



# Aplicação Por Simulação do Controle Preditivo em um Coletor Solar de Placa Plana de Baixo Custo

Bruno Santos Nascimento  
Universidade Federal da Bahia - UFBA  
Lagarto, Brasil  
nascimento.b@ufba.br

Antonio Aliberte de Andrade Machado  
Instituto Federal de Sergipe - IFS  
Maceió, Brasil  
antonio.machado@ifs.edu.br

Karen Valverde Pontes  
Universidade Federal da Bahia - UFBA  
Salvador, Brasil  
karenpontes@ufba.br

**Abstract**—A predictive control system was applied to a low-cost flat-plate solar collector. The system's objective was to track desired *setpoints* and reject external disturbances. However, due to physical constraints of the system, achieving temperatures above 55°C became a challenge, resulting in a decrease in controller performance. Nonetheless, in a majority of cases, the objective was still met. The article describes the tools used and limitations encountered during simulations. In one of the experiments, it was possible to bring the controlled variable to the *setpoints* in approximately 30 seconds. The results obtained confirmed the efficiency and robustness of the predictive controller, even when applied to small systems with few degrees of freedom.

**Keywords**—Predictive control; Solar energy; Efficiency.

**Resumo**—Um sistema de controle preditivo foi aplicado em um coletor solar de placa plana de baixo custo com o objetivo de rastrear os *setpoints* desejados e atenuar distúrbios externos. No entanto, devido às limitações físicas do sistema, alcançar temperaturas superiores a 55°C representou um desafio, resultando em uma redução no desempenho do controlador. O artigo descreve as ferramentas utilizadas e as limitações encontradas durante as simulações. Em um dos experimentos, foi possível atingir o *setpoint* da variável controlada em aproximadamente 30 segundos. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia e robustez do controlador preditivo, mesmo quando aplicado a sistemas pequenos com poucos graus de liberdade.

**Palavras-chave**—Controle Preditivo; Energia solar; Eficiência.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente o mundo está passando por mudanças significativas do ponto de vista ambiental. A crescente preocupação com a emissão de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global resulta na busca por métodos alternativos para a geração de energia, especialmente métodos que sejam eficientes e, preferencialmente, não utilizem combustíveis fósseis.

Nesse contexto, pesquisas mostram que a energia solar é a fonte limpa e sustentável mais abundante disponível na Terra, propiciando o desenvolvimento e aprimoramento de métodos eficientes para o seu aproveitamento. No Brasil, o nordeste tem uma posição privilegiada em relação aos outros estados. O nordeste brasileiro tem o maior potencial solar de todo o

território nacional, com valores de irradiação solar diária total que variam entre 5,5 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup> [1].

Existem diversas maneiras de aproveitar a energia solar. Um coletor solar térmico, por exemplo, é um dispositivo que converte a radiação solar em calor útil, tipicamente para uso térmico, como aquecimento de água ou de processos industriais [2]. Esses métodos diferenciam-se de acordo com as estruturas, materiais e especificidades.

A irradiação solar é uma variável demasiadamente complexa, favorável a inúmeros distúrbios que diminuem a capacidade produtiva de uma planta termossolar. Além disso, a fonte proveniente desse tipo de energia tem natureza cíclica, peculiaridade não muito atrativa para sistemas energéticos.

Diante desse cenário, o presente estudo busca utilizar uma estratégia de controle que possa manipular as variáveis do sistema, como a vazão do fluido de transferência de calor (HTF, do inglês “heat transfer fluid”) que percorre o coletor solar de modo a permitir uma maior estabilidade na temperatura de saída do coletor solar. Para isso, o controle preditivo surge como uma abordagem promissora, capaz de prever as variações na irradiação solar e ajustar a vazão do coletor solar para compensar a diminuição do recurso solar. Ao implementar o controle preditivo no coletor solar, espera-se alcançar uma maior eficiência energética, diminuindo as perdas e aumentando a capacidade de produção do coletor.

Com uma maior estabilidade na temperatura de saída da planta, espera-se ser possível otimizar a geração de energia térmica, proporcionando um sistema mais robusto, confiável e propício para ser utilizado nos mais diversos tipos de processos. Dessa forma, a utilização da estratégia de controle preditivo é essencial para aperfeiçoar o desempenho e a viabilidade de plantas termossolares, contribuindo para a expansão e adoção dessa forma limpa e sustentável de produção de energia.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo dos sistemas de controle é direcionar um processo para uma referência, também conhecida como *setpoint*, de

maneira eficiente e segura. Muitas técnicas de controle têm sido aplicadas aos sistemas de energia solar para superar os problemas causados pela intermitência da irradiação solar [3].

O projeto de controladores para plantas solares térmicas não é uma tarefa trivial. Os controladores para energia solar são diferentes de acordo com os objetivos, complexidade e modo de operação [4]. As estratégias de controle são geralmente focadas em controlar a temperatura de saída de um sistema solar variando a vazão do *HTF* [5]. Em geral, o controlador deve ser capaz de modificar a variável manipulada (MV, do inglês “manipulated variable”) de acordo com as flutuações da variável do processo (PV, do inglês “process variable”) [6]. A vazão do *HTF* será a variável manipulada do presente estudo, enquanto a temperatura de saída do coletor será a variável do processo.

Na literatura, autores como [7] utilizaram um controle antecipatório em conjunto com um PID para controlar a temperatura de saída de um coletor solar, a irradiação também foi uma variável mensurada com intuito de antecipar mudanças indesejadas e realizar as compensações necessárias. Os autores reconhecem que estratégias de controle simples forneceram resultados significativos ao minimizar os efeitos de distúrbios na saída de uma planta termosolar. O trabalho não realizou uma análise econômica da planta após a adoção da estratégia, mas recomenda a adoção de técnicas mais avançadas de controle e otimização para poder tornar a planta economicamente viável e competitiva com a energia baseada em combustíveis fósseis.

Outros pesquisadores, como [8] realizaram a análise e implementação de um sistema mais robusto e avançado, utilizando a estratégia de controle preditivo não linear robusto em um coletor solar integrado a uma planta para dessalinização de água. O sistema é baseado na planta de energia termosolar *AQUASOL* e apesar da incerteza no atraso da planta, o controlador mostrou resultados promissores, principalmente na presença de fortes distúrbios como a queda repentina da irradiação solar. Quando as variações do *setpoint* e os distúrbios são pequenos, a solução ótima é encontrada em apenas uma iteração. No entanto, o comportamento do controlador em um ambiente real, durante um dia com boa irradiância solar, apresentou um sobressinal maior entre as variações de *setpoint*. Como resultado, o desempenho obtido ficou ligeiramente abaixo do esperado, devido a incompatibilidades não contempladas no modelo do processo.

### III. METODOLOGIA

No presente trabalho, busca-se utilizar uma estratégia mais avançada do que os tradicionais controladores *PID* (*Proportional, Integral e Derivativo*), adicionando restrições e outros recursos avançados. Dessa forma, o objetivo é guiar a temperatura de saída para o *setpoint* desejado no menor tempo

possível, visando uma operação mais eficiente do processo. O sistema de estudo será do tipo SISO (Single Input Single Output). A variável controlada será a vazão que percorre o coletor, medida em  $m^3/s$ , e a variável do processo será a temperatura de saída do coletor, em  $^{\circ}C$ .

#### A. Coletor Solar

Um coletor solar é um dispositivo que captura a energia da luz solar e a converte em calor. Ele consiste em uma superfície plana com tubos absorvedores e um fluido térmico que absorve o calor solar. Esse calor pode ser usado para aquecer água ou fluidos.

O presente trabalho utilizou o modelo de um coletor solar de placa plana, que também foi desenvolvido com materiais de fácil acesso e baixo custo. Para a construção do absorvedor, componente mais importante de um coletor solar, foi utilizado um condensador de aço com nove fileiras, comumente encontrado em refrigeradores domésticos e facilmente adquirido em lojas de refrigeração. O absorvedor do coletor possui um volume de  $0,4 L$ , com dimensões de  $0,89 m$  de comprimento por  $0,49 m$  de largura. Além disso, apresenta uma pintura escura que facilita a absorção de calor, conforme ilustrado na Figura 1, reduzindo também sua emissividade. Uma tampa de vidro com espessura de  $3 \times 10^{-3} m$  foi utilizada para proporcionar um efeito estufa dentro do coletor. Para acomodação do absorvedor e da tampa, uma caixa de madeira foi projetada com as dimensões necessárias. A área do coletor foi de  $0,45 m^2$ .



Fig. 1. Absorvedor e Coletor em Operação. Fonte: Autor.

#### B. Software

O *software* escolhido para ser utilizado no projeto foi o *Gekko*<sup>1</sup>. O *Gekko* é um pacote de otimização especializado,

<sup>1</sup>Documentação disponível em: <https://gekko.readthedocs.io/>

de código aberto e que oferece um amplo leque de recursos para resolver problemas de otimização e controle.

Além disso, o *Gekko* possui uma interface amigável para definir o modelo matemático e as restrições do sistema, permitindo que os usuários definam os modelos com facilidade e possam testar diferentes configurações de controle de forma rápida e pragmática.

No contexto do presente estudo, o *Gekko* é usado para resolver o problema de otimização que busca encontrar a melhor ação de controle ( $u$ ) ao longo do tempo para minimizar o erro entre a temperatura de saída do coletor e o *setpoint*. Através do software do *Gekko*, é possível obter uma solução otimizada que atenda às restrições e objetivos definidos, proporcionando um controle eficiente e preciso para o sistema de aquecimento solar.

O software *Gekko* oferece uma ampla e robusta gama de ferramentas. Seu sistema possui uma sintaxe simples e intuitiva, o que o torna acessível até mesmo para iniciantes que não possuem um profundo conhecimento da base matemática que fundamenta o controle preditivo, podendo competir com ferramentas proprietárias, como o Matlab®.

### C. Modelo Matemático do Coletor Solar

No presente artigo, optou-se apenas pela realização da simulação em vez da implementação prática. A simulação ajudou a aprofundar a compreensão do processo, contribuindo para uma implementação futura mais precisa na planta real. Como o modelo é o item mais importante em uma simulação, é necessário validar e ajustar o modelo antes da implementação do controlador.

Para representar matematicamente o coletor solar do processo, foi utilizado um modelo matemático descrito por [9]. Foram desconsiderados os gradientes de temperaturas ao longo dos tubos e que o acúmulo de massa é desprezível, assim, a temperatura de saída do fluido no coletor pode ser modelada a partir do balanço de energia:

$$\rho \cdot A_c \cdot c_p \cdot \frac{dT_{out}}{dt} = \left[ B \cdot I - \frac{H}{L_{eq}} \cdot \left( \frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_a \right) - \frac{c_p \cdot m_{eq} \cdot (T_{out} - T_{in})}{L_{eq}} \right] \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).  $A_c$  é a área da seção dos tubos absorvedores ( $\text{m}^2$ ).  $c_p$  é o calor específico da água ( $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ).  $\frac{dT_{out}}{dt}$  representa a taxa de variação da temperatura de saída no coletor solar em relação ao tempo ( $^\circ\text{C}/\text{s}$ ).  $B$  é o parâmetro de irradiância ( $\text{m}$ ).  $I$  é a irradiação ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).  $H$  é o coeficiente global de perdas térmicas ( $\text{J}/\text{s}^\circ\text{C}$ ).  $L_{eq}$  é o comprimento equivalente dos tubos absorvedores no coletor solar ( $\text{m}$ ).  $T_{out}$  é a temperatura de saída no coletor

solar ( $^\circ\text{C}$ ).  $T_{in}$  é a temperatura de entrada no coletor solar ( $^\circ\text{C}$ ).  $T_a$  é a temperatura ambiente ( $^\circ\text{C}$ ).  $m_{eq}$  é a vazão equivalente que circula no coletor solar ( $\text{kg}/\text{s}$ ). A Tabela I apresenta os parâmetros para representar o coletor desenvolvido.

TABELA I  
PARÂMETROS DO MODELO MATEMÁTICO DO COLETOR SOLAR

Parâmetro	Valor
$\rho$	975 $\text{kg}/\text{m}^3$
$C_p$	4190 $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$
$\beta$	0,80 m
$H$	4,7 $\text{J}/\text{s}^\circ\text{C}$
$A_c$	0,00707 $\text{m}^2$
$T_{in}$	30 $^\circ\text{C}$
$T_a$	32 $^\circ\text{C}$
$L_{eq}$	9 m

### D. Lei de Controle

O controle adotado no processo será o Controle Preditivo (MPC, do inglês “Model Predictive Control”). O MPC é um método de controle avançado que utilizará o modelo matemático apresentado na Equação 1 para prever o comportamento futuro e otimizar a trajetória do modelo que representa o coletor. A formulação geral do MPC baseado no *Gekko* é dada por:

$$\min_{u_k, \dots, u_{k+N-1}} \sum_{i=k}^{k+N-1} \|s_i - y_i\|_Q^2 + \sum_{i=k}^{k+N-1} \|u_i - u_{i-1}\|_R^2$$

Sujeito a

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k)$$

$$g_j(x_i, u_i) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

onde  $u_k, \dots, u_{k+N-1}$  são as entradas de controle em cada instante de tempo no horizonte de predição,  $s_i$  é o sinal de referência ou *setpoint*, no instante de tempo  $i$ ,  $y_i$  é a saída do sistema no instante de tempo  $i$ ,  $f(x_k, u_k)$  é a previsão do modelo do estado no instante de tempo  $k+1$  com base no estado no instante de tempo  $k$  e na entrada de controle no instante de tempo  $k$ ,  $x_{k+1}$  é o estado no instante de tempo  $k+1$ , e  $g_j(x_i, u_i)$  são as restrições nos estados e nas entradas de controle no instante de tempo  $i$ . Toda a sequência de simulação será o horizonte de controle e predição, portanto, os valores das variáveis manipuladas (MV) são ajustadas em todo o tempo de execução da simulação.  $Q$  e  $R$  são pesos atribuídos à saída e às variações da entrada, respectivamente, definidos nativamente na biblioteca. Esses pesos servem para auxiliar o processo de ajuste fino do controlador, adicionando peso ao item desejado.

A solução do problema de otimização fornece as entradas de controle ótimas para o instante de tempo atual e para os próximos instantes de tempo no horizonte de predição.



As entradas de controle para o instante de tempo atual são aplicadas ao sistema e o horizonte é deslocado para frente em um instante de tempo. O processo é repetido no próximo instante de tempo.

É importante definir restrições para o processo uma vez que a escala da planta é bastante limitada. Deve-se analisar a  $A_c$  para definir a maior vazão que pode percorrer os tubos do coletor para não ocasionar rupturas. A vazão máxima suportada pelos tubos é de  $1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , levando em consideração a  $A_c$ . A vazão mínima será de  $5,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . O valor mínimo é definido pelo menor volume que pode ser operado pela bomba que opera o sistema. Essas restrições foram incluídas no código do controlador.

Devido ao fato do processo operar com base na temperatura, o tempo de resposta é mais longo. Portanto, o tempo de simulação foi estabelecido como 20000 segundos, divididos em incrementos de 20 unidades.

O conceito de horizonte de controle e horizonte de predição é comum em sistemas de controle avançados, nos quais o objetivo é calcular uma trajetória do sistema durante o horizonte de controle e, posteriormente, manter o último valor dentro desse horizonte de controle, fazendo previsões até o estado estacionário utilizando o horizonte de predição. Geralmente, esses horizontes são utilizados como parâmetros de sintonia em controladores, pois quanto maior o horizonte, maior será o tempo que o software levará para resolver o problema de otimização. O *Gekko* é mais flexível ao permitir que qualquer sequência de pontos no tempo seja utilizado como horizonte de controle e predição.

Para simular distúrbios que ocorrem durante um dia ensolarado, como a presença de nuvens, foram realizadas variações bruscas na irradiação ao longo das simulações, com o objetivo de se aproximar do comportamento real. A variação da irradiação também foi interessante para verificar o comportamento da variável manipulada (MV) diante desses distúrbios abruptos.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o desempenho do coletor durante um dia de operação, bem como a comparação com o modelo descrito na Equação 1 e a irradiação registrada durante a realização do experimento. O sistema operou em malha aberta, ou seja, sem a implementação de qualquer estratégia de controle.

Após a introdução do controlador, observou-se um desempenho notável, principalmente comparado com o sistema em malha aberta ilustrado anteriormente. O sistema com o controlador foi caracterizado por um baixo sobressinal e um tempo de acomodação ligeiramente curto quando o *setpoint* estava dentro da faixa de operação do coletor. Considerou-se

que o controlador alcançava o *setpoint* ao entrar na faixa de  $\pm 2\%$  do valor desejado. Como a temperatura inicial é de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , a Tabela II apresenta o tempo necessário para atingir alguns *setpoints* estipulados para o *HTF*. Para os testes, a irradiação foi mantida fixa em  $1200 \text{ W/m}^2$  com intuito de simplificar a simulação. O erro de regime permanente foi insignificante, correspondente a  $0,005\%$  do valor final.

TABELA II  
RESULTADOS DO CONTROLE PARA A IRRADIAÇÃO CONSTANTE A  $1200 \text{ W/m}^2$

Setpoint	Tempo de Acomodação
$35 \text{ }^\circ\text{C}$	30s
$40 \text{ }^\circ\text{C}$	316s
$50 \text{ }^\circ\text{C}$	770s
$60 \text{ }^\circ\text{C}$	1506s
$70 \text{ }^\circ\text{C}$	3350s

O erro aumentou e o desempenho piorou significativamente quando o *setpoint* ultrapassou o valor de  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Durante o último caso de simulação do controle, com irradiação constante em  $1200 \text{ W/m}^2$ , foi observado que o tempo necessário para alcançar o *setpoint* de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  foi muito maior, mesmo operando com a vazão em seu valor mínimo. Essa demora pode ser atribuída às limitações e ao tamanho da planta em si. Os resultados obtidos estão em concordância com os experimentos práticos realizados com o coletor, visto que durante um dos experimentos, em condições não ideais e sem um sistema de controle, foi possível alcançar a temperatura de saída máxima de  $64 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O controle conseguiu acompanhar bem os *setpoints* indicados e também rejeitar os distúrbios, a Figura 2 ilustra o que ocorre quando a irradiação solar varia entre  $1000 \text{ W/m}^2$  e  $1400 \text{ W/m}^2$ , que são valores considerados ótimos para a eficiência de sistemas solares. A maior disponibilidade de radiação solar permite que esses sistemas produzam mais energia e forneçam um desempenho ideal.

Quando o *setpoint* é um valor inferior a  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , o desempenho do controlador é excelente, com tempo de acomodação de aproximadamente  $30 \text{ s}$  e sobressinal insignificante, para um *setpoint* determinado em  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . O comportamento dessa situação pode ser visto na Figura 3.

#### V. CONCLUSÕES

O sistema de controle apresentou resultados significativos dentro dos limites de operação do coletor. O rápido tempo de resposta e a capacidade de incorporar as limitações físicas nas restrições do problema de otimização tornam o sistema de controle altamente atraente para plantas maiores. Trabalhos futuros podem explorar a implementação prática do controlador e realizar comparações com a simulação realizada no presente

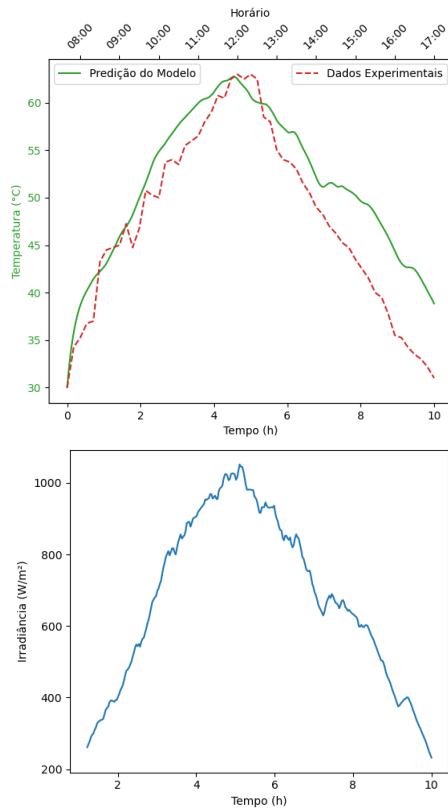


Fig. 2. Modelo, dados experimentais e irradiância. Fonte: Autor

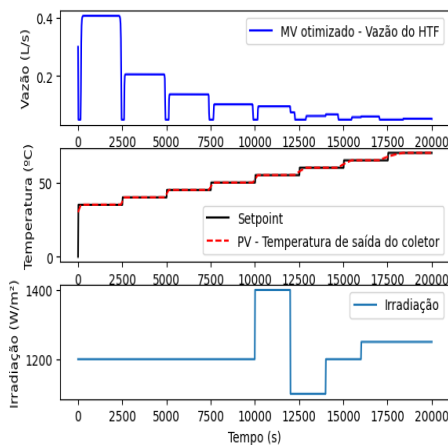


Fig. 3. Resultados da Simulação. Fonte: Autor

trabalho. Além disso, é possível realizar testes com modelos dinâmicos para a irradiação, a fim de tornar o comportamento ainda mais natural e realista. Em geral, o controlador conseguiu atender excepcionalmente aos requisitos estabelecidos para o

sistema.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Sergipe, à Universidade Federal da Bahia e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo valioso apoio prestado a este projeto.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. L., Rütther, R., et al. (2017). Atlas brasileiro de energia solar (2nd ed.). São José dos Campos, Brazil: INPE.
- [2] International Energy Agency (IEA). (2018). World Energy Outlook 2018 - Analysis.
- [3] Camacho, E. F., Berenguel, M. (2007). Part I: An overview of control schemes for distributed solar collector fields, including modeling and basic control approaches. *Solar Energy*, 81, 1240-1251.
- [4] Badescu, V. (2007). Achieving maximum exergy extraction through optimal flow control in solar collectors. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 4311-4322.
- [5] Biazetto, P. H. F. (2021). "Development of an optimal control strategy for temperature regulation and thermal storage operation of a solar power plant." Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [6] Badescu, V. (2008). Efficient flow control in solar collector systems with fully mixed water storage tanks. *Energy Conversion and Management*, 49, 169-184.
- [7] Powell, K. M., Edgar, T. F. (2018, July). Control of a large-scale solar thermal energy storage system. In *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Control Applications (CCA)* (pp. 1168-1173). IEEE.
- [8] Coito, F., et al. (1997). Adaptive control strategies for solar energy plants under disturbances. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 11, 327-342.
- [9] Roca, L., et al. (2019). Solar field control strategies for desalination plants. *Solar Energy*, 188, 115-127.