

ANDRÉ PERPIGNAN VIVIANI DE CAMPOS

537

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESIGN FOR SIX SIGMA NO
PROJETO CONCEITUAL E PRELIMINAR DE TURBINAS A GÁS

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do certificado
de Especialista em Gestão e
Engenharia da Qualidade – MBA /
USP

Orientador:
Prof. Dr. Adherbal Caminada Netto

São Paulo
2013

RESUMO

A metodologia *Design for Six Sigma* (DFSS) tem sido aplicada com sucesso a muitos processos de projetos conduzidos por inúmeras companhias. Tal metodologia é, de certa forma, derivada da metodologia Seis Sigma e está intimamente ligada aos objetivos da Gestão da Qualidade. O objetivo desse trabalho é avaliar a aplicação de ferramentas e conceitos da metodologia DFSS no projeto de turbinas a gás, especialmente em seus compressores, propondo quais seriam as melhores maneiras para integrá-los aos métodos de projeto de turbomáquinas mais utilizados atualmente. O trabalho é composto por uma revisão acerca das metodologias atuais mais consagradas para este tipo de projeto, o estado da arte do DFSS e uma apresentação de suas ferramentas. Posteriormente, os conceitos apresentados são aplicados ao caso específico do projeto de compressores, adequando a metodologia às suas características e necessidades. O trabalho foi embasado, em parte, através do emprego do DFSS no projeto de compressor realizado pelo autor em sua pesquisa junto ao Laboratório de Engenharia Ambiental e Térmica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Concluiu-se que o DFSS tem a contribuir no projeto de turbinas a gás especialmente para realizar a integração entre os subprojetos e para garantir robustez e amplitudes operacionais requeridas.

Palavras-chave: Gestão de Projetos, Turbinas a Gás, Compressores.

ABSTRACT

The Design for Six Sigma (DFSS) methodology has been successfully applied to many project processes held by several companies. This methodology is derived, to some extent, from the Six Sigma methodology and is highly linked to the Quality Management goals. This work's objective is to evaluate the application of tools and concepts from the DFSS methodology in the gas turbine design, specially on its compressors, proposing the best approach to integrate them to the turbomachinery design procedures mostly used currently. This work is composed by a review on the most reliable turbomachinery design methods, the DFSS state of the art and the presentation of its tools. Subsequently, the presented concepts are applied to the specific case of compressor design, adapting the methodology to its characteristics and needs. This work was partially based on the use of DFSS on the compressor design made by the author in the context of his research made in the Laboratory of Environmental and Thermal Engineering of the Polytechnic School of the University of São Paulo. It was concluded that DFSS has a lot to contribute en the gas turbine design, especially for components projects integration and to guarantee the design stiffness and the required operational amplitudes.

Keywords: Project Management, Gas Turbines, Compressors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema do processo de projeto de compressores. As análises e predição de desempenho tornam-se mais complexas no decorrer do processo quando mais detalhes das geometrias propostas ao compressor são incluídos. A cada etapa há um <i>loop</i> , que representa a necessidade de testar diversas geometrias e reformular as entradas de acordo com as saídas já constatadas.	9
Figura 2 - Ciclo DMAIC utilizado nos projetos da metodologia Seis Sigma.	15
Figura 3 – Sequências de trabalho I ² DOV e CDOV.	21
Figura 4 – Esquema do processo de projetos em uma organização típica. Adaptado de Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003).	28
Figura 5 – Segmentação dos projetos em turbinas a gás. Acima está o projeto de um novo produto. Os componentes desse projeto têm projetos independentes até certo ponto e podem ser utilizados em outros projetos. Os projetos de tecnologia e inovação podem fornecer seus resultados aos projetos de componentes. (Proposto pelo autor.)	34
Figura 6 – Dados do <i>benchmarking</i> de turbinas a gás disponíveis no mercado relacionando suas potências desenvolvidas e a razão de pressões de seus compressores.	37
Figura 7 – Dados do <i>benchmarking</i> de turbinas a gás disponíveis no mercado relacionando suas potências desenvolvidas e o produto entre razão de pressões de seus compressores e a vazão mássica (kg/s).	38
Figura 8 – Diagrama de Cordier com indicação das regiões adequadas a cada tipo de compressor. Adaptado de Dixon e Hall (2010).	40
Figura 9 – Dimensões genéricas do perfil meridional do impelidor. Dimensões indicadas são definidas no projeto unidimensional.	41
Figura 10 – Fluxograma do método unidimensional de projeto preliminar utilizado.	50
Figura 11 – Participação de cada tipo de perda com relação à soma das perdas. Em azul apresentam-se as médias de todas as geometrias avaliadas com desvio padrão indicado pelas barras de erro. Em vermelho estão dispostas as perdas para a geometria que teve a maior eficiência indicada.	51
Figura 12 – Gráfico das perdas por incidência pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.	53

Figura 13 - Gráfico das perdas por carga pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.....	53
Figura 14 - Gráfico das perdas por atrito pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.....	54
Figura 15 - Gráfico das perdas por folga pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.....	54
Figura 16 - Gráfico das perdas por mistura pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.....	55
Figura 17 - Gráfico das perdas por fricção no disco pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.	55
Figura 18 - Gráfico das perdas por recirculação pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.....	56
Figura 19 - Gráfico das perdas por vazamento pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Objetivos e resultados esperados de cada etapa da sequência DMADV. Adaptado de Werkema (2005).	19
Tabela 2 – Recomendações para aplicação do DFSS aos tipos de projeto e subprojetos em turbinas a gás.	35
Tabela 3 – Faixas utilizadas para os parâmetros variados durante o projeto unidimensional e as referências que ajudaram a determiná-las.	49
Tabela 4 – Coeficientes de correlação de Pearson para os diversos tipos de perdas relacionados à eficiência através de regressão linear. Intervalos de confiança de 95%.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

a	– velocidade do som
b	– altura da passagem
C	– velocidade absoluta
C_f	– coeficiente de atrito
D	– diâmetro
D_f	– fator de difusão
D_s	– diâmetro específico
f	– fator de atrito
g	– aceleração da gravidade
H	– carga (<i>head</i>)
h	– entalpia
k_s	– rugosidade
L_{ax}	– comprimento axial do impelidor
L_d	– comprimento médio da passagem do difusor
L_m	– comprimento meridional médio do impelidor
M_u	– velocidade adimensional da ponta do rotor
$\dot{m}$	– vazão mássica
N	– rotação
N_s	– velocidade específica
P	– pressão
P_R	– razão de pressões totais
Q	– vazão volumétrica / calor
R	– constante dos gases ideais
r	– raio
Re	– número de Reynolds
T	– temperatura
U	– velocidade tangencial / componente de velocidade
W	– velocidade relativa
Z	– número de pás do impelidor
α	– ângulo absoluto do escoamento com relação à direção meridional
β	– ângulo relativo do escoamento com relação à direção meridional

$\varepsilon_{esteira}$ – fração do comprimento da saída do impelidor no qual há esteira

ϵ – folga entre as pás do impelidor e sua carcaça

η – eficiência

θ – adimensional da vazão mássica

θ_c – ângulo de divergência equivalente do difusor

κ – razão espaço-corda da equação de Came e Robinson (1999) / constante de Von Kármán

μ – fator de escorregamento

Índices subscritos

$(t - t)$ – total - total

0 – condição de estagnação

1 – entrada do compressor / entrada do impelidor

2 – saída do impelidor

A – superfície

at – atrito viscoso

atd – atrito ou fricção no disco

B – relativo à pá (*blade*)

cg – carga

fol – folga

h – *hub*

hid – hidráulico

I – referente ao impelidor

inc – incidência

$isen$ – isentrópica

mis – mistura

rec – recirculação

s – referente ao estágio de compressão / relativo ao *shroud* / processo isentrópico

vaz – vazamento

Siglas

CDOV – Concept, Develop, Optimize, Verify (Conceituar, Desenvolver, Otimizar e Verificar)

CPM – Critical Parameter Management (Gestão de Parâmetros Críticos)

CTQ – Critical to Quality (Crítico à Qualidade)

DFSS – Design for Six Sigma (Projetando para Seis Sigma)

DMADV – Define, Measure, Analyze, Design, Verify (Definir, Medir, Analisar, Projetar e Controlar)

DMAIC – Define-Measure-Analyse-Improve-Control (Definir-Medir-Analisar-Melhorar-Controlar)

DOE – Design of Experiments (Delineamento de Experimentos)

I²DOV – Invention and Innovation, Develop, Optimize, Verify (Invenção e Inovação, Desenvolver, Otimizar e Verificar)

TRIZ – *Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch* (Teoria para a Resolução de Problemas do Inventor)

USD – United States Dollars (Dólares Americanos)

ICOV – Identify, Conceptualize, Optimize, Validate (Identificar, Conceituar, Otimizar, Validar)

KJ – Método de Jiro Kawakita

NUD – *New, Unique and Difficult*

VOC – Voice of Customer (Voz do Consumidor)

FMEA – Failure Mode and Effect Anaysis (Análise dos Modos de Falha e Efeitos)

FTA – Fault Tree Analysis (Análise da Árvore de Falhas)

PDCA – Plan-Do-Check-Act (Planejar-Fazer-Verificar-Agir)

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
SUMÁRIO	x
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Estrutura do texto	3
2. Revisão da literatura	5
3. A metodologia DFSS	12
3.1. Seis Sigma	13
3.2. A função do DFSS	16
3.3. Ferramentas e métodos do DFSS	18
3.4. Comparação entre DFSS e Seis Sigma	29
4. Relação entre o DFSS e a gestão da qualidade	31
5. Aplicação do DFSS ao projeto de turbomáquinas	33
5.1. Aplicação a um projeto preliminar de compressor	36
5.1.1. Perdas internas	43
5.1.2. Perdas parasitas	46
5.1.3. Rotina computacional e análise dos dados	48
6. Conclusão	59
7. Referências	60

1. INTRODUÇÃO

O projeto e utilização de turbomáquinas (ou máquinas de fluxo) são amplamente difundidos, sendo vitais a muitas atividades da indústria. De bombas hidráulicas a motores aeronáuticos, de ventiladores industriais a geradores hidrelétricos, as aplicações são abundantes. Inúmeras empresas dedicam-se à fabricação de turbomáquinas e seus componentes, sendo uma atividade que necessita considerável conhecimento técnico. Turbomáquinas podem ser definidas como aparatos nos quais a energia mecânica é trocada com um fluido de escoamento contínuo através de ação dinâmica de pás rotativas (BASKHARONE, 2006; DIXON; HALL, 2010).

Há um tipo particular de turbomáquina que será o alvo deste trabalho: as turbinas a gás. Empregadas na geração de eletricidade via queima de combustíveis, na indústria aeronáutica e automotiva, elas são caracterizadas por estarem vinculadas ao processo de combustão. Os gases da combustão (ou vapor aquecido por ela) passam pelas turbinas, acionando um ou vários eixos geradores de potência.

Apesar dos fenômenos envolvidos terem sido observados há mais tempo, os primeiros projetos de turbinas a gás que possuíam condições operacionais razoáveis surgiram ao final do século XIX (GIAMPAOLO, 2006). A partir de então, grandes progressos têm sido feitos, especialmente durante a segunda guerra mundial com as primeiras tentativas de aplicação à aviação. As vantagens apresentadas por sua aplicação em diversos âmbitos fizeram com que as turbinas a gás fossem essenciais e se tornassem o alvo de negócios de companhias que vendem seus produtos diretamente ao usuário final ou fornecendo a outras empresas.

Dentre as companhias mais notáveis do ramo, pode-se citar General Electric, Alstom, Rolls-Royce, Siemens, Pratt-Whitney, Volvo e Honeywell. Sendo um mercado que envolve forte concorrência, grandes investimentos e tecnologia de ponta, a gestão da qualidade e o gerenciamento de projetos estão fortemente presentes. Além disso, empresas com este perfil costumam ser pioneiras na adoção de metodologias de gestão e projeto, frequentemente ditando tendências (WERKEMA, 2005).

O nível de desenvolvimento da tecnologia em turbinas a gás no Brasil não possui projeção mundial, sem nenhum fabricante concorrendo em grande escala. Além disso, grande parte do conhecimento acerca da concepção deste tipo de máquina está encerrada em segredos industriais. Por estes motivos, o Laboratório de Engenharia Ambiental e Térmica da Escola Politécnica da USP, onde o autor desenvolve atividades de pesquisa, tem buscado estudar máquinas de fluxo, assim como algumas outras escolas brasileiras. Porém, isso é feito sob uma ótica focada nos fenômenos físicos, sem fins diretos de produção ou com análises do processo de projeto.

É natural que se comece a desenvolver a tecnologia através do conhecimento técnico-teórico que pode vir a embasar processos de produção e projeto. Contudo, o desenvolvimento nacional não está num estágio tão embrionário que impossibilita o estudo de metodologias de projeto, gestão e fabricação de turbinas a gás. E é nesta esfera que se insere este trabalho. Quase toda informação mais detalhada, relativa a esses aspectos, é mantida em segredo pelas companhias, talvez mais que o conhecimento técnico.

Sabe-se que a gestão da qualidade tem tido importância cada vez maior para o sucesso de organizações. Seus princípios, como foco no consumidor, abordagem por processos ou o fomento ao envolvimento das pessoas, são capazes de contribuir para que as metas sejam alcançadas (HOYLE, 2007).

Há alguns modelos desenvolvidos para a realização da gestão da qualidade, como, por exemplo, o Kaizen, a ISO 9000, ou o ciclo PDCA, com abordagens distintas, mas com objetivos bastante similares (HOYLE, 2007). Considerada por muitos um modelo de gestão da qualidade, a metodologia Seis Sigma mostrou-se eficaz para alcançar altos níveis de excelência da qualidade em muitas organizações que a empreenderam (BREYFOGLE, 2003). Essa metodologia é uma maneira sistemática de abordar processos baseada em fatos, com um ciclo definido de ações e o uso de ferramentas estatísticas e experimentais. A metodologia Seis Sigma tem, usualmente, um caráter corretivo (FIORAVANTI, 2005). Isso significa que ela é aplicada a processos já existentes, estudando-os, quantificando seu desempenho, melhorando-os e, por fim, controlando-os.

Uma tendência que tem ganhado força é a criação de produtos e processos já se pensando na adequação ao Seis Sigma. Isso causou o surgimento do DFSS (*Design*

for Six Sigma, podendo ser traduzido como *Projetando para Seis Sigma*) que é um conjunto de ferramentas e métodos a serem utilizados no desenvolvimento de produtos com os mesmos preceitos da metodologia Seis Sigma. Tal abordagem tende a facilitar o posterior controle e reduz os custos dos projetos (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003).

Apesar de ter ferramentas e ciclos bem definidos, a aplicação do DFSS deve se adequar às particularidades dos projetos a serem desenvolvidos e formar uma relação convergente e vantajosa com os métodos de engenharia exigidos pelo projeto. No caso do projeto de turbinas a gás, há conhecimento acerca dos métodos de engenharia mais recomendados. Porém, há uma lacuna justamente sobre como é feita a integração destes métodos com o DFSS.

1.1.Objetivos

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a aplicação da metodologia DFSS ao projeto conceitual e preliminar de turbinas a gás. Pretendeu-se alcançar conclusões sobre a adequação da metodologia em termos práticos e que tipo de escolhas e questionamentos estão envolvidos em tal adequação. Além disso, almejou-se responder quais ferramentas e métodos são mais eficazes e melhor se adaptam às particularidades do projeto de turbomáquinas.

Secundariamente, este trabalho teve também o objetivo de avaliar as vantagens trazidas pelo DFSS para a gestão da qualidade. A relação entre o DFSS e a gestão da qualidade foi estudada e revisada.

1.2.Estrutura do texto

O presente trabalho foi organizado de maneira a facilitar a compreensão do leitor e a apresentar os conceitos numa sequência lógica. O capítulo seguinte é dedicado à caracterização da literatura. Foram revisados o foco da metodologia e suas

ferramentas, de obras que apresentam o DFSS de maneira conceitual ou prática, enfatizando o que de fato pode contribuir com este trabalho. Estudos de caso de aplicações específicas também foram analisados.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação da metodologia DFSS, com os conceitos necessários à compreensão do trabalho. As ferramentas e ciclos empregados nos capítulos posteriores são definidos e explicados conceitualmente, ainda que sucintamente. O item 3.1 se dedica a esclarecer a relação entre a metodologia Seis Sigma e o DFSS, com suas diferenças, semelhanças e complementaridades.

O capítulo quatro estabelece a função do DFSS dentro da gestão da qualidade. Os princípios da qualidade contemplados pelo DFSS são brevemente analisados.

O quinto capítulo é o cerne deste trabalho. Nele é feita a análise da aplicação prática do DFSS ao projeto de turbinas a gás, com o enfoque baseado no projeto de compressor realizado pelo autor. As ferramentas e ciclos mais adequados são definidos e as recomendações para tal aplicação são embasadas.

Por fim, os capítulos seis e sete contêm a conclusão do trabalho e as referências utilizadas, respectivamente.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A literatura que trata da metodologia DFSS conceitualmente é bastante extensa. A descrição das ferramentas indicadas, as fases a serem impostas aos projetos e as bases sobre as quais a metodologia se apóia podem ser encontradas em diversas obras. Porém, algumas se destacam em alguns aspectos.

Nesta linha, o trabalho de Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003) trouxe um enfoque no desenvolvimento de novas tecnologias que foi analisado no presente trabalho. Foram definidos dois diferentes modelos de fases: o I²DOV (Invention and Innovation, Develop, Optimize, Verify – ou traduzindo, Invenção e Inovação, Desenvolver, Otimizar e Verificar) e o CDOV (Concept, Develop, Optimize, Verify – ou traduzindo, Conceituar, Desenvolver, Otimizar e Verificar), sendo o primeiro indicado ao desenvolvimento de novas tecnologias e o segundo ao de produtos. Ambos são cogitados e analisados para o uso no presente trabalho. Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003) trouxeram ainda descrições e análises das ferramentas e melhores práticas para cada uma das fases dos modelos.

Foi feita ainda uma detalhada caracterização sobre o uso da gestão de parâmetros críticos (CPM – do inglês, *Critical Parameter Management*), uma prática fundamental à metodologia DFSS. Através da CPM é possível focar no desempenho daquilo que se projeta, identificando e controlando os parâmetros que de fato governam o comportamento do produto ou tecnologia desenvolvidos. Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003) apresentaram as ferramentas e práticas mais recomendáveis para realização da CPM, conselhos para criação de métricas e para aquisição de dados.

De maneira similar, o trabalho desenvolvido por Yang e El-Haik (2003) é também uma coletânea partindo desde a conceituação do Seis Sigma e DFSS até a recomendação de ferramentas. Porém, houve um enfoque mais desenvolvido em questões conceituais, como a relação entre o DFSS e a gestão da qualidade, além de uma seleção de ferramentas diferente. Foi dada uma ênfase maior à TRIZ (*Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch*, em russo, que pode ser traduzida por Teoria para a Resolução de Problemas do Inventor) e às técnicas de Taguchi. Dessa forma, este trabalho também contribuiu para a realização dessa monografia.

A TRIZ é incorporada ao DFSS tanto para a concepção de ideias quanto para a solução de problemas, sendo, por si só, uma combinação de métodos, ferramentas e maneira de pensar (YANG; EL-HAIK, 2003). É importante deixar claro que sua aplicação não existe apenas no contexto do DFSS, mas ela é recomendada e se ajusta bem aos propósitos do DFSS (HUR et al., 2004). Um dos elementos chave da TRIZ é a análise feita por funções capazes de definir sucintamente aquilo que o produto ou tecnologia a serem desenvolvidos devem realizar.

Também descrita por Yang e El-Haik (2003), a abordagem proposta por Taguchi é focada na determinação dos fatores que afetam o desempenho dos produtos ou produção através de experimentos, análise estatística e funções de transferência. Algumas das técnicas têm grande relação com o delineamento de experimentos. No presente trabalho, algumas dessas ideias e técnicas são empregadas.

No que se refere à relação entre a metodologia Seis Sigma e o DFSS, os trabalhos de Bañuelas e Antony (2003, 2004) foram bastante esclarecedores. O primeiro destes trabalhos (2003), além de ter descrito as similaridades e diferenças entre Seis Sigma e DFSS (discutidas em maiores detalhes na seção 3.1 dessa monografia), apresentou uma proposta de método para determinar em que situações uma metodologia se torna prioridade com relação à outra. O segundo trabalho de Bañuelas e Antony (2004) faz um estudo de caso aplicando o método proposto a duas companhias multinacionais. Dessa forma, estes trabalhos proveram o embasamento para a compreensão dos papéis de cada metodologia.

Numa esfera maior, a integração do DFSS (e do Seis Sigma) na gestão da qualidade é de grande importância ao sucesso dos projetos e, conseqüentemente, das organizações. Pode-se dizer que não há um consenso em relação ao que a metodologia Seis Sigma (e, conseqüentemente, o DFSS) adicionou à gestão da qualidade. Alguns autores defendem que novos princípios foram adicionados, enquanto outros afirmam que o Seis Sigma é apenas um modelo de gestão da qualidade, sem novos princípios, portanto.

Tal debate é mostrado em duas publicações feitas na mesma edição da revista *Quality Digest*. Enquanto Stamatis (2000) questionou a originalidade do Seis Sigma, e até a necessidade de seu uso, Ramberg (2000) tentou mostrar o quanto a metodologia tem a contribuir com a melhoria da qualidade. Como argumento principal, Stamatis (2000) afirmou que há uma tendência em repaginar (ou

“reinventar a roda”) quando o assunto é gestão da qualidade. Ele embasou essa visão salientando que novos métodos tendem a ser atrativos a muitas companhias e profissionais, pois estes esperam vencer os concorrentes com algo revolucionário e de fácil aplicação. O autor colocou o Seis Sigma nessa categoria, sendo apenas uma maneira aparentemente diferente de pregar os mesmos princípios já existentes da gestão da qualidade. Além disso, ele assegurou que muitos consultores colaboram com isso por terem uma fonte renovada de rendimentos.

O trabalho de Zu; Fredendall e Douglas (2008) trouxe uma interessante abordagem para pesquisar a maneira com a qual a implementação da metodologia Seis Sigma afeta a teoria e a aplicação da gestão da qualidade. A partir de revisão da literatura, os autores chegaram a práticas que consideraram fundamentais ao sucesso do Seis Sigma e DFSS. Tendo estas práticas como base, os autores aplicaram um questionário a um número considerável de indústrias. As conclusões apontadas pelos autores, discutidas e integradas à análise feita no capítulo 4 desta monografia, indicam que algumas das práticas do Seis Sigma complementam os princípios básicos da gestão da qualidade, não se atendo a eles. Por outro lado, Sokovic; Pavletic e Pipan (2010) consideraram o DFSS claramente como uma metodologia para melhoria da qualidade, colocando-o lado a lado com ferramentas como o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*, podendo ser traduzido como Planejar-Fazer-Verificar-Agir) e o DMAIC (*Define-Measure-Analyse-Improve-Control*, traduzido por Definir-Medir-Analisar-Melhorar-Controlar). Essa visão coloca o DFSS como um simples modelo de gestão da qualidade ou ainda uma ferramenta.

Ainda abordando a questão do papel do Seis Sigma frente à qualidade, o trabalho de Klefsjö; Wiklund e Edgeman (2001) minimizou a importância da originalidade do Seis Sigma. Partindo dos resultados positivos reportados por muitas companhias com a aplicação do Seis Sigma, os autores defenderam a visão de que o Seis Sigma pode e deve encaixar-se dentro da gestão pela qualidade total, independentemente de seu ineditismo. Dessa forma, o trabalho indicou como as ferramentas e conceitos mais antigos da qualidade e do Seis Sigma se complementam.

Sem preocupar-se com essa questão conceitual, o trabalho de Pfeifer; Reissiger e Canales (2004) tratou da integração do Seis Sigma com os sistemas de gestão da qualidade já operantes nas companhias. Essa abordagem é importante ao considerar-se que, na grande maioria dos casos, as companhias que passam a

aplicar o Seis Sigma e DFSS já destinam esforços à gestão da qualidade e não é inteligente ou viável partir-se do zero. A principal contribuição deste trabalho é uma delimitação dos limites do Seis Sigma e dos sistemas de gestão da qualidade e uma comparação entre os seus objetivos e estratégias centrais.

Alguns estudos de caso também foram de grande valia para guiar a análise da aplicação. Algo similar ao que se pretendeu neste trabalho foi feito por Fioravanti (2005), mas para um segmento da indústria automotiva. A aplicação do DFSS na companhia General Motors foi analisada. Os métodos reportados são focados especialmente no estabelecimento dos requisitos através da voz do cliente e a aplicação do ciclo do DFSS recomendado pelas políticas da General Motors, similar ao CDOV. A contribuição ao presente trabalho se fez com os questionamentos e análises feitos com relação à estrutura particular dos projetos automotivos, dando pistas de como isso deveria ser feito no caso de turbinas a gás.

O estado da arte do projeto de turbinas a gás está em constante evolução. Contudo, a imposição das etapas de projeto que se mostraram mais eficazes são praticamente um consenso. A única diferença mais atual imposta ao processo de projeto de turbomáquinas é a tendência de aplicação de rotinas de otimização, que se tornaram possíveis com as maiores capacidades computacionais. Contudo, a lógica de projeto não se afastou muito.

Esta monografia está focada no projeto de compressores. Os compressores são os componentes de turbinas a gás estudados pelo autor desta monografia. O projeto destes componentes responde por grande parte do projeto total de turbinas a gás. A seção de turbinas tem uma lógica de projeto muito similar à dos compressores, restando então o projeto da câmara de combustão e do sistema de eixos como subprojetos principais.

O trabalho de Came e Robinson (1999) tratou do projeto de compressores e aponta que para se considerar que o projeto está concluído é preciso ter definidos a geometria do compressor, seu material, o processo de fabricação e uma estimativa sobre o mapa de desempenho. Porém, esses autores afirmaram que o maior esforço está concentrado na definição da geometria que envolve os parâmetros aero e termodinâmicos que embasam o próprio funcionamento. Dessa forma, Came e Robinson (1999) descreveram um processo de projeto genérico, muito similar ao

apontado por Casey (1994). Ele serviu como base a toda a aplicação do DFSS feita no quinto capítulo dessa monografia.

Neste processo, o primeiro passo é definir os requisitos técnicos do projeto. Isso é feito com base em parâmetros de desempenho, como potência, razão de pressões, rotação máxima ou fluxo mássico. A partir destes dados de entrada o projetista deve passar ao projeto unidimensional, do qual devem sair as primeiras dimensões do compressor. É importante saber que, nem mesmo nesta fase é possível definir parâmetros imutáveis ao longo do projeto. Não há apenas uma geometria capaz de satisfazer os requisitos. Por este motivo o processo apresenta os *loops* mostrados na Fig. 1, indicando que a cada etapa é necessário fazer diversas tentativas e testes. Em cada etapa, é necessário que várias possibilidades sejam testadas, monitorando as respostas e usando-as para reformular as entradas, de modo a formar um *loop*.



Figura 1 – Esquema do processo de projeto de compressores. As análises e predição de desempenho tornam-se mais complexas no decorrer do processo quando mais detalhes das geometrias propostas ao compressor são incluídos. A cada etapa há um *loop*, que representa a necessidade de testar diversas geometrias e reformular as entradas de acordo com as saídas já constatadas.

Este processo indica que o projeto vai ficando mais complexo, aumentando as dimensões consideradas na análise, até chegar à geometria tridimensional. Caso a geometria projetada não satisfaça os requisitos de validação pode ser necessário retornar às análises unidimensionais. A metodologia DFSS foi aplicada neste contexto.

Há poucos trabalhos que reportaram a aplicação do DFSS em projetos de compressores ou de turbinas a gás, apesar de saber-se que há essa aplicação na indústria. No entanto, há alguns que se encaixam nos objetivos dessa monografia, especialmente em trabalhos mais recentes, marcando uma tendência de aplicação do Seis Sigma e DFSS no setor de turbomáquinas.

O trabalho de Bonaiuti et al. (2006) contribuiu com o preenchimento de parte dessa lacuna. Os autores apresentaram a aplicação do delineamento de experimentos ao projeto de um compressor. Este método é muito útil ao DFSS e é recomendado especialmente para a fase de otimização do projeto (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003; YANG; EL-HAIK, 2003).

Sem aplicar diretamente o DFSS, os trabalhos de Panizza et al. (2012) e Sankaran et al. (2012) trataram de uma questão vital para a metodologia. Ambos propuseram maneiras para quantificar as incertezas associadas ao projeto de compressores com relação ao seu desempenho e chegaram a valores. Essa é uma avaliação importante para a aplicação do DFSS, uma vez que se percebe que o desempenho sempre varia com relação ao previsto e entre as diferentes peças fabricadas. Os autores desses trabalhos são funcionários da General Electric, empresa que é constantemente apontada como um modelo de sucesso da aplicação do Seis Sigma e DFSS.

O trabalho de Lee; Ahn e Yoon (2012) reportou a aplicação direta da metodologia DFSS para a melhoria do projeto de combustores (um dos componentes de turbinas a gás). Este trabalho é de grande interesse a essa monografia, uma vez que houve a aplicação de um ciclo apontado pela metodologia a um projeto. Um pouco diferente dos ciclos I^2DOV e $CDOV$ apresentados por Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003), foi utilizado o ciclo $DIDOV$ (Define, Identify, Design, Optimize, Verify – ou traduzindo, Definição, Identificação, Projeto, Otimização e Verificação). Esse ciclo foi utilizado por conta do projeto a ser realizado ser uma melhoria a um projeto existente, sendo necessário diagnosticar o desempenho de tal projeto e identificar os parâmetros que controlam os objetivos a serem alcançados com a melhoria.

Lee; Ahn e Yoon (2012) utilizaram ferramentas consagradas pelo Seis Sigma e DFSS. Para o passo de Identificação utilizaram o diagrama de causa e efeito para sumarizar os parâmetros do combustor que influenciam na emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x). Para as fases de projeto e otimização os autores utilizaram a abordagem de CPM e o delineamento de experimentos (DOE – *Design of Experiments*). Definindo os parâmetros críticos à qualidade (CTQ – *Critical to Quality*), os autores os controlaram através das análises do delineamento de experimentos e chegaram a uma configuração de projeto que atendia às necessidades.

Com um enfoque um pouco diferente dos trabalhos citados nos parágrafos anteriores, mas ainda dentro da aplicação do DFSS e Seis Sigma às turbinas a gás, o trabalho de Alban et al. (2012) lidou com uma avaliação e melhoria de um projeto de compressor a partir de um problema reportado durante as operações. A diferença principal do trabalho é que não se tratava de um novo projeto ou de uma otimização, mas da solução de um problema que poderia comprometer o projeto, mostrando a versatilidade do DFSS.

A pesquisa realizada nas instalações da Rolls-Royce utilizou outra variante de sequência de ação, o DCOV (Define, Characterize, Optimize, Verify – ou Definição, Caracterização, Otimização e Verificação, em tradução livre) que, na prática, atua da mesma forma que o DIDOV apenas ignorando a fase de projeto, uma vez que não se tencionou fazer um novo projeto nesta aplicação. Essas diferenças entre os ciclos de atuação da metodologia DFSS mostram que não é necessário seguir algum ciclo com rigidez. O mais importante é aplicação da lógica da metodologia da maneira que mais se ajusta às necessidades da aplicação.

Alban et al. (2012) apresentaram os fatores a serem considerados na investigação do defeito na forma de um diagrama de causa e efeito. A partir do diagrama realizaram testes baseados no delineamento de experimentos, que foi capaz de apontar as variáveis que governavam a ocorrência do defeito e, por fim, sugeriram soluções.

Pode-se perceber por esses trabalhos que há aplicação do DFSS às turbinas a gás na indústria e, certamente, a maior parte das informações sobre tal aplicação não é divulgada. Porém, o que há disponível, tanto sobre a teoria quanto a prática, é suficiente para o emprego pretendido nessa monografia.

3. A METODOLOGIA DFSS

O primeiro desenvolvimento do DFSS é atribuído à General Electric (que produz turbomáquinas, entre muitos outros produtos) no final da década de 90, sendo uma derivação do Seis Sigma aplicado ao desenvolvimento de produtos (WERKEMA, 2005). O DFSS foi derivado da metodologia Seis Sigma, sendo visto por muitos como uma sequência natural à crescente aplicação do Seis Sigma. Antony (2002) salientou que empresas que adotaram a metodologia Seis Sigma reportaram dificuldades em ultrapassar cinco sigmas em seus níveis de qualidade sem recorrer a alterações nos projetos de seus produtos e processos. E para isso surgiu o DFSS, com o intuito de projetar ou reestruturar produtos e processos para que estes possam alcançar o nível de seis sigmas de qualidade.

Mesmo tendo sido difundido pela aplicação de organizações pioneiras como a General Electric, o DFSS apresenta algumas variações nas diversas aplicações. Esse fato corrobora a constatação de Antony (2002), uma vez que indica que as companhias passaram a aplicar o DFSS ao perceber sua necessidade a partir da aplicação da metodologia Seis Sigma. Dessa forma, cada empresa encontrou soluções de maneiras deferentes. As diferenças, contudo, aparecem especialmente nos ciclos de ação e na escolha das ferramentas, sem influir nos fundamentos do DFSS. Dessa forma, foi possível teorizar o DFSS e defini-lo.

Yang e El-Haik (2003) definiram o DFSS de forma muito aberta e genérica. Os autores classificaram o DFSS como uma teoria que compreende áreas fundamentais do conhecimento sob a forma de percepções e compressão acerca de diversos campos de conhecimento, além das relações entre estas áreas fundamentais. A definição dada por Werkema (2005) é mais acessível e direta. Segundo a autora, o DFSS é uma abordagem sistemática que utiliza métodos estatísticos e de engenharia.

Mesmo essa definição ainda ignora o objetivo da aplicação do DFSS, algo que deve estar bem claro e presente durante seu uso, assim como sustentam diversos autores (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003; KLEFSJÖ; WIKLUND; EDGEMAN, 2001). Antony (2002) definiu o DFSS com base em seus objetivos, afirmando que o DFSS é uma abordagem para projeto de produtos, processos e serviços que

tenciona alcançar as necessidades e expectativas dos clientes de uma maneira simples e eficaz enquanto reduz os custos da qualidade.

Para esta monografia, as três definições apresentadas são consideradas importantes, sendo que a definição ideal deveria reunir todos os aspectos defendidos pelas três. Tanto o escopo do DFSS, assim como as ferramentas e métodos utilizados por ele, além dos objetivos almejados devem ser contemplados. Esta visão é adotada neste trabalho.

Antes de descrever em mais detalhes a metodologia DFSS é necessário contextualizá-la explicando os fundamentos do Seis Sigma. Uma breve descrição da metodologia Seis Sigma é dada na seção seguinte.

3.1. Seis Sigma

Assim como já mencionado, a metodologia Seis Sigma é anterior ao DFSS, sendo a razão da existência do último. O desenvolvimento original do Seis Sigma foi feito pela Motorola na década de 1980 (HANH; DOGANAKSOY; HOERL, 2000). O Seis Sigma surgiu como uma estratégia para enfrentar a concorrência de companhias japonesas, aumentando a qualidade dos produtos e reduzindo seus defeitos. A Motorola adotou o Seis Sigma não apenas em seus processos pontualmente, mas como filosofia e decisão estratégica (MONTGOMERY; WOODALL, 2008).

O nome da metodologia está ligado ao seu objetivo original, focado em diagnósticos estatísticos dos processos. Sigma (σ) é o símbolo utilizado para representar o desvio padrão, grandeza estatística que representa a variação (ou dispersão) dos dados analisados (BUSSAB; MORETTIN, 2010). Alcançar um nível seis sigma de qualidade significa ter uma variação, ou nível de imperfeição, tão baixa nos processos de modo que os limites de especificação estejam afastados da média (ou valor pretendido no processo) por seis vezes o desvio padrão. Numa distribuição normal, típica na maioria dos processos e conseguida por médias de amostras em todos eles (BREYFOGLE, 2003), este nível de qualidade significa uma taxa de 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (ROTONDARO et al., 2002).

Como se percebe, a metodologia Seis Sigma tem seus fundamentos na análise de dados, sendo baseada totalmente em fatos. É usual que a implementação seja feita com base nos chamados projetos seis sigma. Estes projetos são aplicações nas organizações focando um dado processo, ou até mesmo apenas uma parte do processo, buscando melhorias a partir de uma oportunidade constatada.

Para prosseguir com a descrição da metodologia, é importante apresentar uma definição formal. As dificuldades para definir o DFSS provavelmente são consequência da mesma dificuldade encontrada para o Seis Sigma. Em um trabalho teórico baseado em revisão da literatura e entrevistas com executivos, Schroeder et al. (2008) preocuparam-se em pesquisar as definições correntes da metodologia Seis Sigma e propuseram uma definição mais universal. Os autores definiram então que o "Seis Sigma é uma estrutura organizada e meso-paralela para reduzir variações em processos organizacionais através do uso de especialistas em melhoria, um método estruturado e métricas de desempenho mirando o cumprimento de objetivos estratégicos". Essa foi considerada a definição mais abrangente e completa encontrada na literatura.

Essa definição faz referência à estrutura organizacional paralela usualmente utilizada nos projetos seis sigma, nos quais há uma hierarquia independente, até certo ponto, da estrutura da companhia. Os projetos são conduzidos por uma equipe definida a partir de seu nível de conhecimento acerca das técnicas requeridas pelo Seis Sigma e dos processos a serem analisados e melhorados. *Black belts*, *Green Belts*, *Master Black Belts* e *Campeões* são categorias usualmente utilizadas para denominar as funções nas pequenas equipes encarregadas de implementar os projetos seis sigma (PANDE; HOLPP, 2002).

Quando Schroeder et al. (2008) usaram o termo "meso" estavam se referindo à ideia de sinergia entre as hierarquias paralelas. Os autores apontam que, sem alguma correspondência e influência de uma hierarquia sobre a outra, os projetos seis sigma não poderiam ser bem sucedidos por conta da falta de autoridade da estrutura hierárquica menor.

O método estruturado citado na definição de Schroeder et al. (2008) se refere ao processo ou modelo, como definiram Pande e Holpp (2002), com o qual os projetos seis sigma são conduzidos. Trata-se do DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control – ou Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, em tradução livre),

esquematizado na Fig. 2. Essa abordagem padronizada é uma das chaves do sucesso da metodologia Seis Sigma.

A aplicação do DMAIC começa pela definição e seleção do projeto seis sigma, identificando oportunidades de melhoria, selecionando projetos que realmente contribuam para o sucesso do negócio e para a satisfação dos clientes (PANDE; HOLPP, 2002). O passo seguinte, medir, já aciona o caráter estatístico e factual do Seis Sigma, uma vez que é feito um diagnóstico com base em métricas adequadas e amostragem dos processos. Somente a partir desses diagnósticos quantitativos é possível prosseguir às análises de desempenho dos processos, nas quais as causas dos desvios são investigadas.



Figura 2 - Ciclo DMAIC utilizado nos projetos da metodologia Seis Sigma.

Tendo em mãos o desempenho desejável dos processos, dados sobre o desempenho corrente e as causas das falhas, passa-se à melhoria dos processos com o intuito de alcançar o nível seis sigma de qualidade, o que corresponde à etapa Melhorar. Após este passo, é necessário constatar quantitativamente a melhoria do processo e garantir que ela seja mantida ao longo do tempo e da evolução dos requisitos de desempenho. Dessa forma, o DMAIC pode ser visto como um ciclo (assim como na Fig. 2), uma vez que os processos estão em constante mudança e pode ser necessário redefinir seu desempenho desejável.

A abordagem DMAIC guia os projetos de forma lógica facilitando que sejam bem sucedidos. Esta padronização pode dar a impressão de rigidez excessiva, porém, essa visão não é correta. Apesar de ter fases bem definidas, as maneiras de seguir

o DMAIC variam de acordo com a aplicação e o Seis Sigma faz uso de diversas ferramentas de diagnóstico, análise, otimização e controle, tendo flexibilidade na escolha da ferramenta mais adequada a uma dada situação. A escolha das ferramentas deve ser feita com seu embasamento técnico, nos resultados esperados, custo de aplicação e tempo necessário para obter as respostas desejadas. Além disso, a simples aplicação de ferramentas de nada serve sem o senso crítico dos envolvidos para interpretar suas respostas (ROTONDARO et al., 2002).

3.2.A função do DFSS

Tomando por base os fundamentos da metodologia Seis Sigma apresentados na seção anterior, é mais fácil continuar a caracterização do DFSS. Assim como descrito, a metodologia Seis Sigma sob a forma dos projetos seis sigma é aplicada a processos existentes através do ciclo DMAIC. O DFSS surgiu então como uma antecipação a essa aplicação clássica do Seis Sigma, sendo utilizado na fase de desenvolvimento, antes do processo existir. O principal objetivo do DFSS é realizar o projeto do produto ou processo da forma correta logo na primeira vez, possibilitando alcançar o nível de qualidade seis sigma, a satisfação dos clientes e o sucesso do empreendimento (WERKEMA, 2005). O DFSS é útil, pois, assim como relatado na literatura, somente a aplicação do DMAIC pode não ser capaz de fazer um processo atingir o nível seis sigma de qualidade. Além disso, é possível poupar gastos que seriam incorridos com a correção dos processos.

Um dos principais focos do DFSS (e também do Seis Sigma) é o ganho financeiro trazido. Os resultados alcançados por companhias que aplicaram o DFSS e o Seis Sigma foram reportados por Kwak e Anbari (2006) e tornam claras as vantagens proporcionadas. Além das melhorias em prazos e satisfação, o nível de qualidade trouxe substanciais ganhos ou contenções monetários. Citando alguns exemplos, a General Electric teve um ganho de USD 2 bilhões em 1999, a DuPont/Yerkes poupou USD 25 milhões em 2000 apenas em sua planta de Nova Iorque, a Telefonica espanhola teve ganhos de € 30 milhões nos primeiros 10 meses de

aplicação, enquanto Honeywell, Texas Instruments e Johnson&Johnson ganharam USD 1,2 bilhões, 600 milhões e 500 milhões, respectivamente. Trata-se de valores muito significativos, que mostram um dos objetivos mais marcantes do DFSS.

O DFSS age evitando que vulnerabilidades afetem o projeto. Os tipos principais de vulnerabilidades que podem atingir um projeto são as conceituais e as operacionais. Vulnerabilidades conceituais acontecem por conta de transgressões nos princípios que governam o processo, enquanto as operacionais são relativas a erros do produto ou processo projetado por conta de seu ambiente de operação (YANG; EL-HAIK, 2003). De forma mais genérica, o DFSS tem a função de evitar, prever e corrigir possíveis falhas ou geradores de falhas do projeto ainda em seu desenvolvimento. Portanto, o DFSS é capaz de lidar com vulnerabilidades conceituais, ao contrário da maioria dos métodos tradicionais da qualidade, que agem corrigindo problemas após seu acontecimento.

Um dos pilares da metodologia DFSS é o foco nas necessidades dos clientes. Isso parece óbvio quando se fala em projetar produtos ou processos, contudo, o diferencial é a abordagem sistemática dada a essa questão. Além de definir o que o cliente deseja, talvez a maior dificuldade esteja em traduzir tal desejo em requisitos puramente técnicos que sejam executáveis. Os métodos e ferramentas do DFSS são capazes de auxiliar tal tarefa se bem utilizados.

O comprometimento e atitudes condizentes da alta gerência são outro fator fundamental ao sucesso do DFSS (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003). O DFSS requer grande disciplina e rigor em sua aplicação, uma vez que lida com falhas por vezes pouco aparentes. Tal rigor só é possível com total imersão da organização, que é impossível sem a participação e cooperação da direção. De maneira análoga, o envolvimento de fornecedores também é necessário. Isso é pregado desde os avanços trazidos pela produção enxuta (WOMACK; JONES, 1996).

O treinamento é outro fator decisivo ao sucesso do DFSS, assim como do Seis Sigma. Os funcionários e envolvidos devem ter o domínio necessário acerca da filosofia e das ferramentas matemático-estatísticas com as quais o DFSS conta.

Com base nessas premissas, o DFSS é capaz de diminuir o tempo de entrada no mercado dos produtos ou de aplicação dos processos, reduzir custos no ciclo de vida desses produtos, reduzir custos de garantia, restringir o número de mudanças e

iterações no projeto, melhorar a confiabilidade das entidades projetadas, aprimorar a gestão de riscos e aumentar a compreensão acerca das prioridades e expectativas dos clientes (ANTONY, 2002).

3.3.Ferramentas e métodos do DFSS

Assim como já foi comentado, os métodos utilizados na aplicação do DFSS não são rígidos e variam de acordo com o tipo de projeto e adequação às situações. Nesta seção serão apresentados os métodos e ferramentas mais pertinentes para o caso estudado a partir do capítulo 5. Não se tratam das únicas formas possíveis de realizar esse tipo de projeto, apenas as que foram julgadas mais plausíveis. É importante salientar que nem todas as técnicas foram de fato aplicadas, algumas apenas foram recomendadas no capítulo 5 desta monografia.

O primeiro ponto a ser apresentado são as sequências (ou ciclos) de trabalho, similares ao DMAIC do Seis Sigma. No DFSS não há apenas uma sequência, por conta de diferenças maiores nas aplicações. Porém, há uma sequência mais citada e associada ao DFSS por muitos autores (FIORAVANTI, 2005; PFEIFER; REISSIGER; CANALES, 2004; SOKOVIC; PAVLETIC; PIPAN, 2010; WERKEMA, 2005; ZU; FREDENDALL; DOUGLAS, 2008). Trata-se do DMADV (Define, Measure, Analyze, Design, Verify – ou Definir, Medir, Analisar, Projetar e Controlar, em tradução livre), que é a sequência mais parecida com DMAIC e segue totalmente sua lógica.

Werkema (2005) apresentou de maneira simples e esquemática os objetivos de cada etapa do DMADV. A tabela 1 sumariza tais objetivos. As similaridades com o DMAIC são grandes, apenas substituindo as fases Melhorar e Controlar pelas de Projetar e Verificar. Dessa forma, uma vantagem óbvia de utilizar o DMADV no DFSS é que os profissionais habituados ao Seis Sigma (e ao DMAIC) terão poucos problemas para aplicá-lo.

Tabela 1 – Objetivos e resultados esperados de cada etapa da sequência DMADV. Adaptado de Werkema (2005).

Etapa	Objetivo	Saídas
Definir	Definir qual o produto, processo ou serviço a ser projetado.	Análises de viabilidade técnica e econômica, análise de mercado para o produto, estimativa de tempo de projeto e de recursos necessários.
Medir	Determinar os requisitos do projeto através das necessidades dos clientes, definindo os parâmetros CTQ.	Requisitos técnicos e estudo detalhado do mercado.
Analisar	Selecionar o melhor conceito e iniciar o projeto conceitual.	Análises e escolha entre as diferentes maneiras de cumprir os requisitos.
Projetar	Realizar os projetos preliminar e detalhado de modo que o produto já possa ser fabricado ou o processo executado.	Definição das variáveis de projeto, planejamento da produção, definição das tolerâncias do projeto, protótipos e análises da reação dos clientes.
Verificar	Testar o projeto, assim como sua viabilidade, e lançá-lo.	Confirmação do desempenho do produto ou processo de acordo com os requisitos fixados.

Em algumas aplicações, é difícil separar com clareza as fases Definir e Medir, uma vez que pode não se saber “qual” o produto ou processo a ser desenvolvido, apenas o que ele deve desempenhar, ou seja, suas funções. Tais funções ficam próximas aos requisitos e parâmetros CTQ a serem definidos na fase Medir. Dessa forma, o DMADV é mais funcional a produtos não inovadores e consagrados.

Podemos tomar como exemplo um automóvel. Neste caso, dificilmente o projeto seria iniciado com base em funções básicas, ou seja, não se partiria da necessidade de “transporte urbano de pessoas”. O conceito de automóvel está muito presente e a questão poderia ser com relação a que tipo de automóvel ou que se espera dele,

mas o conceito seria logo acionado na fase Definir. Por este motivo põe-se como objetivo da primeira fase do DMADV definir “qual o produto”.

Tal definição não é prontamente possível quando se fala de inovação ou da abordagem por funções a serem desempenhadas pelo produto ou processo. Este é o principal motivo para haver alternativas ao DMADV. A segunda sequência mais recorrente em descrições sobre o DFSS é o IDOV (Identify, Design, Optimize, Validate – ou, traduzindo, Identificar, Projetar, Otimizar, Validar). Apenas como exemplo, essa abordagem é apresentada por Antony (2002) e Sokovic; Pavletic e Pipan (2010). Yang e El-Haik (2003) se utilizam da mesma abordagem, apenas modificando o nome da segunda etapa, sendo tratada então por ICOV (Identify, Conceptualize, Optimize, Validate – ou Identificar, Conceituar, Otimizar, Validar).

O IDOV evita o comprometimento do processo criativo condensando as etapas Definir e Medir do DMADV na etapa Identificar. Além disso, é dado espaço a uma tendência muito forte nos projetos atuais: a otimização. Porém, ao invés de continuar apresentando o IDOV, julgou-se mais relevante discorrer sobre duas sequências derivadas deste. Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003) definiram duas variantes, que foram brevemente apresentadas na revisão da literatura no capítulo 2, o I²DOV e o CDOV mostrados na Fig. 3. Julgou-se que estas variantes apresentam detalhes importantes que as tornam mais eficazes e, por este motivo, serão apresentadas nesta seção.

Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003) destacam que o uso de ambas as sequências do DFSS está vinculado à estratégia de *Phases e Gates* (fases e pontos de decisão). Neste tipo de abordagem, as fases são períodos de tempo nos quais ferramentas e métodos são utilizados para alcançar um resultado que satisfaça requisitos, enquanto os pontos de decisão são paradas entre as fases nas quais o que foi conseguido durante as fases é avaliado e, a partir da avaliação, os planos do projeto são revistos. As sequências devem ser aplicadas com essa lógica, verificando nos *Gates* se os objetivos da fase que termina foram alcançados. A análise crítica e realista do estado do projeto é fundamental ao sucesso.

O I²DOV é focado no desenvolvimento de novas tecnologias. Pode-se dizer que em muitos projetos de turbomáquinas há aplicação de novas tecnologias, especialmente

na indústria aeronáutica, sabidamente um ramo inovador. A inovação é usualmente feita para algumas funções dos componentes, como, por exemplo, no arrefecimento de pás de turbinas, na durabilidade de rolamentos ou na redução de rotação. Portanto, julgou-se importante analisar tal sequência. Ela está vinculada a ferramentas que facilitam a concepção de novas ideias.

A primeira fase, Invenção e Inovação, tem uma série de tarefas a serem realizadas. Dentre elas, há quatro fatores a serem definidos:

- os objetivos, estratégias e missão da nova tecnologia;
- o mercado alvo e o segmento nos quais a tecnologia se insere;
- a estratégia para as linhas de produtos e
- as funções a serem contempladas pela tecnologia.

O primeiro item marca o papel da direção da companhia e como a aplicação do DFSS só faz sentido se estiver inserida na missão. Além disso, percebe-se o primeiro esforço para estabelecer requisitos. Neste ponto começa a aplicação do CPM.



Figura 3 – Sequências de trabalho I²DOV e CDOV.

Quando se trata de inovação e novas tecnologias, determinar as necessidades dos clientes pode ser complicado. Por vezes o que se procura não é substituir um produto que já está no mercado exercendo certas funções, mas transcender e atender a novas funções. Por este motivo, o estudo do mercado e das funções atendidas pela nova tecnologia precisa de maior dedicação do que no simples desenvolvimento de produtos (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003). Dessa

forma, a determinação e estudo do mercado a ser atingido e a estratégia têm papéis vitais.

Para determinar as necessidades e desejos dos clientes, recomenda-se o uso de diagramas *house of quality*, bem descritos por Hauser e Clausing (1988). Estes diagramas relacionam as necessidades dos clientes com o que a tecnologia pode oferecer e a importância atribuída a cada necessidade. Como se trata do desenvolvimento de uma nova tecnologia, faz-se necessário trabalhar com previsões quanto ao desempenho possível baseadas no conhecimento técnico dos envolvidos.

Avaliar as diversas soluções possíveis para satisfazer as necessidades do consumidor se torna mais simples com os diagramas *house of quality*. Em praticamente todos os casos, as soluções apresentam compromissos entre suas variáveis de desempenho, significando que uma solução que priorize o desempenho de uma variável tende a ter desempenho inferior em outras. Dessa forma, a atribuição de importância às variáveis (ou funções) ajuda a selecionar a solução mais adequada.

Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003) ainda recomendam o *benchmarking* nesta fase. Esta prática nada mais é que uma análise do desempenho dos concorrentes, balizando as escolhas do projeto e definindo o que deve ser alcançado para garantir a parcela necessária do mercado. Quando se fala em inovação, tal prática pode ser prejudicada por haver mais defasagem entre o que os concorrentes dispõem ao mercado e o que estão desenvolvendo no momento corrente. Contudo, a comparação com o que há disponível no mercado já tem grande valia.

A técnica TRIZ pode ser utilizada para gerar os conceitos da inovação e invenção. Além disso, esta técnica pode retirar o vínculo entre variáveis de desempenho. Bem descrita por Yang e El-Haik (2003), esta técnica surgiu a partir da análise estatística de milhares de patentes de invenções. Descobriu-se que grande parte das inovações era baseada num pequeno número de princípios e estratégias, enquanto inovações de maior sucesso são constantemente alcançadas através da resolução de contradições do projeto, e não através de um melhor compromisso.

Ao final dessa fase, é necessário ter documentadas as tecnologias candidatas a desempenharem as funções estipuladas, além de todos os dados utilizados para chegar às previsões de desempenho de tais tecnologias. Este primeiro *gate* deve

garantir ainda a presença das análises econômicas preliminares, do mercado, da situação de patentes e ter todos os dados utilizados organizados de forma rastreável.

A fase seguinte, Desenvolver, deve prover idealmente três entregas ao seu final:

- os conceitos tecnológicos superiores que demonstraram ter potencial, de forma que valha a pena fazê-los passar pela fase de otimização;
- a modelagem matemática que embasa a predição de desempenho da nova tecnologia, assim como a flexibilidade de tal desempenho de acordo com a variação de parâmetros;
- e, se possível, uma protótipo ou modelo físico capaz de validar as predições.

Nesta segunda fase talvez esteja o maior concentração de ferramentas e da influência do Seis Sigma. A abordagem matemática é fundamental, sendo determinística ou estatística. As decisões são tomadas apenas com base em fatos e a técnica de CPM tem grande importância, apesar de ser utilizada desde a primeira fase (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003).

Clausing e Frey (2010) apresentaram o CPM de maneira bastante instrutiva. Os autores mostraram que a técnica permite a conversão das necessidades dos clientes em requisitos, dos requisitos em respostas funcionais, das respostas em parâmetros e, finalmente, dos parâmetros em especificações. Este caminho pode apresentar um caráter intuitivo, contudo, a abordagem sistemática do CPM é um grande diferencial.

O primeiro passo a ser tomado é organizar o que se sabe sobre a VOC (*Voice of Customer* – Voz do Consumidor). É usual recomendar-se o uso do método KJ (nome dado em referência ao seu criador, Jiro Kawakita), que se trata de um simples processo de agrupamento. Útil também para lidar com ideias vindas de *brainstorming*, esse método se inicia com a listagem de todas as necessidades. Após isso, buscam-se as necessidades que aparentem ter alguma relação e, por fim, montam-se grupos que facilitam a análise e discussão.

Tendo as necessidades organizadas em categorias, o passo seguinte do CPM é dividi-las em dois grupos principais: as críticas e as importantes. Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003) utilizaram a sigla NUD para ajudar a identificação das necessidades críticas. São as necessidades novas, únicas e difíceis (*new, unique, difficult*),

enquanto as importantes já foram constatadas em projetos anteriores, são comuns e relativamente fáceis.

Assim como já mencionado, neste ponto do processo, pode-se utilizar o diagrama *house of quality* para definir os requisitos baseados nas necessidades críticas. A passagem da VOC para requisitos tende a ser uma tarefa mais simples nos projetos de turbinas a gás se comparada à maioria dos projetos. Isso acontece por se tratar de um produto puramente técnico, sendo praticamente livre de “caprichos” por parte dos consumidores. As necessidades ficam em torno de variáveis como potência desenvolvida, eficiência, consumo de combustível, preço, custos e frequência de manutenção ou facilidade de integração com outros sistemas. Talvez a maior dificuldade seja estabelecer os limites para os requisitos. Por exemplo, é óbvia a vantagem do cliente em ter o menor consumo de combustível possível, mas é preciso estabelecer um requisito que seja exequível e que, ao mesmo tempo, agrade ao cliente.

Para chegar às respostas funcionais a partir dos requisitos é preciso prever o comportamento da nova tecnologia fora das condições operacionais para as quais o projeto foi preconizado. Trata-se de avaliar a robustez do que foi desenvolvido, prevendo e avaliando seu desempenho com a variação das condições de seu ambiente de operação (CLAUSING; FREY, 2010). A saída dos sistemas projetados é monitorada através da variação sistemática (se possível) ou randômica das entradas, de acordo com as possibilidades do ambiente de operação. Esta avaliação pode ser realizada, novamente, através de modelos matemáticos ou de testes de bancada.

Esta avaliação em turbinas a gás se traduz na chamada condição *off-design*, ou seja, fora do ponto de projeto. O projeto clássico de turbinas a gás se inicia com os a previsão de desempenho no ponto de projeto, sendo a condição na qual se prevê a maior parte da operação (DIXON; HALL, 2010). Exemplificando, na aplicação aeronáutica, o ponto de projeto é próximo à condição de cruzeiro da aeronave, condição na qual o desempenho é mais significativo. Contudo, é muito importante avaliar o desempenho em condições diferentes, como pousos e decolagens.

O passo seguinte dentro do CPM é a determinação dos parâmetros críticos. Tendo as respostas do sistema, é possível estipular que entradas possibilitam a operação adequada. As faixas de valores nas quais a operação é robusta compõem os

parâmetros críticos. Relacionando-os com o projeto de turbinas a gás, o exemplo mais interessante é o mapa de operação típico dos compressores. A operação dos compressores é limitada, usualmente, em termos do fluxo mássico e razão de pressões. Os compressores têm como limites as chamadas condições de *surge* e *choke* (WHITFIELD; BAINES, 1990). A primeira é caracterizada pelas mais altas razões de pressão possíveis e o fluxo mássico baixo, havendo refluxo e impedindo a operação além desta condição. O *choke* ocorre nos mais altos fluxos mássicos possíveis, limitados pelas altas velocidades alcançadas, gerando problemas quando o escoamento atinge a velocidade do som. Os parâmetros críticos são então as faixas de fluxo mássico e razão de pressões nas quais a operação se mantém e satisfaz os requisitos.

Por fim, o passo final do CPM é definir as especificações da tecnologia ou produto. Isso se traduz nos aspectos construtivos, incluindo as tolerâncias. É necessário ter em mente quão precisos os processos produtivos podem ser e como as variações afetam o desempenho e alteram os parâmetros críticos. Os trabalhos de Panizza et al. (2012) e Sankaran et al. (2012) tiveram o objetivo de justamente quantificar a influência das incertezas e tolerâncias na produção de compressores no desempenho.

Dessa forma, o CPM se encerra fornecendo as especificações do projeto. Apesar de ter um papel mais importante na fase Desenvolver do I²DOV (e também do CDOV), é importante salientar que o CPM não se restringe a esta fase, mas se estende a todo o processo de projeto.

A fase Desenvolver ainda tem como recomendação o uso da ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – ou Análise dos Modos de Falha e Efeitos). Muito usada na gestão de projetos e processos, além de ser empregada no Seis Sigma, esta ferramenta consiste na previsão dos modos de falha do projeto (ROTONDARO et al., 2002). Os envolvidos devem levantar todas as maneiras com as quais o projeto pode falhar em cada função de sua operação. Cada falha tem então seus efeitos listados, para que se possa avaliar sua severidade. Após este passo, devem-se listar os possíveis motivos para as falhas, podendo haver vários motivos por falha.

Cada falha é então classificada de acordo com sua gravidade caso ocorra, a probabilidade estimada que aconteça e a probabilidade de detecção da falha. É uma

prática comum, ainda que arbitrária, criar um escore para cada um dos três fatores, atribuindo uma nota alta quanto mais alta a severidade do efeito, mais alta a probabilidade de ocorrer e mais baixa a probabilidade de detecção. Estes valores são então multiplicados para criar um índice, de modo que a prioridade de ação para prevenção ou eliminação das falhas e efeitos é dada aos valores mais altos. A FMEA pode ser acompanhada das práticas de Análise de Árvore de Falha e diagramas ou matrizes de causa e efeito para facilitar a avaliação das causas das falhas levantadas.

Outra ferramenta muito importante e usada pela engenharia mesmo sem o DFSS é o DOE, ou delineamento de experimentos. Esta ferramenta pode ser utilizada nas fases Desenvolver e Otimizar e é útil para estabelecer a relação de causa e efeito entre as variáveis do projeto (YANG; EL-HAIK, 2003). Os “experimentos” realizados na fase de projeto podem ser através de modelagem matemática ou testes de bancada. O DOE lida com variações sistemáticas dos fatores de desempenho avaliando a influência de cada um. Trata-se de uma metodologia muito útil ao CPM. A aplicação mostrada na seção 5.1 se vale de alguns dos princípios do DOE, mesmo sem aplicá-lo por completo.

Por fim, outro fator importante a ser aproveitado na fase Desenvolver do projeto é a análise de riscos, que pode facilitar todo o trabalho de gestão de riscos. Tal análise tem um caráter bastante importante no I²DOV, uma vez que o desenvolvimento de tecnologia e inovação pode envolver riscos consideravelmente altos por conta das incertezas do mercado e investimentos elevados.

A fase Desenvolver do I²DOV tem em seu *gate* a garantia de que os conceitos de tecnologia foram bem caracterizados e serão capazes de atender à VOC. É importante não realizar contenções orçamentárias exageradas com modelos e protótipos, uma vez que passar dessa fase com dúvidas acerca do desempenho das tecnologias pode significar gastos muito mais expressivos no futuro (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003).

A terceira fase do I²DOV é focada na otimização que, segundo Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003), tem duas atividades: avaliação e otimização da robustez e o ajuste das respostas funcionais, assim como indicado na descrição do CPM. Até este ponto, a fase Desenvolver foi capaz de garantir que o desempenho do projeto

satisfaz os requisitos. A meta da fase Otimizar é fazer com que os requisitos sejam alcançados da melhor maneira possível.

A otimização no âmbito das turbinas a gás tem crescido muito. Os modelos e ferramentas para previsão de desempenho dos componentes de turbinas a gás possuem, usualmente, alta complexidade e custo computacional. Como a otimização age testando sistematicamente várias configurações, o limitante era a capacidade computacional. Com o avanço tecnológico, começam a ser possíveis rotinas de otimização de componentes, como no trabalho de Verstraete; Alsalihi e Van den Braembussche (2010), no qual é relatada a otimização da geometria de um compressor radial. Trata-se de uma aplicação em desenvolvimento de produto, não de uma tecnologia. As técnicas do DFSS, como DOE ou CPM, são diretamente aplicáveis a esse tipo de problema e podem ser integradas a técnicas como algoritmos genéticos ou programação não linear neste caso. Para desenvolvimento de tecnologia não há nada reportado na área.

O *gate* da fase Otimizar requer que a tecnologia desenvolvida seja comprovadamente segura, estável e ajustável às variações (ruído) a que estará submetida. Isso deve ser corroborado por análises estatísticas dos experimentos e simulações realizados devidamente documentadas.

A última fase da sequência, Verificar, é o fechamento que permite a posterior utilização da tecnologia projetada em produtos. Uma preocupação pertinente a projetos em turbinas a gás e que verificada nessa fase é a integração da nova tecnologia com os subsistemas e como um afeta ao outro. Outra questão importante nesta última fase é o desenvolvimento de patentes e questões legais para permitir o uso da tecnologia e protegê-la.

Portanto, o último *gate* do I²DOV exige a presença das patentes, uma estimativa dos custos de aplicação da nova tecnologia aos produtos, as análises finais documentadas da confiabilidade da tecnologia e as análises para a gestão de riscos. Percebe-se que a conclusão do I²DOV não culmina em produtos vendáveis na maioria dos casos, mas em produtos para uso interno, e isso se aplica à indústria de turbinas a gás. É possível, dependendo do tipo de negócio que haja apenas a venda de tecnologia a terceiros sem a aplicação pela organização desenvolvedora da tecnologia. Nestes casos, a preocupação com estudos de mercado são potencialmente maiores.

A sequência CDOV é bastante similar ao I²DOV, e deve operar na mesma organização para proceder ao desenvolvimento de produtos (CREVELING; SLUTSKY; ANTIS JR., 2003), assim como explicita a Fig. 4. Sua primeira fase tende a envolver menos riscos e estimativas mais concretas com relação às necessidades dos clientes.

A parte de estudo do mercado também tem significativas modificações. O desenvolvimento de tecnologias tende a ter prazos mais longos e menos rígidos, enquanto o projeto de produtos e processos tem mais rigor e imediatismo. O tipo de pesquisa a ser realizada no desenvolvimento de produtos precisa, na maioria das aplicações, diagnosticar o mercado e não antecipar seus novos paradigmas.



Figura 4 – Esquema do processo de projetos em uma organização típica. Adaptado de Creveling; Slutsky e Antis Jr. (2003).

As fases de desenvolvimento e otimização do CDOV seguem a mesma lógica do I²DOV, com o uso das mesmas ferramentas. As diferenças ficam por conta da necessidade de um maior poder de previsão de desempenho com as ferramentas de engenharia. Além disso, mais aspectos operacionais devem ser definidos, como planos pós-venda e de manutenção.

O *gate* da fase Otimizar é mais incisivo que no I²DOV, preconizando que o produto satisfaça totalmente aos requisitos em todas as condições operacionais a serem enfrentadas já ao final desta fase. A fase final, Verificar, possui a inclusão de aspectos focados nas vendas. É necessário terminar o projeto do produto tendo um plano de *marketing* definido, o planejamento e gestão das operações estruturados e um plano para conseguir as homologações necessárias.

Concluindo essa seção, percebe-se que a abordagem com sequências de trabalho e a estrutura de *phases* e *gates* evita erros nos projetos e torna o processo de projeto

algo organizado e bem documentado, com tomadas de decisão assistidas por ferramentas e métodos totalmente embasados por fatos e mensuração. O DFSS age integrando os métodos de engenharia particulares à aplicação em sua lógica, não sendo uma alternativa a eles, mas uma forma de organizá-los e complementá-los.

3.4.Comparação entre DFSS e Seis Sigma

Como as seções anteriores evidenciaram, tanto o Seis Sigma quanto o DFSS têm como objetivo primário alcançar o nível seis sigma de qualidade e, por consequência, a satisfação dos clientes e o sucesso do empreendimento. Por terem o mesmo objetivo, não seria errado dizer que fazem parte da mesma metodologia e é possível que em algum momento o DFSS seja visto como parte integrante do Seis Sigma.

Fioravanti (2005) salienta de maneira bastante simplificada que o Seis Sigma deve ser utilizado em projetos não relacionados ao desenvolvimento de novos produtos e processos, ao contrário do DFSS. O autor ainda levanta a questão sobre a utilização de ambas as metodologias por algumas empresas. Segundo ele, tal aplicação parece contraditória se o objetivo do DFSS é desenvolver produtos e processos que, quando em operação, apresentem nível de qualidade seis sigma. Com essa premissa, não haveria necessidade de aplicar o Seis Sigma para corrigir os processos.

Tal questionamento não está de acordo com os princípios do DFSS e Seis Sigma. Apesar de o DFSS visar à criação de produtos e processos com nível seis sigma de qualidade logo no começo de sua fabricação ou uso, é preciso lembrar que a melhoria contínua e controle dos processos são fundamentos das metodologias. Os processos estão em constante mudança por conta do dinamismo do mercado e das necessidades envolvidas, não sendo sempre vantajoso criar novos processos, mas melhorá-los e controlá-los através do ciclo DMAIC. Por este motivo DFSS e Seis Sigma são complementares e a aplicação de ambos simultaneamente numa mesma organização é plausível.

Bañuelas e Antony (2004) trataram justamente da questão da decisão sobre a aplicação do DFSS ou do Seis Sigma, ou seja, se é necessário (e vantajoso) reprojeter um processo ou se é possível aprimorá-lo. As conclusões dos autores não puderam ser totalmente fechadas, uma vez que se constatou que tal escolha depende de inúmeros fatores. Os autores discordaram da crença que prioriza o DFSS quando se deseja ultrapassar cinco sigmas no nível de qualidade. De fato, tal barreira não faz sentido se ambas as metodologias miram o nível seis sigma.

Bañuelas e Antony (2004) concluíram ainda que a decisão torna-se mais difícil, pois, obviamente, o Seis Sigma tende a redesenhar os processos, mesmo que não tão radicalmente quanto na aplicação do DFSS. Isso faz com que seja possível alcançar resultados similares com ambas. O mesmo trabalho recomendou o uso da técnica de tomada de decisão *Analytic Hierarchy Process* para auxiliar na escolha. Obviamente, isso não é necessário no desenvolvimento de novos produtos e processos, nos quais o DFSS é a melhor opção.

4. RELAÇÃO ENTRE O DFSS E A GESTÃO DA QUALIDADE

Por esta monografia estar vinculada ao curso de Gestão e Engenharia da Qualidade, julgou-se relevante esclarecer de que maneira o DFSS e Seis Sigma se inserem no contexto da gestão da qualidade. Muito se discute sobre se a metodologia Seis Sigma traz mesmo novos conceitos à gestão da qualidade ou se apenas apresenta e lida com os princípios da qualidade de outra forma (ZU; FREDENDALL; DOUGLAS, 2008) ou ainda se ela é apenas uma ferramenta dentro da gestão da qualidade. De qualquer forma, o DFSS age em favor da gestão da qualidade e isso é inquestionável.

Hoyle (2007) descreveu os oito princípios da gestão da qualidade:

- Abordagem factual
- Abordagem por processos
- Abordagem sistêmica
- Envolvimento das pessoas
- Foco no cliente
- Liderança
- Melhoria contínua
- Relação com fornecedores mutuamente benéfica

Dentre esses princípios, Seis Sigma e DFSS apontam diretrizes explícitas para todos, excetuando-se talvez apenas o último princípio, sobre a relação com fornecedores. Mesmo assim, não se trata de um princípio ignorado por quem defende o Seis Sigma, assim como mostra o trabalho de Coronado e Antony (2002), mas apenas um princípio que não estava explícito no surgimento do Seis Sigma.

Dessa forma, DFSS e Seis Sigma são ao menos modelos de gestão da qualidade, uma vez que contêm referências a todos os seus princípios. A questão que restaria é se essas metodologias vão além da gestão da qualidade ou se são somente um modelo de gestão.

Esse questionamento pode ser facilmente respondido constatando-se que os objetivos do DFSS e do Seis Sigma estão contidos ou, dependendo da definição das metodologias, são os mesmos da gestão da qualidade. Consequentemente, as

metodologias não representam algo que vá além da gestão da qualidade, apesar dessa visão não ser consenso. O fato de o DFSS ser encarado como filosofia e incorporado à missão e visão de várias organizações não o coloca acima da gestão da qualidade, por que isso se trata de uma decisão arbitrária.

De qualquer forma, é importante ter em mente que a gestão da qualidade não é algo absoluto e estático, pois está em constante evolução. Mesmo que as metodologias DFSS e Seis Sigma tenham elementos e princípios não presentes na teoria de gestão da qualidade, a própria aplicação das metodologias já faz com que a gestão da qualidade esteja sendo feita com base nestes princípios. Além disso, nada impede que eles sejam incorporados à gestão da qualidade em sua teoria.

A revisão bibliográfica mostra ainda que há visões diferentes acerca da originalidade dos conceitos e ferramentas do Seis Sigma e DFSS, mas em momento algum questionou-se os resultados alcançados. Os críticos do Seis Sigma costumam atacar o caráter corretivo da metodologia (RAMBERG, 2000), apesar de melhoria contínua e treinamento serem virtudes muito presentes. De qualquer forma, quaisquer críticas nesse sentido podem ser invalidadas pelo DFSS, com suas ações na criação e desenvolvimento de produtos e processos.

Com base nessa discussão, pode-se concluir que o DFSS é uma maneira eficaz de realizar a gestão da qualidade. A metodologia é embasada por teorias científicas e princípios que, se não são os mesmos, se assemelham muito aos princípios da qualidade. Os resultados positivos reportados em literatura são numerosos e consistentes, reduzindo a importância dos pormenores das discussões sobre ineditismo e abrangência do DFSS.

5. APLICAÇÃO DO DFSS AO PROJETO DE TURBOMÁQUINAS

Sabe-se que várias companhias que realizam projetos de turbinas a gás utilizam o DFSS. Mesmo assim, há poucos trabalhos publicados com tal aplicação, assim como mostrado na revisão bibliográfica. O projeto de turbinas a gás é bastante técnico e as necessidades dos clientes são bastante objetivas, facilmente identificáveis e estabelecidas. As principais contribuições do DFSS podem ser na integração dos subsistemas, na compreensão de como as variáveis de projeto se relacionam e na verificação da robustez. Além disso, o fluxo definido de trabalho do DFSS evita erros e torna o processo de projeto mais rápido.

Tomando por base as diversas fases conhecidas dos projetos de turbomáquinas, esta seção propõe-se a definir a melhor sequência de projeto dentro do DFSS e a recomendar as ferramentas a serem utilizadas em paralelo com as ferramentas clássicas do projeto de turbomáquinas.

Não se trata, contudo, de uma aplicação prática a um específico projeto. Tal aplicação é feita na seção seguinte deste capítulo e não inclui todas as etapas de projeto de uma turbina a gás, apenas um demonstrativo de como aplicar alguns conceitos do DFSS.

Para realizar as recomendações neste capítulo, é conveniente dividir em três categorias de projetos em turbinas a gás:

- projeto de um novo modelo de turbina a gás;
- projeto de componentes para uma turbina a gás;
- e desenvolvimento de novas tecnologias para turbinas a gás.

Esta divisão permite uma análise mais plausível, uma vez que os projetos são conduzidos dessa forma nas empresas. O primeiro tipo de projeto é o mais usual e clássico. Trata-se de projetar uma turbina a gás para atender a um cliente específico ou a um nicho do mercado. O segundo tipo, o projeto de componentes, pode ser um subprojeto dentro do primeiro tipo, ou ainda algo independente. No projeto de componentes independentemente do projeto de uma turbina a gás, é comum haver a utilização desses componentes diversos modelos de turbinas a gás da organização.

Quanto à última categoria, as divisões de pesquisa e desenvolvimento estão constantemente em busca de novas tecnologias capazes de melhorar o desempenho ou diminuir os custos dos produtos. Usualmente, o projeto dessas novas tecnologias não está vinculado a um produto em específico, mas seus resultados alimentam famílias de produtos através do projeto de seus componentes. A Fig. 5 resume os diferentes tipos de projetos descritos.

Assim como já mencionado, o mercado de turbinas a gás possui um número relativamente baixo de fabricantes e há parcerias consideravelmente estáveis estabelecidas entre fabricantes e seus consumidores. Tal configuração acirra a necessidade em superar os concorrentes e monitorar seus passos na medida do possível. A prática do *benchmarking* pode ser muito útil.

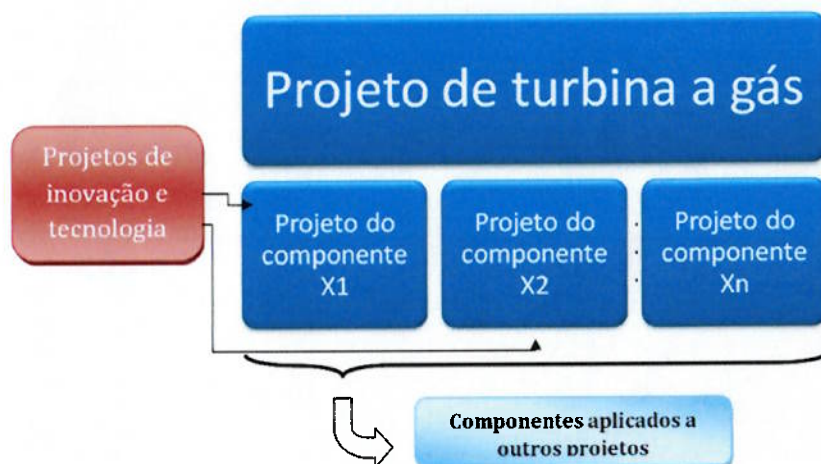


Figura 5 – Segmentação dos projetos em turbinas a gás. Acima está o projeto de um novo produto. Os componentes desse projeto têm projetos independentes até certo ponto e podem ser utilizados em outros projetos. Os projetos de tecnologia e inovação podem fornecer seus resultados aos projetos de componentes. (Proposto pelo autor.)

Para conduzir o projeto de um novo produto, ou seja, de uma nova turbina a gás, recomenda-se o uso da sequência DMADV, uma vez que são produtos sem modificações em seus conceitos e princípios de funcionamento. Assim como no exemplo do desenvolvimento de um automóvel dado no capítulo 3, o DMADV funcionaria bem em um projeto de turbina a gás por haver conhecimento prévio de como o produto será em linhas gerais. Dessa forma, a aplicação do DMADV é capaz de prover um foco maior para as necessidades dos clientes, a integração dos subsistemas e a robustez das operações.

Como a principal preocupação do projeto da turbina a gás como um todo é a integração dos subsistemas de modo que o sistema possa ter desempenho que atenda aos requisitos impostos, a técnica de DOE pode ser de grande valia. Pelo fato de os componentes terem compromissos entre si, o DOE é capaz de prover dados confiáveis sobre a influência de cada ajuste dos componentes.

Tabela 2 – Recomendações para aplicação do DFSS aos tipos de projeto e subprojetos em turbinas a gás.

Tipo de projeto	Ciclo (ou sequência) de trabalho recomendada	Ferramentas recomendadas
Projeto de nova turbina a gás	DMADV	<i>Benchmarking</i> DOE FMEA Técnicas de Taguchi
Projeto de componente para turbina a gás	CDOV	<i>Benchmarking</i> CPM Diagrama de Causa e Efeito DOE FMEA FTA <i>House of Quality</i>
Projeto de nova tecnologia para turbinas a gás	I ² DOV	<i>Benchmarking</i> <i>Brainstorming</i> CPM <i>House of Quality</i> Método KJ TRIZ

As técnicas de Taguchi para garantir a robustez também podem desempenhar um papel importante. Turbinas a gás podem ter como requisito operar em condições com grandes variações, sejam elas climáticas, com combustíveis diferentes, em diversas altitudes ou com defeitos. Dessa forma, quando se deseja avaliar a amplitude de operação ou aumentá-la essa ferramenta tem utilidade.

Para o projeto de componentes, pode haver pequenas mudanças conceituais e quebras de paradigmas. Porém, não se trata de inovação, porque não é vantajoso (ou possível) partir das funções a serem desempenhadas pelos componentes e tentar criar soluções totalmente novas. Componentes são projetados a partir das necessidades vindas de projetos das turbinas a gás, tendo compromissos com o conceito da turbina a gás. Além disso, os prazos para realização dos projetos dos componentes também estão vinculados aos do projeto da turbina a gás completa e variações conceituais severas tornariam as interações entre os componentes imprevisíveis num primeiro momento.

Portanto, recomenda-se o uso do CDOV no projeto de componentes. Inovações que cheguem aos componentes devem estar prontas a serem utilizadas, não havendo sentido em desenvolver tecnologia dentro do projeto dos componentes, assim como ilustra a Fig. 5.

Assim como foi explicitado na seção 3.3, os projetos de inovação e tecnologia para serem aplicados às turbinas a gás têm vantagens com a utilização do I²DOV. Por esse motivo se recomenda seu uso.

As maiores dificuldades enfrentadas para o uso do DFSS neste tipo de projeto é a grande complexidade deste. Há um grande número de variáveis envolvidas no desempenho de uma turbomáquina. Além disso, mesmo tendo definidas as variáveis geométricas e de operação, não é possível prever com absoluta certeza o desempenho de uma turbomáquina. Dessa forma, há dois problemas principais: a definição das variáveis de projeto e a adoção de um modelo de previsão confiável e ao mesmo tempo veloz.

5.1. Aplicação a um projeto preliminar de compressor

O projeto de uma turbomáquina é uma tarefa extremamente complexa. Por este motivo, a aplicação prática apresentada nesta monografia, seguindo as conclusões já apresentadas neste capítulo 5, restringe-se a apenas uma parcela do projeto de um compressor. Os conceitos aqui apresentados fazem parte do projeto conceitual e preliminar para este componente e se relacionam com o projeto desenvolvido pelo

autor junto às suas atividades no Laboratório de Engenharia Ambiental e Térmica da Escola Politécnica da USP.

Como sugerido, a sequência de trabalho mais adequada para o projeto de um componente como o compressor, é o CDOV. O primeiro passo é determinar as necessidades do cliente. O objetivo do trabalho desenvolvido nas dependências da Escola Politécnica é o projeto e construção de uma turbina a gás capaz de desenvolver uma potência de 500 kW para aplicação de geração elétrica. Neste contexto, foram estudados os conceitos de compressores aplicáveis e o que pode se chamar de concorrência, ou seja, foram analisados modelos disponíveis no mercado como um *benchmarking*, assim como recomendado na seção anterior.

Sendo um projeto acadêmico, os únicos requisitos iniciais são a potência e um desempenho de acordo com o que está presente no mercado. Após analisar literatura sobre projeto, decidiu-se iniciar pelo projeto do compressor. Dessa forma, os dados do *benchmarking* são relativos aos parâmetros de projeto dos compressores ou variáveis capazes de fornecer informações sobre o desempenho desse componente. A Fig. 6 apresenta os dados de turbinas a gás comerciais relacionando suas potências com a razão de pressões do compressor, um parâmetro muito importante que costuma ser assumido no início do projeto e que representa o aumento na pressão total do ar alcançado pelo compressor.

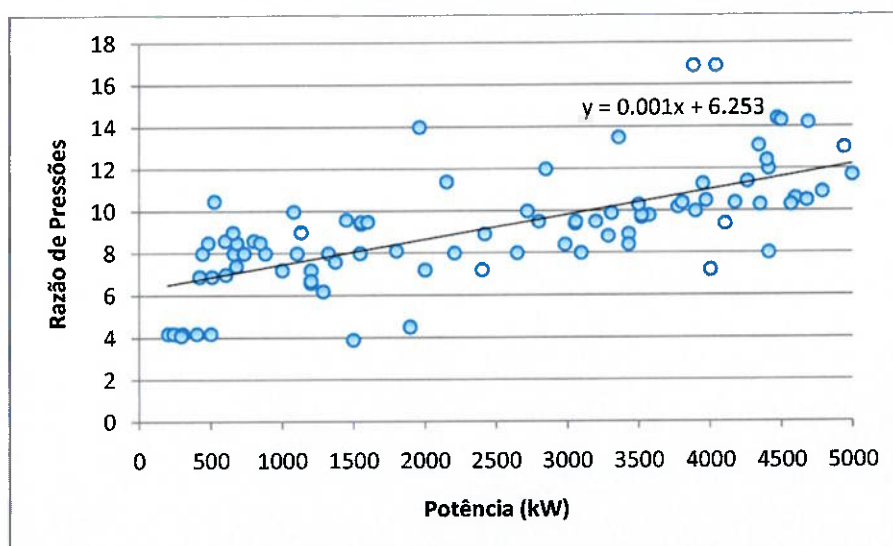


Figura 6 – Dados do *benchmarking* de turbinas a gás disponíveis no mercado relacionando suas potências desenvolvidas e a razão de pressões de seus compressores.

Através desses dados foi possível estimar um valor à razão de pressões e começar com a modelagem termodinâmica da turbina a gás, de modo que mais variáveis pudessem ser definidas (ou ao menos estimadas) para tornar possível o início do projeto unidimensional. O coeficiente de determinação entre as duas variáveis para este grupo de dados é de 0,47 (coeficiente de correlação de 0,68), denotando um grau de relação razoável entre as variáveis. Foi imposta uma razão de pressões de 4, apesar de a distribuição da Fig. 6 sugerir razões maiores para 500 kW, por volta de 6,5. Tal escolha foi baseada nos trabalhos de Dixon e Hall (2010) e Whitfield e Baines (1990), que afirmaram que o projeto de compressores com altas razões de pressão (acima de 5) é consideravelmente mais difícil. Dessa forma, optou-se por posicionar o projeto pouco abaixo dos projetos presentes no mercado, uma vez que não havia experiência prévia e julgou-se adequado impor um requisito mais confortável.

Faz-se importante mencionar que a escolha da razão de pressões teria seguido o que foi indicado pelo *benchmarking* em todas as aplicações usuais (caso não houvesse outro método, logicamente). O ajuste para ter um projeto com requisitos mais confortáveis não faria sentido para a aplicação do DFSS no mercado e iria contra a metodologia. Salienta-se que tal discrepância deve-se unicamente à origem acadêmica do projeto reportado.

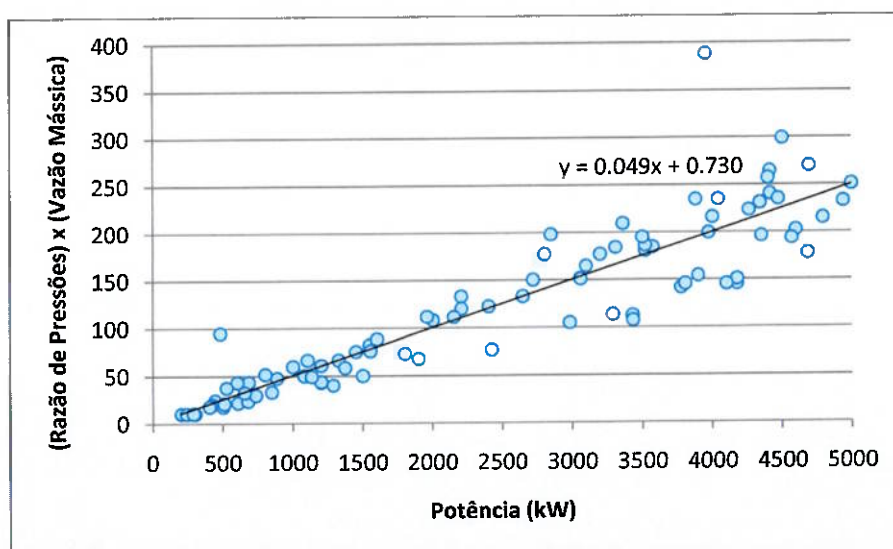


Figura 7 – Dados do *benchmarking* de turbinas a gás disponíveis no mercado relacionando suas potências desenvolvidas e o produto entre razão de pressões de seus compressores e a vazão mássica (kg/s).

Mesmo assim, a escolha foi balizada por outros dados. A imposição da razão de pressões teve como objetivo estimar a vazão mássica de ar necessária à turbina. As vazões mássicas das turbinas a gás disponíveis no mercado também foram encontradas. Notou-se que o produto entre a razão de pressões e a vazão mássica apresentou maior relação com a potência, assim como ilustra a Fig. 7. O coeficiente de determinação é de 0,83 (coeficiente de correlação de 0,91), consideravelmente alto. Com a regressão linear, aferiu-se que a vazão mássica calculada (4,13 kg/s) está próxima ao indicado pela dispersão, apenas 0,6 kg/s a menos.

Antes de proceder à fase Desenvolver do CDOV, foi necessário escolher o tipo de compressor a ser utilizado. Os compressores são usualmente classificados com base na direção do fluxo de ar. Utilizando um método de engenharia, escolheu-se um compressor centrífugo. Tal método, chamado de diagrama (ou linha) de Cordier faz uso de bases de dados de projetos anteriores. Ao dispor num gráfico o diâmetro e velocidade específicos (Eqs. 1 e 2, respectivamente) de compressores considerados estado da arte, notou-se que os dados formavam uma linha razoavelmente bem definida e as regiões da linha nas quais havia compressores radiais e axiais tornavam-se bem delimitadas.

$$D_s = \frac{D(gH)^{1/4}}{\sqrt{Q}} \quad (1)$$

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} \quad (2)$$

Para utilizar o diagrama de Cordier foi necessário estimar outros parâmetros. Tendo a razão de pressões, fez-se uma análise do ciclo Brayton com perdas assim como indicado por Saravanamuttoo; Rogers e Cohen (2001) para estimar a vazão mássica necessária à turbina a gás, da qual são encontradas a vazão volumétrica Q e a carga H . A rotação N foi adotada de acordo com recomendações de Airoidi (2009). Dessa forma, têm-se as variáveis necessárias ao cálculo do diâmetro e velocidade específicos.

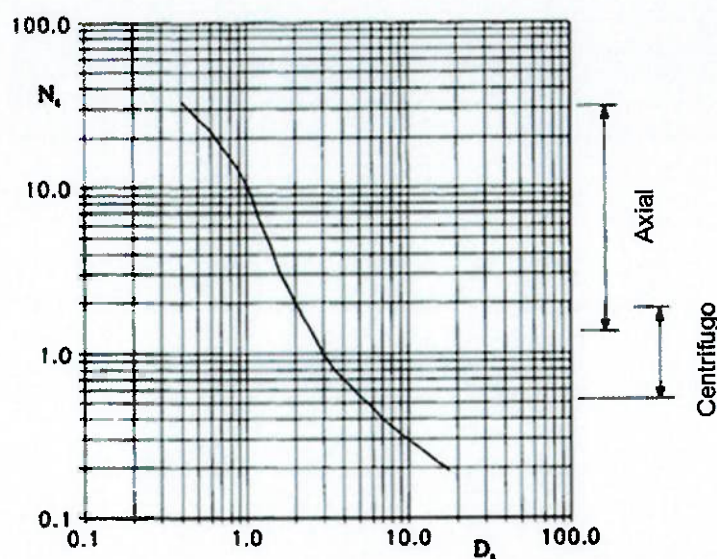


Figura 8 – Diagrama de Cordier com indicação das regiões adequadas a cada tipo de compressor.
Adaptado de Dixon e Hall (2010).

Tendo velocidade específica de 0,66, chegou-se ao diâmetro específico de 4. Para esses valores, os diagramas de Cordier utilizados, como o da Fig. 8, indicaram o uso de um compressor centrífugo para o projeto. Maiores detalhes sobre tal escolha podem ser encontrados no trabalho de Campos e Krieger Filho (2012).

Tendo definido o tipo de compressor, pode-se passar ao projeto unidimensional através de métodos como o de Whitfield e Baines (1990). Nesta fase do projeto, os fatores construtivos e mecânicos são secundários, enquanto a definição geométrica que determina o desempenho aero-termodinâmico tem um papel predominante. A metodologia de projeto aqui apresentada leva em conta apenas este aspecto. No ciclo de projeto proposto por Casey (1994), esquematizado na Fig. 1, o projeto preliminar é equivalente à fase de projeto 1D até o começo do *loop* 2D.

Utilizou-se o método de Whitfield e Baines (1990) com modificações e adições para fornecer as primeiras dimensões do compressor. São utilizadas relações termodinâmicas básicas, conservação de quantidade de movimento e correlações empíricas para chegar às dimensões adequadas do impelidor a partir de alguns parâmetros iniciais. A descrição completa do equacionamento pode ser consultada no trabalho de Campos (2013).

Uma rotina computacional foi feita para variar sistematicamente os parâmetros de entrada. O uso do DFSS, ou mais especificamente de uma análise de correlações, foi feito para avaliar como essas dimensões influenciam a eficiência indicada do

compressor e para guiar as escolhas do projeto. Eficiência e razão de pressões foram estimadas para cada geometria definida assim como na Fig. 9.

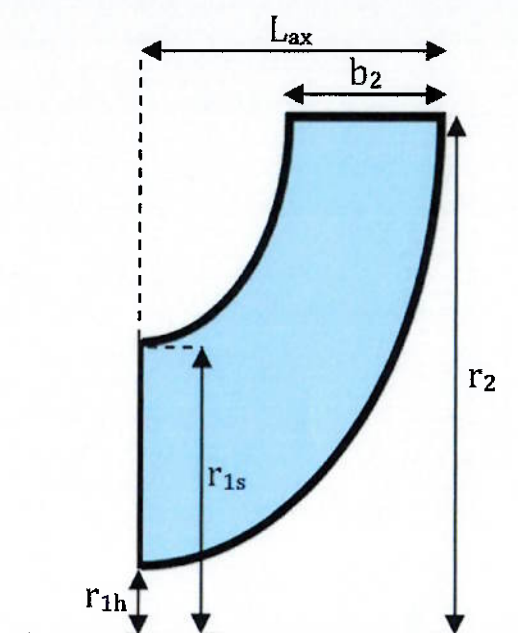


Figura 9 – Dimensões genéricas do perfil meridional do impelidor. Dimensões indicadas são definidas no projeto unidimensional.

Para tanto, um modelo de previsão de desempenho proposto por Oh; Yoon e Chung (1997) foi empregado, contendo algumas adaptações para se adequar às informações disponíveis neste ponto do projeto. Esses autores avaliaram diversas correlações disponíveis para cada tipo de perda e compararam o resultado de cada possível conjunto com dados experimentais. O resultado de tal trabalho foi um conjunto considerado pelos autores o mais adequado para prever o desempenho neste estágio do projeto. As equações de tal modelo estão apresentadas a seguir.

Para que cada geometria gerada no processo do projeto unidimensional seja avaliada, a eficiência é calculada com base em estimativas de perdas. A eficiência do compressor pode ser calculada de acordo com a Eq. 3. Nessa equação, as perdas são comparadas à variação entálpica de Euler (Δh_{Euler}) definida pela Eq. 4. Trata-se do aumento entálpico que ocorreria num escoamento sem perdas viscosas, ou seja, num caso ideal.

$$\eta_{l,isen} = \frac{\Delta h_{Euler} - (\Delta h_{inc} + \Delta h_{cg} + \Delta h_{at} + \Delta h_{fol} + \Delta h_{mis})}{\Delta h_{Euler} + (\Delta h_{atd} + \Delta h_{rec} + \Delta h_{vaz})} \quad (3)$$

$$\Delta h_{Euler} = U_2 \cdot C_{\theta 2} \quad (4)$$

De acordo com Oh; Yoon e Chung (1997), as perdas podem ser classificadas em internas ou parasitas, enquanto Dalbert et al. (1999) as consideram perdas aerodinâmicas ou parasitas. Perdas parasitas representam a diferença entre o trabalho aplicado ao impelidor do compressor e o trabalho de fato disponível às pás do impelidor (AUNGIER, 2000). Além de perdas mecânicas, as perdas parasitas estão associadas também a escoamentos secundários (BOTHÁ; MOOLMAN, 2005). Dentre as perdas analisadas por Oh; Yoon e Chung (1997) as perdas por atrito no disco, recirculação e vazamento na ponta das pás são as parasitas.

Perdas internas estão relacionadas ao escoamento principal. Oh; Yoon e Chung (1997) apontam as perdas por incidência, carga nas pás, atrito viscoso, folga e mistura como perdas internas. As perdas internas afetam tanto a eficiência quanto a razão de pressões gerada pelo impelidor (P_R), enquanto as perdas parasitas afetam apenas a eficiência, assim como denotam as Eqs. 3 e 5.

$$P_R = \left[\frac{\Delta h_{Euler} - (\Delta h_{inc} + \Delta h_{cg} + \Delta h_{at} + \Delta h_{fol} + \Delta h_{mis})}{c_p T_{01}} + 1 \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (5)$$

A seguir as expressões utilizadas para estimativa das perdas serão apresentadas. A maior parte dessas equações tem fundamentação empírica, enquanto outras se baseiam em fundamentos físicos. Contudo, não serão explicitadas suas origens neste trabalho, sendo que essas informações podem ser encontradas nos trabalhos citados por Oh; Yoon e Chung (1997).

Faz-se importante salientar que foram utilizadas apenas correlações para perdas no impelidor do compressor. As correlações envolvem algumas grandezas e conceitos aplicados usualmente a compressores centrífugos que não serão explicados em todos os detalhes nesta monografia. Essas informações podem ser encontradas nos trabalhos de Campos (2013), Cumpsty (2004) ou Dixon e Hall (2010).

5.1.1. Perdas internas

Uma das perdas internas que ocorrem em compressores centrífugos é a perda por incidência. Ela ocorre devido à diferença entre os ângulos do fluido entrando no impelidor e das pás do impelidor, fazendo com que o escoamento altere rapidamente sua direção.

A Eq. 6 apresenta a equação utilizada para calcular esta perda. Percebe-se a dependência da velocidade relativa circunferencial $W_{\theta 1}$ e do definido coeficiente de perda de energia f_{inc} . Segundo o autor da correlação, tal coeficiente deve ter valor entre 0,5 e 0,7. Adotou-se o valor de 0,6.

$$\Delta h_{inc} = f_{inc} \frac{W_{\theta 1}^2}{2} \quad (6)$$

A perda por carga nas pás está relacionada à presença da camada limite na superfície das pás. A Eq. 7 mostra a correlação para estimar a perda, que é dependente da velocidade de rotação do impelidor U_2 . A expressão depende ainda do fator de difusão, definido pela Eq. 8, que depende dos diâmetros (D) e das velocidades relativas (W), além do número de pás do impelidor (Z).

$$\Delta h_{cg} = 0,05 \cdot D_f^2 \cdot U_2^2 \quad (7)$$

$$D_f = 1 - \left(\frac{W_2}{W_{1s}} \right) + \frac{0,75 \Delta h_{Euler} / U_2^2}{(W_{1s} / W_2) [(Z / \pi) (1 - D_{1s} / D_2) + 2 D_{1s} / D_2]} \quad (8)$$

A terceira perda interna a ser considerada é por conta do atrito viscoso entre o fluido e as paredes do impelidor. Neste caso é necessário estimar o coeficiente de atrito C_f para calcular a perda mostrada pela Eq. 9. Trata-se de um coeficiente que denota o cisalhamento decorrente da interação entre o escoamento e as paredes adjacentes a ele.

$$\Delta h_{at} = 2 \cdot C_f \cdot \frac{L_e}{D_{hid}} \cdot (\bar{W})^2 \quad (9)$$

Para estimar o coeficiente de atrito estimou-se uma rugosidade k_s de 0,046 mm de acordo com o exposto por Crowe; Roberson e Elger (2001) para uma superfície típica de aço. Com isso, se calcula o fator de atrito f , mostrado na Eq. 10 fornecida por Crowe; Roberson e Elger (2001). Este fator tem seu valor igual a 4 vezes o coeficiente de atrito. O número de Reynolds necessário a essa expressão foi calculado utilizando a velocidade na ponta da pá U_2 , a espessura da pá na saída b_2 e a viscosidade na saída calculada através da temperatura e densidade do ar na saída.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k_s}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (10)$$

Ainda na expressão da perda por atrito, há o parâmetro $\bar{W}$, uma relação entre velocidades absolutas e relativas na entrada e saída do impelidor. Como o projeto unidimensional não envolvia a velocidade relativa no *hub* na entrada W_{1h} , adotou-se uma aproximação, assim como na Eq. 11. Foi necessário realizar também uma aproximação para o comprimento percorrido pelo escoamento L_e , ou seja, o comprimento da linha de corrente média. Tal aproximação está expressa pela Eq. 12.

$$\bar{W} = \frac{C_1 + C_2 + W_{1s} + 2W_{1h} + 3W_2}{8} \approx \frac{C_1 + C_2 + 2W_{1s} + 3W_2}{7} \quad (11)$$

$$L_e \approx 1,3 \sqrt{\left[L_{ax} - \left(\frac{b_2}{2} \right) \right]^2 + \left[r_2 - \left(\frac{r_{1s} + r_{1h}}{2} \right) \right]^2} \quad (12)$$

O último parâmetro necessário é o chamado diâmetro hidráulico D_{hid} . O cálculo foi feito com a média entre os diâmetros hidráulicos da entrada e saída, representados

pelas Eqs. 13 e 14, respectivamente. O diâmetro hidráulico é definido como quatro vezes a área da seção dividida pelo seu perímetro (GRAVDAHL et al., 2004).

$$D_{hid1} = \frac{4\pi(r_{1s} - r_{1h})^2}{2\pi r_{1s}} \quad (13)$$

$$D_{hid2} = \frac{4\pi r_2^2}{2\pi r_2} \quad (14)$$

Outro tipo de perda interna levado em conta é por folga (*clearance*). Há uma folga entre as pás do impelidor e sua cobertura para possibilitar a rotação. A tendência é que alguma porção do escoamento passe por esta folga indo dos lados de mais alta pressão aos de mais baixa das pás, havendo perda de eficiência e menos aumento de carga. A correlação para estimar essa perda é dada pela Eq. 15.

$$\Delta h_{fol} = 0,6 \frac{\epsilon \cdot C_{\theta 2}}{b_2} \sqrt{\frac{4\pi}{b_2 \cdot Z} \left[\frac{r_{1s}^2 - r_{1h}^2}{(r_2 - r_{1s})(1 + \rho_2/\rho_1)} \right] C_{\theta 2} \cdot C_1} \quad (15)$$

Além dos parâmetros geométricos do impelidor (raios, altura e número de pás) e das velocidades, a expressão para a perda por folga utiliza a dimensão da folga ϵ , evidentemente. A determinação do *tip clearance* em um impelidor está ligada aos processos empregados em sua fabricação, características de comportamento do material em diferentes temperaturas e velocidades, além do posicionamento conseguido em sua montagem. Nenhuma dessas características faz parte do presente projeto ou de seu escopo. Por este motivo usou-se um valor usual de folga apontado por Cumpsty (2004) de 2% da altura da pá. Fez-se a média entre entrada e saída assim como mostra a Eq. 16.

$$\epsilon = 2\% \cdot \frac{b_2 + (r_{1s} - r_{1h})/2}{2} \quad (16)$$

Por fim, a última perda interna avaliada por Oh; Yoon e Chung (1997) acontece por conta da mistura entre jato e esteira na saída do impelidor. Essa estrutura do escoamento é bem discutida por Cumpsty (2004).

$$\Delta h_{mis} = \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha_2} \left[\frac{1 - \varepsilon_{esteira} - (b_3/b_2)}{1 - \varepsilon_{esteira}} \right]^2 \frac{C_2^2}{2} \quad (17)$$

A Eq. 17 fornece a correlação para cálculo da perda por mistura. Nota-se que há dependência com relação à fração da saída na qual há esteira $\varepsilon_{esteira}$. Assumiu-se o valor de 25% com base em informações providas de Cumpsty (2004) e Gravdahl et al. (2004).

5.1.2. Perdas parasitas

Oh; Yoon e Chung (1997), assim como Aungier (2000), levaram em conta três tipos de perdas parasitas: por atrito no disco, por recirculação e por vazamento. O atrito no disco corresponde à interação do impelidor com o fluido em faces que não estão vinculadas ao escoamento a ser pressurizado, principalmente na porção traseira do impelidor.

$$\Delta h_{atd} = f_{atd} \frac{[(\rho_1 + \rho_2)/2] r_2^2 U_2^3}{4\dot{m}} \quad (18)$$

$$f_{atd} = \frac{2,67}{Re_{atd}^{0,5}} \quad \text{se } Re_{atd} < 3 \cdot 10^5 \quad (19)$$

$$f_{atd} = \frac{0,0622}{Re_{atd}^{0,2}} \quad \text{se } Re_{atd} \geq 3 \cdot 10^5$$

A Eq. 18 apresenta a expressão para estimativa da perda por atrito no disco. O parâmetro f_{atd} é calculado de acordo com a Eq. 19 e ele é dependente do número

de Reynolds calculado com a velocidade na ponta da pá U_2 , o raio do impelidor na saída e a viscosidade do ar calculada na saída.

A segunda perda, por recirculação, ocorre na entrada do impelidor e está associada ao fluxo reverso. Whitfield e Baines (1990) definiram esse tipo de perda como um aumento na entalpia devido à ida de fluido com pouca quantidade de movimento da saída do impelidor (antes de entrar nas pás do difusor, no chamado *vaneless space*) de volta à região das pás do impelidor. Essa perda é apontada por Oh; Yoon e Chung (1997) como predominante se comparado com as outras perdas parasitas.

A Eq. 20 traz a expressão para calcular a perda por recirculação. Nela há a influência do ângulo absoluto do escoamento na saída com relação à direção meridional α_2 e, intuitivamente, quanto maior este ângulo, maiores as perdas por recirculação. Há ainda o fator de difusão apresentado na Eq. 8.

$$\Delta h_{rec} = 8 \cdot 10^{-5} \sinh(3,5\alpha_2^3) D_f^2 U_2^2 \quad (20)$$

A última perda advém dos vazamentos que ocorrem através da junção entre impelidor e difusor ou de selos labirintos. Aungier (2000) é o autor da correlação indicada por Oh; Yoon e Chung (1997) e apresentada pela Eq. 21. Ele afirma que a essa correlação assume, com base em dados experimentais, que metade do escoamento que ocorre através do *tip clearance* incorre em perda.

$$\Delta h_{vaz} = \frac{\dot{m}_{cl} U_{cl} U_2}{2\dot{m}} \quad (21)$$

A correlação estima a velocidade do escoamento através dos espaços U_{cl} (Eq. 22) através da estimativa da diferença de pressão que causa essa velocidade ΔP_{cl} (Eq. 23). Para tanto é necessário calcular o raio meridional médio na entrada r_{1m} através da Eq. 24 e estimar o comprimento meridional do canal, o que foi feito com uso da expressão da Eq. 25.

$$U_{cl} = 0,816 \sqrt{\frac{2\Delta P_{cl}}{\rho_2}} \quad (22)$$

$$\Delta P_{cl} = \frac{\dot{m}[r_2 C_{\theta 2} - r_{1m} C_1]}{\frac{(r_{1m} + r_2)}{2} \cdot \frac{[(r_{1s} - r_{1h})/2 + b_2]}{2} \cdot Z \cdot L_m} \quad (23)$$

$$r_{1m} = \frac{(r_{1s} - r_{1h})}{2} + r_{1h} \quad (24)$$

$$L_m \approx 1,1 \sqrt{\left[L_{ax} - \left(\frac{b_2}{2} \right) \right]^2 + \left[r_2 - \left(\frac{r_{1s} + r_{1h}}{2} \right) \right]^2} \quad (25)$$

Por fim, o último parâmetro a ser calculado é o fluxo mássico dos vazamentos $\dot{m}_{cl}$. A correlação se vale do número de pás do impelidor Z , densidade do ar na saída ρ_2 e dimensão da folga ϵ , além dos parâmetros já calculados U_{cl} e L_m .

$$\dot{m}_{cl} = \rho_2 \cdot Z \cdot \epsilon \cdot L_m \cdot U_{cl} \quad (26)$$

As perdas para o difusor não foram estimadas. Foi imposta uma eficiência do estágio 5% menor que a eficiência do impelidor como forma de estimar as perdas que ocorrem nos difusores. Os modelos de perdas encontrados para difusores requerem mais informações sobre sua geometria que o disponível nessa fase do projeto. A principal referência para estimar perdas no difusor é o trabalho de Ribi e Dalbert (2000).

5.1.3. Rotina computacional e análise dos dados

Os parâmetros de entrada do projeto unidimensional do impelidor foram variados dentro de faixas de valores consideradas adequadas pela literatura consultada que estão apresentadas na Tab. 3. O número de valores escolhidos dentro de cada faixa

foi alterado ao longo do desenvolvimento desta monografia para que houvesse boa resolução nos dados.

Tabela 3 – Faixas utilizadas para os parâmetros variados durante o projeto unidimensional e as referências que ajudaram a determiná-las.

Parâmetro	Faixa adequada	Referências
α_2	60 a 80 graus	Aungier (2000) Whitfield e Baines (1990)
β_{1s}	-70 a -50 graus	Whitfield e Baines (1990)
β_{B2}	-65 a 0 graus	Cumpsty (2004) Swain (1992) Whitfield e Baines (1990)
r_{1s}/r_2	0,4 a 0,7	Rusch e Casey (2012) Swain (1992)
ν	0,3 a 0,6	Swain (1992) Vavra (1970)
U_2	≤ 500 m/s	Came e Robinson (1999) Dalbert et al. (1999)
b_2/r_2	$\geq 0,08$	Vavra (1970)

Os passos seguidos para chegar às dimensões principais do impelidor estão sumarizados na Fig. 10. Nesse esquema é possível notar que a rotina computacional foi feita de modo que os valores do fator de escorregamento e da eficiência isentrópica fossem iterados até a convergência.

Foram testadas por volta de 300 mil combinações entre os parâmetros de entrada. Pouco mais da metade desses parâmetros resultaram em geometrias que foram excluídas por não atenderem aos requisitos das duas últimas linhas da Tab. 3 (U_2 e b_2/r_2) ou por terem apresentado valores incompatíveis durante os cálculos do projeto. Esses testes da geometria estão de acordo com os princípios do DFSS, restando analisar os dados coletados.

A primeira análise que forneceu indicações de como melhorar o projeto (fase O – otimizar, do CDOV) foi a comparação entre as contribuições de cada tipo de perda para definir a eficiência. A Fig. 11 apresenta os resultados dessa análise, havendo a média de todas as geometrias analisadas com seu desvio padrão comparada com a distribuição de perdas da geometria de maior eficiência.

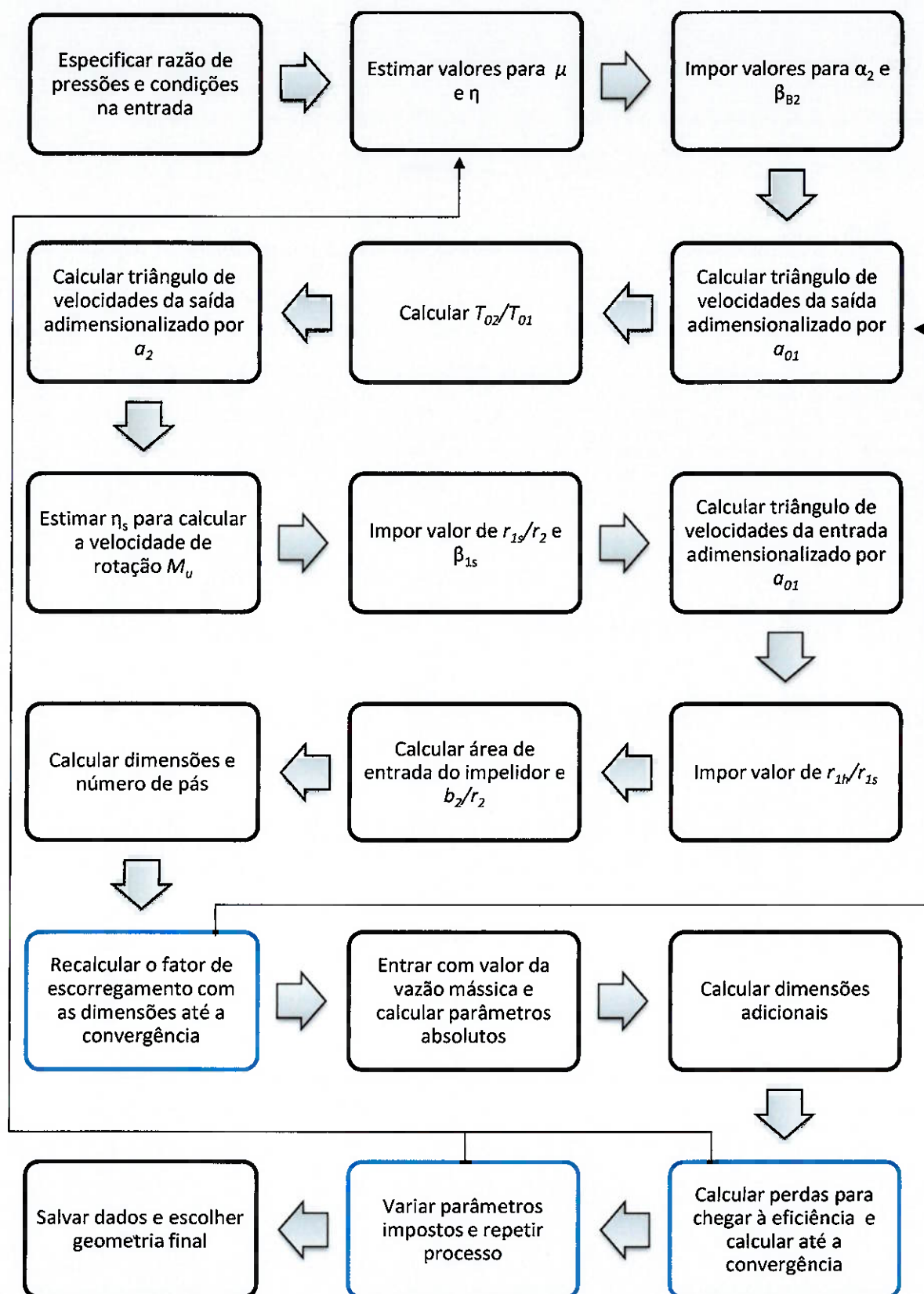


Figura 10 – Fluxograma do método unidimensional de projeto preliminar utilizado

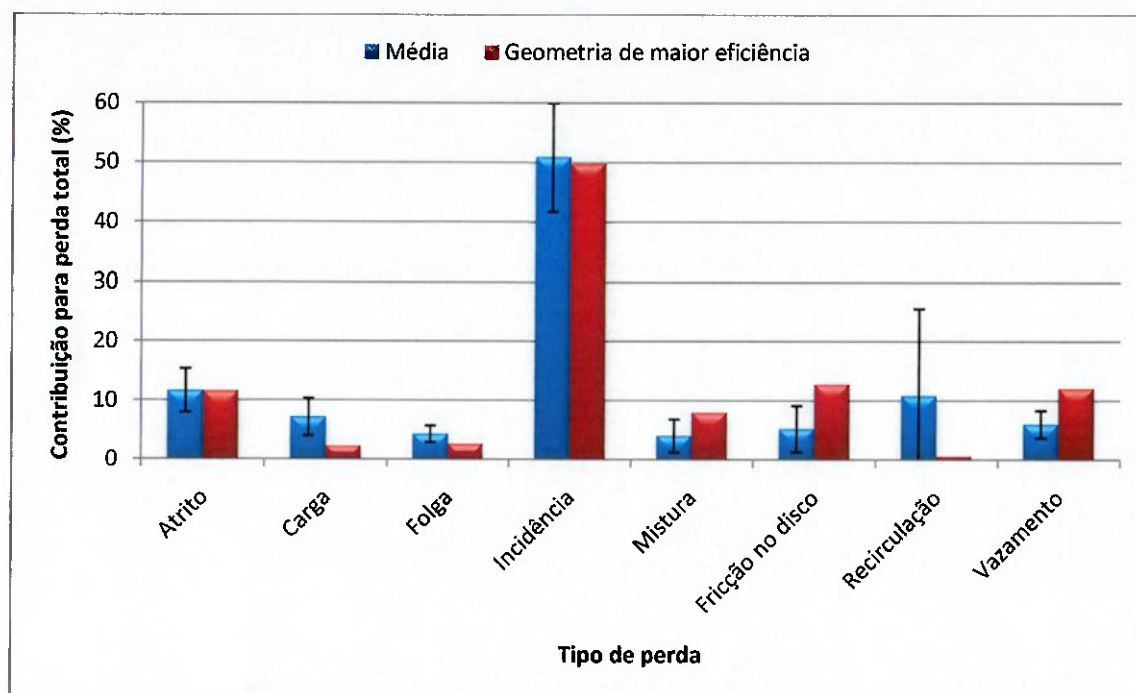


Figura 11 – Participação de cada tipo de perda com relação à soma das perdas. Em azul apresentam-se as médias de todas as geometrias avaliadas com desvio padrão indicado pelas barras de erro. Em vermelho estão dispostas as perdas para a geometria que teve a maior eficiência indicada.

O maior aprendizado vindo dessa análise foi relativo à perda por incidência. Como é possível notar na Fig. 10, as perdas por incidência corresponderam a uma média de mais de 50% do total. Ao investigar os motivos para que esse tipo de perda tivesse papel tão importante, passou-se por uma das decisões (ou simplificações) do projeto que havia sido subestimada.

A formulação do projeto unidimensional considerou que o escoamento na entrada é perpendicular à superfície de entrada. Isso significa que a velocidade circunferencial absoluta na entrada do impelidor ($C_{\theta 1}$) é nula, assim como o ângulo absoluto do escoamento na entrada (α_1). Dessa forma, a velocidade circunferencial relativa ($W_{\theta 1}$) tem a mesma magnitude da velocidade de rotação do impelidor e é maior do que seria caso o impelidor tivesse *prewhirl*, ou seja, ($\alpha_1 \neq 0$). Como mostra a Eq. 6, a correlação que estima a perda por incidência é dependente de $W_{\theta 1}$.

Na prática, trata-se de uma simplificação considerada adequada para a faixa de valores imposta a β_{1S} (DIXON; HALL, 2010; WHITFIELD; BAINES, 1990), uma vez que em todos os casos há ao menos um pouco de *prewhirl*. A dúvida gerada pelo

resultado foi se a adoção de ângulos β_{1s} dentro da faixa adotada causa, de fato, grandes perdas por incidência ou se a perda foi superestimada pela simplificação no modelo.

Recomenda-se, neste caso, a adoção de um modelo mais complexo que seja capaz de prever o valor da velocidade circunferencial absoluta na entrada do compressor para resolver tal dúvida. Esse tipo de decisão faz parte do processo do DFSS, que avalia a relação custo-benefício entre a fidelidade dos modelos e seus custos.

O gráfico da Fig.11 ainda é capaz de evidenciar que as perdas por atrito viscoso, recirculação e carga nas pás são as que mais contribuem para a queda da eficiência, em média. Além disso, fica clara a redução das perdas por recirculação e carga na geometria com máxima eficiência se comparada à média.

Continuando a análise, tentou-se ponderar melhor o papel de cada tipo de perda para determinar os fatores mais críticos ao projeto. Num primeiro momento, foram analisados qualitativamente os gráficos apresentados a seguir. A avaliação qualitativa não é suficiente, porém faz-se necessária na maioria dos casos.

A Fig. 12 apresenta a relação entre as perdas por incidência sob a forma de aumento de entalpia e a eficiência indicada para todas as geometrias avaliadas. Este gráfico mostra que, assim como denotou a Fig. 11, as perdas por incidência têm um papel importante sobre a eficiência, uma vez que pode-se notar um corte de modo que geometrias com grandes perdas por incidência não desenvolvem altas eficiência. Contudo, percebe-se ainda que, valores de perda baixos não são suficientes para que a eficiência seja alta havendo algumas geometrias na dispersão que têm eficiências por volta de 70% mesmo tendo perda por incidência por volta de apenas $1,5 \cdot 10^{-4}$ J.

Ao fazer a mesma análise para as perdas por carga nas pás, apresentada pela Fig. 13, percebe-se uma tendência similar. Como diferença, percebe-se que o “corte” apontado para as perdas por incidência não é tão brusco e linear. Além disso, não há geometrias com perdas próximas às mínimas e eficiência baixa como na Fig. 11. Tal fato pode indicar maior linearidade entre perdas por carga e eficiência.

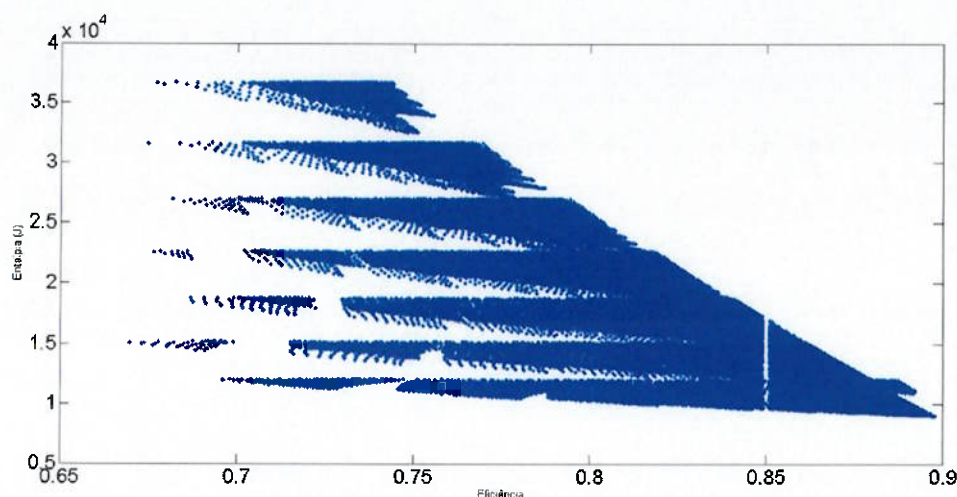


Figura 12 – Gráfico das perdas por incidência pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.

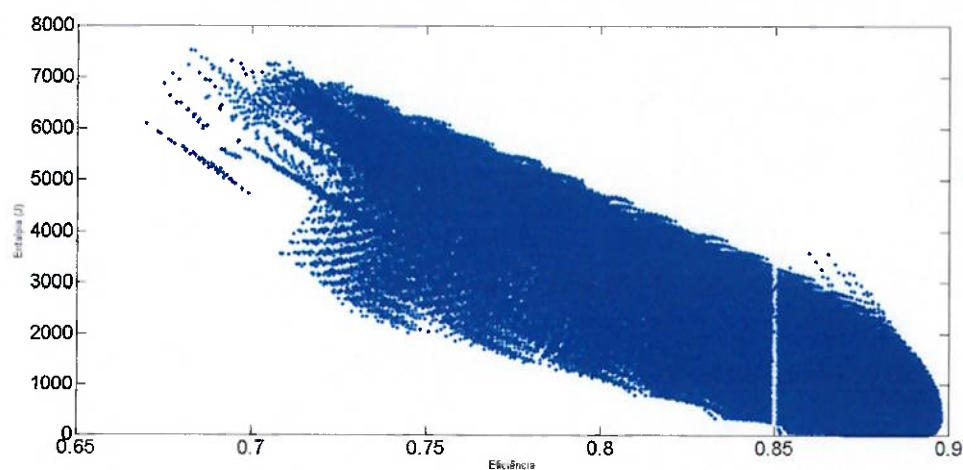


Figura 13 - Gráfico das perdas por carga pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas

A mesma análise qualitativa foi feita para todas as perdas nas Figs. 14 a 19. Percebeu-se que, curiosamente, há poucas geometrias com por volta de 85% de eficiência, havendo uma faixa quase sem pontos em todas as dispersões. Ao verificar qual seria o motivo para esta faixa, constatou-se que quase todas as geometrias que tiveram sua eficiência calculada próxima a esse valor foram excluídas por não satisfazerem os requisitos dispostos nas duas últimas linhas da Tab. 3.

As dispersões para as perdas por atrito viscoso e por folga (Figs. 14 e 15) se mostraram similares às anteriores. É possível notar a esperada tendência de maiores eficiências serem alcançadas com perdas menores.

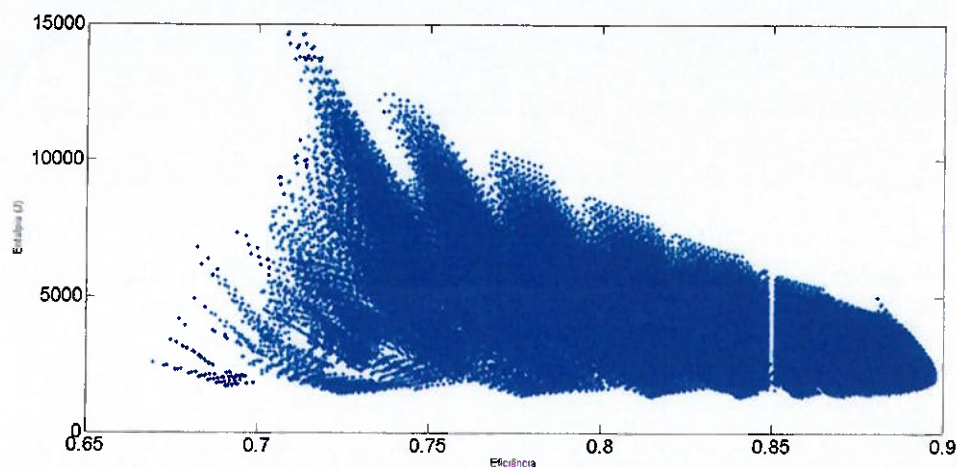


Figura 14 - Gráfico das perdas por atrito pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas

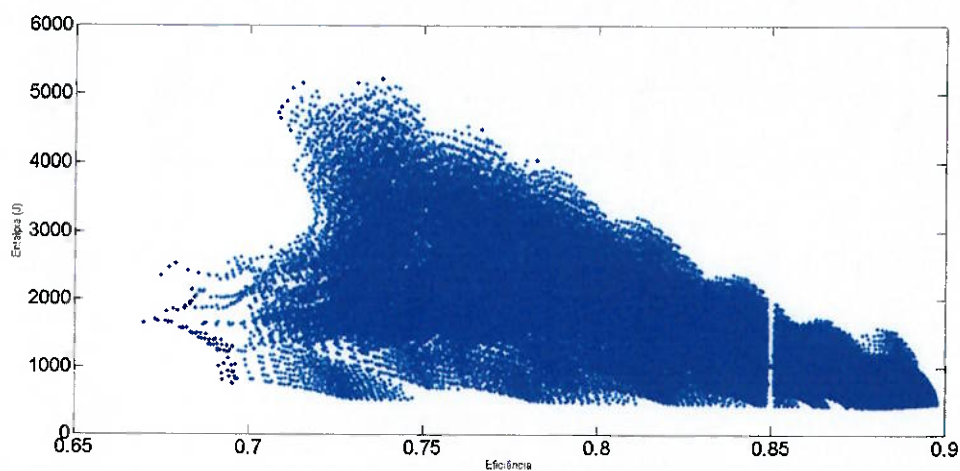


Figura 15 - Gráfico das perdas por folga pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.

Tal padrão não foi encontrado nos gráficos para as perdas por mistura e por fricção no disco dispostas nas Figs. 16 e 17. Essas dispersões mostram que estas perdas não aparentam ter uma correlação com relação à eficiência.

Obviamente, os valores das perdas afetam a eficiência, contudo, nota-se que não é necessário minimizá-las para obter altas eficiências. Não se atribui tal impressão à magnitude dessas perdas. Apesar de menores que as apresentadas pelas perdas por incidência e por atrito, os valores são similares aos das perdas por carga e por folga.

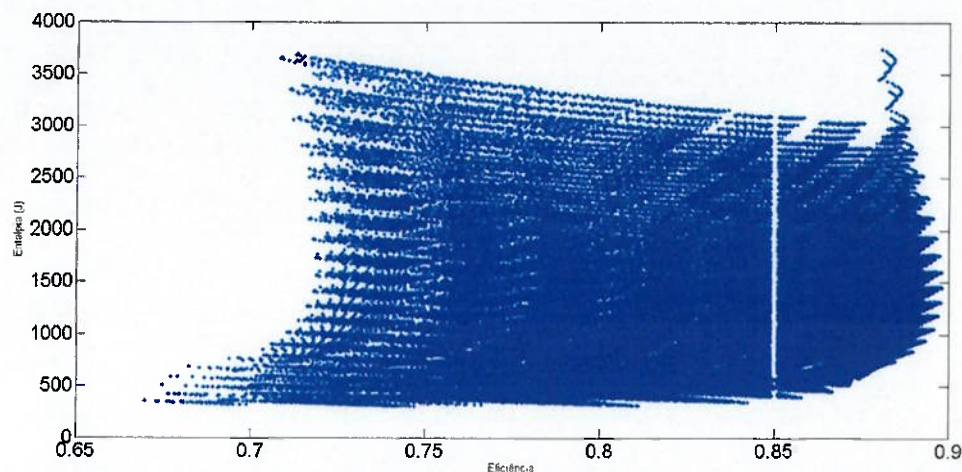


Figura 16 - Gráfico das perdas por mistura pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.

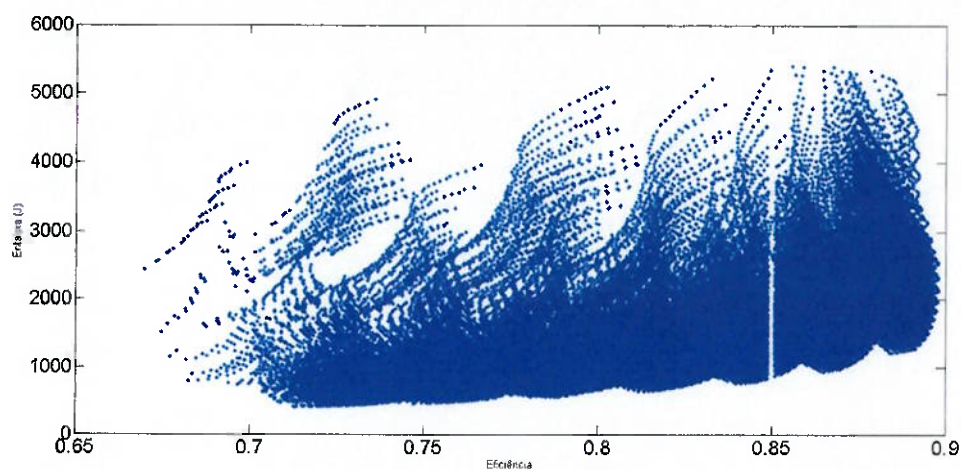


Figura 17 - Gráfico das perdas por fricção no disco pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.

O gráfico para as perdas por recirculação (Fig. 18) apresenta um resultado interessante, havendo um corte similar ao apresentado pelas perdas por incidência. Talvez por alcançar grandes magnitudes, o modelo aponta que não é possível ter alta eficiência com valores altos desse tipo de perda. Contudo, a relação com a eficiência se afasta da linearidade, como é mostrado a seguir através do coeficiente de correlação de Pearson.

Para este caso, a análise qualitativa da dispersão se faz importante. A relação entre as variáveis (perdas por recirculação e eficiência) seria subestimada caso fosse levado em conta apenas o coeficiente de correlação de Pearson.

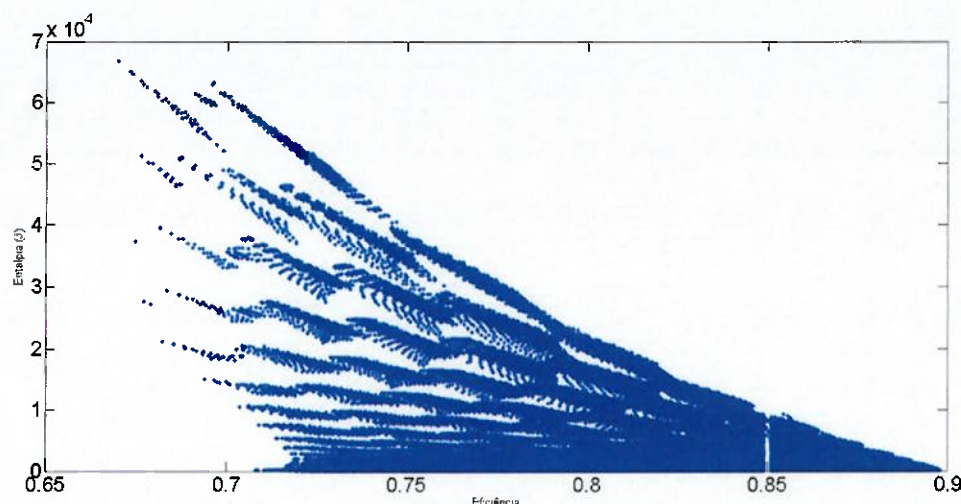


Figura 18 - Gráfico das perdas por recirculação pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.

Por fim, as perdas por vazamento para as geometrias testadas contidas no gráfico da Fig. 19 não aparentaram apresentar qualquer relação clara com a eficiência isentrópica do impelidor.

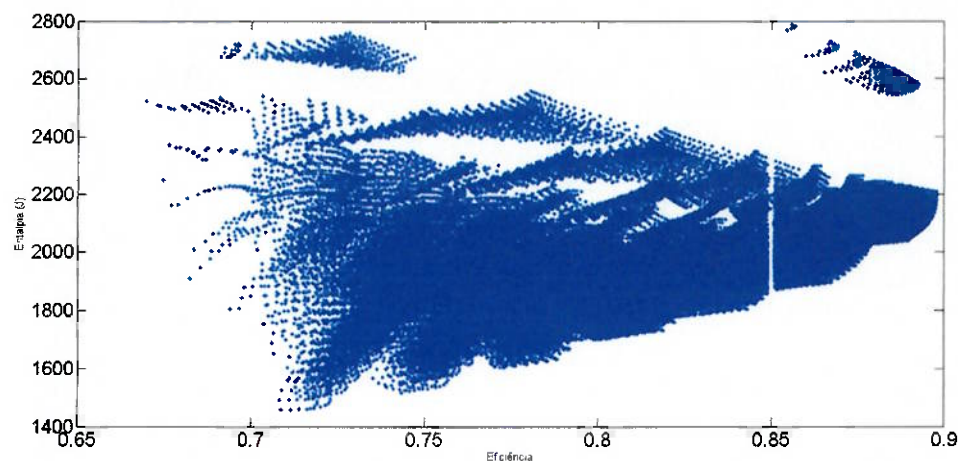


Figura 19 - Gráfico das perdas por vazamento pelas eficiências previstas contendo a dispersão das geometrias avaliadas.

O cálculo do coeficiente de correlação de Pearson de todas as dispersões apresentadas foi realizado e está apresentado na Tab. 4. Foi utilizado intervalo de confiança de 95% e regressão linear.

Tal análise pode parecer irrelevante, uma vez que se tem em mãos a expressão algébrica que relaciona os tipos de perda com a eficiência (Eq. 3). Entretanto, a intenção foi analisar como tais variáveis se comportam com relação à eficiência para geometrias possíveis e que estão de acordo com os requisitos de projeto para, a

partir dos resultados, analisar as variáveis geométricas envolvidas nos modos de perda mais relevantes.

Tabela 4 – Coeficientes de correlação de Pearson para os diversos tipos de perdas relacionados à eficiência através de regressão linear. Intervalos de confiança de 95%.

Tipo de Perda	Coeficiente de Correlação (Eficiência)
Incidência	-0,84
Carga	-0,87
Atrito viscoso	-0,60
Folga	-0,72
Mistura	0,12
Atrito no disco	0,58
Recirculação	-0,50
Vazamento	0,30

As perdas por mistura, atrito no disco e vazamento apresentaram coeficiente de correlação positivo e com valores consideravelmente baixos. Uma relação com coeficiente positivo não faz sentido ao contexto, uma vez que não se espera que a eficiência aumente com o aumento das perdas.

Dessa forma, pode-se tomar a decisão de que essas perdas não são importantes à eficiência e as variáveis envolvidas em seus modelos não seriam as mais importantes a serem monitoradas nas próximas fases do projeto, dado que consideram-se os modelos confiáveis o suficiente. Levou-se em consideração ainda a participação dessas perdas como apresentado na Fig. 11. Tal decisão auxilia na diminuição do número de configurações a serem testadas com uso de ferramentas mais complexas, confiáveis e caras.

Analisando os outros coeficientes, confirma-se a importância das perdas por incidência que apresentaram grande participação nas perdas totais e ainda estão relacionadas à eficiência com coeficiente de correlação de -0,84, num intervalo de confiança de 95%.

As perdas por atrito viscoso e recirculação também mostraram-se importantes, sendo a segunda e terceira em participação média e mostrando alguma relação com a eficiência, porém mais fraca. As perdas por carga nas pás, por sua vez, tiveram a relação mais linear com relação à eficiência, denotando uma oportunidade mais clara de melhoria do projeto caso se trabalhe para minimizá-las.

Das expressões utilizadas para estimar as perdas mais importantes, pode-se notar grande dependência com relação à velocidade tangencial do impelidor na saída U_2 , que está relacionada, obviamente, à velocidade de rotação imposta ao impelidor N e ao seu raio na saída r_2 . Além dessas variáveis, as velocidades relativas (W) mostraram-se importantes por estarem presentes em três das quatro perdas mais importantes. Dessa forma, recomenda-se para as próximas etapas de um projeto de impelidor de compressor centrífugo, especial atenção a essas variáveis.

As análises e considerações apresentadas neste capítulo são relativamente simples e o DFSS pode ser aplicado de muitas outras formas e com muitas outras ferramentas. O projeto de turbomáquinas envolve muitas variáveis e, por este motivo, torna-se muito complexo aplicar tudo que seria possível em um projeto como esse. Não é possível separar claramente as variáveis em um projeto como esse, no qual até mesmo os modelos podem ser alvo de discussões.

No entanto, julga-se que foi possível demonstrar como a abordagem DFSS pode auxiliar o projeto. Resultados úteis foram obtidos ao se determinar, de acordo com os modelos disponíveis nessa etapa do projeto, quais tipos de perdas são mais relevantes e a quais variáveis seria necessário atentar nas etapas seguintes do projeto.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a metodologia DFSS, com sua definição, fundamentos e histórico. Discutiu-se sua relação com a metodologia Seis Sigma e com a gestão da qualidade. A visão mais plausível a que defende o DFSS como um modelo de gestão da qualidade, uma vez que a metodologia contempla os princípios da gestão da qualidade. Concluiu-se que os resultados reportados por organizações que aplicaram o DFSS, tanto em ganhos financeiros quanto em nível de qualidade, são incontestáveis, tirando parte da importância das discussões acerca da originalidade do DFSS.

As principais ferramentas e sequências de trabalho do DFSS foram apresentadas, assim como sua relação com os projetos de turbinas a gás. Foram feitas recomendações sobre o uso do DFSS neste tipo de projeto, concluindo-se que a maior contribuição do DFSS não está na apuração da voz do consumidor, mas na integração dos subsistemas e otimização de componentes.

O trabalho ainda indicou que o uso do DFSS no projeto de turbinas a gás traz vantagens ao aplicar-se as ferramentas recomendadas em paralelo aos métodos consagrados de engenharia. A utilização de uma análise de correlações no projeto preliminar de compressor analisado mostrou-se eficaz ao tornar mais claras as relações entre as variáveis de projeto, facilitando escolhas futuras.

7. REFERÊNCIAS

AIROLDI, M. L. **Análise do escoamento em turbinas axiais e radiais para aplicações em microturbina a gás**. 2009. 88 p. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ALBAN, C.; HILTY, D.; TOLSTYKH, M.; BOLLMAN, A. Characterizing compressor rotor unclamp in a gas turbine engine. **ASME Conference Proceedings 2012**, 2012. Apresentado a ASME TURBO EXPO, Copenhagen, Dinamarca, Junho 11-15, 2012.

ANTONY, J. Design for six sigma: a breakthrough business improvement strategy for achieving competitive advantage. *Work Study*, v. 51, n. 1, p. 6-8, 2002.

AUNGIER, R. H. **Centrifugal compressors: a strategy for aerodynamic design and analysis**. Nova York: The American Society of Mechanical Engineers, 2000. 315 p.

BAÑUELAS, R.; ANTONY, J. Six sigma or design for six sigma?. *The TQM Magazine*, v. 16, n. 4, p. 250-263, 2004.

BAÑUELAS, R.; ANTONY, J. Going from six sigma to design for six sigma: an exploratory study using analytic hierarchy process. *The TQM Magazine*, v. 15, n. 5, p. 334-344, 2003.

BASKHARONE, E. A. **Principles of turbomachinery in air-breathing engines**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 598 p.

BONAIUTI, D.; ARNONE, A.; ERMINI, M.; BALDASSARRE, L. Analysis and optimization of transonic centrifugal compressor impellers using the design of experiments technique. *Journal of Turbomachinery*, v. 128, p. 786-797, 2006.

BOTHA, B. W.; MOOLMAN, A. Determining the impact of the different losses on centrifugal compressor design. *Research and Development Journal of The South African Institution of Mechanical Engineering*, v. 21, p.23-31, 2005.

BREYFOGLE, F. W. **Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods**. 2nd ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 1187 p.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 6^a ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010. 540 p.

CAME, P. M.; ROBINSON, C. J. Centrifugal compressor design. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v. 213, n. 2, p. 139-155, 1999.

CAMPOS, A. P. V. Desenvolvimento de um compressor radial para turbina a gás de pequeno porte. 2013. 149 p. Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CAMPOS, A. P. V; KRIEGER FILHO, G. C.; One-dimensional preliminary compressor design applied to a 500 kW gas turbine and the effect of blade number. **Proceedings of ENCIT**, 2012. Apresentado no 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, Novembro 18-22, 2012.

CASEY, M. V. Computational methods for preliminary design and geometry definition in turbomachinery. In: AGARD Lecture Series, 195., 1994. **Turbomachinery design using CFD**. 1994.

CLAUSING, D.; FREY, D. **Critical parameter management**. MIT Open Course Ware, ESD.33 Systems Engineering, 2010.

CORONADO, R. B.; ANTONY, J. Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organisations. The TQM Magazine, v. 14, n. 2, p. 92-99, 2002.

CREVELING, C. M.; SLUTSKY, J. L.; ANTIS JR., D. **Design for six sigma**: in technology and product development. Nova Jersey: Pearson Education, 2003. 768p.

CROWE, C. T.; ROBERSON, J. A.; ELGER, D. F. **Engineering Fluid Mechanics**, 7th Ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2001. 714 p.

CUMPSTY, N. A. **Compressor aerodynamics**, 2nd Ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 2004. 517 p.

DALBERT, P; RIBI, B.; KMECI, T.; CASEY, M. V. Radial compressor design for industrial compressors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, v. 213, n. 1, p. 71-83, 1999.

DIXON, S. L.; HALL, C. A. **Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery**. 6th ed. Burlington: Elsevier, 2010. 459 p.

FIORAVANTI, A. **Aplicação da metodologia “design for six sigma” (DFSS) em projetos automotivos**. 2005. 118 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GIAMPAOLO, A. **Gas turbine handbook: principles and practices**. 3rd ed. Georgia: The Fairmont Press, 2006. 437 p.

GRAVDAHL, J. T.; WILLEMS, F.; JAGER, B.; EGELAND, O. Modeling of surge in free-spool centrifugal compressors: experimental validation. *Journal of Propulsion and Power*, v. 20, n. 5, p. 849-857, 2004.

HANH, G. J.; DOGANAKSOY, N.; HOERL, R. The evolution of six sigma. *Quality Engineering*, v. 12, n. 3, p. 317-326, 2000.

HAUSER, J. R.; CLAUSING, D. The house of quality. *Harvard Business Review*, v. 66, n. 3, p. 63-73, 1988.

HOYLE, D. **Quality management essentials**. 1st ed. Burlington: Elsevier, 2007. 212 p.

HUR, W. S.; JANG, J. H.; KIM, D. C.; JANG, J. S. How to efficiently use the TRIZ in implementing the DFSS projects. *Proceedings of 9th Asia-Pacific Decision Sciences Institute Conference*, 2004.

KLEFSJÖ, B.; WIKLUND, H.; EDGEMAN, R. L. Six sigma seen as methodology for total quality management. *Measuring Business Excellence*, v. 5, n. 1, p. 31-35, 2001.

KWAK, Y. H.; ANBARI, F. T. Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. *Technovation*, v. 26, p. 708-715, 2006.

LEE, M. C.; AHN, K. I.; YOON, Y. Development of gas turbine combustion tuning technology using six sigma tools. **ASME Conference Proceedings 2012**, 2012. Apresentado a ASME TURBO EXPO, Copenhagen, Dinamarca, Junho 11-15, 2012.

MOLINARI, M.; DAWES, W. N. Review of evolution of compressor design process and future perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 220, n. 6, p. 761-771, 2006.

MONTGOMERY, D. C.; WOODALL, W. H. An overview of six sigma. *International Statistical Review*, v. 76, n. 3, p. 329-346, 2008.

OH, H. W.; YOON, E. S.; CHUNG, M. K. An optimum set of loss models for performance prediction of centrifugal compressors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, v. 211, n. 4, p. 331-338, 1997.

PANDE, P.; HOLPP, L. **What is six sigma?** Nova Iorque: McGraw-Hill, 2002. 86p.

PANIZZA, A.; SASSANELLI, G.; IURISCI, G.; SANKARAN, S. Performance uncertainty quantification for centrifugal compressors: 1. Stage performance variation. **ASME Conference Proceedings 2012**, 2012. Apresentado a ASME TURBO EXPO, Copenhagen, Dinamarca, Junho 11-15, 2012.

PFEIFER, T.; REISSIGER, W.; CANALES, C. Integrating six sigma with quality management systems. *The TQM Magazine*, v. 16, n. 4, p. 241-249, 2004.

RAMBERG, J. S. Six sigma: fad or fundamental? *Quality Digest*, v. 20, n. 5, p. 28-32, 2000.

RIBI, B.; DALBERT, P. One-dimensional prediction of subsonic vaned diffusers. *Journal of Turbomachinery*, v.122, p. 494-504, 2000.

ROTONDARO, R. G.; RAMOS, A. W.; RIBEIRO, C. O.; MIYAKE, D. I.; NAKANO, D.; LAURINDO, F. J. B.; HO, L. L.; CARVALHO, M. M.; BRAZ, M. A.; BALESTRASSI, P. P. **Seis sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços**. São Paulo: Editora Atlas, 2002. 375p.

RUSCH, D.; CASEY, M. The design space boundaries for high flow capacity centrifugal compressors. **ASME Conference Proceedings 2012**, 2012. Apresentado a ASME TURBO EXPO, Copenhagen, Dinamarca, Junho 11-15, 2012.

SANKARAN, S.; IURISCI, G.; SASSANELLI, G.; PANIZZA, A. Performance uncertainty quantification for centrifugal compressors: 2. Flange to flange variability. **ASME Conference Proceedings 2012**, 2012. Apresentado a ASME TURBO EXPO, Copenhagen, Dinamarca, Junho 11-15, 2012.

SARAVANAMUTTOO, H. I. H.; ROGERS, G. F. C.; COHEN, H. **Gas turbine theory**. 5th ed. Essex: Pearson Education Limited, 2001. 491 p.

SCHROEDER, R. G.; LINDERMAN, K.; LIEDTKE, C; CHOO, A. S. Six sigma: definition and underlying theory. *Journal of Operations Management*, v. 26, n. 4, p. 536-554, 2008.

SOKOVIC, M.; PAVLETIC, D.; PIPAN, K. K. Quality improvement methodologies – PDCA cycle, RADAR matrix, DMAIC and DFSS. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, v. 43, n. 1, p. 476-483, 2010.

SOUZA, Z. **Projeto de máquinas de fluxo: Tomo I - Base teórica e experimental**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. 178p.

STAMATIS, D. H. Who needs six sigma, anyway? *Quality Digest*, v. 20, n. 5, p. 33-38, 2000.

SWAIN, E. The initial design of a centrifugal compressor. *Journal of Engineering Design*, v. 3, n.2, p.149-166, 1992.

VAVRA, M. H. Basic elements for advanced designs of radial flow compressors. In: AGARD Lecture Series, 89, 1970. **Advanced Compressors**. 1970.

VERSTRAETE, T.; ALSALIHI, Z.; VAN DEN BRAEMBUSSCHE, R. A. Multidisciplinary optimization of a radial compressor for microgas turbine applications. *Journal of Turbomachinery*, v. 132, n. 3, p. 1-7, 2010.

WERKEMA, M. C. C. **Design for six sigma**. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2005. 300 p.

WHITFIELD, A.; BAINES, N. C. **Design of radial turbomachines**. 1st ed. Essex: Longman Scientific & Technical, 1990. 397 p.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **Lean thinking**: banish waste and create wealth in your corporation. Nova York: Simon & Schuster, 1996. 350 p.

YANG, K., EL-HAIK, B. S. 2003, **Design for six sigma**: a road map for product development. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2003. 617p.

ZU, X., FREDENDALL, L. D., DOUGLAS, T. J. The evolving theory of quality management: the role of six sigma. *Journal of Operations Management*, v. 26, p. 630-650, 2008.

ZU, X., ROBBINS, T. L., FREDENDALL, L. D. Mapping the critical links between organizational culture and TQM/six sigma practices. *International Journal of Production Economics*, v. 123, p. 86-106, 2009.