixas, *i.e.*, de forma a estarem dentro de limites máximos e mínimos. Estas variáveis não aparecem na função objetivo do controlador MPC ou, quando dentro das faixas, deverão ser ponderadas com peso nulo. O que ocorre na prática industrial, é que a escolha dos parâmetros na matriz  $Q$  é feita a partir da experiência do engenheiro de controle (GARRIGA; SOROUSH, 2010).

### 2.3.4 Pesos na matriz de supressão de movimentos ( $r$ )

Colocar pesos nas variações das entradas faz o controlador ser mais robusto, mas pode deixá-lo mais lento. Colocar pesos pequenos ou nenhum deixa o controlador mais agressivo e rápido, porém menos robusto e pode levar o sistema à instabilidade.

## 3 METODOLOGIA

O presente trabalho é continuação do trabalho de Iniciação Científica (SANTOS; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, 2020), o qual se iniciou com 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 Santos *et al.* (2021). 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 controle no ambiente de programação do simulador MATLAB® R2006b.

O sistema estudado tem as seguintes características: é estável em malha aberta; é um sistema multivariável; apresenta constantes de tempos e ganhos muito diferentes para cada variável; apresenta uma não linearidade; é possível operar-se algumas variáveis por faixa de valores enquanto que a maioria das variáveis controladas devem ser operadas com *setpoint* definidos; modelos de 1ª ordem representam bem as dinâmicas das diferentes variáveis em torno do ponto nominal de operação (PELLEGRINI *et al.*, 2018; SANTOS; TVRZSKA DE GOUVÊA, 2020).

Santos *et al.* (2021) incorporaram ao simulador desenvolvido por Pellegrini *et al.* (2018) controladores do tipo PID para controlar a operação do sistema de ar-condicionado. Ele mostrou que o desempenho do controlador era adequado enquanto o sistema operava dentro da faixa de projeto. Contudo para condições *off-design*, o controlador não conseguia manter a temperatura das zonas controladas.

Santos e Tvrzská de Gouvêa (2020) propuseram um controlador preditivo simplificado e mostraram vantagens de seu emprego frente ao uso de um controlador tradicional, notadamente quando o sistema foi operado fora da condição de projeto. Contudo o controlador preditivo apresentou para alguns cenários um desempenho não satisfatório. Desta forma, neste trabalho, buscou-se implementar um controlador preditivo apresentado na literatura. Adicionalmente neste trabalho, revisou-se a topologia do sistema de ar condicionado. Pellegrini *et al.* (2018) fizeram uma simplificação da topologia do sistema de ar condicionado proposto por Araújo (2016). Neste trabalho, recupera-se a proposta original, estendendo-se essa para um sistema a ar-água de vazão de água variável, tido como um sistema energeticamente mais eficiente e concorrente dos sistemas de vazão de refrigerante variável. Realizadas as modificações no simulador do Edifício Moderno, procedeu-se com as simulações para análise do controlador proposto.



### 3.1 EDIFÍCIO MODERNO

O sistema de ar-condicionado do Edifício Moderno foi concebido por Araújo (2016), tendo sido projetado por meio do *software* de simulação comercial *Hourly Analysis Program (HAP)*® 5.10. O Edifício Moderno espelha uma edificação comercial real de grande porte localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais. O sistema de ar-condicionado do tipo ar-água atende uma área climatizada de 19193,4 m<sup>2</sup> e considerou-se no 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. Contudo o projeto contempla o controle da qualidade do ar nas zonas. Para tanto, cada andar da edificação possui um *fancoil* específico para condicionar o ar ambiente externo usado para a renovação do ar nas zonas e garantir os requisitos de norma de ventilação.

O condicionamento do ar na edificação é realizado por um sistema de ar-condicionado central do tipo ar-água, que é um dos tipos de sistemas de ar-condicionado mais eficazes que existe (ZHAO; YU, 2017). O projeto contempla o uso de 3 *chillers* para fornecer água gelada para *fancoils* que fornecem ar frio nas diversas zonas do edifício. Cada *chiller* tem carga nominal de 1064,4 kW.

Pellegrini *et al.* (2018) propuseram o modelo de capacitância global para a modelagem das zonas que foi aprimorado por Santos *et al.* (2021). Ruivo *et al.* (2020) propuseram um modelo rigoroso para o evaporador e fizeram uso de um modelo termodinâmico mais aprimorado para representar as propriedades do fluido refrigerante R-410A. Neste trabalho, faz-se uso do modelo termodinâmico aprimorado, mas empregou-se o modelo do evaporador com coeficiente global de troca térmica. Contudo, outras modificações foram feitas no modelo dinâmico do processo. Além dos aprimoramentos feitos por Santos *et al.* (2021), neste trabalho a pressão de operação do condensador não é mais assumida constante. Assim, o *chiller* apresenta três variáveis manipuladas, a saber, a rotação do compressor, a vazão de ar externo para o condensador a ar e a abertura da válvula de expansão eletrônica. A topologia da edificação considerada por Pellegrini *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2021) foi modificada. Baseou-se na proposta original de projeto de Araújo (2016), ou seja, cada andar é servido por três *fancoils* para resfriar o ar de retorno e um *fancoil* específico para condicionar o ar externo para a condição de controle das zonas climatizadas. O projeto de Araújo (2016) não incluiu o projeto do sistema de controle. Assim, neste trabalho, considera-se um sistema com vazão de água variável e vazão de ar de retorno constante de forma que a qualidade do ar seja sempre garantida. Neste trabalho, não se considerou o controle da umidade das zonas climatizadas. Assume-se que existe um sistema de controle perfeito da umidade do ar externo de forma que o *fancoil* de ventilação sempre insufla ar nas zonas na mesma umidade absoluta de projeto. A temperatura de insuflamento de ar dos *fancoils* de retorno é assumida suficientemente elevada para não haver condensação de água nos *fancoils*. Alterações de calor latente devido a variações na ocupação das zonas são desprezadas. Salienta-se que a parcela de calor latente é muito pequena na composição da

carga térmica de cada andar. Selecionou-se neste trabalho a operação de um *chiller* atrelado a oito andares, sendo sete idênticos e um diferente. A carga térmica destes oito andares selecionados corresponde à carga térmica nominal de um *chiller*. Nenhum dos andares selecionados possui restaurante, cafeterias ou lanchonetes de forma que a hipótese de não se levar em conta a variação do calor latente das pessoas é razoável. A Tabela 1 mostra os ganhos e a Tabela 2 as constantes de tempo identificados com os modelos de primeira ordem neste trabalho.

Tabela 1 – Ganhos estacionários dos modelos identificados

		Variáveis manipuladas							
		AEEV K <sub>p</sub> (°C)	Rot K <sub>p</sub> (°C.s/m <sup>3</sup> )	Vaz. de ar K <sub>p</sub> (°C/Hz)	Vaz. de ag. no fancoil de vent. K <sub>p</sub> (°C.s/kg)	Vaz. de ag. no fancoil de ret. K <sub>p</sub> (°C.s/kg)			
		-	-	-	Perturbações em cada andar				
					ZI	ZD	ZI	ZD	
Variáveis controladas	Temp. da ag. que sai do evap.	-11,0710	-0,0569	-0,1181	0,0393	0,0421	0,0559	0,0626	
	Temp. do ar de vent.	ZIperturbada	-	-	-	-0,9933	-	0,0380	-
		ZI	-7,5350	-0,0359	-0,0801	0,0262	0,0297	0,0380	0,0417
		ZD	-7,5350	-0,0370	-0,0802	0,0262	-2,4799	0,0380	0,0417
	Temp. do ar de retorno	ZIperturbada	-	-	-	-0,1038	-	-0,1832	-
		ZI	-5,7502	-0,0296	-0,0613	0,0201	0,0223	0,0290	0,0322
		ZD	-4,5399	-0,0233	-0,0484	0,0161	-0,1586	0,0235	-0,2750

Fonte: Elaborada pela autora

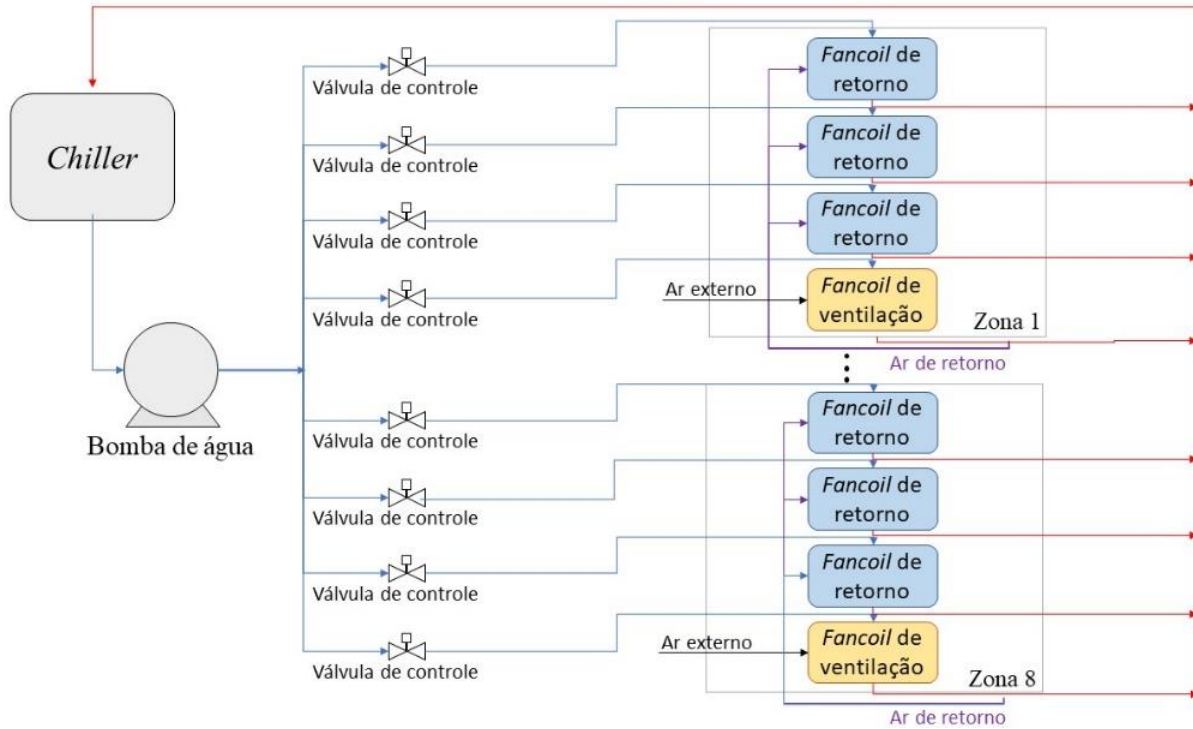
Tabela 2 – Constantes de tempo dos modelos identificados

		Variáveis manipuladas							
		AEEV τ (s)	Rot τ (s)	Vaz. de ar τ (s)	Vaz. de ag. no fancoil de vent. τ (s)	Vaz. de ag. no fancoil de ret. τ (s)			
		-	-	-	Perturbações em cada andar				
					ZI	ZD	ZI	ZD	
Variáveis controladas	Temp. da ag. que sai do evap.	422,6	404,8	429,2	196,2	45,6	209,0	224,2	
	Temp. do ar de vent.	ZIperturbada	-	-	-	9,4	-	213,8	-
		ZI	429,8	445,8	437,0	183,8	74,2	213,8	208,8
		ZD	439,0	441,4	446,0	193,6	23,8	223,6	218,8
	Temp. do ar de retorno	ZIperturbada	-	-	-	143,4	-	144,8	-
		ZI	605,4	587,6	611,0	380,6	297,2	404,0	414,2
		ZD	565,8	545,0	571,4	353,8	142,2	390,4	125,8

Fonte: Elaborada pela autora

Quanto ao sistema de controle, a Figura 1, mostra o esquema considerado neste trabalho. A temperatura de água fria do evaporador não será controlada em *setpoint* fixo, mas controlam-se em *setpoints* fixos as temperaturas dos oito andares e das temperaturas nas saídas de ar de cada *fancoil* de ventilação.

Figura 1 – Esquema do sistema de ar condicionado do Edifício Moderno



Fonte: Elaborada pela autora

O balanço de energia de cada andar é modelado neste trabalho como apresentado na Equação 43. As cargas térmicas devidas à ocupação e equipamentos foram obtidas de Araújo (2016). A radiação térmica é embutida na modelagem da transferência de calor com o meio externo. Para tanto, ajustou-se o produto do coeficiente global de troca térmica pela área de troca térmica aos dados de troca de calor entre o andar e o ambiente calculado para o Araújo (2016) no ponto nominal de projeto. Os valores ajustados para os dois tipos de andares foram mantidos constantes. Assume-se ainda, na Equação 48 que o ar de ventilação insuflado é retirado da zona, de forma a se fechar o balanço material e evitar uma pressurização ou depressurização do andar. Isto é normalmente assegurado pela utilização de *dampers* automatizados. As propriedades do ar atmosférico foram modeladas conforme ASHRAE (2017) e os dados dimensionais das zonas, como área de paredes, volume de ar em cada andar foram obtidos de Araújo (2016).

$$\frac{dT_{ret}}{dt} = \frac{\dot{m}_{ins}h_{ins} - (\dot{m}_{ins} + \dot{m}_{vt})h_{ret} + \dot{m}_{vt}h_z + U_z A_z (BS - T_{ret}) + q_{z,pes} + q_{z,resto}}{m_z (cv_{AS} + ua. cv_{va})} \quad (48)$$

Em que:  $\dot{m}_{ins}$  = Vazão mássica de ar insuflado na zona (kg/s),  $h_{ins}$  = Entalpia do ar insuflado na zona (kJ/kg),  $\dot{m}_{vt}$  = Vazão mássica de ventilação (kg/s),  $h_{ret}$  = Entalpia do ar que sai da zona (kJ/kg),  $h_z$  = Entalpia do ar na zona (kJ/kg),  $U_z$  = Coeficiente global de troca térmica entre a zona e o ambiente externo (W/(m<sup>2</sup>·K)),  $A_z$  = Área de troca térmica através das paredes da zona (m<sup>2</sup>),  $BS$  = Temperatura de bulbo seco do ar ambiente externo (K),  $T_{ret}$  = Temperatura da corrente de ar que sai do andar (K),  $q_{z,pes}$  = Carga térmica por ocupação das pessoas (kW),  $q_{z,resto}$  = Carga térmica por

uso de equipamentos, iluminação e transferência de calor pelas paredes e janelas (kW),  $m_z$  = Massa de ar no andar (kg),  $cv_{AS}$  = Calor específico a volume constante para o ar seco (kJ/kgK),  $ua$  = Umidade absoluta do ar insuflado (kg de água/kg de ar seco)

Com exceção do *fancoil* de ventilação, os demais *fancoils* foram modelados conforme feito por Pellegrini *et al.* (2018). Observou-se que assumir-se um coeficiente global de troca térmica constante para o *fancoil* de ventilação não é adequado. A partir da realização de um mapa de pontos de operação em estado estacionário para diferentes cargas térmicas da edificação e diferentes condições ambientais, estabeleceu-se o modelo empírico da Equação 49 para o *fancoil* de ventilação dos andares 1 a 7. A Equação 50 foi usada para modelar o coeficiente global de troca térmica do *fancoil* de ventilação do oitavo andar.

$$UA_{fan,v,tipo} = 142,0346235 + a + 5,962\hat{h}_{ext} - 0,082853\hat{h}_{ext}^2 + 0,0003867\hat{h}_{ext}^3 \quad (49)$$

Sendo,  $UA_{fan,v,tipo}$  o produto do coeficiente global de troca térmica pela área de troca térmica de cada *fancoil* de ventilação dos andares 1 a 7 e  $\hat{h}_{ext}$  a entalpia específica do ar externo em kJ/kg. Nesta equação, a unidade de  $UA_{fan,v,tipo}$  é kW/m<sup>2</sup>.K

$$UA_{fan,v,8^oandar} = 0,0018691 + 0,4065322UA_{fan,v,tipo} \quad (50)$$

Sendo,  $UA_{fan,v,8^oandar}$  o produto do coeficiente global de troca térmica pela área de troca térmica do *fancoil* de ventilação do oitavo andar.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a síntese do controlador, consideraram-se as seguintes restrições nas variáveis de entrada. A vazão de água para cada um dos 24 *fancoils* de retorno e dos 8 *fancoils* de ventilação pode variar em  $\pm 50\%$  do valor nominal. A rotação do compressor pode operar entre 10Hz e 90Hz, a abertura da EEV pode operar entre 0 e 100% e a vazão de ar para o condensador pode aumentar ou diminuir de 40 m<sup>3</sup>/s em relação ao valor do ponto nominal de operação. Percebe-se que há 35 variáveis manipuladas em que o controlador pode atuar. Quanto às ações de controle, a máxima variação na abertura da válvula de expansão eletrônica em cada período de atuação do controlador foi limitada a 5%, a variação na vazão de ar pode ser de no máximo 3 m<sup>3</sup>/s e na rotação de 2,5 Hz. A máxima variação nas vazões de água para cada *fancoil* é de 2% do valor no ponto nominal de operação. A temperatura da água na saída do evaporador é controlada por faixa entre os valores de 5,7°C e 10,7°C de forma que não haja congelamento da mesma e que não haja problemas operacionais no sistema de compressão do vapor.

A Tabela 3 a seguir apresenta os parâmetros do controlador que foram variados para as simulações dos casos servo com variação no *setpoint* de operação da temperatura nos andares e no ar

na saída dos *fancoils* de ventilação, esta foi a variação no *setpoint* testada em Santos *et al.* (2021). Os autores mostram que o controlador PID-IMC apresenta um bom desempenho quando se aumenta o *setpoint*, mas não consegue abaixar a temperatura dos andares. O controlador preditivo empregado pelos autores conseguiu alcançar os novos pontos de operação, mas apresentou uma resposta lenta e oscilatória para a elevação de temperatura e uma resposta lenta para o abaixamento da temperatura. Na Tabela 3 também são apresentados os parâmetros para as simulações dos casos regulatórios onde foram aplicadas perturbações nas condições do ambiente externo e na carga térmica devida ao uso de equipamentos e iluminação. Para os casos regulatórios, considerou-se como valor de *setpoint* para as temperaturas em todas as zonas e na saída de todos os *fancoils* de ventilação o valor de 24°C. Nas simulações neste item, consideraram-se os parâmetros de sintonia apresentados na Tabela 4, sendo  $y_{\max} = 1$  em todas as simulações e  $q_{1,1} = 0$ . Nesta tabela  $q_{i,i}$  e  $r_{i,i}$  são os elementos das matrizes de ponderação de erros e supressão de movimentos. Os horizontes de predição e de controle foram adotados, respectivamente, como sendo 30 e 10 em todas as simulações e o tempo de amostragem do controlador é de 60s.

Tabela 3 – Perturbações aplicadas para estudo do comportamento regulatório do controlador MPC com a função objetivo adaptada de Wallace *et al.* (2012)

Caso	$T_{ext}$	$UR_{ext}$ (%)	$UA_{ext}$	$q_{ilum\&peessoas,nominal}$
P1	33	50	-	-
P2	30	80	-	-
P3	30	-	$UA_{nom}$	-
P4	33	-	$UA_{nom}$	-
P5	32	-	$UA_{nom}$	$1,1 \times q_{ilum\&peessoas,nominal}$
P6	32	-	$UA_{nom}$	$0,9 \times q_{ilum\&peessoas,nominal}$

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 4 – Parâmetros de sintonia considerados

Conjunto de parâmetros	$k_{\beta}$	$q_{ii}; i \neq 1$	$r_{ii}; i \neq 1$	$r_{1,1}$
S1	1	0,5	0,01	0,01
S2	0,5	0,25	0,1	0,01
S3	0,75	0,25	0,1	0,01

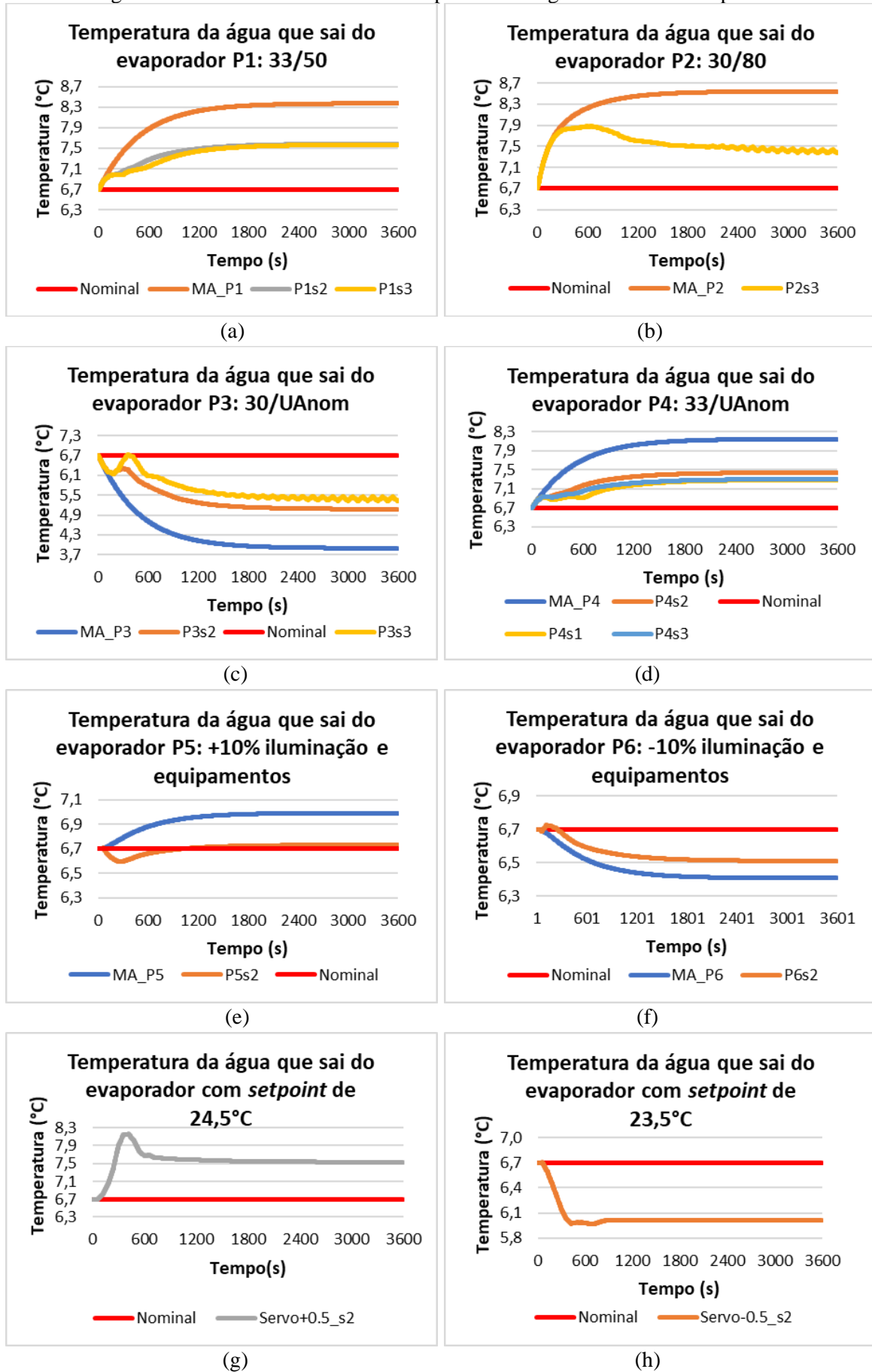
Fonte: Elaborada pela autora

As respostas em malha fechada são apresentadas a seguir. Percebe-se que, embora exista uma ação de controle, reduzindo-se o erro estacionário em relação às respostas em malha aberta, o desempenho do controlador para os casos regulatórios não é satisfatório. O desempenho do controlador para os casos servo é bom. Percebe-se que mesmo empregando-se o modelo ideal sem se incorporar as medições das variáveis controladas, tem-se um bom desempenho, com erro estacionário da ordem de 0,1°C.

O aumento do fator  $k_\beta$  parece levar a um menor erro estacionário, contudo se observa em algumas simulações que o sistema está no limite da estabilidade. Para outras simulações realizadas, não apresentadas neste artigo, houve problemas de convergência (as simulações para as perturbações P1 e P2 e parâmetros de sintonia s1), assim, não se realizaram as simulações de todos os cenários para os parâmetros de sintonia s1. Percebeu-se, ainda, problemas de condicionamento numérico durante a resolução do problema da programação quadrática em diversas simulações, particularmente nos instantes iniciais até 500 a 700 s nas seguintes simulações: P2-s3, P4-s3, P4-s2, P4-s1 e para os casos servo. Embora a função *quadprog* do *software* MATLAB® tenha obtido uma solução viável, o número máximo de iterações foi excedido sem se obter uma solução ótima. Estas soluções implementadas foram responsáveis por problemas durante a resolução do sistema de equações não lineares representativas da operação do *chiller* a ar, sendo que em algumas simulações, durante um ou no máximo 6 instantes de tempo, o programa *fmincon* do *software* MATLAB® não tenha convergido. Como a norma quadrática do vetor de restrições de igualdade se manteve pequena (inferior a  $2 \times 10^{-4}$  para todas as situações, exceto uma em que o erro chegou a  $2 \times 10^{-3}$ ), não se interromperam as simulações. Estes problemas ocorreram ao início das simulações. Salienta-se que problemas de convergência semelhantes foram observados em uma das simulações em malha aberta (para a perturbação P3). Foram efetuadas outras simulações, inclusive com erros nos parâmetros dos modelos identificados e observaram-se problemas de instabilidade na resolução do sistema de equações não lineares para tempos elevados (superiores a 1800 s).

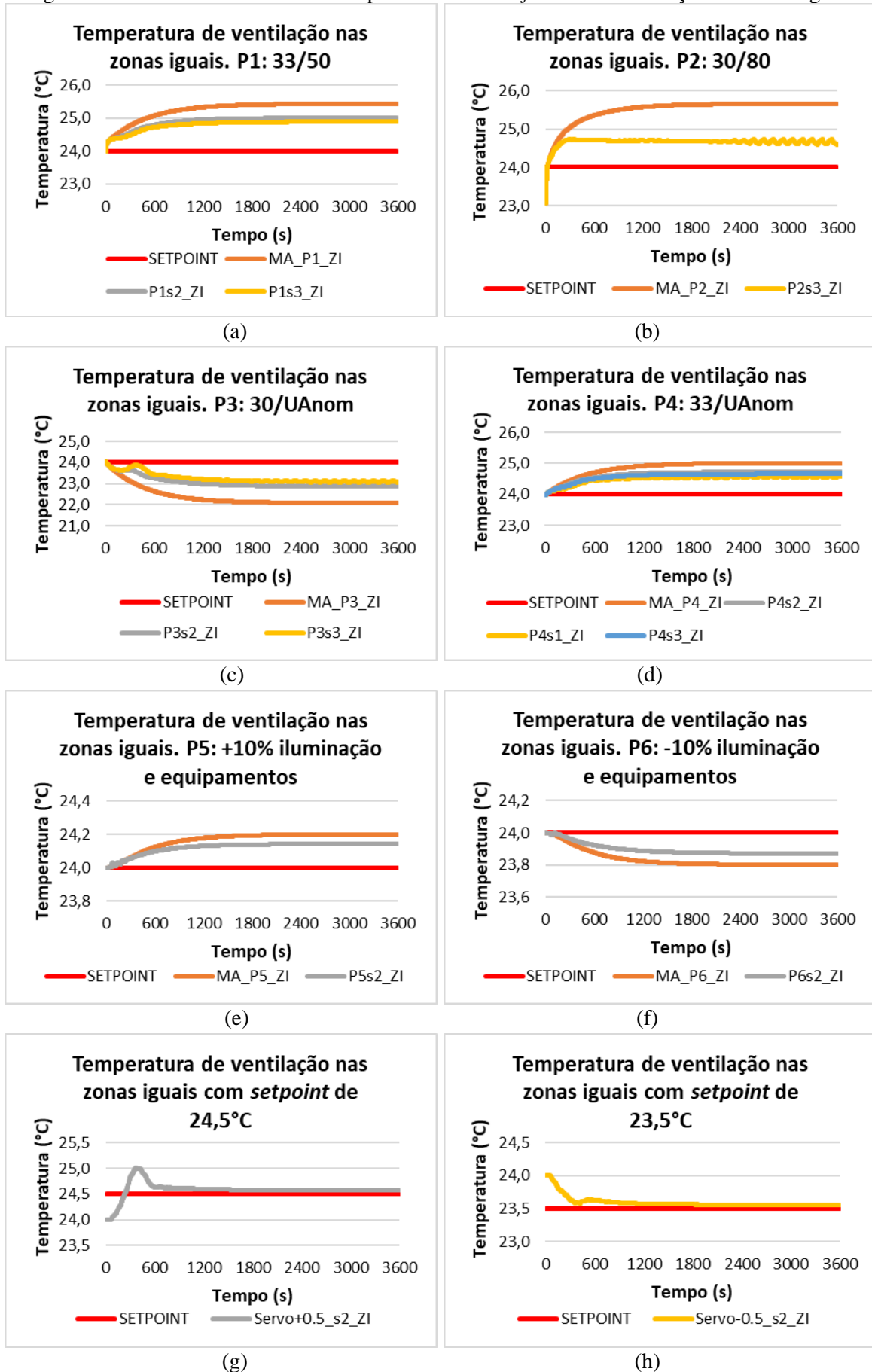
As Figuras 2 a 5 mostram os resultados da simulação do controlador sem a incorporação do corretor de estimativa de estados apresentado na Equação 28 para os casos simulados P1 a P6, sendo MA a simulação do sistema em malha aberta, ou seja, sem ação do controlador. Nestas figuras, indica-se como SETPOINT para as variáveis controladas por faixa, o valor nominal de projeto da variável analisada. Quando a variável é controlada, SETPOINT é efetivamente o valor de referência desta variável adotado na simulação.

Figura 2 – Análise dos valores da Temperatura da água na saída do evaporador



Fonte: Elaborada pela autora

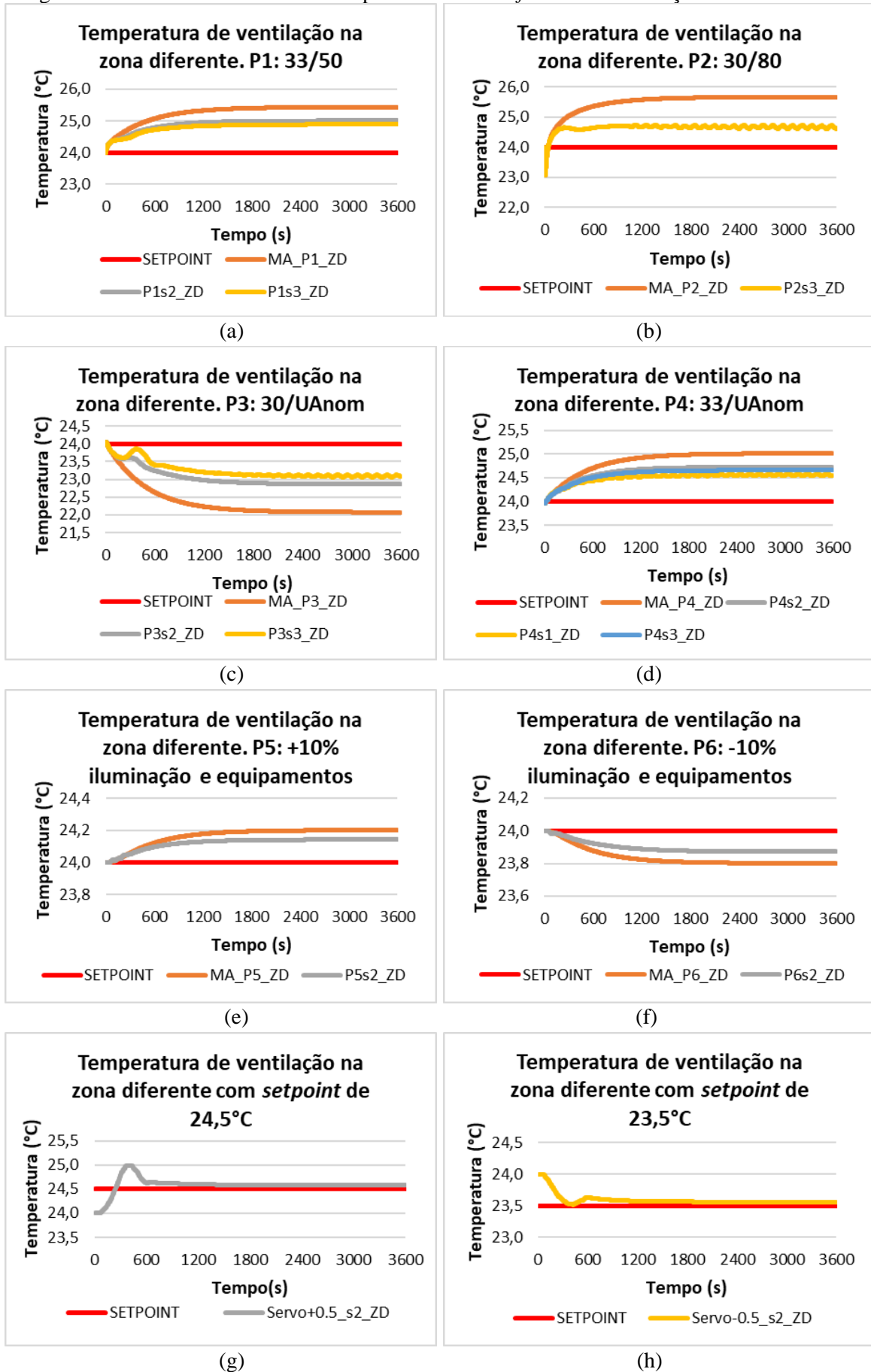
Figura 3 – Análise dos valores da Temperatura do ar no *fancoil* de ventilação das zonas iguais



Fonte: Elaborada pela autora

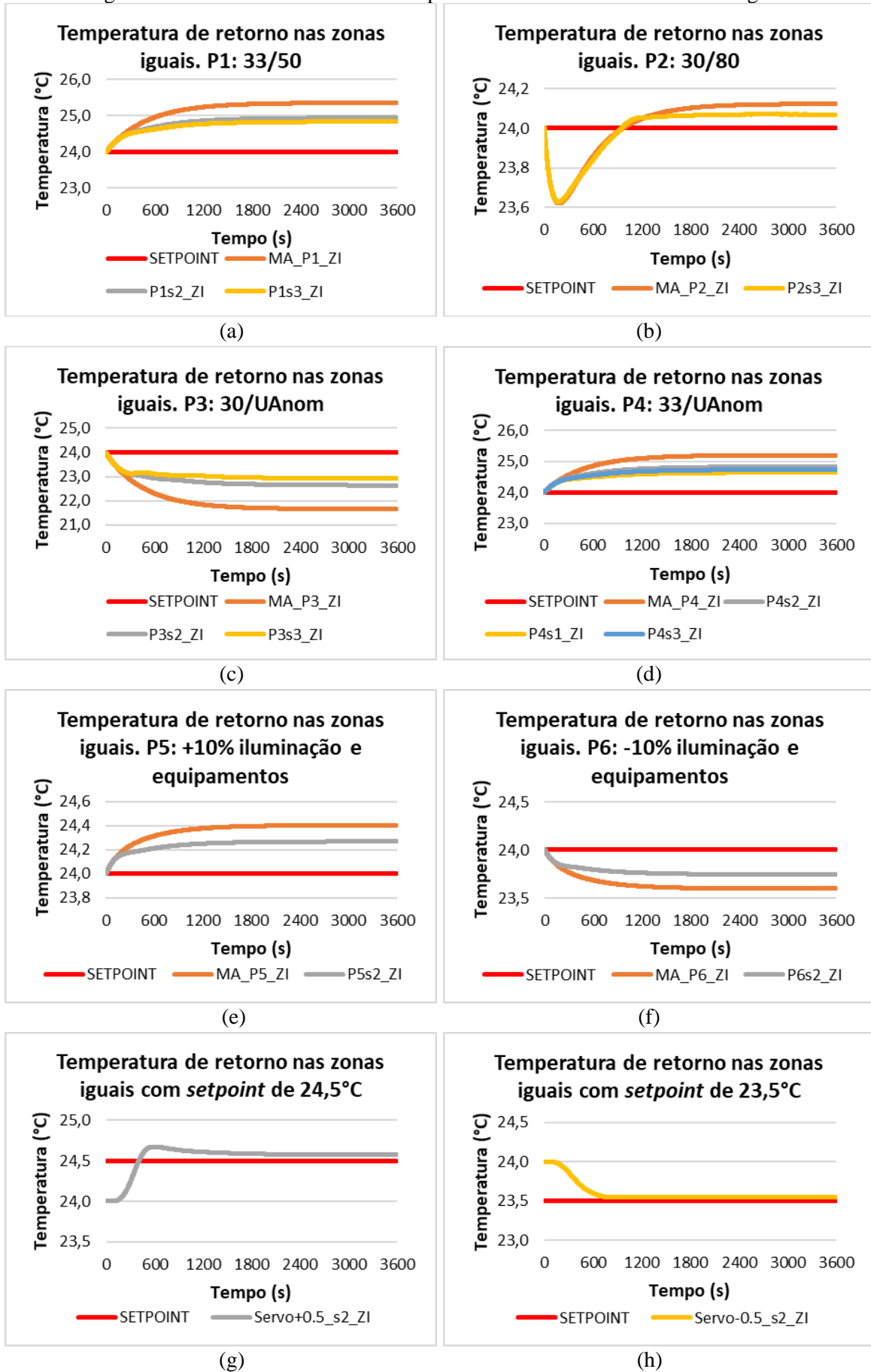


Figura 4 – Análise dos valores da Temperatura do ar no *fancoil* de ventilação da zona diferente



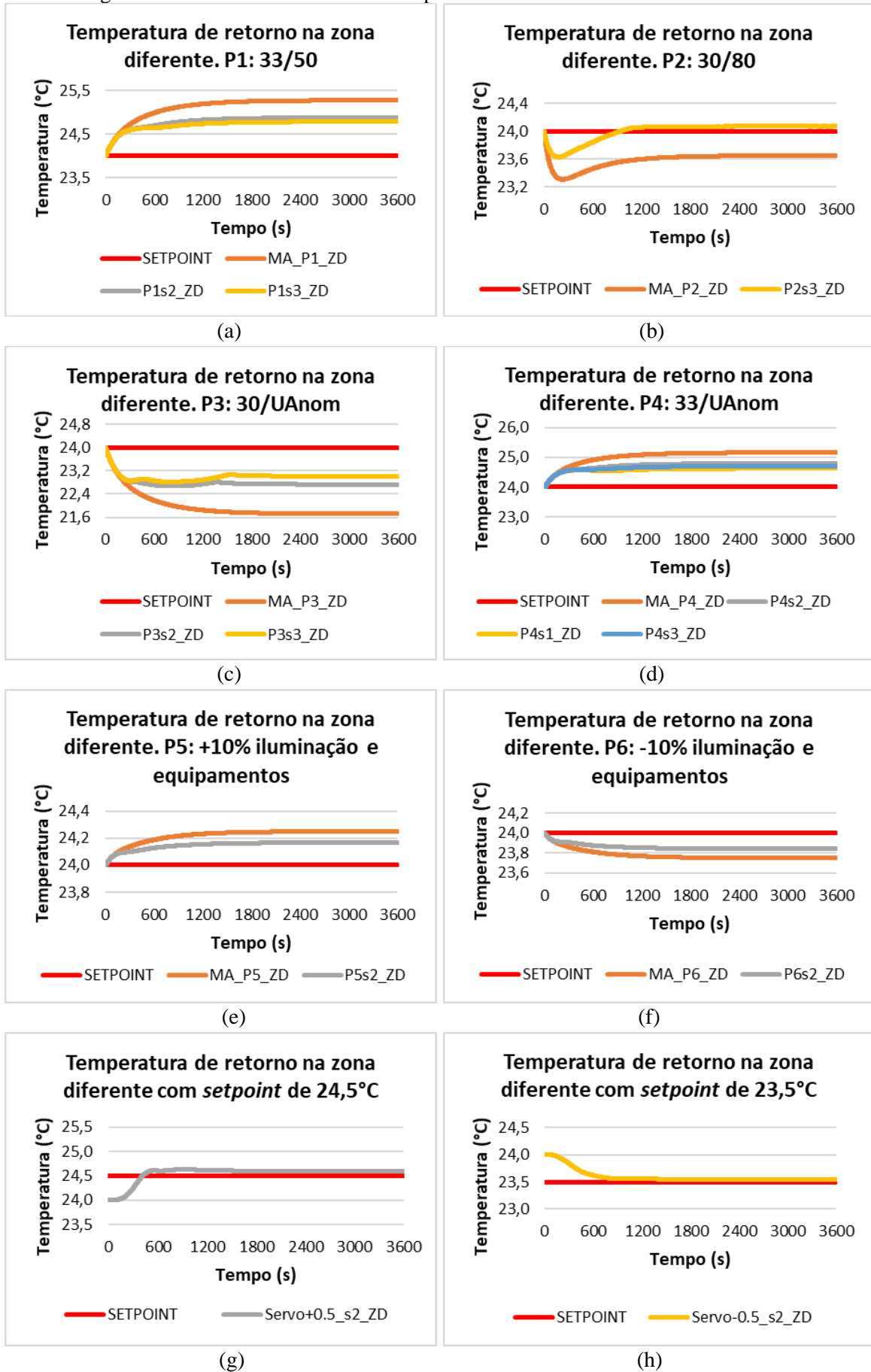
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 5 – Análise dos valores da Temperatura do ar de retorno das zonas iguais



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 6 – Análise dos valores da Temperatura do ar de retorno da zona diferente



Fonte: Elaborada pela autora

Os resultados mostram uma boa capacidade de controle da operação do controlador para o caso servo, em especial, considerando-se que não foi incorporada a atualização dos estados estimados com medições da planta. O pequeno *offset* observado se encontra dentro do erro admissível para o controle da operação de sistemas de ar condicionado para fins de conforto e pode ser explicado pela existência de não linearidades no processo reportadas em Pellegrini *et al.* (2018). A zona menor pode estar apresentando um comportamento diferente das demais zonas pois foram empregados os mesmos parâmetros de sintonia para todas as zonas, assim como o mesmo peso para cada relação entre cada variável manipulada com cada variável controlada, desse modo essa zona pode estar sentindo mais os efeitos de erros de modelagem.

Salienta-se que a sintonia do controlador foi prontamente obtida a partir das recomendações genéricas apresentadas na literatura reportadas neste trabalho. Apesar da dimensão elevada do controlador e da existência de 630 estados estimados e dos elevados horizontes de controle e predição e de se restringirem os valores preditos ao longo de todo o horizonte de predição, nenhum problema de estabilidade numérica foi encontrado e, uma vez, montadas as matrizes de estado, a resolução dos problemas de programação quadrática foi rápida.

É possível que as dificuldades de convergência e de controle possam estar associadas à determinação de pontos operacionais no limite de capacidade de operação do sistema ou não realizáveis. Os ganhos pequenos e as respostas interagentes parecem sugerir a necessidade de incorporação de um modelo de previsão das perturbações. Adicionalmente, percebe-se a necessidade de controlar bem a temperatura de ar na saída dos *fancoils* de ventilação, uma vez que esta é uma perturbação importante para as zonas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, sintetizou-se um controlador preditivo que emprega uma representação do processo na forma de um modelo em espaço de estados incremental para o controle da temperatura de operação de oito andares do Edifício Moderno. O sistema de controle é do tipo ar-água com vazão de água variável, dotado de *fancoils* específicos para o controle do ar externo usado para a renovação do ar. A operação do processo foi representada por meio de modelos de 1ª ordem. O controlador controla 16 temperaturas em *setpoints* fixos e a temperatura da água na saída do evaporador por faixa e manipula 35 variáveis manipuladas.

Foi desenvolvido um novo modelo dinâmico fenomenológico da operação do sistema de ar condicionado do Edifício Moderno e analisou-se o seu comportamento dinâmico para estabelecer os modelos lineares de 1ª ordem que reproduzissem o seu comportamento frente a perturbações. A estrutura do controlador preditivo foi selecionada com base na representação do processo em modelos de espaços de estado e a partir disso foram escolhidos os parâmetros de sintonia do controlador

preditivo. A programação do controlador proposto para o Edifício Moderno foi realizada no ambiente do *software* MATLAB® e seu desempenho foi analisado para verificar a capacidade de manter as zonas controladas em *setpoints* especificados.

O controlador sintetizado mostrou boa capacidade de alterar os *setpoints* dos oito andares, mesmo não tendo sido incorporado no modelo de espaços de estado o efeito da medição de variáveis de processo, e uma capacidade razoável nos casos regulatórios tendo em vista que não conseguiu controlar a temperatura no valor esperado de 24°C com as perturbações feitas. Assim, pode haver a necessidade de melhor entender a região de operação do *chiller*, estabelecendo um mapa de pontos operacionais possíveis em estado estacionário e melhor caracterizar as máximas e mínimas variações permitidas nas variáveis manipuladas.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- a) fazer mapas de operação para delimitar melhor os limites em todas as variáveis manipuladas;
- b) rever o modelo de coeficiente global do *fancoil* da zona diferente;
- c) analisar o condicionamento das matrizes e atribuir pesos diferentes;
- d) deixar a incorporação das medições dos erros em destaque (diferentemente da abordagem de Wallace *et al.* (2012));
- e) estudar a incorporação da minimização do consumo energético na função objetivo do controlador.

## REFERÊNCIAS

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

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.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE. Handbook of Fundamentals.** ASHRAE, Inc., 2017.

ASTRÖM, J. K.; WITTENMARK, B. **Computer – Controlled Systems: Theory and Design.** Mineola, New York, 3rd ed., 2011. 576 p.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte.** 2nd ed., LTC, 2004. 858 p.

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.

- CAPRON, B.D.O.; ODLOAK, D. A robust LQR-MPC control strategy with input constraints and control zones. **J. of Process Control**, v. 64, p. 88—99, 2018.
- GARRIGA, J. L.; SOROUGH, M. **Model Predictive Control Tuning Methods: A Review**. Philadelphia, Pennsylvania. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, Vol. 49, No. 8.
- GEORGIOU, A.; GEORGAKIS, C.; LUYBEN, W. L. **Nonlinear Dynamic Matrix Control for High-Purity Distillation Columns**. *AIChE J.* 1988, 34 (8), 1287–1298.
- IEA. **Cooling, 2020**. IEA, Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/cooling>>. Acesso em 29/05/2021.
- 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.
- MARIANO, Y. R. **Elaboração de procedimentos de síntese de controladores robustos para reatores contínuos de mistura perfeita**. FAPESP, São Paulo, 2007. Artigo.
- MAURATH, P. R.; LAUB, A. J.; SEBORG, D. E.; MELLICHAMP, D. A. **Predictive Controller Design by Principal Components Analysis**. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1988, 27, 1204–1212.
- ODLOAK, D. **Extend robust model predictive control**. *AIChEJ*, v.50, n. 8, p. 1824-1836, 2004.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5 ed., Pearson Education, 2010. 809 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.
- RUIVO, J. P.; GASPARINI, L. B. **Estudo do efeito da Fidelidade do Modelo Matemático do Evaporador na Avaliação da Operação de um Sistema de Compressão a Vapor**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020
- SANTOS, C. G.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M. **Síntese de um controlador MPC para o condicionamento de ar do edifício moderno**. Trabalho apresentado na XVI Jornada de Iniciação Científica, São Paulo, 2020. Artigo.
- SANTOS, C. G.; TVRZSKÁ DE GOUVÊA, M.; SILVA, A. F. da; CALY, J. P.; ROSA, M. T. de M. G.. Síntese de um controlador MPC para o condicionamento de ar do edifício moderno. In: ATENA(ed.). **Engenharia Elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica 2**. [S.I.]: ATENA, 2021. No prelo.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics and control**. 3rd ed., NJ: John Wiley & Sons, 2011. 514 p.
- SOUZA, G.; ODLOAK, D.; ZANIN, A. C. **Real time optimization (RTO) with model predictive control (MPC)**. Elsevier, São Paulo, 2010, 34, 1999-2006.

TRIERWEILER, J. O.; FARINA, L. A. **RPN Tuning Strategy for Model Predictive Control.** *J. Process Control* **2003**, *13*, 591–598.

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.

ZHANG, R.; WU, S.; GAO, F. **State space model predictive control for advanced process operation: A review of recent development, new results, and insight.** Hong Kong, 2017. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *56*, 5360–5394.

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.