

Análise de um aquecedor solar através do método F-Chart e modelagem estatística

Analysis of a solar heater using the F-Chart method and statistical modeling

DOI:10.34117/bjdv8n11-183

Recebimento dos originais: 11/10/2022

Aceitação para publicação: 16/11/2022

Jefferson Heitor de Oliveira Rocha

Mestrando em Engenharia Mecânica

Instituição: Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão

Endereço: Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, São Luís – MA

E-mail: jeffersonrocha@acad.ifma.edu.br

Rubens Soeiro Gonçalves

Doutorado em Engenharia Química

Instituição: Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão

Endereço: Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, São Luís – MA

E-mail: soeiro@ifma.edu.br

Ana Isabel Palmero Marrero

Doutorado em Ciências Físicas

Instituição: Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Industrial

Endereço: R. Dr. Roberto Frias, 400, 4200-465 Porto, Portugal

E-mail: apalmero@fe.up.pt

Antônio Santos Araújo Junior

Doutorado em Engenharia Mecânica

Instituição: Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão

Endereço: Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, São Luís – MA

E-mail: asaraujojr@ifma.edu.br

Keyll Carlos Ribeiro Martins

Doutorado Engenharia Mecânica

Instituição: Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão

Endereço: Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, São Luís – MA

E-mail: kmartins@ifma.edu.br

RESUMO

Neste trabalho realizou-se uma análise de um aquecedor solar através do método f-chart e modelagem estatística. Através do método f-chart foram realizadas simulações considerando-se os diversos parâmetros constantes, exceto que os parâmetros: área do coletor, temperatura de saída e inclinação foram variados. Nas diversas simulações a área do coletor foi considerada dentro e fora da faixa inferior da indicada por Klein et al (1976,1977), na predição de radiação solar em superfície inclinada incidente, foram realizadas segundo diversos modelos clássicos da literatura: Liu e Jordan e Modelo de

HDKR: Hay e Davies, Klucher e Reindl e Badescu. Modelos lineares validados estatisticamente foram propostos, a partir de uma unidade experimental construída para a predição horária da temperatura de saída do coletor em função da temperatura de entrada, radiação incidente e velocidade do vento, em que os resultados mostraram concordância significativa com os dados experimentais. Em adição, ensaios de termografia infravermelha foram realizados e corroboraram as análises quanto ao instante de maior temperatura e gradientes na superfície do coletor. Apesar da área da unidade experimental encontrar-se fora da faixa recomendada, os resultados experimentais da temperatura de saída em torno de 55 °C concordaram com as simulações realizadas.

Palavras-chave: aquecedor solar, simulações, predição de radiação, método F-Chart, modelagem estatística.

ABSTRACT

In this work, an analysis of a solar heater was carried out using the f-chart method and statistical modeling. Through the f-chart method, simulations were performed considering the various constant parameters, except that the parameters: collector area, outlet temperature and slope were varied. In the various simulations, the collector area was considered within and outside the lower range indicated by Klein et al (1976, 1977), in the prediction of solar radiation on an incident inclined surface, they were performed according to several classic models in the literature: Liu and Jordan and HDKR model: Hay and Davies, Klucher and Reindl and Badescu. Statistically validated linear models were proposed, from an experimental unit built for the hourly prediction of the collector outlet temperature as a function of the inlet temperature, incident radiation and wind speed, in which the results showed significant agreement with the experimental data. In addition, infrared thermography tests were performed and corroborated the analyzes regarding the instant of highest temperature and gradients on the collector surface. Despite the area of the experimental unit being outside the recommended range, the experimental results of the outlet temperature around 55 °C agreed with the simulations performed.

Keywords: solar heater, simulations, radiation prediction, F-Chart method, statistical modeling.

1 INTRODUÇÃO

Motivados pela crise do petróleo nos anos setenta, no Brasil começam a surgir as primeiras iniciativas para o surgimento do sistema de aquecimento solar residencial, porém nesse primórdio ainda era escassa a mão de obra especializada em sistema de aquecimento de água. A partir desse momento, condicionamento natural e conservação de energia em edificações passam a nortear os projetistas, desvinculando os padrões construtivos e estéticos internacionais, para uma arquitetura mais social, cultural e ambiental no país.

As edificações são responsáveis por 33% do consumo final de energia elétrica, a utilização de energia em edifícios pode ser dividida em duas necessidades básicas. As necessidades de energia térmica - incluindo aquecimento e resfriamento, aquecimento de água e cozinha - respondem por cerca de 77% da demanda global de energia final em edifícios. Os 23% restantes correspondem a usos elétricos finais, que compreendem iluminação, eletrodomésticos e outros usos não relacionados a aquecimento ou resfriamento (REN 21,2021).

O Brasil por ser um país privilegiado em relação à insolação, possui cerca de oito horas de incidência direta de luz solar por dia. Por isso, é um excelente mercado para o sistema de aquecimento solar de água através da radiação solar (energia solar térmica). A energia solar térmica é uma tecnologia que permite a conversão da energia solar em energia térmica, e a partir disso, proporciona o aquecimento da água em sistemas residenciais, prediais e comerciais. A conversão da radiação eletromagnética proveniente do sol em energia térmica é realizada por coletores (ou painéis) solares.

Em 2020, a oferta interna de energia (total de energia disponibilizada no país) atingiu 287,6Mtep, registrando uma queda de 2,2% em relação ao ano anterior. O incremento das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica (perda zero) e o avanço da oferta de biomassa da cana e biodiesel contribuíram para que a matriz energética brasileira se mantivesse em um patamar renovável muito superior ao observado no resto do mundo.

No caso da energia elétrica verificou-se um recuo na oferta interna de 5,4 TWh (-0,8%) em relação a 2019. A geração hidráulica reduziu 0,4%, acompanhando a queda na importação (-1,7%), cuja principal origem é Itaipu. Em contrapartida, a geração eólica atingiu 57 TWh, crescimento de 1,9%. A potência eólica alcançou 17.131MW, expansão de 11,4%. Já a geração solar atingiu 10,7TWh (geração centralizada e MMD), o que representou um avanço de 61,5% em relação ao ano anterior. Com isso, a participação de renováveis na matriz elétrica atingiu 84,8% em 2020 (EPE, 2021).

Diante deste contexto, este trabalho pretende analisar um dos métodos clássicos de dimensionamento e desempenho, o f-chart, fora das condições estabelecidas (área do coletor) e propor modelos matemáticos baseados na estatística paramétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Muitos modelos fornecem a radiação solar em uma superfície inclinada. O primeiro é o modelo isotrópico do céu desenvolvido originalmente por Hottel e Woertz (1942) e refinado por Liu e Jordan (1960). A radiação total em uma superfície horizontal, H , é a soma do feixe horizontal, H_b , e da radiação difusa, H_d .

$$H = H_b + H_d \text{ reescrevendo: } \bar{H}b = \bar{H} - \bar{H}d = \bar{H}\left(1 - \frac{\bar{H}d}{\bar{H}}\right) \quad \text{Eq. (1)}$$

- MODELO DE LIU E JORDAN:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \quad \text{Eq. (2)}$$

- O MODELO DE HDKR: HAY E DAVIES, KLUCHER E REINDL:

Se o feixe for refletido e todos os termos de radiação difusa, como brilho isotrópico, circunsolar e de horizonte são adicionados à equação da radiação solar, uma nova correlação se desenvolve chamada modelo HDKR. É basicamente a combinação de modelos Hay e Davies, Klucher e Reindl.

$$\bar{H}_\beta = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) + \bar{H} \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left\{ (1 - A) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \left[1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + AiRb \right\}, \quad Ai = \frac{H}{H_o} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\bar{H}_\beta = (H_b + \bar{H}_d Ai) R_b + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) + \bar{H} \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left\{ (1 - A) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \left[1 + \sqrt{\frac{\bar{H}_b}{\bar{H}}} \sin^3 \left(\frac{\beta}{2}\right)\right] \right\} \quad \text{Eq. (4)}$$

Tabela 1: Significados modelo HDKR.

H_b - Radiação de feixe ou radiação direta	H_d - Radiação difusa
H_t - Radiação total em uma superfície horizontal, (na incidência normal)	H_o - Radiação extraterrestre

Fonte: Próprio autor

- MODELO BADESCU:
- Badescu demonstrou modelo para a radiação solar difusa em uma superfície inclinada, e considerado o fator de visão, $F_c - s = (3 + \cos 2\beta)/4$.

$$H_T = H_b + H_d \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) + H_d \left(\frac{3 + \cos 2\beta}{4}\right) \quad \text{Eq. (5)}$$

- MODELO REINDL ET AL:
- Uma definição de anisotropia, o índice (A) foi introduzido conforme proposto por Hay e Davies. O fator de modulação $f = \sqrt{(H^-)_b / H^-_g}$ também foi adicionado para multiplicar o termo de $\sin^3(\beta/2)$ para fator de brilho do horizonte. Eles consideraram todos os três componentes da fração difusa, como $H^-_{T,d,iso}$, $H^-_{T,d,hz}$ e $H^-_{T,d,cs}$.

$$\text{Índice (A):} \quad A = H^-_{(b,n)} / H^-_{(0,n)} = H^-_b / H^-_0$$

Eq. (6)

$$H^-_{T,d} = (H^-_b + H^-_d \cdot A) \cdot R^-_b + H^-_{\rho_g} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta/2)}{2} + H^-_d \cdot \left\{ (1 - A) \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta/2)}{2} \right) \left[1 + \sqrt{\left(\frac{H^-_b}{H^-_0} \right)} \cdot \sin^3(\beta/2) \right] + \left[\frac{AR^-}{H^-_0} \right] \cdot H^-_b \right\} \right)$$

Eq. (7)

2.1 METÓDO F-CHART

De acordo com Duffie e Beckman (2006), o método f-chart serve para estimar o desempenho térmico de sistemas de aquecimento ativo para edifícios (usando líquido ou ar como fluido de trabalho), onde a temperatura mínima de entrega de energia está perto de 20°C.

Tabela 2: Faixas de parâmetros usados no desenvolvimento do f-chart para sistemas de líquido e ar.

$$\begin{aligned} 0.6 &\leq (\tau\alpha)_n \leq 0.9 \\ 5 &\leq F'_R A_c \leq 120 \text{m}^2 \\ 2.1 &\leq U_L \leq 8.3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 30 &\leq \beta \leq 90^\circ \\ 83 &\leq (UA)_h \leq 667 \text{ W/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Fonte: Klein et al (1976,1977).

2.1.1 As variáveis adimensionais “X” E “Y”

O parâmetro X representa a relação entre a perda total de energia do coletor de referência e a carga ou demanda de aquecimento total (L) durante o período Δt , enquanto o parâmetro Y representa a razão da energia solar total absorvida para a carga ou demanda de aquecimento total (L) durante o mesmo período.

$$X = \frac{A_c F'_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_\alpha) \Delta t}{L} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$Y = \frac{A_c F'_R (\tau\alpha) \bar{H}_T N}{L} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

Tabela 3: Parâmetros das variáveis adimensionais X e Y.

A_c = área do coletor (m^2)	F'_R = fator de eficiência do trocador de calor do coletor
U_L = coeficiente de perda geral do coletor ($W / m^2 \text{ } ^\circ C$)	Δ_t = número total de segundos no mês
\bar{T}_α = temperatura ambiente média mensal ($^\circ C$)	T_{ref} = temperatura de referência derivada empiricamente ($100^\circ C$)
L = carga de aquecimento total mensal para aquecimento ambiente e água quente (J)	\bar{H}_T = radiação diária médio mensal incidente na superfície do coletor por unidade de área (J / m^2)
N = dias do mês	$(\bar{\tau\alpha})$ = produto médio mensal de transmitância-absortância

Fonte: Próprio Autor

As Equações 8 e 9 podem ser reescritas como:

$$X = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (T_{ref} - \bar{T}_\alpha) \Delta_t \frac{A_c}{L} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$Y = F_R (t\alpha)_n \frac{F'_R}{F_R} \left[\frac{(\bar{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \right] \bar{H}_T N \frac{A_c}{L} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde $F_R U_L$ e $F_R (\bar{\tau\alpha})_n$ são obtidos a partir de resultados de teste de coletor. A relação F'_R / F_R corrige várias quedas de temperatura entre o coletor e o tanque de armazenamento. A proporção $\frac{(\bar{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n}$ é estimada. A temperatura média do ar \bar{T}_α é obtida a partir de registros meteorológicos para o mês e local desejado, e \bar{H}_T é encontrada a partir da radiação diária média mensal na superfície do coletor.

2.1.2 O F-chart para sistemas líquidos

Para sistemas da configuração padrão do f-chart, a fração f da carga total mensal fornecida pelo espaço solar e sistema de aquecimento de água é dada como uma função de X e Y. A relação de X, Y e f na forma de equação é:

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \quad \text{Eq. (12)}$$

- CORREÇÃO NA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO
- O desempenho de sistemas com capacidade de armazenamento na faixa de 37,5 a 300 litros/ m^2 pode ser determinada multiplicando o adimensional grupo X por um fator de correção de tamanho de armazenamento X_c/X da equação 13.

$$\frac{X_c}{X} = (\text{capacidade armazenamento real} / \text{capacidade de armazenamento padrão})^{-0.25} \quad \text{Eq. (13)}$$

- CORREÇÃO NO TAMANHO DO TROCADOR DE CALOR

O f-chart para sistemas líquidos foi desenvolvido com $\epsilon LC_{min}/(UA)h = 2$. O desempenho de sistemas com outros valores de $\epsilon LC_{min}/(UA)h$ pode ser estimado a partir do f-chart modificando Y por um fator de correção do trocador de calor de Y_c/Y , conforme indicado na equação 14.

$$\frac{Y_c}{Y} = 0,39 + 0,65 \exp\left(\frac{-0,139(UA)h}{\epsilon LC_{min}}\right) \quad \text{Eq. (14)}$$

$\epsilon LC_{min}/(UA)h$, onde ϵL é a eficácia do trocador de calor de carga água-ar, C_{min} é a taxa mínima de capacitância do fluido (vazão de massa vezes o calor específico do fluido).

2.2 ANALISE ESTATÍSTICA

O procedimento de Tukey faz uso da distribuição da estatística de intervalo estudentizado:

$$q = \frac{\bar{y}_{max} - \bar{y}_{min}}{\sqrt{MS_E/n}} \quad \text{Eq. (15)}$$

onde \bar{y}_{max} e \bar{y}_{min} são as maiores e menores médias de amostra, respectivamente, de um grupo p de médias da amostra. Para iguais tamanhos de amostra, o teste de Tukey declara duas médias significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças de amostra excede.

$$T_\alpha = q_\alpha(a, f) \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad \text{Eq. (16)}$$

2.2.1 Modelos de regressão linear de estimadores

Em geral, a variável de resposta y pode estar relacionada a k-variáveis de regressão de acordo com o modelo: Montgomery (2012).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad \text{Eq. (17)}$$

Modelos que são mais complexos em aparência do que em equações podem frequentemente ser analisados por múltiplas técnicas de regressão linear. Considere adicionar um termo de interação ao primeiro modelo de ordem em duas variáveis.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad \text{Eq.(18)}$$

Em que a função dos mínimos quadrados dado pela equação 18

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \epsilon' \epsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad \text{Eq.(19)}$$

Observe que L pode ser expresso como:

Observe que L pode ser expresso como:

$$L = y'y - \beta'X'y - y'X\beta + \beta'X'X\beta =$$
$$y'y - 2\beta'X'y + \beta'X'X\beta$$

$$\frac{dL}{d\beta} |_{\hat{\beta}} = -2X'y + 2X'X\beta = 0$$

que simplifica para:

$$X'X\hat{\beta} = X'y$$

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y$$

2.2.2 Teste de hipótese em regressão múltipla

Em problemas de regressão linear múltipla, certos testes de teses sobre os parâmetros do modelo são úteis para medir a utilidade do modelo. Esses procedimentos requerem que os erros ϵ_i no modelo sejam normal e independentemente distribuídos com média zero e variância σ^2 , abreviado $\epsilon \sim NID(0, \sigma^2)$. Como resultado desta suposição, as observações y_i são normalmente e independentemente distribuídas com médio $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ variável σ^2 .

O teste de significância da regressão é um teste para determinar se há uma relação linear entre a variável de resposta y e um subconjunto da variável do regressor x_1, x_2, \dots, x_k , as hipóteses apropriadas são:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para pelo menos um } j$$

A rejeição de H_0 na equação implica que pelo menos uma das variáveis do regressor x_2, \dots, x_k contribui significativamente para o modelo. O procedimento de teste envolve uma análise de particionamento de variação da soma total dos quadrados SS_T em uma soma dos quadrados devido ao modelo (ou à regressão) e uma soma dos quadrados devido ao resíduo (ou erro), digamos:

$$SS_T = SS_R + SS_E$$

Agora, se a hipótese nula $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ for verdadeira, então é distribuído como χ^2_k , onde o número de graus de liberdade para χ^2 é igual ao número da variável do regressor no modelo. Também, podemos mostrar que SS_E/σ^2 é distribuído como χ^2_{n-k-1} e que SS_E e SS_R são independentes. O procedimento de teste para $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ é calcular:

$$F_0 = \frac{SS_R/k}{SS_E/(n-k-1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad \text{Eq.(20)}$$

E rejeitar H_0 se F_0 exceder $F_{\alpha,k,n-k-1}$. Como alternativa, poderíamos usar a abordagem do P-value para o teste de hipótese e, portanto, rejeitar H_0 se o P-value para a estatística F_0 for menor que α (alfa).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações do método f-chart, visando estimar o desempenho a longo prazo dos sistemas de aquecimento solar de água com configurações padrão, foram realizadas utilizando-se o software Softsun, em que os parâmetros: eficiência óptica ($F_R(t\alpha)_n$); coeficiente de perda ($F_R U_L$); temperaturas de entrada; relação do produto transmitância – absorvância ($\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$); fator de correção do trocador de calor ($\frac{F'_{R}}{F_R}$) e vazão foram considerados constantes, em que os respectivos valores são indicados na tabela 4. Estes valores indicados na referida tabela são típicos da literatura específica. Os parâmetros que foram variados nas diversas simulações foram: a predição da radiação segundo os

modelos citados, a temperatura de saída e a área do coletor, este parâmetro considerado o principal no dimensionamento do mesmo, o ângulo de inclinação do coletor (β), tendo sido selecionado as áreas de 1,20 m², que é área igual ao da unidade experimental construída, 2 m² e 6 m². O volume de armazenamento/área do coletor em 150L/m².

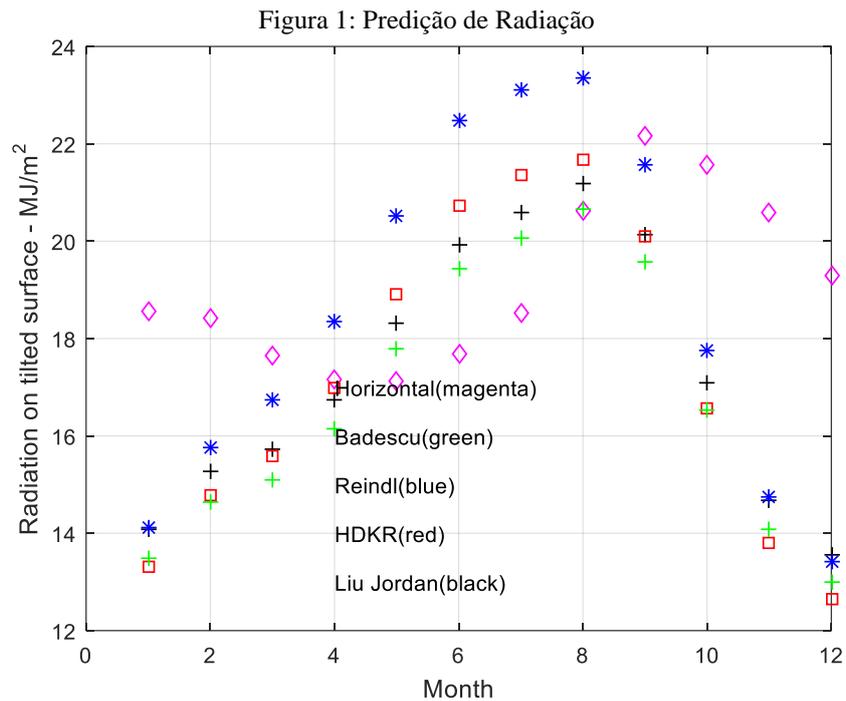
Tabela 4: Parâmetros das simulações do f-chart

	Parâmetros do f-chart				Média-f	Desvio padrão-f
	Simulação 1 - Liu Jordan	Simulação 2 - HDKR	Simulação 3 - Reindl	Simulação 4 - Badescu		
AC -Área do coletor (m ²)	2	2	2	2		
FR(τ)n - Eficiência Óptica	0,74	0,74	0,74	0,74		
FRUL - Coeficiente de Perda (w/m ² /C°)	4	4	4	4		
β - Inclinação do Coletor para a Horizontal (°)	35	35	35	35		
(τ)/(τ)n - Relação do Produto de Transmittância-Absortância	0,96	0,96	0,96	0,96		
FR/FR - Coletor - Fator de correção do trocador de calor	0,99	0,99	0,99	0,99		
Vazão (L/dia)	200	200	200	200		
Temperatura de entrada (C°)	25	25	25	25		
Temperatura de Saída (C°)	60	60	60	60		
V. armazenamento/área do coletor (l/m ²)	150	150	150	150		
Latitude (°)	-2,53	-2,53	-2,53	-2,53		
	Saída					
f - Fração solar anual sem correções	0,582246	0,57859	0,61849	0,563865	0,585798	0,023197667
f - Fração solar anual com correções	0,549317	0,545661	0,585561	0,530936	0,552869	0,023197667
	Parâmetros do f-chart					
	Simulação 5 - Liu Jordan	Simulação 6 - HDKR	Simulação 7 - Reindl	Simulação 8 - Badescu	Média-f	Desvio padrão-f
AC -Área do coletor (m ²)	6	6	6	6		
FR(τ)n - Eficiência Óptica	0,74	0,74	0,74	0,74		
FRUL - Coeficiente de Perda (w/m ² /C°)	4	4	4	4		
β - Inclinação do Coletor para a Horizontal (°)	35	35	35	35		
(τ)/(τ)n - Relação do Produto de Transmittância-Absortância	0,96	0,96	0,96	0,96		
FR/FR - Coletor - Fator de correção do trocador de calor	0,99	0,99	0,99	0,99		
Vazão (L/dia)	200	200	200	200		
Temperatura de entrada (C°)	25	25	25	25		
Temperatura de Saída (C°)	60	60	60	60		
V. armazenamento/área do coletor (l/m ²)	150	150	150	150		
Latitude (°)	-2,53	-2,53	-2,53	-2,53		
	Saída					
f - Fração solar anual sem correções	1,07074	1,06245	1,0987	1,05166	1,070888	0,020120016
f - Fração solar anual com correções	0,996276	0,987982	1,02423	0,977195	0,996421	0,020118129
	Parâmetros do f-chart					
	Simulação 9 - Liu Jordan	Simulação 10 - HDKR	Simulação 11 - Liu Jordan	Simulação 12 - Liu Jordan	Média-f	Desvio padrão-f
AC -Área do coletor (m ²)	2	2	1,2	1,2		
FR(τ)n - Eficiência Óptica	0,74	0,74	0,74	0,74		
FRUL - Coeficiente de Perda (w/m ² /C°)	4	4	4	4		
β - Inclinação do Coletor para a Horizontal (°)	35	35	35	35		
(τ)/(τ)n - Relação do Produto de Transmittância-Absortância	0,96	0,96	0,96	0,96		
FR/FR - Coletor - Fator de correção do trocador de calor	0,99	0,99	0,99	0,99		
Vazão (L/dia)	200	200	200	200		
Temperatura de entrada (C°)	25	25	25	25		
Temperatura de Saída (C°)	45	45	60	45		
V. armazenamento/área do coletor (l/m ²)	150	150	150	150		
Latitude (°)	-2,53	-2,53	-2,53	-2,53		
	Saída					
f - Fração solar anual sem correções	0,850067	0,843823	0,383757	0,604134	0,670445	0,22279374
f - Fração solar anual com correções	0,829263	0,823018	0,363026	0,590591	0,651475	0,222070005

Fonte: Próprio Autor (2022).

3.1 PREDIÇÃO DA RADIAÇÃO

A figura 1 mostra a predição da radiação segundo os modelos Liu e Jordan, HDKR, Reindl e Badescu, observa-se que os valores MÁXIMOS foram obtidos para o modelo Reindl nos meses 6,7 e 8. Os valores MÍNIMOS para os modelos HDKR e Badescu, para os meses 1, 11 e 12.



Fonte: Próprio autor (2022).

3.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES de 1 a 4; 5 a 8 e 9 a 12 f-chart

A tabela 4 mostra os parâmetros das simulações 1 a 4, em que a área do coletor foi mantida constante em 2m² e variando-se o modelo teórico de predição da radiação conforme indicado em que os demais parâmetros foram mantidos constantes conforme descrito. A figura 2 mostra a tela de entrada de dados do f-chart do softsun.

Figura 2: Tela de entrada de dados do f-chart do softsun para a sim_1 – modelo Liu-Jordan.

Input			
Ac - collector area (m2)		2	
F _R (τ _a) _n - optical efficiency		0.74	
F _{R,U,L} - loss coefficient - [W/m2/°C]		4	
β - collector slope from horizontal (°)		35	
(τ _a) / (τ _a) _n - ratio of the transmittance-absorptance product		0.96	
Collector-heat exchanger correction factor (FR'/FR)		0.99	
Heating load by water - calculating	flow rate (L/dia)	200	
T mains (C)	25	T water required (C)	60
Note: to enter with the load, leave the field of flow rate "empty"			
V _{storage} /Ac (storage capacity/square meter of collector area)[l/m2]		150	
City	São Luis	Latitude	-2.53
Output			
f (annual solar fraction) - without corrections		0.582246	
f (annual solar fraction) - with corrections		0.549317	

Fonte: Próprio autor (2022).

Analisando-se as simulações 1 a 4 para o sistema sem correção; considerando-se os quatro modelos de predição de radiação: as frações solares apresentaram os valores de 0,582246 para o modelo Liu Jordan, de 0,57859 para o modelo HDKR, de 0,61849 para o modelo de Reindl, de 0,563865 para o modelo de Badescu, com máximo valor para o modelo Reindl e mínimo para o modelo Badescu; com média de 0,585798 e o desvio padrão de 0,023197667.

Analisando-se as simulações 1 a 4 para o sistema com correção; considerando-se os quatro modelos de predição de radiação: as frações solares apresentaram os valores de 0,549317 para o modelo Liu Jordan, de 0,545661 para o modelo HDKR, de 0,585561 para o modelo de Reindl, de 0,530936 para o modelo de Badescu, com máximo valor para o modelo Reindl e mínimo para o modelo Badescu; com média de 0,552869 e desvio padrão de 0,023197667.

A tabela 4 mostra os parâmetros das simulações 5 a 8, em que a área do coletor foi mantida constante em 6m^2 e variando-se o modelo teórico de predição da radiação conforme indicado em que os demais parâmetros foram mantidos constantes conforme descrito.

Analisando-se as simulações 5 a 8 para o sistema sem correção; considerando-se os quatro modelos de predição de radiação: as frações solares apresentaram os valores de 1,07074 para o modelo Liu Jordan, de 1,06245 para o modelo HDKR, de 1,0987 para o modelo de Reindl, de 1,05166 para o modelo de Badescu, com máximo valor para o modelo Reindl e mínimo para o modelo Badescu; com média de 1,070888 e o desvio padrão de 0,020120016.

Analisando-se as simulações 5 a 8 para o sistema com correção; considerando-se os quatro modelos de predição de radiação: as frações solares apresentaram os valores de 0,996276 para o modelo Liu Jordan, de 0,987982 para o modelo HDKR, de 1,02423 para o modelo de Reindl, de 0,977195 para o modelo de Badescu, com máximo valor para o modelo Reindl e mínimo para o modelo Badescu; com média de 0,996421 e desvio padrão de 0,020118129.

A tabela 4 mostra os parâmetros das simulações 9 a 12, em que a área do coletor foi mantida constante em 2m^2 para sim_9 e sim_10, $1,20\text{m}^2$ para sim_11 e sim_12, variando-se o modelo teórico de predição da radiação conforme indicado em que os demais parâmetros foram mantidos constantes conforme descrito.

Analisando-se as simulações 9 a 12 para o sistema sem correção; considerando-se os dois modelos de predição de radiação: as frações solares apresentaram os valores de 0,850067;0,383757;0,604134 para o modelo Liu Jordan, de 0,843823 para o modelo HDKR, com máximo valor para o modelo Liu Jordan e mínimo para o modelo Liu Jordan; com média de 0,670445 e o desvio padrão de 0,222793974.

Analisando-se as simulações 9 a 12 para o sistema com correção; considerando-se os dois modelos de predição de radiação: as frações solares apresentaram os valores de 0,829263; 0,363026; 0,590591 para o modelo Liu Jordan, de 0,823018 para o modelo HDKR, com máximo valor para o modelo Liu Jordan e mínimo também; com média de 0,651475 e desvio padrão de 0,222070005.

3.3 COMPARAÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS 09, 19 e 20 DE JULHO

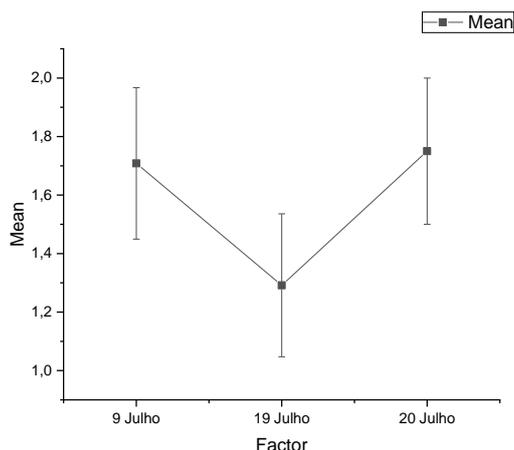
As análises estatísticas, de acordo com a ANOVA, mostraram que tanto para as médias da velocidade do vento, radiação horária incidente na horizontal, temperatura externa, quanto para radiação horária incidente inclinada, apresentaram o mesmo resultado, isto é: ao nível de significância de 5 % as populações não são significativamente diferentes, como pode ser observado nas tabelas 5, 6, 7 e 8 uma, vez que o P-value é maior do que o nível de significância para cada um dos fatores. Estes resultados são mostrados nas tabelas 5, 6, 7 e 8 com o respectivo erro padrão como intervalo de confiança. No entanto analisando o resultado apresentado na tabela 9, P-value menor que o nível de significância 0,05, rejeitando a hipótese nula, então podemos afirmar que há diferença significativa das médias das populações (temperatura de saída em função da inclinação do coletor). A tabela 10 mostra a estatística descritiva da temperatura de saída para as três inclinações, em que a maior média de 33,78 °C corresponde a 35° inclinação do coletor, e a menor média de 25,57 °C corresponde a 25° de inclinação do coletor.

Tabela 5: ANOVA da velocidade do vento.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	3,08333	1,54167	1,01875	0,36641
Error	69	104,41667	1,51329		
Total	71	107,5			

Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 1: Velocidade do vento X Fator (dia).



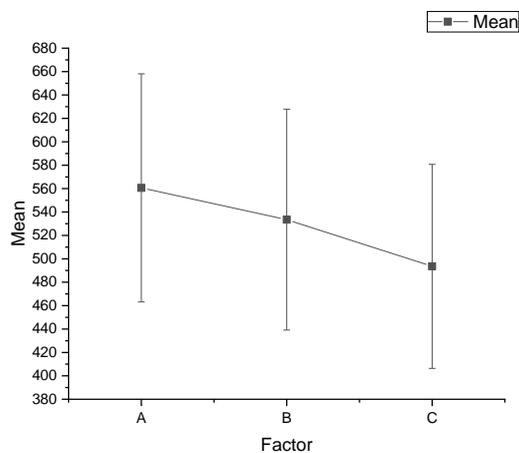
Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 6: ANOVA da Radiação incidente superfície horizontal.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	13663,08333	6831,54167	0,05553	0,94602
Error	69	8,48853E6	123022,14191		
Total	71	8,50219E6			

Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 2: Radiação Incidente superfície na horizontal X Fator (dia)



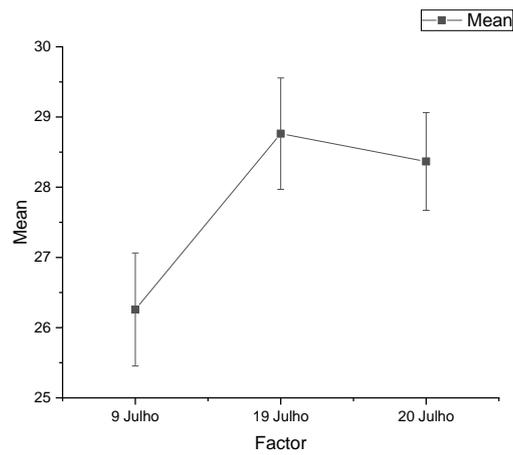
Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 7: ANOVA da Temperatura Externa.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	86,98083	43,49042	3,08834	0,05193
Error	69	971,66792	14,08214		
Total	71	1058,64875			

Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 3: Temperatura Externa X Fator (dia).



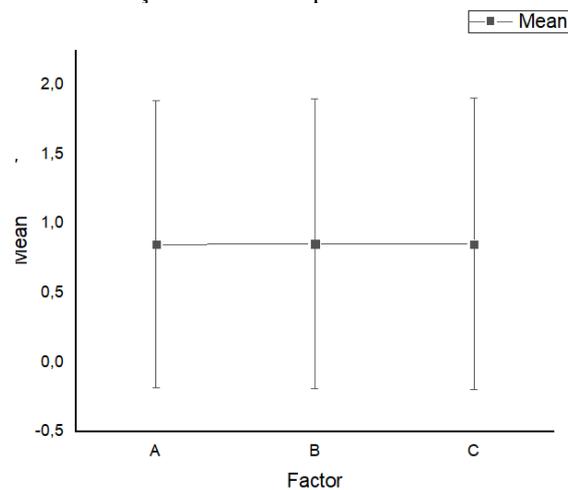
Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 8: ANOVA da radiação incidente superfície inclinada.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	3,8318E-4	1,9159E-4	1,75827E-4	0,99982
Error	69	75,18606	1,08965		
Total	71	75,18644			

Fonte: Próprio autor (2022).

Gráfico 4: Radiação Incidente superfície inclinada X Fator (dia)

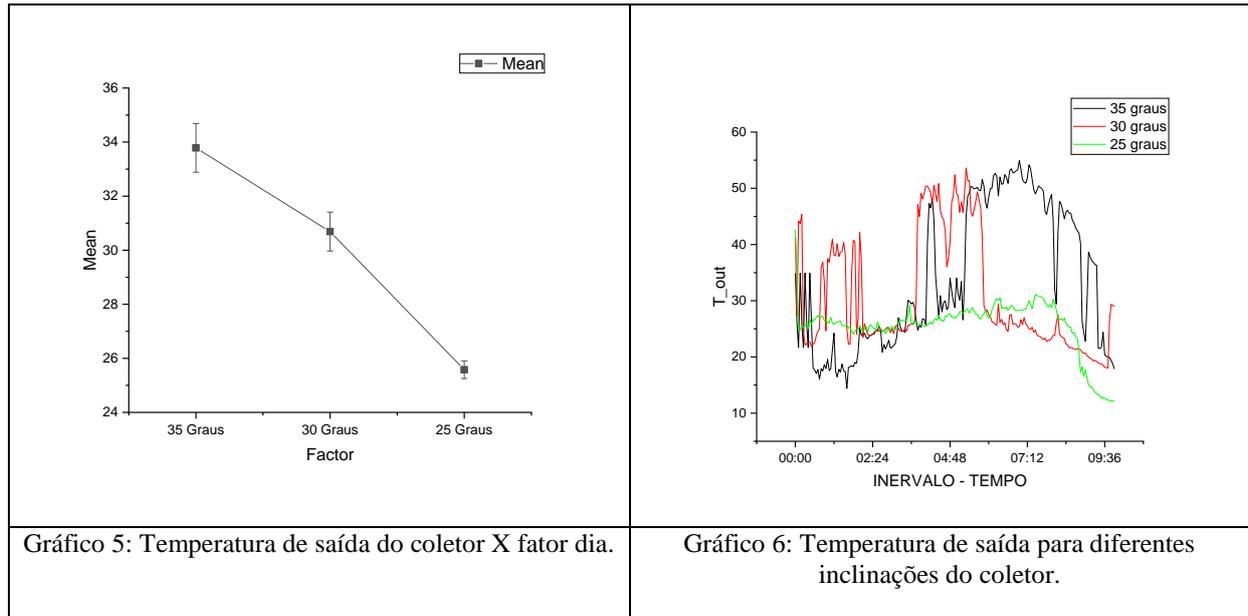


Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 9: ANOVA da Temperatura de saída.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	6852,81477	3426,40739	35,92062	1,88738E-15
Error	595	56756,04561	95,38831		
Total	597	63608,86038			

Fonte: Próprio autor (2022).



Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 10: Estatística Descritiva da Temperatura de saída.

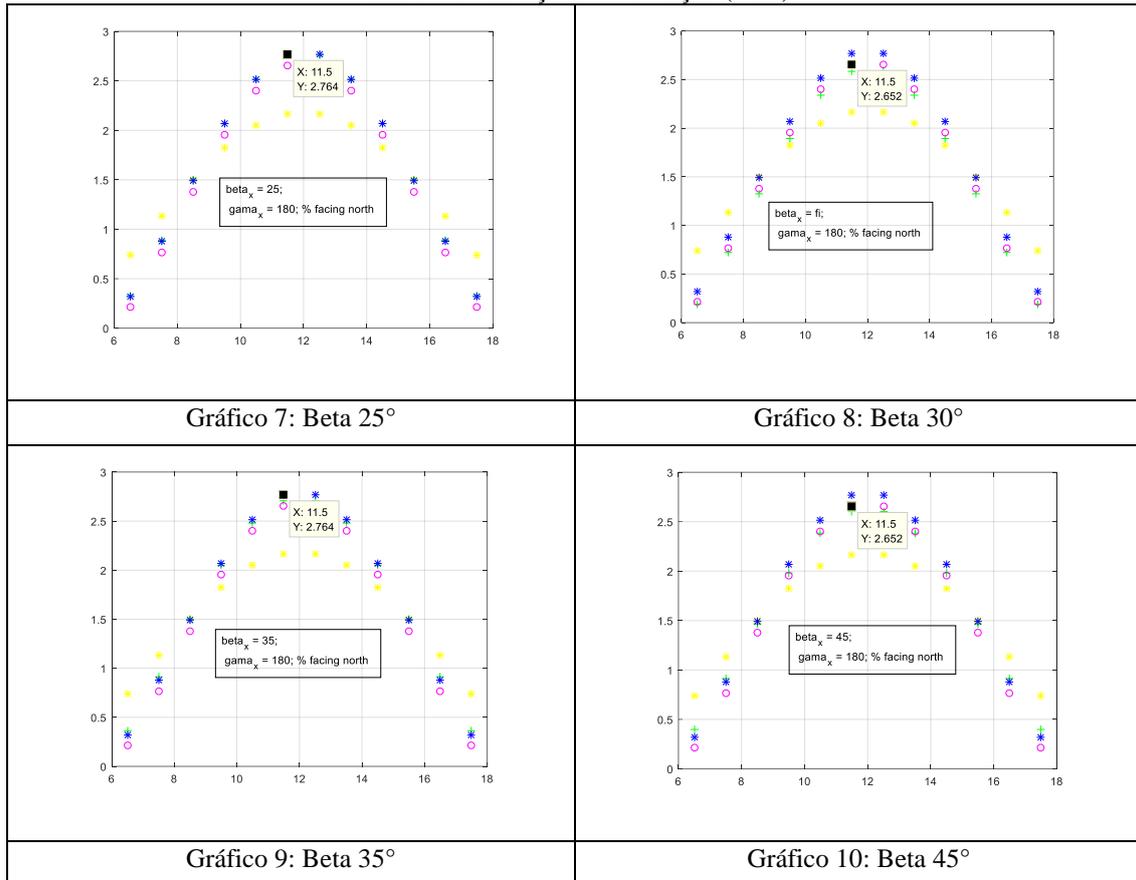
	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
T_out	200	1	33,78548	12,72065	0,89949
	199	2	30,69004	10,14208	0,71895
	199	2	25,57734	4,59922	0,32603

Fonte: Próprio autor (2022).

Os gráficos 1, 2, 3, 4 e 5 mostram as médias da velocidade do vento, radiação incidente na horizontal, temperatura externa, radiação incidente na superfície inclinada temperatura de saída do coletor versus o fator (dia) com seus respectivos intervalos de confiança. O gráfico 6 mostra uma análise comparativa das temperaturas de saída do coletor para as diferentes inclinações.

A tabela 11 demonstra os gráficos (7, 8, 9 e 10) da radiação incidente em função da inclinação da placa coletora (β). Foram considerados os modelos clássicos de predição de radiação da literatura: Liu Jordan (verde); HDKR (magenta); Reindl (Azul); Badescu (amarelo) e ângulos (β) de 25°; 30°; 35° e 45°, este último diferente das aquisições experimentais. Observa-se que para a inclinação de 35°, comparativamente, a incidência é ligeiramente maior às outras inclinações, 25° e 30°. E que beta maior que 35°, no caso 45° já ocorre perda de radiação incidente, sendo, portanto, pelas análises a inclinação ótima correspondente a 35°.

Tabela 11: Radiação X Inclinação (Beta).



Fonte: Próprio autor (2022).

A tabela 12 mostra os modelos propostos para a predição horária de temperatura de saída de coletor superfície horizontal, referentes aos dias 9/07(35°); 19/07(30°) e 20/07(25°), representa um modelo de regressão linear múltipla entre a temperatura de saída do coletor como função da temperatura de entrada (x1), radiação (x2), e velocidade do vento (x3), considera-se que não há interação entre temperatura de entrada, radiação e velocidade do vento, com as respectivas tabelas ANOVA.

Tabela 12: Resultados dos modelos propostos de predição superfície horizontal

Modelos propostos																											
9 de julho (35°)	$y = -12.0542 + 1.6038x_1 + 7.13927x_2 + 0,64513x_3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>DF</th> <th>Sum of Squares</th> <th>Mean Square</th> <th>F Value</th> <th>Prob>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">T_out experimental</td> <td>Model</td> <td>3</td> <td>1204,15414</td> <td>401,38471</td> <td>8,64406</td> <td>0,00942</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>325,04333</td> <td>46,43476</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>10</td> <td>1529,19747</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>At the 0.05 level, the fitting function is significantly better than the function y=constant.</p>			DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	T_out experimental	Model	3	1204,15414	401,38471	8,64406	0,00942	Error	7	325,04333	46,43476			Total	10	1529,19747			
		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F																					
T_out experimental	Model	3	1204,15414	401,38471	8,64406	0,00942																					
	Error	7	325,04333	46,43476																							
	Total	10	1529,19747																								
19 de julho (30°)	$y = 4,7666 + 0,98818x_1 - 0,23164x_2 - 0,20241x_3$																										

		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
T_out experimental	Model	3	1034,02661	344,67554	58,83433	2,4864E-5
	Error	7	41,00886	5,85841		
	Total	10	1075,03547			

At the 0.05 level, the fitting function is significantly better than the function y=constant.

20 de julho (25°)

$$y = 7,98319 + 1,04338x_1 - 2,78177x_2 - 0,52208x_3$$

		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
T_out experimental	Model	3	388,15495	129,38498	18,23545	0,00109
	Error	7	49,66672	7,09525		
	Total	10	437,82167			

At the 0.05 level, the fitting function is significantly better than the function y=constant.

Fonte: Próprio autor (2022).

Como pode ser observado, P-values em todos os resultados da ANOVA na tabela 12 são menores do que o nível de significância (5%), rejeitando, portanto, H_0 e implicando que pelo menos um dos regressores contribue significativamente para o modelo, isto é, os modelos são estatisticamente válidos. Os gráficos 11, 12 e 13 mostram comparativamente a temperatura estimada pelos modelos propostos e a temperatura de saída medida experimentalmente, revelando claramente a concordância entre ambas.

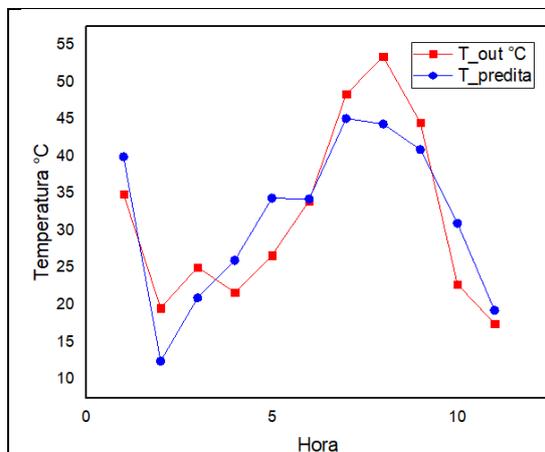


Gráfico 11: Temperatura experimental de saída x estimada

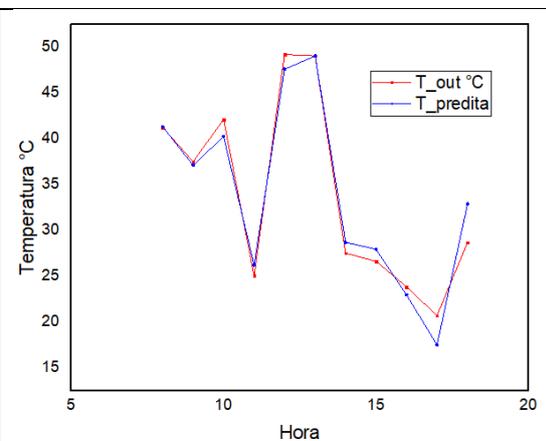


Gráfico 12: Temperatura experimental de saída x estimada

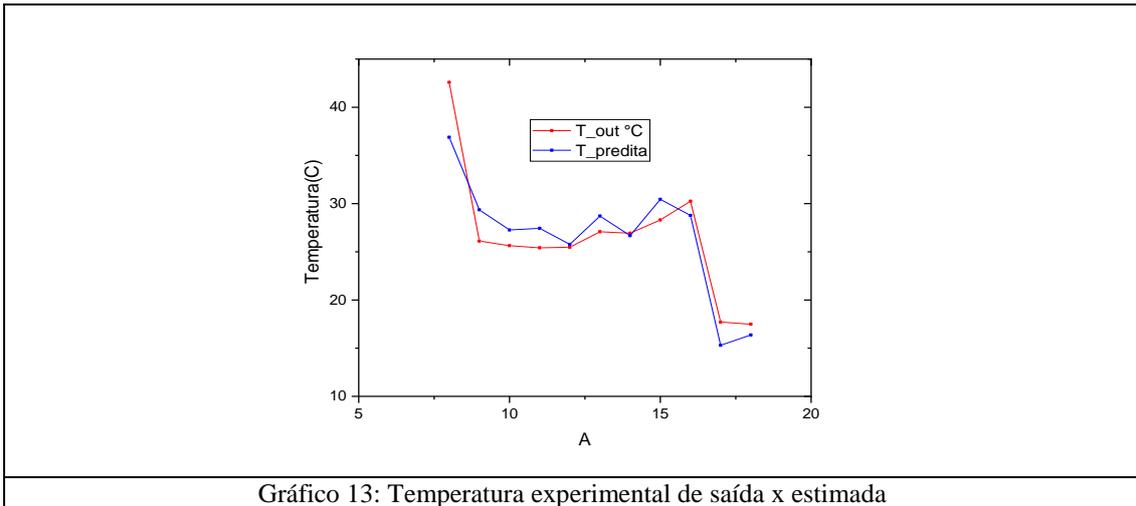


Gráfico 13: Temperatura experimental de saída x estimada

Fonte: Próprio autor (2022)

A tabela 13 mostra os modelos propostos para a predição horária de temperatura de saída de coletor superfície inclinada, referentes aos dias 9/07(35°); 19/07(30°) e 20/07(25°), representa um modelo de regressão linear múltipla entre a temperatura de saída do coletor como função da temperatura de entrada (x1), radiação (x2), e velocidade do vento (x3), considera-se que não há interação entre temperatura de entrada, radiação e velocidade do vento, com as respectivas tabelas ANOVA.

Tabela 13: Resultados dos modelos propostos de predição superfície inclinada

Modelos propostos																											
9 de julho (35°)	$y = -12.0542 + 1.6038x_1 + 7,13927x_2 + 0,64513x_3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>DF</th> <th>Sum of Squares</th> <th>Mean Square</th> <th>F Value</th> <th>Prob>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">T_out experimental</td> <td>Model</td> <td>3</td> <td>1204,15414</td> <td>401,38471</td> <td>8,64406</td> <td>0,00942</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>325,04333</td> <td>46,43476</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>10</td> <td>1529,19747</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>At the 0.05 level, the fitting function is significantly better than the function y=constant.</p>			DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	T_out experimental	Model	3	1204,15414	401,38471	8,64406	0,00942	Error	7	325,04333	46,43476			Total	10	1529,19747			
		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F																					
T_out experimental	Model	3	1204,15414	401,38471	8,64406	0,00942																					
	Error	7	325,04333	46,43476																							
	Total	10	1529,19747																								
19 de julho (30°)	$y = 4,7666 + 0,98818x_1 - 0,23164x_2 - 0,20241x_3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>DF</th> <th>Sum of Squares</th> <th>Mean Square</th> <th>F Value</th> <th>Prob>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">T_out experimental</td> <td>Model</td> <td>3</td> <td>1034,02661</td> <td>344,67554</td> <td>58,83433</td> <td>2,4864E-5</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>41,00886</td> <td>5,85841</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>10</td> <td>1075,03547</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>At the 0.05 level, the fitting function is significantly better than the function y=constant.</p>			DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	T_out experimental	Model	3	1034,02661	344,67554	58,83433	2,4864E-5	Error	7	41,00886	5,85841			Total	10	1075,03547			
		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F																					
T_out experimental	Model	3	1034,02661	344,67554	58,83433	2,4864E-5																					
	Error	7	41,00886	5,85841																							
	Total	10	1075,03547																								
20 de julho (25°)	$y = 7,98319 + 1,04338x_1 - 2,78177x_2 - 0,52208x_3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>DF</th> <th>Sum of Squares</th> <th>Mean Square</th> <th>F Value</th> <th>Prob>F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">T_out experimental</td> <td>Model</td> <td>3</td> <td>388,15495</td> <td>129,38498</td> <td>18,23545</td> <td>0,00109</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>49,66672</td> <td>7,09525</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>10</td> <td>437,82167</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>At the 0.05 level, the fitting function is significantly better than the function y=constant.</p>			DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	T_out experimental	Model	3	388,15495	129,38498	18,23545	0,00109	Error	7	49,66672	7,09525			Total	10	437,82167			
		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F																					
T_out experimental	Model	3	388,15495	129,38498	18,23545	0,00109																					
	Error	7	49,66672	7,09525																							
	Total	10	437,82167																								

Fonte: Próprio autor (2022).

Como pode ser observado, P-values em todos os resultados da ANOVA na tabela 13 são menores do que o nível de significância (5%), rejeitando, portanto, H_0 e implicando que pelo menos um dos regressores contribue significativamente para o modelo, isto é, os modelos são estatisticamente válidos. Os gráficos 14, 15 e 16 mostram comparativamente a temperatura estimada pelos modelos propostos e a temperatura de saída medida experimentalmente, revelando claramente a concordância entre ambas.

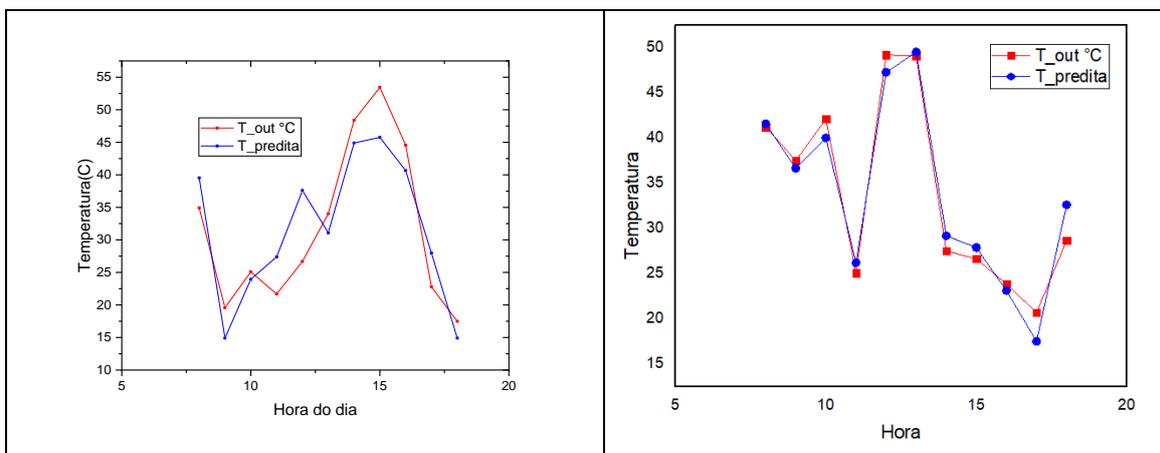


Gráfico 14: Temperatura experimental de saída x estimada

Gráfico 15: Temperatura experimental de saída x estimada

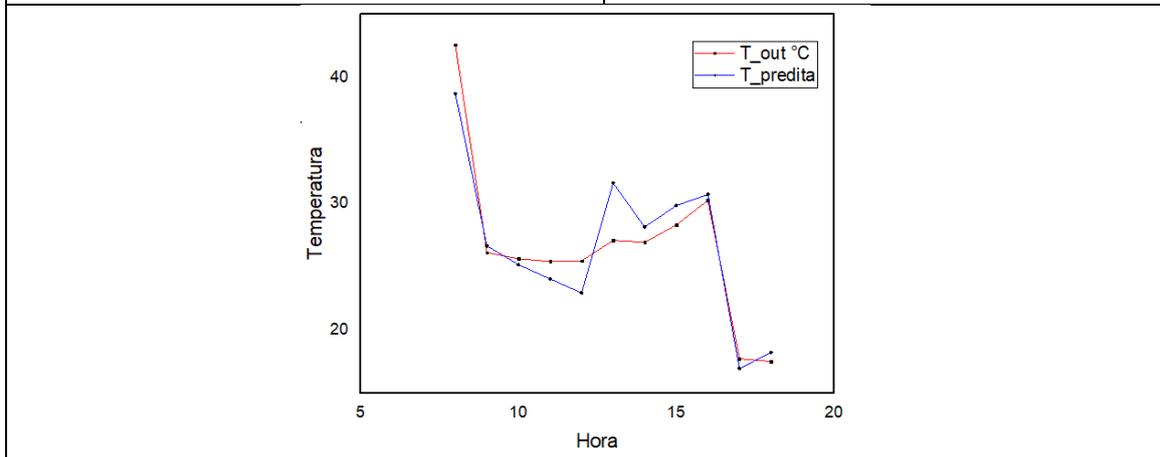


Gráfico 16: Temperatura experimental de saída x estimada

Fonte: Próprio autor (2022).

3.4 ANÁLISES TERMOGRÁFICAS

Os ensaios termográficos que foram realizados simultaneamente a aquisição de dados são apresentados a seguir, mostram o comportamento térmico do sistema.

Tabela 14: Termografias Comparativas de mesmo horário e inclinações distintas

		
<p>Figura 3: 15 horas / 9 de julho – 35°</p>	<p>Figura 4: 15 horas / 19 de julho - 30°</p>	<p>Figura 5: 15 horas / 20 de julho - 25°</p>

Fonte: Próprio autor (2022).

A análise das figuras termográficas pode-se dizer que a maior temperatura registrada foi no dia 9 de julho (inclinação de 35°) às 15 horas (42.5°C). Podemos constatar também conforme tabela 13 acima, que o comparativo de dias diferentes (9, 19 e 20 de julho), inclinações diferentes (35°; 30° e 25°), e o mesmo horário de captura, corrobora que a inclinação de 35° detém as maiores temperaturas de acordo com as termografias.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto e dos resultados apresentados, considerando o projeto e execução do aquecedor solar pelo método f-chart realizado com sucesso e as simulações de 1 a 12 realizadas para os parâmetros constantes, a saber: $FR(\tau\alpha)_n$ - Eficiência Óptica; FR_{UL} - Coeficiente de Perda ($W/m^2/C^\circ$); $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ - Relação do Produto de Transmitância-Absortância; FR'/FR - Coletor - Fator de correção do trocador de calor; Vazão (L/dia); Temperatura de entrada (C°); V. armazenamento/área do coletor (l/m^2) e Latitude ($^\circ$) e as com parâmetros variáveis: AC - Área do coletor (m^2) e Temperatura de Saída (C°), β - Inclinação do Coletor ($^\circ$), em que nas referidas simulações foram analisadas sob a influência do modelo de predição teórica para a predição da radiação na superfície do coletor, segundo os modelos de Liu Jordan, HDKR, Reindl e Badescu na fração solar a longo prazo do sistema, pode se concluir que o modelo de Reindl

apresentou maior fração solar média anual, e que o modelo Badescu apresentou menor para todas as simulações, com desvio padrão não mais de 2 % . Nas simulações de 1 a 4 mesmo sendo indicado que o parâmetro A_c está fora da faixa indicada para o f-chart a fração solar a longo prazo manteve-se abaixo de 1 indicando que não há sobredimensionamento do coletor para a temperatura de saída indicada, resultado este corroborado com as simulações experimentais. Nas simulações de 5 a 8 para o f-chart a fração solar sem correções a longo prazo manteve-se acima de 1 indicando que há sobredimensionamento do coletor para a temperatura de saída indicada, e a fração solar com correções, apenas o modelo de Reindl resultou em sobredimensionamento. Nas simulações de 9 a 12 mesmo sendo indicado que o parâmetro A_c está fora da faixa indicada para o f-chart a fração solar a longo prazo manteve-se abaixo de 1 indicando que não há sobredimensionamento do coletor para a temperatura de saída indicada, resultado este com as simulações experimentais.

Os modelos lineares propostos para a predição horária da temperatura de saída do coletor em função da temperatura de entrada, radiação incidente e velocidade do vento, foram validados estatisticamente e concordaram significativamente com os dados experimentais.

Os ensaios de termografia infravermelha corroboraram as análises parciais do instante de maior temperatura e gradientes na superfície do coletor.

As simulações do f-chart, apesar da área do coletor estar fora da faixa recomendada, os resultados experimentais concordaram quanto à temperatura de saída em torno de 55 graus Celsius.

REFERÊNCIAS

Badescu V. A new kind of cloudy sky model to compute instantaneous values of diffuse and global irradiance. *Theor Appl Climatol* 2002; 72:127–36.

Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. fourth ed. Wiley; ISBN: 978-0-470-87366-3, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). BEN 2021 Relatório Síntese 2021 Ano Base 2020.

Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, v.28, p.293-302, 1982.

GONÇALVES, R.S., PALMERO-MARRERO, A. I., OLIVEIRA, A. C. Educational solar energy tool in Matlab environment. 6th International Conference on Energy and Environment Research (ICEER 2019), SCIEI, 2019, 22–25 July, Aveiro, Portugal.

IRENA - International Renewable Energy Agency (IRENA, 2020). Renewable Capacity Highlights. 31 March 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2020.pdf?la=en&hash=B_6BDF8C3306D271327729B9F9C9AF5F1274FE30B. Acesso em: 01 de setembro de 2021.

Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*. New York: John Wiley & Sons, Inc; 2001

Reindl DT, Beckman WA, Duffie JA. Diffuse fraction correlations. *Sol Energy* 1990;45(1).