



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Priscilla Corrêa Bisognin

**Otimização da Troca Térmica em Trocadores de Calor de Leito Fluidizado para  
Utilização em Sistemas de Geração de Energia Solar Concentrada**

Florianópolis

2020

Priscilla Corrêa Bisognin

**Otimização da Troca Térmica em Trocadores de Calor de Leito Fluidizado para  
Utilização em Sistemas de Geração de Energia Solar Concentrada**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do título de doutora em  
Engenharia Química

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cíntia Soares

Coorientador: Prof. Dr. Jaci Carlo Schramm Câmara  
Bastos

Coorientador: Prof. Dr. Natan Padoin

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bisognin, Priscilla Corrêa

Otimização da troca térmica em trocadores de calor de leito fluidizado para utilização em sistemas de geração de energia solar concentrada / Priscilla Corrêa Bisognin ; orientadora, Cíntia Soares, coorientador, Natan Padoin, coorientador, Jaci Carlo Schramm Câmara Bastos, 2020.  
101 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Química. 2. Transferência de calor. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Metodologia de superfície de resposta . 5. Leito fluidizado. I. Soares, Cíntia. II. Padoin, Natan . III. Bastos, Jaci Carlo Schramm Câmara IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. V. Título.

Priscilla Corrêa Bisognin

**Otimização da Troca Térmica em Trocadores de Calor de Leito Fluidizado para  
Utilização em Sistemas de Geração de Energia Solar Concentrada**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Adriano da Silva  
UFSC/PósENQ

Prof. Dr. Rodrigo Koerich Decker  
FURB

Dr.<sup>a</sup> Karolline Ropelato  
ESSS

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de doutor em engenharia química.

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cíntia Soares  
Coordenadora do Programa

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cíntia Soares  
Orientadora

Florianópolis, 2020

Este trabalho é dedicado aos meus pais, meus colegas  
e aos meus professores.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Dr.<sup>a</sup> Cíntia Soares, pela paciência, dedicação, inspiração e acima de tudo por me ensinar o que é ciência.

Ao meu coorientador, Dr. Jaci Camara Bastos, pelos valiosos conselhos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Dr. Natan Padoin, pelo encorajamento constante e por nunca hesitar em compartilhar seu conhecimento.

Aos meus pais, pela confiança e carinho.

Ao meu noivo, Bruno Niero, e a todos os meus amigos por fazer os dias nublados mais claros, me dando forças para continuar.

Aos meus alunos da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, por me fazerem uma professora e uma pessoa melhor.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina pelos recursos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

*“O insucesso é apenas uma oportunidade  
para recomeçar com mais inteligência.”  
(Henry Ford)*

## RESUMO

Neste trabalho a metodologia de superfície de resposta foi utilizada para produzir um meta-modelo a ser utilizado na otimização da troca térmica em trocadores de calor de leito fluidizado, a serem inseridos em um sistema de geração de energia solar utilizando a tecnologia de energia solar concentrada. Os resultados para o desenvolvimento da superfície de resposta foram obtidos por meio de simulações computacionais baseadas na teoria cinética dos escoamentos granulares. Por se tratar de um fenômeno bastante complexo, no qual há influência de diversas variáveis, um estudo inicial de triagem de variáveis, realizado por meio de um planejamento experimental fatorial fracionário, foi feito. A partir deste foi determinado que o tamanho das partículas, distância e diâmetro dos tubos de transferência de calor são os fatores que mais influem nos mecanismos de troca térmica dentro do leito. Usando essas variáveis outros dois planejamentos experimentais foram propostos com o intuito de obter um ponto ótimo. O primeiro, um planejamento fatorial completo com quatro níveis, resultou em uma superfície de resposta na qual não havia um ponto de máximo, por este motivo um segundo planejamento experimental, do tipo central composto, foi selecionado em uma região de busca diferente. Pela análise dos resultados obtidos com ambos os planejamentos conclui-se que um ponto de máximo para o coeficiente de transferência de calor é obtido quando se tem um tamanho de partícula de 0,2 mm, diâmetro de tubos de 35,13 mm e distância entre os tubos de 6,2 cm. Na sequência o calor trocado entre os tubos e o leito foi otimizado utilizando dois novos planejamentos experimentais centrais compostos. Nesse caso o valor ótimo foi obtido quando o diâmetro dos tubos é de 36,75 mm e a distância entre estes é de 6,91 cm.

**Palavras-chave:** Metodologia de superfície de resposta. Leitos fluidizados. Transferência de calor. Fluidodinâmica computacional.

## ABSTRACT

In this thesis, the response surface methodology was used to produce a meta-model applied to the optimization of heat exchange in fluidized bed heat exchangers used in power generation systems through the concentrated solar energy technology. The results for the development of the response surface were obtained from computational simulations based on the kinetic theory of granular flows. Since this is a fairly complex system, in which there is the influence of several variables, an initial study of variable screening, carried out through a fractional factorial experimental design was made. Then it was found that the size of the particles, as well as the distance and the diameter of the heat transfer tubes, are the factors that most influence the mechanisms of heat exchange within the bed. Using these variables, two other experimental designs were proposed in order to obtain an optimal point. The first one, complete factorial design with four levels, resulted in a response surface in which there was no point of maximum, thus a second experimental design, based on the central composite scheme, was selected in a different search region. When analyzing the results obtained with both designs, it is possible to conclude that a point of maximum for the heat transfer coefficient is obtained for the particle size of 200  $\mu\text{m}$ , the diameter of tubes of 35.13 mm and the distance between the tubes of 6.2 cm. Thereafter the amount of heat exchanged between the tubes and the bed was optimized using two new composite central experimental designs. In this case, the optimal value was obtained when the diameter of the tubes is 36.75 mm and the distance between them is 6.91 cm.

**Keywords:** Response surface methodology. Fluidized beds. Heat Transfer. Computational fluid dynamics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tendência dos preços do petróleo entre 1861 e 2011. . . . .	19
Figura 2 – Utilização mundial de fontes de energia entre 1991 e 2016. . . . .	20
Figura 3 – Sistema de geração de energia solar com partículas sólidas. . . . .	23
Figura 4 – Ciclo de Rankine em sistema de energia solar concentrada. . . . .	24
Figura 5 – Sistema de concentração de energia solar com leito fluidizado. . . . .	24
Figura 6 – Trocador de calor em sistema para geração de energia solar. . . . .	25
Figura 7 – Trocador de calor de leito fluidizado: a) evaporação e b) superaquecimento. . . . .	25
Figura 8 – Trocador de calor de leito fluidizado: a) evaporação e b) superaquecimento. . . . .	27
Figura 9 – Exemplo de Rede Neural. . . . .	38
Figura 10 – Geometria usada na validação do modelo computacional bidimensional. . . . .	45
Figura 11 – Malha computacional. . . . .	46
Figura 12 – Geometrias utilizadas na triagem de fatores. . . . .	49
Figura 13 – Geometrias limites do planejamento central composto. . . . .	51
Figura 14 – Geometrias usadas no primeiro planejamento composto central para otimização da troca térmica. . . . .	53
Figura 15 – Geometrias usadas no segundo planejamento composto central para otimização da troca térmica. . . . .	54
Figura 16 – Arquitetura da rede neural. . . . .	55
Figura 17 – Velocidade do ar em 5 s de simulação. . . . .	61
Figura 18 – Fração volumétrica dos sólidos em 5 s de simulação. . . . .	62
Figura 19 – Arranjo triangular dos tubos. . . . .	63
Figura 20 – Gráfico de Pareto para a triagem de fatores. . . . .	64
Figura 21 – Gráfico de Pareto para triagem de fatores excluindo a velocidade . . . . .	65
Figura 22 – Principais efeitos na variável resposta. . . . .	70
Figura 23 – Estagnação de partículas no topo de tubos com elevado diâmetro. . . . .	71
Figura 24 – Gráfico de Pareto dos coeficientes do modelo. . . . .	72
Figura 25 – Gráfico dos resíduos versus valores ajustados. . . . .	74
Figura 26 – Gráfico Q-Q para modelo quadrático gerado a partir de planejamento experimental completo . . . . .	75
Figura 27 – Superfícies de resposta geradas com planejamento completo. . . . .	77
Figura 28 – Gráfico de contorno para $D_p=-1$ . . . . .	78
Figura 29 – Gráfico de contorno para $D_p=0$ . . . . .	78
Figura 30 – Gráfico de Pareto para os termos do modelo quadrático gerado com o planejamento experimental central composto. . . . .	81

Figura 31 – Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo gerado com planejamento experimental central composto. . . . .	82
Figura 32 – Gráfico Q-Q para o modelo gerado com planejamento experimental central composto. . . . .	83
Figura 33 – Gráfico de contorno para o modelo gerado com planejamento experimental central composto. . . . .	84
Figura 34 – Superfície de resposta gerada com o meta-modelo obtido a partir dos dados do primeiro planejamento usado na otimização da troca térmica. . . . .	86
Figura 35 – Gráfico de contornos gerado com o meta-modelo obtido a partir dos dados do primeiro planejamento usado na otimização da troca térmica.	86
Figura 36 – Gráfico de superfície gerado com o meta-modelo obtido a partir dos dados do segundo planejamento usado na otimização da troca térmica.	87
Figura 37 – Gráfico de contornos gerado com o meta-modelo obtido a partir dos dados do segundo planejamento usado na otimização da troca térmica.	88
Figura 38 – Gráficos de regressão para a rede neural. . . . .	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do material granular usado na etapa de validação.....	45
Tabela 2 – Níveis referentes ao primeiro planejamento experimental da otimização da troca térmica.....	52
Tabela 3 – Níveis referentes ao segundo planejamento experimental da otimização da troca térmica.....	52
Tabela 4 – Espaçamento das células.....	57
Tabela 5 – Queda de pressão para diferentes malhas numéricas .....	57
Tabela 6 – Resultados do estudo de convergência de malha .....	58
Tabela 7 – Queda de pressão média para diferentes malhas .....	58
Tabela 8 – Índices de convergência de malha calculados com a queda de pressão média .....	58
Tabela 9 – Valores médios do coeficiente de transferência de calor calculados com diferentes malhas .....	59
Tabela 10 – Erros relativos entre coeficiente de transferência de calor médio para diferentes malhas .....	59
Tabela 11 – Fatores e seus níveis utilizados no estudo de triagem de fatores .....	62
Tabela 12 – Resultados do planejamento experimental para triagem de fatores.....	63
Tabela 13 – Coeficientes do modelo com todos os fatores e interações, exceto K:Dt .....	64
Tabela 14 – Coeficientes de um modelo que exclui a velocidade do gás .....	66
Tabela 15 – Comparação dos coeficientes de determinação de diferentes modelos.....	66
Tabela 16 – Coeficientes do modelo 3 que exclui a condutividade e velocidade do gás .....	67
Tabela 17 – Níveis dos fatores utilizados na otimização por superfície de resposta.....	67
Tabela 18 – Resultados do planejamento fatorial completo .....	67
Tabela 19 – Coeficientes de um modelo quadrático para geração de superfície de resposta .....	73
Tabela 20 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento experimental central composto.....	80
Tabela 21 – Resultados do planejamento experimental central composto .....	80
Tabela 22 – Coeficientes de um modelo quadrático para geração de superfície de resposta na segunda região de busca .....	80
Tabela 23 – Fluxo de calor médio com diferentes tempos de simulação .....	84
Tabela 24 – Resultados do primeiro planejamento experimental usado na otimização da troca térmica. ....	85
Tabela 25 – Resultados do segundo planejamento experimental usado na otimização da troca térmica. ....	87

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{exata}$	Solução exata
$f(h)$	Solução numérica aproximada
$E$	Erro
$\rho$	Ordem de convergência
$r$	Razão de refino
$ICM$	Índice de convergência da malha
$F_s$	Fator de segurança
$\varepsilon$	Fração volumétrica
$\rho$	Massa específica ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$t$	Tempo (s)
$v$	Velocidade ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$P$	Pressão ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )
$P_s$	Pressão da fase sólida ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$\mu$	Viscosidade dinâmica ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$\xi$	Viscosidade global ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$H$	entalpia ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
$\kappa$	Condutividade térmica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$e$	Coefficiente de restituição
$g_0$	Função distribuição radial.
$\Theta$	Temperatura granular da fase sólida ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ )
$\theta$	Ângulo interno de fricção
$C_D$	Coefficiente de arraste
$Re$	Número de Reynolds
$\beta$	Coefficiente interfase de arraste ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$D_p$	Diâmetro da partícula (m)
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$h$	Coefficiente de transferência de calor ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$D_t$	Diâmetro dos tubos (mm)
$Dist$	Distância entre os tubos (cm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	DIVISÃO DO TRABALHO	17
1.2	OBJETIVOS	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
2.1	ENERGIA SOLAR CONCENTRADA	19
2.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS FLUIDIZADOS	26
<b>2.2.1</b>	<b>A Fluidização</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Efeito de superfícies submersas no comportamento do leito</b>	<b>28</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Transferência de calor em leitos fluidizados</b>	<b>28</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Transferência de calor em leitos fluidizados com superfícies submersas</b>	<b>30</b>
2.3	ESTUDOS DE OTIMIZAÇÃO COM O USO COMBINADO DE TÉCNICAS DE CFD E RSM	31
2.4	TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA - FUNDAMENTOS	33
<b>2.4.1</b>	<b>Análise Tradicional da Convergência de Erros</b>	<b>34</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Intervalo Assintótico de Convergência</b>	<b>34</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Extrapolção de Richardson</b>	<b>35</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Índice de Convergência de Malha</b>	<b>36</b>
2.5	REDES NEURAIS	37
2.6	ALGORITMOS GENÉTICOS	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
3.1	MODELO COMPUTACIONAL	40
3.2	VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	44
3.3	SELEÇÃO DOS FATORES QUE MAIS INFLUENCIAM O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	47
3.4	OTIMIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	48
3.5	OTIMIZAÇÃO DA TROCA TÉRMICA ENTRE OS TUBOS SUBMERSOS E O LEITO	50
3.6	GERAÇÃO DE UM META-MODELO UTILIZANDO REDES NEURAIS E OTIMIZAÇÃO COM ALGORITMOS GENÉTICOS	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>57</b>
4.1	RESULTADOS DO TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA	57
<b>4.1.1</b>	<b>Validação do Modelo Computacional</b>	<b>59</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Fluidodinâmica</b>	<b>60</b>
4.2	RESULTADOS DO ESTUDO DE TRIAGEM DE FATORES	60

4.3	OTIMIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA UTILIZANDO A METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA . . . . .	67
4.3.1	<b>Adequação do modelo usado na metodologia de superfície de resposta . . . . .</b>	<b>74</b>
4.3.2	<b>Utilização da metodologia de superfície de resposta para otimização de um trocador de calor de leite fluidizado . . . . .</b>	<b>76</b>
4.3.3	<b>Otimização da troca térmica entre os tubos submersos e o leite .</b>	<b>83</b>
4.4	GERAÇÃO DE UM META-MODELO UTILIZANDO REDES NEURAIS E OTIMIZAÇÃO COM ALGORITMOS GENÉTICOS . . . . .	88
5	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a previsão de escassez de fontes combustíveis fósseis nos próximos anos, há uma crescente preocupação em atender a demanda energética mundial utilizando fontes renováveis. Além disso, nas últimas décadas, uma progressiva preocupação ambiental vem margeando as discussões sobre energia. O iminente esgotamento de fontes fósseis, aliado ao agressivo custo ambiental provocado por estas, têm colocado destaque sobre fontes de energia renováveis, dentre as quais está incluída a energia solar. Apesar de ser uma fonte de calor que não apresenta custos, a sua conversão em energia elétrica depende de um desenvolvimento tecnológico que ainda se encontra em uma etapa incipiente.

Uma das formas mais usadas de aproveitamento de energia solar é o uso de raios solares concentrados como fonte de aquecimento de um fluido, que será usado para a geração de vapor em ciclos termodinâmicos. Uma limitação atual neste processo está justamente nos fluidos que são utilizados, principalmente sais fundidos, que não atingem temperaturas tão altas, e podem ocasionar problemas operacionais caso sua temperatura caia a valores inferiores a temperatura de fusão. Uma recente alternativa para este tipo de substância são os materiais particulados, que se comportam de forma semelhante a um fluido, quando estão fluidizados, e apresentam ótimas taxas de absorção de calor devido a sua elevada área superficial. A utilização de partículas para a geração de vapor deve ocorrer em trocadores de calor de leito fluidizado. Sabe-se que estes equipamentos apresentam altas taxas de transferência de energia, porém a complexidade dos fenômenos fluidodinâmicos que os compõem é tanta, que é preciso uma série de diferentes modelos fenomenológicos e empíricos para representar seu comportamento. Desta forma a otimização do coeficiente de troca térmica entre o leito e os tubos, pelos quais passa o vapor d'água, se torna uma tarefa desafiadora, visto a quantidade de variáveis que podem alterar este coeficiente, sejam elas propriedades das substâncias utilizadas, variáveis operacionais ou variáveis do projeto geométrico.

Com base no exposto, o intuito desta tese é utilizar diferentes ferramentas para lidar com este processo de otimização da troca térmica entre leito e tubos. Inicialmente, a troca de calor em leitos fluidizados é descrita por um modelo computacional, concebido utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional. Este modelo, após devidamente validado, será usado para a realização de uma triagem de fatores, ou seja, a verificação de quais fatores têm significância estatística dentro dos intervalos considerados. O objetivo deste estudo, a otimização da troca térmica, será feita com a utilização da metodologia de superfície de resposta, utilizando simulações computacionais como ensaios de planejamentos experimentais. Inicialmente o trabalho foca no coeficiente de transferência de calor, que é o parâmetro mais estudado quando se trata de transferência de calor em leitos fluidizados. Na sequência, o trabalho estuda a troca

térmica entre os tubos e o leite, afinal, em termos práticos, é mais importante para o projetista analisar o calor total trocado dentro do equipamento a fim de aperfeiçoar o processo em projeto.

## 1.1 DIVISÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo traz uma revisão bibliográfica, mostrando trabalhos de diferentes áreas que podem interessar ao leitor que queira entender as bases deste estudo. Inicialmente é mostrado um panorama geral do cenário energético mundial, a fim de contextualizar o leitor na relevância de estudos para o desenvolvimento da energia solar. Em seguida, são mostrados estudos relatando sistemas de energia solar concentrada e sobre a utilização de partículas sólidas nestes sistema. Dessa forma, é introduzido o principal objeto de estudo, o trocador de calor de leite fluidizado utilizado em sistemas de geração de energia solar concentrada. Para que o leitor compreenda melhor sobre o fenômeno da fluidização, foram apresentados estudos importantes nesta área, assim como no desenvolvimento computacional deste campo. A utilização da metodologia de superfície de resposta em estudos computacionais é bastante recente, por isso, uma seção mostrando outros exemplos dessa utilização foi incluída. Na sequência é mostrado o desenvolvimento de uma metodologia usada em uma etapa importante da validação do modelo computacional, o teste de independência de malha, para que o leitor conheça seus fundamentos. Por fim, foram revisados alguns conceitos envolvendo redes neurais e algoritmos genéticos, ferramentas utilizadas para geração de um meta-modelo e otimização, respectivamente.

O segundo capítulo mostra todas as etapas usadas no desenvolvimento deste trabalho, desde a obtenção do modelo computacional, escolha das variáveis testadas para a otimização até o desenvolvimento dos planejamentos experimentais usados para a geração das duas superfícies de respostas utilizadas nos processos de otimização, tanto do coeficiente de transferência de calor quanto da troca térmica entre tubos e leitos. Também são mostradas as etapas utilizadas para a geração de um meta-modelo por redes neurais, e os parâmetros usados em um algoritmo genético usado na otimização do coeficiente de transferência de calor.

Os resultados obtidos com a metodologia apresentada no segundo capítulo foram expostos e avaliados no terceiro capítulo. Neste constam todos os resultados, desde aqueles usados na validação do modelo computacional até aqueles empregados na obtenção de um ponto de ótimo para o projeto de um trocador de calor de leite fluidizado. Também foram mostrados os resultados obtidos com a metodologia de otimização proposta, que combina redes neurais e algoritmos genéticos. Estes foram então comparados com os resultados obtidos pela metodologia de superfície de resposta.

Na sequência, o capítulo de conclusão mostra as considerações que podem ser feitas comparando-se os resultados obtidos com os objetivos deste trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho apresenta como principal objetivo a otimização da troca térmica em leitos fluidizados usados em sistemas de geração de energia solar concentrada.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

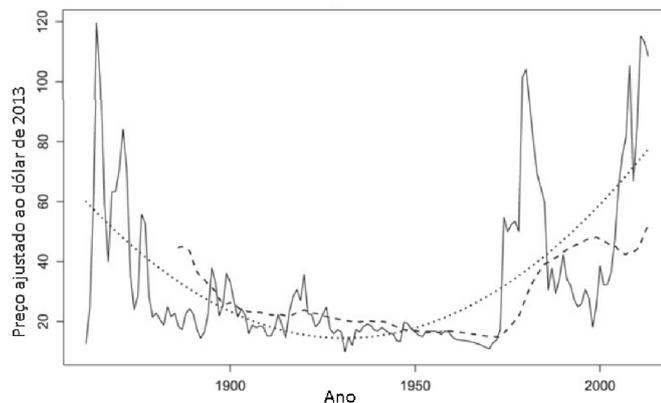
- avaliar quais fatores apresentam significância estatística sobre o coeficiente de transferência de calor, dentro dos intervalos determinados;
- aplicar a metodologia de superfície de resposta para obtenção de valores dos fatores escolhidos que otimizem o coeficiente de transferência de calor;
- aplicar a metodologia da superfície de resposta para otimizar a troca térmica entre tubos submersos e o leito;
- efetuar a otimização do coeficiente de troca térmica utilizando algoritmos genéticos aplicados a um meta-modelo gerado por meio de redes neurais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ENERGIA SOLAR CONCENTRADA

Desde a revolução industrial, a energia elétrica ganhou um papel de suma importância na matriz econômica de um país, de maneira que a falta de fontes energéticas, ou a má distribuição destas, pode até mesmo barrar o avanço econômico e tecnológico de uma nação. Ao final da revolução industrial houve uma queda nos preços do petróleo e do gás natural, o que possibilitou a muitas nações fundar sua matriz energética com base nessas fontes. Após a década de 1930, um aumento crescente nos preços desses bens passou a ser observado, de forma que a preocupação em obter energia a partir de outras fontes também se tornou um fenômeno crescente. Haugom, Mydland e Pichler (2016) ajustaram um modelo quadrático para os preços do petróleo entre os anos de 1861 e 2013, como mostra a linha pontilhada presente na Figura 1. Tanto a observação dos preços reais (mostrados pela linha sólida na Figura 1) quanto a análise do modelo quadrático ajustado (linha pontilhada), mostram uma tendência inicial de queda dos preços, seguido por um aumento a partir da década de 1930.

Figura 1 – Tendência dos preços do petróleo entre 1861 e 2011.



Fonte: adaptado de Haugom, Mydland e Pichler (2016)

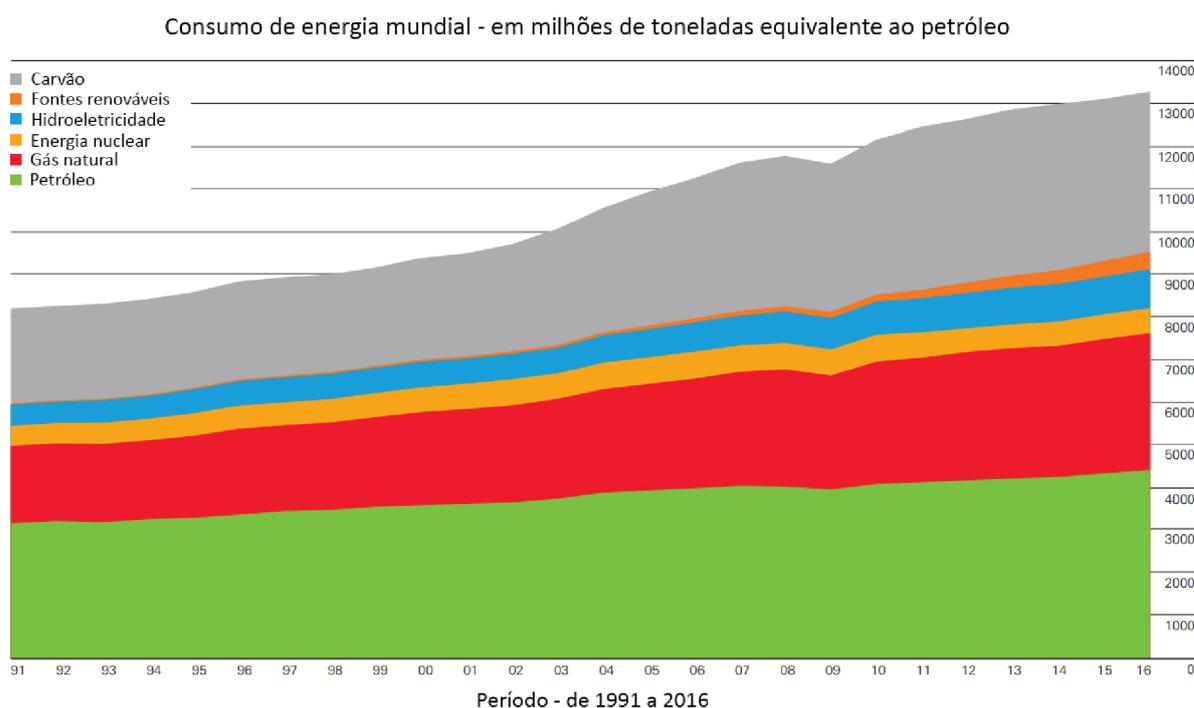
Na Figura 1 é possível observar na linha sólida que por volta da década de 1970 houve um grande salto nos preços do petróleo. Nessa época também começaram a surgir movimentos ambientais, de forma que a junção destes dois fatores fez com que uma busca ativa por fontes de energia mais baratas e ambientalmente apropriadas se instaurasse em diversos países.

Dentro deste panorama surgiu o conceito de energias renováveis, definidas por Twidell e Weir (1986) como sendo uma energia obtida de correntes de energia contínuas ou repetitivas no ambiente natural. Outra definição abrangente para o termo energias renováveis foi dada por Sorensen (2000), que as caracteriza como fluxos de energia que podem ser repostos na mesma taxa em que são usados.

Passadas quase cinco décadas desde que fontes renováveis de energia come-

çaram a ser buscadas, as fontes fósseis continuam a ter uma participação proeminente na geração de energia no mundo, como mostra a Figura 2, elaborada pela *British Petroleum* (empresa multinacional do ramo energético), na qual consta o consumo de energia advinda de diferentes fontes para 67 países. Esta mostra a clara predominância de fontes não-renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão. Além disso, ainda pode-se observar que às fontes renováveis ainda são reservadas as menores parcelas de utilização dentro da matriz energética mundial.

Figura 2 – Utilização mundial de fontes de energia entre 1991 e 2016.



Fonte: *British Petroleum* BP (2017)

Um das formas de energia renovável com maior disponibilidade é a energia solar. Há diferentes formas de aproveitamento da radiação solar, como a absorção da radiação para aquecimento de água e a utilização de lagoas solares, constituídas de reservatórios de água salina, nos quais a salinidade da porção inferior aumenta a densidade da água, impedindo a convecção natural de forma a "armazenar" calor na forma de água aquecida na porção inferior do reservatório (GANGULY; DATE; AK-BARZADEH, 2017). Além dessas utilizações de energia solar em baixas temperaturas, é possível converter a radiação solar diretamente em eletricidade com a utilização de células fotovoltaicas. Todas essas formas de aproveitamento da energia solar são mais indicadas para escalas menores, como uso doméstico, por demandarem grandes áreas a fim de ampliar a quantidade de radiação absorvida.

Além de aplicações a baixas temperaturas (inferiores a 100 °C), também é possível trabalhar com temperaturas maiores em sistemas que concentram os raios solares para gerar a chamada energia solar concentrada (CSP - Concentrated Solar Power). De forma geral, é possível descrever a energia solar concentrada como uma série

de classes de sistemas que concentram os raios solares para a geração de energia térmica a altas temperaturas com a finalidade de geração de eletricidade (GAUCHE *et al.*, 2017). Há várias formas de se trabalhar com energia solar concentrada, sendo uma das mais tradicionais os sistemas de torre de energia, que podem ser resumidos como sistemas compostos por um campo de heliostatos (espelhos com posições ajustáveis) que refletem a radiação solar para o topo de uma torre, na qual há um fluido de transferência de calor, que será posteriormente usado para a geração de vapor que irá expandir em uma turbina acoplada a um gerador elétrico (TAGGART, 2008).

Apesar de possuir um grande potencial, o fato da energia solar concentrada ainda estar em estado inicial em termos de estudos, faz com que esta ainda seja bem menos utilizada do que a energia solar fotovoltaica. No final de 2015, a capacidade instalada mundial para a energia solar concentrada estava em quase 4800 MW. Este número ainda é bastante tímido quando comparado com a capacidade instalada para a energia solar fotovoltaica: 227 GW no mesmo período (REN21, 2016).

Um dos fatores cruciais em um sistema que trabalha com energia solar concentrada é o fluido de troca de calor. Três características são desejadas para este tipo de fluido: operar com estabilidade térmica em uma grande extensão de temperaturas, de forma a aumentar a eficiência do ciclo termodinâmico, possuir propriedades que facilitem a transferência de calor e ser seguro para a saúde e meio ambiente, além de não apresentar potencial corrosivo (BENOIT *et al.*, 2016). Os fluidos de transferência de calor mais comuns ainda são os sais fundidos e óleos. Porém outros fluidos, como metais líquidos, água supercrítica e gases pressurizados já tiveram suas propriedades investigadas para este propósito (VIGNARROBAN *et al.*, 2015; PEIRO *et al.*, 2017; PARRADO *et al.*, 2016), sendo que os sais fundidos ainda apresentam a vantagem de poder operar a temperaturas próximas de 800 °C (VIGNARROBAN *et al.*, 2015).

Além da escolha do fluido de transferência de calor, a seleção do modelo de trocador de calor, que será usado na geração de vapor, também apresenta uma função importante dentro de um projeto de sistema de energia solar concentrada com torre central. Os trocadores de calor do tipo casco e tubo ainda são os mais econômicos para esta aplicação. Porém trocadores de calor de placas também têm surgido como candidatos para utilização neste tipo de sistema (PEIRO *et al.*, 2017).

Apesar de apresentarem inúmeras vantagens, como baixo custo, ausência de toxicidade e alta capacidade de retenção de energia, o uso de sais fundidos em sistemas de energia solar concentrada apresentam um grande risco: caso a temperatura do sistema caia a um ponto inferior à temperatura de fusão do sal ocorre a solidificação deste material, o que pode causar danos graves à toda estrutura do sistema (SNIDERMAN, 2012). Além disso, a utilização de sais fundidos impõe uma restrição de temperatura que, apesar de ser superior a outros fluidos de troca térmica, ainda não representa a máxima temperatura que pode ser obtida com a absorção de radiação

solar. No fim da década de 70, Hunt (1979) propôs a utilização de partículas sólidas com a finalidade de absorver a radiação solar. De acordo com o autor, a grande área superficial ocasionada pela granulometria das partículas gera alta transferência de calor entre estas e um gás que deve ser aquecido e expandido em uma turbina para geração de energia mecânica e, em seguida, elétrica (HUNT, 1979). Este sistema, proposto pelo autor citado, possuía a vantagem de utilização do ciclo termodinâmico de Brayton, que descarta a etapa de resfriamento de água, reduzindo custos ambientais.

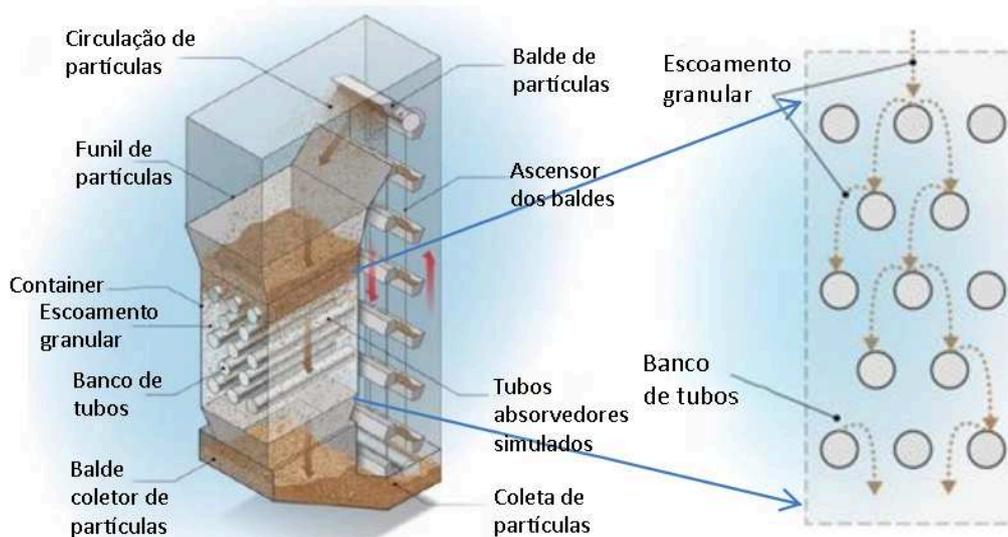
Apesar do grande potencial ambiental que sistemas de energia solar concentrada carregam, o fato desta tecnologia ainda não estar completamente desenvolvida impede que seja economicamente competitiva, quando comparada com outras formas de geração de energia. Uma das formas de limitar os altos custos dessa tecnologia está na utilização de ciclos termodinâmicos mais eficientes para maior conversão de energia solar em energia elétrica - o que inerentemente exige maiores temperaturas e a utilização de materiais mais baratos como meios de troca térmica. Ambos os requisitos são satisfeitos com a utilização de partículas sólidas (MA; MEHOS *et al.*, 2015). Este tipo de sistema, proposto por diversos autores (MA; MEHOS *et al.*, 2015; SAKADJIAN *et al.*, 2015; SIEGEL; KOLB, 2008; CHRISTIAN; HO, 2014, 2015; WANG, F. *et al.*, 2016; XIAO *et al.*, 2014), valeria-se das propriedades das partículas sólidas para utilização de um outro trocador de calor com reconhecida eficiência: o trocador de calor de leito fluidizado, cujas propriedades de mistura resultam em altas taxas de transporte de calor e de massa.

Existem diferentes designs de trocadores de calor que podem ser utilizados em um sistema de geração de energia solar com partículas sólidas como meio de transferência de calor. Esses trocadores de calor utilizam as partículas sólidas aquecidas por radiação solar em receptores. Esses receptores são equipamentos localizados sobre torres, centralizadas em campos de espelhos e que direcionam os raios solares para esse receptor, aquecendo essas partículas a altas temperaturas. Autores afirmam que essas temperaturas podem chegar de 700 °C a 1000 °C (FLAMANT *et al.*, 2013; MEIER, 1999; FLAMANT, 1982; KOLB; DIVER; SIEGEL, 2007; DIVER; SIEGEL, 2006; KIM, K. *et al.*, 2009; SAKADJIAN *et al.*, 2015; SIEGEL; GROSS *et al.*, 2014).

Um dos designs mais simples para o sistema de geração de energia solar com partículas sólidas é um sistema fechado e acoplado, onde as partículas passam do receptor no topo para o sistema de troca térmica por ação da gravidade. Desta forma, as partículas quentes escoam diretamente sobre tubos, aquecendo o fluido de trabalho no interior dos tubos. Um esquema desse sistema está apresentado na Figura 3.

É comum separar o trocador de calor em diferentes seções: a de preaquecimento, a de ebulição e a de superaquecimento. Uma forma de realizar o superaquecimento do fluido de trabalho da turbina utilizando essas três seções seria ter a seção de superaquecimento no topo, onde são despejadas as partículas quentes que esta-

Figura 3 – Sistema de geração de energia solar com partículas sólidas.



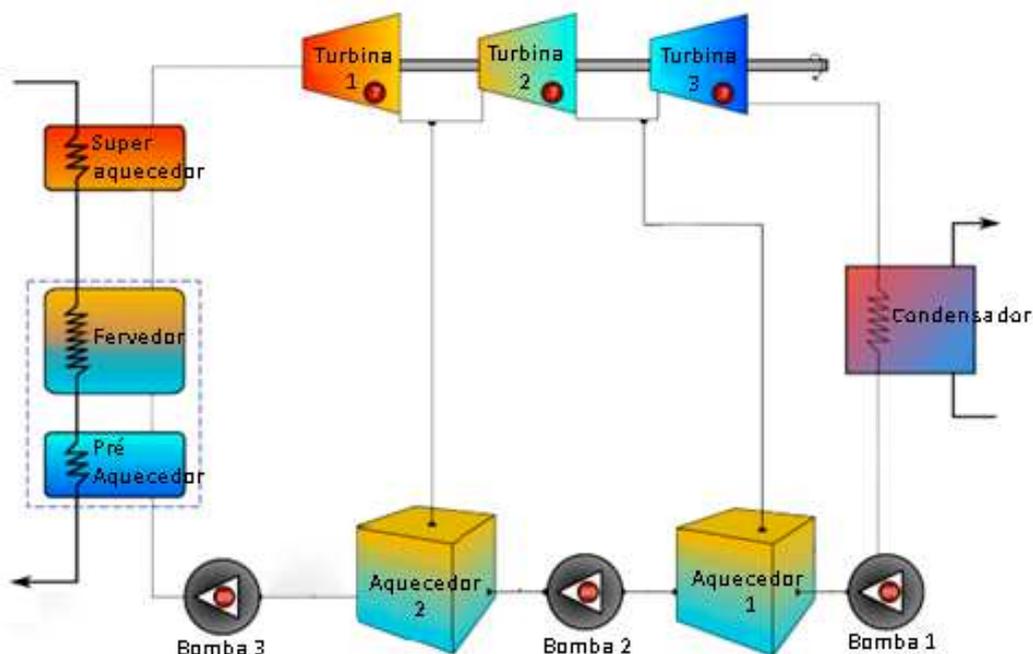
Fonte: adaptado de Martinek e Ma (2015).

vam armazenadas no silo quente, enquanto que o fluido de trabalho entra na base, criando um sistema contracorrente. Desta forma, as partículas mais quentes da seção de superaquecimento entram em contato com o fluido já aquecido, fazendo com que este alcance altas temperaturas. Na base, o fluido frio seria previamente aquecido por partículas com temperaturas menores, que já realizaram trocas térmicas nas seções de ebulição e superaquecimento. A Figura 4 mostra uma configuração de um ciclo de Rankine utilizado para a geração de energia com um fluido superaquecido. A seção à esquerda dessa figura mostra como se dá esse processo de superaquecimento em três seções (preaquecimento, ebulição e superaquecimento). Um sistema similar é encontrado no trabalho de Ma, Glatzmaier e Mehos (2014), porém, as seções encontram-se em posições opostas, sendo que a seção de superaquecimento está na base, enquanto que a seção de pré-aquecimento está no topo, como mostra a Figura 5. Mas, assim como o sistema anterior, o fluido de trabalho frio entra na seção de preaquecimento, enquanto que as partículas quentes entram pela base, na seção de superaquecimento.

Uma configuração composta por apenas uma seção de aquecimento é apresentada por Ho (2016), cujo sistema possui o receptor de energia solar sobre a seção de aquecimento, de forma que as partículas se deslocam pela ação da gravidade do receptor para a seção de troca térmica com o fluido de trabalho, conforme a Figura 6.

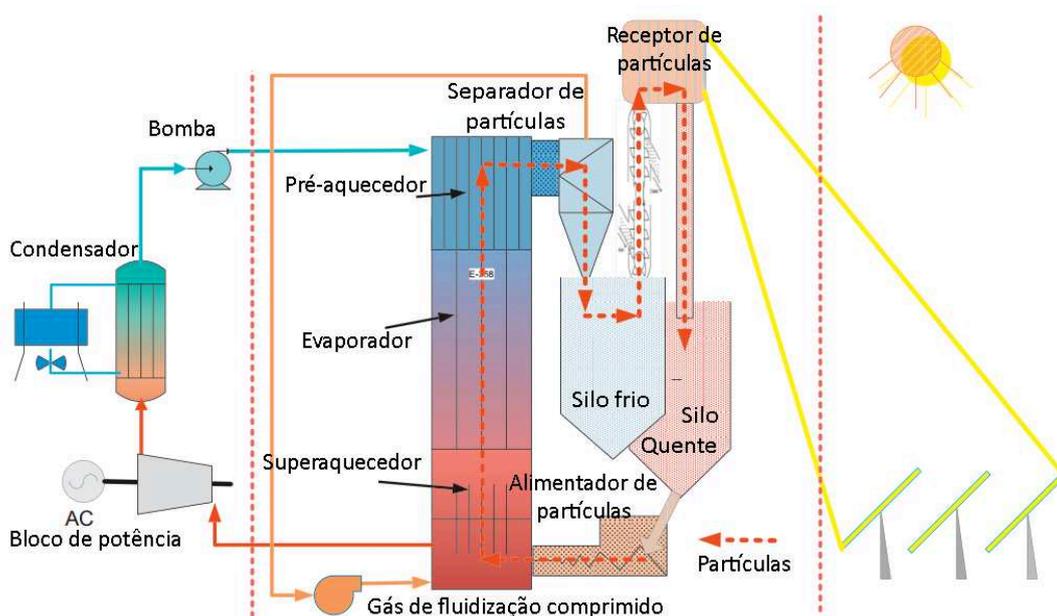
Além da configuração das seções de troca térmica em série, há também a possibilidade de conectá-las em paralelo, como feito por Schwaiger *et al.* (2015). Essa configuração conta apenas com duas seções, a de evaporação e a de superaquecimento. Ambas as seções (compostas por trocadores de calor pressurizados) são alimentadas com partículas vindas diretamente do silo quente, ou seja, com partículas

Figura 4 – Ciclo de Rankine em sistema de energia solar concentrada.



Fonte: adaptado de Wagner (2008).

Figura 5 – Sistema de concentração de energia solar com leito fluidizado.

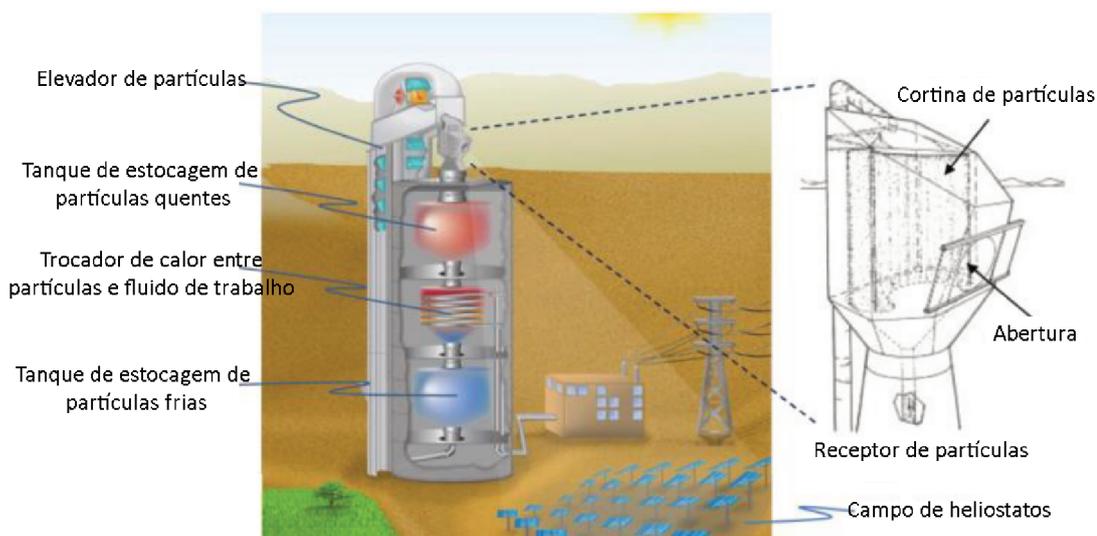


Fonte: adaptado de Ma, Glatzmaier e Mehos (2014).

a mesma temperatura. As partículas quentes elevam a temperatura do fluido de trabalho à temperatura de saturação. Em seguida, o vapor em temperatura de saturação passa para a seção de superaquecimento para troca térmica adicional. Essas seções são mostradas na Figura 7.

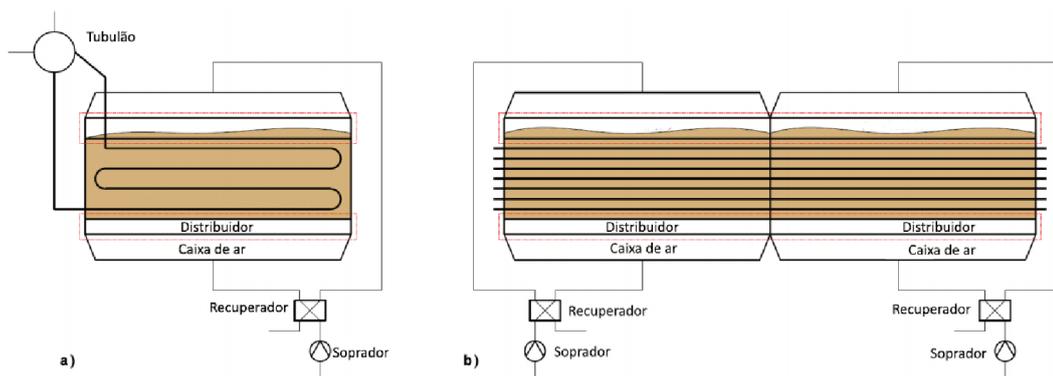
De forma geral, sabe-se que coeficientes de transferência de calor em leitos fluidizados densos, como leitos borbulhantes, tendem a ser maiores do que leitos fluidi-

Figura 6 – Trocador de calor em sistema para geração de energia solar.



Fonte: adaptado de Ho *et al.* (2014).

Figura 7 – Trocador de calor de leito fluidizado: a) evaporação e b) superaquecimento.



Fonte: adaptado de Schwaiger *et al.* (2015).

zados circulantes, como mostra Abdelmotalib (2015), que comparou os coeficientes de transferência de calor obtidos por vários autores para leitos fluidizados para combustão. Por isso, sugere-se a utilização de leitos densos para o propósito de aquecimento de um fluido de trabalho de um ciclo termodinâmico para a geração de energia.

Em relação as partículas utilizadas, muitos autores utilizam areia (AL-ANSARY *et al.*, 2012; FLAMANT *et al.*, 2013) e, de forma geral, os tamanhos de partículas utilizados ficam em níveis de grandeza entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$  m. Como apontado por Baumann e Zunft (2015) e Ho (2016), a areia é um material barato que apresenta características satisfatórias para a aplicação em processos de concentração de energia solar. Desta forma, sugere-se a utilização deste material para este processo de geração de energia.

## 2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS FLUIDIZADOS

A utilização de partículas como meio de transferência de calor em um sistema de energia solar concentrada exige uma escolha apropriada do trocador de calor que seja beneficiada pelas propriedades do sistema particulado. Um trocador de calor de leito fluidizado surge como a opção mais óbvia e viável para tratar com a troca de calor entre partículas e um fluido de trabalho. Dentro de um sistema de energia solar concentrada, o trocador de calor de leito fluidizado é instalado após o silo de armazenamento das partículas quentes, inserido no sistema para equalizar os tempos de residência das partículas no receptor de partículas e no trocador de calor. Ao sair deste silo, as partículas são introduzidas no trocador de calor de leito fluidizado juntamente com um gás de fluidização. Uma série de tubos, dentro dos quais passa o fluido de trabalho da turbina, estão dispostos no trocador de calor, de forma que as partículas quentes irão causar o superaquecimento deste fluido até atingir a temperatura necessária, de acordo com o ciclo termodinâmico escolhido para gerar eletricidade.

Analisando este processo é perceptível que a troca de calor entre as partículas sólidas e o fluido de trabalho da turbina é um dos processos mais elementares dentro deste sistema. Caso essa troca de calor não seja feita da melhor forma possível, a radiação solar absorvida pelas partículas, quando estas se encontram no receptor, será desperdiçada. Além disso, é inevitável que haja perda de calor dentro do silo de armazenamento das partículas quentes, de forma que é preciso aproveitar de melhor forma possível a temperatura de entrada das partículas no leito fluidizado. Para tornar esta troca térmica eficaz é preciso entender o comportamento dos fenômenos de transferência de energia entre um leito e superfícies submersa, pois os tubos contendo o fluido de trabalho da turbina podem ser representados como superfícies inseridas no leito.

### 2.2.1 A Fluidização

Quando um leito encontra-se empacotado com partículas sólidas, estas oferecem resistência à passagem de um gás. À medida que a velocidade deste gás aumenta, a força de arrasto cresce e torna-se capaz de suportar o peso das partículas. Quando isso ocorre a queda de pressão do leito torna-se proporcional ao peso das partículas, dando origem à chamada fluidização incipiente. Com o aumento da velocidade do fluido o leito é expandido e o sistema fluido/partículas passa a se comportar como um fluido, em um fenômeno chamado de fluidização. A expansão de um leito fixo em um leito fluidizado é facilitada pela vibração do leito (BOTTERILL, 1975).

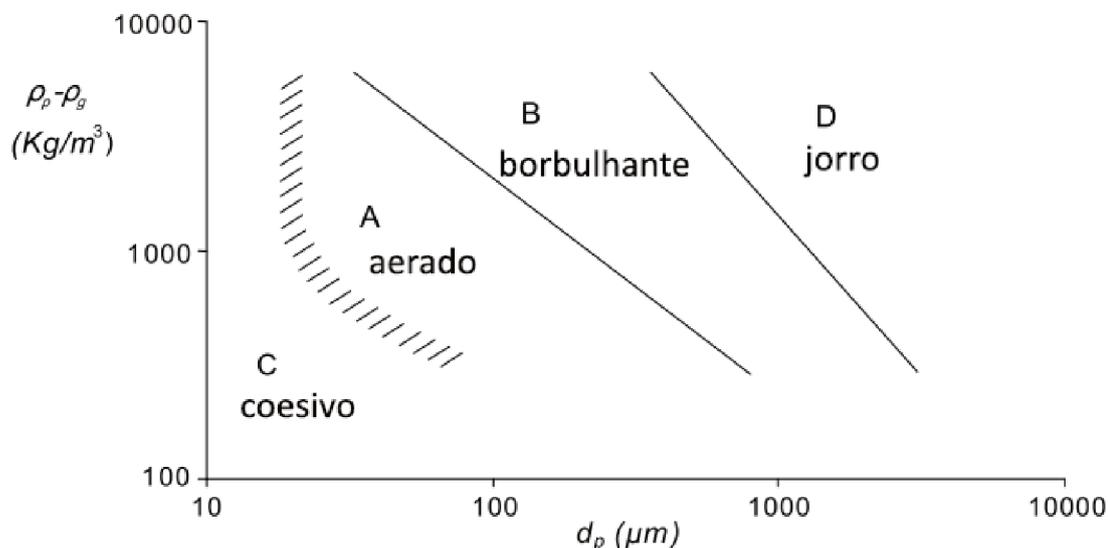
Em leitos formados por um sistemas gás/partículas há uma propensão à distribuição heterogênea dos grãos. Assim, surgem cavidades, caracterizadas pela ausência de partículas, chamadas de bolhas. A formação e quebra dessas bolhas gera

um grande movimento dentro do leito, responsável por altas taxas de transferência de calor e de massa nesse tipo de sistema. Incrementos na velocidade do fluido podem fazer com que a força de arraste seja suficiente para impelir as partículas para fora do leito, causando o transporte pneumático, que marca o fim da fluidização (BOTTERILL, 1975).

Apesar de bastante simples, leitos fluidizados apresentam grandes vantagens, como a grande área superficial das partículas e movimentação no leito, o que possibilita altas taxas de transporte e eliminação de gradientes. Entre as desvantagens deste tipo de sistema estão a demanda energética necessária para a fluidização e a restrição de condições operacionais dentro da faixa de fluidização (BOTTERILL, 1975).

Entre a fluidização incipiente e o transporte pneumático há uma gama de comportamentos que podem ser assumidos pelo leito, que são uma função, principalmente, do tipo de partícula e da velocidade do fluido. Geldart separou as partículas em quatro classes distintas, que apresentam diferentes comportamentos quando fluidizadas (GELDART, 1973). Os diâmetros e massas específicas relativas de cada uma das classes de fluidização são mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Trocador de calor de leito fluidizado: a) evaporação e b) superaquecimento.



Fonte: adaptado de Valverde Millán (2013).

O comportamento e o padrão de circulação de bolhas em um leito é importante, pois estão relacionados com a taxa de mistura. A passagem de bolhas arrasta as partículas que estão em sua porção superior, enquanto que na esteira da bolha (região abaixo de uma bolha em deslocamento) há uma constante renovação de partículas. Diversos autores mostraram que uma diminuição no tamanho das partículas gera um aumento na mistura (BOTTERILL, 1975). Também há registros de que o aumento na viscosidade e na densidade do fluido acarreta em uma maior mistura de sólidos ao gerar bolhas maiores (LEWIS; GILLIAND; GIROUARD, 1962).

### 2.2.2 Efeito de superfícies submersas no comportamento do leito

A imersão de tubos horizontais em um leito causa a obstrução do escoamento, de forma que partículas localizadas na porção superior dos tubos podem não ser fluidizadas, porém a quantidade de partículas estagnadas depende da fluidização do resto do leito e do ângulo de repouso dos sólidos. No caso de um arranjo de tubos horizontais igualmente espaçados, há um movimento oscilatório das bolhas, que passam por lados alternados dos tubos, como observado experimentalmente por Keairns (1970), conforme citado por Botterill (1975). Essas bolhas, porém, podem coalescer e englobar os tubos, e, mesmo assim, há a presença de sólidos estagnados no topo dos tubos.

Ao inserir superfícies no leito há uma dispersão de bolhas, que acaba alterando o comportamento fluidodinâmico do sistema. A geometria dessas superfícies vai influenciar diretamente na fluidização, na fluidodinâmica e nos fenômenos de transporte do sistema, por isso deve ser avaliada com cautela em um projeto.

### 2.2.3 Transferência de calor em leitos fluidizados

O atual entendimento que se tem dos mecanismos de troca térmica em um leito fluidizado tem muitas de suas bases em estudos experimentais, já que trata-se de um processo de elevada complexidade e aleatoriedade. Já há décadas pesquisadores vêm desenvolvendo trabalhos para elucidar quais são as principais variáveis que alteram o comportamento fluidodinâmico e de transferência de energia em um leito. Vários autores apontam que a densidade dos sólidos em suspensão é um dos principais componentes a influenciar nas quantidades de energia permutadas no interior deste equipamento (SUNDARESAN; KOLAR, 2013; PAGLIUSO; LOMBARDI; JR., 2000; FOX; GREWAL; MOEN, 1999; REDDY; NAG, 1997; SHI; NICOLAI; REH, 1998). Pagliuso, Lombardi e Jr. (2000) mostraram que o coeficiente de troca térmica em um leito apresentava maiores intensidades nas proximidades do distribuidor, onde a densidade dos sólidos tende a ser maior. R. L. Wu *et al.* (1987) fizeram uma série de experimentos em um leito fluidizado circulante, cujos resultados mostraram que a densidade da suspensão de sólidos tem uma grande influência no coeficiente de transferência de calor.

De acordo com Kalita, Mahanta e Saha (2013), há um fator que pode alterar a densidade de suspensão de sólidos, afetando, como consequência direta, o coeficiente de transferência de calor dentro de um leito: a pressão. Para chegar a esta conclusão, os pesquisadores citados montaram uma unidade pressurizada com circulação, na qual misturaram diferentes razões de biomassa e areia, mantendo a velocidade do gás de fluidização, porém alterando a pressão de 1 a 5 bar, em incrementos de 2 bar. Eles observaram que o aumento na pressão causava um efeito direto na suspensão

de sólidos, como também melhorava a circulação das partículas no interior da unidade experimental, o que também pode ter contribuído com o aumento do coeficiente de troca térmica. Outros autores também obtiveram conclusões semelhantes em relação à contribuição da pressão nos fenômenos de troca térmica no interior de um leito (KIM; KIM, 2013; WINAYA; BASU, 2001; GUPTA; NAG, 2002).

Todas as variáveis que alteram significativamente o coeficiente de transferência de calor entre o leito e uma superfície parecem estar ligadas com o comportamento dos sólidos dentro deste leito. Desta forma, é de se esperar que a velocidade do gás de fluidização também cause uma alteração nesse coeficiente, já que é capaz de transformar o padrão de circulação de sólidos dentro de um leito. Trabalhos de vários autores confirmam essa influência direta da velocidade do gás nos fenômenos de transferência de calor internos em um leito (EBERT; GLICKSMAN; LINTS, 1993; AL-BUSOUL; ABU-EIN, 2003; TAOFEEQ; AL-DAHMAN, 2018). Até um certo ponto, o aumento da velocidade do gás gera um elevado grau de mistura, o que proporciona uma melhor distribuição do calor pelo fenômeno de convecção. Porém, a partir de um determinado ponto, incrementos nesta velocidade causaram uma maior dispersão dos sólidos, tornando o leito mais diluto. Conforme visto anteriormente, a suspensão de sólidos tem uma relação direta com o coeficiente de transferência de calor, de forma que leitos com baixa densidade de sólidos tendem a ter menores coeficientes de transferência de calor. Por isso, o aumento na velocidade superficial do gás de fluidização causa um aumento no coeficiente de transferência de calor até um determinado ponto (ponto de máximo), a partir do qual seu efeito passa a ser contrário, causando uma diminuição neste parâmetro, como mostrado experimentalmente por Masoumifard *et al.* (2008). O efeito da velocidade do gás também foi estudado por S. W. Kim *et al.* (2003a), que provaram, por meio de um aparato experimental, a ocorrência de um aumento do coeficiente de transferência de calor com o aumento da velocidade superficial do gás de fluidização até um ponto de máximo. A velocidade também impactou a frequência de bolhas, que aumentou com a velocidade, e o tempo de contato da emulsão, que diminuiu conforme a velocidade de fluidização aumentou.

O clássico trabalho de Geldart (1973) mostra que, além da pressão e da velocidade, diferentes partículas apresentam diferentes características e padrões de fluidização, de forma que é possível separar diferentes partículas em classes de acordo com sua padronagem de fluidização. Um dos fatores que mais influencia nessa divisão de classes de fluidização é o tamanho das partículas. Por alterar a fluidodinâmica no interior do leito, o diâmetro das partículas acaba tendo um papel fundamental também nos mecanismos de troca térmica do leito. Em relação a esta variável, parece haver um consenso referente ao fato de que partículas menores resultam em coeficientes de transferência de calor mais elevados. Resultados experimentais que corroboram esta tese podem ser encontrados em uma infinidade de trabalhos na literatura (BASU, 1990;

HONG-SHUN *et al.*, 1993; BLASZCZUK; NOWAK; KRZYWANSKI, 2017; PAGLIUSO; LOMBARDI; JR., 2000; WU, R. *et al.*, 1989).

O estudo de transferência de calor em leitos fluidizados visa, principalmente, o desenvolvimento de sistemas que aproveitam as vantajosas características em relação a fenômenos de transferência que a fluidização oferece. A inserção de superfícies de troca térmica em leitos fluidizados é bastante comum, seja para fornecer energia com o objetivo de aquecer as partículas do leito, ou para absorver o calor de partículas aquecidas. A inclusão de diferentes corpos dentro de um leito irá alterar a circulação de sólidos no interior deste, influenciando na formação e na dispersão de bolhas e gerando áreas de estagnação de partículas. Desta forma, é importante também o estudo da influência que diferentes superfícies podem exercer nos fenômenos de transferência de calor, quando inseridos em seu meio. O formato e tamanho da superfície submersa de transferência de calor têm grande impacto no coeficiente de transferência de calor entre o leito e a superfície, pois irão alterar a distribuição de bolhas no interior do leito (BISOGNIN; FUSCO; SOARES, 2016).

#### **2.2.4 Transferência de calor em leitos fluidizados com superfícies submersas**

A presença de um tubo, ou um conjunto de tubos, ou outra superfície dentro de um leito fluidizado causa perturbações, de forma que o coeficiente de transferência de calor não pode ser obtido com correlações tradicionais. Devido ao fato de que diversas aplicações de leitos fluidizados exigem a inserção de uma superfície no leito, vários autores trabalharam para desenvolver correlações para prever o coeficiente de transferência de calor em diferentes situações. Richardson e Shakiri (1979) mediram o coeficiente de transferência de calor entre um leito e um elemento aquecido eletricamente para diferentes tipos de materiais, velocidade de gás e pressões. Estes resultados foram utilizados no estudo de uma correlação para a predição do número de Nusselt neste tipo de sistema.

Lechner, Merzsch e Krautz (2014) investigaram a influência de um único tubo e um conjunto de tubos, cujos eixos são dispostos na horizontal, no fenômeno de transferência de calor dentro de um leito, implementando esta influência em correlações úteis na predição de transferência de calor em sistemas gás-sólidos com partículas finas. A transferência de calor entre um leito e uma superfície está diretamente ligada aos contatos intermitentes das partículas com a superfície, o que é determinado pelo padrão de circulação dos sólidos no leito. Esse padrão, por sua vez, está relacionado com a velocidade superficial do gás de fluidização, conforme mostrado por Natale, Lancia e Nigro (2008). Este princípio, juntamente com os efeitos das propriedades físicas do material, pressão e temperatura, foi usado como base para o desenvolvimento de uma correlação semi-empírica para a predição do coeficiente de transferência de calor por Natale, Lancia e Nigro (2008).

Experimentos com superfícies esféricas e leitos fluidizados foram desenvolvidos por Dons e Ferrari (1995). Entre as conclusões obtidas por estes autores está o fato de que há uma dependência real entre o coeficiente de transferência de calor e o tamanho da esfera submersa, sendo que quanto maior a esfera, menor tende a ser o coeficiente. Além disso, os autores mostram as inadequações de modelos tradicionais na predição do fenômeno de troca térmica em um leito quando há a inserção de um pequeno objeto tridimensional.

Embora haja um esforço por parte dos pesquisadores para desenvolver modelos e correlações para a predição de fenômenos de transferência em leitos com superfícies submersas, há muitas variáveis que parecem interagir (diâmetro das partículas, propriedades do gás e do sólido, tamanho e geometria da superfície, entre outras) e tornar essa predição difícil de ser realizada com precisão. Além disso, a obtenção de dados experimentais para o ajuste de tais correlações é um processo dispendioso. Por estes motivos, muitos pesquisadores têm se voltado para ferramentas mais modernas, como é o caso da fluidodinâmica computacional, para tentar elucidar o comportamento desse tipo de sistema, de forma a aprimorá-lo e estender suas aplicações a novos campos.

### 2.3 ESTUDOS DE OTIMIZAÇÃO COM O USO COMBINADO DE TÉCNICAS DE CFD E RSM

O planejamento experimental surgiu como uma forma de poupar tempo e recursos em estudos experimentais, de forma que o pesquisador pudesse realizar um menor número de experimentos e, ainda assim, efetuar uma análise estatística completa e confiável dos dados obtidos. Dentro da gama de planejamentos experimentais existentes, há aqueles que se destinam à criação de superfícies de resposta, que consistem em gráficos gerados com modelos ajustados de segunda ordem, ou superiores, que, por apresentar curvatura, indicam a existência de pontos de máximo ou de mínimo, caso estes existam dentro da região de busca considerada.

Embora planejamentos experimentais e a metodologia de superfície de resposta (RSM) sejam comumente usados em procedimentos experimentais, estudos computacionais podem se beneficiar de forma grandiosa com o uso destas ferramentas. Da mesma forma que experimentos tendem a ser custosos em relação a tempo e recursos, simulações computacionais também podem apresentar esses custos. A resolução de equações diferenciais inerentes às técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) se torna computacionalmente cara quando se possui uma grande geometria e quando há modelos adicionais que descrevem não apenas a fluidodinâmica do processo, mas também outros fenômenos, como transferência de calor, de massa, turbulência, cinética de reações químicas, entre outros. Desta forma, cada simulação tende a tomar um grande tempo, já que todas as equações devem ser resolvidas de forma discretizada,

tanto no tempo, quanto no espaço. Isso faz com que as simulações tenham uma longa duração e exijam máquinas potentes para sua realização, especialmente quando o estudo exige um grande número de simulações, o que pode limitar algumas pesquisas.

Pelos motivos citados, um número cada vez maior de pesquisadores vem utilizando ferramentas de planejamento experimental e superfície de resposta em estudos computacionais. Kumar e Bansal (2013) utilizaram técnicas de CFD para gerar um modelo para degradação fotocatalítica de rodamina B em reator fotocatalítico anular. Após a validação deste modelo, com base em resultados experimentais, o modelo computacional foi utilizado para gerar dados necessários para a geração de uma superfície de resposta, como base em um planejamento experimental central composto. A superfície gerada com o ajuste dos dados a um modelo quadrático foi utilizada para a obtenção de um ponto de máximo de degradação da rodamina no processo.

Em biorreatores que contam com a presença de membranas, o processo de *fouling*, seja por incrustação dos poros por deposição, ou por formação de torta, consiste em um grande problema na operação deste tipo de equipamento. Para estudar este processo, Yang, Yu *et al.* (2017) utilizaram uma metodologia combinada de fluidodinâmica computacional e superfície de resposta. Os autores definiram a taxa de carregamento de lodo, vazão de ar, diâmetro de bolhas e concentração do lodo como fatores para a investigação de diferentes respostas, incluindo a propensão à deposição de partículas, viscosidade do lodo, tensão cisalhante e taxa de deformação. A análise dos coeficientes do modelo gerado para a superfície de resposta permitiu aos autores entender a influência de cada um dos fatores e sua significância nas diferentes respostas.

A produção enzimática de peróxido de hidrogênio em reatores de mistura perfeita foi simulada utilizando fluidodinâmica computacional por Aghbolaghy e Karimi (2014). O modelo computacional validado foi então obtido para encontrar os melhores valores de vazão de água, velocidade do impelidor e taxa molar de glicose a fim de maximizar o rendimento. Isso foi feito com a geração de uma superfície de resposta, criada com o ajuste de dados de um planejamento experimental central composto.

O estudo de microdispositivos é uma área crescente de estudos que tem encontrado aplicações nos mais diversos campos da ciência, da engenharia à medicina. Um dos desafios quando se trata destes dispositivos está na obtenção de elevados graus de mistura, necessários em várias operações, especialmente em microrreatores. Ortega-Casanova (2017) utilizou técnicas de CFD em conjunto com superfície de resposta para propor diferentes geometrias de microrreatores, a fim de obter melhores índices de mistura.

## 2.4 TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA - FUNDAMENTOS

Ao se efetuar uma simulação computacional existem diversas fontes de erros. A identificação desses é feita em duas etapas: verificação e validação. Mehta (1996) definiu estas duas etapas de forma bastante simples: “A validação avalia se as coisas certas estão sendo feitas, e a verificação avalia se elas estão sendo feitas da forma correta.” Isso significa que a validação examina se os modelos matemáticos usados representam corretamente os fenômenos a serem descritos pela simulação, sendo que esta análise é efetuada por meio do confronto dos dados obtidos computacionalmente com dados obtidos de forma empírica. A verificação está relacionada com a solução destes modelos, afinal é possível que o modelo, fenomenológico ou empírico, tenha sido escolhido corretamente, porém sua solução não seja feita da maneira mais apropriada, o que incorre em erros.

A discretização espacial, geração da malha, é uma etapa delicada da simulação. Afinal, essa divisão de um domínio contínuo pode resultar em erros graves caso não seja feita de forma adequada. Malhas mais refinadas resultam em soluções mais precisas, pois no limite do tamanho de célula tendendo a zero (domínio contínuo) não existem erros de discretização. Porém, na prática, este limite é impossível de ser atingido (MEHTA, 1991). Além disso, um grande refino de malha incorre em elevados custos computacionais, capazes de inviabilizar uma simulação. De acordo com o Celik (1993), um método numérico bem escolhido com uma malha suficientemente refinada deveria resultar em uma solução exata para um modelo bem posto (com condições de contorno bem definidas).

A escolha de uma malha adequada é uma das etapas mais críticas no processo de verificação de uma solução numérica, sendo que a escolha de um sistema com discretização inadequada pode incorrer em erros tão significativos quanto a escolha de um modelo que não represente corretamente a fenomenologia do sistema. O processo de escolha do nível de discretização espacial é chamado de estudo de independência de malha, que geralmente é efetuado pela comparação entre soluções obtidas com malhas sucessivamente mais refinadas, até que não haja variação entre os resultados. Este estudo também pode ser feito com indicadores, como o índice de convergência de malha, que será usado neste trabalho.

O estudo de transferência de calor em leitos fluidizados é um problema complexo, que envolve diversos modelos e parâmetros. Isso faz com que o estudo de independência de malha neste tipo de sistema seja feito com diligência. Cloete, Johansen e Amini (2015) estudaram o comportamento de independência de malha em simulações de reatores de leito fluidizados, usando o modelo de dois fluidos, e constataram que este comportamento varia muito de acordo com o tamanho de partículas utilizadas, sendo que partículas pequenas (diâmetro de 200  $\mu\text{m}$ ) necessitaram de um tamanho de célula 63 vezes maior que partículas maiores (diâmetro de 1000  $\mu\text{m}$ ). Estes resultados

contestam a prática de utilizar malhas com tamanhos de células aproximadamente 10 vezes maiores que o tamanho da partícula (ASEGEHEGN; SCHREIBER; KRAUTZ, 2011; LI; BENYAHIA, 2013; KONG; ZHANG; ZHU, 2014). Por este motivo, optou-se por desenvolver um estudo de independência de malha utilizando o índice de convergência de malha, que tem sido usado com bons resultados em diversos problemas de simulação (PAUDEL; SAENGER, 2017; FERRARI *et al.*, 2017; LIN; FERNG, 2016).

### 2.4.1 Análise Tradicional da Convergência de Erros

Geralmente as análises de erro se baseiam na seguinte relação entre a solução exata ( $f_{exata}$ ) e a solução numérica aproximada ( $f(h)$ ) descrita pela Equação 1:

$$E = f(h) - f_{exata} = C \cdot h^p + HOT \quad (1)$$

onde  $C$  é uma constante,  $h$  é alguma medida do espaçamento da malha,  $p$  é a ordem de convergência e  $HOT$  representa termos de ordens mais altas, ou seja, outras potências de  $h$ . Se as malhas consideradas forem suficientemente refinadas, ou seja, se os resultados estão numa região assintótica e não variam rapidamente, os termos de ordens mais altas podem ser desprezados. Assim, o erro será dado pela Equação 2:

$$E = f_{exata} - f(h) \approx C \cdot h^p \quad (2)$$

Se for aplicado logaritmo na expressão acima, o resultado será dado pela Equação 3:

$$\log E = \log C + p \cdot h \quad (3)$$

A partir da Equação 3, a ordem do erro pode ser facilmente obtida plotando-se um gráfico do erro de discretização ( $E$ ) em função do espaçamento da malha ( $h$ ). Um problema com as Equações 2 e 3 é que geralmente a solução exata não é conhecida. Se três malhas diferentes foram utilizadas, com uma razão de refino ( $r$ ) constante, ou seja, se  $r = h_1/h_2 = h_2/h_3 = \text{constante}$ , onde  $h_1 < h_2 < h_3$ , então a Equação 3 pode ser escrita para os três diferentes espaçamentos de malha ( $h_1, h_2$  e  $h_3$ ) e resolvida para a ordem de convergência ( $p$ ), resultando na Equação 4:

$$p = \frac{\log\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)}{\log r} \quad (4)$$

### 2.4.2 Intervalo Assintótico de Convergência

Um código só pode ser dito preciso se a malha for suficientemente refinada, de forma que a solução esteja no intervalo assintótico de convergência, ou seja, numa região na qual haja pouca variação nos resultados obtidos com diferentes malhas.

Neste intervalo tem-se um comportamento que pode ser descrito pela Equação 5:

$$C = \frac{E}{h^p} \quad (5)$$

ou seja, a razão entre o erro e o espaçamento da malha elevado à ordem do erro deve ser constante.

### 2.4.3 Extrapolação de Richardson

A extrapolação de Richardson é um método para obter o valor que seria calculado numa hipótese de contínuo, ou seja, quando o espaçamento da malha fosse nulo. Um quantidade  $f$  qualquer, resultante de uma simulação, pode ser expressa por uma expansão em séries, conforme a Equação 6 (ROACHE, 1997):

$$f = f_{h=0} + g_1 \cdot h + g_2 \cdot h^2 + g_3 \cdot h^3 + \dots \quad (6)$$

onde as funções  $g_1$ ,  $g_2$  e  $g_3$  são independentes do espaçamento da malha, e  $f_{h=0}$  é o resultado na hipótese de espaçamento nulo da malha.

Caso seja assumida uma solução  $f$  de segunda ordem ( $g_1 = 0$ ) e  $f$  tenha sido calculado com duas malhas,  $h_1$  e  $h_2$ , sendo  $h_1$  o menor tamanho de célula, é possível estimar o valor de  $f_{h=0}$ , se os termos de terceira ordem e ordens superiores forem desprezados, como na Equação 7:

$$f_{h=0} = f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^2 - 1} \quad (7)$$

sendo  $r$  a razão de refino da malha:  $r = h_2/h_1$ , sendo que esta razão não precisa ser necessariamente um número inteiro. A extrapolação de Richardson pode ser generalizada para uma ordem  $p$ , como mostra a Equação 8:

$$f_{h=0} \cong f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^p - 1} \quad (8)$$

É comum que seja escolhida uma razão de refino  $r = 2$ . Neste caso, a Equação 8 pode ser simplificada para fornecer a Equação 9:

$$f_{h=0} = \frac{4}{3} \cdot f_1 - \frac{1}{3} \cdot f_2 \quad (9)$$

É importante notar que a extrapolação de Richardson é baseada em uma representação da série de Taylor, como mostra a Equação 6, e por isso ela não é válida em regiões que apresentam descontinuidades.

Caso  $f_1$  e  $f_2$  tenham sido calculados usando métodos de 2ª ordem, as Equações 8 e 9 devem, em teoria, fornecer uma estimativa de quarta ordem. De maneira geral, considera-se  $f_{h=0}$  como sendo de ordem de precisão  $p+1$ . A extrapolação de Richardson pode ser aplicada para a solução em pontos específicos da malha ou para funções da solução, como o arrasto (calculado a partir das velocidades). Isso assume que a função é globalmente de 2ª ordem e que as funções da solução foram calculadas consistentemente com métodos de 2ª ordem.

#### 2.4.4 Índice de Convergência de Malha

De acordo com Roache (1997), o Índice de Convergência de Malha (ICM) é baseado em um estimador de erro de refinamento de malha, derivado da teoria da extrapolação de Richardson generalizada. Recomenda-se o uso mesmo que a extrapolação de Richardson não tenha sido usada para melhorar a precisão e, em alguns casos, mesmo que as condições para a teoria não sejam estritamente satisfeitas.

O Índice de Convergência de Malha (*ICM*) é uma medida da distância entre o valor calculado e o valor numérico assintótico. É um indicativo de quanto a solução iria mudar caso a malha fosse mais refinada. Um valor baixo para este índice indica que os cálculos estão dentro do intervalo assintótico, ou seja, que o refino da malha teria pouco impacto na solução e que os resultados obtidos com diferentes malhas estão convergindo.

Para uma malha refinada, o ICM é dado pela Equação 10:

$$ICM_{refinado} = \frac{F_s \cdot |\epsilon|}{(r^p - 1)} \quad (10)$$

onde  $F_s$  é um fator de segurança, para o qual são recomendados valores de  $F_s = 3,0$  para comparação entre duas malhas e  $F_s = 1,25$  para comparação entre três malhas.

Para malhas mais grosseiras, o ICM é calculado pela Equação 11:

$$ICM_{grosseiro} = \frac{F_s \cdot |\epsilon| \cdot r^p}{(r^p - 1)} \quad (11)$$

sendo  $\epsilon$  o erro relativo, dado por  $\epsilon = (f_2 - f_1)/f_1$ .

É importante checar se cada nível da malha está na região assintótica de convergência. Isso pode ser analisado com dois valores de ICM, computados a partir de três diferentes malhas, como mostra a Equação 12:

$$ICM_{23} = r^p \cdot ICM_{12} \quad (12)$$

ou seja, a razão entre os índices de convergência de malha, para as malhas 2 e 3 e para as malhas 1 e 2, deve ser igual à razão de refino elevada a ordem do erro.

Com base no exposto, esta tese trata sobre transferência de calor em leitos fluidizados, visando um sistema de concentração de energia solar. Para tal são utilizadas simulações computacionais, que substituem experimentos tradicionais na obtenção de dados. A verificação do modelo computacional proposto é efetuada com a metodologia apresentada na seção 2.4.4. O modelo computacional verificado e validado é utilizado para a realização de todas as corridas referentes a diferentes planejamentos experimentais utilizados. O primeiro destes planejamentos é realizado com o objetivo de limitar a quantidade de variáveis com influência significativa no fenômeno em estudo. Em seguida, as variáveis escolhidas são utilizadas em um estudo de otimização do coeficiente de transferência de calor e na troca térmica entre os tubos e o leito,

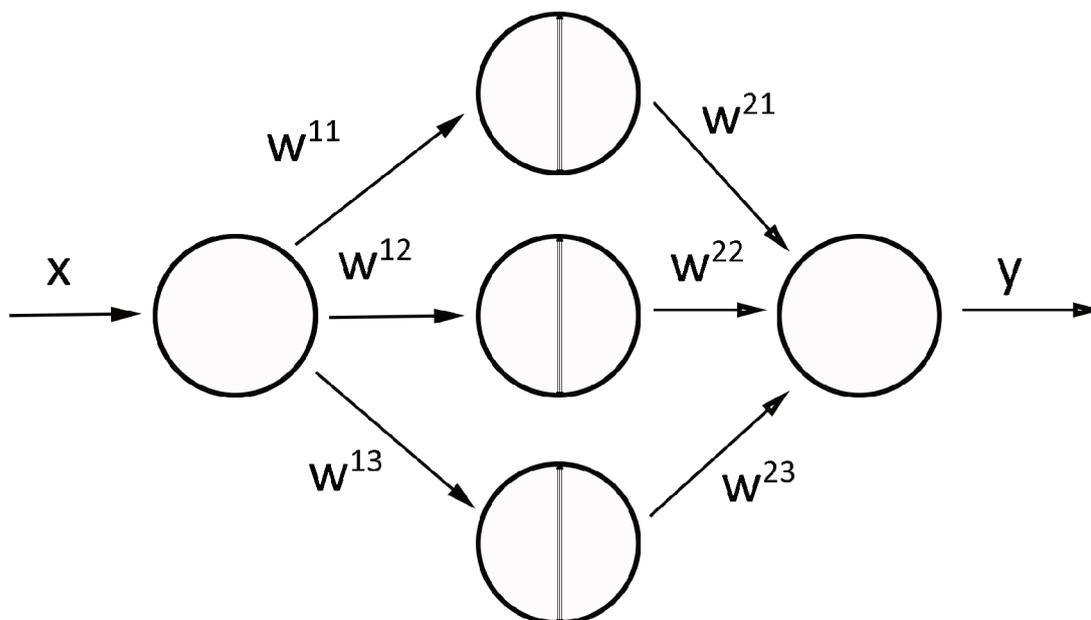
no qual também são utilizados planejamentos experimentais com dados obtidos computacionalmente. A inserção de técnicas computacionais em estudos de otimização destaca-se como uma tendência em anos recentes, consistindo uma alternativa barata à criação de protótipos e módulos experimentais. Tais ferramentas ainda se mostram bastante úteis e ainda constituem alicerces da engenharia, que apóiam inclusive as ferramentas computacionais. Porém, o uso de aparatos experimentais representa altos custos, que, ainda que indispensáveis, podem ser reduzidos com o apoio de ferramentas computacionais usadas para fornecer um norte aos pesquisadores e projetistas de diferentes áreas da engenharia. Desta forma, este trabalho apresenta sua importância ao propor ferramentas e obter dados que podem ser utilizados no projeto de um equipamento integrante de uma estação de energia solar concentrada.

## 2.5 REDES NEURAIS

A inteligência artificial é uma área de estudo relativamente recente, que partiu da ciência da computação, mas já vem ocupando lugar de destaque em diversos ramos, da engenharia à medicina. Por inteligência artificial entende-se que máquinas devem ser capazes de aprender, o que é obtido ao expor à máquina a um conteúdo bastante elevado de dados, de forma que essa seja capaz de organizar esse conteúdo na forma de modelos, que possuem entradas e saídas, de forma que quando uma nova informação de entrada seja apresentada à máquina, esta seja capaz de gerar uma saída. As redes neurais são uma forma de inculir conceitos biológicos, relacionados ao cérebro humano, à maneira como as máquinas desenvolvem modelos para tratar entradas e saídas. É importante destacar que redes neurais não tem o intuito de replicar fielmente o funcionamento de neurônios, apenas de aplica alguns conceitos para aplicações que envolvam não-linearidades, capacidade de generalização entre outros aspectos que são processados mais facilmente por humanos que por máquinas (JAIN; MOHIUDDIN, 1996). Um dos fundamentos biológicos sobre o qual se apoia o estudo das redes neurais, é a complexidade de informações que pode ser processada por estruturas individualmente simples: os neurônios. A partir das conexões (sinapses) entre estas unidades os seres humanos obtém uma grande capacidade de processamento de informação. Dessa forma, as redes neurais também se utilizam de unidades básicas (chamadas de neurônios), que recebem uma informação e a transformam por meio de uma função ativação, geralmente uma função não-linear, como a função sigmóide. Entre essas unidades básicas, cuja função é aplicação de uma função, existem conexões, que se remetem as sinapses cerebrais. Essas conexões são representadas por valores matemáticos chamados de pesos. Dessa forma tem-se informação de entrada, que são multiplicadas pelos pesos encontrados em cada conexão. A soma de todas as entradas multiplicadas pelos pesos que conectam entradas e um neurônio passa pela função sigmóide para gerar um novo valor relacionado a cada neurônio. A arquitetura,

quantidade e disposição dos neurônios, é definida pelo cientista que desenvolve a rede. Às camadas intermediárias entre a camada de entrada e a saída dá-se o nome de camadas escondidas. Uma rede simples, com apenas uma camada escondida é dada na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de Rede Neural.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2020).

Assim um modelo gerado por uma rede neural será dado pela arquitetura da rede e pesos relativos às conexões. O aprendizado, ou treinamento, de uma rede é o processo pelo qual são definidos os pesos entre conexões. Para isso ser feito é necessário que existam muitos, pois é a partir desses dados que esses pesos são ajustados. Geralmente o conjunto de dados é dividido em dois grupo: o primeiro para o treinamento (definição dos pesos) e o segundo para verificação do modelo. Caso todos os dados disponíveis sejam usados para o treinamento, ele pode ter uma grande capacidade de ajuste aos dados coletados, porém terá capacidade reduzida de generalização, ou seja, pode ser que os resultados obtidos com novas entradas não sejam precisos.

Ao se falar em redes neurais um dos termos mais ouvidos é retropropagação. Esse termo diz respeito à maneira como os pesos são ajustados dos final para o início da rede. Os pesos começam com uma estimativa inicial, e então a saída é calculada. Com a saída coletada do banco de dados fornecido ao computador o erro entre resultado calculado e fornecido é calculado. Esse erro é usado para ajustar os pesos, sendo propagado do fim, saída, ao meio, camadas escondidas, para só então voltar a camadas de entradas (I.A. BASHEER, 2000).

## 2.6 ALGORITMOS GENÉTICOS

Enquanto as redes neurais fazem uso de conceitos biológicos para geração de modelos, os algoritmos genéticos buscaram inspiração na evolução para solucionar problemas de otimização. O princípio básico por trás dessas técnicas está na criação consecutiva de populações (conjunto de indivíduos, que nada mais são do que vetores de entrada para o problema proposto) que são avaliadas por meio de uma função adaptação, equivalente à função objetivo em formulações tradicionais de problemas de otimização. Para passar para a próxima 'geração' são escolhidos apenas os indivíduos que pontuam mais na função adaptação. As informações dos indivíduos mais adaptados é então combinada em um processo chamado de crossover. Após a combinação de informações provenientes de dois indivíduos diferentes tem-se então uma nova geração.

Algoritmos de otimização muitas vezes enfrentam um problema bastante comum: a convergência em um mínimo (ou máximo) local, deixando de encontrar o ponto ótimo global para o problema. Dentro dos algoritmos genéticos é acrescentada uma taxa de mutação que mantém certa variabilidade dentro das consecutivas gerações, permitindo ao algoritmo eventualmente explorar regiões mais distantes daquelas na qual está convergindo. A mutação é feita a uma taxa baixa, e tem-se a mudança aleatório de um, ou mais, dos genes (dados) que compõem o indivíduo.

Os fundamentos teóricos e referências a trabalhos científicos expostos nesse capítulo constituem as bases para o desenvolvimento desta tese. O capítulo seguinte mostra como esses fundamentos foram utilizados para a elaboração de métodos que permitiram a obtenção dos objetivos propostos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de otimizar a geometria e as condições operacionais de um leito fluidizado utilizado para troca térmica em um sistema de energia solar concentrada, várias etapas foram realizadas. Inicialmente, houve o desenvolvimento e a validação de um modelo computacional capaz de descrever o fenômeno com a precisão requerida, etapa que consistiu na escolha dos modelos apropriados e no estudo da malha computacional. Em seguida, este modelo foi aplicado em um estudo para a triagem dos fatores mais significativos no processo, etapa na qual diferentes parâmetros foram avaliados estatisticamente com o intuito de restringir o número total de parâmetros para a etapa de otimização. Na sequência, foram desenvolvidos dois planejamentos experimentais em diferentes regiões de busca para encontrar um ponto de ótimo para a variável em estudo, o coeficiente de transferência de calor, e mais dois para encontrar o ponto ótimo da troca térmica entre o leito e os tubos submersos. Os procedimentos usados no desenvolvimento das etapas citadas são explanados nas seções que seguem.

#### 3.1 MODELO COMPUTACIONAL

Os resultados utilizados para elaborar as superfícies de resposta, desenvolvidas com a finalidade de otimização do processo em estudo, foram obtidos de forma computacional. Todas as simulações deste trabalho foram realizadas no software ANSYS® CFD (FLUENT®) 18.1. Para descrever as diferentes fases presentes (gás de fluidização e partículas sólidas) foi utilizada uma abordagem euleriana, que descreve ambas as fases como meios contínuos. As Equações governantes para uma abordagem Euleriana são obtidas através de balanços considerando ambas as fases como fluidos, sendo que as propriedades da fase sólida são descritas utilizando conceitos da teoria cinética dos escoamentos granulares. Os balanços de massa para as duas fases consideradas são dadas pelas Equações 13 e 14.

Fase gasosa:

$$\frac{\partial(\epsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \vec{V}_g) = 0 \quad (13)$$

Fase sólida:

$$\frac{\partial(\epsilon_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \vec{V}_s) = 0 \quad (14)$$

O balanço de quantidade de movimento é obtido a partir da segunda lei de Newton que considera que a soma das forças que atuam sobre um elemento de volume equivale a variação da quantidade de movimento obtida no domínio considerado. Em um

leito fluidizado as forças consideradas são: força viscosa, força peso, força de pressão do sólido, força de pressão estática e a força interfacial, que acopla as equações de balanço para as duas fases por meio do coeficiente interfacial de arraste. Matematicamente os balanços de quantidade de movimento para as duas fases são dados pelas equações 15 e 16.

Fase gasosa:

$$\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = \nabla \cdot (\tau_g) - \varepsilon_g \nabla P - \beta (\vec{v}_g - \vec{v}_s) + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} \quad (15)$$

Fase sólida:

$$\frac{\partial (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \nabla \cdot (\tau_s) - \varepsilon_s \nabla P - \nabla P_s + \beta (\vec{v}_g - \vec{v}_s) + \varepsilon_s \rho_s \mathbf{g} \quad (16)$$

sendo:

$$\tau_s = \mu_s \varepsilon_s \left( \nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T \right) + \varepsilon_s \left( \xi_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \mathbf{I} \quad (17)$$

e

$$\tau_g = \mu_s \varepsilon_g \left( \nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T \right) + \frac{2}{3} \varepsilon_s \mu_s (\nabla \cdot \vec{v}_g) \mathbf{I} \quad (18)$$

onde  $\mathbf{I}$  é o tensor identidade,  $\xi_i$  é a viscosidade global da fase particulada, definida como a resistência da partícula sólida à compressão e expansão, e  $\mu_s$  é a viscosidade dinâmica da fase sólida.

Os balanços de energia são obtidos com a segunda lei da termodinâmica, que estabelece que a energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada. Por se tratar de uma abordagem Euleriana a análise da energia é feito considerando um elemento de volume fixo no espaço, o que resulta nos balanços dados pelas equações 19 e 20.

Fase gasosa:

$$\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g H_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g H_g) = \nabla \cdot \varepsilon_g \kappa_{g,eff} \nabla T_g - h_{gs} (T_s - T_g) \quad (19)$$

Fase sólida:

$$\frac{\partial (\varepsilon_s \rho_g H_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s H_s) = \nabla \cdot \varepsilon_s \kappa_{s,eff} \nabla T_s + h_{sg} (T_s - T_g) \quad (20)$$

onde  $H_i$  é a entalpia,  $\kappa$  é a condutividade térmica,  $T$  é a temperatura e  $h_{gs}$  é o coeficiente volumétrico de transferência de calor interfase. A condutividade térmica efetiva descrita acima é relacionada com a condutividade térmica molecular através das seguintes relações:

$$\kappa_{g,eff} = \left( \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_s}}{\varepsilon_g} \right) \kappa_g \quad (21)$$

$$\kappa_{s,eff} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_s}} \kappa_s [\omega A + (1 - \omega) \Gamma] \quad (22)$$

onde,

$$\Gamma = \frac{2}{1 - \frac{B}{A}} \left[ \frac{A-1}{\left(1 - \frac{B}{A}\right)^2} \frac{B}{A} \ln\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{(B-1)}{\left(1 - \frac{B}{A}\right)} - \frac{B+1}{2} \right] \quad (23)$$

$$A = \frac{\kappa_s}{\kappa_g} \quad (24)$$

$$B = 1,25 \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_g} \right)^{10/9} \quad (25)$$

$$\omega = 7,26 \cdot 10^{-3} \quad (26)$$

A abordagem Euleriana foi usada em conjunto com a teoria cinética dos escoamentos granulares, de forma que a fase granular é tratada como um fluido contínuo. A temperatura granular representa a energia associada ao movimento aleatório das partículas sólidas em um escoamento, sendo análoga à temperatura termodinâmica. Esta propriedade é descrita matematicamente pela Equação 27.

$$\Theta = \frac{1}{3} \langle c^2 \rangle \quad (27)$$

onde  $c$  é velocidade instatânea da partícula e  $\Theta$  é a temperatura granular.

Muitas das propriedades dos sólidos usadas no modelo computacional são descritas pela teoria cinética dos escoamentos granulares, que parte de uma analogia entre os sólidos granulares e a teoria cinética dos gases e cuja descrição matemática completa pode ser encontrada em Gidaspow (1994). As equações utilizadas neste modelo para descrição das propriedades dos sólidos foram baseadas no trabalho de Lun *et al.* (1984). De acordo com este autor, a pressão dos sólidos é dada pela Equação 28, a viscosidade global dos sólidos (que representa a resistência à compressão) é dada pela Equação 29 e a viscosidade dinâmica é representada pela Equação 30. As componentes colisional, cinética e friccional da viscosidade dinâmica são dadas pelas equações 31, 32 e 33, respectivamente, sendo a componente friccional extraída de Schaeffer (1987).

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s [1 + 2(1 + e)\varepsilon_s g_0] \Theta_s \quad (28)$$

sendo  $e$  o coeficiente de restituição, cujo valor usado foi de 0,9,  $\Theta_s$  a temperatura granular da fase sólida e  $g_0$  a função distribuição radial.

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s D_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \quad (29)$$

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,f} \quad (30)$$

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s D_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \quad (31)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s D_p \sqrt{\pi \Theta_s}}{96 \varepsilon_s (1 + e) g_0} \left[ 1 + \frac{4}{5} (1 + e) g_0 \varepsilon_s \right]^2 \quad (32)$$

$$\mu_{s,f} = \frac{\rho_s \sin \theta}{2 \sqrt{I_{2D}}} \quad (33)$$

onde  $\theta$  é o ângulo interno de fricção e  $I_{2D}$  é o segundo invariante do deviatórico do tensor tensão. A dissipação da energia granular e a distribuição radial são dadas pelas Equações 34 e 35, respectivamente (LUN *et al.*, 1984).

$$\gamma_s = \frac{12 (1 - e^2) g_0}{D_p \sqrt{\pi}} \rho_s \varepsilon_s^2 \Theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (34)$$

$$g_0 = \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (35)$$

A escolha de um modelo de arrasto apropriado é imprescindível para a obtenção de resultados confiáveis na simulação de processos que envolvem fluidização. A força de arrasto surge da diferença entre as velocidades dos sólidos e da fase fluida, sendo descrita matematicamente pela multiplicação da velocidade relativa entre as fases e o coeficiente de transferência de quantidade de movimento interfase, representado por  $\beta$  (PEI; ZHANG; WEN, 2012).

O modelo de Gidaspow foi selecionado para este estudo devido a sua ampla utilização na literatura (LOHA; CHATTOPADHYAY; CHATTERJEE, 2012; DU *et al.*, 2006) e com base em estudos prévios desenvolvidos pelos autores (BISOGNIN; FUSCO; SOARES, 2016). Este modelo utiliza a equação de Ergun (ERGUN, 1952) para leitos densos e o modelo empírico de Wen e Yu (1966) para leitos mais dilutos. Por este motivo, este modelo apresenta equações diferentes para calcular o coeficiente de transferência de quantidade de movimento para leitos com densidade superior a 0,8 (Equações 36 e 37) e para leitos com densidade igual ou inferior a 0,8 (Equação 38).

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{D_p} \varepsilon_g^{-2,65} \quad (36)$$

com

$$C_D = \frac{24}{\varepsilon_g Re_s} \left[ 1 + 0,15 (\varepsilon_g Re_p)^{0,687} \right] \quad (37)$$

$$\beta = 150 \frac{\varepsilon_s (1 - \varepsilon_g) \mu_g}{\varepsilon_g D_p^2} + 1,75 \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{D_p} \quad (38)$$

Outro fenômeno que apresenta importância em modelos computacionais que descrevem leitos fluidizados é a turbulência. É comum citar as altas taxas de transferência de calor e de massa em um leito fluidizado como sendo as principais vantagens para utilização destes sistemas. Isso se deve muito em função dos movimentos convectivos no interior do leito, mas a turbulência também contribui para o aumento de taxas de transferência. Por isso é importante utilizar um modelo apropriado para descrever este fenômeno. Com base na literatura (WANG, Q. *et al.*, 2013) e em estudos anteriores realizados pelos autores deste trabalho (BISOGNIN; FUSCO; SOARES, 2016), o modelo de turbulência “*RNG -  $\kappa - \epsilon$  disperso*” foi escolhido.

Além de um modelo de arrasto e de turbulência, essenciais para a descrição do processo de fluidização, neste trabalho é necessária a adição de um modelo de troca de calor entre a fase gasosa e a fase particulada para que se possa efetuar o cálculo do coeficiente de transferência de calor, propriedade cujo objetivo desta tese é a otimização. O modelo escolhido foi o de Gunn (1978) devido a sua ampla utilização, inclusive em trabalhos anteriores dos autores. O modelo empírico de Gunn (1978) calcula o número de Nusselt, com base nos números adimensionais de Reynolds ( $Re_s$ , calculado para os sólidos) e de Prandtl ( $Pr$ ), sendo aplicável para leitos com porosidade entre 0,35 e 1. A descrição matemática deste modelo é dada pela Equação 39.

$$Nu = (7 - 10\varepsilon_g + 5\varepsilon_g^2) \left( 1 + 0,7 Re_s^{0,2} Pr^{\frac{1}{3}} \right) + (1,33 - 2,4\varepsilon_g + 1,2\varepsilon_g^2) Re_s^{0,7} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (39)$$

Após o cálculo do número de Nusselt, o coeficiente de transferência de calor,  $h$ , é obtido usando a própria definição do número de Nusselt, dada pela Equação 40.

$$Nu = \frac{h_{gs} D_p}{\kappa} \quad (40)$$

onde  $\kappa$  representa a condutividade térmica.

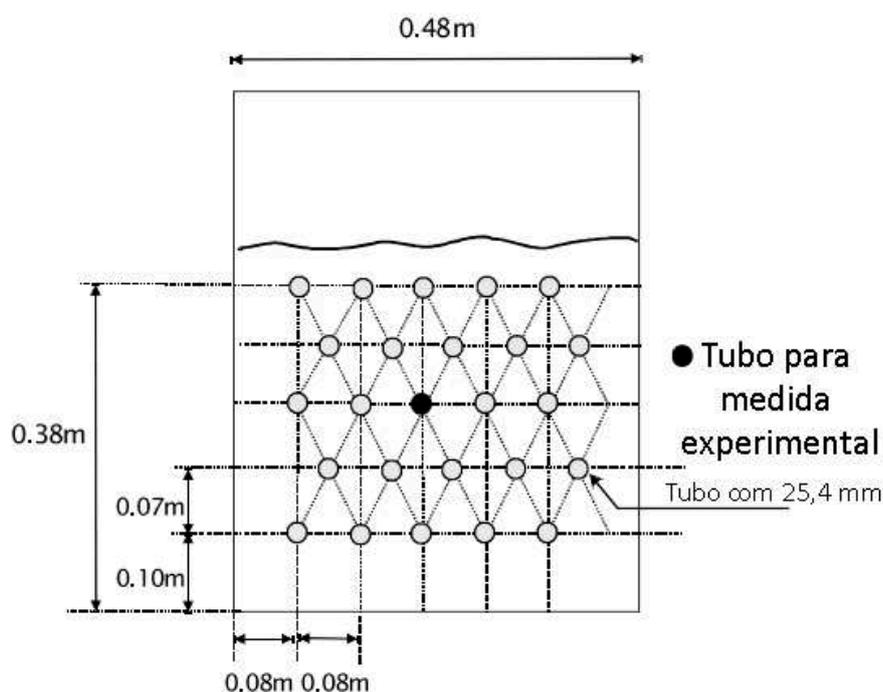
Os modelos apresentados são usados para a obtenção de propriedades necessárias à resolução dos balanços de massa, energia e quantidade de movimento. A descrição matemática destes balanços pode ser consultada em Bisognin, Fusco e Soares (2016).

### 3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Para descrever o processo de troca térmica utilizada em sistemas de energia solar concentrada, foi utilizado como base um estudo experimental de S. W. Kim *et al.* (2003b), no qual é apresentado um leito fluidizado com tubos horizontais dispostos ao longo do leito, sendo que o estudo de troca térmica se deu entre o leito e os tubos. A obtenção de um modelo computacional para este processo seguiu procedimentos padrões de validação de uma simulação, usando como referência os dados experi-

mentais obtidos no trabalho citado. A geometria computacional elaborada possui as mesmas dimensões que o módulo usado por S. W. Kim *et al.* (2003b), conforme a Figura 10, extraída do estudo do autor citado.

Figura 10 – Geometria usada na validação do modelo computacional bidimensional.



Fonte: S. W. Kim *et al.* (2003b)

Para definir como o domínio computacional deve ser dividido, de forma a não alterar significativamente os resultados, um estudo de independência de malha foi realizado seguindo os passos descritos no item 2.4 deste trabalho. Os resultados deste estudo estão expostos no Capítulo 4. A malha escolhida é dada na Figura 11.

Nesta fase de validação de um modelo computacional, as propriedades de ambas as fases foram tomadas como as mesmas que no trabalho experimental usado como base para o processo de validação. Estas propriedades são listadas na Tabela 1.

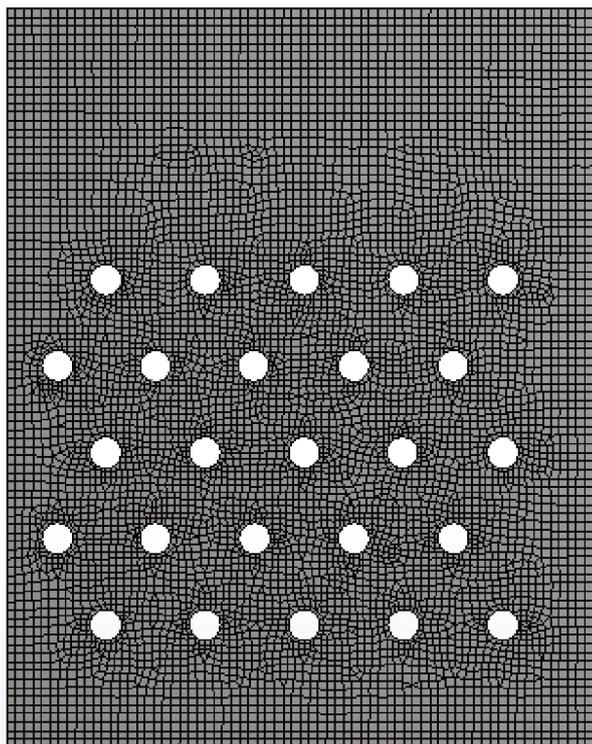
Tabela 1 – Propriedades do material granular usado na etapa de validação.

Material	Areia
Diâmetro das partículas esféricas ( $\mu\text{m}$ )	240
Massa específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2582
Velocidade mínima de fluidização (m/s)	0,048
Calor específico ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )	710

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

As condições de contorno utilizadas também foram extraídas do trabalho experimental. A velocidade do gás de fluidização foi considerada como 0,126 m/s na direção normal à fronteira inferior do leito (entrada do leito). Foi considerado que o tubo no qual

Figura 11 – Malha computacional.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

a transferência de calor estava sendo avaliada possuía uma temperatura constante, que foi medida pelos autores do trabalho experimental (KIM, S. W. *et al.*, 2003b). Nas paredes foi aplicada uma condição de não-escorregamento para ambas as fases.

Devido a passagem de bolhas pelo leite, há variações recorrentes no processo ao longo do tempo, motivo pelo qual optou-se por realizar as simulações em regime transiente. Um passo de tempo de 0,0002 s foi eleito com base em estudos prévios desenvolvidos pelos autores (BISOGNIN; FUSCO; SOARES, 2016). O esquema de discretização utilizado foi de segunda ordem e o acoplamento pressão-velocidade foi do tipo SIMPLE.

A variável resposta, coeficiente de transferência de calor, foi medida em diferentes pontos do tubo no trabalho experimental, sendo um desses pontos localizado no topo do tubo central em estudo. Os resultados da simulação foram considerados no ponto localizado no topo do tubo avaliado. Para comparação com os resultados do trabalho de S. W. Kim *et al.* (2003b), uma média temporal entre 5 e 15 s de simulação foi utilizada. Em estudos prévios notou-se que haviam oscilações no início da simulação devido a inicialização, por isso foram excluídos os primeiros 5 s de simulação. Também percebeu-se que ao realizar médias com um valor superior à 15 s havia pouca variação nos resultados, em relação às médias efetuadas até 15 s.

Todas as simulações realizadas apresentaram esta mesma configuração, tendo

apenas variações geométricas e nos parâmetros em estudo. Os resultados do coeficiente de transferência de calor para os estudos de otimização foram tomados como a média ao redor de todo o perímetro do tubo e não apenas em um ponto específico, assim como os resultados que foram utilizados para a etapa de validação.

### 3.3 SELEÇÃO DOS FATORES QUE MAIS INFLUENCIAM O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Inicialmente cinco fatores foram escolhidos para estudar seu impacto no parâmetro em estudo, sendo eles: o diâmetro das partículas, a condutividade térmica dos materiais que compõem as partículas, a velocidade do gás de fluidização, o diâmetro dos tubos de transferência de calor e a distância entre estes. O diâmetro da partícula e a condutividade térmica são propriedades do material, citados na literatura como fatores que impactam no coeficiente de transferência de calor (CALDERON *et al.*, 2018; BLASZCZUK; NOWAK; KRZYWANSKI, 2017; PAGLIUSO; LOMBARDI; GOLDSTEIN, 2000; MAHANTA; PATIL; PANDEY, 2010; WIMAN; ALMSTEDT, 1997). A obtenção de valores ótimos para estas propriedades facilitaria a escolha de um material a ser utilizado em um processo de geração de energia solar pela concentração da radiação solar em partículas.

A velocidade do gás de fluidização também é um fator que tem conhecido impacto na transferência de calor em leitos fluidizados. A variação do coeficiente de troca térmica com a velocidade do gás costuma apresentar uma relação diretamente proporcional, até que se atinja um ponto de máximo (AL-ARKAWAZI, 2018; YANG; ZHOU; QI, 2018). A partir deste ponto, há uma tendência de decaimento do coeficiente de transferência de calor com o aumento da velocidade do gás.

Os últimos dois aspectos escolhidos, o diâmetro dos tubos e a distância entre eles, são fatores geométricos que podem apresentar grande influência na fluidodinâmica do leito. O coeficiente de transferência de calor depende fortemente da distribuição das bolhas pelo leito e estes fatores podem alterar drasticamente esta condição, limitando a passagem do ar pelos espaços entre os tubos, caso estes estejam muito próximos, ou possibilitando uma maior liberdade na passagem de bolhas quando os tubos apresentam maior distância. Além disso, quando os tubos são menores, muitas vezes as bolhas envolvem os tubos em sua passagem, enquanto que quando há tubos de elevado diâmetro muitas vezes as bolhas se rompem, formando novas bolhas.

Como a utilização de cinco fatores em um planejamento experimental que forneça uma superfície de resposta resultaria em um número muito elevado de ensaios computacionais, inicialmente um planejamento fatorial fracionário do tipo  $2^{5-1}$  foi feito com apenas dois níveis para cada fator, a fim de verificar quais variáveis realmente contribuem significativamente com variações no resultado. Os valores máximos e mínimos para cada variável, nesta etapa, foram, respectivamente, 240  $\mu\text{m}$  e 690  $\mu\text{m}$  para o

diâmetro das partículas; 0,07 m/s e 0,12 m/s para a velocidade do gás de fluidização; 0,9 e 2,0 W/(m·K) para a condutividade térmica das partículas; 6 e 12 cm para a distância entre os tubos; 18 e 35 mm para o diâmetro dos tubos. Este planejamento resultou em 16 ensaios computacionais e os resultados destes ensaios são apresentados na seção seguinte. Os valores para as variáveis geométricas (diâmetro e distância entre os tubos) foram escolhidos para que houvesse uma grande variação em relação ao trabalho experimental tomado como base, porém de forma que os tubos não ficassem próximos ou grandes demais a ponto de impedir a passagem dos sólidos. Os valores do diâmetros das partículas e condutividade térmica foram escolhidos a partir de materiais mais utilizados na literatura. As velocidades selecionadas também foram embasadas no artigo experimental usado na validação (KIM, S. W. *et al.*, 2003b).

Para se ter uma ideia visual das dimensões e espaçamento dos tubos utilizados, a Figura 12 mostra as quatro diferentes geometrias utilizadas nesta etapa. Na parte (a) tem-se o maior diâmetro dos tubos (35 mm) e o maior espaçamento entre estes (12 cm). A parte (b) mostra a configuração geométrica, que consiste na menor distância entre os tubos e menor diâmetros deste (18 mm). As partes (c) e (d) da figura apresentam a distância entre os tubos, de 6 cm, e diâmetro de 35 mm e 18 mm, respectivamente.

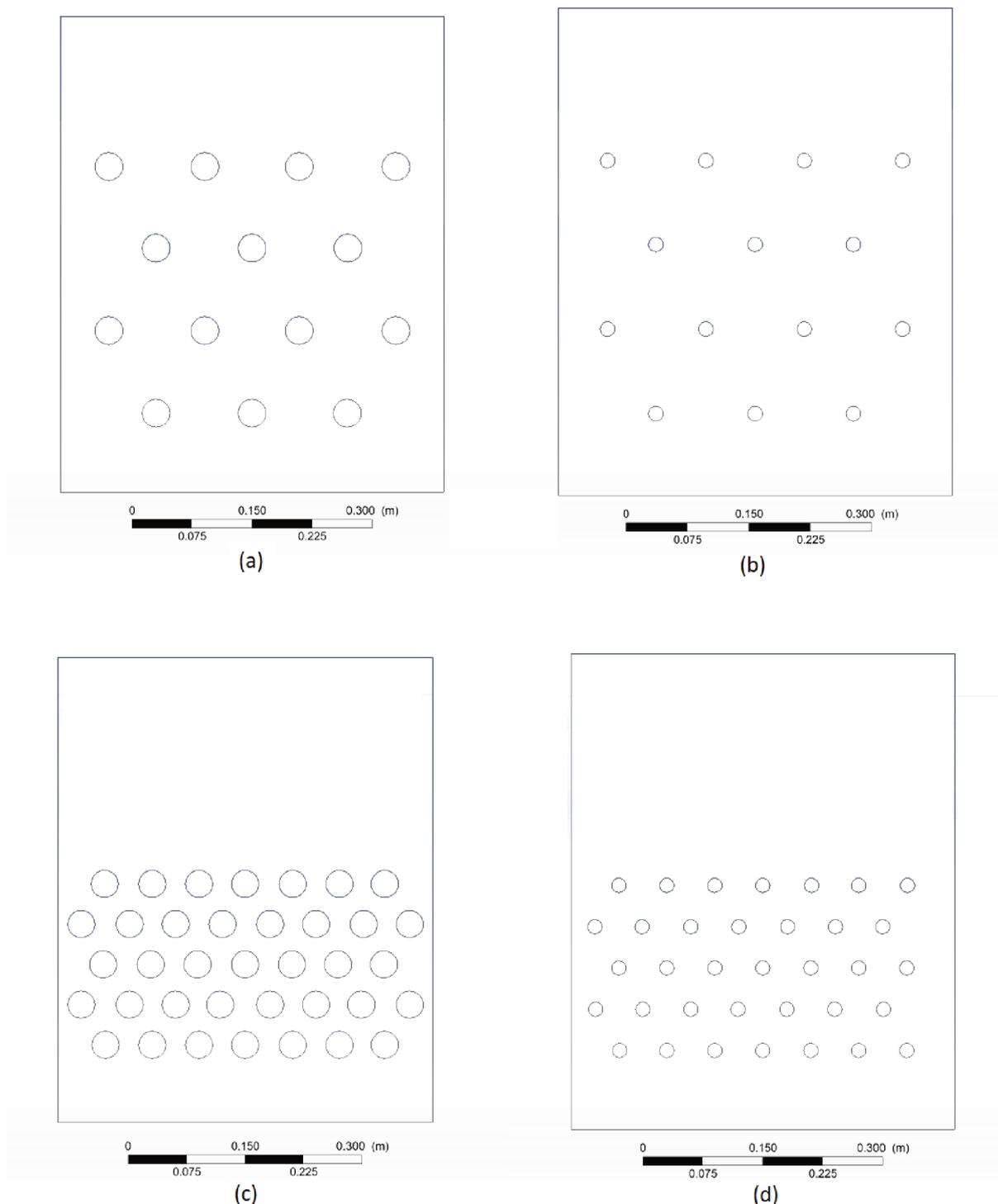
As geometrias selecionadas para esta fase do estudo apresentam diferenças significativas, pois o intuito é analisar se as variáveis relacionadas com estas geometrias apresentam significância estatística na variação dos resultados, o que é feito analisando os coeficientes de um modelo gerado com as respostas dos ensaios computacionais.

### 3.4 OTIMIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Após a seleção das variáveis mais importantes para o estudo do coeficiente de transferência de calor no sistema de leito fluidizado utilizado, um novo planejamento experimental foi efetuado a fim de ajustar um modelo para gerar uma superfície de resposta, de forma a investigar a existência de um ponto de máximo na região de busca selecionada. Um planejamento experimental fatorial completo com três fatores e quatro níveis para cada fator foi o escolhido para esta etapa por dois motivos: o primeiro é a necessidade de um alto volume de resultados para efetuar a segunda parte deste estudo, que consiste na elaboração de um meta-modelo por meio do uso de redes neurais; o segundo motivo é que um planejamento completo com mais de dois níveis possibilita a criação de um modelo quadrático, que é necessário para se obter a curvatura esperada em uma superfície de resposta.

Nesta etapa, optou-se por estender o alcance dos diâmetros de partícula, que variaram entre 200 e 800  $\mu\text{m}$ , sendo então os quatro níveis para esta variável dados por 200, 400, 600 e 800  $\mu\text{m}$ . Porém, o alcance total da variável distância entre os tubos foi mantida, variando de 6 a 12 cm, pois acreditou-se que caso o limite inferior para esta

Figura 12 – Geometrias utilizadas na triagem de fatores.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

variável fosse reduzido, os tubos ficariam muito próximos, impedindo a circulação de sólidos no leito. Já o limite superior - 12 cm - foi mantido, pois, caso fosse aumentado, os tubos ficariam muito afastados e poucos tubos seriam inseridos no leito. Desta forma, os 4 níveis para a distância entre os tubos são 6, 8, 10 e 12 cm. Já o diâmetro

dos tubos teve apenas uma pequena alteração no limite inferior, passando para 17 mm neste planejamento. Esta mudança foi feita apenas para que a divisão do alcance total da variável em 4 níveis pudesse ser uniformizada (17 - 23 - 29 - 35 mm).

Como houve pouca variação nos valores extremos escolhidos para as variáveis geométricas neste estudo, níveis intermediários foram acrescentados. As geometrias extremas utilizadas foram basicamente iguais às aquelas mostradas na Figura 10.

A análise dos resultados obtidos com o planejamento fatorial completo não indicou nenhum ponto de máximo dentro da região de busca analisada. Por este motivo, um novo planejamento experimental foi proposto, em uma nova região de busca, escolhida com base nos resultados do planejamento anterior. Como uma relação linear entre o diâmetro das partículas e a variável resposta em estudo (o coeficiente de transferência de calor) foi percebida, esta variável foi mantida constante nesta etapa, já que comercialmente seria difícil encontrar materiais com diâmetros inferiores ao limite do estudo anterior. Assim, apenas a distância entre os tubos e o diâmetro destes foram analisados.

O planejamento experimental proposto para esta etapa foi do tipo composto central, que é bastante indicado para a geração de superfícies de resposta e não resulta em um número excessivo de ensaios. Para este planejamento foi considerado o nível -1 para o diâmetro dos tubos como 35 mm (o maior diâmetro do ensaio anterior), e para o nível +1 foi considerado 37 mm. Já a distância entre os tubos teve com níveis -1 e +1 os valores de 5 cm e 6 cm, respectivamente. O valor de  $\alpha$  considerado foi de 1,41214.

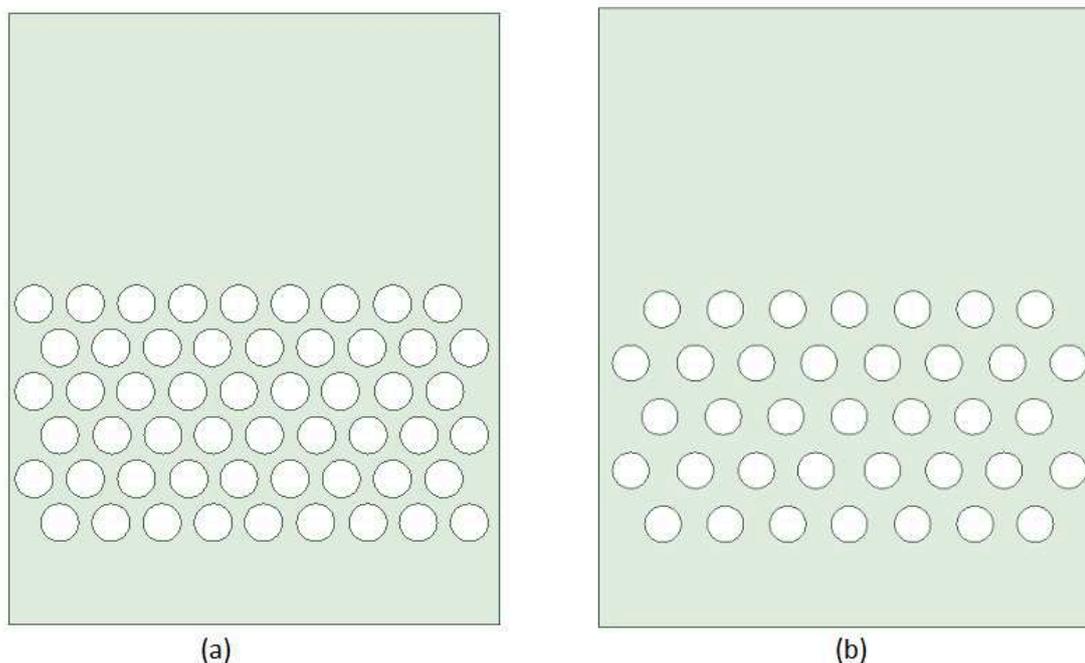
Para se ter uma ideia das variações geométricas referentes à região de busca deste novo planejamento experimental, são apresentadas as duas geometrias extremas na Figura 13. Na parte (a) desta figura mostra-se o arranjo nos quais os tubos estão mais próximos, enquanto que na parte (b) o arranjo que apresenta uma maior distância entre os tubos, ou seja, uma maior região para a passagem de bolhas.

Os resultados deste planejamento experimental central composto, assim como um modelo que se ajusta a estes dados, e sua análise, são mostrados na seção seguinte. A análise dos resultados dos dois planejamentos experimentais realizados na etapa de otimização permitiram a inferência de um ponto de ótimo para o projeto geométrico de um trocador de calor de leito fluidizado.

### 3.5 OTIMIZAÇÃO DA TROCA TÉRMICA ENTRE OS TUBOS SUBMERSOS E O LEITO

Os estudos prévios possibilitaram uma melhor compreensão no que concerne ao coeficiente de transferência de calor. Esse coeficiente, embora seja o objeto principal de estudo de boa parte de publicações técnico-científicas da área, não permite a otimização de um equipamento de engenharia, cujo principal objeto é maximizar

Figura 13 – Geometrias limites do planejamento central composto.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

as temperaturas obtidas. Para isso, uma variável resposta mais apropriada é o calor total trocado na superfície de todos os tubos. Utilizando o calor como resposta em um processo de otimização será possível obter respostas mais diretas para o problema que se deseja solucionar: obter partículas mais quentes em um trocador de leito fluidizado inserido em um sistema de geração de energia solar concentrada. Para fazer este estudo foi considerado um sistema de energia solar concentrada cuja seção de aquecimento das partículas se subdivide em três partes: a seção de preaquecimento, a seção de aquecimento e a seção de superaquecimento. A seção escolhida para este estudo é a de preaquecimento, onde as partículas já perderam energia na forma de calor nas seções anteriores. Após o aquecimento pela radiação solar, as partículas entram na seção de superaquecimento, onde se encontra a água já previamente aquecida pelos setores anteriores. Para o setor de preaquecimento será considerada que a água está entrando em temperatura ambiente (considerada como 300 K), enquanto as partículas estão a uma temperatura de 373 K. Dessa forma, não há transferência de calor por radiação, pois a diferença entre as temperaturas dos tubos e das partículas é pequena.

Para fazer o estudo de otimização foi feito um novo planejamento experimental do tipo composto central (CCD). As variáveis usadas foram as mesmas obtidas no final do estudo anterior: o diâmetro dos tubos internos do trocador de calor de leito fluidizado e a distância entre estes. Desta forma o planejamento experimental resultou

em 9 ensaios, cujos valores de cada nível atribuído às duas variáveis são dados na Tabela 2:

Tabela 2 – Níveis referentes ao primeiro planejamento experimental da otimização da troca térmica

	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
Diâmetro dos tubos (mm)	19,5	22	28	34	36,5
Distância entre os tubos (mm)	42,2	56,3	60,6	73,6	79

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Em todos os ensaios o número de linhas de tubos foi padronizado em 5. A velocidade do gás de fluidização foi mantida em 0,12 m/s. As geometrias que compõem o planejamento composto central a ser efetuado são dadas na Figura 14.

Conforme pode ser visto pelas geometrias, o tamanho do leito permaneceu o mesmo, porém o tamanho dos tubos e o distanciamento entre este tiveram alterações. Consequentemente, o número de tubos em cada ensaio também apresentou variação. Para tomar a decisão de fixar o tamanho do leito, porém variar o número de tubos considerou-se que em termos práticos é mais interessante aumentar o calor total transferido em um mesmo tamanho de equipamento, variando apenas a geometria, disposição e quantidade de tubos submersos. A seção seguinte apresenta os resultados para este planejamento experimental, onde vê-se que o ponto de ótimo não foi obtido. Dessa forma uma nova região de busca foi proposta, sendo centrada na geometria 7, que foi aquela com o maior calor trocado. Dessa forma, novo planejamento experimental composto central com dois níveis é proposto. Os níveis das novas geometrias são dados na Tabela 3.

Tabela 3 – Níveis referentes ao segundo planejamento experimental da otimização da troca térmica

	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
Diâmetro dos tubos (mm)	35,07	35,48	36,48	37,48	37,62
Distância entre os tubos (cm)	6,29	6,5	7	7,5	7,71

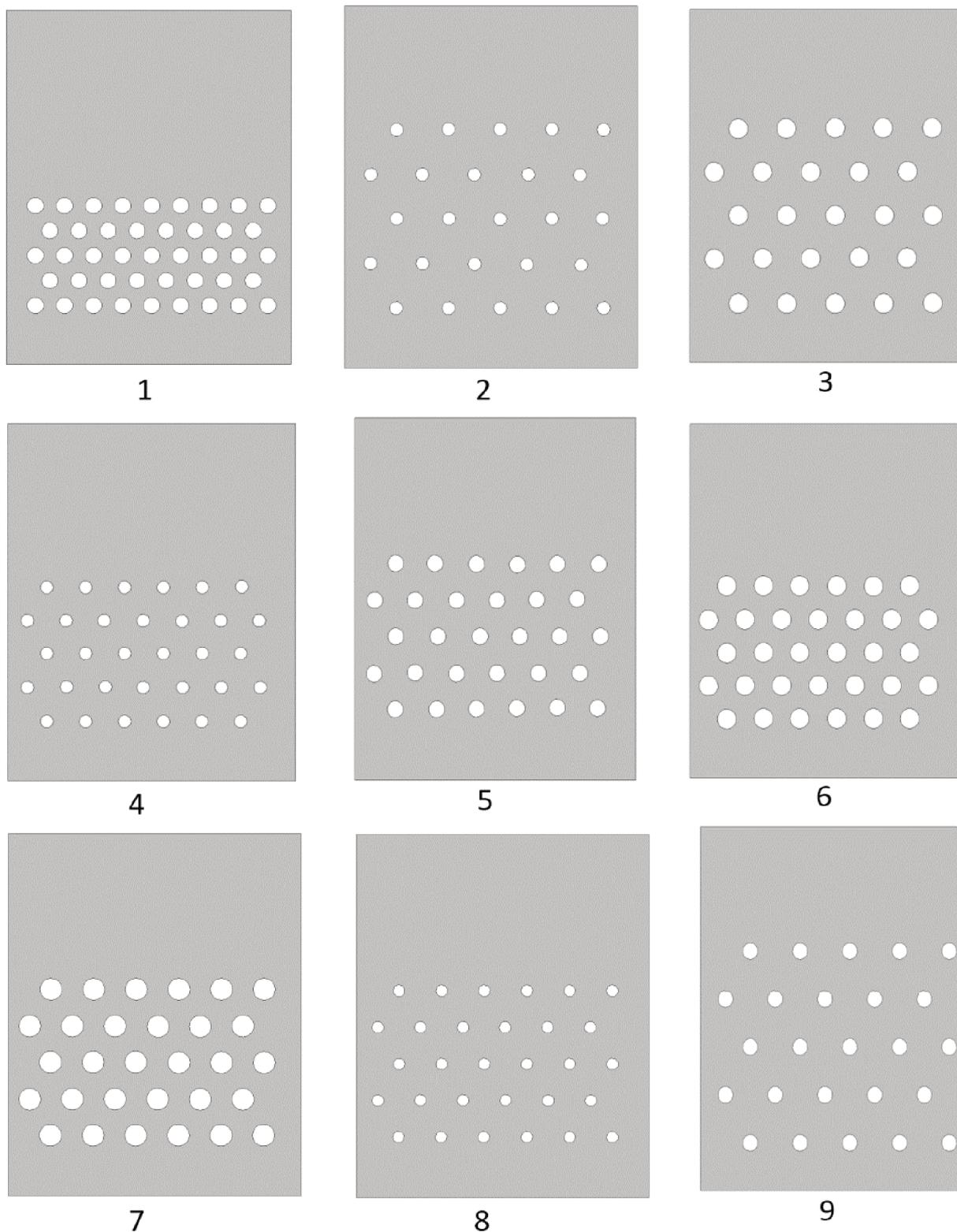
Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

As geometrias geradas para esse novo planejamento são dadas na Figura 15.

### 3.6 GERAÇÃO DE UM META-MODELO UTILIZANDO REDES NEURAI E OTIMIZAÇÃO COM ALGORITMOS GENÉTICOS

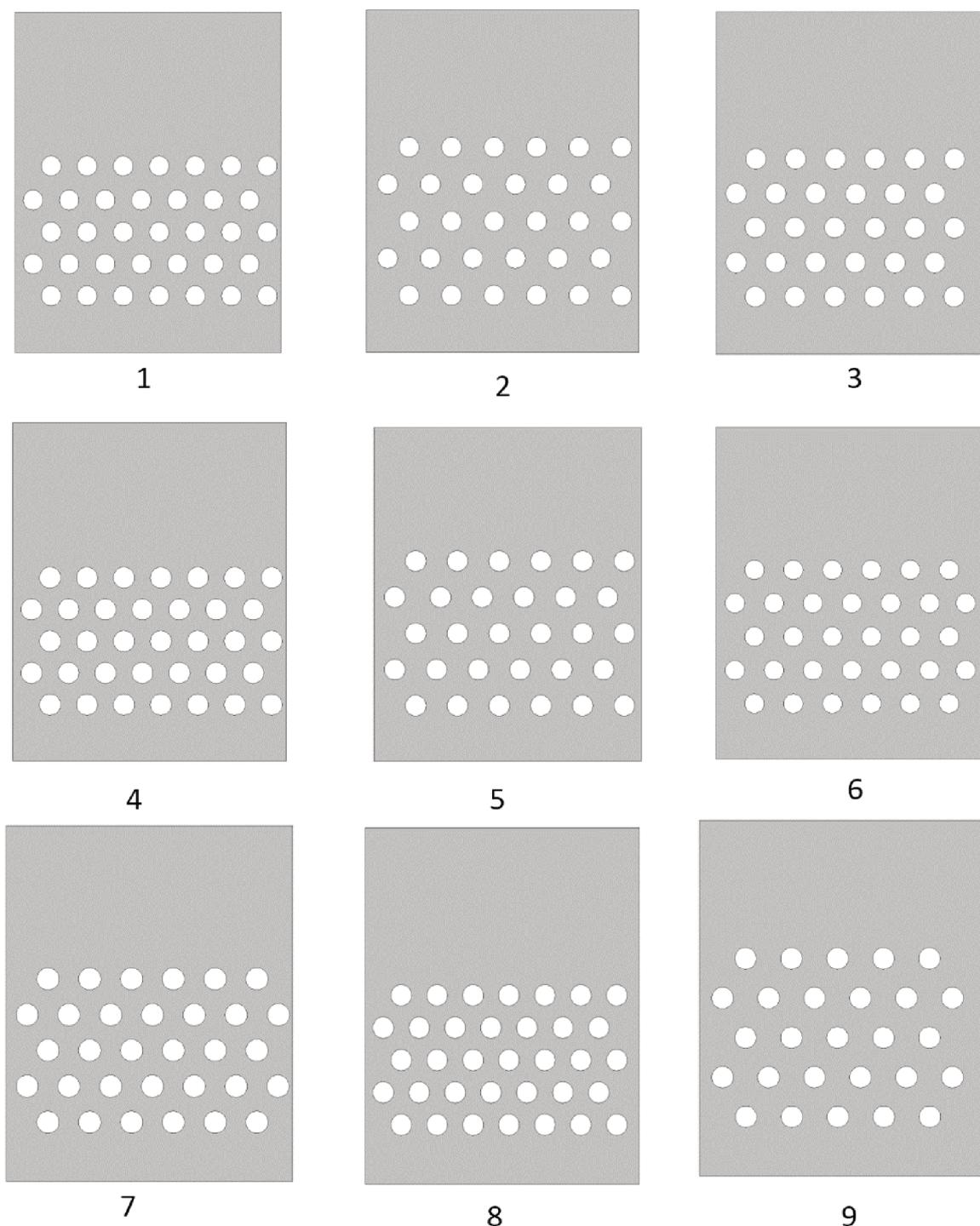
A etapa final deste trabalho consistiu na proposta de uma metodologia de otimização que combina redes neurais e algoritmos genéticos. A elaboração do meta-modelo foi feita utilizando o software Mathworks Matlab 19. No software foram carregados os

Figura 14 – Geometrias usadas no primeiro planejamento composto central para otimização da troca térmica.



Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Figura 15 – Geometrias usadas no segundo planejamento composto central para otimização da troca térmica.



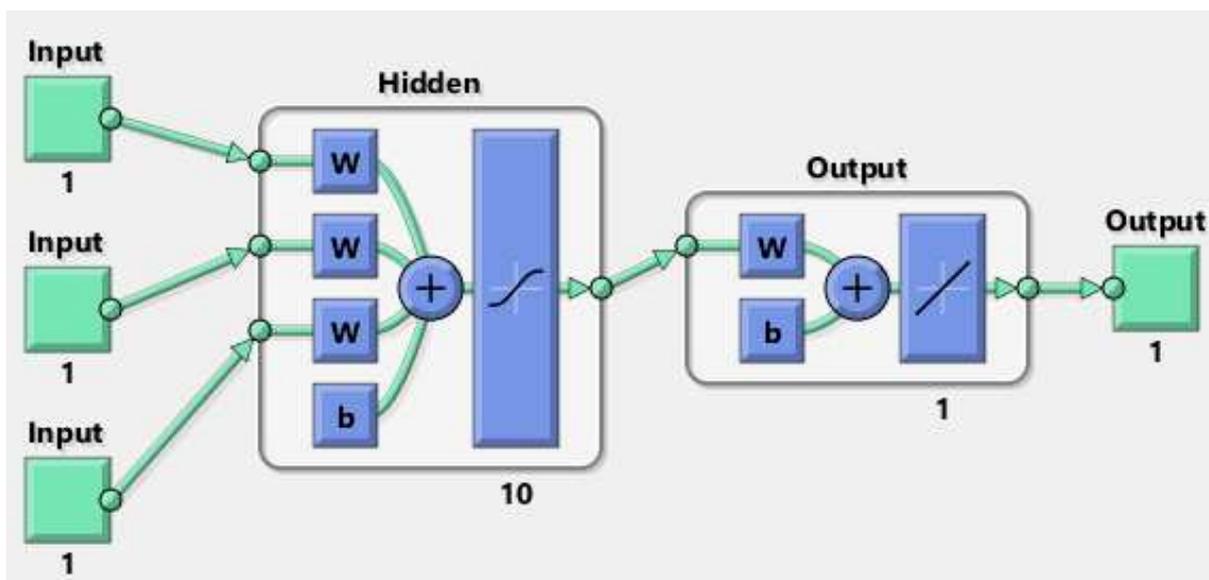
Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

dados do planejamento fatorial completo de 4 níveis, feito na etapa de otimização do coeficiente de troca térmica. Esse planejamento, que consiste em um elevado número

de ensaios, já foi efetuado para que fosse possível ter uma maior quantidade de dados para o treinamento e supervisão da rede neural.

Uma rede neural com uma camada escondida, contendo 10 neurônios, foi gerada. O método utilizado para a definição dos pesos pelo software é o método de retropropagação de Levenberg-Marquardt. Uma representação da arquitetura da rede é dada na Figura 16.

Figura 16 – Arquitetura da rede neural.



Fonte: desenvolvido pela autora (Matlab) (2020).

Como é possível observar o número de entradas para este caso é três. Essas entradas se referem aos valores de diâmetro das partículas, diâmetros dos tubos e distância entre os tubos, usados como variáveis para o estudo de otimização do coeficiente de troca térmica. A saída neste problema é o próprio coeficiente de troca térmica.

A partir dos valores fornecidos pelo programa para os pesos referentes às conexões entre entradas e neurônios, neurônios e saída e também os pesos referentes ao bias (que pode ser pensado como equivalente a constante de uma regressão linear), foi possível gerar uma função matemática que passa pelos seguintes procedimentos: multiplicações das matrizes dos pesos pelas entradas, aplicação da função ativação, multiplicação dos resultados da função ativação pelos pesos das conexões entre neurônios e saídas, e conversão do resultado final. A função ativação, para uma entrada  $n$  qualquer, é dada pela Equação 41, enquanto que a conversão do valor de saída da rede, denotado por  $z$ , para o valor final, denotado por  $y$ , é dada pela Equação 42, onde o valor de 191,86 é o coeficiente de transferência de calor mínimo obtido e 0,00352 é igual a duas vezes o valor inverso da subtração entre o coeficiente máximo e o coefici-

ente mínimo. O sinal de negativo no lado direito da Equação 42 foi adicionado pois o padrão do Matlab é minimizar a função objetivo por algoritmos genéticos.

$$a = \frac{2}{1+e^{-2n}} - 1 \quad (41)$$

$$y = -\left(z - \frac{-1}{0.00352+191.859}\right) \quad (42)$$

Tendo a função adaptação, foi possível efetuar a otimização com algoritmos genéticos. Para isso foi usado a Toolbox de otimização presente no Matlab 19. A fração de crossover utilizada foi de 0,8 e a taxa de mutação foi de 0,01. A população inicial foi de 50 indivíduos e as restrições aplicadas foram que o limite inferior não deveria ser menor que -1 e o limite superior não deveria exceder 1 (foi trabalhado com os valores normalizados para as variáveis).

Utilizando as metodologias apresentadas neste capítulo foram obtidos os resultados de otimização apresentados e analisados no capítulo seguinte.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados obtidos com os procedimentos apresentados no capítulo anterior serão expostos e analisados com base nos objetivos deste trabalho.

### 4.1 RESULTADOS DO TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA

Para calcular o Índice de Convergência de Malha e verificar se os resultados obtidos com diferentes malhas encontravam-se no intervalo assintótico, optou-se por utilizar 3 diferentes malhas, compostas por tamanho de células com uma razão de refino igual a  $r = 1,4$ . Os tamanhos de células utilizadas neste estudo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Espaçamento das células

$h_1$	5 mm
$h_2$	7 mm
$h_3$	9,8 mm

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

A queda de pressão é uma variável importante quando se estuda a fluidodinâmica de leitos fluidizados, sendo que pressão é um dos resultados obtidos diretamente a partir das equações governantes. Além disso, a queda de pressão é uma medida que não apresenta flutuações tão drásticas ao longo do tempo, como é o caso de medidas pontuais, como o coeficiente de transferência de calor. Por esses motivos, a queda de pressão foi escolhida para comparar as simulações realizadas nas diferentes malhas. A Tabela 5 mostra os valores pontuais de queda de pressão para as diferentes malhas, com 5 s de tempo de simulação.

Tabela 5 – Queda de pressão para diferentes malhas numéricas.

$f_1$	5607,1 Pa
$f_2$	5600,9 Pa
$f_3$	5534,5 Pa

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Utilizando a Equação 4 calcula-se diretamente a ordem  $p$ , a partir dos resultados de queda de pressão, mostrados na Tabela 5, e da razão de refino utilizada ( $r = 1,4$ ). Esse valor deve ser arredondado, pois a ordem deve ser um número inteiro. Com a Equação 8, que representa a extrapolação de Richardson generalizada, obtém-se uma estimativa para a queda de pressão num caso contínuo, ou seja, quando o tamanho das células tende a zero. Dois índices de convergência de malha (ICM) são calculados pela Equação 11: o ICM das malhas 2 e 3 ( $ICM_{23}$ ) e o ICM das malhas 1 e 2 ( $ICM_{12}$ ). Todos esses resultados mencionados são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Resultados do estudo de convergência de malha

$\rho$	7,089 $\approx$ 7
$f_{h=0}$	5606,4 Pa
$ICM_{23}$	0,15 %
$ICM_{12}$	1,64 %

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Os resultados para o índice de convergência de malha estão abaixo de 5 %, o que mostra que há pouca variação dos resultados para diferentes malhas, especialmente entre as malhas 1 e 2, que são as malhas mais refinadas. Quando o erro relativo entre os resultados dessas malhas é calculado obtém-se um valor de apenas 0,1 %, o que confirma que os resultados apresentados por estas malhas são bastante próximos. Outra importante análise a ser feita neste estudo é verificar se os resultados se encontram na região assintótica de convergência, o que é feito com a averiguação da validade da igualdade mostrada na Equação 12. Calculando a razão entre os termos mostrados na Equação 12 obtém-se  $ICM_{23}/(ICM_{12} \cdot r^p) = 1,03$ . Como o valor resultante dessa razão está muito próximo de 1, pode-se afirmar que os resultados se encontram na região assintótica de convergência.

Esta mesma análise foi efetuada com resultados médios da queda de pressão, obtidos entre 5 e 10 s de simulação, presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – Queda de pressão média para diferentes malhas

Malha	Queda de pressão média entre 5 e 10 s
Malha 1	5574,9 Pa
Malha 2	5556,2 Pa
Malha 3	5529,8 Pa

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Utilizando esses valores médios, os índices de convergência de malha ( $ICM_{23}$ ) e ( $ICM_{12}$ ) foram novamente calculados. Estes resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Índices de convergência de malha calculados com a queda de pressão média

$(ICM_{23})$	$(ICM_{12})$
2,078 %	1,468 %

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Com os valores de índice de convergência de malha expostos na Tabela 8 também é possível verificar que os resultados encontram-se na região assintótica de convergência, pois a razão entre os termos da Equação 12 fica muito próxima da unidade:  $ICM_{23}/(ICM_{12} \cdot r^p) = 1,012$ .

Por fim, uma análise mais tradicional para o estudo de independência de malha foi efetuada, comparando-se resultados médios do coeficiente de transferência de

calor, obtido entre 5 e 10 s de simulação, para as três diferentes malhas. Os resultados médios para o coeficiente de transferência de calor são mostrados na Tabela 9 e os erros relativos entre esses resultados são expostos na Tabela 10.

Tabela 9 – Valores médios do coeficiente de transferência de calor calculados com diferentes malhas

Malha	Coeficiente de transferência de calor médio ( $W/(m^2 \cdot K)$ )
Malha 1	511,4
Malha 2	484,7
Malha 3	413,2

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Tabela 10 – Erros relativos entre coeficiente de transferência de calor médio para diferentes malhas

Malhas	Erro relativo
Malhas 2 e 3	14,75 %
Malhas 1 e 2	5,2 %

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Utilizando o índice de convergência de malha verificou-se que os resultados para queda de pressão encontram-se na região assintótica de convergência para as 3 malhas analisadas. Porém, uma análise mais tradicional, comparando os erros relativos entre os resultados, mostrou que os resultados das malhas 1 e 2 são mais próximos (possuem um baixo erro relativo). Além disso, o ICM calculado para as malhas 1 e 2 também foi significativamente menor do que para as malhas 2 e 3. Considerando-se estes resultados, a malha 2 foi escolhida para dar prosseguimento aos estudos, visto que esta apresenta-se na região assintótica de convergência, possui baixo erro relativo em relação à malha mais refinada (malha 1), mas por não possuir o menor tamanho de célula irá garantir que os tempos de simulação não sejam tão elevados, viabilizando a realização de mais estudos.

#### 4.1.1 Validação do Modelo Computacional

O estudo computacional realizado foi feito com base no trabalho experimental de S. W. Kim *et al.* (2003b), que analisaram características de um leito com um conjunto de tubos submersos. No referido trabalho o coeficiente de transferência de calor no tubo central do arranjo foi medido em diferentes posições. Para obter uma comparação direta entre o trabalho experimental e o modelo computacional, a posição de  $0^\circ$  foi adotada, equivalente a posição do número 9 em um relógio. Nessa posição, os autores do trabalho experimental obtiveram um coeficiente de transferência de calor médio em torno de  $450 W/(m^2 \cdot K)$ .

Utilizando a malha escolhida pelo estudo anterior, a geometria, as condições de contorno e as configurações detalhadas na seção de metodologia, foi obtido um coeficiente de transferência de calor médio de  $487,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Desta forma, a diferença percentual entre o estudo experimental de S. W. Kim *et al.* (2003b) e o estudo computacional realizado foi de apenas 8,4 %, o que comprova o êxito obtido pelo modelo computacional em descrever o fenômeno físico da fluidização.

O passo de tempo escolhido, 0,0002 s, para a realização das simulações presentes nesse trabalho foi baseado em outros trabalhos científicos que continham simulações de leitos fluidizados. Esse passo de tempo é suficientemente pequeno para que o número de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) seja inferior a 1. Essa condição assegura que a distância pela qual uma informação é transportada em um passo de tempo seja inferior ao tamanho de uma célula, de forma que, a cada passo de tempo, a informação seja transportada apenas a células vizinhas.

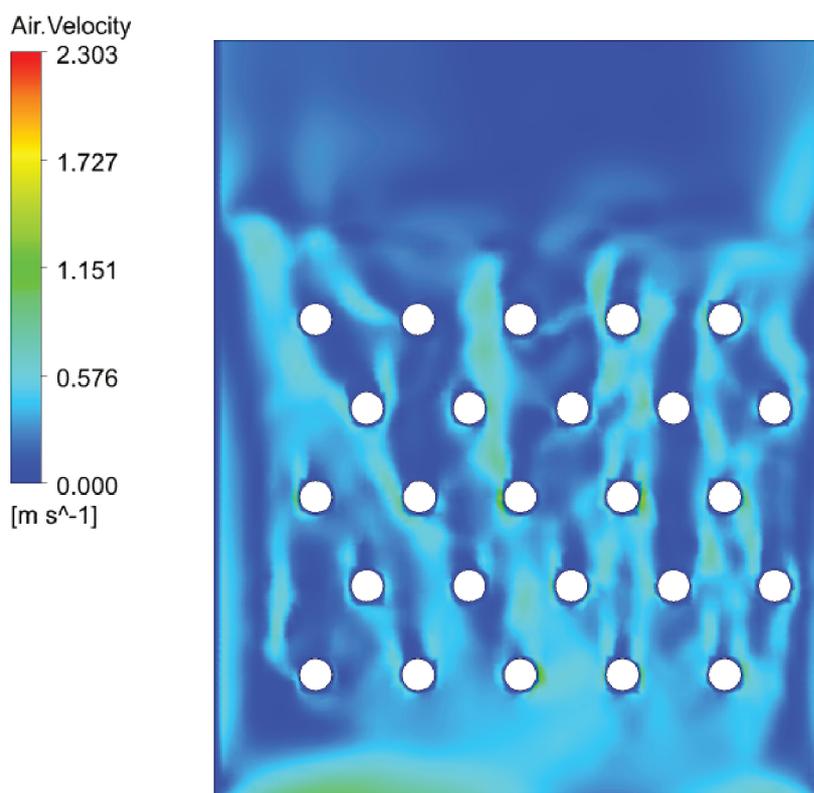
#### 4.1.2 Fluidodinâmica

A inserção de superfícies no interior de um leito fluidizado modifica o comportamento dos sólidos e dos fluidos no interior do mesmo. Tanto a velocidade do ar quanto o padrão de dispersão de bolhas são alterados conforme a geometria e tamanho das superfícies presentes no leito. A observação destes fenômenos pode ser feita por meio de ferramentas de pós processamento acopladas a códigos comerciais de fluidodinâmica computacional. Na Figura 17 é observada a velocidade do ar no leito após 5 s de tempo real de simulação. Na entrada do leito, assim como ao redor dos tubos, há zonas com velocidades superiores. A presença de velocidades maiores ao redor dos tubos é causada pela redução da área disponível causada pela inserção dos tubos. Além disso, esses picos de magnitude da velocidade condizem com a presença de bolhas, que tendem a se concentrar ao redor dos tubos, como mostra a Figura 18, que apresenta a fração de sólidos no leito, também após 5 s de simulação. A Figura 18 mostra a presença de bolhas, de tamanhos regulares, ao redor dos tubos e também uma área de maior diluição do leito próximo ao distribuidor. Além disso, também se observa que há uma expansão do leito, porém esta é pequena, de modo que não há transporte de partículas para o exterior do leito, indicando um regime borbulhante bem definido.

## 4.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE TRIAGEM DE FATORES

Para determinar quais fatores são mais relevantes no aumento do coeficiente de transferência de calor, um planejamento experimental fatorial do tipo  $2^{5-1}$  foi proposto. Este tipo de planejamento experimental é útil na fase de triagem de fatores, pois reduz o número de experimentos computacionais necessários, mas sem que os efeitos

Figura 17 – Velocidade do ar em 5 s de simulação.



Fonte: desenvolvido pela autora (2020).

principais sejam confundidos com efeitos de interação entre dois fatores.

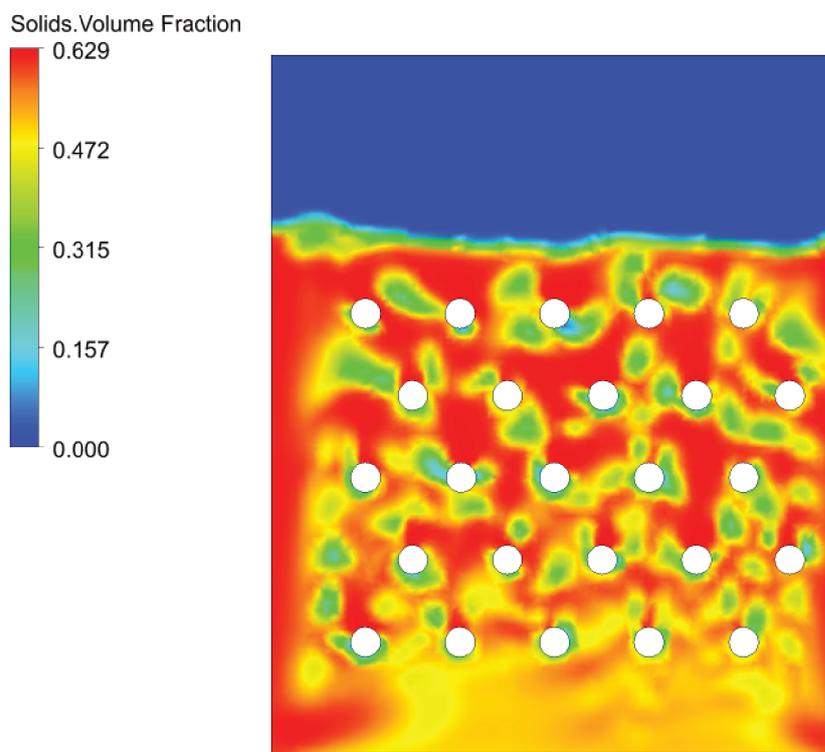
Os fatores escolhidos para esta triagem foram: o diâmetro da partícula, a velocidade do gás de fluidização, a condutividade térmica das partículas, o diâmetro dos tubos submersos no leito e a distância entre estes tubos. Estes foram escolhidos com base nas diretrizes indicadas no capítulo anterior.

A Tabela 11 mostra os níveis escolhidos para cada um dos 5 fatores mencionados. Os níveis foram selecionados de forma que abrangessem uma ampla margem de valores. Caso a faixa de valores selecionada fosse pequena, seria possível que uma pequena variação dos resultados decorrente dessa escolha mascarasse efeitos que são significativos. Porém não mostraram significância estatística pois produziram pouca variação nos resultados em decorrência da proximidade dos valores escolhidos como níveis.

A distância entre os tubos foi definida considerando-se que os tubos se encontram em um arranjo triangular, sendo que a distância mencionada seria o lado de um triângulo equilátero, como mostra a Figura 19.

O planejamento experimental escolhido,  $2^{5-1}$ , resulta em 16 ensaios computacionais. Os resultados desses ensaios foram tomados como a média do coeficiente de transferência de calor ao redor do tubo que se encontra na posição central da terceira

Figura 18 – Fração volumétrica dos sólidos em 5 s de simulação.



Fonte: desenvolvido pela autora (2020).

Tabela 11 – Fatores e seus níveis utilizados no estudo de triagem de fatores

Fator	Níveis	
	-1	1
Diâmetro das partículas em $\mu\text{m}$ ( $D_p$ )	240	690
Velocidade em m/s ( $Vel$ )	0,07	0,12
Condutividade térmica em $W/(m \cdot K)(K)$	0,9	2,0
Distância entre os tubos em cm ( $Dist$ )	6	12
Diâmetro dos tubos em mm ( $D_t$ )	18	35

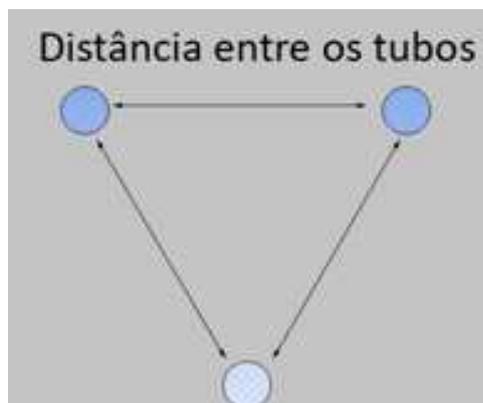
Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

fileira a partir do distribuidor. Essa média foi efetuada entre 5 e 10 s de simulação a fim de excluir os efeitos de inicialização. O planejamento experimental e seus resultados são dados na Tabela 12.

Com estes resultados, um modelo que contabiliza todos os fatores listados e todas as interações entre dois fatores foi ajustado. O gráfico de Pareto para os coeficientes deste modelo é dado na Figura 20.

Por este gráfico pode-se ver que o efeito mais significativo é o diâmetro das partículas, que apresenta efeito negativo, ou seja, conforme o diâmetro das partículas diminui, o coeficiente de transferência de calor aumenta. Outro efeito que apresentou um significativo efeito negativo foi o diâmetro dos tubos, pois os tubos maiores tendem a impedir o movimento livre das bolhas, afetando de forma pronunciada a fluidodinâmica

Figura 19 – Arranjo triangular dos tubos.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Tabela 12 – Resultados do planejamento experimental para triagem de fatores.

Ensaio	Dp	Vel	K	Dt	Dist	h (W/(m <sup>2</sup> ·K))
1	1	-1	-1	-1	1	558,48
2	-1	-1	-1	-1	-1	670,69
3	1	1	-1	-1	-1	381,62
4	-1	1	-1	-1	1	670,22
5	1	-1	1	-1	-1	521,01
6	-1	-1	1	-1	1	635,14
7	1	1	1	-1	1	592,13
9	1	-1	-1	1	-1	289,79
8	-1	1	1	-1	-1	715,97
10	-1	-1	-1	1	1	570,87
11	1	1	-1	1	1	359,38
12	-1	1	-1	1	-1	634,68
13	1	-1	1	1	1	365,07
14	-1	-1	1	1	-1	726,60
15	1	1	1	1	-1	370,43
16	-1	1	1	1	1	587,52

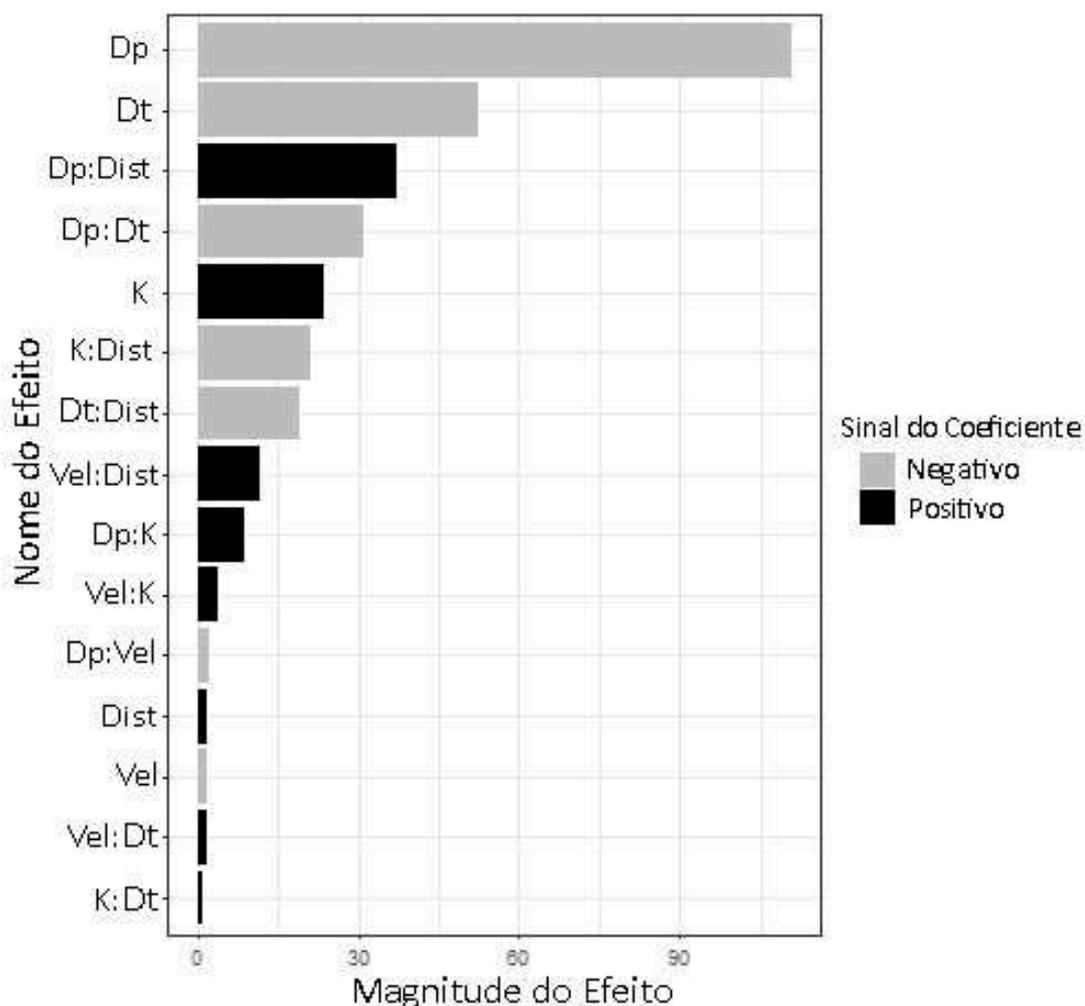
\*onde h é o coeficiente de transferência de calor

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

do leito ao redor dos tubos, o que causou a diminuição do coeficiente de transferência de calor. Pela Figura 20 vê-se que as interações entre a condutividade térmica das partículas e o tamanho dos tubos praticamente não interferem nos resultados, de maneira que esta interação será excluída do modelo. Desta forma, tem-se graus de liberdade suficientes para calcular os p-valores de cada um dos coeficientes, o que é dado na Tabela 13.

Analisando-se os p-valores é possível verificar que os efeitos mais significativos são o diâmetro da partícula e o diâmetro dos tubos, conforme já havia sido mostrado pelo gráfico de Pareto. Considerou-se que coeficientes com p-valores superiores a 0,05 não são significativos. Portanto, estes efeitos serão descartados para a execução de um novo modelo. De um modo geral, percebe-se que os coeficientes menos significativos são a velocidade e suas interações. Uma possível causa para este re-

Figura 20 – Gráfico de Pareto para a triagem de fatores.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Tabela 13 – Coeficientes do modelo com todos os fatores e interações, exceto K:Dt.

	Estimado	Erro	t-valor	P-valor
Intercepto	540,601	0,730	740,910	0,001
Dp	-110,861	0,730	-151,939	0,004
Vel	-1,607	0,730	-2,203	0,271
K	23,633	0,730	32,390	0,020
Dt	-52,557	0,730	-72,031	0,009
Dist	1,751	0,730	2,399	0,251
Dp:Vel	-2,244	0,730	-3,076	0,200
Dp:K	8,788	0,730	12,044	0,053
Dp:Dt	-31,014	0,730	-42,506	0,015
Dp:Dist	37,275	0,730	51,087	0,012
Vel:K	3,886	0,730	5,326	0,118
Vel:Dt	1,566	0,730	2,147	0,278
Vel:Dist	11,567	0,730	15,853	0,040
K:Dist	-21,021	0,730	-28,810	0,022
Dt:Dist	-19,084	0,730	-26,155	0,024

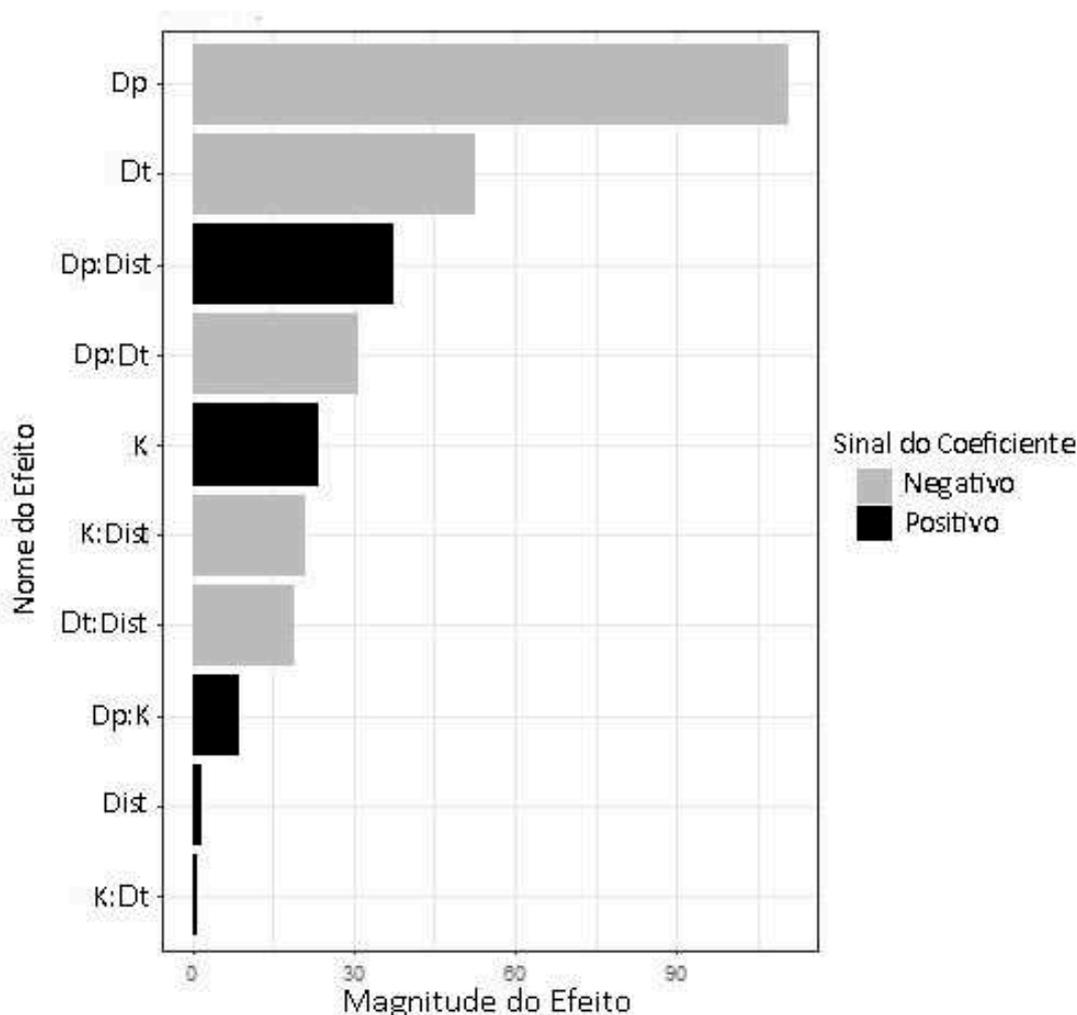
$R^2 = 0,9999$

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

sultado vem do fato de que fatores geométricos também estão sendo estudados, de forma que possivelmente uma alteração drástica na geometria do sistema apresenta uma contribuição maior na modificação dos fenômenos de troca térmica, quando comparados com a velocidade do gás de fluidização. Com relação à velocidade, a única interação que apresentou significância foi entre a velocidade e a distância dos tubos. Porém, como este estudo é realizado com o intuito de eliminar os fatores que menos contribuem para variações no coeficiente de transferência de calor, a velocidade foi eliminada.

Um novo modelo foi elaborado levando em consideração os diâmetros das partículas e dos tubos, além da condutividade do material e da distância entre os tubos. O gráfico de Pareto para este novo modelo é dado na Figura 21.

Figura 21 – Gráfico de Pareto para triagem de fatores excluindo a velocidade



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Novamente observa-se que as contribuições mais significativas são os diâmetros das partículas e dos tubos. Para analisar quantitativamente os coeficientes deste modelo uma análise dos p-valores, mostrados na Tabela 14, é recomendada.

Tabela 14 – Coeficientes de um modelo que exclui a velocidade do gás.

	Estimado	Erro	t-valor	P-valor
Intercepto	540,601	5,639	95,876	0,000
Dp	-110,861	5,639	-19,661	0,000
K	23,633	5,639	4,191	0,009
Dt	-52,557	5,639	-9,321	0,000
Dist	1,751	5,639	0,310	0,769
Dp:K	8,788	5,639	1,558	0,180
Dp:Dist	37,275	5,639	6,611	0,001
Dp:Dt	-31,014	5,639	-5,500	0,003
K:Dt	0,730	5,639	0,129	0,902
K:Dist	-21,021	5,639	-3,728	0,014
Dt:Dist	-19,084	5,639	-3,385	0,020

$R^2 = 0,99163$

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Pelos resultados expostos na tabela, apesar da distância entre os tubos não apresentar significância, suas interações com os demais fatores são representativas. Já a condutividade apresenta significância como efeito principal, porém suas interações com o diâmetro da partícula e com o diâmetro dos tubos não são significativas.

Novos dois modelos foram comparados com o modelo acima: o primeiro deles contabilizou os efeitos e interações do diâmetro das partículas, diâmetro dos tubos e condutividade, ou seja, excluiu a distância entre tubos, e foi chamado de modelo 2. O outro modelo considerou apenas os diâmetros das partículas e dos tubos e a distância entre tubos, ou seja, excluiu a condutividade, e foi chamado de modelo 3. Ambos os modelos são comparados, na Tabela 15, com o modelo anterior (modelo 1) por meio de seus coeficientes de determinação.

Tabela 15 – Comparação dos coeficientes de determinação de diferentes modelos.

Modelo	$R^2$
1	0,99163
2	0,87597
3	0,93492

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

O modelo 3, que excluiu a condutividade possui coeficiente de determinação superior ao modelo 2, ou seja, os fatores incluídos neste modelo são capazes de explicar 93% da variação dos resultados, enquanto que este número para o modelo 2 é apenas de 88%. Por este motivo, o modelo 3, que excluiu a condutividade, foi escolhido para representar os dados. Os coeficientes deste modelo são apresentados na Tabela 16.

A partir destes resultados foi decidido que os fatores utilizados para a continuação deste estudo serão o diâmetro das partículas, o diâmetro dos tubos e a distância entre os tubos. Com estes fatores foi elaborado um novo planejamento experimental, onde cada um dos 3 fatores é representado por 4 níveis, de forma a melhor captar as variações do processo de acordo com estas variáveis, o que resultou em 64 ensaios

Tabela 16 – Coeficientes do modelo 3 que exclui a condutividade e velocidade do gás.

	Estimado	Erro	t-valor	p-valor
Intecepto	540,601	11,724	46,109	0,000
Dp	-110,861	11,724	-9,456	0,000
Dt	-52,557	11,724	-4,483	0,002
Dist	1,751	11,724	0,149	0,885
Dp:Dist	37,275	11,724	3,179	0,011
Dp:Dt	-31,014	11,724	-2,645	0,027
Dt:Dist	-19,084	11,724	-1,628	0,138

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

computacionais, cujos resultados são mostrados na sequência.

#### 4.3 OTIMIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA UTILIZANDO A METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Após a definição das variáveis mais significativas no processo em estudo, foram estabelecidos quatro níveis de cada um dos fatores, os quais estão relacionados na Tabela 17. Este níveis foram escolhidos de maneira a se obter uma amplitude maior para a variação de cada uma das variáveis em estudo, e, assim, possibilitar o estudo do processo em uma maior extensão.

Tabela 17 – Níveis dos fatores utilizados na otimização por superfície de resposta

Fator	Níveis			
	-1	-1/3	1/3	1
Diâmetro das partículas ( $\mu\text{m}$ )	200	400	600	800
Distância entre os tubos (cm)	6	8	10	12
Diâmetro dos tubos (mm)	17	23	29	35

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

O planejamento experimental executado foi do tipo fatorial completo. Este tipo de planejamento, utilizando um número de níveis superior a 2, diferentemente de planejamentos fatoriais fracionários, permite uma maior resolução do modelo, sendo capaz de capturar termos quadráticos e termos de interação que geram curvatura na superfície de resposta, permitindo a descoberta de um ponto de ótimo para o sistema. Um planejamento fatorial completo baseado em apenas 2 níveis de cada fator seria capaz de obter apenas termos de interação e não termos quadráticos, os quais são essenciais para obter uma superfície com curvatura (NIST/SEMATECH, 2013; MONTGOMERY, 2012). Os resultados obtidos em cada ensaio computacional do planejamento experimental, mais um ponto central, encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados do planejamento fatorial completo

Diâmetro de partícula	Diâmetro dos tubos	Distância entre os tubos	Coeficiente de Transferência de Calor ( $W/(m^2 \cdot K)$ )
-----------------------	--------------------	--------------------------	---

-1	-1	-1	692,491
-1/3	-1	-1	584,194
1/3	-1	-1	465,729
1	-1	-1	300,611
-1	-1/3	-1	759,700
-1/3	-1/3	-1	577,466
1/3	-1/3	-1	443,624
1	-1/3	-1	269,996
-1	1/3	-1	758,322
-1/3	1/3	-1	614,801
1/3	1/3	-1	414,063
1	1/3	-1	235,0062
-1	1	-1	760,509
-1/3	1	-1	582,990
1/3	1	-1	389,615
1	1	-1	191,859
-1	-1	-1/3	652,347
-1/3	-1	-1/3	563,963
1/3	-1	-1/3	526,144
1	-1	-1/3	452,956
-1	-1/3	-1/3	709,475
-1/3	-1/3	-1/3	586,007
1/3	-1/3	-1/3	493,152
1	-1/3	-1/3	380,582
-1	1/3	-1/3	741,389
-1/3	1/3	-1/3	592,967
1/3	1/3	-1/3	468,446
1	1/3	-1/3	362,407
-1	1	-1/3	719,602
-1/3	1	-1/3	623,155
1/3	1	-1/3	421,971
1	1	-1/3	276,244
-1	-1	1/3	644,871
-1/3	-1	1/3	587,525
1/3	-1	1/3	596,854
1	-1	1/3	546,121
-1	-1/3	1/3	638,184
-1/3	-1/3	1/3	585,014
1/3	-1/3	1/3	532,413
1	-1/3	1/3	513,214
-1	1/3	1/3	684,761
-1/3	1/3	1/3	618,737
1/3	1/3	1/3	501,853
1	1/3	1/3	432,254
-1	1	1/3	692,959

-1/3	1	1/3	611,087
1/3	1	1/3	495,596
1	1	1/3	376,128
-1	-1	1	603,126
-1/3	-1	1	594,321
1/3	-1	1	629,381
1	-1	1	648,881
-1	-1/3	1	625,763
-1/3	-1/3	1	630,795
1/3	-1/3	1	595,863
1	-1/3	1	623,195
-1	1/3	1	632,164
-1/3	1/3	1	574,917
1/3	1/3	1	576,943
1	1/3	1	569,128
-1	1	1	609,045
-1/3	1	1	582,912
1/3	1	1	540,735
1	1	1	470,986
0	0	0	561,369

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Com os resultados presentes na tabela anterior, um modelo contendo efeitos principais, efeitos de interação e termos quadráticos foi ajustado. Esse é mostrado na Equação 43.

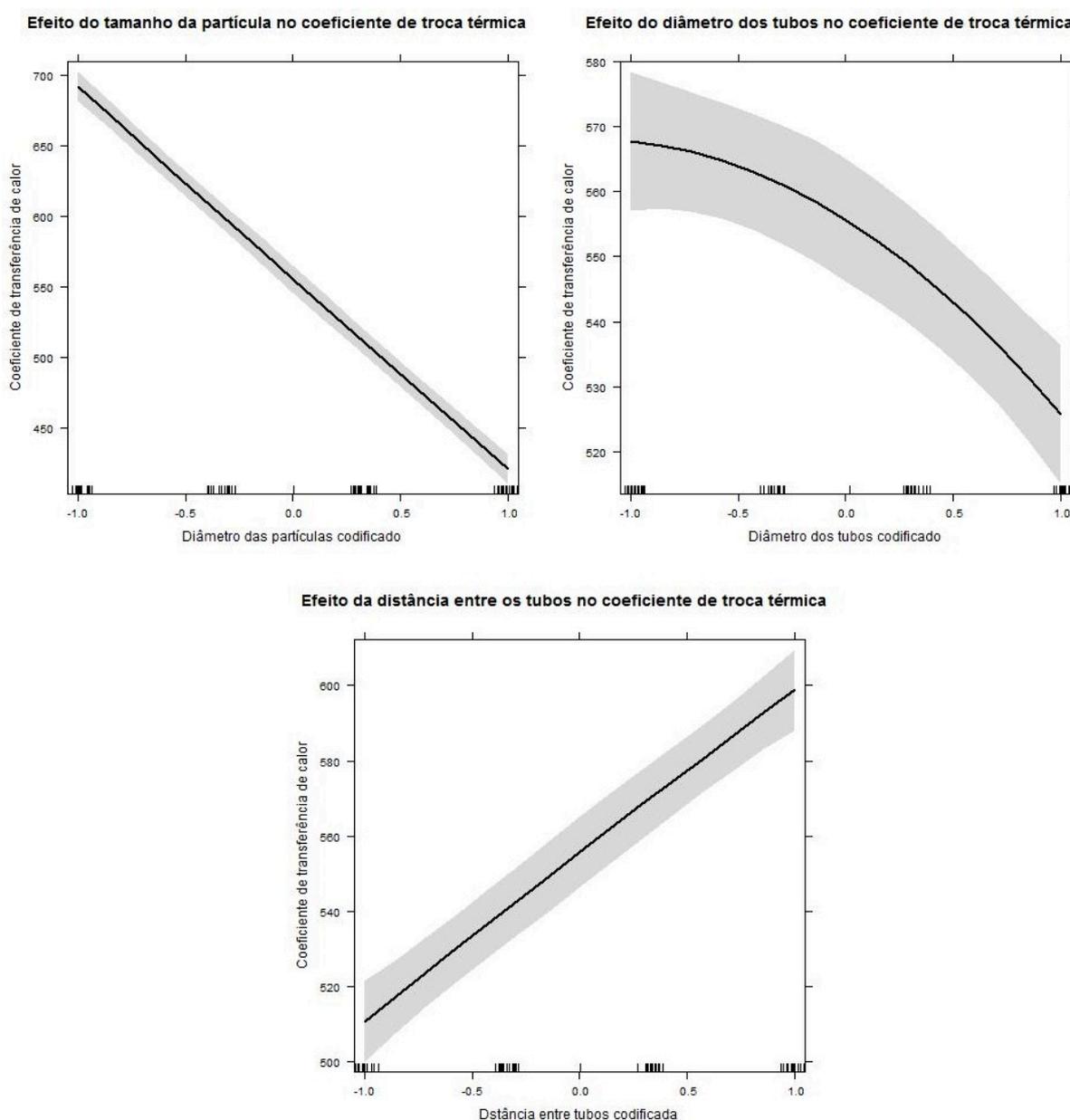
$$\begin{aligned}
 h = & 558,065 - 133,534 \cdot Dp - 22,675 \cdot Dt + 45,823 \cdot Dist - \\
 & 54,369 \cdot Dp \cdot Dt + 112,575 \cdot Dp \cdot Dist - \\
 & 10,294 \cdot Dt \cdot Dist - 1,163 \cdot Dp^2 - \\
 & 10,963 \cdot Dt^2 - 2,931 \cdot Dist^2
 \end{aligned} \tag{43}$$

Os coeficientes do modelo já fornecem um panorama geral sobre como cada um dos fatores em análise contribuem para o resultado final. O sinal negativo representa uma influência inversa da variável na resposta, como é o caso do diâmetro da partícula, cuja diminuição leva a um aumento no coeficiente de transferência térmica, o que também é confirmado por diversos autores em trabalhos tanto computacionais quanto experimentais (BLASZCZUK; NOWAK; KRZYWANSKI, 2017; PAGLIUSO; LOMBARDI; GOLDSTEIN, 2000; MAHANTA; PATIL; PANDEY, 2010). Além dos sinais, as magnitudes dos coeficientes também trazem informações importantes. No caso dos coeficientes dos efeitos principais, o seu valor representa o quanto a variação unitária desta variável contribui na resposta final. No caso do diâmetro de partículas, um

aumento de uma unidade codificada (correspondente a  $300 \mu\text{m}$ ) nesta propriedade causa uma diminuição de 133,534 no coeficiente de troca térmica.

Uma forma de complementar as informações que os coeficientes dos efeitos principais carregam, é a análise dos gráficos dos efeitos principais, dados na Figura 22, que consistem em uma ferramenta simples e intuitiva de interpretar as alterações geradas por esses efeitos na variável resposta.

Figura 22 – Principais efeitos na variável resposta.

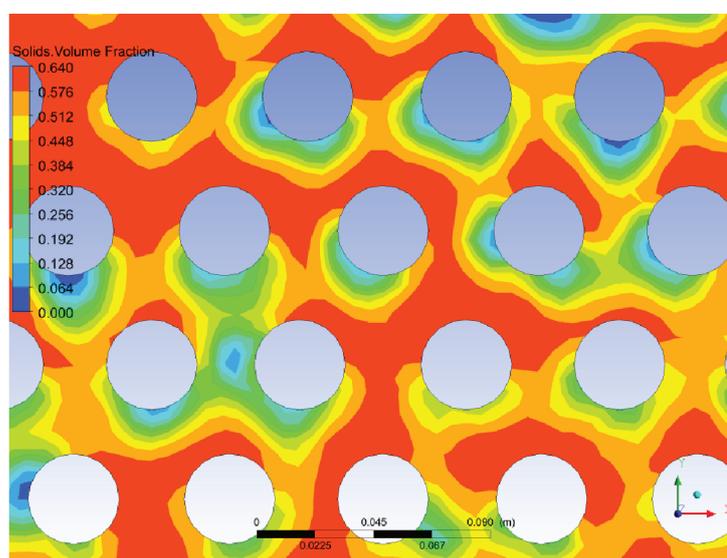


Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

É possível observar na Figura 22 que, assim como afirmado ao analisar o coeficiente referente à este fator, ao aumentar o diâmetro das partículas ocorre uma drástica diminuição no coeficiente de transferência de calor. Em relação ao diâmetro

dos tubos, vê-se que este comportamento se repete, de forma que tubos menores irão gerar maiores coeficientes de troca térmica. Uma possível causa para esta relação pode estar no fato de que um maior diâmetro causa zonas de estagnação, onde algumas partículas podem ficar acumuladas no topo dos tubos, diminuindo a taxa de renovação de partículas ao redor destas estruturas. Este fenômeno é exemplificado na Figura 23, que mostra uma área de maior densidade de sólido no topo de tubos com diâmetros elevados. No caso de tubos com baixos diâmetro é comum que as bolhas envolvam completamente o tubo, o que diminui a ocorrência de acúmulo de partículas. Em relação à distância entre os tubos, identifica-se que um maior afastamento entre estes gera maiores magnitudes na variável resposta, comportamento que pode ser atribuído à uma melhora na circulação dos sólidos devido ao distanciamento dos tubos.

Figura 23 – Estagnação de partículas no topo de tubos com elevado diâmetro.

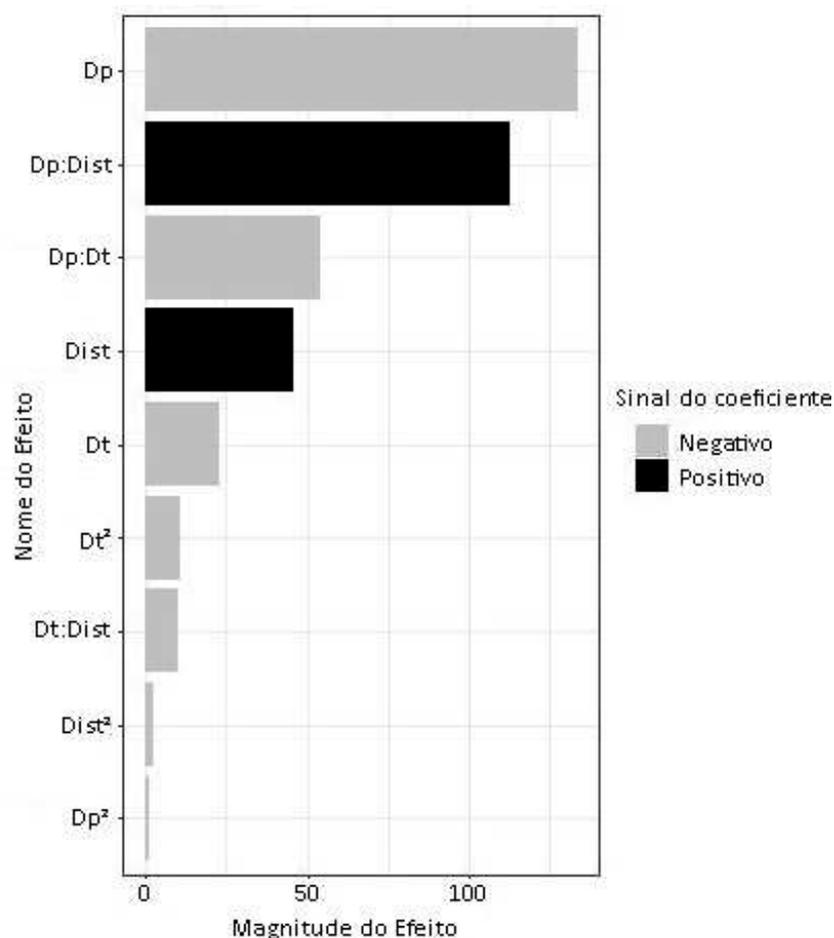


Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Os gráficos expostos na Figura 24 permitem uma análise simplificada de como os efeitos principais agem na variável resposta. Para melhor entender a magnitude dos impactos gerados pelos demais termos, um gráfico de Pareto, como o mostrado na Figura 24, é recomendável. Neste gráfico é possível ver claramente a influência de cada termo do modelo da Equação 43. O fator que apresenta maior impacto no coeficiente de transferência de calor é o tamanho das partículas, o qual apresenta uma relação negativa, conforme já citado. O segundo termo da equação que apresenta maior impacto na resposta é a interação entre o tamanho das partículas e a distância entre os tubos. Esta interação, possivelmente, apresenta tamanha significância no resultado, pois está relacionada diretamente com a circulação de sólidos dentro do leito. Um maior distanciamento dos tubos facilita a passagem de bolhas e, conseqüentemente, a circulação dos sólidos. Pelo gráfico de Pareto também é possível ver

que a interação entre o diâmetro dos tubos e o tamanho das partículas apresenta uma contribuição significativa, cujo sinal é negativo. Os coeficientes, tanto do diâmetro das partículas quanto do diâmetro dos tubos, apresentam sinais negativos, então é natural que a interação entre estas duas variáveis também apresente uma contribuição negativa. Os efeitos individuais dos diâmetros dos tubos e do distanciamento entre estes também se apresentam negativos e com baixa magnitude no gráfico de Pareto. Ao se analisar a Figura 24, vê-se que a distância entre os tubos apresenta impacto positivo. Possivelmente devido ao fato de o termo de interação entre a distância dos tubos e o diâmetro das partículas apresentar um impacto positivo de alta significância. Em relação aos termos quadráticos, todos apresentam pouca contribuição na variável resposta, tendo efeitos com baixa magnitude.

Figura 24 – Gráfico de Pareto dos coeficientes do modelo.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

O gráfico de Pareto permite uma análise rápida dos efeitos causados por cada um dos termos do modelo. Porém, para saber se cada termo realmente é estatisticamente significativo, é necessário analisar os p-valores de cada um dos coeficientes, que mostram a significância do termo caso sejam inferiores a 0,05. Estes valores são dados na Tabela 19.

Tabela 19 – Coeficientes de um modelo quadrático para geração de superfície de resposta

	Estimado	Erro	t-valor	P-valor
Intercepto	558,065	4,761	117,224	2,2e-16
Dp	-133,534	2,795	-47,782	2,2e-16
Dt	-22,675	2,795	-8,113	5,69e-11
Dist	45,828	2,795	16,398	2,2e-16
Dp:Dt	-54,369	3,749	-14,501	2,2e-16
Dp:Dist	112,575	3,749	30,024	2,2e-16
Dt:Dist	-10,294	3,749	-2,746	0,0082
Dp <sup>2</sup>	-1,163	4,634	-0,251	0,8027
Dt <sup>2</sup>	-10,963	4,634	-2,365	0,0215
Dist <sup>2</sup>	-2,931	4,634	-0,633	0,5296

R<sup>2</sup> = 0,9855  
R<sup>2</sup> ajustado = 0,9832

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

O valor de  $R^2$  mostra o quanto da variação dos resultados pode ser explicada pelo modelo. No caso do modelo proposto, este coeficiente tem um valor bastante próximo de 1, o que mostra que o modelo é capaz de explicar os resultados. Já o  $R^2$  ajustado é uma estatística que leva em conta quantos termos o modelo apresenta. Se muitos termos não significativos forem acrescentados ao modelo, o  $R^2$  ajustado irá diminuir, diferentemente do  $R^2$ . Com isso, uma discrepância entre o  $R^2$  e o  $R^2$  ajustado identifica se há termos no modelo que poderiam ser excluídos (MONTGOMERY, 2012).

Neste caso, os valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado estão bastante próximos, o que indica que não há um excesso de termos insignificantes no modelo. Por este motivo, e também por sua contribuição na curvatura, os termos quadráticos serão mantidos no modelo usado para gerar uma superfície de resposta.

Os resultados presentes na Tabela 19 corroboram a análise do gráfico de Pareto, mostrando que os termos quadráticos apresentam baixa magnitude, o que resulta em sua insignificância estatística no modelo. Os demais termos, incluindo todos os termos de interação, apresentam p-valores extremamente baixos, o que prova sua significância.

Antes de utilizar o modelo gerado para prosseguir com a otimização do sistema em estudo, é necessário verificar sua adequação, isso porque ao utilizar uma regressão para ajustar um modelo, uma série de hipóteses são aplicadas, as quais devem ser verificadas para que seja possível a afirmação de que o modelo proposto é condizente com estas hipóteses. Estatísticas padrões, como as mostradas na Tabela 19, são propriedades globais do modelo que, apesar de trazerem informações importantes sobre este, não garantem sua adequação.

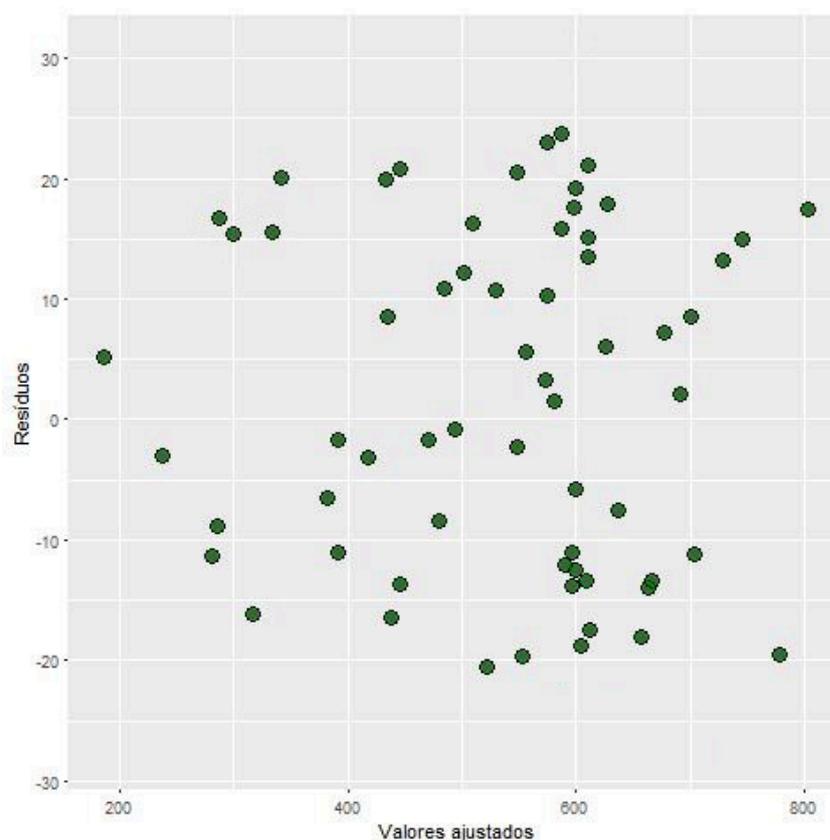
### 4.3.1 Adequação do modelo usado na metodologia de superfície de resposta

A análise de adequação de um modelo é feita com base no estudo dos resíduos, que são a diferença entre os valores reais e os valores preditos, de forma que podem ser considerados como uma boa medida da variabilidade das respostas que não foram explicadas pelo modelo (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012).

Algumas características essenciais que os resíduos devem apresentar estão relacionadas com a sua variabilidade. Quando a média dos resíduos se situa ao redor de zero e um gráfico de dispersão dos resíduos versus valores preditos não apresenta nenhum padrão discernível, isso significa que os resíduos são randômicos e os experimentos realizados não foram enviesados. Quando existe um padrão curvado nos resíduos, isto ainda pode indicar a presença de não-linearidades, que exigiriam mais termos no modelo (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012).

Para os dados em análise, a média dos resíduos fica na ordem de  $10^{-14}$ , o que representa um número suficientemente próximo de zero. O gráfico dos resíduos versus valores ajustados é dado abaixo.

Figura 25 – Gráfico dos resíduos versus valores ajustados.



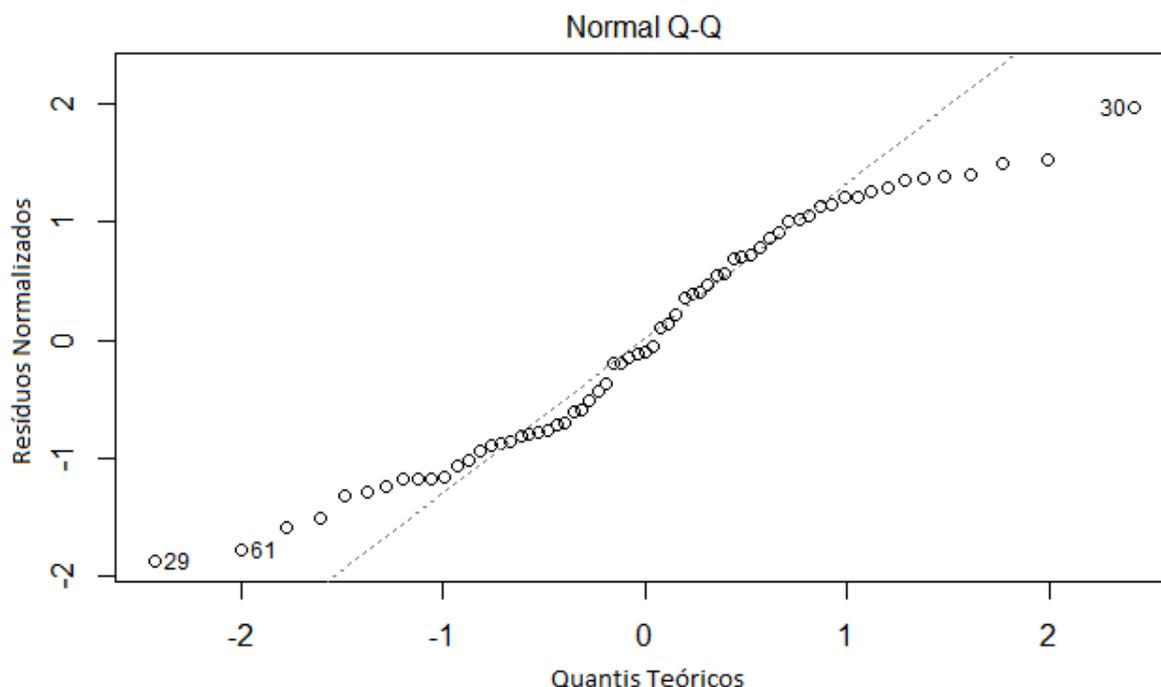
Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

A distribuição dos pontos na Figura 25 anterior não revela nenhum padrão típico que revela inconformidades do modelo, sendo suficientemente randômico para

satisfazer este critério de adequação.

Muitos dos testes estatísticos comumente feitos em modelos de regressão partem da suposição de normalidade, como é o caso dos testes t e F, além da definição de intervalos de confiança. Por este motivo é preciso saber se os dados com os quais se está trabalhando respeitam a hipótese da normalidade, pois, caso não haja evidência de normalidade, os testes estatísticos tradicionais devem ser refutados. Uma maneira de avaliar a normalidade é através de um gráfico de normalidade, chamado de gráfico Q-Q, por meio do qual se faz uma avaliação visual em relação a este tópico. Neste tipo de gráfico, os quantis dos resíduos são confrontados com quantis de uma distribuição normal teórica. Desta forma, é esperado que os pontos sigam o formato de uma reta diagonal, o que diagnostica a proximidade entre os quantis dos resíduos e de uma distribuição normal. Assim, quanto mais próximo de uma reta estiverem os pontos, maior é a aceitação da hipótese de normalidade. Esta condição de linearidade deve ser respeitada, principalmente nos valores centrais (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012), sendo que pequenas divergências deste comportamento nos extremos do gráfico não são suficientes para invalidar a hipótese da normalidade. O gráfico Q-Q para os resíduos do modelo proposto são dados na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico Q-Q para modelo quadrático gerado a partir de planejamento experimental completo



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

O gráfico Q-Q mostra os pontos distribuídos ao longo da diagonal do gráfico de forma aproximadamente linear. Nas extremidades ocorrem pequenos achatamentos,

mas, como citado, estas pequenas deformações em relação à uma reta diagonal não são suficientes para refutar a hipótese de normalidade. Desta forma, pode-se dizer que os resíduos do modelo respeitam a distribuição normal, o que prova sua adequação.

Tendo sido satisfeitas as condições de adequação do modelo, este pode ser usado para gerar uma superfície de resposta, a qual é usada para analisar e otimizar o processo em estudo.

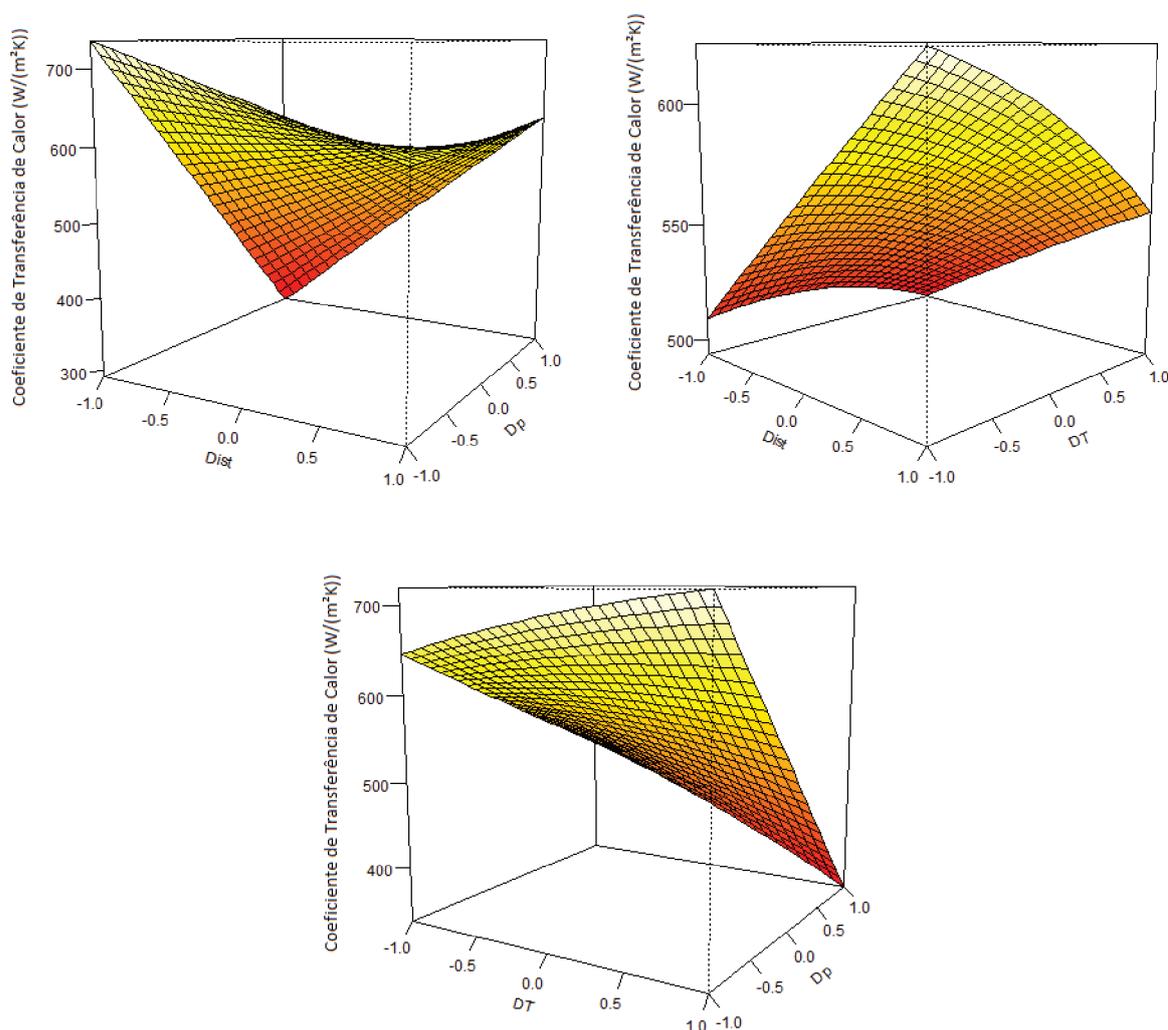
#### **4.3.2 Utilização da metodologia de superfície de resposta para otimização de um trocador de calor de leito fluidizado**

Tendo provado a adequação do modelo elaborado, este é utilizado para a criação de superfícies de resposta com o objetivo de procurar um ponto ótimo que maximize o coeficiente de transferência de calor. A Figura 27 mostra as superfícies de resposta formadas com cada par das variáveis analisadas. Rapidamente é identificável que dentro da região de busca explorada não há nenhum ponto de ótimo, de forma que uma nova região deve ser explorada. Pelas superfícies, é possível ver que a diminuição do diâmetro das partículas gera maiores coeficientes de troca térmica. Porém, uma grande diminuição do diâmetro das partículas, muito além desta região estudada, pode causar alguns problemas, como a dificuldade em se obter comercialmente este tipo de material, além da presença de uma maior coesão entre partículas menores, o que poderia prejudicar a fluidização. Devido ao fato de não ter se encontrado na literatura a utilização de partículas menores do que as especificadas como limite inferior para esta propriedade, em sistemas de energia solar concentrada, será fixado o diâmetro das partículas em  $200 \mu\text{m}$  para estudos futuros.

Tendo fixado o valor de uma das propriedades, deve-se agora entender o comportamento das variáveis geométricas nesta região. Isto é facilmente obtido com a visualização de um gráfico de contorno que relaciona o coeficiente de transferência de calor com o diâmetro dos tubos e a distância entre estes, fixado em  $D_p = -1$ . Este gráfico é mostrado na Figura 28, na qual se vê claramente que, para esta região, há um aumento do coeficiente em estudo com o diâmetro dos tubos e com a diminuição da distância entre estes. Em uma primeira análise, vê-se que este gráfico contraria os efeitos principais mostrados na Figura 22. Porém, este modelo não representa uma relação linear, de forma que as interações entre os efeitos causam esta ressalva, ou seja, a presença de interações entre as variáveis faz com que haja diferenças nas tendências da resposta em regiões distintas.

Este fato pode ainda ser evidenciado ao se analisar o gráfico de Pareto contido na Figura 25, que mostra que os coeficientes relacionados com pares de interação que contém o diâmetro das partículas possuem um peso maior no modelo em relação aos coeficientes dos efeitos principais relacionados com o diâmetro dos tubos e com a distância entre estes.

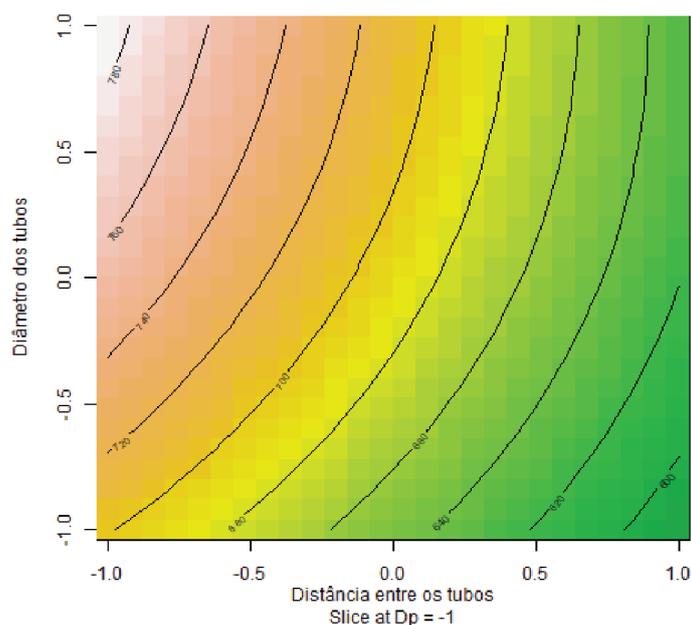
Figura 27 – Superfícies de resposta geradas com planejamento completo.



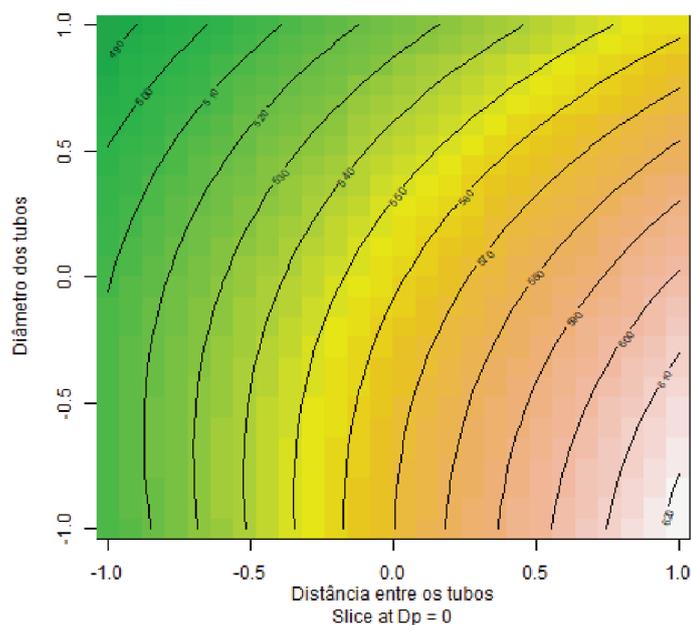
Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Para visualizar ainda melhor como estas interações refletem no modelo, apresenta-se um gráfico de contorno na Figura 29 para o diâmetro dos tubos e a distância entre os tubos, quando o diâmetro de partícula normalizado é igual a 0 ( $D_p=500 \mu\text{m}$ ). Nessa figura, é possível notar um crescimento da variável resposta com a diminuição do diâmetro dos tubos, assim como os efeitos principais mostrados na Figura 22. Também há um claro aumento do coeficiente de transferência de calor com o aumento da distância entre os tubos, o que está de acordo com o que foi mostrado na Figura 22.

A diferença nas tendências das variáveis geométricas está relacionada com sua forte interação com o diâmetro das partículas, como indicam os coeficientes do modelo. Possivelmente, partículas menores não encontram tanta dificuldade em se movimentar dentro de um leito onde os tubos têm maior proximidade e maior diâmetro, por isso a mistura dentro do leito não é afetada por essa maior quantidade de obstáculos formados pelos tubos maiores e mais próximos.

Figura 28 – Gráfico de contorno para  $D_p = -1$ .

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Figura 29 – Gráfico de contorno para  $D_p = 0$ .

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Utilizando estes resultados, um novo planejamento experimental foi proposto em uma região de busca distinta, partindo da região mostrada na Figura 29, a fim de continuar a averiguação de existência de um ponto de máximo para o sistema em estudo.

Como o tamanho das partículas parece ter uma relação inversamente proporcional com o coeficiente de troca térmica (o que é confirmado por diversos autores, como

mostrado na revisão bibliográfica), optou-se por fixar essa variável em  $200\ \mu\text{m}$ , de forma a focar na otimização das variáveis geométricas do sistema. Um dos fatores que acarretou nessa decisão foi o fato de que partículas muito pequenas podem apresentar propriedades de coesão, o que pode dificultar a operação do sistema. Além disso, de acordo com a literatura consultada durante o desenvolvimento deste trabalho, não foram encontradas referências de utilização de partículas com diâmetros tão diminutos, que não pertencessem à classe B da classificação de Geldart para partículas. Blaszcuk, Nowak e Krzywanski (2017) obtiveram melhores resultados para parâmetros de transferência de calor entre um leito e um conjunto de tubos utilizando partículas com diâmetros pequenos, inferiores a  $241\ \mu\text{m}$ , sendo que as menores partículas utilizadas no estudo possuíam diâmetro de até  $219\ \mu\text{m}$ . Baumann e Zunft (2015) estudaram propriedades de partículas a serem utilizadas em sistemas de geração de energia solar concentrada, sendo que os menores diâmetros de partículas investigados por estes autores foi de  $0,6\ \text{mm}$ . S. W. Kim *et al.* (2003b) utilizaram partículas com diâmetros de  $240\ \mu\text{m}$  em seus estudos com transferência de calor entre leitos e arranjos horizontais de tubos. Entre todos os artigos consultados, o que apresentou menor diâmetro foi dos autores Grewal e Saxena (1983), que utilizaram partículas de areia com  $167\ \mu\text{m}$ . Porém, estas partículas muito pequenas podem ocasionar problemas operacionais, pois sua expansão é demasiada grande, em comparação com partículas maiores, e há forças coesivas entre as partículas.

O primeiro planejamento experimental escolhido neste trabalho foi do tipo fatorial completo. Em parte essa escolha foi devida ao fato de que estes dados serão utilizados para treinar uma rede neural, a qual necessita de uma grande quantidade de resultados, sendo que o planejamento completo é o que fornece um maior número de ensaios computacionais. Porém, como não foi obtido um ponto de máximo dentro desta primeira região de busca considerada, optou-se por realizar um planejamento experimental mais enxuto, que não gerasse tantos ensaios, a fim de verificar uma nova região de busca; afinal, haveria a possibilidade de também não se encontrar um ponto de máximo dentro desta região. Isso acarretaria na necessidade de averiguar ainda uma outra região de busca, o que resultaria em um número muito elevado de simulações computacionais. Esta incerteza, em relação à existência de um ponto de máximo dentro das regiões de busca investigadas, aliada ao propósito de concluir este projeto dentro do prazo estabelecido, conduziu à decisão de utilizar outro tipo de planejamento.

O planejamento escolhido nesta etapa foi do tipo central composto, com apenas duas variáveis, o diâmetro dos tubos e a distância entre estes, já que foi decidido manter o diâmetro da partícula fixo em  $200\ \mu\text{m}$ . Os níveis de cada variáveis são mostrados na Tabela 20, e os resultados obtidos com os experimentos numéricos são dados na Tabela 21.

Os resultados presentes na Tabela 21 foram utilizados para a criação de um

Tabela 20 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento experimental central composto.

Variável	Níveis				
	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
Diâmetro dos tubos (Dt), em mm	34,586	35	36	37	37,414
Distância entre os tubos (dist), em cm	4,793	5	5,5	6	6,207

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Tabela 21 – Resultados do planejamento experimental central composto.

Diâmetro dos tubos, em mm	Distância entre os tubos, em cm	Coefficiente de transferência de calor, em $W/(m^2 \cdot K)$
1	1	558,800
1,41214	0	334,205
0	-1,41214	390,133
-1	1	760,509
0	1,41214	759,868
-1	-1	476,203
0	0	616,482
-1,41214	0	607,795
1	-1	309,5

Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

novo modelo quadrático que descreva o comportamento do sistema em estudo, dentro dos limites da região considerada. Os coeficientes deste novo modelo estão expostos na Tabela 22.

Tabela 22 – Coeficientes de um modelo quadrático para geração de superfície de resposta na segunda região de busca

	Estimado	Erro	t-valor	P-valor
Intercepto	616,461	5,247	117,492	1,359e-6
Dt	-94,483	1,856	-50,895	1,67e-5
Dist	132,159	1,856	71,190	6,1e-6
Dt:Dist	-8,752	2,623	-3,336	0,04451
Dt <sup>2</sup>	-72,060	3,082	-23,384	0,00017
Dist <sup>2</sup>	-19,907	3,082	-6,460	0,0075

$R^2 = 0,9996$

$R^2$  ajustado = 0.999

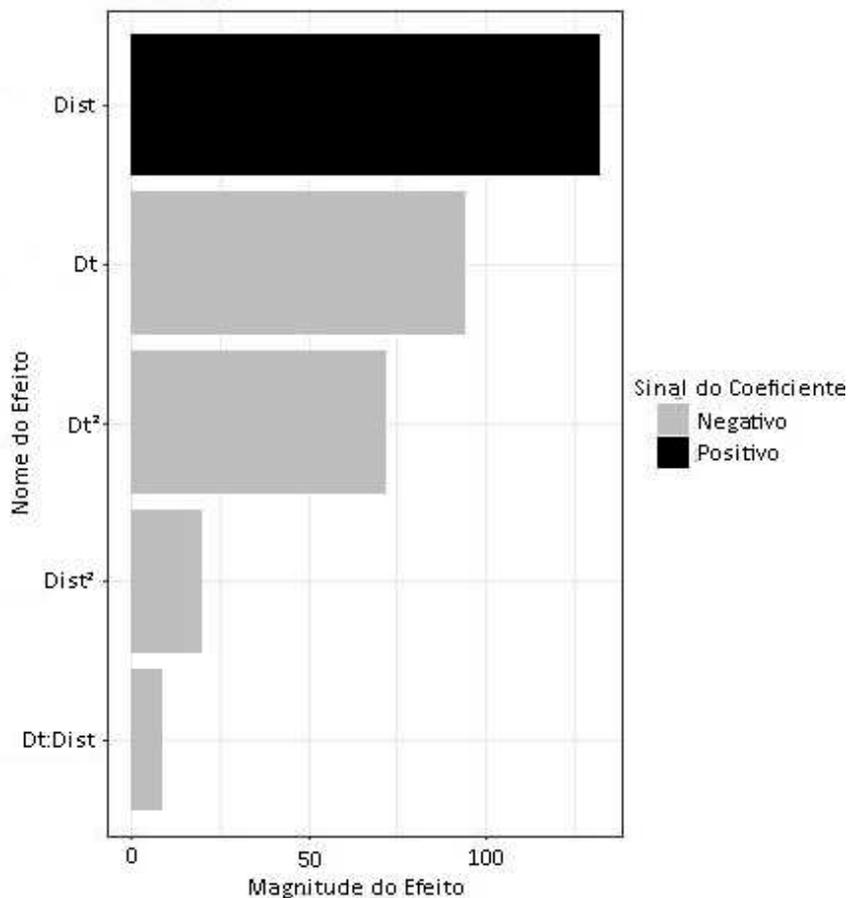
Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

Analisando os p-valores para os coeficientes, vê-se que todos estes são estatisticamente significativos, de forma que nenhum termo deve ser desconsiderado. Além disso, o coeficiente de determinação apresenta um valor bastante elevado, o que prova que os resultados são explicados pelo modelo proposto.

Para visualizar o grau de importância de cada um dos termos do modelo gerado, um gráfico de Pareto é apresentado na Figura 30.

Neste gráfico percebe-se que há uma forte contraposição do efeito positivo gerado pela distância entre os tubos e os demais coeficientes, que apresentam magnitudes menores. Uma possível explicação para estes resultados nesta região de busca

Figura 30 – Gráfico de Pareto para os termos do modelo quadrático gerado com o planejamento experimental central composto.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

considerada é que uma proximidade maior dos tubos com elevados diâmetros dificulta a circulação dos sólidos dentro do leito, alterando suas propriedades de transferência de calor.

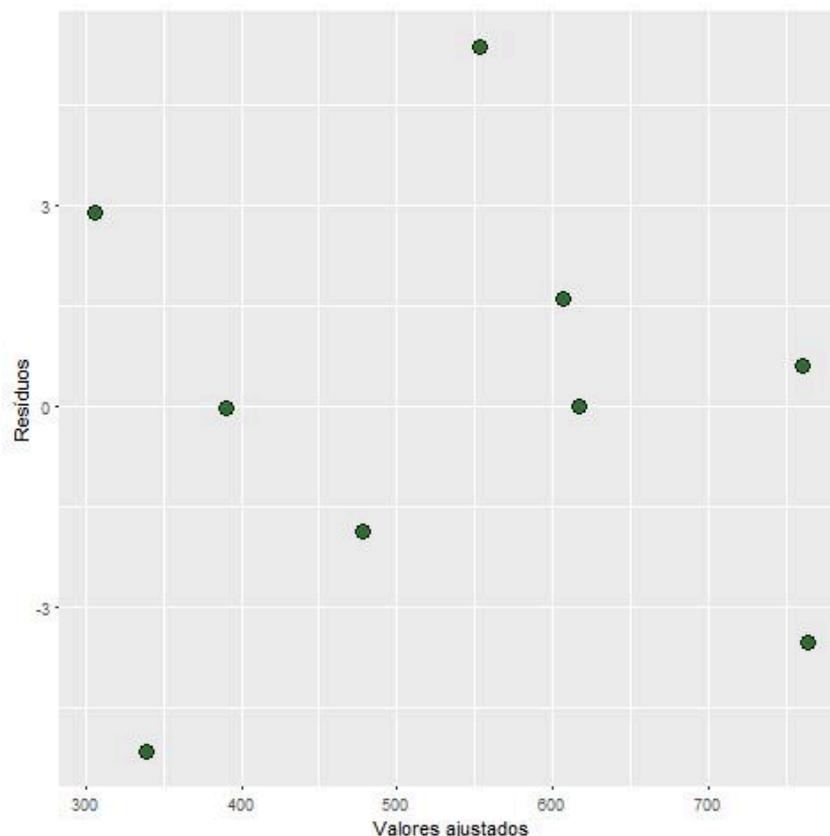
Para checar a adequação do modelo, um gráfico dos resíduos versus valores ajustados e o gráfico Q-Q são mostrados nas Figuras 31 e 32, respectivamente.

Da mesma maneira que ocorreu no modelo anterior, ambos os gráficos contidos nas Figuras 31 e 32 mostram que o modelo é adequado. No primeiro destes gráficos não há nenhum padrão discernível. No segundo, os valores estão próximos da reta diagonal, o que é um bom indicativo da normalidade da amostra.

Sabendo que o modelo é adequado, pode-se gerar o contorno de uma superfície de resposta a fim de analisar de forma visual o comportamento dos dados na região considerada. Por estar se trabalhando com apenas duas variáveis o gráfico de contorno mostrado na Figura 33 é bidimensional.

A Figura 33 mostra que há um aumento do coeficiente em estudo com o aumento da distância entre os tubos e com diâmetro de tubos igual a -0,868, considerando

Figura 31 – Gráfico dos resíduos versus valores ajustados para o modelo gerado com planejamento experimental central composto.

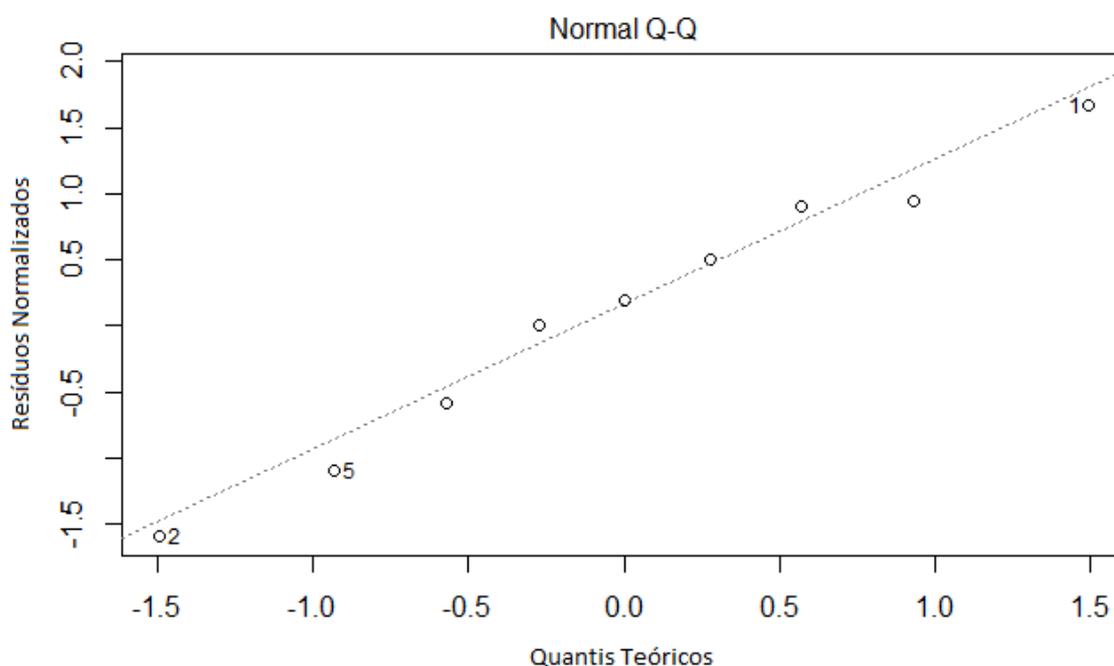


Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

a variável normalizada. Provavelmente, estes resultados se devem ao fato de que nesta região de busca os tubos já possuem um diâmetro elevado, de forma que um maior distanciamento entre eles permite uma melhor circulação de partículas dentro do leito. Além disso, conforme concluiu Doherty *et al.* (1985), o coeficiente de transferência de calor pode diminuir com o aumento dos tubos, já que isso cria zonas de estagnação de partícula no topo dessas estruturas.

Se estes resultados forem comparados com aqueles obtidos pelo planejamento experimental anterior, vê-se que, caso o a distância entre os tubos for ainda maior, tem-se uma diminuição da variável resposta, como mostra a Figura 28. Para o modelo elaborado a partir deste planejamento experimental, um ponto de ótimo seria obtido quando os diâmetros dos tubos fossem igual a  $-0,87$  e a distância entre tubos igual a  $3,51$ . Este resultado, porém, ultrapassa a região de busca analisada em relação à distância entre os tubos e, devido à grande complexidade do problema, que apresenta diversas não-linearidades, não pode-se extrapolar este modelo. Assim, será considerado que o ponto de ótimo do problema é um ponto que se encontra dentro da região de busca considerada, sendo dado quando as variáveis normalizadas diâmetro dos

Figura 32 – Gráfico Q-Q para o modelo gerado com planejamento experimental central composto.



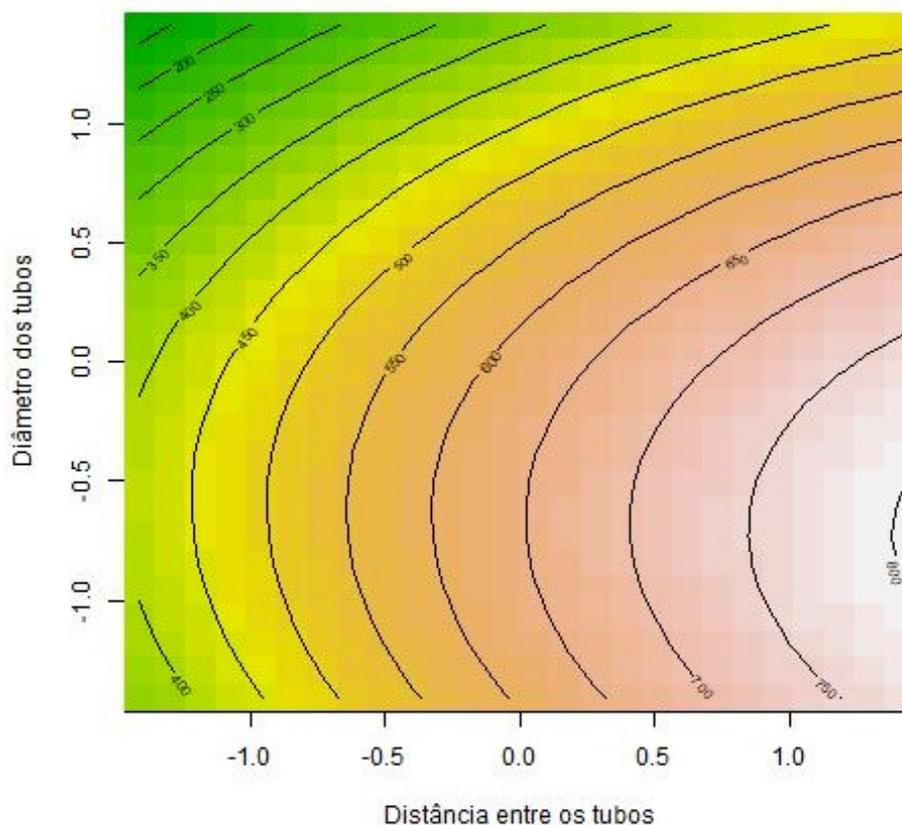
Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

tubos e distância entre os tubos tem, respectivamente, os valores de -0,868 e 1,412, o que corresponde a 35,13 mm e 6,2 cm, respectivamente, em variáveis não codificadas. Neste ponto, o coeficiente de transferência de calor é igual a  $801,839 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , que é de fato o maior valor encontrado para a variável resposta no desenvolvimento deste trabalho.

#### 4.3.3 Otimização da troca térmica entre os tubos submersos e o leito

Para definir o tempo real de cada simulação foram extraídos resultados médios de alguns parâmetros para diferentes tempos de simulação. Com isso, foi possível avaliar se há diferenças significativas nos resultados com tempos maiores, ou se os resultados médios com tempos menores de simulação são próximos o suficiente de forma que se possa obter um equilíbrio entre tempo de execução das simulações e qualidade e confiabilidade dos resultados. O primeiro destes testes foi feito com o fluxo de calor calculado nas paredes dos tubos. Diferentemente das seções anteriores deste trabalho, nas quais o coeficiente de transferência de calor foi calculado apenas no tubo central (assim como no trabalho de S. W. Kim *et al.* (2003b)), o fluxo de calor para esta etapa e as futuras foi tomado como o médio ao longo do perímetro de todos os tubos, o que permite uma visão mais geral do processo de troca térmica no sistema. Esta média foi obtida com a geração de uma Polyline no Ansys® Post, na fronteira

Figura 33 – Gráfico de contorno para o modelo gerado com planejamento experimental central composto.



Fonte: desenvolvido pela autora (2018).

dos tubos, e com a consequente criação de uma função para o cálculo da média do fluxo de calor ao longo dessa fronteira e que englobou o perímetro de todos os tubos. Os resultados foram calculados desconsiderando o primeiro segundo de simulação, pois ele apresenta algumas instabilidades devida à inicialização, prática comum em trabalhos da área para cálculos de médias. A geometria utilizada nesse teste consistia em um leito com as mesmas dimensões apresentadas em seções anteriores, 60 cm de altura e 48 cm de comprimento, e 5 fileiras de tubos submersos com 28 mm de diâmetro espaçados em 7 cm, considerando esse valor do espaçamento o lado de um triângulo equilátero onde os tubos estão dispostos nos vértices. A Tabela 23 apresenta os valores médios obtidos para diferentes médias de tempo.

Tabela 23 – Fluxo de calor médio com diferentes tempos de simulação.

Tempo (s)	Fluxo de calor médio ao longo do perímetro dos tubos (w/m <sup>2</sup> )
5	-34954,15
8	-35202,54
10	-35404,42
12	-35512,45

Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

O sinal negativo deve-se ao fato de que a transferência de calor está acontecendo do leite para os tubos, afinal as partículas sólidas presentes no meio é que estão aquecidas. Dessa forma, o sinal difere-se do apresentado em resultados anteriores, nos quais o calor era transferido do tubo para o leite. Os resultados da tabela mostram que as diferenças entre os valores médios calculados com diferentes tempos de simulação não apresentam grandes distâncias entre si. Desta forma, optou-se por efetuar as demais simulações com 10 segundos, a fim de diminuir o tempo de execução computacional, mas manter a credibilidade dos resultados. Após a definição do tempo final da simulação, foram feitos os 9 ensaios resultantes do planejamento experimental composto central, cujas geometrias foram dadas no capítulo anterior. Os resultados obtidos para cada um dos ensaios é dado na Tabela 24.

Tabela 24 – Resultados do primeiro planejamento experimental usado na otimização da troca térmica.

Níveis		Diâmetro dos tubos (mm)	Distância entre os tubos (cm)	Área total dos tubos (m)	Fluxo de calor ( $w/m^2$ )	Calor (w)
0	$-\alpha$	28	4,879	7,491	-33318,8	-249591
-1	1	22	8,5	3,399	-29926,2	-101719
1	1	34	8,5	5,302	-37817,6	-200509
-1	-1	22	6,5	4,35	-27872,1	-121244
0	0	28	7	5,226	-35404,4	-185024
1	-1	34	6,5	6,784	-42723,2	-289834
$\alpha$	0	36,48	7	6,836	-44660,6	-305300
$-\alpha$	0	19,52	7	3,6	-29816	-107338
0	$\alpha$	28	9,121	4,355	-30288,6	-131907

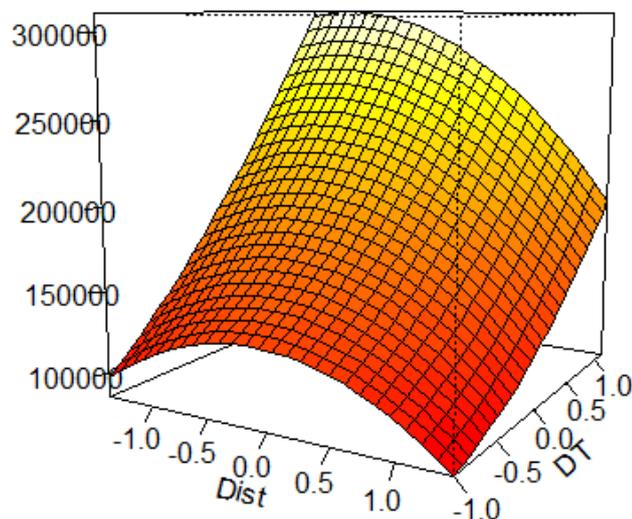
Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Esses dados foram usados na geração de um meta-modelo, que, quando colocado em forma gráfica com valores dentro do intervalo considerado, resulta na superfície de resposta e contornos dados, respectivamente, pelas Figuras 34 e 35.

Conforme pode ser visto, há uma tendência de crescimento do valor do calor trocado conforme o diâmetro dos tubos aumenta e sua distância diminui. Isso pode ser explicado especialmente pois há um significativo aumento da área disponível para troca térmica quando esses parâmetros seguem as tendências citadas. Embora os gráficos anteriores tenham utilidade na análise de tendências, o ponto de ótimo buscado não foi encontrado. Desta forma, um novo planejamento experimental composto central foi proposto com o objetivo de ampliar a região de busca. Foi considerado que a geometria 7 (que apresentou o maior valor para a variável resposta) é o ponto central do novo planejamento. Os resultados para esta geometria e para as 8 novas geometrias desenvolvidas no estudo são dados na Tabela 25.

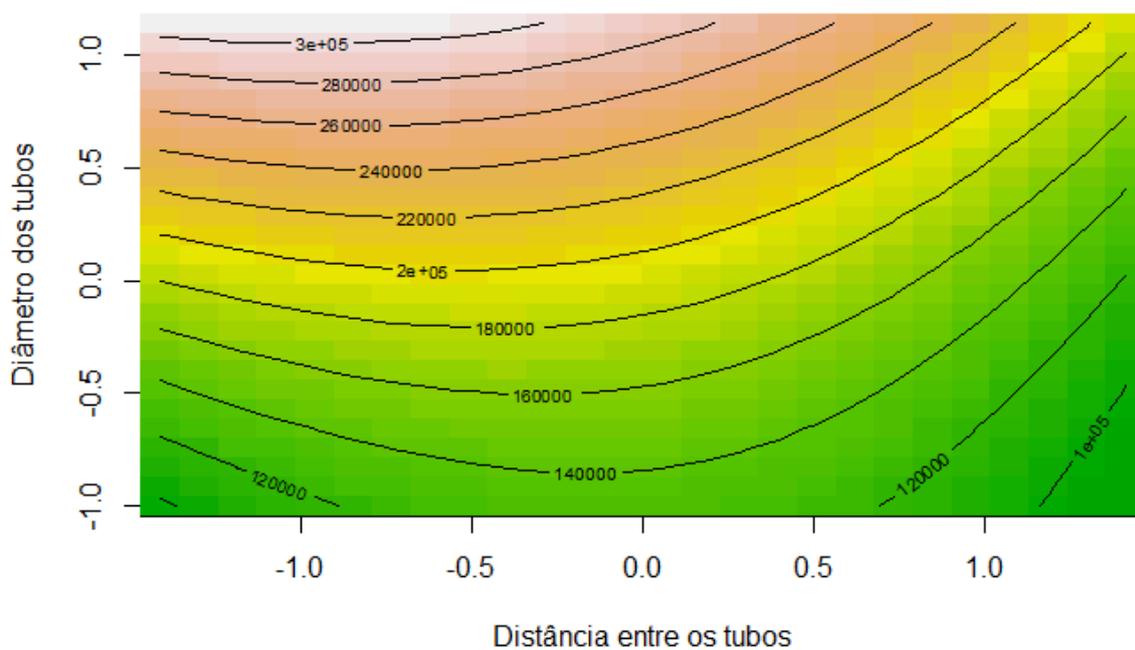
A partir desses dados um novo meta-modelo foi obtido, e com ele os gráficos de superfície e de contornos dados, respectivamente, pelas Figuras 36 e 37.

Figura 34 – Superfície de resposta gerada com o meta-modelo obtido a partir dos dados do primeiro planejamento usado na otimização da troca térmica.



Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

Figura 35 – Gráfico de contornos gerado com o meta-modelo obtido a partir dos dados do primeiro planejamento usado na otimização da troca térmica.



Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

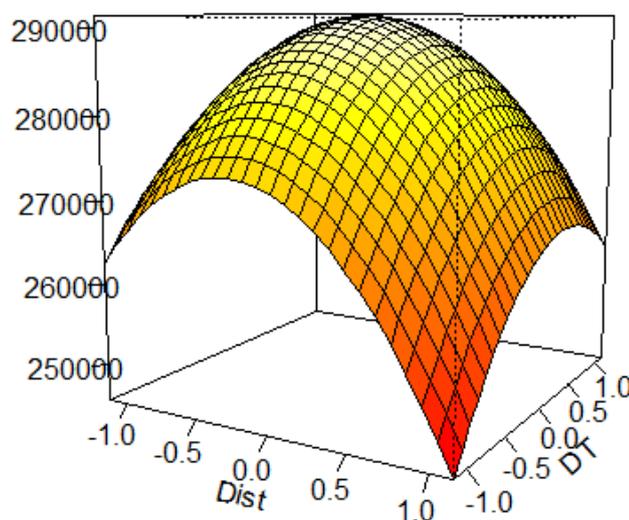
Agora é possível ver que um ponto de ótimo foi obtido. Sua localização equivale

Tabela 25 – Resultados do segundo planejamento experimental usado na otimização da troca térmica.

	Diâmetro dos tubos (mm)	Distância entre os tubos (cm)	Calor (w)
1	35,48	6,5	279432,18
2	35,48	7,5	259819,82
3	36,48	7	305299,96
4	37,48	6,5	284752,12
5	37,48	7,5	271456,14
6	35,07	7	261124,96
7	37,62	7	274981,21
8	36,48	6,29	262321,44
9	36,48	7,71	258541,92

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

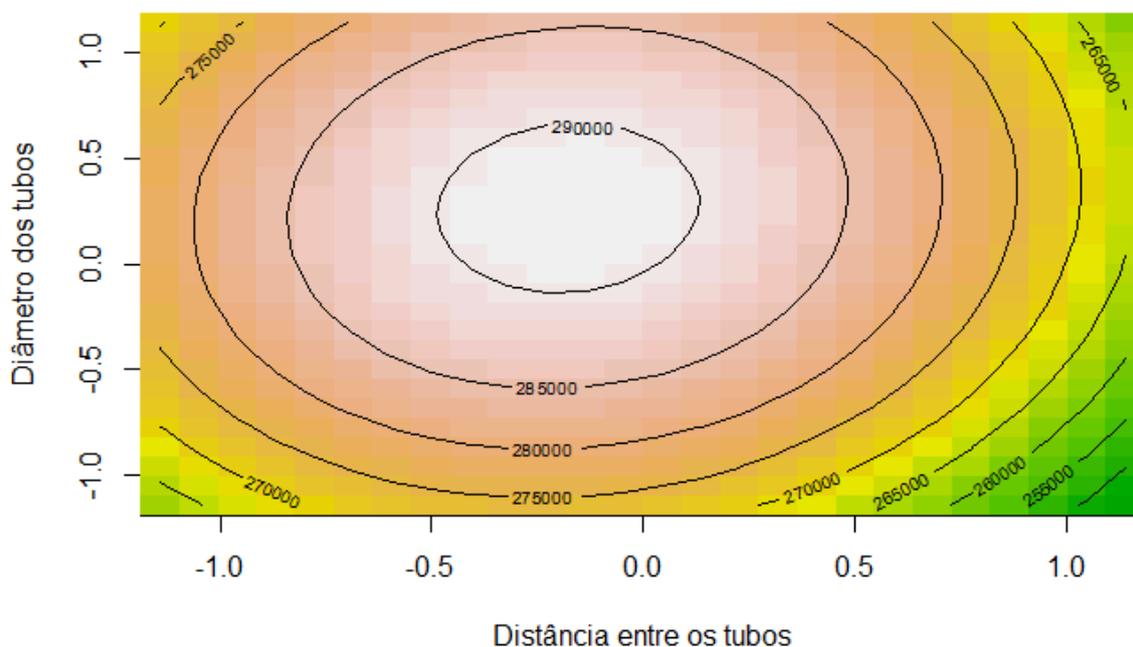
Figura 36 – Gráfico de superfície gerado com o meta-modelo obtido a partir dos dados do segundo planejamento usado na otimização da troca térmica.



Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

ao ponto no qual as variáveis normalizadas diâmetro dos tubos e distância dos tubos são, respectivamente, 0,267 e -0,178. Convertendo esses valores normalizados para suas unidades de origem, tem-se que o ponto ótimo é atingido quando o diâmetro dos tubos corresponde a 36,75 mm e a distância entre estes é de 6,91 cm. Uma breve comparação entre os pontos de ótimo obtidos considerando o coeficiente de transferência como variável resposta e na sequência o calor transferido como resposta permite observar sua proximidade. Para o diâmetro dos tubos, a primeira análise resultou num valor de 35,13 mm e uma distância de 6,2 cm. Já a segunda análise resultou em tubos maiores, porém ligeiramente mais distantes. O aumento no diâmetro dos tubos tem

Figura 37 – Gráfico de contornos gerado com o meta-modelo obtido a partir dos dados do segundo planejamento usado na otimização da troca térmica.



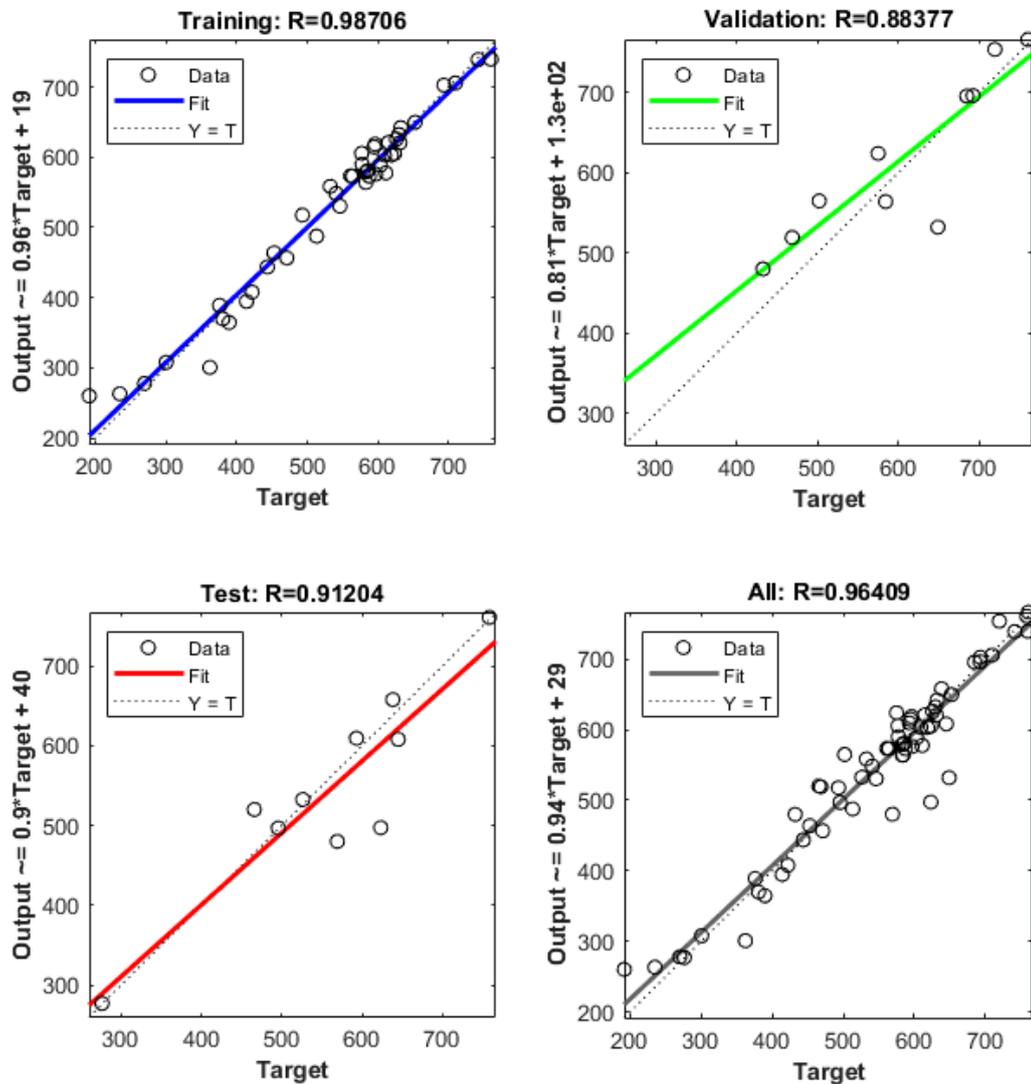
Fonte: desenvolvido pela autora (2019).

uma influência direta na área disponível para troca térmica, leva em consideração na segunda análise. Apesar dessa diferença considera-se que, pelos tamanhos dos intervalos considerados em ambos os estudos, os dois resultados podem servir como base para estudos futuros que venham a ser desenvolvidos na área, ou mesmo projetos do equipamento em estudo.

#### 4.4 GERAÇÃO DE UM META-MODELO UTILIZANDO REDES NEURAIS E OTIMIZAÇÃO COM ALGORITMOS GENÉTICOS

Por fim os dados gerados no planejamento fatorial completo são utilizados na geração de um meta-modelo utilizando redes neurais, conforme descrito no capítulo anterior. A comparação dos resultados obtidos por meio das simulações numéricas pode ser comparado com os resultados obtidos pelo meta-modelo gerado para verificar ajuste aos dados fornecidos. Os gráficos de regressão para esta rede são dados na Figura 38. Nessa figura é possível ver os valores do coeficiente de regressão para os diferentes grupos: o primeiro grupo, composto pela maioria dos dados, que foi utilizado para o treinamento da rede, e os outros grupos de validação e teste. O último gráfico mostra todos a totalidade dos dados. Para este último caso tem-se um coeficiente de regressão igual a 0,964, comprovando a capacidade da rede neural treinada em reproduzir os dados obtidos.

Figura 38 – Gráficos de regressão para a rede neural.



Fonte: desenvolvido pela autora (Matlab) (2020).

Os pesos ajustados pelo *software* são então usados para a criação do meta-modelo. Essa função é considerada a função adaptação no desenvolvimento de um problema de otimização envolvendo algoritmos genéticos. Utilizando a toolbox de otimização do Matlab 19, com as restrições e configurações descritas no capítulo 3, são obtidos os seguintes resultados para as variáveis codificadas, após 56 iterações: -0,997 para o diâmetro das partículas, 0,975 para o diâmetro dos tubos e -0,967 para a distância entre os tubos. Olhando a Figura 28, que mostra o gráfico de contorno quando o diâmetro das partículas é fixado em -1, vê-se que ambos métodos de otimização convergem para soluções similares, sendo que os maiores valores para a

variável resposta são obtidos quando o diâmetro das partículas e distância entre tubos é mínimo, porém o diâmetro dos tubos é máximo (dentro da região de busca considerada). Decodificando as variáveis de entrada temos que o diâmetro das partículas equivale a  $203,6 \mu\text{m}$ , o diâmetro de tubos é  $34,775 \text{ mm}$  e a distância entre os tubos é  $6,099 \text{ cm}$ . Com esses parâmetro de entrada o valor do coeficiente de troca térmica, dado pelo meta-modelo, é  $766,04$ .

Ambas as metodologia utilizadas para otimização são bastante simples de serem efetuadas e produzem resultados semelhantes. A geração de um meta-modelo por redes neurais tem a desvantagem de que é aconselhado um volume grande de dados para que seja efetuado o treinamento da rede. A metodologia de superfície de resposta pode ser aplicada em delineamentos experimentais com reduzidos números de ensaios, o que torna sua utilização mais aconselhável em casos onde seja necessário planejar experimentos ou ensaios computacionais. Porém para fazer utilizar superfície de resposta é preciso ter resultados em pontos específicos, o que nem sempre é uma realidade quando se trabalha com dados que já foram obtidos. A metodologia combinada de redes neurais com algoritmos genéticos pode ser extremamente útil em situações nas quais o pesquisador tenha um histórico de dados e esteja buscando a otimização, como seria o caso de um equipamento já em utilização em uma indústria. Vale destacar que as duas metodologias utilizadas iniciam com o ajuste de um meta-modelo (uma função quadrática no caso da superfície de resposta e uma rede neural com 10 neurônios na camada escondida para o segundo método). Em seguida o respectivo meta-modelo é otimizado com um algoritmo, que no caso do pacote RSM do software RStudio, utilizado no primeiro método, é o algoritmo da subida mais íngreme e no segundo caso é um algoritmo genético implementado diretamente no Matlab. Assim recomenda-se a utilização da metodologia de superfície de resposta em casos onde os experimentos ainda serão realizados no futuro, já que ela exige que seja seguido um determinado delineamento experimental, enquanto que a segunda metodologia pode ser usado no caso de existência de um histórico de dados.

## 5 CONCLUSÃO

A crescente busca por novas fontes de energia colocou em evidência a necessidade de realização de estudos na área de energia solar, visto que esta energia, apesar de vantajosa, não representa uma parcela significativa da matriz energética mundial. O principal motivo para isto é que esta alternativa ainda apresenta altos custos que poderiam ser drasticamente reduzidos com avanços tecnológicos na área. A utilização de materiais granulares como fonte de armazenamento do calor oriundo de raios solares e, posteriormente, como fluidos de troca térmica para geração de vapor, é muito promissora. Porém, é preciso que o calor armazenado nas partículas seja aproveitado da melhor maneira possível, de forma que o projeto e a operação do leito fluidizado usado para a troca térmica entre as partículas e o vapor deva ser otimizado. A complexidade deste processo cria a necessidade de busca de uma forma de otimização eficiente e confiável. A metodologia de superfície de resposta é usada comumente na literatura para otimização dos mais variados processos. Neste trabalho, esta metodologia foi empregada em conjunto com técnicas de fluidodinâmica computacional, visto a dificuldade em realização de experimento de processos desta natureza. A primeira etapa do estudo, após validação do modelo, foi uma triagem de fatores, na qual foi observado que a condutividade térmica do material e a velocidade do gás de fluidização não apresentaram influência com significância estatística na variável resposta, o coeficiente de troca de calor. Com isso, prosseguiu-se o estudo apenas com as variáveis significativas: diâmetro das partículas, diâmetro dos tubos e distância entre os tubos. Esses resultados iniciais provam a importância do projeto de um leito, já que duas, das três variáveis selecionadas como mais significativas, são parâmetros geométricos. Os três fatores selecionados na etapa anterior foram usados em um planejamento experimental completo, com 4 níveis para cada fator, a fim de assegurar a efetividade de um modelo quadrático. A análise dos resultados provou que, destes fatores, o que apresenta mais influência é o diâmetro das partículas, que tem uma relação inversa com o coeficiente de troca térmica. A superfície de resposta gerada com estes resultados não apresentou pico de máximo, motivo pelo qual foi proposto um outro planejamento experimental em uma nova região de busca. Como o diâmetro das partículas apresentou relação linear inversa com a variável resposta, este foi fixado em seu valor mínimo, de forma que apenas as variáveis geométricas foram variadas neste último planejamento fatorial, que foi do tipo composto central. A análise conjunta das superfícies de resposta geradas pelos dois planejamentos experimentais permitiu a inferência de um ponto de máximo para o projeto de um trocador de calor de leito fluidizado. O valor do coeficiente de transferência de calor obtido com valores dos parâmetros geométricos obtidos após o processo de otimização foi significativamente maior que o valor inicial obtido na etapa de validação do modelo computacional.

A facilidade e maior rapidez de realização de experimentos computacionais faz com que estes sejam bastante vantajosos no desenvolvimento de superfícies de resposta, como mostraram os resultados. Em relação às metodologias de otimização utilizadas (superfície de resposta e combinação de redes neurais com algoritmos genéticos), ambas obtiveram resultados semelhantes, sendo que a utilização de cada uma dependerá da situação na qual o pesquisador se encontra. Caso os experimentos estejam em fase de planejamento, recomenda-se a utilização da primeira, que pode ser feita com um número reduzido de ensaios. Porém, se a otimização deve ser feita em um equipamento ou processo já em operação, recomenda-se a segunda metodologia pois, embora necessite de um número elevado de dados, não exige que estes tenham sido obtidos em pontos específicos. A comparação das diferentes metodologias para obtenção de um resultado ótimo mostra como ferramentas computacionais, tanto técnicas de fluidodinâmica computacional quanto redes neurais, podem flexibilizar a realização de um estudo de otimização ao ampliar a gama de metodologias disponíveis para escolha do pesquisador. Desta forma estudos de otimização tendem a se tornar menos dispendiosos e podem ser aplicados com maior frequência nas mais diversas áreas, seja na indústria ou no meio acadêmico.

## REFERÊNCIAS

- AGHBOLAGHY, Mostafa; KARIMI, Afzal. Simulation and optimization of enzymatic hydrogen peroxide production in a continuous stirred tank reactor using CFDRSM combined method. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 45, n. 1, p. 101–107, 2014.
- AL-ANSARY, Hany *et al.* Experimental Study of a SandAir Heat Exchanger for Use With a High-Temperature Solar Gas Turbine System. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 134, n. 4, p. 041017-1 - 041017–7, 2012.
- AL-ARKAWAZI, S. Modeling the heat transfer between fluid-granular medium. **Applied Thermal Engineering**, v. 128, p. 696–705, 2018.
- ASEGEHEGN, T. W.; SCHREIBER, M.; KRAUTZ, H. J. Numerical simulation and experimental validation of bubble behavior in 2D gas-solid fluidized beds with immersed horizontal tubes. **Chemical Engineering Science**, v. 66, p. 5410–5427, 2011.
- BASU, Prabir. Heat transfer in high temperature fast fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 45, n. 10, p. 3123–3136, 1990.
- BAUMANN, T.; ZUNFT, S. Properties of granular materials as heat transfer and storage medium in CSP application. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 143, Supplement C, p. 38–47, 2015.
- BENOIT, H. *et al.* Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, Supplement C, p. 298–315, 2016. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.059>.
- BISOGNIN, Priscilla Corra; FUSCO, Jos Mozart; SOARES, Cintia. Heat transfer in fluidized beds with immersed surface: Effect of geometric parameters of surface. **Powder Technology**, v. 297, p. 401–408, 2016.
- BLASZCZUK, Artur; NOWAK, Wojciech; KRZYWANSKI, Jaroslaw. Effect of bed particle size on heat transfer between fluidized bed of group b particles and vertical rifled tubes. **Powder Technology**, v. 316, p. 111–122, 2017.
- BOTTERILL, J. S. M. **Fluid-bed heat transfer**. [S.l.]: Academic Press, 1975.
- BP. **BP Statistical Review of World Energy**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>.

- AL-BUSOUL, M. A.; ABU-EIN, S. K. Local heat transfer coefficients around a horizontal heated tube immersed in a gas fluidized bed. **Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 4, p. 355–358, abr. 2003.
- CALDERON, Alejandro *et al.* High temperature systems using solid particles as {TES} and {HTF} material: A review. **Applied Energy**, v. 213, p. 100–111, 2018.
- CELIK, I. Numerical Uncertainty in Fluid Flow Calculations: Needs for Future Research. **Journal of Fluids Engineering**, v. 115, p. 194–195, 1993.
- CHRISTIAN, J.; HO, C. Alternative Designs of a High Efficiency, North-facing, Solid Particle Receiver. **Energy Procedia**, v. 49, Supplement C, p. 314–323, 2014. Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference.
- CHRISTIAN, J.; HO, C. System Design of a 1 MW North-facing, Solid Particle Receiver. **Energy Procedia**, v. 69, Supplement C, p. 340–349, 2015. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014.
- CLOETE, Schalk; JOHANSEN, Stein Tore; AMINI, Shahriar. Grid independence behaviour of fluidized bed reactor simulations using the Two Fluid Model: Effect of particle size. **Powder Technology**, v. 269, p. 153–165, 2015.
- DIVER, Richard B.; SIEGEL, Nathan. Serpentine Solid Particle Receiver. **Technical Advance SD-10471**, Sandia National Laboratories, 2006.
- DOHERTY, J. A. *et al.* Heat transfer from immersed horizontal tubes of different diameter in a gas-fluidized bed. **Energy**, v. 11, p. 773–783, 1985.
- DONS, G.; FERRARI, G. Heat transfer coefficients between gas fluidized beds and immersed spheres: dependence on the sphere size. **Powder Technology**, v. 82, n. 3, p. 293–299, 1995.
- DU, Wei *et al.* Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 5, p. 1401–1420, 2006.
- EBERT, T.A.; GLICKSMAN, L.R.; LINTS, M. Determination of particle and gas convective heat transfer components in a circulating fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, v. 48, n. 12, p. 2179–2188, 1993.
- ERGUN, S. Flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, p. 89–94, 1952.
- FERRARI, G. *et al.* CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. **Renewable Energy**, v. 105, p. 722–734, 2017.

FLAMANT, G. Theoretical and experimental study of radiant heat transfer in a solar fluidized-bed receiver. **AIChE Journal**, American Institute of Chemical Engineers, v. 28, n. 4, p. 529–535, 1982. ISSN 1547-5905. DOI: [10.1002/aic.690280402](https://doi.org/10.1002/aic.690280402).

FLAMANT, Gilles *et al.* Dense suspension of solid particles as a new heat transfer fluid for concentrated solar thermal plants: On-sun proof of concept. **Chemical Engineering Science**, v. 102, Supplement C, p. 567–576, 2013. ISSN 0009-2509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.08.051>.

FOX, W.B.; GREWAL, N.S.; MOEN, D.A. Wall-to-bed heat transfer in circulating fluidized beds. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 26, n. 4, p. 499–508, 1999.

GANGULY, Sayantan; DATE, Abhijit; AKBARZADEH, Aliakbar. Heat recovery from ground below the solar pond. **Solar Energy**, v. 155, Supplement C, p. 1254–1260, 2017. ISSN 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.068>.

GAUCHE, Paul *et al.* System value and progress of CSP. **Solar Energy**, v. 152, Supplement C, p. 106–139, 2017. Progress in Solar Energy Special Issue: Concentrating Solar Power (CSP). ISSN 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.072>.

GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, p. 285–292, 1973.

GIDASPOW, D. **Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions**. [S.l.]: Academic Press, 1994.

GREWAL, Nanak S.; SAXENA, Satish C. Experimental studies of heat transfer between a bundle of horizontal tubes and a gas-solid fluidized bed of small particles. **Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 22, p. 367–376, 1983.

GUNN, D. J. Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidised beds. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 21, p. 467–476, 1978.

GUPTA, A.V.S.S.K.S.; NAG, P.K. Bed-to-wall heat transfer behavior in a pressurized circulating fluidized bed. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, n. 16, p. 3429–3436, 2002.

HAUGOM, Erik; MYDLAND, Orjan; PICHLER, Alois. Long term oil prices. **Energy Economics**, v. 58, Supplement C, p. 84–94, 2016. ISSN 0140-9883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.06.014>.

HO, C. *et al.* Technology Advancements for Next Generation Falling Particle Receivers. **Energy Procedia**, v. 49, Supplement C, p. 398–407, 2014. Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference.

HO, Clifford K. A review of high-temperature particle receivers for concentrating solar power. **Applied Thermal Engineering**, 109, Part B, p. 958–969, 2016. Special Issue: Solar Energy Research Institute for India and the United States (SERIUS) Concentrated Solar Power.

HONG-SHUN, Li *et al.* An investigation on instantaneous local heat transfer coefficients in high-temperature fluidized beds. Experimental results. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 36, n. 18, p. 4389–4395, 1993.

HUNT, Arlon J. A new solar thermal receiver utilizing a small particle heat exchanger. **13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**, 1979.

I.A. BASHEER, M. Hajmeer. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. **Journal of Microbiological Methods**, v. 43, p. 3–31, 2000.

JAIN, A. K.; MOHIUDDIN, K. M. Artificial Neural Networks: a Tutorial. **Comput. IEEE**, 1996.

KALITA, Pankaj; MAHANTA, Pinakeswar; SAHA, Ujjwal K. Some Studies on Wall-to-bed Heat Transfer in a Pressurized Circulating Fluidized Bed Unit. *In: 0*, p. 163–172. 5th BSME International Conference on Thermal Engineering.

KIM, Kibum *et al.* A study of solid particle flow characterization in solar particle receiver. v. 83, p. 1784–1793, out. 2009.

KIM, S. W. *et al.* Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 3, p. 399–409, 2003.

KIM, S. W. *et al.* Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, p. 399–409, 2003.

KIM, Sung Won; KIM, Sang Done. Heat transfer characteristics in a pressurized fluidized bed of fine particles with immersed horizontal tube bundle. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 64, n. 0, p. 269–277, 2013.

KOLB, Gregory J.; DIVER, Richard B.; SIEGEL, Nathan. Central-Station Solar Hydrogen Power Plant. **Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME**, v. 129, p. 179–183, 2007.

KONG, L.; ZHANG, C.; ZHU, J. Evaluation of the effect of wall boundary conditions on numerical simulations of circulating fluidized beds. **Particuology**, v. 13, p. 114–123, 2014.

KUMAR, Jatinder; BANSAL, Ajay. Photocatalytic degradation in annular reactor: Modelization and optimization using computational fluid dynamics (CFD) and response surface methodology (RSM). **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 1, n. 3, p. 398–405, 2013.

LECHNER, Stefan; MERZSCH, Matthias; KRAUTZ, Hans Joachim. Heat-transfer from horizontal tube bundles into fluidized beds with Geldart A lignite particles. **Powder Technology**, v. 253, p. 14–21, 2014.

LEWIS, W. K.; GILLIAND, E. R.; GIROUARD, H. **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, v. 58, 1962.

LI, T.; BENYAHIA, S. Evaluation of wall boundary condition parameters for gas-solids fluidized bed simulations. **AIChE Journal**, v. 59, p. 3624–3632, 2013.

LIN, C. H.; FERNG, Y. M. Investigating thermal mixing and reverse flow characteristics in a T-junction using CFD methodology. **Applied Thermal Engineering**, v. 102, p. 733–741, 2016.

LOHA, Chanchal; CHATTOPADHYAY, Himadri; CHATTERJEE, Pradip K. Assessment of drag models in simulating bubbling fluidized bed hydrodynamics. **Chemical Engineering Science**, v. 75, p. 400–407, 2012.

LUN, C. K. K. *et al.* Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 140, p. 223–256, 1984.

MA, Z.; GLATZMAIER, G.C.; MEHOS, M. Development of Solid Particle Thermal Energy Storage for Concentrating Solar Power Plants that Use Fluidized Bed Technology. **Energy Procedia**, v. 49, Supplement C, p. 898–907, 2014.

MA, Z.; MEHOS, M. *et al.* Development of a Concentrating Solar Power System Using Fluidized-bed Technology for Thermal Energy Conversion and Solid Particles for Thermal Energy Storage. **Energy Procedia**, v. 69, Supplement C, p. 1349–1359, 2015. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.136>.

MAHANTA, P.; PATIL, R.S.; PANDEY, M. Effect of Particle Size and Sand Inventory on Wall-to-Bed Heat Transfer Characteristics of Circulating Fluidized Bed Riser. **Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. II, WCE 2010**, 2010.

MARTINEK, Janna; MA, Zhiwen. Granular Flow and Heat Transfer Study in a Near-Blackbody Enclosed Particle Receiver. v. 137, out. 2015.

MASOUMIFARD, Nima *et al.* Investigation of heat transfer between a horizontal tube and gas-solid fluidized bed. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 29, n. 5, p. 1504–1511, 2008.

MEHTA, Unmeel B. Guide to Credible Computer Simulations of Fluid Flows. **Journal of Propulsion and Power**, v. 12, n. 5, p. 940–948, 1996.

MEHTA, Unmeel B. Some Aspects of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics Results. **Journal of Fluids Engineering**, v. 113, p. 538–543, 1991.

MEIER, A. A predictive CFD model for a falling particle receiver/reactor exposed to concentrated sunlight. **Chemical Engineering Science**, v. 54, n. 13, p. 2899–2905, 1999. ISSN 0009-2509. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00376-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00376-5).

MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, G. Geoffrey. **Introduction to linear regression analysis**. [S.l.]: John Wiley e Sons, 2012. P. 821.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. [S.l.]: John Wiley e Sons, 2012. P. 752.

NATALE, Francesco Di; LANCIA, Amedeo; NIGRO, Roberto. A single particle model for surface-to-bed heat transfer in fluidized beds. **Powder Technology**, v. 187, n. 1, p. 68–78, 2008.

NIST/SEMATECH. **e-Handbook of Statistical Methods**. [S.l.: s.n.], 2013. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. Acessado em: 29-12-2017.

ORTEGA-CASANOVA, J. Application of CFD on the optimization by response surface methodology of a micromixing unit and its use as a chemical microreactor. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 117, p. 18–26, 2017.

PAGLIUSO, Josmar Davilson; LOMBARDI, Geraldo; GOLDSTEIN, Leonardo. Experiments on the local heat transfer characteristics of a circulating fluidized bed. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 20, n. 3, p. 170–179, 2000.

PAGLIUSO, Josmar Davilson; LOMBARDI, Geraldo; JR., Leonardo Goldstein. Experiments on the local heat transfer characteristics of a circulating fluidized bed. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 20, n. 3 – 4, p. 170–179, 2000.

PARRADO, C. *et al.* 2050 LCOE improvement using new molten salts for thermal energy storage in CSP plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, Supplement C, p. 505–514, 2016. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.148>.

- PAUDEL, S.; SAENGER, N. Grid refinement study for three dimensional CFD model involving incompressible free surface flow and rotating object. **Computer and Fluids**, v. 143, p. 134–140, 2017.
- PEI, P.; ZHANG, K.; WEN, D. Comparative analysis of CFD models for jetting fluidized beds: The effect of inter-phase drag force. **Powder Technology**, v. 221, p. 114–122, 2012.
- PEIRO, Gerard *et al.* Influence of the heat transfer fluid in a CSP plant molten salts charging process. **Renewable Energy**, v. 113, Supplement C, p. 148–158, 2017. ISSN 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.083>.
- REDDY, B.V.; NAG, P.K. Axial and radial heat transfer studies in a circulating fluidized bed. **International Journal of Energy Research**, v. 21, p. 1109–1122, 1997.
- REN21. **Renewables 2016 Global Status Report**. [S.l.], 2016.
- RICHARDSON, J.F.; SHAKIRI, K.J. Heat transfer between a gas-solid fluidized bed and a small immersed surface. **Chemical Engineering Science**, v. 34, n. 8, p. 1019–1029, 1979.
- ROACHE, P. J. Quantification of Uncertainty in Computation Fluid Dynamics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 29, p. 123–160, 1997.
- SAKADJIAN, B. *et al.* Fluidized-bed Technology Enabling the Integration of High Temperature Solar Receiver CSP Systems with Steam and Advanced Power Cycles. **Energy Procedia**, v. 69, Supplement C, p. 1404–1411, 2015. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014. ISSN 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.126>.
- SCHAEFFER, D. G. Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow. **Journal of Differential Equations**, v. 66, p. 19–50, 1987.
- SCHWAIGER, K. *et al.* Fluidized Bed Steam Generators for Direct Particle Absorption CSP-plants. **Energy Procedia**, v. 69, Supplement C, p. 1421–1430, 2015.
- SHI, D.; NICOLAI, R.; REH, L. Wall-to-bed heat transfer in circulating fluidized beds. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 37, n. 4, p. 287–293, 1998.
- SIEGEL, N.; GROSS, M. *et al.* Physical Properties of Solid Particle Thermal Energy Storage Media for Concentrating Solar Power Applications. **Energy Procedia**, v. 49, Supplement C, p. 1015–1023, 2014.

SIEGEL, Nathan; KOLB, Greg. Design and on-sun testing of a solid particle receiver prototype. **ASME 2008 2nd International Conference on Energy Sustainability**, 2008.

SNIDERMAN, Debbie. **Salt Heat Transfer Fluids in CSP**. 2012. Disponível em: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/heat-transfer/salt-heat-transfer-fluids-in-csp>.

SORENSEN, Bent. **Renewable Energy**. Segunda Edição. [S.l.]: Academic Press, 2000. ISBN 978-0126561524.

SUNDARESAN, R.; KOLAR, Ajit Kumar. Axial heat transfer correlations in a circulating fluidized bed riser. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, n. 1, p. 985–996, 2013.

TAGGART, Stewart. Hot stuff: CSP and the Power Tower. **Renewable Energy Focus**, v. 9, n. 3, p. 51–54, 2008. ISSN 1755-0084. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(08\)70094-5](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(08)70094-5).

TAOFEEQ, Haidar; AL-DAHMAN, Muthanna. Heat transfer and hydrodynamics in a gas-solid fluidized bed with vertical immersed internals. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 122, p. 229–251, 2018.

TWIDELL, J.; WEIR, A.D. **Renewable Energy Resources**. [S.l.]: E & FN Spon, 1986. ISBN 9780419120100.

VALVERDE MILLÁN, José Manuel. **Introduction. The Classical Geldart's Diagram and the New Type of Gas-Fluidization Behavior**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. P. 1–6.

VIGNAROUBAN, K. *et al.* Heat transfer fluids for concentrating solar power systems A review. **Applied Energy**, v. 146, Supplement C, p. 383–396, 2015. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.125>.

WAGNER, Michael. Simulation and predictive performance modeling of utility-scale central receiver system power plants, jan. 2008.

WANG, Fangzhou *et al.* Experimental study of a single quartz tube solid particle air receiver. **Solar Energy**, v. 123, Supplement C, p. 185–205, 2016.

WANG, Qinggong *et al.* Numerical study of gas-solid flow in a coal beneficiation fluidized bed using kinetic theory of granular flow. **Fuel Processing Technology**, v. 111, n. 0, p. 29–41, 2013.

WEN, C. Y.; YU, Y. H. Mechanics of fluidization. **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, v. 62, p. 100–111, 1966.

- WIMAN, J.; ALMSTEDT, A.E. Hydrodynamics, erosion and heat transfer in a pressurized fluidized bed: influence of pressure, fluidization velocity, particle size and tube bank geometry. **Chemical Engineering Science**, v. 52, n. 16, p. 2677–2695, 1997.
- WINAYA, Nyoman S.; BASU, Prabir. Effect of pressure and carbon dioxide concentration on heat transfer at high temperature in a Pressurized Circulating Fluidized Bed (PCFB) combustor. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 44, n. 15, p. 2965–2971, 2001.
- WU, R. L. *et al.* Heat transfer from a circulating fluidized bed to membrane waterwall surfaces. **AIChE Journal**, v. 33, p. 1888–1893, 1987.
- WU, R.L. *et al.* Suspension to Surface heat transfer in a circulating fluidized bed combustor. **AIChE Journal**, v. 35, n. 10, p. 1685–1691, 1989.
- XIAO, Gang *et al.* Simulation and experimental study on a spiral solid particle solar receiver. **Applied Energy**, v. 113, Supplement C, p. 178–188, 2014.
- YANG, Min; YU, Dawei *et al.* Optimization of MBR hydrodynamics for cake layer fouling control through CFD simulation and RSM design. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 102–111, 2017.
- YANG, Ning; ZHOU, Yunlong; QI, Tianyu. The heat transfer between an immersed surface of moving lignite and small particles in a fluidized bed equipped with an inclined slotted distributor. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 92, p. 366–374, 2018.