

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA VIA BOX-BEHKEN

Gustavo Lucas Höher (UFRGS) - gushoher@hotmail.com

Bruno Polydoro Cascaes (UFRGS) - cascaes.bruno@gmail.com

Letícia Jenisch Rodrigues (UFRGS) - leticia.jenisch@gmail.com

Paulo Smith Schneider (UFRGS) - pss@mecanica.ufrgs.br

Resumo:

O presente trabalho tem como objetivo a análise da aplicação do método de Box-Behnken, o qual determina a relação entre os parâmetros de entrada e uma dada saída. Para um sistema de aquecimento de água a partir de coletores solares de placa plana, situado na cidade de Porto Alegre, utilizou-se o arquivo climático desta região. Definido um dado intervalo de estudo para cada parâmetro, em conjunto com o software MINITAB pode-se determinar os valores de cada parâmetro para diferentes experimentos. Os ensaios foram realizados através do Software TRNSYS, alterando os valores de azimute, inclinação, área, volume de tanque e tipo de coletor para obter a saída desejada, neste caso a fração solar. Depois de realizados os experimentos definidos pelo método de Box-Behnken, realizou-se análise dos dados gerados pelo software. Percebeu-se que o parâmetro área tem uma influência significativa para os valores de fração solar. Analisando o intervalo de confiabilidade do modelo, constatou-se que muitas interações entre os parâmetros estavam fora do intervalo desejado. Outro fator analisado é o gráfico de resíduo gerado, que com seu comportamento acaba validando o modelo resultante, pelo fato de que os experimentos seguirem uma dada linha de tendência.

Palavras-chave: *Energia Solar Térmica, Box-Behnken, Sistemas de aquecimento de água.*

Área temática: *Conversão Térmica com coletores planos*

Subárea temática: *Sistemas Solares Térmicos: aquecimento de água, espaço e refrigeração*

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA VIA BOX-BEHKEN

Gustavo Lucas Höher – gushoher@hotmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Engenharia de Energia

Bruno Polydoro Cascaes – cascaes.bruno@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Letícia Jenisch Rodrigues – leticia.jenisch@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Paulo Smith Schneider – pss@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. *O presente trabalho tem como objetivo a análise da aplicação do método de Box-Behnken, o qual determina a relação entre os parâmetros de entrada e uma dada saída. Para um sistema de aquecimento de água a partir de coletores solares de placa plana, situado na cidade de Porto Alegre, utilizou-se o arquivo climático desta região. Definido um dado intervalo de estudo para cada parâmetro, em conjunto com o software MINITAB pode-se determinar os valores de cada parâmetro para diferentes experimentos. Os ensaios foram realizados através do Software TRNSYS, alterando os valores de azimute, inclinação, área, volume de tanque e tipo de coletor para obter a saída desejada, neste caso a fração solar. Depois de realizados os experimentos definidos pelo método de Box-Behnken, realizou-se análise dos dados gerados pelo software. Percebeu-se que o parâmetro área tem uma influência significativa para os valores de fração solar. Analisando o intervalo de confiabilidade do modelo, constatou-se que muitas interações entre os parâmetros estavam fora do intervalo desejado. Outro fator analisado é o gráfico de resíduo gerado, que com seu comportamento acaba validando o modelo resultante, pelo fato de que os experimentos seguem uma dada linha de tendência.*

Palavras-chave: Energia Solar Térmica, Box-Behnken, Sistemas de aquecimento de água.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho busca explorar quais parâmetros de entrada para um sistema de aquecimento de água solar caseiro influenciam a determinação da fração solar. O método escolhido foi o de Box-Behnken, onde por meios estatísticos e matemáticos pode-se determinar a relação entre os parâmetros de entrada e de saída de um dado sistema. Esse método faz parte de uma ferramenta chamada *Design of Experiments* (DoE). Para o desenvolvimento de uma dada simulação ou estudo, a ferramenta DoE fora utilizada em grande parte dos casos para determinar o conjunto de parâmetros que regem o melhor comportamento do sistema em questão.

Em UMDU et al., 2018, a aplicação da ferramenta fora utilizada para determinar o dimensionamento dos experimentos para otimização da transmissão térmica de biorreatores de microalga. BENDATO et al., 2015, objetivou a determinação da equação que determina o custo de implementação de uma planta fotovoltaica de 1 MWe. No trabalho de HANNANE et al., 2013, o sistema DoE fora utilizado para determinar as condições de operação de painéis fotovoltaicos através do descobrimento das tensões de circuito aberto do painel. A partir desta ferramenta pode-se notar a vasta área de possíveis aplicações, além de diminuir o tempo de resposta na obtenção de resultados.

No sistema utilizado neste trabalho, são avaliados 5 parâmetros de entrada, que variam em um determinado intervalo. O software MINITAB fora utilizado para fazer a manipulação dos dados e gerar assim um dado número de experimentos, nos quais se obteria o comportamento desse sistema a partir de um modelo matemático. Outro software utilizado foi o TRNSYS, o qual estes parâmetros de entradas foram inseridos a fim de obter os valores de fração solar para cada experimento.

O uso de métodos matemáticos em aplicações de energia pode ser observado em MÄKELÄ, 2017, no qual é apresentado o método de *Response Surface Methodology* (RSM), o qual é caracterizado por determinar a correlação dos parâmetros de entrada e saída do modelo. Este trabalho traz em discussão a viabilidade e a facilidade da utilização desses métodos para aplicações experimentais e de determinação via simulações em softwares.

2. Apresentação do Caso

O presente trabalho tem por objetivo principal a determinação dos parâmetros que mais impactam no desempenho de um sistema de aquecimento solar (SAS), o qual utiliza coletores solares do tipo placa plana, com escoamento forçado. Para tanto, foi selecionado um perfil de consumo de água quente, para uma edificação residencial, assumindo quatro moradores. Esse perfil, leva em conta o horário de consumo com relação a um dia da habitação. Este sistema situa-se na cidade de Porto Alegre.

2.1 Estudo

O SAS, o qual é composto por um arranjo de coletores solares, conectados em série, uma bomba, um controlador, um reservatório estratificado e um aquecedor de passagem auxiliar.

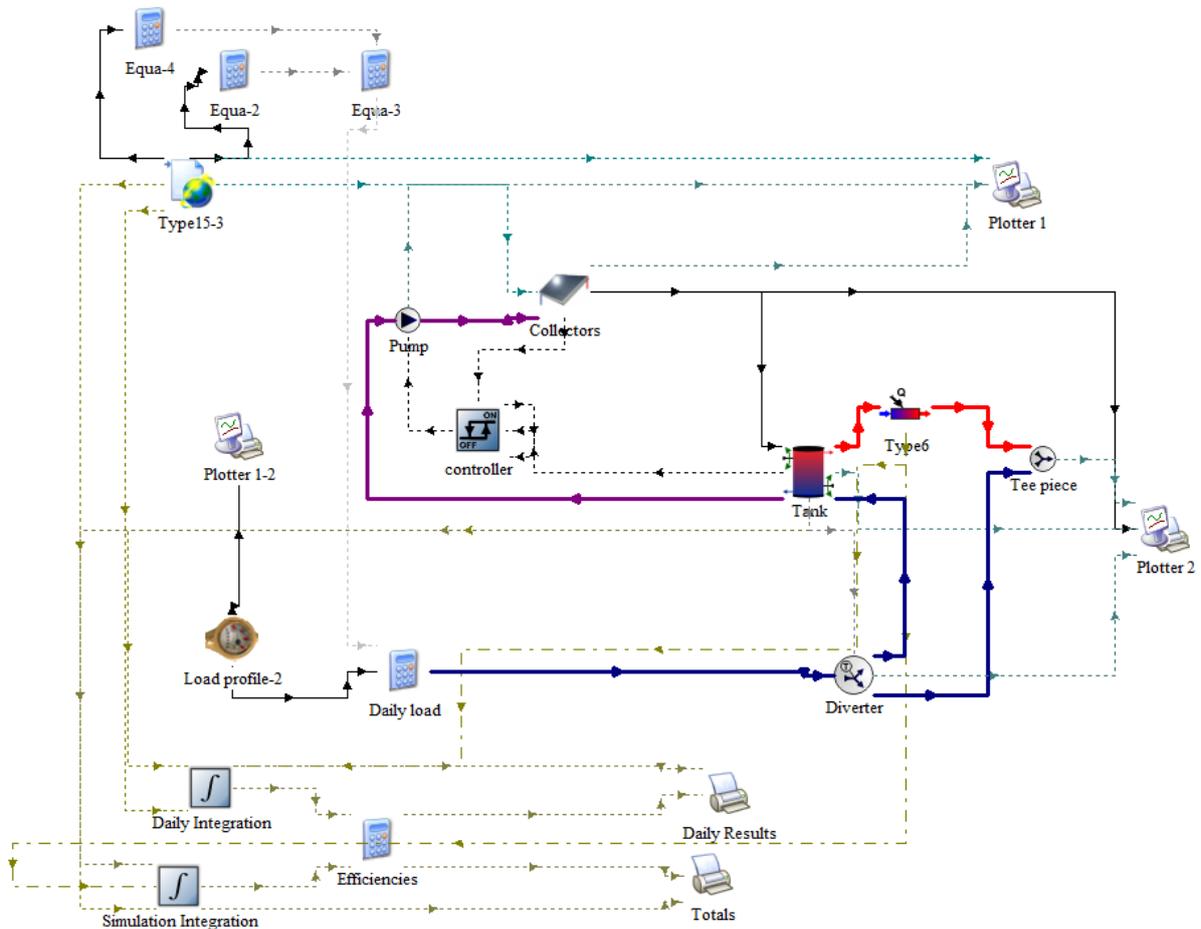


Figura 1: Área de trabalho do software TRNSYS. Fonte: Autor.

O reservatório de água empregado teve seu volume estipulado a partir do cálculo proposto pela norma brasileira NBR 15569. Depois de realizado os cálculos, chegou-se ao valor de 0,4 m³ de água. Utilizando um consumo determinado de uma família de quatro indivíduos, levando em conta a sua rotina diária, pode-se estimar a porcentagem de consumo para alguns intervalos de tempo, apresentados na tabela a seguir:

Tabela 1: Distribuição de consumo. Fonte: Autor.

Faixa Horária	Porcentagem de Consumo
7h - 9h	30%
9h - 11h	0
11h - 13h	20%
13h - 18h	5%
18h - 22h	40%
22h - 24h	5%

O SAS foi avaliado pelo software TRNSYS, no qual o modelo reconhecido pelo programa para coletores do tipo placa plana é nomeado como *quadratic efficiency collector*. Como o sistema analisado está sendo aplicado na cidade de Porto Alegre, empregamos o arquivo climático da mesma. Configurando com o tipo de coletor escolhido, sua área e

volume estipulados, pode-se verificar a simulação e obter como resultado a fração solar média anual para dado arranjo de coletores. Essa variável é definida como a redução fracionária de energia obtida para um coletor solar térmico.

Para dimensionamento e obter o comportamento das variáveis que têm maior influência no estudo empregado, fora utilizado o software MINITAB. Através do método *design of experiments* (DOE), pelo método de Box-Behnken, os dados foram selecionados a partir de um intervalo determinado. O método escolhe valores existentes dentro do intervalo escolhido e os distribui em distintos ensaios ou experimentos. Por meio deste recurso pode-se minimizar o número de experimentos. Assim, para cada ensaio obtém-se um valor de fração solar de acordo com os parâmetros que foram escolhidos pelo software. Neste estudo, as variáveis escolhidas foram: o azimute, a inclinação, a área do arranjo, o volume do tanque e o tipo de coletor (A, B ou C). Abaixo temos os intervalos destes dados:

Tabela 2: Intervalo de Input no MINITAB. Fonte: Autor.

Parâmetro	Dados
Azimute	0° - 90°
Inclinação	0° - 50°
Área do arranjo	2 m ² - 6 m ²
Volume do Tanque	0.3 m ³ - 0.5 m ³
Coletor	A, B ou C

A área do arranjo fora escolhida por ser menor comparada a recomendada, mas maior que a área de um único coletor. O intervalo de inclinação foi adotado de forma que não ultrapasse a recomendada para essa latitude. O volume do tanque foi levado em conta os valores recomendados, de acordo com catálogo disponível. Quanto ao azimute, definiu-se o valor de zero, que é o recomendado e foi observada a alteração do valor de energia recebida quando a variável se aproxima de 90°.

Foram escolhidos três tipos de coletores de acordo com a etiqueta do INMETRO com relação a coletores solares. O primeiro coletor é classificado como tipo, o segundo é um coletor classificado como B e um terceiro coletor, de tipo C. Na tabela a seguir pode-se observar os dados que serão utilizados na análise dos três tipos de coletores solares como o $Fr(\tau\alpha)$, $Fr U_L$ e a vazão recomendada pelo manual do fabricante:

Tabela 3: Dados dos coletores utilizados. Fonte: Autor.

Tipo de Coletor	$Fr(\tau\alpha)$	$Fr U_L$	Vazão Recomendada
A	0.739	5.051	70
B	0.681	5.421	53
C	0.31	4.621	54

O método de Box-Behnken foi utilizado para obter uma equação que rege o comportamento do sistema. A técnica que engloba o método escolhido é conhecida como superfície de resposta (*Response Surface Methodology* - RSM), que consiste em um conjunto de teorias matemáticas e estatísticas que são necessárias para a modelagem e análise de problemas que a resposta de interesse é fortemente influenciada por certas variáveis e o objetivo é otimizar essa resposta. No primeiro momento de analisar a resposta gerada pelo método RMS, é necessário encontrar uma aproximação adequada para a função y real que relaciona diretamente com as variáveis independentes.

A resposta para um sistema que utiliza RSM é geralmente modelado por uma equação linear polinomial de grau baixo. Caso esse sistema não atenda as necessidades, um polinômio de grau superior deve ser utilizado. O objetivo geral do RSM é determinar a condição ótima de operação para o sistema e determinar a região em que cada requisito de operação é satisfeito.

3. Metodologia

O Box-Behnken, é um dos métodos mais usuais na análise de *Design of Experiments* (DoE). No estudo realizado por Vieira, 2017, acerca da previsão e da penalização energética para sistemas de dessulfurização de gases de combustão de carvão mineral, o método de resposta de superfície foi utilizado a modo de que o número de experimentos fosse reduzido.

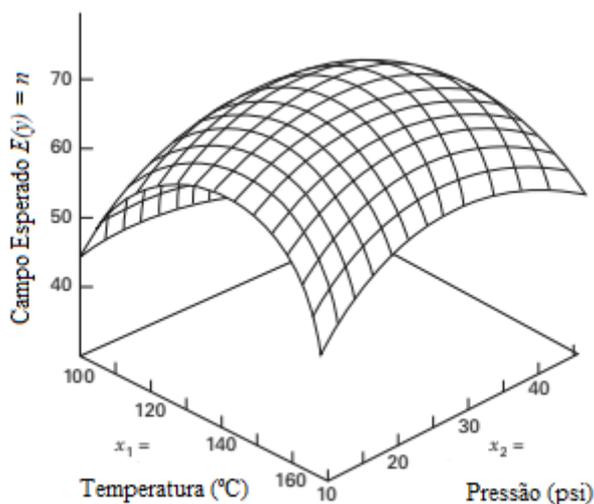


Figura 2: Gráfico de resposta de superfície. Fonte: Montgomery, 2012.

Por ser um método da classe de resposta de superfície, o mesmo é expresso através de uma superfície característica, a qual é plotada a partir da relação dos parâmetros escolhidos com a saída desejada. Na Figura 2, os parâmetros exemplificados são a temperatura e pressão, sendo a saída a superfície (plano) resultante. No caso do uso do método Box-Behnken, esses parâmetros nunca são avaliados em seus extremos (inferior e superior) num mesmo experimento. Ou seja, cada um é avaliado em um experimento diferente. Essa característica torna o projeto mais econômico. Além disso, o método requer poucos cálculos e reduz o número de experimentos necessários.

Nesse modelo, por se tratar de uma superfície de resposta, a mesma é dada por um termo quadrático, ou seja, uma equação polinomial do tipo

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

na qual os coeficientes β são gerados pelo programa a fim de expressar a relação entre as entradas e a saída. O produto de termos x_i e x_j representa a relação entre as entradas. Com esta equação, o comportamento do sistema pode ser determinado, bastando apenas substituir os valores dos parâmetros de entrada dentro dos intervalos determinados. No caso do sistema avaliado neste trabalho, os parâmetros foram escolhidos de modo que não ocorresse uma correlação entre eles, mas somente com a saída.

Os parâmetros escolhidos podem ser classificados em contínuo ou categórico. O intervalo contínuo que é denominado por uma quantidade de valores que pode variar de x a y . E o intervalo categórico, que denomina não um valor, mas sim uma categoria ou classe de uma certa variável que não pode ser quantizada.

Um dos resultados a analisar pelo modelo é a equação característica que rege o sistema. Também pode-se observar que muitos termos não são de grande influência para a saída. Dependendo do Grupo de estudo, um dado intervalo de confiabilidade é gerado. A solução é dada por uma tabela de regressão. Para respeitar o intervalo de confiabilidade, o termo *P-Value* deve estar abaixo de 0,05. Caso os valores estejam acima desta ordem, a dada interação não é relevante para o modelo. Desta maneira, devem ser descartados primeiramente as interações de maior ordem com *P-Value* mais alto, e assim sucessivamente. Finalizando esta parte, o modelo refinado estará em seu estado final. Outro parâmetro que deve ser avaliado é o R^2 , que deve ter seu valor mais próximo possível de 1. Isto pode ser observado ao retirarmos os termos de menor significância.

4. Resultados

Realizando o tratamento de dados pelo software MINITAB, pode-se observar os resultados impressos pelo programa. A primeira informação impressa é a tabela de regressão da superfície de resposta, o qual indica as relações entre os parâmetros escolhidos. A validação do modelo é dada pelos parâmetros $R\text{-aq(adj)}$ e $R\text{-aq(pred)}$, os quais descrevem o nível de confiabilidade dos resultados. Quanto mais próximos de 1 estes parâmetros estão, menor é erro gerado pelo modelo. A equação característica deste modelo é um outro resultado a ser analisado. A equação possui todos os coeficientes que relacionam os parâmetros escolhidos com a saída desejada.

Segundo metodologia, o resultado de P-Value deve estar com um valor menor que 0,05. Para isto, foram observadas as variáveis de maior grau de interação que estivessem com um valor acima do permitido. As relações de segunda ordem, Azimute-Volume, Azimute-Coletor, Inclinação-Área, Inclinação-Volume, Inclinação-Coletor, Área-Volume e Volume-Coletor acabam não tendo grande influência sobre o modelo estudado. Nas de primeira ordem, apenas a interação de Volume-Volume, não tem influência para o modelo. Com o método de refino de modelo aplicado, restaram três interações de segunda ordem e quatro de primeira ordem.

Na tabela a seguir, o valor representativo entre os parâmetros restantes é demonstrado pelo intervalo de confiabilidade de 95%.

Tabela 4: Dados dos resíduos. Fonte: Autor.

Termo	P-Value
Model	0,000
Linear	0,000
Azimute	0,000
Inclinação	0,000
Área	0,000
Volume	0,000
Coletor	0,000
Square	0,000
Azimute*Azimute	0,000
Inclinação*Inclinação	0,000
Área*Área	0,000
Coletor*Coletor	0,000
2-Way Interaction	0,000
Azimute*Inclinação	0,007
Azimute*Área	0,002
Área*Coletor	0,001

No gráfico de resíduos, representado pela Figura 3, os valores de fração solar obtidos a partir das simulações em questão seguem um padrão descrito pela linha de tendência de cor vermelha. Tendo em conta a análise de variância dos experimentos em questão, o gráfico de resíduos é plotado a fim de que possamos mensurar o quão afastados estão os resultados da linha de tendência. Em outras palavras, o gráfico indica a probabilidade de os resultados terem um comportamento próximo do esperado, conforme variamos os parâmetros de entrada do modelo.

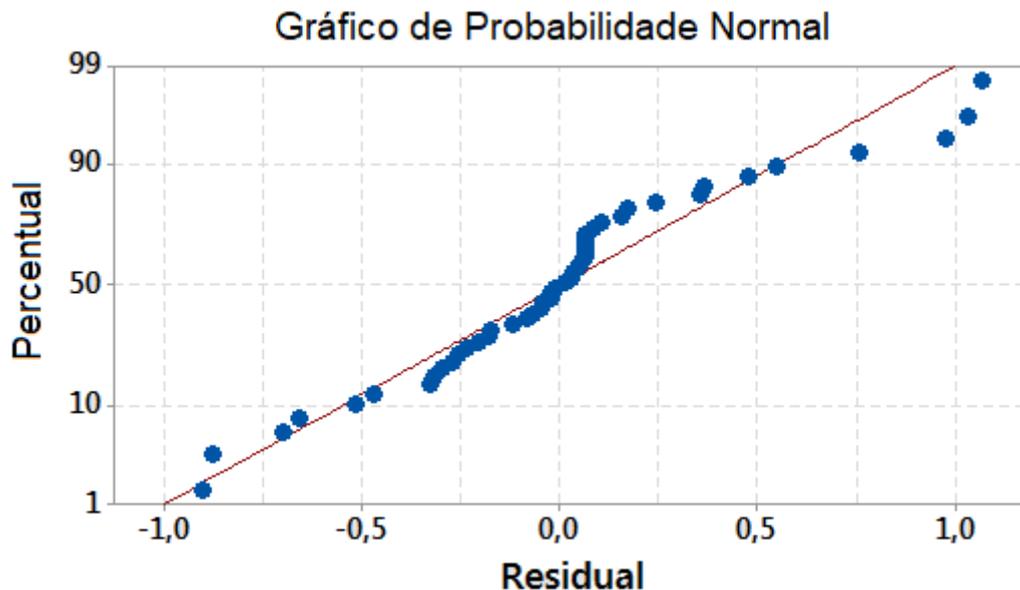


Figura 3: Gráfico de Resíduos. Fonte: Autor.

Outra forma de validar se os resultados anteriores estão de acordo é analisar os gráficos de interação entre os parâmetros. Um deles é o gráfico de interação entre os parâmetros de entrada. Nestes gráficos, pode observar os diferentes valores que o software gerou para realizar os experimentos. Na Figura 4, temos esta representação diferenciada por três cores, quanto mais essas linhas se cruzam mais forte é a correlação entre os parâmetros. Pode-se observar que o gráfico

de Azimute x Inclinação, tem maior correlação. Já os gráficos de Azimute x Área e Inclinação x Área estão totalmente separados, o que representa total independência entre os parâmetros.

Gráfico das Interações Entre os Parâmetros

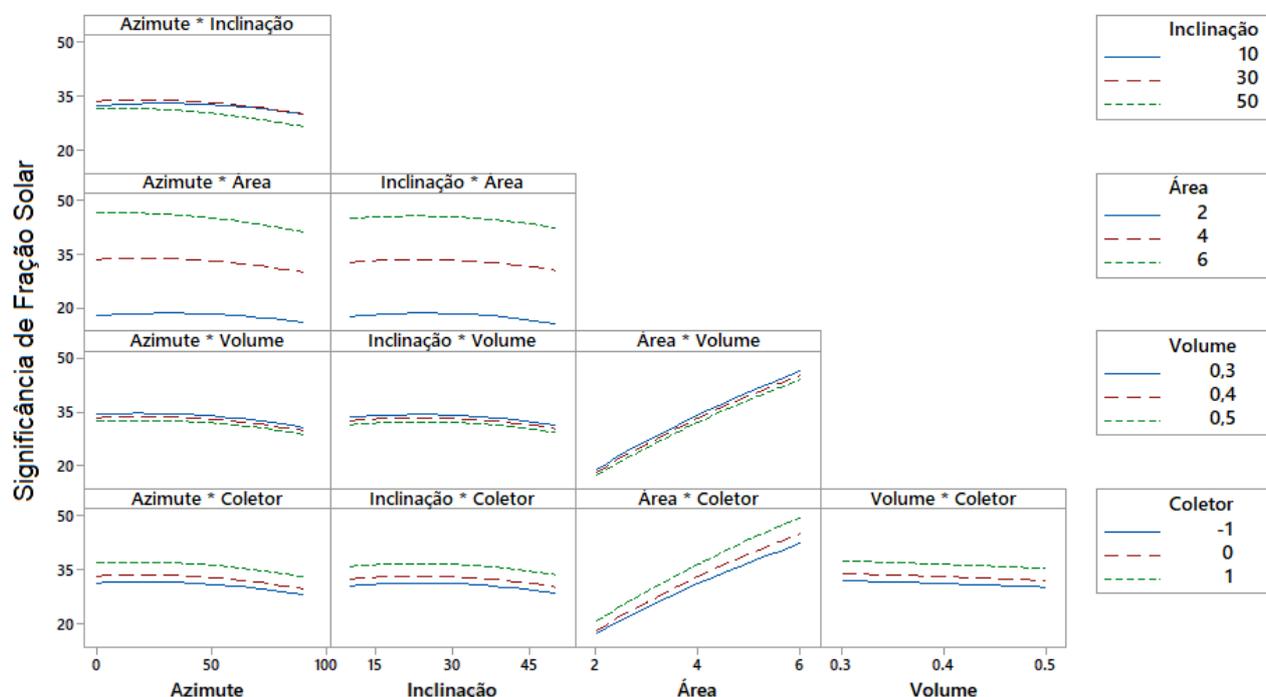


Figura 4: Gráfico de Interações. Fonte: Autor.

A relação de cada parâmetro de entrada com a saída também é apresentada em gráfico fornecido pelo software. Através da Figura 5, nota-se que o parâmetro área é de grande influência para a variação da fração solar. Quanto maior a inclinação da reta, maior será sua influência para o modelo. Para um coletor de área de 2 m² temos uma baixa fração solar e no extremo oposto temos uma alta fração solar que corresponde a maior área do modelo avaliado. Nos parâmetros azimute e inclinação, é observado que no extremo inferior não possuem a maior fração solar e no extremo superior estes parâmetros correspondem uma fração mais baixa. Para o volume temos uma variação praticamente linear, sendo uma reta decrescente, a qual possui valor baixo de fração solar para pequeno volume de reservatório e conforme esse valor cresce maior a fração.

Gráfico de Efeito da Saída Para Cada Entrada

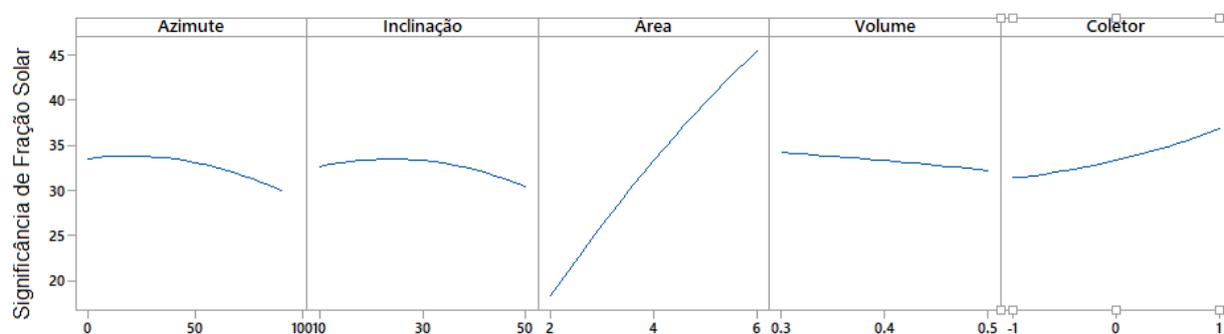


Figura 5: Gráfico de efeito da saída para cada entrada. Fonte: Autor.

5. Considerações Finais

Com a utilização do método de Box-Behnken, determinou-se a influência dos parâmetros de entrada na saída. Ao refinar o modelo aplicando uma confiabilidade de 95%, percebeu-se que muitas interações de segunda ordem entre os parâmetros escolhidos, podem ser descartadas dado que as mesmas não surtem efeitos consideráveis no valor de fração

solar. A interação área-coletor teve uma maior influência sendo seu valor em torno de 0,1% de desvio. A interação área-azimute resultou em um desvio baixo respeitando a regra imposta pelo modelo, fazendo da área um parâmetro a ser observado com mais cautela.

Nos resultados apresentados anteriormente, constatou-se a relação entre o parâmetro azimute-inclinação pelas curvas de interação entre os parâmetros. Pelo fato de que a inclinação e a azimute dependerem igualmente da posição solar, isto resulta em uma grande interação com a saída.

Percebe-se que a área do arranjo do coletor tem uma grande influência no valor de fração solar. Com o aumento de área, a quantidade de energia transmitida para água é muito maior. Os demais parâmetros de entrada não influenciam tão fortemente a saída. O coletor escolhido também influencia no valor de fração solar, mas de uma forma mais suave. O coletor da classificação A possui maior fração solar e conseqüentemente, o de classificação C as menores frações solares.

Para validar o modelo, foram utilizadas as curvas de resíduo. As quais indicaram que os experimentos realizados seguiram uma linha linear. Muitos dos pontos estavam sobre a linha, resultando em um desvio muito pequeno do valor especificado pelo modelo. Os demais seguiam a linha de tendência, porém com desvios um pouco mais expressivos, mas de pequena relevância. Com esta análise pode-se observar a presença de Outliers, que são resultados que diferem fortemente dos demais.

Outro fato a ser considerado é o baixo grau da equação que o programa imprime. Isso se dá pelos parâmetros terem uma fraca interação entre eles. Tal fato pode ser comprovado pelo gráfico de interações dado pela Figura 4, o qual temos apenas uma interação relevante entre o parâmetro azimute e inclinação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Laboratório de Vapor e Refrigeração (LAFRIG) e ao Laboratório Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos (LETA) por disponibilizarem o espaço e o software TRNSYS para a realização das simulações. O segundo autor agradece ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da UFRGS

REFERÊNCIAS

- Bendato, I., Cassettari, L., Mosca, M., & Mosca, R. (2015). A design of experiments/response surface methodology approach to study the economic sustainability of a 1 MWe photovoltaic plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1664–1679. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.074>
- Hannane, F., Elmoosaoui, H., Nguyen, T. V., Petit, P., Aillerie, M., & Charles, J. P. (2013). Forecasting the PV panel operating conditions using the design of experiments method. *Energy Procedia*, 36, 479–487. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.054>
- Mäkelä, M. (2017). Experimental design and response surface methodology in energy applications: A tutorial review. *Energy Conversion and Management*, 151(May), 630–640. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.021>
- Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments Eighth Edition*. Design. <https://doi.org/10.1198/tech.2006.s372>
- Umdu, E. S., Kahraman, İ., Yildirim, N., & Bilir, L. (2018). Optimization of microalgae panel bioreactor thermal transmission property for building façade applications. *Energy and Buildings*, 175, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.027>
- Vieira, L. W. (2017). *Modelo de previsão de penalização energética para sistemas de dessulfurização de gases de combustão de carvão mineral*. UFSC.

ANALYSIS OF PARAMETERS OF A WATER HEATING SYSTEM VIA BOX-BEHKEN

Abstract. *This paper aims to analyze the application of the Box-Behnken method, which determines the relationship between the input parameters and a desired output. For a water heating system from flat plate solar collectors, located in the city of Porto Alegre, the climate archive of this region was used. Defining a given study interval for each parameter, together with the MINITAB software can determine the values of each parameter for different experiments. The tests were performed using TRNSYS software, changing the azimuth, slope, area, tank volume and collector type values to obtain the desired output, in this case the solar fraction. After performing the experiments defined by the Box-Behnken method, we performed analysis of the data generated by the software. It was noticed that the area parameter has a significant influence on the solar fraction values. Analyzing the reliability interval of the model, it was found that many interactions between the parameters were outside the desired range. Another factor analyzed is the generated residual graph, which with its behavior ends up validating the resulting model, because the experiments follow a given trend line.*

Key words: *Solar Thermal Energy, Box-Behnken, Water heating systems.*