Sintonia de PI com base em MPC aplicado a um sistema de coletores solares ⋆

Leonardo Colussi Lucian R. da Silva Rodolfo C. C. Flesch Marcus V. Americano da Costa

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Controle e Automação de Processos de Energia, Departamento de Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil (e-mail: leonardo.colussi@grad.ufsc.br, lucian.ribeiro@ufsc.br, rodolfo.flesch@ufsc.br, marcus.americano@ufsc.br)

Abstract: This work presents the application of a proportional-integral controller, tuned from the concepts of generalized predictive control, together with an anti-*windup* strategy for handling constraints. Due to the nonlinear nature of the plant model, the computation of the controller is performed using a first-order model obtained from linearization at a specific operating point. The performance of the proposed controller was significantly superior compared to other control approaches, showing no oscillations around the reference signal and exhibiting low aggressiveness in the control action. The comparative analysis of the controllers also considered a performance index that evaluates the reference tracking error and control effort.

Resumo: Este trabalho apresenta a aplicação de um controlador proporcional-integral, sintonizado a partir dos conceitos do controlador preditivo generalizado, em conjunto com uma estratégia anti-*windup* para o tratamento de restrições. Devido à natureza não linear do modelo da planta, a obtenção do controlador é realizada por meio do modelo de primeira ordem obtido a partir da linearização em um ponto de operação específico. O desempenho do controlador proposto foi significativamente superior em comparação com outras abordagens de controle, não apresentando oscilações em torno do sinal de referência e exibindo baixa agressividade na ação de controle. A análise comparativa dos controladores também considerou um índice de desempenho que avalia o erro de seguimento de referência e o esforço de controle.

Keywords: Solar collectors; Solar energy; Model predictive control; GPC; PID.

Palavras-chaves: Coletores solares; Energia solar; Controle preditivo baseado em modelo; GPC; PID.

1. INTRODUÇÃO

Em um cenário de reservas limitadas de fontes de energia fóssil e aumento do aquecimento global impulsionado pela grande quantidade de CO_2 emitida pela sociedade atual, torna-se imperativo o uso amplo de energias provenientes de fontes renováveis (Tian e Zhao, 2013; Ghritlahre e Prasad, 2018). Nesse contexto, a energia solar se destaca, podendo ser empregada de forma passiva ou ativa. Na abordagem passiva, a energia solar é utilizada sem a necessidade de equipamentos adicionais, enquanto na abordagem ativa são utilizados dispositivos que convertem essa energia em outra forma de energia utilizável.

No contexto da utilização ativa da energia solar, dois tipos de equipamentos são comuns para sua captação: os coletores solares fotovoltaicos e os coletores solares térmicos. Os coletores solares fotovoltaicos convertem diretamente a luz solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas, geralmente feitas de silício. Quando os fótons da luz solar atingem essas células, liberam elétrons, gerando corrente elétrica. Por outro lado, os coletores solares térmicos utilizam a energia solar para aquecer um fluido (como água ou ar) em tubos ou painéis absorvedores (Hiben et al., 2023). Esse calor é, então, transferido para uso em sistemas de aquecimento de água, ambientes ou processos industriais. Os coletores concentradores parabólicos compostos (CPCs, do inglês *Compound Parabolic Collectors*) são o tipo mais usado de coletor solar térmico (Tian et al., 2018). Isso ocorre por possuírem algumas características importantes, tais quais: um bom desempenho ótico (que permite absorver uma quantidade elevada de calor), capacidade de armazenamento térmico de alta densidade, alta taxa de troca de calor e longa durabilidade.

Muitas pesquisas foram conduzidas ao longo dos anos devido ao amplo espectro de aplicações da energia solar térmica (Evangelisti et al., 2019). Isso se deve ao fato de que seu uso não se limita ao aquecimento de fluidos (Suman et al., 2015), como ar e água, mas também é aplicado

⋆ Este trabalho foi realizado com apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015 e gerido pela FAPESP com os processos nº 2024/10280-5 e 2024/11429-2.

em outros processos importantes, como a dessalinização da água (Paixão et al., 2023), o aquecimento e resfriamento industrial (Hiben et al., 2023), a destoxificação e desinfecção da água (Malato et al., 2007), entre outros.

Uma característica distintiva das plantas de energia solar térmica quando se trata do aquecimento de água é a presença de sistemas de armazenamento. Isso permite o suprimento da demanda de água quente mesmo quando não há irradiação solar. Um exemplo notável desse sistema é a usina Cerro Dominador, abordado em Telsnig e Ferrán (2015), localizada no deserto do Atacama, no Chile. Essa usina possui capacidade de armazenamento de energia térmica por até 17,5 horas e tornou-se um modelo de eficiência e sustentabilidade na geração de energia solar térmica.

Contudo, técnicas de modelagem e de simulação são importantes para fins de projeto de engenharia. Em particular, o modelo do sistema solar térmico utilizado por Buzás e Kicsiny (2014) e validado por Kicsiny (2014) refere-se a um sistema de aquecimento solar instalado no campus da Universidade István Szent (SZIU, do inglês *Szent István University*). As funções que descrevem a dinâmica das entradas foram obtidas a partir de uma abordagem caixa branca, na qual foram utilizados conceitos físicos que fazem uso dos parâmetros do coletor solar térmico. Dessa forma, a dinâmica de cada entrada do sistema é imposta por meio das características do sistema e não mediante uma abordagem empírica para obtenção das constantes de tempo e dos ganhos estáticos de cada dinâmica que descreve o processo.

Em termo de operação, abordagens de controle clássico, como o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), e estratégias de controle preditivo baseado em modelo (MPC, do inglês *Model Predictive Control*) são amplamente utilizadas em aplicações envolvendo sistemas com coletores solares. No artigo de Zambrano et al. (2006), foi utilizado um MPC híbrido para controlar um sistema solar térmico com armazenamento e equipado com um refrigerador por absorção. No trabalho de Fiorentini et al. (2017), as características do coletor solar de ar foram integradas a um algoritmo MPC que era regulado pelo sistema de automação predial de uma casa de um único pavimento. Camacho et al. (2018) apresentaram um MPC em espaço de estados, juntamente com um observador de estados, que é utilizado para controlar a temperatura de saída de um coletor solar. A proposta obteve um melhor desempenho quando comparada a um controlador preditivo generalizado (GPC, do inglês *Generalized Predictive Control*) com ganho escalonado. Li et al. (2020) projetaram um controle antecipativo (*feedforward*) assistido por PI para um coletor solar parabólico, que regula a vazão mássica para evitar flutuações causada pelas mudanças nas condições climáticas e manter a temperatura de saída próxima à referência, resultando em uma redução de 6% na perda térmica.

Entretanto, abordagens MPC, apesar de oferecerem um bom desempenho na maioria dos processos nos quais são aplicadas, são relativamente mais complexas de serem implementadas na prática. Isso se deve, principalmente, à necessidade de se executar um algoritmo de otimização a cada período de amostragem. Por outro lado, o controle PID, presente em aproximadamente 90% das malhas de controle industriais, é bastante simples de ser implementado e oferece uma boa relação entre desempenho e robustez (Åström e Wittenmark, 2013). Além disso, estratégias conhecidas como anti-*windup* podem ser utilizadas em conjunto com o PID para mitigar os efeitos causados pela presença de restrições na malha de controle (da Silva et al., 2019).

No sistema de controle descrito por Buzás e Kicsiny (2014), é empregado um controlador PI que, devido à falta de tratamento adequado das restrições operacionais do atuador, enfrenta dificuldades em seguir corretamente um sinal de referência nos instantes iniciais. A ausência de consideração dessas restrições resulta em um fenômeno conhecido na literatura como *windup*, o qual pode levar a uma redução no desempenho do sistema em malha fechada. Isso pode se manifestar por meio de um alto sobressinal, oscilações na saída do sistema e, em casos extremos, até mesmo instabilidade (da Silva et al., 2019).

O objetivo deste estudo é ajustar um controlador PI com base em um GPC para regular a temperatura do fluido de saída de um coletor solar, cujo modelo é descrito por Buzás e Kicsiny (2014), de modo a obter um desempenho mais satisfatório quando comparado à sintonia utilizada no artigo original. O PI resultante tem resposta semelhante àquela obtida pelo GPC, porém não requer a execução de um algoritmo de otimização a cada período de amostragem. Essa abordagem pode ser estendida para qualquer tipo de planta solar térmica cuja modelagem possa ser aproximada por um modelo linear de primeira ordem. O controlador PI proposto é combinado a uma estratégia de anti-*windup* para lidar com as restrições de magnitude e de incremento do sinal de controle, visando mitigar os efeitos da presença dessas restrições no sistema em malha fechada. Portanto, propõe-se aqui a junção das potencialidades de controle avançado com a simplicidade de aplicação de um controle PI para aplicação em coletores solares térmicos.

Este trabalho é estruturado em seis seções. Na Seção 2.1, é realizada a modelagem do sistema não linear, bem como a linearização do sistema em um ponto de operação. Na Seção 3, é apresentada a formulação da sintonia do controlador PI equivalente a um GPC. Na Seção 4, são apresentados os resultados da simulação do sistema em malha fechada, bem com suas respectivas análises. Por fim, na Seção 5, são apresentadas as conclusões do artigo.

2. MODELAGEM DO SISTEMA

Esta seção apresenta a formulação do modelo não linear do coletor solar, que será utilizado para simular o sistema em malha fechada. Adicionalmente, descreve-se a linearização do sistema em um ponto de operação específico, bem como a obtenção da função de transferência que representa a dinâmica da planta em torno desse ponto. O modelo linear resultante é então utilizado para o cálculo do controlador PI, baseado no GPC para o caso sem restrições.

2.1 Modelagem do sistema não linear

O coletor solar térmico considerado neste estudo é regulado por uma válvula que é responsável pelo controle de vazão do fluido, o qual apresenta uma temperatura específica.

Internamente, a temperatura do fluido é influenciada pela temperatura ambiente, onde o sistema está localizado, e pela radiação solar recebida, que transfere calor para o fluido. Consequentemente, a temperatura do fluido na saída do sistema é a principal variável a ser controlada conforme a referência estabelecida. A Figura 1 apresenta o esquemático de um coletor solar térmico, em que T_o (°C) é a temperatura de saída do fluido, I (W/m^2) é a irradiância, T_i (°C) é a temperatura de entrada do fluido, T_e (°C) é a temperatura ambiente do coletor e v (m^3/s) é a vazão da válvula (Buzás e Kicsiny, 2014).

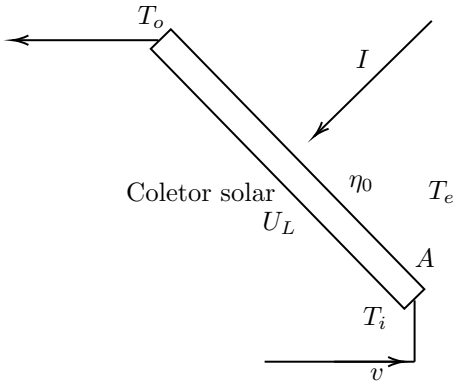

Figura 1. Esquemático de um coletor solar térmico.

O modelo do coletor solar, abordado por Kicsiny (2014), é dado por

$$\frac{\mathrm{d}T_o(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{A\eta_0}{C} I(t) - \frac{U_L A}{C}(T_\mathrm{a}(t) - T_\mathrm{e}(t)) + \frac{v(t)}{V}(T_\mathrm{i}(t) - T_\mathrm{o}(t)), \tag{1}$$

em que

$$T_a(t) = \frac{T_i(t) + T_o(t)}{2} \tag{2}$$

representa a média da temperatura dos fluidos no coletor. É importante notar que esse modelo é considerado não linear pelo fato de que a vazão de entrada, $v(t)$, que não é constante, é multiplicada pela temperatura de entrada do fluido $T_i(t)$ e pela temperatura de saída do fluido $To(t)$.

Além disso, os parâmetros utilizados na modelagem que descreve o coletor solar térmico em estudo são os seguintes: $\eta_0 = 0{,}74$ (eficiência óptica do coletor), $U_L = 7\,\mathrm{W/(m^2\,K)}$(coeficiente geral de troca de calor do coletor), $A = 33{,}3\,\mathrm{m}^2$ (área superficial do coletor), $V = 0{,}027\,\mathrm{m}^3$ (volume do fluido de transferência de calor no coletor), $\rho = 1000\,\mathrm{kg/m^3}$ (massa específica do fluido do coletor), $c = 4200\,\mathrm{J/(kg\,K)}$ (capacidade térmica específica do fluido do coletor) e $C = 113\,400\,\mathrm{J/K}$ (capacidade térmica do fluido do coletor).

O sistema avaliado por Buzás e Kicsiny (2014) utiliza sinais senoidais de referência e perturbações com o intuito de incorporar elementos de periodicidade às entradas do sistema, semelhantes aos observados no no campus da SZIU. Os sinais considerados apresentam as seguintes características

$$\begin{aligned} T_{o,r}(t) &= 60 + 5\,\mathrm{sen}(2\pi 0{,}003456t)\ ^\circ\mathrm{C}, \\ I(t) &= 450 + 200\,\mathrm{sen}(2\pi 0{,}104741t)\ \mathrm{W/m^2}, \\ T_i(t) &= 15 + 5\,\mathrm{sen}(2\pi 0{,}010474t)\ ^\circ\mathrm{C}, \\ T_e(t) &= 18 + 8\,\mathrm{sen}(2\pi 0{,}002073t)\ ^\circ\mathrm{C}, \end{aligned} \tag{3}$$

considerando uma temperatura inicial do fluido de saída de $T_o(0) = 20\,^\circ\mathrm{C}$.

2.2 Modelagem do sistema linearizado em um ponto de operação

O sistema de controle da planta linearizada no ponto de operação possui a vantagem de ser mais facilmente compreendido, além de possibilitar o projeto de controladores lineares. O modelo da planta obtido aqui é utilizado para sintonizar um controlador PI com base no GPC para o caso sem restrições.

Para linearizar o sistema no ponto de operação, são consideradas novas variáveis para a referência e para as perturbações, definidas como

$$\begin{aligned} \tilde{T}_o(t) &= T_o(t) - T_o^0, \\ \tilde{v}(t) &= v(t) - v^0, \\ \tilde{T}_\mathrm{e}(t) &= T_\mathrm{e}(t) - T_\mathrm{e}^0, \\ \tilde{I}(t) &= I(t) - I^0, \\ \tilde{T}_\mathrm{i}(t) &= T_\mathrm{i}(t) - T_\mathrm{i}^0, \end{aligned} \tag{4}$$

em que $T_o^0 = 60\,^\circ\mathrm{C}$, $v^0 = 0{,}000\,039\,\mathrm{m^3/s}$, $T_e^0 = 18\,^\circ\mathrm{C}$, $I^0 = 450\,\mathrm{W/m^2}$ e $T_i^0 = 15\,^\circ\mathrm{C}$ representam os valores das variáveis correspondentes no ponto de operação. Nesse caso, com base na equação diferencial ordinária apresentada na Equação (1), é possível obter um modelo linearizado no ponto de operação dado por

$$\frac{\mathrm{d}T_\mathrm{o}(t)}{\mathrm{d}t} = -\left(\frac{U_\mathrm{L}A}{2C} + \frac{v^0}{V}\right)\tilde{T}_\mathrm{o}(t) + \frac{T_\mathrm{i}^0 - T_\mathrm{o}^0}{V}\tilde{v}(t) + \frac{A\eta_0}{C}\tilde{I}(t) + \left(\frac{v^0}{V} - \frac{U_\mathrm{L}A}{2C}\right)\tilde{T}_\mathrm{i}(t) + \frac{U_\mathrm{L}A}{C}\tilde{T}_\mathrm{e}(t). \tag{5}$$

Aplicando a transformada de Laplace na Equação (5), considerando condições iniciais nulas, é possível obter as funções de transferência que determinam a dinâmica de cada variável de entrada do sistema na variável de saída, resultando em

$$\overline{\tilde{T}}_o(s) = \frac{\tilde{\tau}}{\tilde{\tau}s+1}\frac{T_\mathrm{i}^0 - T_\mathrm{o}^0}{V}\overline{\tilde{v}}(s) + \frac{\tilde{\tau}}{\tilde{\tau}s+1}\frac{A\eta_0}{C}\overline{\tilde{I}}(s) + \frac{\tilde{\tau}}{\tilde{\tau}s+1}\left(\frac{v^0}{V} - \frac{U_\mathrm{L}A}{2C}\right)\overline{\tilde{T}}_\mathrm{i}(s) + \frac{\tilde{\tau}}{\tilde{\tau}s+1}\frac{U_\mathrm{L}A}{C}\overline{\tilde{T}}_\mathrm{e}(s), \tag{6}$$

em que

$$\tilde{\tau} = \frac{1}{\frac{U_L A}{2C} + \frac{v^0}{V}}. \tag{7}$$

A Equação (6) pode ser reescrita na forma

$$\overline{\tilde{T}}_o(s) = \tilde{W}_1(s)\overline{\tilde{I}}(s) + \tilde{W}_2(s)\overline{\tilde{T}}_\mathrm{i}(s) + \tilde{W}_3(s)\overline{\tilde{T}}_\mathrm{e}(s) + \tilde{W}_4(s)\overline{\tilde{v}}(s), \tag{8}$$

em que

$$
\begin{aligned}
\tilde{W}_1(s) &= \frac{\overline{\tilde{T}}_o(s)}{\overline{\tilde{I}}(s)} = \frac{\tilde{\tau} A \eta_0}{(\tilde{\tau} s + 1) C}, \\
\tilde{W}_2(s) &= \frac{\overline{\tilde{T}_{\mathbf{o}}}(s)}{\overline{\tilde{T}_{\mathbf{i}}}(s)} = \frac{\tilde{\tau}}{(\tilde{\tau} s + 1)} \left(\frac{v^{\mathbf{0}}}{V} - \frac{U_{\mathbf{L}} A}{2C} \right), \\
\tilde{W}_3(s) &= \frac{\overline{\tilde{T}}_o(s)}{\overline{\tilde{T}}_e(s)} = \frac{\tilde{\tau} U_{\mathrm{L}} A}{(\tilde{\tau} s + 1) C}, \\
\tilde{W}_4(s) &= \frac{\overline{\tilde{T}}_o(s)}{\overline{\tilde{v}}(s)} = \frac{\tilde{\tau} \left(T_{\mathrm{i}}^0 - T_{\mathrm{o}}^0 \right)}{(\tilde{\tau} s + 1) V}.
\end{aligned} \tag{9}
$$

Com base nas funções de transferência apresentadas na Equação (9), é possível estruturar um diagrama de blocos preliminar representando um sistema em malha fechada, considerando $\tilde{W}_{\mathrm{c}}$ como o controlador, $\tilde{W}_4$ como a dinâmica a ser controlada e $\tilde{W}_1$, $\tilde{W}_2$ e $\tilde{W}_3$ como as dinâmicas de perturbações de saída do sistema. Além disso, a partir do modelo da planta linearizado, $\tilde{W}_4$, é possível realizar a sintonia de controladores lineares para serem aplicados ao sistema em torno do ponto de operação.

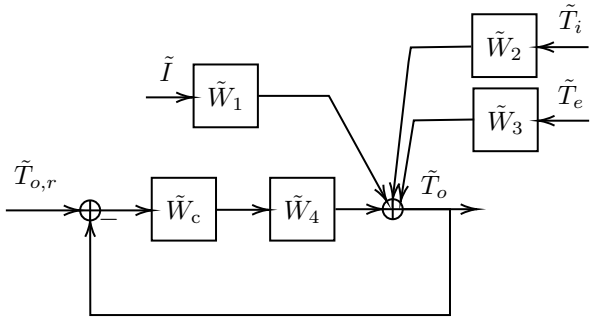

Figura 2. Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle linearizado.

3. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR PI EQUIVALENTE AO GPC

Esta seção apresenta a formulação do controlador PI a partir da estratégia GPC considerando o caso sem restrições. Esse controlador foi sintonizado com base no modelo linearizado da planta do sistema, apresentado na Equação (9), e foi utilizado na simulação do sistema em malha fechada.

Considere que o modelo auto-regressivo integrado de média móvel (CARIMA, do inglês *Controlled Auto-Regressive and Integrated Moving Average*) de primeira ordem,

$$(1 + a_1 z^{-1}) y(k) = b_0 u(k-1) + \frac{\eta(k)}{\Delta}, \tag{10}$$

é usado pelo GPC para calcular as predições das saídas futuras da planta, que são utilizadas para calcular a ação de controle minimizando uma função custo (Camacho e Bordons, 2013). Na Equação (10), $u(k)$ e $y(k)$ representam a entrada e a saída do processo, respectivamente, k é o tempo discreto em amostras, z^{-1} é o operador atraso, $\eta(k)$ é um ruído branco com média nula e $\Delta = (1 - z^{-1})$. A função custo a ser minimizada pelo GPC é dada por

$$J_{\mathrm{MPC}} = \sum_{j=1}^{N} [\hat{y}(k+j|k) - r(k)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda [\Delta u(k+j-1)]^2, \tag{11}$$

em que N é o horizonte de predição, N_u é o horizonte de controle, λ é o peso do incremento de controle, $\hat{y}(k+j|k)$ é a saída predita em $k+j$ no instante de tempo k, $r(k)$ é o sinal de referência considerado constante no horizonte de predição e $\Delta u(k)$ é o incremento do sinal de controle.

Uma solução analítica que minimiza J_{MPC}, para o caso sem restrições, pode ser obtida diferenciando J_{MPC} em relação a $\Delta u(k)$ e igualando a zero. Com base nisso, a solução ótima para o caso sem restrições, $\Delta u^{\star}_{\mathrm{UC}}(k)$, pode ser obtida como (Normey-Rico et al., 2024)

$$\Delta u^{\star}_{\mathrm{UC}}(k) = \sum_{j=1}^{2} l_{y_j} y(k-j) + \sum_{i=1}^{N} v_i r(k), \tag{12}$$

em que os coeficientes l_{y_j} e v_i podem ser calculados a partir dos parâmetros do modelo, do horizonte de predição N, do horizonte de controle N_u e do peso do incremento de controle λ. Ou seja, a lei de controle GPC para o caso sem restrições pode ser reestruturada em uma forma equivalente a um controlador PI de 2 graus de liberdade com um controlador $C_{\mathrm{PI}}(z)$ e um filtro de referência $F_{\mathrm{PI}}(z)$ dados por

$$C_{\mathrm{PI}}(z) = -\frac{l_{y_1} + l_{y_2} z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \tag{13}$$

$$F_{\mathrm{PI}}(z) = \frac{\sum_{i=1}^{N} v_i}{l_{y_1} + l_{y_2} z^{-1}}, \tag{14}$$

em que $F_{\mathrm{PI}}(z)$ possui ganho estático igual a 1.

4. SIMULAÇÃO DO SISTEMA E RESULTADOS

Nesta seção, é apresentada uma comparação entre o controlador PI proposto e o controlador considerado por Buzás e Kicsiny (2014), que apresenta ganho proporcional $K_p = -15$ e ganho integral $K_i = -3$. O controlador foi discretizado utilizando o método de Tustin, considerando um período de amostragem de $T_s = 1$, resultando em

$$C_{\mathrm{PI_C}}(z) = \frac{-16{,}5 + 13{,}5 z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \tag{15}$$

O controlador PI discreto com base no GPC foi sintonizado a partir do modelo da planta linearizada, $\tilde{W}_4(s)$, discretizada utilizando um segurador de ordem zero e um período de amostragem $T_s = 1\,\mathrm{s}$, resultando em

$$\tilde{W}_4(z) = \frac{-1665 z^{-1}}{1 - 0{,}997 z^{-1}}. \tag{16}$$

Os parâmetros de sintonia utilizados foram $N = 8$, $N_u = 1$ e $\lambda = 10$, resultando em um controlador, $C_{\mathrm{PI_{GPC}}}(z)$, com ganho proporcional $K_p = -7{,}06$ e ganho integral $K_i = -1{,}07$, e um filtro de referência, $F_{\mathrm{PI_{GPC}}}(z)$, dados por

$$
\begin{aligned}
C_{\mathrm{PI_{GPC}}}(z) &= \frac{-0{,}0009 + 0{,}0006 z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \\
F_{\mathrm{PI_{GPC}}}(z) &= \frac{0{,}151}{1 - 0{,}848 z^{-1}}.
\end{aligned} \tag{17}
$$

Além disso, um controlador *feedfoward*, $G_{\mathrm{FF}}(s)$ também é considerado na simulação, de modo a melhorar o desempenho do sistema em malha fechada. O modelo de perturbação utilizado para o cálculo do controlador *feedfoward* foi a irradiância do sistema. O controlador obtido, utilizando o

método clássico que leva em conta a relação das dinâmicas do modelo da perturbação e do modelo da planta, resulta em um ganho estático dado por (Visioli, 2006)

$$G_{\mathrm{FF}}(s) = \frac{\tilde{W}_1(s)}{\tilde{W}_4(s)} = 1{,}3 \times 10^{-7}. \tag{18}$$

A simulação do sistema em malha fechada é realizada levando em conta a dinâmica não linear descrita na Equação (1). Nessa simulação, são utilizados sinais senoidais tanto para a referência, $T_{o,r}(t)$, quanto para as perturbações, $I(t)$, $T_i(t)$ e $T_e(t)$. As amplitudes e frequências desses sinais são especificadas na Equação (3). Além disso, também são consideradas restrições de saturação no atuador, sendo $u_{\min} = 0\,\mathrm{m^3/s}$ e $u_{\max} = 2{,}33 \times 10^{-4}\,\mathrm{m^3/s}$ os valores mínimo e máximo, respectivamente, de abertura da válvula e $\Delta u_{\min} = -9{,}1 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^3/s^2}$ e $\Delta u_{\max} = 9{,}1 \times 10^{-5}\,\mathrm{m^3/s^2}$ os valores mínimo e máximo, respectivamente, referentes à taxa de variação da abertura da válvula.

Três abordagens de controle foram analisadas: a sintonia original considerada por Buzás e Kicsiny (2014), representada no gráfico como $\mathrm{PI_B}$, a mesma sintonia mas considerando uma estratégia de anti-*windup* conhecida como *clamping*, representada como $\mathrm{PI_{B,C}}$, e a sintonia do PI com base no GPC utilizando a mesma estratégia de anti-*windup*, representada como $\mathrm{PI_{GPC}}$. A estratégia *clamping* consiste em limitar a ação do integrador quando ultrapassa os limites de saturação do sistema de controle (Visioli, 2006). Além disso, o controlador *feedfoward*, apresentado na Equação (18), é utilizado nos três casos.

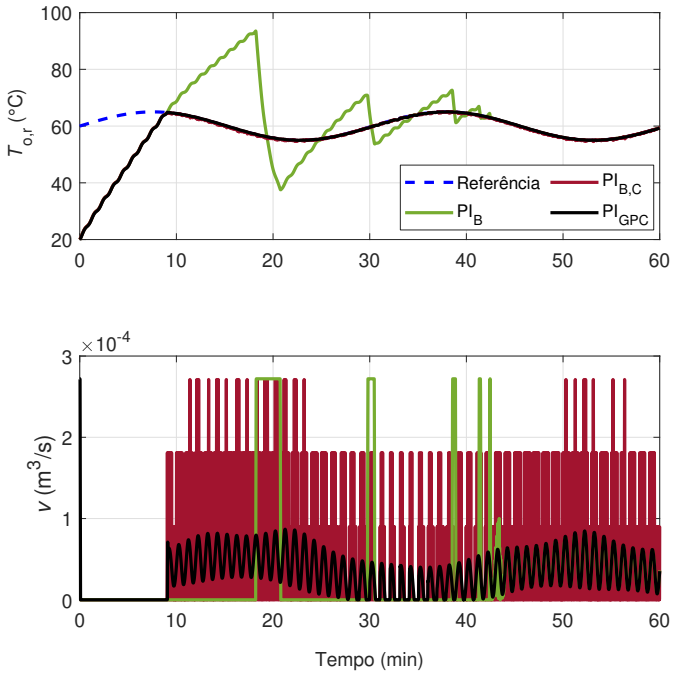

Figura 3. Simulação dos sistema em malha fechada.

Na simulação apresentada na Figura 3, é evidente que a saída do sistema usando o controlador PI com sintonia sugerida por Buzás e Kicsiny (2014) enfrenta dificuldades para se sincronizar com a onda senoidal de referência, resultando em um tempo de acomodação prolongado devido às perturbações e à saturação do controlador. Isso ocorre devido ao fato de o controlador não ter sido projetado para lidar com as restrições da válvula presentes no modelo. Além disso, é notável uma variação significativa no sinal de controle durante o processo de acomodação, atingindo valores extremos de abertura permitida na válvula.

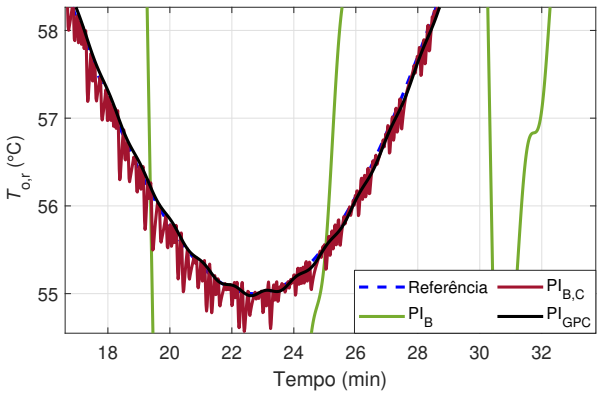

Figura 4. Ampliação do sinal de saída do sistema.

Por outro lado, a mesma sintonia, mas agora considerando a estratégia de *clamping* apresenta um desempenho bastante superior, sem apresentar sobressinal na saída do sistema. Entretanto, dois problemas foram observados nessa abordagem: alta variabilidade na ação de controle e oscilação da saída do sistema em torno do sinal de referência. Na prática, a alta agressividade da ação de controle observada nessa estratégia pode resultar em uma diminuição da vida útil da válvula de controle. Em relação à saída do sistema, um comportamento oscilatório pode ser observado na Figura 4. Se a água aquecida estiver sendo usada para aplicações de aquecimento doméstico ou banhos, as oscilações na temperatura da água podem resultar em desconforto para os usuários, com a água ora muito quente, ora insuficientemente aquecida.

Já a sintonia do PI proposta, com base no GPC em conjunto da abordagem *clamping*, apresenta um desempenho bastante próximo ao da sintonia anterior, mas com um esforço de controle significativamente inferior. Além disso, na Figura 4 é possível observar que a saída do sistema fica bastante próxima ao sinal de referência e não apresenta oscilações.

Para fins de comparação entre as abordagens de controle, emprega-se um índice de desempenho que considera o erro de seguimento de referência e o esforço de controle, expresso por

$$J = \sum_{k=1}^{N_s} \frac{1}{2}(e(k)^2 + \Delta u(k)^2), \tag{19}$$

em que N_s representa a quantidade de amostras consideradas na simulação, $e(k)$ denota o erro entre a referência e a saída e $\Delta u(k)$ é a variação do sinal de controle. Os valores do erro e da variação do sinal de controle foram normalizados por meio da divisão de cada sinal pelo valor de *offset* do sinal de referência e pelo valor máximo de saturação imposto ao sistema, respectivamente. É importante salientar que quanto menor o valor do índice J, melhor é o desempenho do controlador em termos de seguimento de referência e esforço de controle.

A partir da análise do valor mínimo do índice de esforço de controle, o controlador PI_{GPC} possui o melhor desempenho assegurando o seguimento de referência e rejeição a perturbações com menores variações e amplitudes do sinal de controle. Tal característica contribui significativamente para o prolongamento da vida útil da válvula responsável pela vazão do fluido, a qual representa a variável manipulada do sistema como também reflete-se em menor custo econômico devido ao menor uso da energia elétrica e da quantidade de fluido utilizado.

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma aplicação de um controlador PI, sintonizado a partir de uma estratégia MPC em conjunto de uma estratégia anti-*windup*, aplicado a um sistema de coletor solar abordado por Buzás e Kicsiny (2014). A sintonia foi realizada com base no modelo linear do sistema, obtido em um ponto de operação específico.

Os resultados da abordagem de controle proposta, quando comparados a estratégia utilizada por Buzás e Kicsiny (2014), mostram uma melhoria significativa no desempenho do sistema em malha fechada, sem a presença de sobressinal ou oscilações na saída do sistema. Essas características melhoram a eficiência energética do sistema e reduzem desconfortos que possam ser causados pela utilização da água em aplicações domésticas.

Além disso, observa-se um esforço de controle significativamente reduzido, resultando em um aumento na vida útil do atuador e em economia de recursos, como energia elétrica utilizada na bomba e na válvula de controle, bem como na quantidade de água necessária durante a operação do sistema.

REFERÊNCIAS

Åström, K.J. e Wittenmark, B. (2013). *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*. Courier Corporation.

Buzás, J. e Kicsiny, R. (2014). Transfer functions of solar collectors for dynamical analysis and control design. *Renewable Energy*, 68, 146–155.

Camacho, E.F. e Bordons, C. (2013). *Model Predictive Control*. Springer, London.

Camacho, E.F., Gallego, A.J., Sanchez, A.J., e Berenguel, M. (2018). Incremental state-space model predictive control of a fresnel solar collector field. *Energies*, 12(1), 3.

da Silva, L.R., Flesch, R.C.C., e Normey-Rico, J.E. (2019). Controlling industrial dead-time systems: When to use a PID or an advanced controller. *ISA Transactions*.

Evangelisti, L., Vollaro, R.D.L., e Asdrubali, F. (2019). Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109318–109338.

Fiorentini, M., Wall, J., Ma, Z., Braslavsky, J.H., e Cooper, P. (2017). Hybrid model predictive control of a residential HVAC system with on-site thermal energy generation and storage. *Applied Energy*, 187, 465–479.

Ghritlahre, H.K. e Prasad, R.K. (2018). Application of ANN technique to predict the performance of solar collector systems-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 84, 75–88.

Hiben, Y.G., Bayray, M., e Lauwaert, J. (2023). Optimizing solar-assisted industrial heating and cooling system for cost-effective installation. *Applied Thermal Engineering*, 230, 120778.

Kicsiny, R. (2014). New delay differential equation models for heating systems with pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 807–815.

Li, L., Li, Y., Yu, H., e He, Y.L. (2020). A feedforward-feedback hybrid control strategy towards ordered utilization of concentrating solar energy. *Renewable energy*, 154, 305–315.

Malato, S., Blanco, J., Alarcón, D.C., Maldonado, M.I., Fernandez-Ibanez, P., e Gernjak, W. (2007). Photocatalytic decontamination and disinfection of water with solar collectors. *Catalysis Today*, 122(1-2), 137–149.

Normey-Rico, J.E., Flesch, R.C.C., Lima, D.M., e Peccin, V.B. (2024). *Controle preditivo baseado em modelo - Caso monovariável linear*. Editora Blucher.

Paixão, D., Quirino, P., Fialho, R., Americano da Costa, M., e Pontes, K. (2023). A dynamic optimization approach for a multi-effect desalination (med) integrated with thermosolar storage system. *Solar Energy*, 262, 1–18.

Suman, S., Khan, M.K., e Pathak, M. (2015). Performance enhancement of solar collectors—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 192–210.

Telsnig, T. e Ferrán, G.D. (2015). Solar mining technology options–techno-economic-ecological datasheet concentrated solar power parabolic trough with storage.

Tian, M., Su, Y., Zheng, H., Pei, G., Li, G., e Riffat, S. (2018). A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1272–1296.

Tian, Y. e Zhao, C.Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied energy*, 104, 538–553.

Visioli, A. (2006). *Practical PID control*. Springer Science & Business Media.

Zambrano, D., Bordons, C., García-Gabín, W., e Camacho, E.F. (2006). A solar cooling plant: a benchmark for hybrid systems control. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(5), 199–204.