



*Ministério da Educação*  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
Criada pela Lei 10.435, de 24 de Abril de 2002

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**OTIMIZAÇÃO DE PRODUTO NA FASE CONCEITUAL**  
**VIA MODELAÇÃO NUMÉRICA**

**Julián Ignacio López Arcos**

**Itajubá**  
**Agosto de 2013**



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei 10.435, de 24 de Abril de 2002

i

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Julián Ignacio López Arcos**

## **OTIMIZAÇÃO DE PRODUTO NA FASE CONCEITUAL VIA MODELAÇÃO NUMÉRICA**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Produção como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia de Produção**

**Área de Concentração: Qualidade**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos E. Sanches da Silva**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Ramiro G. Ramirez Camacho**

**Agosto de 2013**

**Itajubá – MG**



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei 10.435, de 24 de Abril de 2002

ii

# UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Julián Ignacio López Arcos**

## OTIMIZAÇÃO DE PRODUTO NA FASE CONCEITUAL VIA MODELAÇÃO NUMÉRICA

Dissertação aprovada por banca examinadora em 13 de setembro de 2013, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

Prof. Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva

**Itajubá 2013**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre do meu lado.

À minha família por me oferecer o amor e apoio incondicional.

Aos professores e amigos Dr. Carlos Eduardo Sanches da Silva, Dr. Ramiro Gustavo Ramirez Camacho pela orientação, apoio e por sempre acreditar em mim, sem eles este sono não seria realidade.

Aos professores Dr. Anderson Paulo de Paiva, Dr. Genésio José Menon pela clareza e grandes contribuições no trabalho.

A todos os professores do Programa de Engenharia de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

A todos os meus amigos, que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos do GEPE por fazer-me sentir em família.

A CAPES e FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

## RESUMO

O trabalho consiste na análise da otimização de um produto na fase conceitual via modelagem numérica. Foi utilizada a integração das metodologias: dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e o delineamento de experimentos (DOE), para obter o metamodelo do produto para cada característica; a técnica de otimização multiobjetivo de Interseção Normal à Fronteira ou NBI (*Normal Boundary Intersection*) foi utilizada para otimizá-las. O objeto de estudo da análise de otimização, foi aplicada num difusor interno da tubulação de um trocador de calor de um forno industrial. Vale salientar que não existe um gabarito para a confecção do difusor. Foi identificado que o aumento de troca de calor, é comprometida pela queda de pressão no difusor, o que afeta o desempenho do forno. O uso da técnica de otimização multiobjetivo NBI, foi empregada visando estabelecer os parâmetros conceituais otimizados que atendam as duas funções conflitante (fluxo de calor e queda de pressão). Simplificações no modelo em CFD foram realizadas com base em informações técnicas e em restrições de fabricação e montagem. Após a análise, foram reportados resultados de uma configuração geométrica ótima do difusor, o que demonstra a efetividade da otimização na fase conceitual considerando o fluxo de calor e a queda de pressão do produto. Esta metodologia pode ser estendida para o desenvolvimento de outros difusores com diferentes dimensões.

Palavras-chave: Dinâmica dos fluidos computacional (CFD), delineamento de experimentos (DOE), fase conceitual, (PDP), Processo de desenvolvimento de produto.

## ABSTRACT

This work consists, of product optimization analysis in the conceptual phase via numerical modeling. The integration of methodologies was used: computational fluid dynamics (CFD) and design of experiments (DOE), to obtain the product metamodel for each feature, the technique of multi-objective optimization of the Normal Boundary Intersection or NBI (Normal Boundary Intersection) has been used to optimize them. The optimization study analysis object was applied in an internal diffuser pipe heat exchanger of an industrial oven. Highlights that there is a template for making the diffuser. Was identified that in heat exchange enhancement, is engaged by pressure drop across the diffuser, that affects the oven performance. The multiobjective optimization technique (NBI) was used to establish the conceptual parameters optimized to meet the two conflicting functions (heat flux and pressure drop). Simplifications in (CFD) model were based on technical information and restrictions by manufacturing and assembly. After analysis results reported are an new optimum geometrical configuration of the diffuser, which demonstrates the effectiveness of the optimization in the conceptual phase of product development, considering the heat flux and the pressure drop. This methodology can be extended to the development of other diffusers with different dimensions.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), Design of Experiments (DOE), conceptual phase, Product Development Process (PDP).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Difusores empregados nas técnicas passivas.....	19
Figura 2.2 - Difusor de fita cônica; Fonte: (FAN <i>et al.</i> , 2011).....	19
Figura 2.3 - Resumo da Metodologia CFD .....	22
Figura 2.4 - Arranjo composto central para três fatores .....	26
Figura 2.5 – Otimização com Objetivo Único.....	28
Figura 2.6 - Otimização Multiobjectivo .....	29
Figura 3.1 - 1ª Fase – Análise Preliminar.....	31
Figura 3.2 - Experimento para obter o Metamodelo .....	32
Figura 3.3 - Etapas da Otimização NBI.....	32
Figura 3.4 - Integração das fases 1 e 2 .....	33
Figura 3.5 - Etapa da Fase 3 .....	34
Figura 4.1 - Forno CG6, da PRÁTICA TECHNICOOK® .....	35
Figura 4.2 - Desdobramento Forno CG6 da PRÁTICA TECHNICOOK® .....	36
Figura 4.3 - Elementos que compõem o subsistema do trocador .....	37
Figura 4.4 - Representação esquemática do subsistema do trocador .....	38
Figura 4.5 - Representação em 3D do Modelo geométrico do difusor no trocador .....	39
Figura 4.6 - Plano 2D .....	40
Figura 4.7 - Modelo do difusor 2D com Axi-simetria axial.....	40

Figura 4.8 - Entradas x Saídas .....	43
Figura 4.9 - Linhas de função corrente .....	44
Figura 4.10 - Fluxo do calor total .....	45
Figura 4.11 - Condições iniciais da malha com células triangulares e tetraédricas .....	48
Figura 4.12 - Objetivo da Otimização .....	50
Figura 4.13 - Fronteira de Pareto .....	54
Figura 4.14 - Taxa de Calor ótima ( $w/m^2$ ) .....	55
Figura 4.15 - Linhas de corrente .....	56
Figura 4.16 - Taxa do Metamodelo vs Simulação .....	58
Figura 4.17 - Queda de pressão do Metamodelo vs Simulação .....	58
Figura 4.18 - Linearidade da Taxa de Calor .....	59
Figura 4.19 - Linearidade da Queda de Pressão .....	59
Figura 6.1 - Malha hexaédrica tipo O-Grid .....	62
Figura 6.2 - Discretização da geometria .....	63



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Fatores a e b para arranjos CCD.....	27
Tabela 4.1- Limites inferiores e superiores das variáveis de projeto .....	42
Tabela 4.2 - Dados do teste piloto .....	44
Tabela 4.3 - Arranjo CCD .....	46
Tabela 4.4 - Comportamento do metamodelo baseado no algoritmo NBI.....	53
Tabela 4.5 - Ponto de ótimo .....	54
Tabela 4.6 - Comparação da Simulação versus Simulações .....	57
Tabela 6.1 - Avaliações em vários modelos de turbulência .....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise da Variância
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central
CCI	Arranjo Inscrito
CCF	Arranjo da Fase Centrada
CFD	Dinâmica Computacional de Fluidos
DOE	Delineamento de experimentos
NBI	Interseção Normal à Fronteira
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
OLS	Método dos mínimos Quadrados Ordinários
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Alfa (distancia entre os pontos centrais)
$\beta$	Beta (Coeficientes dos parâmetros)
$\subset$	Esta contida
$\Delta P$	Perda de carga ou queda de pressão (Pa)
$\epsilon$	Épsilon (erro experimental)
$\Phi$	Phi (matriz Payoff)
$k$	Número de fatores
$k-\epsilon$	K-Épsilon Modelo de turbulencia
$\eta$	resposta de interesse
$q$	Taxa de transferência de calor ( $w/m^2$ )
$\hat{\rho}$	Ro - raio da região esférica abrangida pelo arranjo CCD
$R^2$	Coeficiente de determinação
$\mathfrak{R}^n$	Espaço Real n Dimensões
$\Sigma$	Somatório
$v$	Variável desconhecida
$X$	vetor de variáveis independentes
$x_i$	Valor de cada componente
$y$	Resposta de Interesse
$w$	Vetor de valores atribuido aos pesos
$\rightarrow$	Se..então

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Importância do tema.....	13
1.2 Objetivos .....	14
1.3 Justificativa .....	14
1.4 Limitações .....	15
1.5 Metodologia e estrutura do trabalho .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Considerações para o desenho do Difusor .....	18
2.2 Dinâmica Computacional de Fluidos - CFD.....	20
2.3 Projeto e Análise de Experimentos - DOE .....	23
2.4 Metodologia da Superfície de Resposta.....	24
2.5 Otimização Multi-Objetivo NBI .....	28
<b>3. MÉTODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
3.1 Projeto de Experimentos .....	30
<b>4. APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
4.1 Primeira Fase – Análise Preliminar .....	35
4.1.1 Desdobramento do Produto .....	36

4.1.2 Transferência de Calor - Método de solução .....	38
4.2 Segunda Fase – Experimento para obter o metamodelo .....	41
4.2.1 Identificação do Problema.....	41
4.2.2 Seleção da variável de resposta.....	42
4.2.3 Escolha do tipo de arranjo .....	45
4.2.4 Desenvolvimento do experimento (simulação em CFD) .....	47
4.2.5 Análise estatística dos dados .....	48
4.3 Terceira Fase – Método NBI.....	49
4.4 Comparação dos resultados.....	56
<b>5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>60</b>
5.1 Conclusões .....	60
5.2 Sugestões para estudos futuros .....	60
<b>6. APÊNDICES .....</b>	<b>62</b>
6.1 Validação – analítica laminar.....	62
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>70</b>
ANEXO A – Parte da listagem do arquivo Script.dat .....	70
ANEXO B – Parte da listagem do Arquivo Journal.jou .....	72

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Importância do tema

Atualmente, o mercado exige resposta rápida às necessidades dinâmicas dos clientes, tendo restrições, cada vez maiores, de prazo e recursos. Como solução para essas limitações estão surgindo de maneira crescente o desenvolvimento e aplicação de sistemas computacionais, não apenas para elaboração de desenhos, mas também para o desenvolvimento de conceitos, testes virtuais e otimização, números de ensaios para obter um produto otimizado na fase conceitual pode ser minimizado (YOSHIMURA, 2010).

Segundo Clark e Fujimoto (1991) “o desenvolvimento de produtos é um processo pelo qual uma organização transforma as oportunidades de mercado e de possibilidades técnicas em informações para a fabricação de um produto comercial”. Otto e Wood, (1998; 2000) apresentam a geração de conceitos como uma fase do PDP onde são recolhidas todas as informações disponíveis do produto como especificações do mercado para o produto, e de como o produto satisfará as necessidades dos clientes, independentemente da implementação.

Folkestad e Johnson (2002) advertem que bons resultados do PDP não são obtidos com o uso de técnicas isoladas e sim combinadas. Myers *et. al.* (2009) afirmam que, as indústrias têm motivado o uso de experimentos para investigar os fatores que afetam o desempenho do produto; geralmente empregando planos estatísticos de experimentos como arranjos ortogonais que especificam combinações de valores do fator a ser usado em protótipos de produtos para o experimento.

Sendo assim, Montgomery (1999) define o Delineamento de experimentos (Design of Experiments DOE) como uma técnica estatística que permite identificar e quantificar as causas efeito dentro de um estudo experimental. As variáveis vinculadas nas causas sofrem uma manipulação, para medir o efeito sobre as outras variáveis de interesse. Os passos para o delineamento de experimentos são: (1) identificar o problema; (2) escolher os fatores, níveis e valores; (3) selecionar a variável de resposta; (4) escolher o arranjo do experimento;

(5) desenvolver o experimento; (6) analisar estatisticamente os dados obtidos; (7) realizar as conclusões e recomendações. A partir do **passo 5**, que é desenvolver o experimento, utiliza-se a ferramenta de simulação baseado na metodologia da Dinâmica Computacional de Fluidos (Computational Fluid Dynamics- CFD).

Versteeg e Malalasekera (1995) descrevem o CFD como uma técnica eficiente para análises de locais de campo de escoamento, troca de calor, e fenômenos associados com reações químicas, por meio da simulação e modelagem das equações de conservação, onde através da técnica de volumes finitos, são resolvidas simultaneamente utilizando processadores de alto desempenho. Diversas aplicações industriais como na aerodinâmica de aeronaves, hidrodinâmica, turbomáquinas, resfriamento de componentes elétricos e eletrônicos, entre outros.

## 1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a otimização de parâmetros de produtos na fase conceitual a partir de modelação numérica. Além de obter o depósito de patente do difusor do trocador de calor do forno CG6.

## 1.3 Justificativa

Essa pesquisa justifica-se devido:

- Permitir adequar respostas rápidas às necessidades dinâmicas dos clientes, tendo restrições, cada vez maiores, de prazo e recursos. Como solução para essas limitações estão surgindo de maneira crescente o desenvolvimento e aplicação de sistemas computacionais de alto desempenho para o desenvolvimento de conceitos, testes virtuais e otimização, assim o número de ensaios para obter um conceito otimizado pode ser minimizado (YOSHIMURA, 2007).
- Minimizar as interações nas fases de desenvolvimento de produtos é uma ótima aproximação na engenharia simultânea, reduzindo tempo de desenvolvimento e custos.

(WHEELWRIGHT; CLARK, 1992).

- Projetar e desenvolver novos produtos ou melhorar os já existentes, por meio de técnicas de delineamento de experimentos (DOE), (MONTGOMERY, 2006).

## 1.4 Limitações

O presente trabalho encontra-se limitado pelos seguintes elementos:

- Não foi realizada a verificação e validação dos resultados por meio da confecção e teste de um protótipo;
- O modelo poderia agregar outros parâmetros (materiais do difusor; materiais do trocador de calor; dimensões do trocador de calor e do difusor; geometria do tubo do trocador de calor; tipo de queimador; geometria do difusor; outras fontes de energia: carvão, óleo, ...). Vale destacar que esses outros parâmetros não foram analisados devido a limitações práticas e técnicas impostas pela empresa;
- Entre as técnicas do Projeto e Análise de Experimento, foi utilizado somente a Metodologia de Superfície de Resposta;
- Como método de otimização, foi empregado somente o NBI (Normal Boundary Intersection);
- O modelo CFD foi bidimensional;
- O forno utilizado trocou seu queimador os dados utilizados para as otimizações foram realizados considerando o queimador antigo;
- O trocador de calor possui vinte e quatro tubos os dados utilizados para as otimizações foram médios e não os valores reais para cada tubo do trocador de calor;
- O único algoritmo de otimização utilizado foi o Algoritmo Genético, executado a partir de softwares comerciais.



## 1.5 Metodologia e estrutura do trabalho

Este primeiro capítulo teve como objetivo a introdução do problema de pesquisa. Dentro desta proposta, a importância do PDP foi contextualizada frente a rapidez e qualidade do desenvolvimento de produtos. A condução desta pesquisa foi fundamentada no delineamento sugerido em Ulrich e Eppinger (2008), tendo como primeiro o entendimento da função da fita difusora no trocador de calor e sua construção. Foram necessárias reuniões com os colaboradores da empresa, pois o produto objeto de pesquisa é fabricado de maneira empírica e aleatória. Utilizou-se como referencia os dados anteriormente coletados na pesquisa de iniciação científica “Análise da Viabilidade Técnica de um Sistema de Refrigeração por Absorção Utilizando os Gases dos Fornos de Panificação”, (SILVA, 2006).

As técnicas do Projeto e Análise de Experimentos foi dividido em duas fases: 1º) Metodologia de Superfície de Resposta, para desenvolvimento de modelos matemáticos e análise da influência dos parâmetros; 2º) otimização NBI, para determinação dos parâmetros ótimos.

Com isso, o objetivo geral enunciado anteriormente pode ser desdobrado em:

- Desenvolver modelos matemáticos das respostas de interesse da troca de calor, auxiliado via simulação CFD;
- Análisar a influência dos parâmetros sobre a geometria;
- Identificar de uma combinação ótima dos parâmetros visando a
  - maximização do fluxo de calor e a
  - minimização da queda de pressão;
- Validar os resultados via simulação CFD.

Segundo o delineamento de experimentos, foram criadas as geometrias necessárias no software, para testá-las com as configurações do problema real, coletando as respostas das variáveis de saída. Coletadas as informações, foram avaliados estatisticamente apoiados no

software comercial; construir os metamodelos para cada resposta foi o passo seguinte. A otimização dos metamodelos baseado no método de otimização NBI. A comparação e avaliação dos resultados via simulação CFD foi feita antes de tirar as conclusões.

Finalmente, levando em consideração o que foi discutido no Capítulo 1 e para que os objetivos definidos pudessem ser devidamente alcançados, os capítulos seguintes foram organizados da seguinte forma:

- O **Capítulo 2** apresenta os conceitos necessários para a fundamentação teórica desta pesquisa. São apresentados os principais conceitos relacionados à Processo de Desenvolvimento de Produtos. Quanto às técnicas de experimentação e otimização, discute-se o Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia de Superfícies de Resposta, Dinâmica computacional de Fluidos e os aspectos teóricos para a estratégia de ponderação das respostas no algoritmo NBI.
- O **Capítulo 3** descreve o método experimental utilizado, detalhando os equipamentos empregados e as etapas seguidas em cada fase do estudo.
- No **Capítulo 4** o método experimental é aplicado para a otimização da troca de calor, apresentando e discutindo simultaneamente os resultados obtidos em cada etapa do estudo. A estratégia de ponderação das respostas para o NBI é verificada experimentalmente ao final deste capítulo.
- O **Capítulo 5** encerra o trabalho, apresentando a conclusões, contribuições e sugestões para estudos futuros.

Complementam a dissertação a bibliografia, os anexos e apêndices.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos que compõem a fundamentação teórica desta dissertação, abordando: a o uso do difusor na troca de calor; a simulação na ferramenta de CFD; o delineamento de experimentos; e a otimização do difusor da geometria. A discussão de tais fundamentos é importante para que a característica do processo de desenvolvimento desse produtos seja bem conhecido, bem como suas aplicações, vantagens e oportunidades.

### 2.1 Considerações para o desenho do Difusor

As técnicas de aumento de troca de calor em superfícies são muito importantes para poupar energia e para o uso ótimo das fontes de energia. As técnicas de aumento de troca de calor estão divididas em duas classes, as passivas e as ativas (WEBB, 1994). As técnicas passivas são as de maior preferencia pelos pesquisadores por não usar fontes externas de energia, e requer fazer extensões de superfícies, rugosidade nas superfícies e dispositivos de fluxo turbulento. Exemplos de pesquisas com técnicas passivas são as apresentadas na **Figura 2.1: a)** inserção de uma fita enrolada (EIAMSA-ARD; PROMVONGE, 2010); **b)** extensão do tubo (GUO; TAO; SHAH, 2005); **c)** inserção de uma bobina de arame (YAKUT; SAHIN, 2004); **d)** a inserção de malha (WANG; SUNDEN, 2002).

GUO *et. al.* (1998) introduz o conceito de aumento de troca de calor convectivo, por meio do maior ângulo entre os o campo de escoamento e o gradiente de temperatura para gerar turbulência com uma pequena queda de pressão. Segundo Wang e Sundén (2002) a seleção do elemento passivo, a ser introduzido no interior do tubo do trocador de calor, depende dos fatores custo e desempenho; comparando vários elementos concluiu-se que os que apresentam maiores eficiências são a fita enrolada e a bobina de arame (Vide **Figura 2.1 c-d)**, entre tanto, a fita enrolada apresentou a maior eficiência desconsiderando a queda de pressão.

Foi demonstrado em Fan et al. (2011) via simulação numérica às características como numero de Nusselt, fator de fricção e avaliação de desempenho, por meio de elementos com

configuração de fita cônica (**Figura 2.2**) apresentam bom desempenho na troca de calor (cinco vezes maior do que um tubo liso sem elemento inserido).

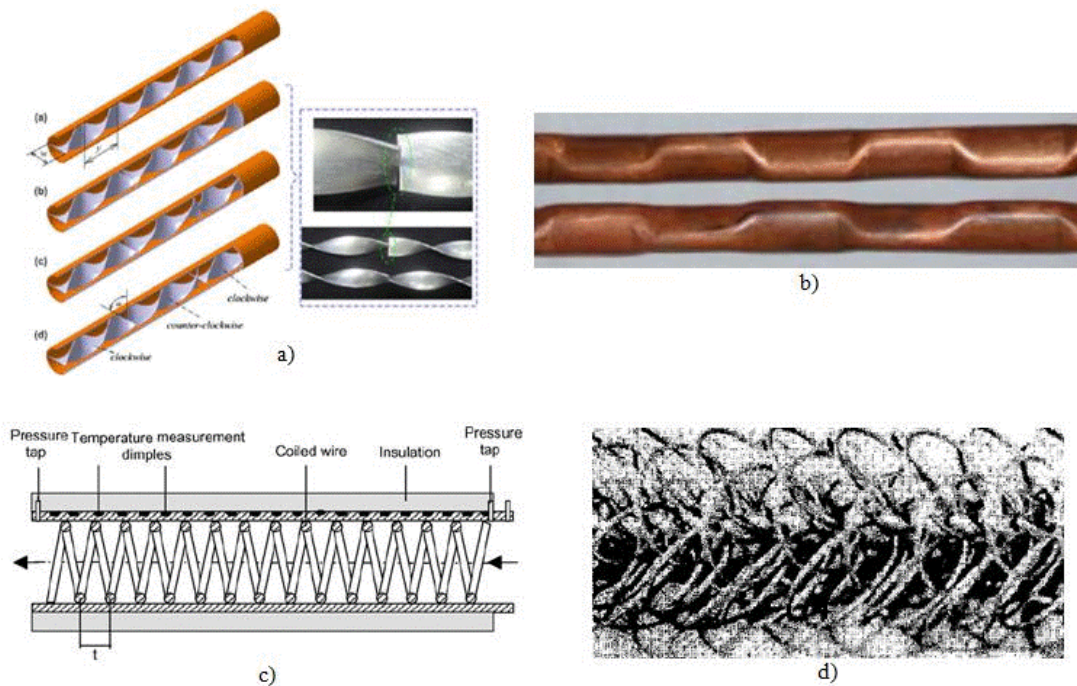


Figura 2.1 - Difusores empregados nas técnicas passivas.

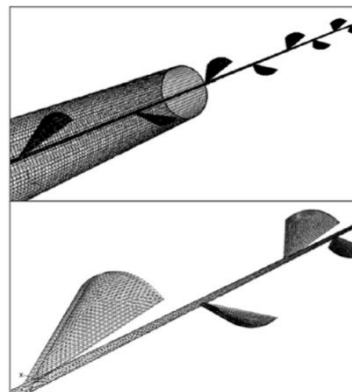


Figura 2.2 - Difusor de fita cônica; Fonte: (FAN *et al.*, 2011).

A pesquisa de Turan e Öztop (2012) permite afirmar que a troca de calor e o campo de

escoamento em um tubo, esta é função direta da inserção de diferentes tipos de elementos passivos. Foram testados três diferentes tipos de discos, inseridos perpendicularmente ao longo do tubo, com pequenas variações de chanfro nos discos, com diferentes números de Reynolds. A validação do estudo numérico foi realizada a partir da obtenção de dados experimentais para diferentes configurações geométricas dos discos.

Um difusor é um dispositivo mecânico que é concebido para controlar as características do escoamento a partir de uma condição de entrada para uma de saída desejada, como maior pressão ou velocidade, em algumas aplicações são usados para reduzir a velocidade do escoamento a fim de recuperar a perda de carga do fluxo num escoamento dentro de um tubo o que traduz em um aumento da troca de calor. Historicamente tem sido desenvolvido a partir de métodos empíricos, pequenas mudanças em desenho de parâmetros resultam grandes resultados no desempenho (WHITE, 1999).

A confecção de diferentes configurações de difusores, e testá-las implicam na construção de bancos de ensaios para a experimentação. Em muitas situações, os experimentos são caros e necessitam de bastante tempo para a realização dos ensaios. Além da necessidade de se considerar os processos de fabricação envolvidos nos elementos passivos, que dependendo dos detalhes mecânicos podem apresentar vantagens ou desvantagens econômicas. Nesse sentido, existe o comprometimento entre a maior eficiência de troca de calor e o custo de fabricação.

Uma alternativa de abordagem, é utilizar as técnicas numéricas de simulação do escoamento com base em softwares comerciais de Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD *Computer Fluid Dynamics*) (FLUENT® e CFX®).

## **2.2 Dinâmica Computacional de Fluidos - CFD**

Muitos problemas da engenharia vêm sendo abordados com base em diferentes técnicas, como: experimentais com base em análises adimensionais, soluções puramente analíticas e numéricas.

As análises do campo de escoamento com base em técnicas numéricas de solução de equações diferenciais têm se aperfeiçoado com o advento da computação digital principalmente nos últimos 30 anos, apresentando-se como complemento às áreas puramente teóricas e experimentais da mecânica dos fluidos, onde por razões de complexidade, custo e tempo, para possibilitar o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos; e recebeu o nome de dinâmica computacional de fluidos ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD) em inglês. O CFD é uma área nova, com contínuo desenvolvimento e expansão, utilizada por pesquisadores e profissionais das mais diversas áreas em aplicações industriais: aerodinâmica, hidrodinâmica, turbo maquinaria, elétrica, eletrônica, entre outros.

A simulação numérica auxiliada pelos modernos processadores, aceleram o desenvolvimento do projeto, por meio da redução do tempo gasto em ensaios experimentais. A CFD por meio de técnicas de visualização científica auxilia o entendimento da física do escoamento, permitindo ao projetista identificar os fenômenos do escoamento embutidos no grande volume de dados. A solução simulada ou modelada de um certo problema de engenharia pode ser integrada com programas de otimização de forma a realizar modificações nos protótipos virtuais até que seja alcançada uma função objetivo. Esta metodologia de projeto otimizado, permite racionalizar a confecção de protótipos físicos e o planejamento de experimentos, por meio da redução do número de horas necessárias em ensaios em bancos experimentais (OLIVEIRA, 2010).

Para que o fenômeno possa ser resolvido numericamente, é necessário estabelecer um modelo matemático (Equações de conservação) que representa o comportamento físico do problema. Na simulação do escoamento interno é importante quantificar os mecanismos de dissipação de energia associados às perdas de energia. Nesse sentido, a escolha do modelo de turbulência dependerá do tipo de problema a ser tratado.

Levando em consideração a complexidade da geometria, os fenômenos envolvidos no problema, o grau de refinamento da malha computacional e o modelo computacional adotado pode-se chegar a um valor muito próximo do real. Vale salientar que, para simulação de escoamentos turbulentos, existem vários modelos matemáticos disponíveis, e cabe ao

engenheiro o estudo das aplicações e limitações destes, assim como o estudo dos fenômenos envolvidos e a validação dos resultados obtidos experimentalmente.

As simulações numéricas são compostas por três fases: **a) pré-processamento**: gera-se a geometria bidimensional ou tridimensional, malha estruturada ou não estruturada por meio do ICEM-CFD®. **b) processamento**: onde as equações de conservação na forma diferencial, que representam o fenômeno são resolvidas algebricamente com base em técnicas numéricas **c) pós-processamento**: obtenção das grandezas locais e globais do escoamento através de técnicas gráficas de visualização. Na **Figura 2.3**, apresenta-se um esquema da integração destas três fases.

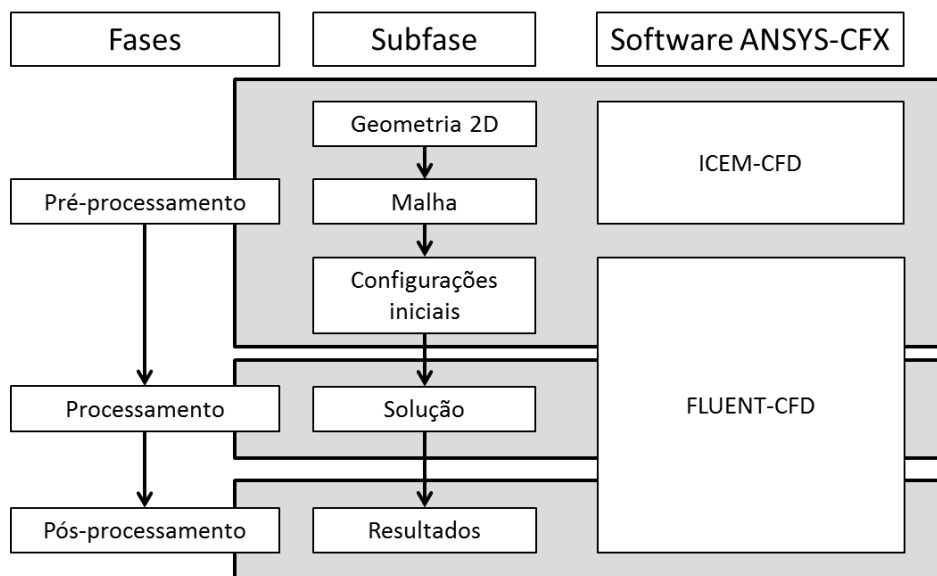


Figura 2.3 - Resumo da Metodologia CFD

O difusor pode ser desenvolvido empiricamente ou a partir de experimentação; um experimento é um processo que tem como objetivo confirmar ou verificar uma ou varias hipóteses, em relação com determinado fenômeno mediante a manipulação e o estudo de correlações das variáveis que presumivelmente são a sua causa.

## 2.3 Projeto e Análise de Experimentos - DOE

O Projeto e Análise de Experimentos – DOE é um conjunto de ferramentas importantes para o desenvolvimento de produtos e processos. As indústrias tem motivado o uso de experimentos para investigar os fatores que afetam o desempenho do produto. Geralmente empregando planos estatísticos de experimentos como arranjos ortogonais que especificam combinações de valores do fator a ser usado em protótipos de produtos para o experimento (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009).

Alguns dos principais benefícios ao emprego das técnicas do DOE podem ser, processos com maior desempenho; especificações nominais com menor variabilidade e maior conformidade; tempo e custos de desenvolvimento de produtos ou quantidade de processos menor.

Montgomery (2006) afirma que DOE trabalha baixo a diretriz de três princípios básicos, aleatorização que consiste na execução dos experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação; replicação que é a repetição de um mesmo teste várias vezes, criando uma variação para a variável de resposta utilizada para avaliação do erro experimental; blocagem que deve ser utilizada quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais. Esta técnica permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados.

O emprego da abordagem estatística no Projeto e Análise de Experimentos necessita que as pessoas envolvidas nos experimentos tenham uma ideia clara a respeito do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e de um entendimento básico das ferramentas de análise utilizadas. Assim, Montgomery (2006) propõe que o emprego do Projeto e Análise de Experimentos deve considerar as seguintes etapas:

1. Definir claramente o problema;
2. Escolher os fatores e definir dos níveis de trabalho;



3. Selecionar as variáveis de resposta;
4. Escolher o projeto experimental, existem varias opções como: planejamento fatorial completo, fracionado; os arranjos de Taguchi e a Metodologia de superfície de resposta.
5. Executar os experimentos;
6. Analisar estatisticamente os dados;
7. Elaborar as conclusões e recomendações.

Entre as varias opções de projeto experimental, Borkowski e Valeroso (2001) afirmam que os projetos de pesquisa na indústria, manufatura, na engenharia e nas ciências físicas requerem de experimentação para encontrar relações entre as variáveis de desenho e as respostas de interesse, apresentado casos de sucesso no emprego desta metodologia podem ser observados em (CHEN; HUANG; HUNG, 2010; SUN et al., 2010). O presente trabalho utilizou a Metodologia de Superfície de Resposta, pela natureza do estudo, que propõe à otimização da geometria do difusor de um trocador de calor, em função do gerador de vórtices ou aletas. Sendo assim, os principais conceitos que fundamentam a Metodologia de Superfície de Resposta são discutidos com maiores detalhes no item seguinte.

## **2.4 Metodologia da Superfície de Resposta**

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é descrita por Myers *et. al.* (2009) como um conjunto de ferramentas estatísticas e matemáticas usadas de maneira sequencial para modelar e analisar com o objetivo de determinar as condições ótimas de operação ou para determinar uma região no espaço na qual os fatores satisfazem as necessidades operativas de um processo ou sistema.

Khuri e Cornell (1996) descrevem o procedimento para desenvolvimento da superfície de resposta:

1. Planejar a serie de experimentos para a medição adequada e viável da resposta de interesse.
2. Desenvolver o modelo matemático da superfície de resposta de segunda ordem com os melhores ajustes.

3. Encontrar o conjunto ótimo de parâmetros experimentais que geram um valor máximo ou mínimo de resposta.
4. Representar os efeitos diretos e interativos de parâmetros do processo graficamente em duas ou três dimensões.

Segundo Borkowski e Valeroso (2001) os problemas na metodologia de superfície de resposta (RSM) envolve a resposta de interesse  $\eta$ , a qual é função do vetor  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_2, \dots, x_k)$  de  $k$  variáveis independentes;  $\eta = v(\mathbf{X})$  e a forma de  $v$  é desconhecida, mas  $v$  pode-se aproximar pelo polinômio de baixa ordem  $f(\mathbf{X})$  tais como o modelo de superfície de resposta de segunda ordem apresentado na **Equação (2.1)**.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=i+1}^k \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ji} x_i^2 + \epsilon \quad (2.1)$$

Onde as  $\beta$  são os coeficientes dos parâmetros,  $y$  é a resposta de interesse e  $\epsilon$  o termino do erro experimental entre o modelo real e o modelo polinomial.

Para a estimação dos coeficientes definidos pelo modelo da **Equação (2.1)**, o algoritmo tipicamente usado é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*). Com isso, fica construída a função aproximada que relaciona a resposta de interesse com as variáveis do processo. Após a construção do modelo, a significância do mesmo é verificada por meio de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância). Este teste de significância é importante para avaliar se o modelo é estatisticamente significativo. Além disso, o ANOVA também permite verificar quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos. O ajuste dos modelos é representado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2$  (adj.)), que considera o fato de que  $R^2$  tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Uma visão mais detalhada envolvendo o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, Análise de Variância e ajuste dos modelos pode ser observada em Paiva (2006), juntamente com outras análises importantes como a análise de resíduos e o teste de falta de

ajuste (*Lack-of-fit*).

Desde que Box e Wilson (1951), descrevem o arranjo composto central (Central Composite Design – CCD), que tem sido o arranjo experimental mais utilizado na Metodologia de Superfícies de Resposta.

Um arranjo composto central para  $k$  fatores é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais (DEL CASTILLO, 2007; PLASUN, 1999):

- um grupo de níveis extras denominados pontos axiais ( $2k$ ), O número de pontos axiais em um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. Em função da localização dos pontos axiais, o CCD pode ser circunscrito, inscrito ou de face centrada.
- um fatorial completo ( $2^k$ ) ou fracionado ( $2^{k-p}$ ,  $p$  a fração desejada do experimento),
- um conjunto de pontos centrais ( $m$ ).

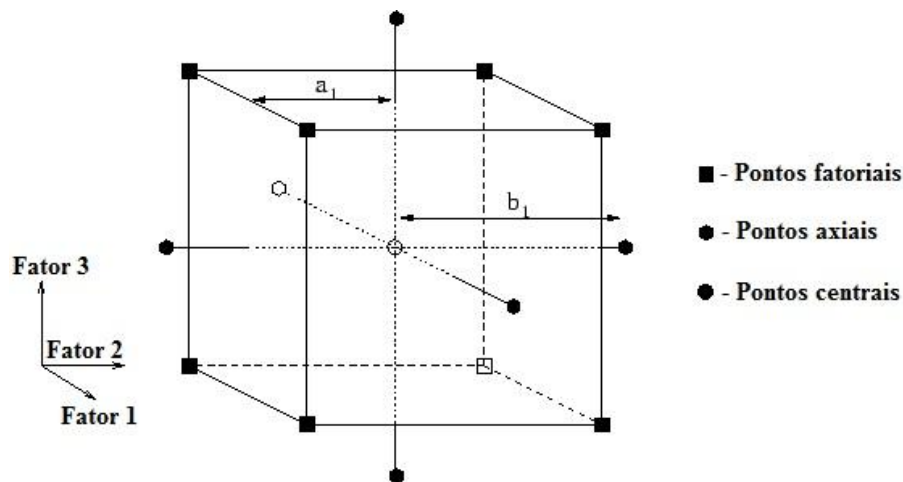


Figura 2.4 - Arranjo composto central para três fatores

Fonte: Adaptado de (PLASUN, 1999)

Os três tipos de arranjos compostos centrais, (Arranjo Composto Circunscrito – CCC; Arranjo Inscrito – CCI; arranjo de face centrada – CCF) têm estrutura igual que a **Figura 2.4**. Mas com outros valores para  $a_i$  e  $b_i$ . Os valores dos três Arranjos centrais estão descritos na **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 - Fatores a e b para arranjos CCD

	$b_i/a_i$	$\alpha = \text{Valor}_i$	# Níveis/Fator
CCC	$\sqrt{k}$	$2 a_i$	5
CCI	$\sqrt{k}$	$2 b_i$	5
CCF	1	$2 a_i = 2 b_i$	3

Fonte: Adaptado de (PLASUN, 1999)

Os arranjos CCC e CCI apresentam uma característica especial, são rotacionais; se diz que um arranjo é rotacional se, após a rotação dos pontos do desenho em relação ao ponto central dos momentos da distribuição do desenho permanecem inalteradas. Para que o Arranjo Composto Central seja rotacional, o fator  $b_i/a_i$  deve ser  $\sqrt{k}$ .

Um Arranjo Central Circunscrito CCC corresponde ao Arranjo Composto Central CCD original, os pontos axiais estão a uma distância  $\alpha$  dos pontos centrais, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator. O Arranjo inscrito CCI é adequado para situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis. E o Arranjo de Face Centrada CCF caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja,  $\alpha = +1$  ou  $-1$ . Requer três níveis para cada fator.

Um CCC explora o maior espaço experimental possível, enquanto um CCI explora o menor. O valor de  $\alpha$  depende do número de experimentos da porção fatorial do CCD. Assim, segundo Box e Drapper (1987),  $\alpha = (2^k)^{1/4}$ , sendo  $k$  o número de fatores analisados.

Como uma das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta tem sido utilizada com frequência por vários pesquisadores, contribuindo para a otimização e para um melhor entendimento acerca dos fenômenos que

caracterizam os mais diversos processos de fabricação. Sendo assim, casos de sucesso no emprego desta metodologia podem ser observados em (CHEN; HUANG; HUNG, 2010; SUN et al., 2010).

Após de obter dados do comportamento do trocador de calor a partir da análise numérica e obter o metamodelo de cada resposta, passa-se na etapa da otimização; desenvolvida com o método de otimização multiobjectivo, pela natureza do fenômeno da troca de calor onde o fluxo escoamento no interior de um tubo, são conflitantes entre a taxa do fluxo de calor versus a queda na pressão. Utilizou-se o método da Interseção Normal da Fronteira conhecido amplamente na literatura como Normal Boundary Intersection NBI.

## 2.5 Otimização Multi-Objetivo NBI

Num problema de otimização trata-se de encontrar soluções que esteja apresentado o valor ótimo para uma função objetivo. O caso mais simples é com um objetivo único, apresentado por uma função do tipo  $f: M \rightarrow N$ , onde  $M \subset \mathfrak{R}$  y  $N \subset \mathfrak{R}$ . O domínio e a imagem da função são números reais e o valor ótimo corresponde num mínimo ou máximo,

**Figura 2.5.**

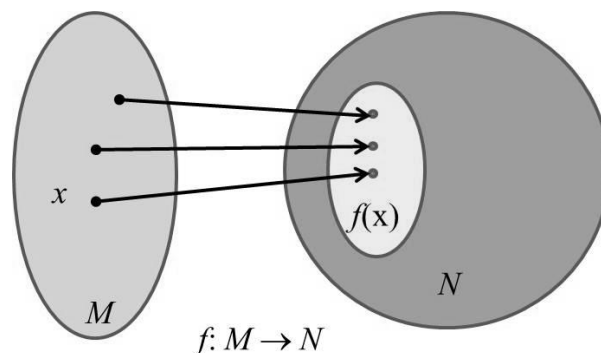


Figura 2.5 – Otimização com Objetivo Único

Mas na ciência e na engenharia existem aplicações onde a otimização simultânea de

mais de um objetivo (otimização multi-objetivo) é necessária. Há de otimizar uma função do tipo  $f: S \rightarrow T$ , onde,  $S \subset \mathbb{R}^n$  y  $T \subset \mathbb{R}^k$ . Mas para problemas de otimização multiobjetivo não triviais não existem uma única solução de elementos em  $S$  que produzam pontos ótimos para cada  $k$  objetivos que compõem  $f$ . Acontece isto pela existência de conflitos entre as funções objetivo; um valor que melhora um objetivo empiora o outro. Neste caso existe um numero possivelmente infinito de soluções ótimas de Pareto na fronteira eficiente, **Figura 2.6**.

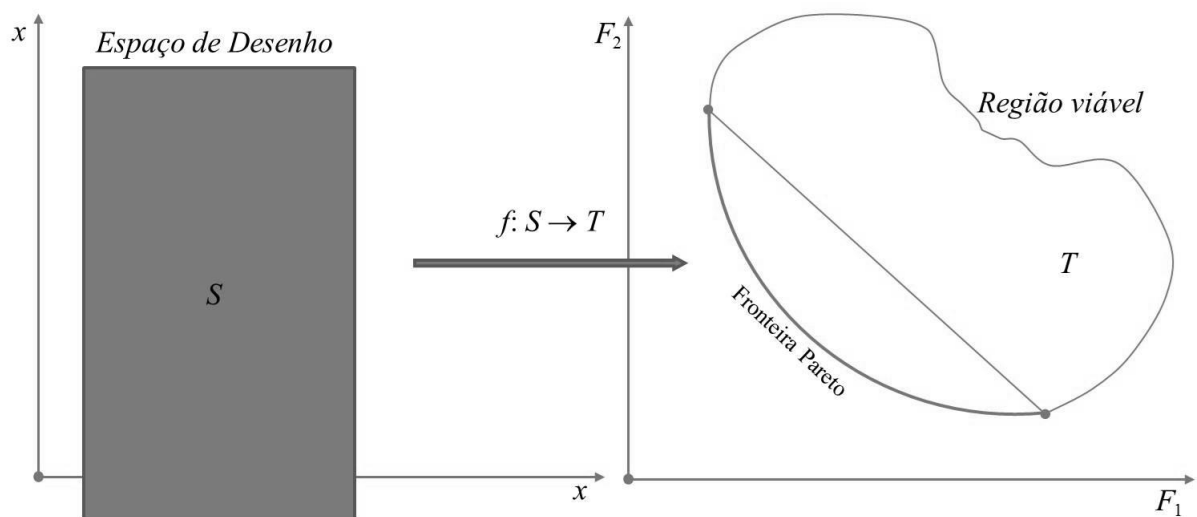


Figura 2.6 - Otimização Multiobjetivo

O método NBI foi introduzido e desenvolvido por Das e Dennis (1998), para encontrar uma dispersão de soluções ótimas de Pareto com pontos uniformemente distribuídos para problemas de otimização multiobjetivo não linear. A abordagem escalar da soma ponderada tem a desvantagem fundamental de não conseguir pontos uniformemente distribuídos, mesmo se for usado uma dispersão uniforme de vetores do peso. A abordagem NBI usa o esquema escalar com a característica que a dispersão uniforme de parâmetros dará origem à dispersão uniforme próxima sobre a fronteira eficiente. Também, o método é independente das escalas relativas de diferentes funções objetivo.

## 3. MÉTODOLOGIA

Este capítulo é dedicado ao detalhamento do método de pesquisa adotado, como a apresentação dos conceitos e recursos necessários para o levantamento dos dados e as simulações como método de confirmação. Desta forma, inicia-se o capítulo com uma breve discussão a respeito do procedimento experimental adotado.

### 3.1 Projeto de Experimentos

A natureza desta pesquisa foi baseada na coleta, análise e interpretação matemática dos dados, onde o pesquisador possui controle sobre o experimento. Como método de condução foi adotado a pesquisa experimental; e foi classificada como pesquisa quantitativa em (CRESWELL, 2011).

Para analisar a otimização de parâmetros de produtos na fase conceitual, como já mencionado anteriormente, este trabalho propõe o uso de varias ferramentas empregadas separadamente, a CFD(Dinâmica computacional de fluidos) definido no item 2.2; o DOE (projeto e análise de experimentos) definido no item 2.3, considerando os projetos experimentais do DOE foi utilizada a metodologia de construção de Superfície de Resposta, definido no item 2.4; analise do fenômeno físico estudado, a otimização foi utilizando empregado o método NBI (*Interseção Normal à Fronteira*), com objetivo de encontrar uma geometria ótima para o desenvolvimento do produto. Com isso, o método experimental pode ser dividido em três fases:

**1ª Fase – Análise Preliminar:** baseada na descrição do problema real para se simplificar se numa geometria 2D, de simples análise no software de CFD, apresentada pela **Figura 3.1**, e consegue-se a obter a os parâmetros da geometria e os dados experimentais do processo.



Figura 3.1 - 1ª Fase – Análise Preliminar

**2ª Fase – Experimento para obter o Metamodelo:** utiliza-se o CFD como ferramenta de simulação do fenômeno de troca de calor da para a coleta de dados do experimento, apresentado na **Figura 3.2**; onde o experimento é conduzido com o DOE. Logo após, à análise estatística dos dados obtém a modelagem matemática das respostas e análise das influencias dos parâmetros.

**3ª Fase – Otimização NBI:** utilizada para obter a combinação ótima dos parâmetros escolhidos do experimento na troca de calor, que permitam a maximização dos resultados do processo, **Figura 3.3**.



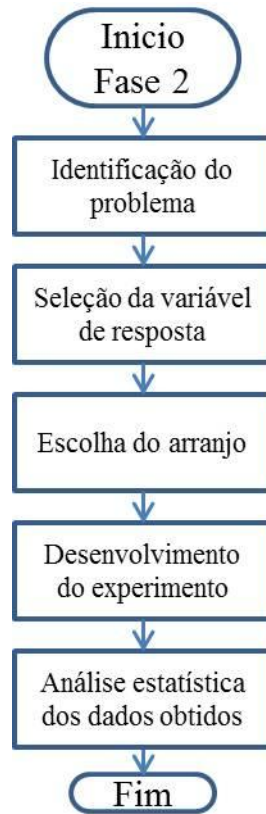


Figura 3.2 - Experimento para obter o Metamodelo

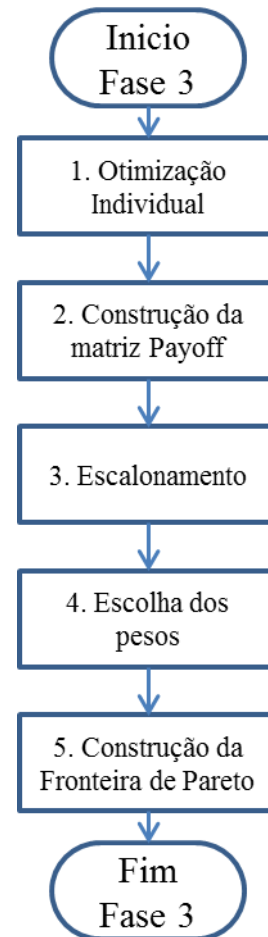


Figura 3.3 - Etapas da Otimização NBI

Para conseguir o desenvolvimento do experimento é necessário passar pelas três fases sequenciais, primeiro deve ser bem conhecido o objeto de estudo, neste caso o forno de panificação; deve-se planejar bem o experimento para coletar os dados para o desenvolvimento da pesquisa, para na terceira fase desenvolver a otimização. Na **Figura 3.4** é apresentado um fluxograma a integração sequencial da fase 1 com a fase 2. A simulação CFD, os parâmetros DOE, passando pelos passos do processo CFD, até coletar a totalidade dos dados escritos na matriz de experimentos.

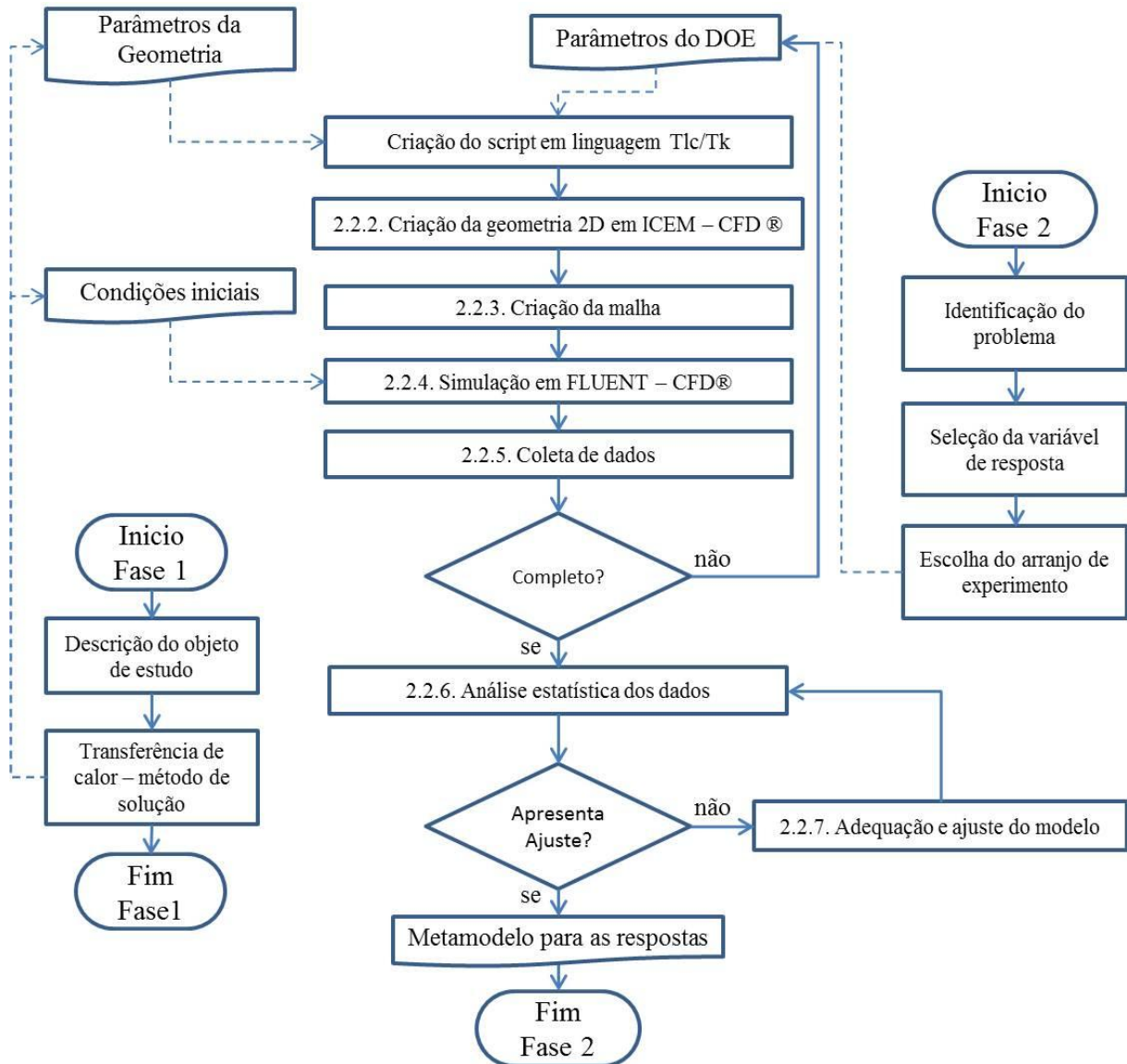


Figura 3.4 - Integração das fases 1 e 2

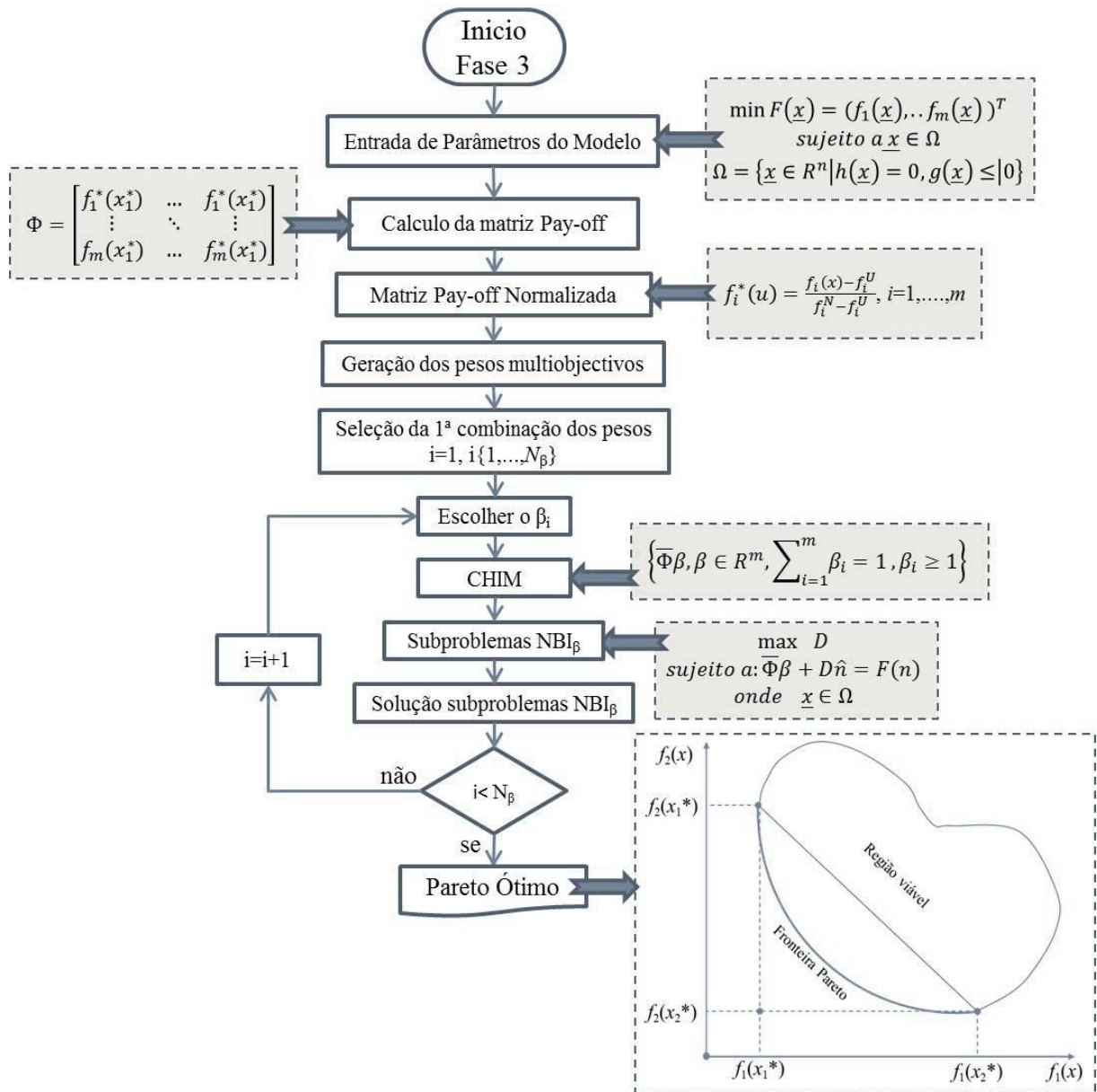


Figura 3.5 - Etapa da Fase 3

Fonte: adaptado de (VAHIDINASAB; JADID, 2010)

Logo após da construção da fronteira de Pareto na fase três, segue uma comparação das simulações versus o metamodelo, finalizando as fases com as conclusões da pesquisa.

## 4. APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL

O capítulo 4 descreve a aplicação do método experimental definido no capítulo anterior para se obter a otimização do produto na fase conceitual em relação ao objeto de estudo. Dessa forma, as etapas definidas em cada fase do método são desenvolvidas no presente capítulo, junto com os resultados obtidos ao longo do estudo.

### 4.1 Primeira Fase – Análise Preliminar

Nesta fase é realizada uma análise preliminar de forma a identificar o problema, a metodologia de solução com base na integração de técnicas de Dinâmica dos Fluidos computacional e algoritmos de delineamento de experimentos.

Este trabalho tem como base um estudo P&D pesquisa e desenvolvimento entre a empresa PRÁTICA TECHNICOOK® em parceria com a FAPEMIG (EDT-101654/05), intitulado “*Aprimoramento de Sistemas Eletroeletrônicos, Mecânicos e de Gás para Aplicação em Fornos Industriais com Ênfase na Capacitação e Adequação as Normas do Mercado Comum Europeu Visando a Exportação*”.



Figura 4.1 - Forno CG6, da PRÁTICA TECHNICOOK®

Nessa oportunidade, foram identificadas várias oportunidades de aperfeiçoamento para o modelo de forno CG6 da PRÁTICA TECHNICOOK® (**Figura 4.1**), sendo o aumento da eficiência térmica do forno uma de elas, por meio de novas configurações no difusor.

O difusor que se pretende otimizar faz parte do subsistema “trocador de calor” de um forno industrial. Entretanto é importante entender os mecanismos de transferência de calor associados ao difusor com objetivo de aumentas as eficiências térmicas e conseguir fluxos de calor uniformes. Uma forma de identificar os aprimoramentos no novo projeto é com base nas análises funcionais de desdobramento do produto.

#### 4.1.1 Desdobramento do Produto

A modelagem da função total de um produto em funções mais simples é obtida pelo seu desdobramento em elementos de menor complexidade, detalhes desta metodologia podem ser encontrados em (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Na **Figura 4.2** é apresentado o desdobramento do forno Industrial CG6, identificando as funções associadas aos equipamentos eletromecânicos e os fluxos de energia.

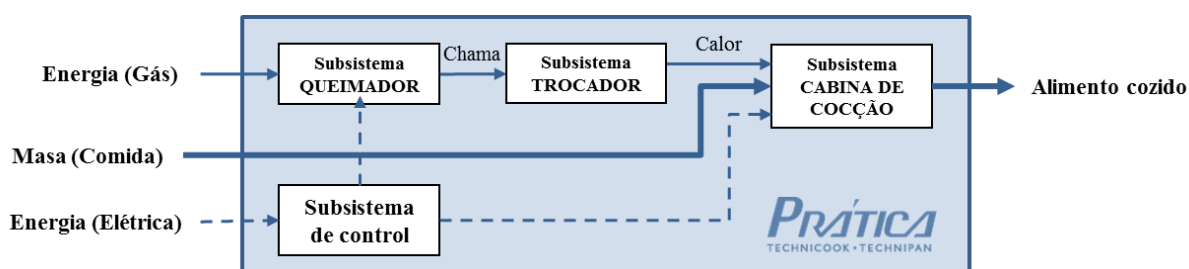


Figura 4.2 - Desdobramento Forno CG6 da PRÁTICA TECHNICOOK®

O desdobramento serve para a identificação do fluxo nas entradas de energia, materiais e sinais. Nota-se que a função total do produto é realizada após serem executados hierarquicamente todos os subsistemas que o compõem.

Neste trabalho será identificado como oportunidades de melhoria o subsistema *Trocador de Calor* que tem como função transferir a energia térmica de um fluido para outro

de forma eficiente. Para a aplicação da indústria alimentícia, os meios devem estar separados por uma parede sólida e o material deve ser de aço inoxidável, evitando assim a contaminação do alimento cozido.

A fita apresentada na **Figura 4.3 c**; e o tubo mostrado na **Figura 4.3 a-b**, compõem os elementos do subsistema de trocador. Tendo como entradas ao subsistema, o ar aquecido pela chama do queimador (subsistema queimador) com temperatura em torno 483K e velocidade média de 1,3m/s. Na **Figura 4.4** mostra de forma esquemática do subsistema de trocador, segundo (SILVA, 2006).



a)



b)



c)

Figura 4.3 - Elementos que compõem o subsistema do trocador



Figura 4.4 - Representação esquemática do subsistema do trocador

### 4.1.2 Transferência de Calor - Método de solução

Para a análise do campo de escoamento no forno, foram analisadas as variações de pressão na entrada e saída do tubo-trocador-calor utilizando o software FLUENT-CFD® com base em técnicas numéricas dos volumes finitos impondo as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia. Foi construída a geometria e malha computacional, verificando-se a discretização dos elementos a partir do critério da *lei de parede*. Foram testados e analisados modelos de turbulência para regime turbulento que resulte em perdas de carga coerentes com modelos analíticos disponíveis na literatura clássica. A validação com a solução analítica laminar pode ser encontrada no **Apêndice 6.1**.

A **Figura 4.5** apresenta o tubo-trocador de calor em 3D e a fita de aço inoxidável, dobrada em oito partes, o tubo tem um diâmetro interno de 4,0 cm e 40 cm de altura.

Entretanto, para economia computacional na simulação, é possível usar modelos 2D sem perder a generalidade impondo a condição de axi-simetria axial, por ter uma geometria cilíndrica e não apresentar uniformidade na distribuição do escoamento nas direções angulares e radiais. Soluções de problemas de campo de escoamento tridimensional que apresentam soluções próximas dos modelos 2D, impondo condições de axi-simetria axial foram verificados por (KIM; BAEK, 2005; SUSAN-RESIGA et al., 2009).



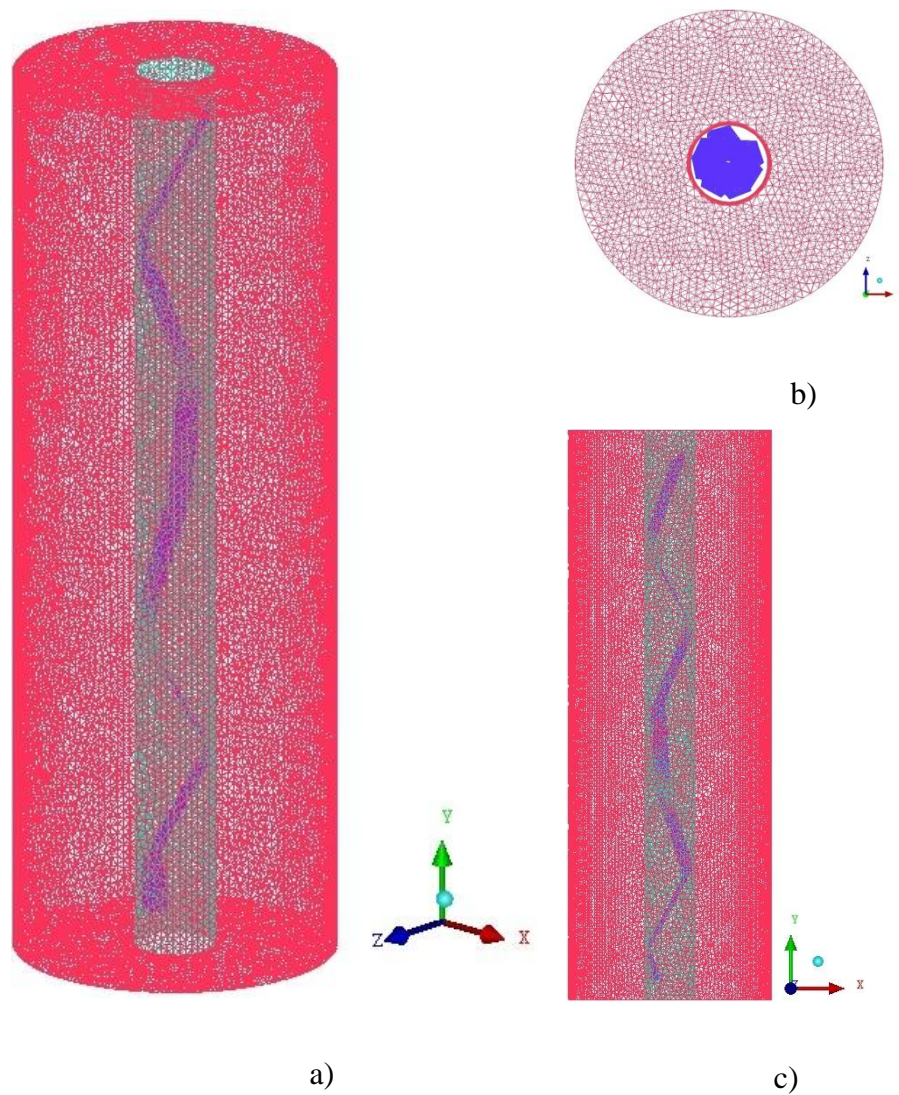


Figura 4.5 - Representação em 3D do Modelo geométrico do difusor no trocador

Com isso, o modelo geométrico foi reduzido para duas dimensões, como mostra a **Figura 4.6**.

Sendo assim, foi construída uma nova geometria em 2D (Vide **Figura 4.7**) onde são estendidos os regiões de entrada (20cm) e saída (40cm) de forma a permitir o desenvolvimento do escoamento. Foram definidos para esta pesquisa o estudo de quatro geradores de vórtices pela condição da axi-simétria representariam a totalidade de 8.



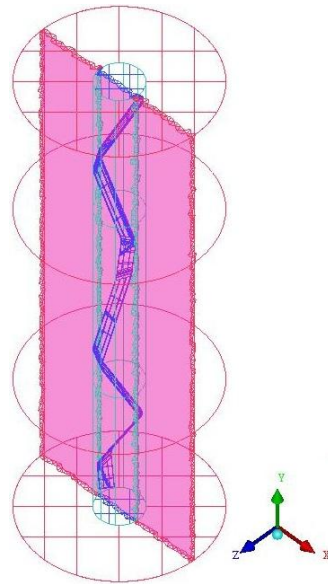


Figura 4.6 - Plano 2D

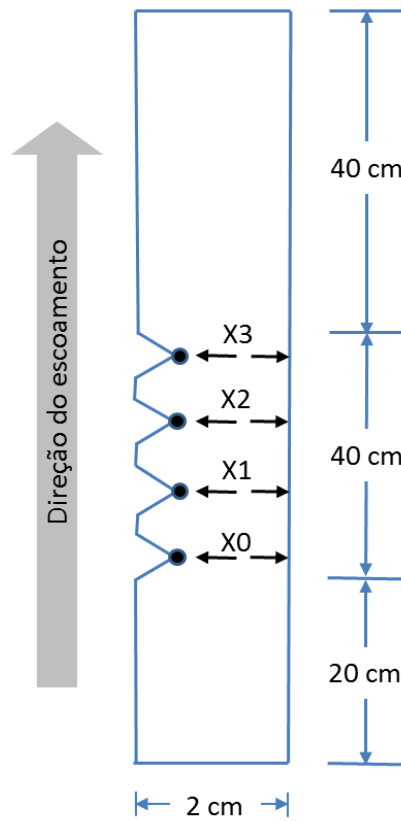


Figura 4.7 - Modelo do difusor 2D com Axi-simétria axial

As simulações em CFD em 2D apresentam economias computacionais quando o escoamento principal é predominante antes os fluxos secundários, situações contrárias devem ser necessariamente simuladas e modeladas em 3D, (AHMED et al., 2011; GUIMARÃES; DA SILVA, 2010; PLOTEAU; NICOLAS; GLOUANNEC, 2012; THERDTHAI; ZHOU; ADAMCZAK, 2002, 2003; THERDTHAI, 2004; TURAN; ÖZTOP, 2012).

## 4.2 Segunda Fase – Experimento para obter o metamodelo

Obter o metamodelo de um produto é combinar informações da física e conceptual para o processo de desenho, com informações necessárias para automações, otimizações (HENDERSON; TAYLOR, 1993).

Seguindo os delineamentos descritos no item 2.3 é apresenta-se o delineamento da execução dos experimentos para obter o metamodelo do difusor em função da geometria; o delineamento é descritos com maior detalhe em (MONTGOMERY, 2006).

### 4.2.1 Identificação do Problema

O difusor trocador de calor tem a função de garantir a distribuição radial e uniforme do fluxo de calor por meio da inserção adequada de elementos perturbativos da corrente livre. Entre tanto, a escolha do tipo de elemento requer de análises da transferência de calor convectiva e condutiva. Os elementos perturbativos são conhecidos como geradores de vórtices; não existe uma geometria padrão, sendo necessário o desenvolvimento empírico ou por meio das análises em Dinâmica dos Fluidos Computacional CFD. Entretanto, a metodologia com base no projeto de experimentos, DOE permite as análises das diferentes variáveis de projeto no espaço experimental definido nas posições  $x_0, x_1, x_2, x_3$  para análises do fluxo de calor e da perda de carga.

Entre as variáveis de projeto que podem ser considerados para o difusor trocador de calor do Forno CG6 são: diâmetro, comprimento, espessura e material do tubo; largura, comprimento, espessura, numero de geradores de vórtices e material da fita; numero de canais (difusor trocador de calor, Vide **Figura 4.3a**).

Fazer mudanças na configuração do forno CG6, exige o cumprimento de restrições impostas pelo Diretor Industrial da fabrica PRÁTICA TECHNICOOK®; sendo assim, foram consideradas como variáveis de projeto a geometria dos geradores de vórtices em busca por otimizar uma melhor troca de calor.

Os variáveis e restrições laterais dos pontos  $x_0, x_1, x_2, x_3$  estão apresentados na **Tabela 4.2** que representam os parâmetros geométricos da fita, resultando em quatro geradores de vórtices, variando entre  $1,8 \geq x_i \geq 0,0$  (Vide **Figura 4.7**).

Tabela 4.1- Limites inferiores e superiores das variáveis de projeto

Variáveis	Limites	
	Inferior	Superior
$x_0$	0,0	1,8
$x_1$	0,0	1,8
$x_2$	0,0	1,8
$x_3$	0,0	1,8

#### 4.2.2 Seleção da variável de resposta

Para a seleção da variável de resposta se deve conhecer o produto ou processo onde pretende se aplicar a solução. Neste trabalho serão definidas como variáveis de resposta a taxa de transferência de calor  $q$  ( $w/m^2$ ) e a perda de carga ou variação de pressão total entre a entrada e saída do tubo,  $\Delta P$  (Pa), como mostra o esquema da **Figura 4.8**.

No caso de experimentos em laboratório, existem variáveis que podem ser consideradas como perturbações (ruídos) que afetam o processo de forma até significativa, de difícil controle, como por exemplo, as variações ambientais ou perturbações de campos externos. Já na simulação numérica, existem *ruídos* numéricos, como por exemplo, no

truncamento das series que definem o calculo das variações do campo de escoamento.

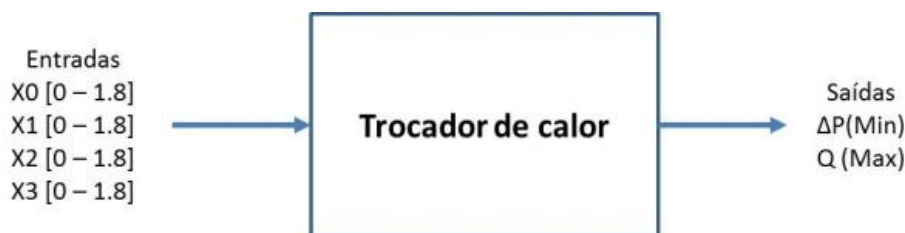


Figura 4.8 - Entradas x Saídas

A união das primeiras três etapas ou passos descritos com anterioridade desta fase é conhecido como planejamento pré-experimental. Se o planejamento pré-experimental for bem feito, a fase de escolha do arranjo do experimento vai ser bem mais fácil, nesta fase é importante manter o escopo do experimento, levando em consideração o espaço amostral (numero de replicas) e a seleção de uma ordem de execução ótima dos ensaios e experimentos (MONTGOMERY, 1999).

Durante a fase de desenvolvimento do experimento é relevante monitorar os processos de experimentação cuidadosamente, tendo certeza que tudo saia como foi planejado, um erro nesta fase pode comprometer o experimento (DEL CASTILLO, 2007). Nesta fase do experimento podem-se planejar experimentos pilotos só para testa-o.

O teste piloto foi realizado em CFD para obter a solução das variáveis de resposta, com os valores de:  $x_0, x_1, x_2, x_3$ , como mostra a **Tabela 4.2**, para com as condições de contorno de velocidade, temperatura e pressão. Na **Figura 4.9** apresenta as linhas da função corrente no plano de axi-simetria axial, identificando-se a formação dos vórtices.

Tabela 4.2 - Dados do teste piloto

Fluido	Temperatura	Fator			
Ar	483K	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
	Velocidade	1,8	1,8	1,8	1,8
	1,3 m/s				

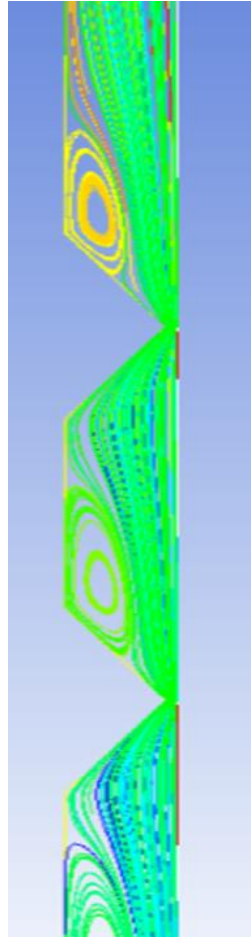


Figura 4.9 - Linhas de função corrente

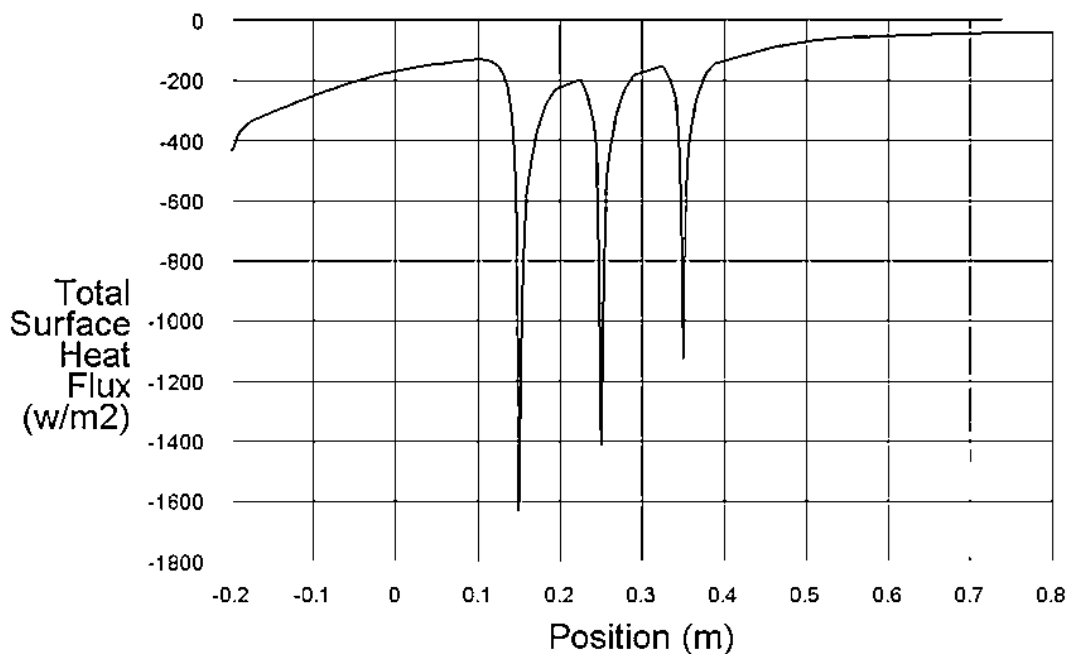


Figura 4.10 - Fluxo do calor total

Na **Figura 4.10** mostra o comportamento da variação do fluxo de calor ( $q$ ) na parede do tubo para as variações de  $x_0, x_1, x_2, x_3$ . Do experimento piloto pode-se concluir que os variáveis de projeto  $x_0, x_1, x_2, x_3$  provocam a geração de vórtices que afetam o desempenho na troca de calor e a perda de carga ou queda de pressão.

### 4.2.3 Escolha do tipo de arranjo

O delineamento experimental utilizado seguiu o argumento sugerido pela Metodologia de Superfície de resposta, de se obter uma aproximação quadrática para cada resposta de interesse do metamodelo – derivada de uma série de Taylor multidimensional – com as variáveis independentes. Para esta tarefa, utilizou-se um arranjo composto central, com 16 pontos fatoriais, 8 axiais e 5 pontos centrais, totalizando 29 combinações experimentais dos quatro fatores descritos anteriormente.

Nas etapas anteriores, foram determinados o número de fatores e seus níveis, pôde-se

escolher o método mais adequado à resolução do problema em questão.

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) resulta da união estatística e matemática empregada para modelar, analisar e determinar as condições ótimas de operação para um sistema ou para determinar uma região no espaço na qual os fatores satisfazem as necessidades operativas de um processo ou sistema (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009).

O arranjo de Componente Central (Central Composite Design – CCD) apresentado por (BOX; WILSON, 1951), dentro da Metodologia de Superfície de Resposta, tem sido o arranjo experimental mais utilizado para a exploração e análises em espaços amostrais de experimentos. Este arranjo possui a vantagem de proporcionar uma variância constante e mínima na previsão para todos os pontos situados a uma mesma distância do centro. Na **Tabela 4.3** é mostrada a construção do arranjo.

Tabela 4.3 - Arranjo CCD

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	X0	X1	X2	X3	TCalor	QuedaPress
1	1	1	1	0,45	0,45	0,45	0,45		
2	2	1	1	1,35	0,45	0,45	0,45		
3	3	1	1	0,45	1,35	0,45	0,45		
4	4	1	1	1,35	1,35	0,45	0,45		
5	5	1	1	0,45	0,45	1,35	0,45		
6	6	1	1	1,35	0,45	1,35	0,45		
7	7	1	1	0,45	1,35	1,35	0,45		
8	8	1	1	1,35	1,35	1,35	0,45		
9	9	1	1	0,45	0,45	0,45	1,35		
10	10	1	1	1,35	0,45	0,45	1,35		
11	11	1	1	0,45	1,35	0,45	1,35		
12	12	1	1	1,35	1,35	0,45	1,35		
13	13	1	1	0,45	0,45	1,35	1,35		
14	14	1	1	1,35	0,45	1,35	1,35		
15	15	1	1	0,45	1,35	1,35	1,35		
16	16	1	1	1,35	1,35	1,35	1,35		
17	17	-1	1	-1,1102E-16	0,9	0,9	0,9		
18	18	-1	1	1,8	0,9	0,9	0,9		
19	19	-1	1	0,9	-1,1102E-16	0,9	0,9		
20	20	-1	1	0,9	1,8	0,9	0,9		
21	21	-1	1	0,9	0,9	-1,1102E-16	0,9		
22	22	-1	1	0,9	0,9	1,8	0,9		
23	23	-1	1	0,9	0,9	0,9	-1,1102E-16		
24	24	-1	1	0,9	0,9	0,9	1,8		
25	25	0	1	0,9	0,9	0,9	0,9		
26	26	0	1	0,9	0,9	0,9	0,9		
27	27	0	1	0,9	0,9	0,9	0,9		
28	28	0	1	0,9	0,9	0,9	0,9		
29	29	0	1	0,9	0,9	0,9	0,9		

Fatores:  $2^4=16$  □

Axiais:  $2*4=8$  □

Center points: 5 □

Runs: 29

Alpha: 2

Com o arranjo de CCD apresentado continuasse com o desenvolvimento do experimento.

#### 4.2.4 Desenvolvimento do experimento (simulação em CFD)

(MONTGOMERY, 2006) afirma que, cada tipo de experimento tem um procedimento de desenvolvimento adequado para solução do problema em questão. Como ferramenta para a solução do problema foi utilizado o software FLUENT-CFD® com base na técnica dos volumes finitos CFD.

A geometria e malha computacional foi editada em linguagem de programação Tcl/Tk, para ser interpretada pelo software ICEM-CFD® por meio do arquivo **script.dat**. Esta abordagem permite que sejam realizadas modificações geométricas no script de forma a obter malhas com o mesmo número de elementos e parâmetros de crescimento de malha. Para a discretização do campo bidimensional foi utilizada uma malha hexaédrica com refino na parede como um total de 16700 elementos quadrilaterais; no **ANEXO A** – Parte da listagem do arquivo Script.dat, apresenta-se uma parte da listagem do arquivo **script.dat**.

No script, são editadas as variáveis de projeto para diferentes arranjos de  $x_0, x_1, x_2, x_3$  de forma a gerar os experimentos utilizando o plano CCD.

Para a solução do campo de escoamento foi utilizado o FLUENT-CFD®, onde as condições de contorno, modelo de turbulência (k-ε), esquemas de solução e critério de convergência (resíduo) são editados num arquivo auxiliar tipo **journal.jou**. Resultados globais de perda de carga  $\Delta P$  (entrada e saída) e fluxo de calor  $q$  na parede são coletados para a construção da superfície de resposta. Na **Figura 4.11**, são apresentadas as condições de contorno para o trocador difusor de calor. No **ANEXO B** – Parte da listagem do Arquivo Journal.jou, uma parte do arquivo **journal.jou**.



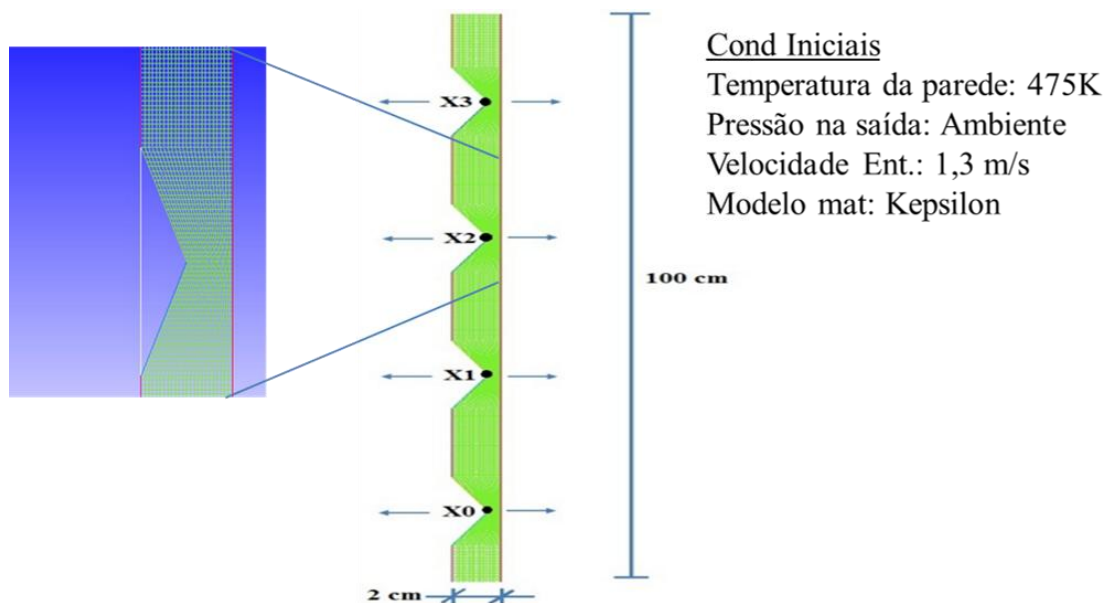


Figura 4.11 - Condições iniciais da malha com células triangulares e tetraédricas

O tempo de processamento para cada *solução* é aproximadamente 10 minutos para atingir o resíduo de  $\varepsilon = 10^{-6}$  com um processador Intel® Xeon® CPU E5620@ 2.40 GHz 2.39 GHz, RAM 4 GB.

Sendo finalizada a etapa de pós-processamento, a etapa seguinte na solução da obtenção do metamodelo, procura-se analisar os resultados estatisticamente.

#### 4.2.5 Análise estatística dos dados

De acordo com os procedimentos descritos previamente, e após da realização dos experimentos, são obtidos os resultados e pode-se avaliar com um análise de resíduos em procura de padrões aleatórios ou dados suspeitos. Onde é possível escolher se continuar com a seguinte fase ou refazer o experimento (MONTGOMERY, 2006).

Modelagem matemática das respostas - Via MINITAB®, (Método dos Mínimos Quadrados Ordinários OLS).

$$\begin{aligned}
Y1(\dot{q}) = & 82,5541 + 10,5045X_0 + 10,3622X_1 + 9,5331X_2 + 7,5314X_3 \\
& + 5,5837X_0^2 + 5,8172X_1^2 + 5,5857X_2^2 + 4,7026X_3^2 - 0,7146X_0X_1 \\
& - 0,4238X_0X_2 - 0,3652X_0X_3 - 0,6284X_1X_2 - 0,2600X_1X_3 \\
& - 0,4912X_2X_3
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Apresenta um ajuste 86,78%

$$\begin{aligned}
Y2(\Delta P) = & -4,5834 - 18,9619X_0 - 18,6062X_1 - 18,3262X_2 - 18,1440X_3 \\
& - 10,3931X_0^2 - 9,9105X_1^2 - 9,5396X_2^2 - 9,3204X_3^2 - 0,0428X_0X_1 \\
& - 0,0156X_0X_2 - 0,0027X_0X_3 - 0,0540X_1X_2 - 0,0258X_1X_3 \\
& - 0,0578X_2X_3
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Apresenta um ajuste 0,00%; precisa ajuste.

$$\begin{aligned}
Y2(\ln(Abs(\Delta P))) \\
= & 1,521 + 0,411X_0 + 0,409X_1 + 0,406X_2 + 0,403X_3 + 0,268X_0^2 \\
& + 0,268X_1^2 + 0,267X_2^2 + 0,267X_3^2 - 0,065X_0X_1 - 0,065X_0X_2 \\
& - 0,065X_0X_3 - 0,060X_1X_2 - 0,061X_1X_3 - 0,0567X_2X_3
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Apresenta um ajuste 78,00% não necessitando de ajuste.

Com a modelagem matemática das respostas, reza-se a otimização.

### 4.3 Terceira Fase – Método NBI

Logo de obter um ajuste maior nas equações que representam o metamodelo de cada resposta, taxa de transferência de calor ( $q$ ) e a queda de pressão ( $\Delta P$ ) como variáveis de saída, em função das variáveis de entrada. O passo a seguir é a otimização das equações do

metamodelo.

Como primeira etapa de um problema de otimização, é necessária a clarificação do problema. Neste contexto e levando a consideração os resultados da variabilidade de taxa de transferência de calor ( $q$ ) e a queda de pressão ( $\Delta P$ ) em função das variáveis da geometria; que entre maior seja o valor das variáveis, maior é a taxa de transferência de calor. Inversamente proporcional é a variação da queda de pressão. A otimização tem como objetivo diminuir a variação entre a média e o valor máximo dos valores da taxa de transferência de calor  $q$ , apresentado na **Figura 4.12**.

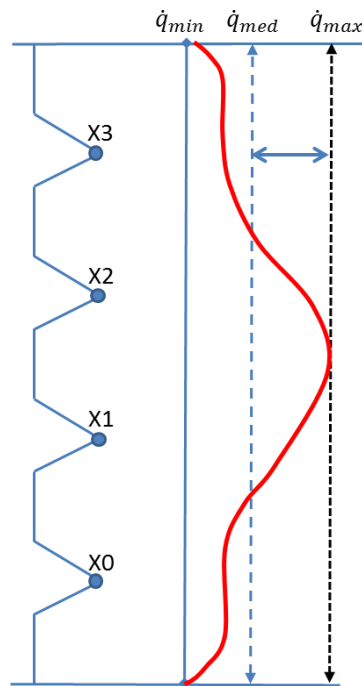


Figura 4.12 - Objetivo da Otimização

O ideal é ter a maior taxa de troca de calor, que por convenção adoto o nome de  $q_{ótimo}$  apresentado pela subtração da taxa de troca de calor máximo ( $q_{max}$ ) e a taxa de calor média ( $q_{med}$ ) **Equação (4.4)**; em simultânea conseguir diminuir a queda de pressão ( $\Delta P_{min}$ ) **Equação (4.5)**. Pelas características do problema, resulta num problema de Otimização Multiobjectivo.

$$q_{\acute{O}timo} = q_{Max} - q_{Medio} \quad (4.4)$$

$$\Delta P_{Min} = P_{T_2} - P_{T_1} \quad (4.5)$$

Um problema de Otimização Multiobjectivo é uma formulação matemática onde se pretende satisfazer simultaneamente múltiplos objetivos. A busca por satisfazer os objetivos conflitantes é uma nova função  $F(x) = \{f_1(x); f_2(x)\}$ ; onde  $f_1(x) = \dot{q}$  representaria a taxa de calor e  $f_2(x) = \Delta P$  a perda de carga.

Para desenvolver o algoritmo de otimização multiobjectivo NBI para duas funções objetivas é necessário seguir as 5 etapas que geralmente são apresentadas em (ROMAN; ROSEHART, 2006; SIDDIQUI; AZARM; GABRIEL, 2012; VAHIDINASAB; JADID, 2010; ZANGENEH; JADID, 2010).

No método NBI, primeiramente é criada a matriz payoff  $\Phi$  **Equação (4.6)**. Para criar a matriz é necessária calcular os valores de ótimo individual para cada função objetivo  $f_i^* = \min(f_i)$ ,  $i \in \{1,2\}$ . Achando os pontos extremos da Fronteira (pontos de ancoragem), a linha de utopia que os liga fica revelada.

O ponto de utopia é definido como o vetor que contém os valores ótimos de cada função objetivo  $F^u = [f_1^*(x_1^*) \quad f_2^*(x_2^*)]^T$  onde  $f_1^*(x_1^*) = \dot{q}_{\acute{O}tima}$  e  $f_2^*(x_2^*) = \Delta P_{\acute{O}tima}$ .

O Pseudo “Ponto de Nadir” é definido como o vetor que contém os piores valores de cada função objetivo  $F^N = [f_1(x_2^*) \quad f_2(x_1^*)]^T$  onde  $f_1^N(x_1^*) = \dot{q}_{\grave{N}ótima}$  e  $f_2^N(x_2^*) = \Delta P_{\grave{N}ótima}$ .

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(x_1^*) & f_1(x_2^*) \\ f_2(x_1^*) & f_2^*(x_2^*) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

No caso do presente estudo, pode-se escrever a matriz Payoff  $\Phi$  como:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 140,174 & 82,554 \\ 3,835 & 1,521 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Já Vahidinasab e Jadid (2010) afirmam que, se as funções objetivo têm diferentes magnitudes ou significados físicos, o primeiro passo é normalizar as funções para obter um conjunto de soluções de Pareto que representem a Fronteira Eficiente. O valor normalizado da função objetivo representado como  $f_i^*(u)$  é calculado usando o ponto de utopia e o pseudo ponto de nadir. A **Equação (4.8)** mostra como é o cálculo.

$$f_i^*(u) = \frac{f_i(x) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U}, \quad i=1, \dots, m \quad (4.8)$$

As variáveis da **Equação (4.8)** são substituídas formando as equações (4.9) e (4.10).

$$f_1^*(x) = \left[ \frac{f_1(x) - T}{f_1^{max}(x) - f_1^{min}(x)} \right] \quad (4.9)$$

$$f_2^*(x) = \left[ \frac{f_2(x) - \Delta P}{f_2^{max}(x) - f_2^{min}(x)} \right] \quad (4.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_1^*(u) \\ s. t: \quad f_1^*(u) - f_2^*(u) + 2w - 1 = 0 \\ X^T X \leq \hat{\rho}^2 \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Onde  $w$  é o vetor de valores atribuídos aos pesos ( $0 \leq w_i \leq 1$ ),  $X$  é a matriz experimental e  $\hat{\rho}$  é o raio da região esférica abrangida pelo arranjo CCD. Com estas restrições, espera-se que as soluções obtidas caiam dentro da região experimental e que a Fronteira de Pareto seja convexa e equiespaçadas, ou seja, uma fronteira definida por pontos equidistantes para cada peso  $w_i$ , resultados da otimização na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4 - Comportamento do metamodelo baseado no algoritmo NBI

EXT	w	X0	X1	X2	X3	Metamodelo		
						Tcalor	Pcarga	Exp(Pcarga)
1	0,0000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	82,5541	1,5211	4,5771
2	0,0500	0,9432	0,9373	0,9000	0,9000	84,5073	1,5982	4,9440
3	0,1000	0,9786	0,9777	0,9000	0,9000	86,5012	1,6776	5,3528
4	0,1500	1,0113	1,0171	0,9000	0,9000	88,5395	1,7594	5,8091
5	0,2000	1,0377	1,0454	0,9215	0,9000	90,6277	1,8436	6,3190
6	0,2500	1,0630	1,0711	0,9462	0,9000	92,7731	1,9300	6,8895
7	0,3000	1,0872	1,0970	0,9708	0,9000	94,9805	2,0189	7,5303
8	0,3500	1,1116	1,1225	0,9948	0,9000	97,2558	2,1106	8,2533
9	0,4000	1,1353	1,1480	1,0190	0,9000	99,6055	2,2053	9,0728
10	0,4500	1,1588	1,1688	1,0494	0,9000	102,0374	2,3033	10,0070
11	0,5000	1,1835	1,1969	1,0686	0,9000	104,5613	2,4050	11,0779
12	0,5500	1,2080	1,2231	1,0911	0,9000	107,1878	2,5108	12,3144
13	0,6000	1,2314	1,2482	1,1146	0,9054	109,9310	2,6213	13,7534
14	0,6500	1,2541	1,2717	1,1360	0,9236	112,8107	2,7371	15,4416
15	0,7000	1,2765	1,2972	1,1580	0,9409	115,8503	2,8590	17,4434
16	0,7500	1,3000	1,3203	1,1839	0,9593	119,0794	2,9881	19,8488
17	0,8000	1,3249	1,3461	1,2077	0,9788	122,5382	3,1262	22,7867
18	0,8500	1,3509	1,3730	1,2333	0,9991	126,2834	3,2753	26,4507
19	0,9000	1,3791	1,4014	1,2604	1,0203	130,3999	3,4388	31,1492
20	0,9500	1,4087	1,4326	1,2903	1,0443	135,0256	3,6221	37,4152
21	1,0000	1,4020	1,4179	1,3507	1,1943	140,1733	3,8350	46,2934

As respostas de Tcalor e Exp(Pcarga) do metamodelo foram obtidas em função das variáveis ( $x_0$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) ótimas. Obteve-se respostas ótimas do metamodelo conseguindo-se construir a Fronteira de Pareto na **Figura 4.13**.

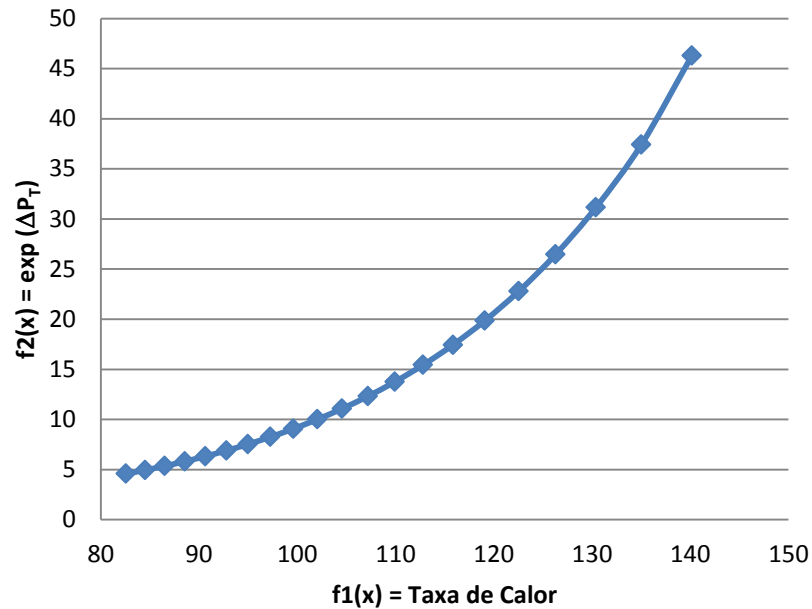


Figura 4.13 - Fronteira de Pareto

A Fronteira de Pareto é formada pelos pontos no espaço das funções objetivo que corresponde ao conjunto de Pareto – Ótimo; obtiveram-se assim os parâmetros ótimos do difusor do trocador de calor. Na Fronteira de Pareto, dentre as soluções ótimas foi escolhida o ponto  $f_1(x) = 135.03$  e  $f_2(x) = 37.42$ , resultando nas variáveis de projeto, **Tabela 4.5**.

Tabela 4.5 - Ponto de ótimo

Fator	Valor ótimo
$x_0$	1,41
$x_1$	1,43
$x_2$	1,29
$x_3$	1,04

Como experimento comprobatório, é feita uma simulação para com os valores ótimos

de  $(x_0, x_1, x_2, x_3)$  em CFD. A **Figura 4.14** mostra a distribuição da taxa de calor em função com o comprimento do tubo, onde função  $f_1(x)$ ; taxa de calor tem um comportamento mais uniforme em comparação com o teste piloto (Vide **Figura 4.10**).

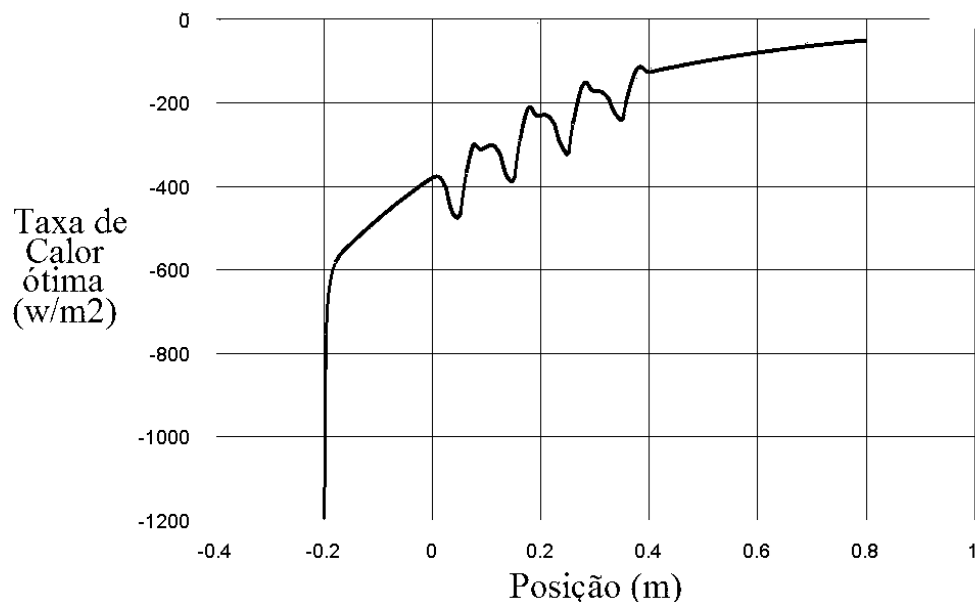


Figura 4.14 - Taxa de Calor ótima (w/m<sup>2</sup>)

Na **Figura 4.15**, mostra as linhas de corrente para o ponto ótimo, verifica-se que não existem regiões de vorticidade que provocariam maior perda de carga, sendo assim pode-se afirmar que o critério da menor perda de carga foi atendido.



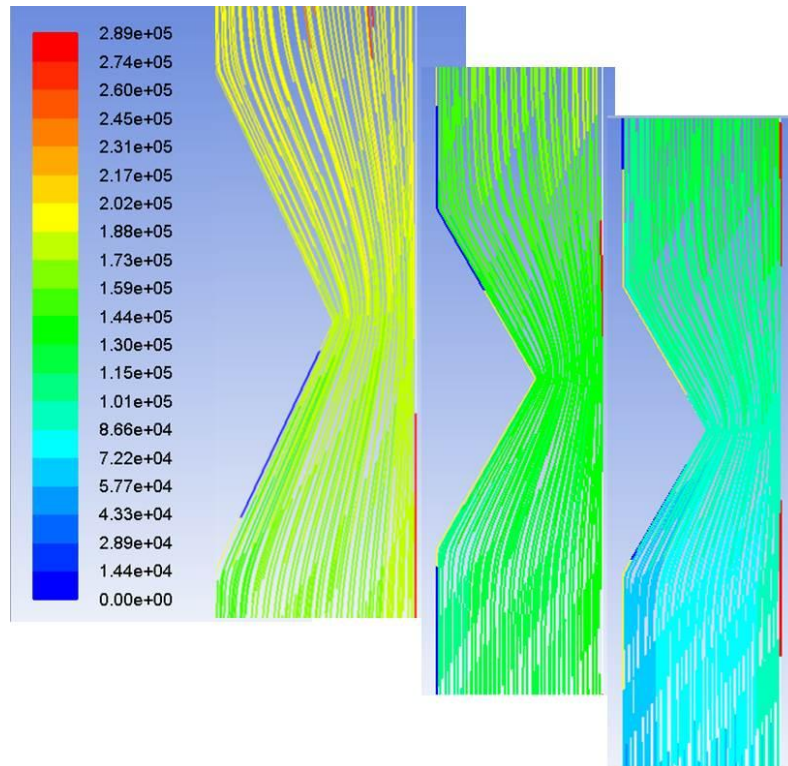


Figura 4.15 - Linhas de corrente

#### 4.4 Comparação dos resultados

Os parâmetros de ótimo obtidas no **Item 4.3** das simulações, são substituídos nas **Equações ((4.1) e ((4.3)** para as respostas  $T_{calor}$  e  $Exp(P_{carga})$ , obteve-se assim a resposta do Metamodelo versus a simulação, **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6 - Comparação da Simulação versus Simulações

EXT	w	X0	X1	X2	X3	Metamodelo		Simulações	
						Tcalor	Exp(Pcarga)	Tcalor	Exp(Pcarga)
1	0,0000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	82,5541	4,5771	82,9563	4,5771
2	0,0500	0,9432	0,9373	0,9000	0,9000	84,5073	4,9440	84,6298	4,9050
3	0,1000	0,9786	0,9777	0,9000	0,9000	86,5012	5,3528	86,5456	5,2718
4	0,1500	1,0113	1,0171	0,9000	0,9000	88,5395	5,8091	88,5332	5,6885
5	0,2000	1,0377	1,0454	0,9215	0,9000	90,6277	6,3190	90,6251	6,1322
6	0,2500	1,0630	1,0711	0,9462	0,9000	92,7731	6,8895	92,9037	6,6198
7	0,3000	1,0872	1,0970	0,9708	0,9000	94,9805	7,5303	95,2440	7,1621
8	0,3500	1,1116	1,1225	0,9948	0,9000	97,2558	8,2533	97,4251	7,7730
9	0,4000	1,1353	1,1480	1,0190	0,9000	99,6055	9,0728	99,8827	8,4536
10	0,4500	1,1588	1,1688	1,0494	0,9000	102,0374	10,0070	102,5139	9,2000
11	0,5000	1,1835	1,1969	1,0686	0,9000	104,5613	11,0779	105,1977	10,0801
12	0,5500	1,2080	1,2231	1,0911	0,9000	107,1878	12,3144	107,9948	11,0717
13	0,6000	1,2314	1,2482	1,1146	0,9054	109,9310	13,7534	110,7231	12,1826
14	0,6500	1,2541	1,2717	1,1360	0,9236	112,8107	15,4416	113,4695	13,4145
15	0,7000	1,2765	1,2972	1,1580	0,9409	115,8503	17,4434	116,3539	14,8425
16	0,7500	1,3000	1,3203	1,1839	0,9593	119,0794	19,8488	119,3274	16,4852
17	0,8000	1,3249	1,3461	1,2077	0,9788	122,5382	22,7867	122,3971	18,4629
18	0,8500	1,3509	1,3730	1,2333	0,9991	126,2834	26,4507	125,6698	20,8615
19	0,9000	1,3791	1,4014	1,2604	1,0203	130,3999	31,1492	129,0073	23,8567
20	0,9500	1,4087	1,4326	1,2903	1,0443	135,0256	37,4152	132,5901	27,7326
21	1,0000	1,4020	1,4179	1,3507	1,1943	140,1733	46,2934	136,3265	29,9155

As respostas são comparadas individualmente da simulação versus o metamodelo, **Figura 4.16 - Figura 4.17** e para comprovar a linearidade **Figura 4.18 - Figura 4.19**.

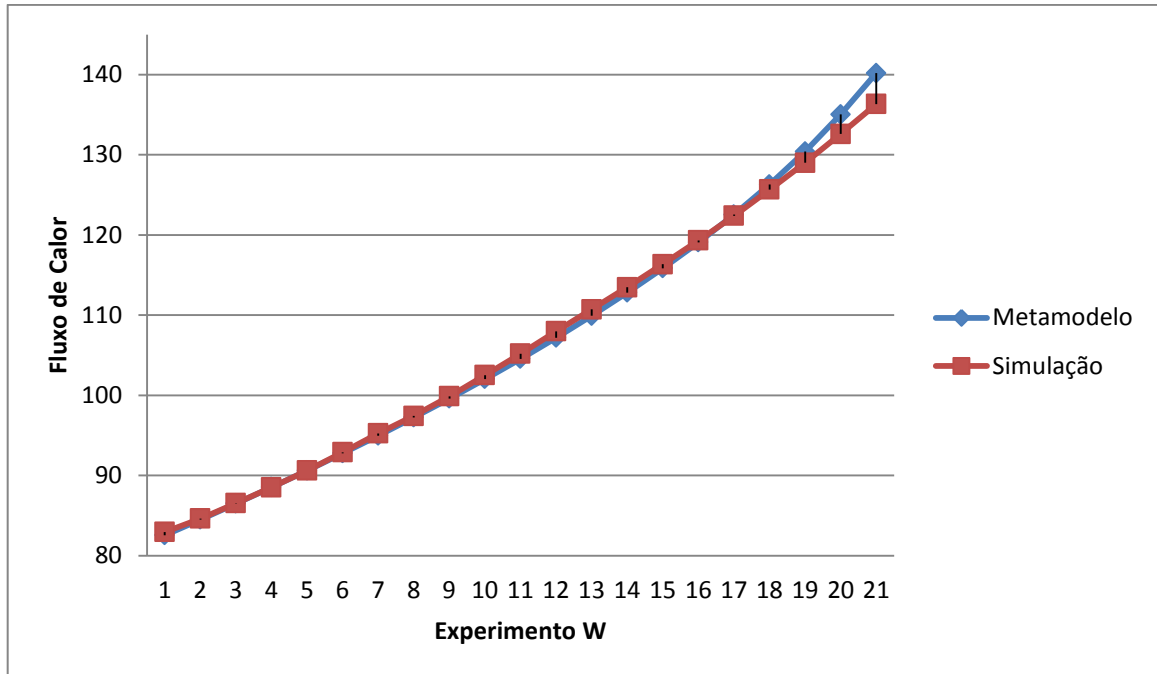


Figura 4.16 - Taxa do Metamodelo vs Simulação

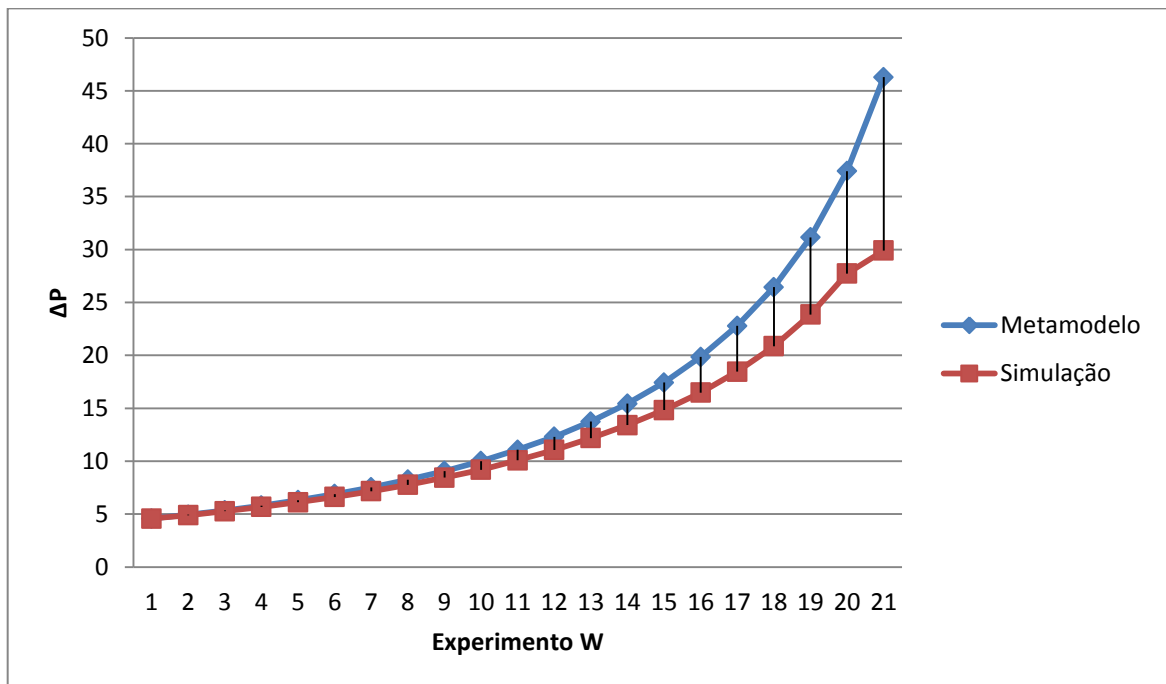


Figura 4.17 - Queda de pressão do Metamodelo vs Simulação

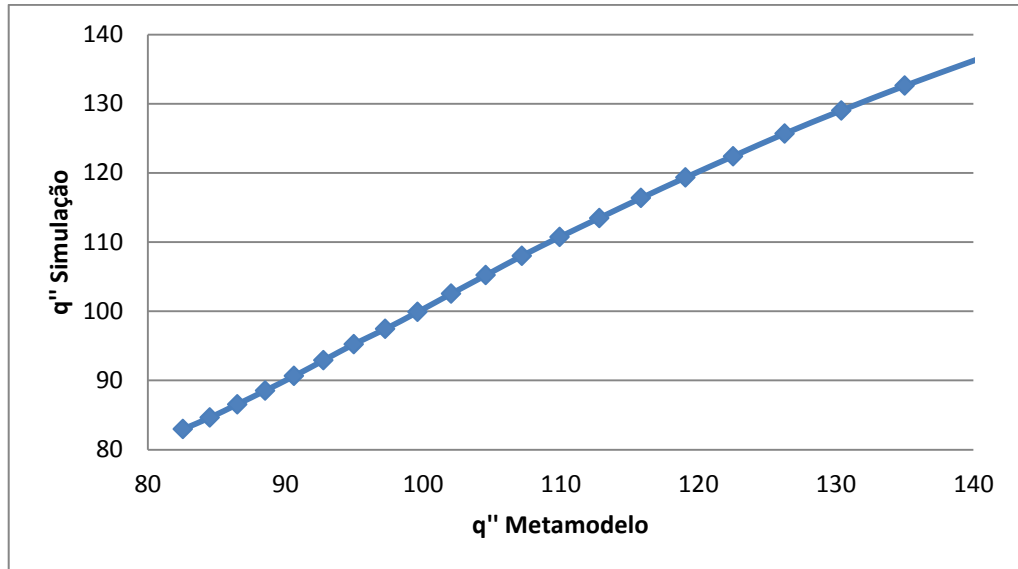


Figura 4.18 - Linearidade da Taxa de Calor

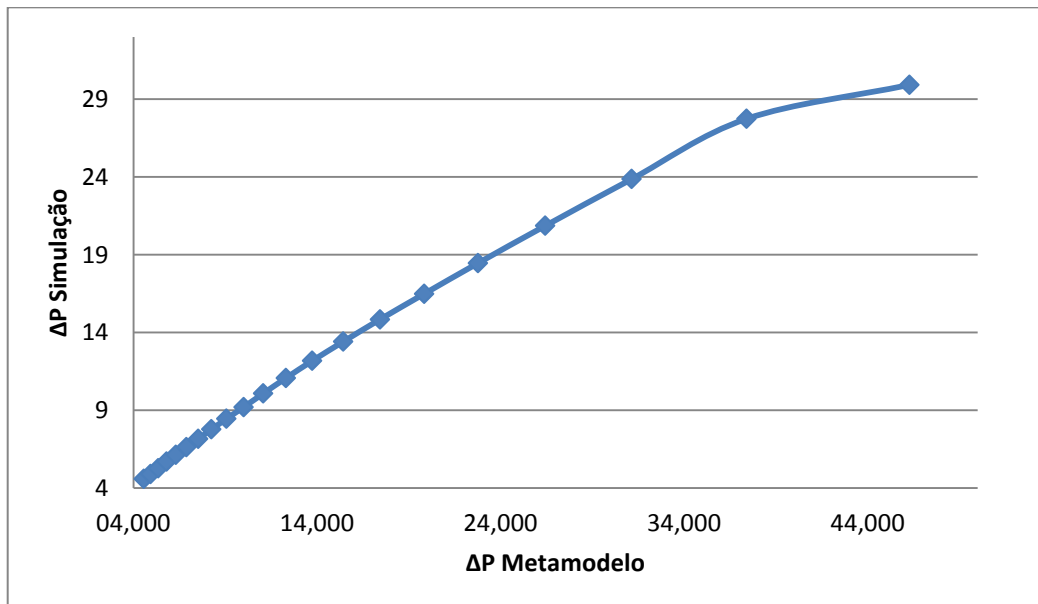


Figura 4.19 - Linearidade da Queda de Pressão

## **5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

### **5.1 Conclusões**

Foi utilizada a integração de processos numéricos; dinâmica dos fluidos computacional (CFD), delineamento de experimentos (DOE), e a construção de metamodelos para o projeto preliminar de um difusor de um forno industrial de panificação.

Os resultados evidenciam que a aplicação integrada da dinâmica dos fluidos computacional junto com o delineamento de experimentos potencializa uma solução ótima para o produto. Apesar de ter sido testado com duas especificações, a integração das metodologias fornece uma ferramenta poderosa ao modelar o difusor permitindo seu projeto para uma grande quantidade de variações de especificação. A existência do modelo serve de subsídios para novas otimizações no desenvolvimento de novos difusores, resultando na redução do tempo e dos custos do PDP, se comparado a atual sistemática empírica. Destaca-se que o metamodelo contempla duas respostas correlacionadas e conflitantes que dificilmente seriam otimizadas empiricamente.

### **5.2 Sugestões para estudos futuros**

Estender a metodologia para o caso 3D, com objetivo de quantificar de forma detalhada os fluxos secundários e a influencia destes na troca de calor e perda de carga.

Introduzir outras variáveis geométricas de projeto como altura, diâmetro do tubo e seção transversal.

Considerar a otimização multidisciplinar (multicritério, multiobjetivo) em função de outras funções objetivos como a integridade estrutural, eficiência térmica, funcionalidade, modularidade e custos.

Finalmente, é importante aplicar a proposta de integração PDP, via a realização de ensaios experimentais que permitam validar o modelo numérico.

## 6. APÊNDICES

### 6.1 Validação – analítica laminar

Para as análises do campo de escoamento no forno, foram analisadas as variações de pressão na entrada e saída de um tubo, de forma a, garantir uma discretização de malha apropriada, e seleção do modelo turbulência que resulte em perdas de carga coerentes com modelos analíticos disponíveis na literatura clássica. A validação é feita considerando regime laminar e turbulento, sem efeitos da equação da energia, isto é, não será considerado o campo de temperatura.

Foi construída uma geometria com as seguintes dimensões; comprimento  $L=1,0$  m. Diâmetro  $d=0,04$  m. Para a discretização do domínio de cálculo foi gerada uma malha hexaédrica, tipo O-Grid com 434815 elementos. Na **Figura 6.1** mostra a malha no plano transversal do tubo.

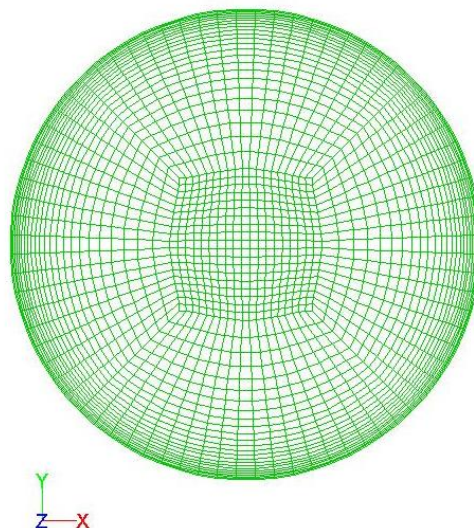


Figura 6.1 - Malha hexaédrica tipo O-Grid

Na **Tabela 6.1** são apresentados diferentes valores de variação de pressão total entre a entrada e saída do tubo em função de alguns modelos de turbulência disponíveis no software

Fluent®.

Tabela 6.1 - Avaliações em vários modelos de turbulência

Modelo	Entrada	Saída	Resposta
K-ômega	2,9054	1,1452	1,7603
K-ômega SST	2,9265	1,1470	1,7795
SST 7 Equações	3,2917	1,1411	2,1470
Spal allmaras	2,4913	1,1510	1,3403

As simulações com CFD iniciam se com a subfase onde a modelagem geométrica CAD do domínio que se precisa analisar, pode ser feita em qualquer software comercial ou no ICEM – CFD® que contem o pacote do ANSYS CFX®; porém, é necessário obter as informações, analisa-las e projetar o comportamento desejado. Depois de ter gerado o modelo geométrico ou CAD do domínio, é dividido espacialmente ou discretizado em pequenos volumes de controle células para formar a malha (**Figura 6.2**).

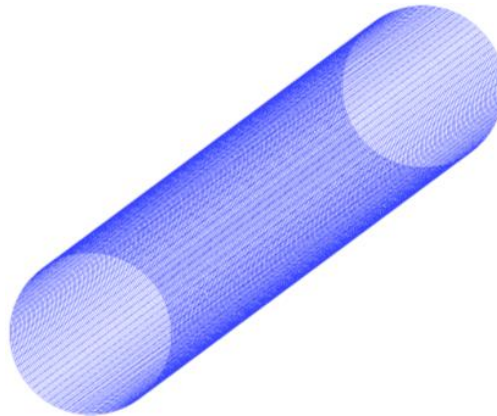


Figura 6.2 - Discretização da geometria

Depois de gerar a malha do modelo geométrico, na etapa de processamento, são estabelecidas as configurações da simulação, com o software FLUENT - CFD®; Como definir materiais, velocidades, temperaturas, condições do meio. Dependendo do problema que procurasse solução, o software CFX-Solver®, auxilia com modelos computacionais com soluções pré-estabelecidas. O tempo de processamento depende de vários fatores: numero de células



las; especificações do equipo usado; e configuração da simulação. Por exemplo, as propriedades físicas do fluido como temperatura e velocidade, são calculadas em cada célula como solução das equações fundamentais. Se o numero de células é maior, precisasse uma maior capacidade computacional.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M. A. et al. Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 38, n. 10, p. 1368–1375, dez. 2011.

BORKOWSKI, J.; VALEROSO, E. Comparison of design optimality criteria of reduced models for response surface designs in the hypercube. **Technometrics**, v. 43, n. 4, p. 468–477, 2001.

BOX, G.; WILSON, K. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B** (...), v. 13, n. 1, p. 1–45, 1951.

CHEN, W.-L.; HUANG, C.-Y.; HUNG, C.-W. Optimization of plastic injection molding process by dual response surface method with non-linear programming. **Engineering Computations**, v. 27, n. 8, p. 951–966, 2010.

CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. **Product Development Performance: Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry**. Boston: Harvard Business Review Press, 1991. p. 409

CRESWELL, J. W. **Educational Research: Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research**. 4th. ed. [s.l.] Pearson, 2011. p. 672

DAS, I.; DENNIS, J. Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. **SIAM Journal on Optimization**, v. 8, n. 3, p. 631–657, 1998.

DEL CASTILLO, E. **Process Optimization: A Statistical Approach**. [s.l.] Springer, 2007. p. 462

EIAMSA-ARD, S.; PROMVONGE, P. Performance assessment in a heat exchanger

tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 7-8, p. 1364–1372, mar. 2010.

FAN, A. et al. A numerical study on thermo-hydraulic characteristics of turbulent flow in a circular tube fitted with conical strip inserts. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p. 2819–2828, out. 2011.

FOLKESTAD, J. E.; JOHNSON, R. L. Integrated rapid prototyping and rapid tooling (IRPRT). **Integrated Manufacturing Systems**, v. 13, n. 2, p. 97–103, 2002.

GUIMARÃES, P. M.; DA SILVA, C. E. S. A parametric study of forced convection in an enclosure with stationary heated cylinders. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 37, n. 5, p. 469–475, maio. 2010.

GUO, Z.; LI, D.; WANG, B. A novel concept for convective heat transfer enhancement. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 41, n. 14, p. 2221–2225, 1998.

GUO, Z. Y.; TAO, W. Q.; SHAH, R. K. The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 9, p. 1797–1807, abr. 2005.

HENDERSON, M.; TAYLOR, L. A meta-model for mechanical products based upon the mechanical design process. **Research in Engineering Design**, v. 5, n. 3-4, p. 140–160, 1993.

KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. **Response surfaces: Designs and analyses**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 510

KIM, M. Y.; BAEK, S. W. Modeling of radiative heat transfer in an axisymmetric cylindrical enclosure with participating medium. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 90, n. 3-4, p. 377–388, fev. 2005.

MONTGOMERY, D. C. Experimental Design for Product and Process Design and Development. **Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)**, v. 48, n. 2, p. 159–177, jul. 1999.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 3rd. ed. [s.l.] WILEY, 2009. p. 704

OTTO, K. N.; WOOD, K. L. Engineering Design Product Evolution : A Reverse Engineering and Redesign Methodology. p. 226–243, 1998.

OTTO, K.; WOOD, K. **Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development**. 1. ed. [s.l.] Prentice Hall, 2000. p. 1104

PAIVA, A. P. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processo de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2006.

PLASUN, R. **Optimization of VLSI Semiconductor Devices**. [s.l.] Technischen Universität Wien, 1999.

PLOTEAU, J. P.; NICOLAS, V.; GLOUANNEC, P. Numerical and experimental characterization of a batch bread baking oven. **Applied Thermal Engineering**, v. 48, p. 289–295, dez. 2012.

ROMAN, C.; ROSEHART, W. Evenly Distributed Pareto Points in Multi-Objective Optimal Power Flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 2, p. 1011–1012, maio. 2006.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos, Uma referência**

**para melhoria do processo.** São Paulo: Saraiva, 2006. p. 542

SIDDIQUI, S.; AZARM, S.; GABRIEL, S. A. On improving normal boundary intersection method for generation of Pareto frontier. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 46, n. 6, p. 839–852, 8 maio. 2012.

SILVA, S. F. **Análise da Viabilidade Técnica de um Sistema de Refrigeração por Absorção Utilizando os Gases dos Fornos de Panificação.** [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2006.

SUN, G. et al. Multiobjective robust optimization method for drawbead design in sheet metal forming. **Materials & Design**, v. 31, n. 4, p. 1917–1929, abr. 2010.

SUSAN-RESIGA, R. F. et al. Three-Dimensional versus Two-Dimensional Axisymmetric Analysis for Decelerated Swirling Flows. **The 14th International Conference on Fluid Flow Technologies**, 2009.

THERDTHAI, N. The development of an anemometer for industrial bread baking. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 3, p. 329–334, ago. 2004.

THERDTHAI, N.; ZHOU, W.; ADAMCZAK, T. Optimisation of the temperature profile in bread baking. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 1, p. 41–48, nov. 2002.

THERDTHAI, N.; ZHOU, W.; ADAMCZAK, T. Two-dimensional CFD modelling and simulation of an industrial continuous bread baking oven. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 2, p. 211–217, nov. 2003.

TURAN, B.; ÖZTOP, H. Analysis of heat transfer in a heated tube with a different typed disc insertion. **Thermal Science**, v. 16, n. 1, p. 139–149, 2012.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product Design and Development.** 4th. ed. Irwin: McGraw-Hill, 2008. p. 368

VAHIDINASAB, V.; JADID, S. Normal boundary intersection method for suppliers' strategic bidding in electricity markets: An environmental/economic approach. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 6, p. 1111–1119, jun. 2010.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. [s.l.] New York (Harlow, Essex, England and Longman Scientific & Technical), 1995. p. 257

WANG, L.; SUNDEN, B. Performance comparison of some tube inserts. **International Communications in Heat and Mass ...**, v. 29, n. 1, p. 45–56, 2002.

WEBB, R. L. **Principles of Enhancement Heat Transfer**. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 1994. p. 556

WHEELWRIGHT, S. C.; CLARK, K. B. **Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency and Quality**. [s.l.] Free Press, 1992. p. 364

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. [s.l.] WCB/McGraw-Hill, 1999. p. 826

YAKUT, K.; SAHIN, B. The effects of vortex characteristics on performance of coiled wire turbulators used for heat transfer augmentation. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, n. 16, p. 2427–2438, nov. 2004.

YOSHIMURA, M. System Design Optimization for Product Manufacturing. **Concurrent Engineering**, v. 15, n. 4, p. 329–343, 1 dez. 2007.

YOSHIMURA, M. **System Design Optimization for Product Manufacturing**. [s.l.] Springer-Verlag, 2010. p. 216

ZANGENEH, A.; JADID, S. Normal boundary intersection and benefit – cost ratio for distributed generation planning. n. October 2008, p. 97–113, 2010.

## ANEXOS

**ANEXO A – Parte da listagem do arquivo Script.dat**

```

set x0 0.9; #valor de x en la geométrica
set x1 1.0686
set x2 1.1969
set x3 1.1835
ic_point {} GEOM pnt.00 0,-20,0
ic_point {} GEOM pnt.01 0,2.5,0
ic_point {} GEOM pnt.02 $x0,5,0
ic_point {} GEOM pnt.03 0,7.5,0
ic_point {} GEOM pnt.04 0,12.5,0
ic_point {} GEOM pnt.05 $x1,15,0
ic_point {} GEOM pnt.06 0,17.5,0
ic_point {} GEOM pnt.07 0,22.5,0
ic_point {} GEOM pnt.08 $x2,25,0
ic_point {} GEOM pnt.09 0,27.5,0
ic_point {} GEOM pnt.10 0,32.5,0
ic_point {} GEOM pnt.11 $x3,35,0
ic_point {} GEOM pnt.12 0,37.5,0
ic_point {} GEOM pnt.13 0,80,0
ic_point {} GEOM pnt.14 2,80,0
ic_point {} GEOM pnt.15 2,-20,0
ic_curve point GEOM crv.07 {pnt.14 pnt.15}
ic_curve point GEOM crv.08 {pnt.14 pnt.13}
ic_curve point GEOM crv.09 {pnt.15 pnt.00}
ic_curve point GEOM crv.10 {pnt.00 pnt.01}
ic_curve point GEOM crv.11 {pnt.01 pnt.02}
ic_curve point GEOM crv.12 {pnt.02 pnt.03}
ic_curve point GEOM crv.13 {pnt.03 pnt.04}
ic_curve point GEOM crv.14 {pnt.04 pnt.05}
ic_curve point GEOM crv.15 {pnt.05 pnt.06}
ic_curve point GEOM crv.16 {pnt.06 pnt.07}
ic_curve point GEOM crv.17 {pnt.07 pnt.08}
ic_curve point GEOM crv.18 {pnt.08 pnt.09}
ic_curve point GEOM crv.19 {pnt.09 pnt.10}
ic_curve point GEOM crv.20 {pnt.10 pnt.11}
ic_curve point GEOM crv.21 {pnt.11 pnt.12}
ic_curve point GEOM crv.22 {pnt.12 pnt.13}
ic_point projcurv GEOM pnt.32 {pnt.12 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.33 {pnt.11 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.34 {pnt.10 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.35 {pnt.09 crv.07}

```

```

ic_point projcurv GEOM pnt.36 {pnt.08 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.37 {pnt.07 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.38 {pnt.06 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.39 {pnt.05 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.40 {pnt.04 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.41 {pnt.03 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.42 {pnt.02 crv.07}
ic_point projcurv GEOM pnt.43 {pnt.01 crv.07}
ic_undo_group_begin
ic_geo_set_part curve {crv.10 crv.11 crv.12 crv.13 crv.07 crv.14 crv.15 crv.16 crv.17
crv.18 crv.19 crv.20 crv.21 crv.22} EJE 0
ic_undef_update_family_type visible {EJE GEOM CREATED_FACES ORFN SOLID}
{!NODE LINE_2 QUAD_4} update 0
ic_geo_delete_family CREATED_FACES
ic_undo_group_end
ic_undo_group_begin
ic_geo_set_part curve crv.09 ENTRADA 0
ic_undef_update_family_type visible {EJE GEOM ORFN ENTRADA SOLID}
{!NODE LINE_2 QUAD_4} update 0
ic_undo_group_end
ic_undo_group_begin
ic_geo_set_part curve crv.08 SALIDA 0
ic_undef_update_family_type visible {EJE GEOM ORFN SALIDA ENTRADA SOL-
ID} {!NODE LINE_2 QUAD_4} update 0
ic_undo_group_end
ic_undo_group_begin
ic_geo_set_part curve crv.07 PARED 0
ic_undef_update_family_type visible {PARED EJE GEOM ORFN SALIDA ENTRA-
DA SOLID} {!NODE LINE_2 QUAD_4} update 0
ic_undo_group_end
ic_undo_group_begin
ic_geo_new_family SOLID
ic_boco_set_part_color SOLID
ic_hex_initialize_mesh 2d new_numbering new_blocking SOLID
ic_hex_switch_blocking root
ic_hex_unblank_blocks
ic_hex_switch_blocking root
ic_undo_group_end
ic_undo_group_begin
ic_hex_split_grid 11 13 0.575819 m GEOM SOLID VORFN
ic_undo_group_end
ic_undo_group_begin
ic_hex_split_grid 11 33 0.956535 m GEOM SOLID VORFN
ic_undo_group_end

```



## ANEXO B – Parte da listagem do Arquivo Journal.jou

```

/file/read-case "c:\trocador\mesh.msh"
(cx-gui-docx-activate-
item"General*Frame1*Table1*Frame1(Mesh)*ButtonBox1(Mesh)*PushButton1(Scale)")
(cx-gui-do cx-set-toggle-button "Scale Mesh*Frame2(Scaling)*Table2(Scaling)
*ToggleBox1*Specify Scaling Factors" #f)
(cx-gui-do cx-activate-item "Scale Mesh*Frame2(Scaling)*Table2(Scaling)
*ToggleBox1*Specify Scaling Factors")
(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "Scale Mesh*Frame2(Scaling)*Table2(Scaling)
*Frame3(Scaling Factors)*RealEntry1(X)" '( 0.01))
(cx-gui-docx-set-real-entry-list "Scale Mesh*Frame2(Scaling)*Table2(Scaling)
*Frame3(Scaling Factors)*RealEntry2(Y)" '( 0.01))
(cx-gui-do cx-activate-item "Scale Mesh*Frame2(Scaling)*Table2(Scaling)
*PushButton4(Scale)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Scale Mesh*PanelButtons*PushButton1(Close)")
(cx-gui-do cx-activate-item "NavigationPane*Frame1*PushButton3(Models)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Models*Frame1*Table1*Frame1*List1(Models)" '( 1))
(cx-gui-do cx-activate-item "Models*Frame1*Table1*Frame1*List1(Models)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Models*Frame1*Table1*PushButton2(Edit)")
(cx-gui-do cx-set-toggle-button "Energy*Frame1(Energy)*Table1(Energy)*Frame1
*ToggleBox1*CheckBox1(Energy Equation)" #f)
(cx-gui-do cx-activate-item "Energy*Frame1(Energy)*Table1(Energy)*Frame1
*ToggleBox1*CheckBox1(Energy Equation)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Energy*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Models*Frame1*Table1*Frame1*List1(Models)" '( 2))
(cx-gui-do cx-activate-item "Models*Frame1*Table1*Frame1*List1(Models)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Models*Frame1*Table1*PushButton2(Edit)")
(cx-gui-do cx-set-toggle-button "Viscous Model*Frame1*Table1*Frame1(Model)
*ToggleBox1(Model)*k-epsilon (2 eqn)" #f)
(cx-gui-do cx-activate-item "Viscous Model*Frame1*Table1*Frame1(Model)
*ToggleBox1(Model)*k-epsilon (2 eqn)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Viscous Model*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-activate-item "NavigationPane*Frame1*PushButton4(Materials)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Materials*Frame1*Table1*Frame1*List1(Materials)" '( 1))
(cx-gui-do cx-activate-item "Materials*Frame1*Table1*Frame1*List1(Materials)")
(cx-gui-do cx-activate-item "NavigationPane*Frame1*PushButton6(Cell Zone Conditions)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1*Table1
*Frame2*Table2*DropDownList2(Type)" '( 0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame2
*Table2*DropDownList2(Type)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Question*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1*Table1
*Frame1*List1(Zone)" '( 0))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame1*List1(Zone)")
(cx-gui-do cx-activate-item "fluid-9-1*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-activate-item "NavigationPane*Frame1*PushButton7(Boundary Conditions)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1
*Table1*Frame1*List1(Zone)" '( 0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame1*List1(Zone)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame2
*Table2*DropDownList2(Type)" '( 11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame2
*Table2*DropDownList2(Type)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Question*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1
*Table1*Frame1*List1(Zone)" '( 0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame1*List1(Zone)")
(cx-gui-do cx-activate-item "symmetry-11-1*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1
*Table1*Frame1*List1(Zone)" '( 1))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame1*List1(Zone)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame2
*Table2*DropDownList2(Type)" '( 12))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1
*Frame2*Table2*DropDownList2(Type)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Question*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1
*Table1*Frame1*List1(Zone)" '( 1))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1
*Table1*Frame1*List1(Zone)")
(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "velocity-inlet-12-1*Frame4*Frame1(Momentum)*Frame1
*Table1*Frame8*Table8*RealEntry2(Velocity Magnitude)" '( 1.3))
(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "velocity-inlet-12-1*Frame4*Frame3(Thermal)*Frame1
*Table1*Frame1*Table1*RealEntry2(Temperature)" '( 483))
(cx-gui-do cx-activate-item "velocity-inlet-12-1*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1
*Table1*Frame1*List1(Zone)" '( 2))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame1*List1(Zone)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Boundary Conditions*Frame1
*Table1*Frame1*List1(Zone)" '( 3))
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame1*List1(Zone)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Boundary Conditions*Frame1*Table1*Frame2
*Table2*Frame4*Table4*ButtonBox1*PushButton1(Edit)")
(cx-gui-do cx-set-toggle-button "wall-14-1*Frame4*Frame3(Thermal)
*Frame1*Frame1(Thermal Conditions)*Frame1*ToggleBox1*Temperature" #f)
(cx-gui-do cx-activate-item "wall-14-1*Frame4*Frame3(Thermal)*Frame1

```