

CONTROLE DE TEMPERATURA EM CAMPOS SOLARES DE GRANDE PORTE UTILIZANDO A ABORDAGEM DO PNMP - PRACTICAL NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL

JOSÉ D. VERGARA DIETRICH*, JULIO ELIAS NORMEY-RICO*, MANUEL BERENGUEL†, LIDIA ROCA‡

**Dep. de Automação e Sistemas, Caixa Postal 476, CEP 88040-900
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil*

†*Dep. de Informática, Ctra. Sacramento s/n, 04120
Universidad de Almería
Almería, Espanha*

‡*Plataforma Solar de Almería - CIEMAT, CIESOL, Tabernas
Almería, Espanha*

Emails: vergara@utfpr.edu.br, julio.normey@ufsc.br, beren@ual.es, lidia.roca@psa.es

Abstract— Solar thermal power plants require large and interconnected solar fields. In such cases it is common the sunlight reaching different values in each sector of the solar field, mainly due to the passage of local clouds. The purpose of this paper is to explore the characteristics of the operation and the large solar field control possibilities in different topologies using a strategy based on Model Predictive Control (MPC).

Keywords— Solar Power, Predictive Control, Temperature Control.

Resumo— Centrais heliotérmicas de grande porte necessitam campos solares extensos e interconectados. Nesses casos é comum que a irradiação solar alcance valores diferentes em cada setor do campo solar devido, principalmente, à passagem de nuvens localizadas. A proposta deste trabalho é explorar as características do funcionamento e as possibilidades de controle de campos solares de grande porte em diferentes topologias utilizando a estratégia de Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC).

Palavras-chave— Energia Solar, Controle Preditivo, Controle de Temperatura.

1 Introdução

O uso de energia solar tem crescido significativamente nos últimos anos e vem sendo utilizada como fonte primária de energia em centrais heliotérmicas para processos como destilação, dessalinização, dentre outros (Lima et al., 2015). A expectativa, segundo o IEA (*International Energy Agency*), é de que a energia elétrica heliotérmica atinja 11% da produção de energia elétrica mundial até 2050 (*Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity*, 2014).

Em geral, a energia solar é captada utilizando dois sistemas: a) placas fotovoltaicas, que transformam diretamente a irradiação solar em energia elétrica; ou b) sistemas heliotérmicos, nos quais utiliza-se a irradiação solar para aquecer um determinado fluido de trabalho que irá produzir energia através do calor absorvido. O processo aqui estudado é o de um campo solar em que o controle da temperatura é feito através da variação da vazão do fluido de trabalho. O campo, por sua vez, está sujeito a perturbações externas, como as variações da irradiação solar, seja pela posição do sol durante o dia ou por eventual passagem de nuvens, e à variação da temperatura ambiente e da temperatura do fluido que entra no campo solar. O objetivo de controle é manter, sempre que possível, a temperatura do fluido na saída do campo solar dentro da região de operação, mesmo quando

sujeito às perturbações.

Particularmente, no caso de campos solares de grande porte, é comum que a irradiação solar alcance valores diferentes para cada campo durante o dia, devido à passagem de nuvens localizadas, resultando em campos com diferentes vazões e interconectados. Dessa forma, configura-se um problema maior e mais difícil de tratar, principalmente devido à dinâmica acoplada do arranjo dos campos sujeitos a diferentes perturbações. Este trabalho procura explorar as características do funcionamento e as possibilidades de controle de campos solares de grande porte em diferentes topologias utilizando uma estratégia de Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC).

O trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 apresenta-se o processo estudado, na seção 3 comenta-se o tipo de controlador a ser utilizado, na seção 4 mostram-se os resultados e em seguida, na seção 5, as conclusões.

2 Descrição do processo

O campo solar consiste em um sistema de captação da irradiação solar que transfere o calor absorvido para um fluido de trabalho. A modelagem do campo utilizada neste trabalho tem sido aplicada com bons resultados para concentradores parabólicos (Cirre et al., 2007; Roca et al., 2008) e captadores planos (Pasamontes et al., 2013). O

Tabela 1: Parâmetros do processo

Símb.	Descrição	Valor
A_a	Seção reta do absorvedor	$1,7453 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
C_p	Calor específico da água	4190 J/kgK
H	Coefficiente de perdas térmicas	4 J/sK
L_{eq}	Comprimento equivalente do tubo absorvedor	$5,67 \text{ m}$
β_I	Irradiância do modelo	$0,1024 \text{ m}$
ρ	Densidade da água	975 kg/m^3
d_c	Atraso de transporte no campo solar para este trabalho	50 s
η_{eq}	Parâmetro do processo	588

modelo do campo é dado por

$$\rho C_p A_a \dot{T}_{oF}(t) = \beta_I I(t) - \frac{H}{L_{eq}} (\bar{T}(t) - T_a(t)) - \frac{C_p}{\eta_{eq}} \dot{m}_F(t - d_c) \frac{T_{oF}(t) - T_{iF}(t)}{L_{eq}} \quad (1)$$

onde T_{oF} é a temperatura da água na saída, I é a irradiação solar, $\bar{T}$ é a temperatura média do coletor (que é dada pela média aritmética entre a temperatura de entrada e a de saída do coletor), T_a é a temperatura ambiente, $\dot{m}_F$ é a vazão mássica da água, d_c é o atraso de transporte entre a entrada e a saída e T_{iF} é a temperatura de entrada da água. Os demais elementos são parâmetros do processo, cujos valores foram ajustados seguindo como referência o trabalho de (Roca et al., 2008) e estão representados na Tabela 1.

As variações na intensidade da irradiação solar durante o dia, a temperatura da água de entrada no campo solar e a temperatura ambiente são consideradas perturbações. As perturbações provenientes da irradiação solar são resultantes da variação da irradiação durante o dia e da passagem de nuvens acima do campo solar, que podem ser perturbações muito rápidas e de grande amplitude, diferentemente da temperatura ambiente cuja dinâmica é muito mais lenta. Por outro lado, a variação da temperatura da água de entrada no campo solar é decorrente de vários elementos, como a própria irradiação solar, a vazão da água e a temperatura ambiente.

Para otimizar a eficiência do coletor e evitar esforços internos por dilatação que danifiquem o conjunto, deve ser considerada uma restrição para a diferença de temperatura entre a entrada e saída do coletor (Roca et al., 2008). Para este trabalho será considerada a restrição

$$5^\circ\text{C} < [T_{oF}(t) - T_{iF}(t)] < 25^\circ\text{C} \quad (2)$$

onde T_{oF} é temperatura de saída e T_{iF} a temperatura de entrada do campo solar. Por outro lado, para manter o equilíbrio hidrodinâmico e evitar a cavitação da bomba, a vazão mássica é limitada em

$$1,2 \text{ kg/s} < \dot{m}_F < 4,8 \text{ kg/s}. \quad (3)$$

Para poder implementar o modelo em simulador, a Equação (1) foi discretizada utilizando uma aproximação *forward* (Lima et al., 2015). O mo-

delo do campo solar é dado por

$$T_{oF}(k) = T_{oF}(k-1) + \frac{\beta_I T_s}{\rho C_p A_a} I(k-1) - \frac{HT_s}{L_{eq} \rho C_p A_a} (\bar{T}(k-1) - T_a(k-1)) - \frac{T_s}{\rho A_a \eta_{eq}} \dot{m}_F(k-1 - d_c) \frac{T_{oF}(k-1) - T_{iF}(k-1)}{L_{eq}}. \quad (4)$$

As variáveis do processo podem ser vistas na Tabela 2, sendo a temperatura da água de saída do campo solar T_{oF} a variável a ser controlada e a vazão da água que passa pelo campo solar $\dot{m}_F$ a variável manipulada.

2.1 Modelagem de um campo solar de grande porte

Para simular o comportamento de um campo de grande porte, quatro¹ campos individuais foram arranados em duas configurações diferentes, chamadas de CP (Campos em Paralelo) e CS (Campos em Série). Tanto no sistema CP quanto no CS a vazão total do arranjo é de quatro vezes a vazão de um campo individual e, portanto, o limite de operação da bomba de água para os arranjos é dado por

$$4,8 \text{ kg/s} < \dot{m}_A < 19,2 \text{ kg/s} \quad (5)$$

sendo $\dot{m}_A$ a vazão resultante do arranjo².

A configuração chamada de CP representa a conexão dos quatro campos em paralelo com válvulas proporcionais nas suas entradas e com saídas interconectadas, gerando um sistema com quatro entradas manipuladas, 12 perturbações (I , T_a e T_{iF} para cada campo) e uma saída controlada, como pode ser visto na Figura 1. Nesta configuração, a vazão do arranjo é dada por

$$\dot{m}_A = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{Fi} \quad (6)$$

sendo $\dot{m}_A$ a vazão resultante do arranjo e $\dot{m}_{Fi}$, com $i = 1, 2, 3$ e 4 , as vazões individuais de cada campo. Uma característica importante desta configuração é que, a rigor, os campos individuais podem operar com vazões reduzidas, desde que a soma das vazões de cada campo esteja dentro dos limites de operação da bomba (5).

A temperatura de saída do arranjo é aproximada³ por

$$T_{oA} = \frac{\sum_{i=1}^4 T_{oFi} \dot{m}_i}{\dot{m}_A} \quad (7)$$

sendo T_{oA} a temperatura resultante do arranjo dos campos solares, T_{oFi} e $\dot{m}_i$, com $i = 1, 2, 3$ e 4 ,

¹Número escolhido arbitrariamente para obter um campo resultante de 2x2 campos originais e equidistantes.

²Foi utilizado o mesmo limite de operação de $\dot{m}_A$ para ambos os arranjos com o intuito de equiparar as quantidades de calor disponibilizadas.

³Por simplicidade, o modelo desconsidera a dinâmica da mistura.

as temperaturas de saída e as vazões mássicas de cada campo e $\dot{m}_A$ a vazão resultante do arranjo.

Outra característica da configuração CP é que a temperatura de saída do arranjo é afetada instantaneamente pela alteração de vazão de qualquer um dos campos que a compõe, resultando em um sistema sem atraso de transporte e com dinâmica sensivelmente diferente à de um campo individual.

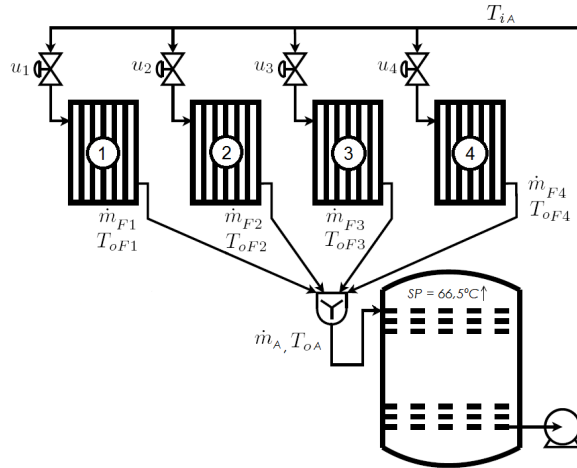


Figura 1: Arranjo dos campos solares na configuração CP

Na outra configuração (CS) os campos estão conectados em série e a saída de um campo alimenta a entrada do outro, gerando um sistema com uma entrada manipulada, 12 perturbações (I , T_a e T_{iF} para cada campo) e uma saída controlada, como pode ser visto na Figura 2. Para poder comparar os arranjos CP e CS em termos de eficiência energética, foi admitido que os campos solares são dimensionados para suportar a pressão hidráulica característica de cada arranjo.

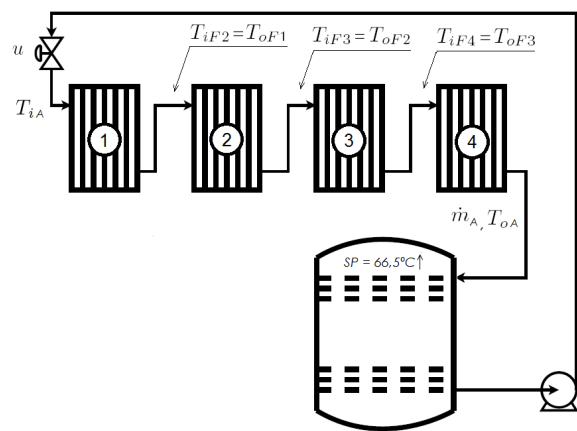


Figura 2: Arranjo dos campos solares na configuração CS

Tabela 2: Variáveis do processo

Simb.	Descrição	Unidade
T_{oF}	Temperatura de saída do campo solar	°C
T_{oA}	Temperatura de saída do arranjo	°C
$\dot{m}_F$	Fluxo mássico no interior do campo solar	kg/s
$\dot{m}_A$	Fluxo mássico do arranjo	kg/s
I	Irradiação solar	W/m ²
T_{iF}	Temperatura de entrada do campo solar	°C
T_{iA}	Temperatura de entrada do arranjo	°C
T_a	Temperatura ambiente	°C

3 Controle Preditivo PNMPC

O Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) é uma família de técnicas de controle que fazem uso de um modelo para prever o comportamento futuro do processo e, com base nessas previsões, minimizar uma função de custo que pondera o erro de seguimento de referências e as ações de controle e considera um conjunto de restrições nas variáveis envolvidas (Camacho and Bordons, 2007). Isto explica o porquê do MPC ser a estratégia de controle avançado mais utilizada atualmente para controle de processos industriais, principalmente na indústria petroquímica e de processos (Cutler and Ramaker, 1980), (de Campos et al., 2013).

Neste trabalho será utilizado o controlador MPC chamado de *Practical Non-Linear Model Predictive Control* (PNMPC) (Plucênio, 2010), que é um controlador concebido para controlar sistemas não lineares. Para o problema dos campos solares proposto neste trabalho a função custo é dada por

$$\begin{aligned}
 J = & \sum_{j=1}^N \delta [\hat{y}(k+j|k) - w(k+j)]^2 \\
 & + \sum_{i=1}^{N_{in}} \sum_{j=1}^{N_u} \lambda [\Delta u_i(k+j-1)]^2 \\
 & + \sum_{j=1}^{N_u} \gamma [u(k+j-1) - w_u(k+j-1)]^2 \\
 & + \alpha \sum_{i=1}^{N_{in}} \sum_{j=1}^N \phi [\hat{y}_i(k+j|k) - w_i(k+j)]^2
 \end{aligned} \quad (8)$$

sendo que δ , λ , γ e ϕ são as ponderações das parcelas de J para seguimento de referência da temperatura do arranjo, penalização da variação do controle, maximização da vazão do sistema e manutenção da temperatura de saída dos campos dentro dos limites de operação, respectivamente. Ainda, N é o horizonte de predição, N_u é o horizonte de controle, N_{in} é o número de entradas no arranjo ($N_{in} = 4$ para o caso CP e $N_{in} = 1$ para CS), $\hat{y}$ é a temperatura de saída do arranjo predita, w é a referência da temperatura de saída do arranjo do sistema, Δu_i são os incrementos de vazão em cada campo (variáveis manipuladas), u é a vazão total do arranjo, w_u é a referência para a vazão total do arranjo (que corresponde ao máximo de vazão possível do sistema) e $\hat{y}_i$ e w_i são

a temperatura predita e a referência para a saída de cada campo, com $\alpha = 1$ para o arranjo CP e $\alpha = 0$ para o arranjo CS. O problema de otimização resume-se à minimização da função custo sujeita às restrições de vazão (3) (5).

A função custo (8) requer o cálculo das saídas preditas do sistema que podem ser calculadas como função das variáveis de decisão Δu conhecendo o modelo do processo. Porém, para que o problema de otimização resultante seja um problema de programação quadrática (QP), o modelo (1) não pode ser utilizado diretamente. O PNMPC calcula as previsões $\hat{Y}$ através do modelo

$$\hat{Y} = G\Delta u + f \quad (9)$$

onde Δu é o vetor de incrementos de controle futuro, f representa a resposta livre do sistema e G é uma matriz que relaciona, de forma linear, os controles futuros e as saídas preditas⁴.

No caso do algoritmo PNMPC, a resposta livre f e a matriz G são calculadas por

$$f = f(\hat{y}, \hat{u}) \quad (10)$$

$$G = \frac{\partial \hat{Y}}{\partial \Delta u} \quad (11)$$

sendo que f é composta pelos valores passados da variável controlada y e da variável manipulada u e G é o jacobiano de $\hat{Y}$ sendo uma matriz dinâmica generalizada que pode ser utilizada para sistemas lineares e para sistemas não lineares contínuos e diferenciáveis (Plucênio, 2010).

4 Resultados

Para comparar o desempenho dos arranjos CS e CP, ambos foram submetidos às mesmas condições de irradiação⁵, temperatura ambiente e temperatura da água de entrada. Os perfis de irradiação podem ser vistos na Figura 3 e as temperaturas de entrada e ambiente na Figura 4.

O comportamento da temperatura e da vazão de saída de cada arranjo com referência de temperatura em 70 °C pode ser visto nas Figuras 5 e 6, onde nota-se que as dinâmicas de ambos os arranjos são parecidas.

Na configuração CS a vazão mínima nos campos é determinada pela vazão mínima da bomba. Se a irradiação cair a níveis muito baixos, ainda que a vazão seja reduzida ao valor mínimo, existe a possibilidade de que um ou mais campos solares não sejam capazes de elevar a temperatura da água que recebem ou, até mesmo, diminuí-la devido às perdas térmicas para o ambiente. A

⁴G é calculada de maneira diferente para cada tipo de estratégia de MPC.

⁵Apesar de não comporem um cenário real, foram escolhidos perfis de irradiação de diferentes épocas do ano e com muita variação para testar o controlador em casos extremos.

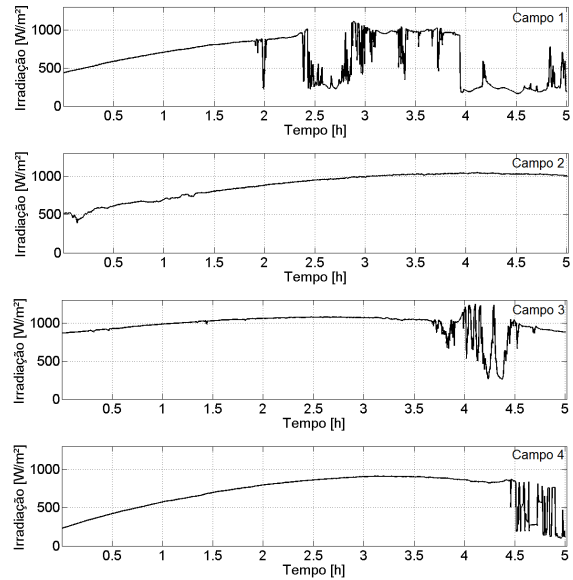


Figura 3: Primeiro cenário de irradiações para os diferentes campos⁵

despeito disso, a configuração CP permite desativar campos⁶ cuja irradiação for insuficiente para manter a temperatura da água de saída do campo dentro dos limites de operação (2), desde que seja atendida a restrição de vazão do arranjo (5).

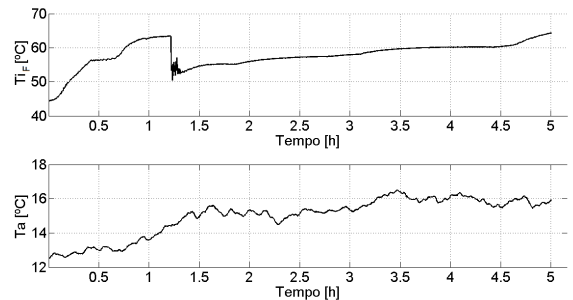


Figura 4: Temperatura da água de entrada e ambiente aplicada aos campos solares

Para analisar o comportamento dos arranjos em uma situação mais crítica, cenários com irradiações reduzidas foram utilizados, sendo estes 90%, 80%, 70% e 60% da irradiação do primeiro cenário, mantendo os diferentes perfis de irradiação para cada campo. Para quantificar a eficiência do sistema foi analisada a quantidade de calor disponibilizada pelo arranjo e a vazão total resultante. Além disso, foram calculados, para o tempo de simulação, os índices de desempenho médios entre os cenários TV(*Total Variation*) e ISE(*Integral Square Error*) para analisar o esforço de controle e o seguimento à referência, respectivamente, como pode ser visto na Tabela 3.

⁶Neste trabalho, o campo é desativado quando a temperatura de saída permanecer menor ou igual à de entrada por um período maior do que um minuto.

Tabela 3: Volume de água e calor disponibilizados pelos arranjos CP e CS

Irradiação	Descrição	CS	CP	CP ¹	Diferença ²	Diferença ^{1,2}
100%	Água[t]	227,4	231,8	229,2	1,9%	0,8%
	Calor[MJ]	10713,9	10822,4	10896,7	1,0%	1,7%
90%	Água[t]	193,3	201,5	200,5	4,2%	3,8%
	Calor[MJ]	8868,6	9005,3	9117,1	1,5%	2,8%
80%	Água[t]	157,3	167,0	167,0	6,1%	6,1%
	Calor[MJ]	7039,0	7158,9	7339,5	1,7%	4,3%
70%	Água[t]	123,8	133,3	133,9	7,7%	8,1%
	Calor[MJ]	5237,7	5306,0	5592,8	1,3%	6,8%
60%	Água[t]	103,4	106,6	106,3	3,1%	2,8%
	Calor[MJ]	3517,9	3579,7	3913,1	1,8%	11,2%
TV/ISE ³		-	60,47/1,736e7	37,63/1,735e7	42,85/1,734e7	-

¹Arranjo CP com possibilidade de desativar campos.

²Diferença do arranjo CP em relação ao arranjo CS.

³Índices de desempenho (média entre cenários): $TV = \sum |\Delta m(k)|$; $ISE = \sum [w(k) - y(k)]^2$.

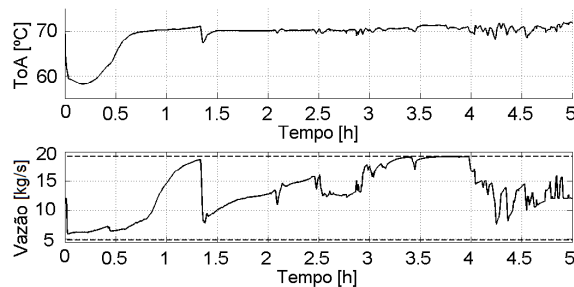


Figura 5: Temperatura de saída e vazão do arranjo na configuração CP

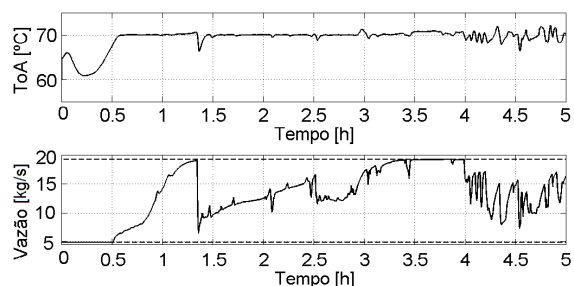


Figura 6: Temperatura de saída e vazão do arranjo na configuração CS

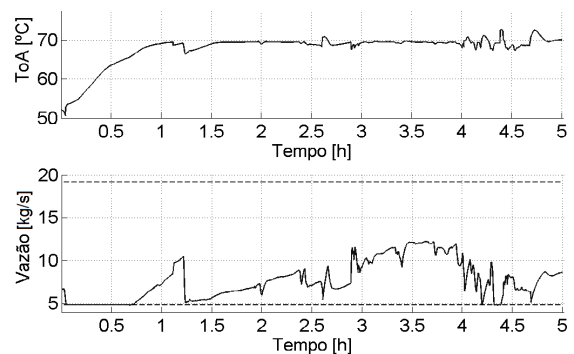


Figura 7: Temperatura e vazão do arranjo na configuração CP com a possibilidade de desativação de campos sob irradiação reduzida 70%

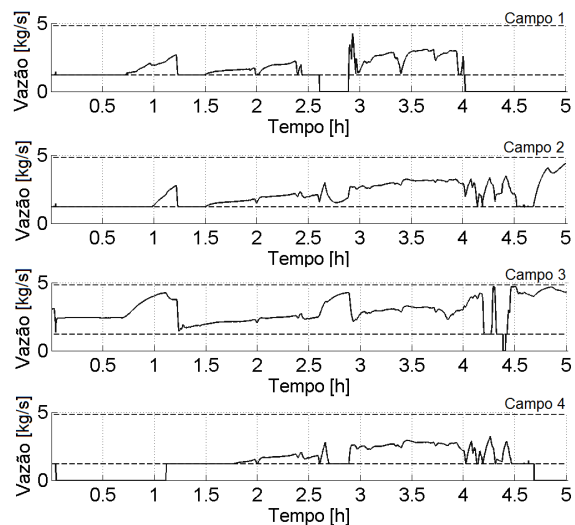


Figura 8: Vazão dos campos na configuração CP com a possibilidade de desativação de campos sob irradiação reduzida 70%

Para ilustrar a evolução da vazão no caso de irradiações reduzidas, a Figura 7 mostra o comportamento do arranjo CP submetido a 70% da irradiação do primeiro cenário e com a possibilidade de desativar campos, onde nota-se que o controlador reduz a vazão do arranjo para manter a temperatura de saída próxima à da referência; e a Figura 8 mostra a evolução das vazões nos campos separadamente.

A Figura 9 mostra o aumento de calor disponibilizado pelo arranjo CP, em relação ao arranjo CS, para cenários com 100%, 90%, 80%, 70% e 60% da irradiação original. O arranjo CP produz mais energia para todos os cenários, chegando a disponibilizar 1,8% mais calor no cenário 60% em relação ao arranjo CS. O arranjo CP com a possibilidade de desativação de campos apresentou a maior eficiência, chegando a gerar 11,2% mais calor no cenário 60%, se comparado com o arranjo CS. Por outro lado, apesar do valor do erro quadrático médio (ISE) de ambos os arranjos serem semelhantes, o esforço de controle no arranjo CP apresentou menor variação total (TV).

O aumento da eficiência do arranjo CP   devido a dois fatores: a) por deixar de transportar água que esteja abaixo da temperatura da água de entrada através da desativação do campo e b) pelas diferentes quantidades de calor perdidas para o ambiente em cada arranjo. Percebe-se, através do modelo do processo (1), que as perdas para o ambiente são menores enquanto menor for a temperatura média do coletor, situação que o controlador do arranjo CP com possibilidade de desativação de campos enfrenta com mais facilidade. Na Figura 10 mostra-se a evolução das temperaturas dos campos no cenário 70%, onde nota-se que o arranjo com possibilidade de desativação de campos opera com temperaturas iguais ou menores, resultando em menores perdas para o ambiente, justificando a sua alta eficiência.

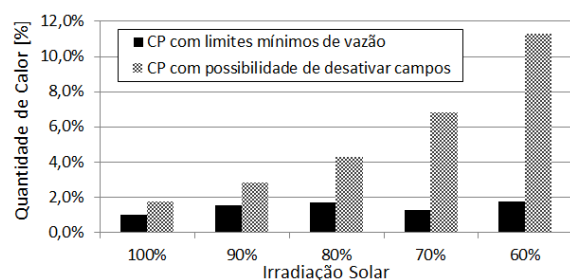


Figura 9: Aumento da quantidade de calor absorvido no arranjo CP, em comparação ao CS, para diferentes irradiações

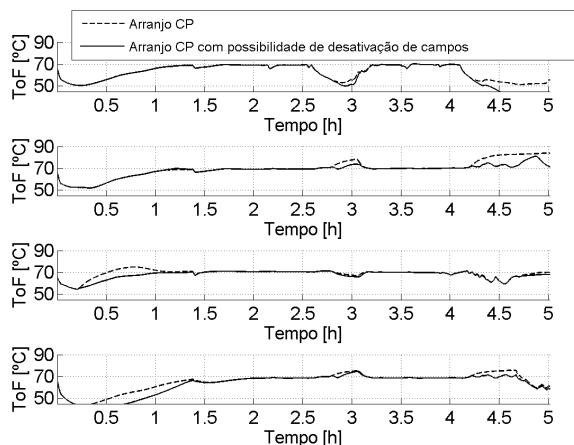


Figura 10: Temperatura dos campos na configuração CP sob irradiação reduzida 70%

5 Conclusões

Este trabalho propôs-se a analisar e comparar o desempenho de campos solares de grande porte, utilizando a abordagem do PNMPC, em duas configurações diferentes: série (CS) e paralelo (CP). Apesar de oferecer volume total de água geralmente menor, a configuração em paralelo disponibiliza mais quantidade de calor em todos os cenários, alcançando eficiência 11,2% maior quando

submetido a 60% da irradiação do primeiro cenário. Tal eficiência deve-se   possibilidade de desativar campos com eventual irradiação insuficiente e pelo fato do controlador permitir que os campos operem com temperaturas menores resultando em menores perdas de calor para o ambiente.

Como trabalho futuro, pretendem-se testar os resultados do trabalho na Planta Solar de Almería na Espanha.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos membros do projeto AQUASOL, ao Ministério da Economia e Competitividade da Espanha (ENERPRO DPI2014-56364-C2-R) e ao CNPQ pelo apoio.

Referências

- Camacho, E. and Bordons, C. (2007). *Model Predictive Control*, Springer.
- Cirre, C., Berenguel, M., Valenzuela, L. and Camacho, E. (2007). Feedback linearization control for a distributed solar collector field., *Control Engineering Practice* (15): 1533–1544.
- Cutler, C. R. and Ramaker, B. L. (1980). Dynamic matrix control - a computer control algorithm, *Automatic Control Conference, San Francisco*.
- de Campos, M. C., Gomes, M. V. and Perez, J. G. T. (2013). *Controle Avan ado e Otimiza  o na Indústria do Petr leo*, Interci ncia.
- Lima, D., Normey-Rico, J. and Santos, T. (2015). Temperature control in a solar collector field using filtered dynamic matrix control, *ISA Transactions*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2015.09.016i>.
- Pasamontes, M., Álvarez, J., Guzmán, J., Berenguel, M. and Camacho, E. (2013). Hybrid modeling of a solar-thermal heating facility, *Solar Energy* (97): 557–590.
- Plucênio, A. (2010). *Desenvolvimento de técnicas de controle n o linear para eleva  o de fl uidos multif sicos*, PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Roca, L., Berenguel, M., Yebra, L. and Alarc n-Padilla, D. C. (2008). Solar field control for desalination plants, *Solar Energy* (82): 772–786.
- Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity* (2014). <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-thermal-electricity-2014-edition.html>.