

## OTIMIZAÇÃO DE PRODUTO NA FASE CONCEITUAL A PARTIR DE MODELAÇÃO NUMÉRICA

Julián Ignacio López Arcos ([burack\\_sa@hotmail.com](mailto:burack_sa@hotmail.com)) - UNIFEI  
Carlos Eduardo Sanches da Silva ([cadusanches@uol.com.br](mailto:cadusanches@uol.com.br)) - UNIFEI  
Ramiro Gustavo Ramirez Camacho ([ramirez@unifei.edu.br](mailto:ramirez@unifei.edu.br)) - UNIFEI  
Karol Andrea Trochez Trujillo ([karitol-5@hotmail.com](mailto:karitol-5@hotmail.com)) - UNIFEI

### Resumo

*Este trabalho consiste na análise da otimização de um produto na fase conceitual por meio de modelação numérica. Foi usada a integração das metodologias: dinâmica dos fluidos computacional (CFD), delineamento de experimentos (DOE), para obter o metamodelo do produto para cada resposta; a técnica de otimização multiobjectivo conhecida como Interseção Normal à Fronteira ou NBI (Normal boundary Intersection) para otimiza-las. O objeto de estudo, para aplicação da análise de otimização, foi um difusor interno da tubulação de um trocador de calor, visando estabelecer os parâmetros conceituais otimizados rapidamente. Simplificações no modelo foram realizadas baseando-se nas informações técnicas e em restrições de fabricação e montagem. Após da análise os resultados demonstram a efetividade da otimização na fase conceitual considerando o fluxo de calor e a queda de pressão. O modelo obtido permite o desenvolvimento rápido 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.

### 1. INTRODUÇÃO

Conceitualmente, de acordo com Clark e Fugimoto (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”.

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, assim o número de ensaios para obter um produto otimizado na fase conceitual pode ser minimizado (YOSHIMURA, 2010).

Otto e Wood (2001), apresentam a fase conceitual como uma fase do PDP onde são recolhidas todas as informações disponíveis do produto como especificações do mercado para o produto, de como o produto satisfará as necessidades dos clientes, independentemente da implementação.

Segundo Montgomery (1999), *Design of Experiments - DOE* é 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: a identificação do problema; escolha de fatores, níveis e valores; seleção da variável de resposta; escolha do arranjo do experimento; desenvolver o experimento; análise estatística dos dados obtidos; conclusões e recomendações. A partir do passo 5, que é desenvolver o experimento, utiliza-se como ferramenta de simulação a metodologia da Dinâmica Computacional de Fluidos - CFD.

A técnica CFD envolve análises de sistemas considerando: fluxo de fluidos; troca de calor; e fenômenos associados com reações químicas. Apoiada por simulações computacionais, a técnica possui amplas aplicações industriais como na aerodinâmica de aeronaves, hidrodinâmica de embarcações, turbo maquinaria, elétrica e eletrônica, entre outros (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Folkestad e Johnson (2001) advertem que bons resultados do PDP não são obtidos com o uso de técnicas isoladas e sim combinadas. Pelo 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 (MYERS; MONTGOMERY, 2009).

O software de ANSYS CFX, contém a maioria das ferramentas computacionais necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa. Diversos estudos feitos em várias áreas de conhecimentos para otimização de parâmetros envolvidos com: moldagem, troca de calor, fluidos, materiais e desenhos; onde foram aplicados ferramentas estatísticas como o Desenho de Experimentos DOE, para obter aperfeiçoamentos no desempenho de processos ou produtos (HOU *et al.*, 2010; SUN *et al.*, 2010; CHEN *et al.*, 2010; GUIMARÃES; DA SILVA, 2010; OKTAY *et al.*, 2011).

Neste contexto esse artigo tem como objetivo descrever o potencial da integração das metodologias dinâmica dos fluidos computacional (CFD), utilizando o software ANSYS CFX®; e o delineamento de experimentos (DOE), visando à modelação numérica do produto. A metodologia consiste na obtenção do metamodelo do produto, via a integração das metodologias DOE e CFD, culminando na aplicação da otimização e análises dos resultados.

## 2. OBTENÇÃO DO METAMODELO DO PRODUTO

O difusor que será inserido no trocador de calor tem como função espalhar e distribuir o escoamento dentro do tubo onde é inserido, atualmente foi desenvolvido empiricamente. Alguns dados são omitidos, pois busca-se posteriormente uma patente de modelo de utilidade. Seguem abaixo as etapas do DOE.

### 2.1. Identificação do problema

Fita de aço inoxidável, dobrada em vários geradores de vórtices, comprimento ao longo do duto onde vai ser inserido de seção circular (L), na direção Z, Ø de diâmetro. O fluido é Ar, velocidade V e temperatura T na entrada do tubo e foram obtidas experimentalmente.

### 2.2. Escolha de fatores, níveis e valores

A procura por otimizar a geometria do difusor para adquirir uma melhor troca de calor, porem, os fatores escolhidos na (tabela 1) são os parâmetros da geometria para fazer o estudo correspondente.

Tabela 1. Características dos modelos de duto estudado

Fator	Nível	
	Alto (+1)	Baixo (-1)
X0	1,8	0
X1	1,8	0
X2	1,8	0
X3	1,8	0

Fonte: Autor

Os produtos ou processos sempre tem algum tipo de restrição, como por exemplo larguras, espessura, comprimento entre outros fatores, que não tem variabilidade, a ideia com a esta pesquisa é assumir algumas restrições como: a espessura do material; área da seção do canal; area total da superfície aletada; material; área total de troca de calor por duto; área frontal de escoamento; largura do canal; numero de canais; e otimizar a geometria para adquirir uma melhor troca de calor, com os fatores escolhidos (tabela 1) planeja-se um DOE e achar a correlação dos fatores que influenciam o desempenho da troca de calor.

### 2.3. Seleção da variável de resposta

Para a seleção da variable de resposta o pesquisador deve conhecer o produto ou processo onde pretende se aplicar a solução, tem variaveis que podem ser consideradas ruidos (afetam o processo, mas não podem ser controladas) ou variaveis potenciais de arranjo (podem ser controlaveis).

Nesta pesquisa a taxa de transferência de calor (Q) e a queda de pressão ( $\Delta P$ ) como variável de saída, e como ruídos podem ser, por exemplo: humidade, pressão atmosférica e

temperatura ambiente.



As primeiras tres etapas ou passos são conhecidas como planejamento pre-experimental, se o planejamento pre-experimental for bem feito, a fase de escolha do arranjo do experimento vai ser bem mais facil, 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.

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. Nesta fase tambem pode-se planejar experimentos pilotos só para testar o planejamento. Na fase anterior forão coletados dados que serão analisados estatisticamente, contribuindo para a solução do problema. Deve-se considerar também a correlações entre os fatores que afetam o ótimo desempenho do produto ou processo. Um relatorio com conclusões do experimento é feito depois da analise estatistica dos dados.

#### 2.4. Escolha do tipo de arranjo

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. Montgomery (2006), apresenta alguns dos tipos de experimento, por exemplo, os comparativos simples; só um fator; de tipo fatorial; superfície de resposta e outros.

A superfície de resposta (RSM) é a 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 o sistema (MONTGOMERY, 2009).

Nesta pesquisa foi usado o arranjo de superfície de resposta; desde que Box e Wilson (1951), falaram do arranjo componente central (Central Composite Design – CCD), tem sido o arranjo experimental mais utilizado na Metodologia de Superfícies de Resposta.

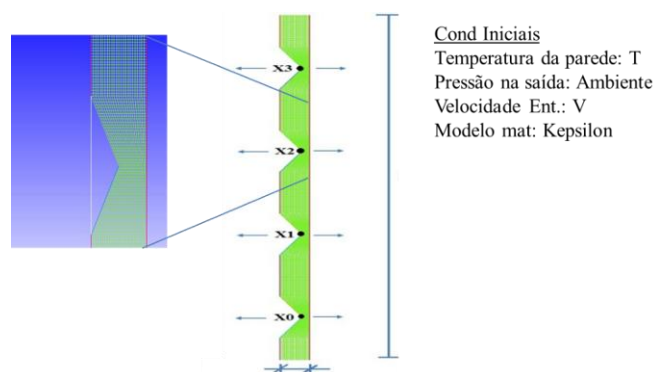
#### 2.5. Desenvolvimento do experimento (Simulação em CFD)

Montgomery (2006) afirma que, cada tipo de experimento tem um procedimento de

desenvolvimento adequado para solução do problema em questão. Como ferramenta de simulação foi utilizada o pacote ANSYS CFX® que trabalha com Dinâmica computacional de Fluidos CFD.

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995) e Thévenin e Janinga (2008) as simulações numéricas são compostas por três fases: a fase inicial de pré-processamento, as simulações com CFD se inicia com as subfases 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 pequenas células (volumes finitos) para formar a malha (figura 2), no mesmo software ICEM-CFD. Neste caso a geometria 2D que representa a fita difusora no trocador de calor, foi desenvolvida parametricamente com um script em linguagem de programação Tcl Tk® (Tool Command Language – Toolkit) e corrida em ICEM-CFD.

Figura 2. Malha com células em formas triângulos e tetraedros e condições iniciais.



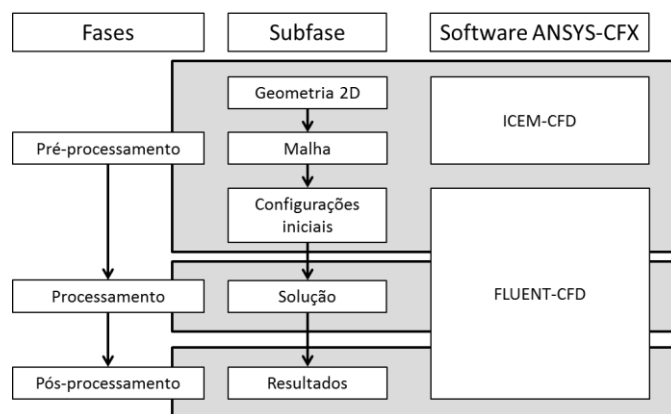
Fonte: Autor.

Depois de gerar a malha do modelo geométrico na etapa de processamento são estabelecidas as configurações da simulação em um arquivo journal file: Como definir materiais, velocidades, temperaturas, condições do meio; não é mais que um serie de comandos TUI (Interface texto Usuario) armazenados em formato texto.

Dependendo do problema que procurasse solução, o software FLUENT-CFD, auxilia com modelos computacionais com soluções pré-estabelecidas. O tempo de processamento depende de vários fatores: numero de células; 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 número de células é maior, precisasse uma maior capacidade computacional.

Figura 3. Fases e subfases numa simulação numérica CFD.



Fonte: Autor

Sendo finalizada a etapa de processamento, inicia-se a etapa de pós-processamento, onde se procura analisar os resultados, culminando nas conclusões. Geralmente são feitas novas simulações.

## 2.6. Análise estatístico de 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).

*Y1(Fluxo de Calor)*

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

Eq. (1)

Apresenta um ajuste 86,78%

*Y2(Queda de pressão)*

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

Eq. (2)

Apresenta um ajuste 0,00%; precisa ajuste

$$Y2(\ln(\text{Abs}(\text{Queda de pressão}))) = 1,521 + 0,411X_0 + 0,409X_1 + 0,406X_2 + 0,403X_3 + 0,268X_0^2 + 0,268X_1^2 + 0,267X_2^2 + 0,267X_3^2 - 0,065X_0X_1 - 0,065X_0X_2 - 0,065X_0X_3 - 0,060X_1X_2 - 0,061X_1X_3 - 0,0567X_2X_3$$

Eq. (3)

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

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

### 3. OTIMIZAÇÃO DO METAMODELO DO PRODUTO

#### 3.1. Clarificação do problema de otimização

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; porem precisa-se clarificar em função do que vai ser otimizado.

O ideal é ter a maior taxa de troca de calor (Q) o que é possível conseguir, fechando o tubo na saída, ou dificultando o escoamento do fluido mediante a fita difusora, a maior estricção do escoamento resulta na queda de pressão ( $\Delta P$ ). Restrições no escoamento influenciam o queimador, podendo comprometer a integridade do produto (explosão). Assim, as duas variáveis de resposta são dependentes e conflitantes. Nas equações (4) e (5) estão as variáveis para otimizar.

$$\dot{q}_{otimo} = \dot{q}_{max} - \dot{q}_{medio} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\Delta P_{min} = P_{T_2} - P_{T_1} \quad \text{Eq. (5)}$$

#### 3.2. Metodologia de otimização NBI:

A metodologia de otimização Intersecção Normal à Fronteira ou NBI (Normal Boundary Intersection) é uma metodologia de otimização multiobjectivo amplamente abordada em (DAS; DENNIS, 1998). Onde procura-se vários pontos ótimos de Pareto nos problemas de otimização multiobjectivo. Com o objetivo de capturar a troca entre os objetivos conflitantes; o método é independente das escalas das funções e é muito bem sucedido na produção de conjuntos de pontos uniformemente distribuídos no conjunto de Pareto, pela distribuição dos pesos. Pode ser facilmente adaptado para mais de dois objetivos continuando com a eficiência característica do algoritmo. O planejamento para otimizar a função objetivo esta sujeita na matriz trade-off apoiada das equações (3) e (4).



$$\begin{cases} \min f_1^*(u) \\ \text{s. t. } f_1^*(2) - f_2^*(2) + 2w - 1 = 0 \\ X^T X \leq \rho^2 \end{cases}$$

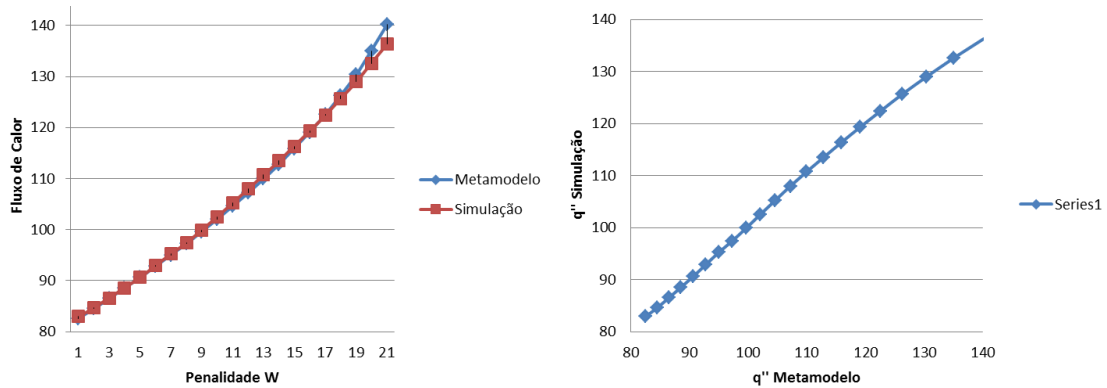
$$w[0 \sim 1] : 0,05 \ 0,1 \ \dots$$

$$f_1^*(x) = \left[ \frac{f_1(x) - Q}{f_1^{\max}(x) - f_1^{\min}(x)} \right] \quad \text{Eq. (3)}$$

$$f_2^*(x) = \left[ \frac{f_2(x) - \Delta P}{f_2^{\max}(x) - f_2^{\min}(x)} \right] \quad \text{Eq. (4)}$$

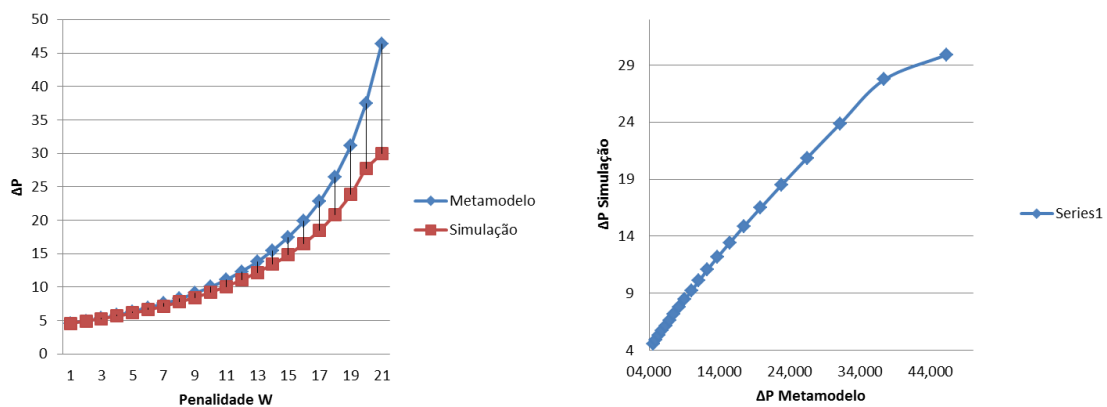
Feitas as simulações foi preenchida a matriz experimental e comparado os resultados do metamodelo versus a simulação dos dados obtidos.

Fig 4. Comparação do metamodelo versus a simulação (Q) – Fluxo de calor



Fonte: Autor

Fig 5. Comparação do metamodelo versus a simulação ( $\Delta P$ ) – Queda de pressão

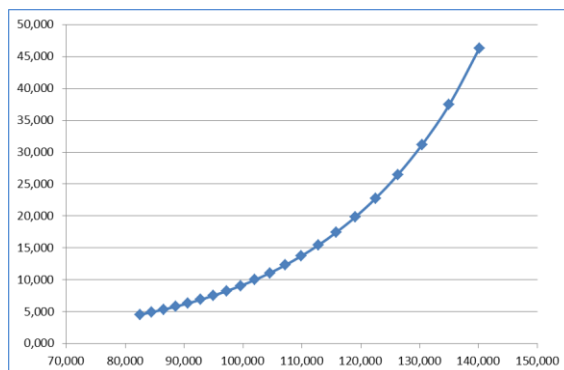


Fonte: Autor

Com os dados obtidos para cada um dos pesos, foi construída a fronteira de Pareto, que apresenta a otimização simultânea de os dois objetivos conflitantes, figura 6.



Fig 6. Fronteira de Pareto

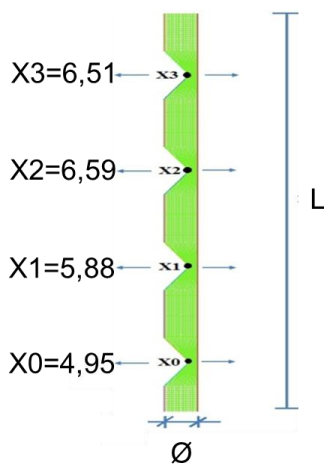


Fonte: Autor

A fronteira de Pareto é formada pelos pontos no espaço das funções objetivo que corresponde ao conjunto Pareto – ótimo.

Obteve-se assim os parâmetros otimizados do difusor do trocador de calor, não sendo os mesmos descritos devido ao sigilo necessário para posterior depósito de patente do modelo de utilidade.

Fig 7. Pontos Ótimos



Fonte: Autor

Propõe-se construir um protótipo e testado num experimento comprobatório.

#### 4. CONCLUSÕES

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.

Propõem-se para continuidade da pesquisa a aplicação da proposta de integração no PDP, via a realização de testes práticos que permitam validar o metamodelo desenvolvidos.

Agradeço ao CNPq (Pró-Engenharia), a FAPEMIG e a CAPES pelo apoio financeiro para realização dessa pesquisa.

## 5. REFERÊNCIAS

BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society**, B13, 1–38, 1951.

CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. **Product development performance: strategy, organization, and management in the world auto industry**. Boston-Mass: HBS Press, 1991.

CHEN, W.; Hung, C. Optimization of plastic injection molding process by dual response surface method with non-linear programming. **Optimization of molding process**. Vol. 27 N°8, p. 951-966, 2010.

DA SILVA, S.F. **Análise da Viabilidade Técnica de um Sistema de Refrigeração por Absorção Utilizando os Gases dos Fornos de Panificação**. 2006. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais. Orientador: Carlos Eduardo Sanches da Silva.

DAS, I.; DENNIS, J.E.; Normal-boundary intersection: A new method for generating the pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. **SIAM J. OPTIM.** Vol. 8, No. 3, pp. 631-657, 1998.

FOLKESTAD, J.; JOHNSON, R.L. Integrated rapid prototyping and rapid tooling (IRPRT). **Integrated Manufacturing Systems**, Vol. 13, No 2, p. 97-103, 2002.

GUIMARÃES, P.M.; DA SILVA, C.E.S.; A parametric study of forced convection in an enclosure with stationary heat cylinders. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Vol. 37, p 469-475, 2010.

HOU, B. et al. 2010. Stochastic analysis and robust optimization for a deck lid inner panel stamping. **Materials and design**, Vol. 31, p 1191 – 1199, 2010.

MONTGOMERY; D.C. **Design and analysis of experiments**. Six edition, 2006, John Wiley & sons, Inc. USA.

Montgomery; D.C. Experimental Design for product and process design development. **The Statistician**, Vol. 48, Part 2, p 159-177, 1999.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C.; ANDERSON-COOK, C.M. 2009. **Response Surface Methodology: Process and Product optimization using designed experiments**, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ.

OKTAY, E.; AKAY, H.U.; MERTTOPCUOGLU, O. Parallelized structural topology optimization and CFD coupling for design of aircraft wing structures. **Computers & Fluids**, Vol. 49, p 141-145, 2011.

OTTO, K.N.; WOOD, K.L. **Product design: Techniques in reverse engineering and new product development**. Prentice Hall, New Jersey, 2001.

SUN, G. et al. Multiobjective robust optimization method for drawbead design in sheet metal forming. **Materials and Design**, Vol 31, p 1917-1929, 2010.

THÉVENIN, D; JANIGA, J. 2008. **Optimization and computational fluid dynamics**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ULRICH, K.T.; EPPINGER, S.D. 2004. **Product Design and Development**, Third Edition. McGraw-Hill, New York.

VERSTEEG, H.K.; W. MALALASEKERA. 1995, **An Introduction to computational fluid dynamics**. Longman Scientific & Technical. Malaysia.

YOSHIMURA, M. 2010. **System design optimization for product manufacturing**. 2010, Springer-Verlag London Limited.