

Capítulo 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das máquinas de fluxo — bombas, ventiladores, compressores e turbinas — recebeu um grande impulso a partir dos avanços da aerodinâmica no século XX. O projeto adequado de aerofólios para os perfis de pás de rotores e estatores tornou-se cada vez mais um fator crucial para a melhoria da eficiência energética dessas máquinas.

Aliados a estes avanços encontram-se o crescente aumento da capacidade de cálculo dos computadores digitais e o desenvolvimento de novas técnicas computacionais que têm tornado possível a produção de turbomáquinas conducentes a resultados cada vez mais próximos das especificações de projeto, reduzindo custos de experimentação em modelos e protótipos e viabilizando projetos industriais.

Atualmente, verifica-se uma forte tendência no emprego de técnicas computacionais de otimização e métodos inversos em projetos aerodinâmicos. Trata-se aparentemente de uma tendência irreversível, que tem alterado drasticamente os procedimentos tradicionais de projeto aerodinâmico, baseados unicamente em cálculos sequenciais e na experiência

acumulada dos projetistas. Seguindo essa tendência, o escopo do presente trabalho refere-se ao desenvolvimento de uma metodologia de projeto inverso de aerofólios em grades de turbomáquinas utilizando um algoritmo de otimização especial, baseado em busca aleatória controlada. Nos itens subseqüentes, procura-se tornar mais claro o significado dessa metodologia.

1.2 – CONTEXTO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No estudo do escoamento ao redor das pás de turbomáquinas destacam-se dois tipos clássicos de problemas. No primeiro, denominado problema direto, são feitas análises das características do escoamento, partindo-se de uma configuração geométrica dada, ou seja, conhecida a geometria dos perfis, os parâmetros dimensionais da grade e os ângulos do escoamento a montante e a jusante, efetua-se o cálculo do escoamento. No problema direto é comum a utilização de famílias padronizadas de perfis que nem sempre são as melhores soluções para o problema de projeto.

No segundo tipo de problema, denominado problema inverso, o objetivo é a determinação de uma geometria adequada para atender a uma distribuição de pressões ou de velocidades fornecida inicialmente. Com a solução do problema inverso elimina-se a necessidade de utilização de famílias padronizadas de aerofólios no projeto das pás; entretanto, a especificação da distribuição de pressões ou de velocidades depende fortemente de um prévio conhecimento em aerodinâmica e teoria da camada limite; além disso, nem sempre é possível determinar formatos aerodinâmicos viáveis partindo daquela distribuição. Um formato aerodinâmico viável de um aerofólio, por exemplo, não deve apresentar contornos abertos ou com cruzamentos.

Atualmente, os métodos de otimização apresentam-se como ferramentas versáteis e bastante difundidas para projetos de aerodinâmica. Estas ferramentas não estão vinculadas a um único tipo de problema ou método para o cálculo do escoamento e sua aplicação não exige necessariamente uma dada distribuição de pressões ou de velocidades para obter um perfil. Podem ser aplicados na determinação de parâmetros geométricos ou aerodinâmicos que minimizem certas grandezas globais de interesse do projetista, tais como perdas e arrasto.

Os métodos de otimização também podem ser utilizados na obtenção de uma solução aproximada do problema inverso, mesmo em situações em que não exista uma solução viável

exata. Com o emprego de parametrizações geométricas adequadas e a aplicação de certas restrições, torna-se possível obter uma geometria final viável que produza uma distribuição de pressões que melhor se aproxime da distribuição especificada.

Algumas comparações podem ser feitas entre os métodos inversos clássicos — que não usam técnicas de otimização diretamente — e os métodos de otimização — mesmo quando aplicados ao problema inverso. Os métodos inversos clássicos são relativamente rápidos, podendo inclusive dispensar iterações, com um esforço computacional comparável a uma única análise; por outro lado, os processos de otimização normalmente requerem diversas análises para um único problema. Os métodos de otimização em geral são capazes de determinar pelo menos uma solução viável aproximada e podem exercer um maior controle das variáveis de projeto, reduzindo o risco de que a solução não seja aplicável; os métodos inversos clássicos podem gerar uma geometria inviável para as condições de busca. Os métodos de otimização comportam, com relativa facilidade, o tratamento de restrições geométricas e do escoamento, enquanto que os métodos inversos clássicos apresentam dificuldades no tratamento de restrições.

A título ilustrativo, apresenta-se a seguir a classificação dos métodos inversos para projeto de aerofólios proposta por Yiu (1994):

- Métodos com correção iterativa da geometria e utilização de equações não-lineares.
- Métodos de cálculo no plano transformado - transformação conforme.
- Métodos especiais, incluindo o método dos painéis para o cálculo do escoamento potencial e incompressível.
- Métodos de modificação iterativa - métodos de otimização

Diversos métodos híbridos podem ser concebidos pela combinação de dois ou mais dos métodos listados acima. Por exemplo, Petrucci (2003) apresenta um método inverso híbrido para o projeto de aerofólios combinando os métodos de transformação conforme e de painéis.

Deve-se observar que a classificação de Yiu (1994) não pretende ser exaustiva. Em geral, não convém superestimar a importância de qualquer classificação desse tipo. Mas é importante ressaltar que a metodologia a ser apresentada ao longo do presente trabalho deveria ser incluída no último item da lista de Yiu, pois se baseia no emprego de técnicas de otimização. Como será visto, a metodologia proposta utiliza um método de painéis para determinar a distribuição de pressões em torno dos aerofólios; todavia, qualquer outro tipo de método de cálculo do escoamento poderia ser empregado em seu lugar e, portanto, não conviria classificar a metodologia proposta neste trabalho como híbrida. De qualquer forma, como o método de cálculo de escoamento e o método de otimização escolhidos são

ingredientes importantes da metodologia e são independentes entre si, decidiu-se por apresentar o seu contexto e a revisão bibliográfica pertinente em duas partes distintas, enfocando cada método em separado.

1.2.1 – Métodos de Análise do escoamento Potencial ao Redor de Aerofólios de Pás de Máquinas de Fluxo

O desenvolvimento de turbomáquinas apresenta fases importantes e sequenciais, podendo-se empregar técnicas unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais, dependendo da fase em que se encontra o desenvolvimento do projeto.

Inicialmente, as análises unidimensionais do escoamento geram parâmetros fluidodinâmicos e geométricos. Ficam definidos nesta fase, por exemplo, o tipo de máquina, o número de estágios, dimensões principais, o número de pás, os triângulos de velocidades, os balanços de massa, energia e quantidade de movimento.

Em uma segunda etapa, bidimensional, o estudo do escoamento em grades lineares determina as características geométricas de pás e aletas e define os parâmetros geométricos de grade como, por exemplo, os ângulos de montagem e os espaçamentos. Nessa etapa, os métodos de análise de escoamento potencial concorrem com os métodos viscosos, baseados na solução das equações de Navier-Stokes. Os métodos potenciais, obviamente, são menos completos que os métodos viscosos, mas são muito mais fáceis de se implementar e apresentam custo computacional bem menor. Em situações de projeto, os métodos potenciais podem ainda ser corrigidos de maneira semi-empírica ou mediante o acoplamento dos efeitos de camada limite e esteira, de modo a se tornarem mais realistas, sem perda substancial de sua eficiência numérica. Dessa forma, os métodos potenciais constituem, ainda hoje, ferramentas extremamente úteis no projeto aerodinâmico via otimização.

Dentre os métodos para análise do escoamento bidimensional, potencial, de fluido incompressível, em regime permanente, destacam-se duas abordagens clássicas já bastante desenvolvidas: o método da transformação conforme e o método das singularidades.

Embora não seja alvo do presente trabalho, o método da transformação conforme está apoiado em antigas teorias de variáveis complexas e pode ser utilizado nos problemas de projeto. Através desse método, um problema de escoamento em torno de uma geometria complicada (no plano físico) e de difícil solução direta é relacionado matematicamente a uma geometria mais simples (no plano transformado), para qual a solução possa ser calculada mais

facilmente. Ou seja, o cálculo do escoamento é feito no plano transformado com uma geometria mais simples e mapeado de volta para a geometria desejada no plano físico.

O método das singularidades utiliza uma distribuição discreta ou contínua de fontes (aparecimento de vazão), sumidouros (desaparecimento de vazão) e vórtices (aparecimento de circulação) para a simulação das velocidades induzidas pela presença de um corpo. Esta distribuição, que pode ser implantada na superfície ou no interior do corpo em estudo, deve satisfazer certas condições de contorno e de continuidade.

Utilizado no presente trabalho, o método das singularidades foi desenvolvido inicialmente por Birnbaum (1923) e Glauert (1924), para perfis de pequena espessura e curvatura, tendo ainda bordo de fuga afilado. Esses trabalhos iniciais baseiam-se em uma única distribuição contínua de vórtices para representar o campo de velocidades induzidas, na forma de integrais. Este procedimento mostrou-se mais versátil que os métodos de transformação conforme, e foi estendido a diversas outras situações. Por exemplo, no projeto inverso de pás de rotores máquinas de fluxo centrífugas citam-se os trabalhos pioneiros de Staufer (1936) e de Betz e Flügge-Lotz (1938). Um tratamento mais geral de grades de máquinas de fluxo com perfis de formato arbitrário, utilizando distribuições de vórtices no contorno, foi apresentado por Isay (1954). Todavia, pouca atenção foi dada à obtenção de soluções, provavelmente devido às restrições computacionais da época.

Com o advento e disseminação dos computadores digitais, esquemas numéricos passaram a ser usados de modo a ampliar a aplicabilidade do método de singularidades a corpos de formato arbitrário. Uma das implementações numéricas mais utilizadas hoje em dia é o método dos painéis, desenvolvido principalmente nas décadas de 1960 e 1970. O trabalho de Hess e Smith (1967) apresenta uma revisão sobre o desenvolvimento inicial e diversas aplicações do método dos painéis a corpos bi e tridimensionais, incluindo grades lineares de máquinas de fluxo (Giesing, 1964). No método dos painéis, a superfície do corpo é discretizada em elementos, ou painéis, sobre os quais são colocadas distribuições de singularidades de intensidade a se determinar, porém de forma conhecida (constante, linear, parabólica, etc.). O cálculo destas intensidades é feito impondo uma condição de contorno em certos pontos de controle e resolvendo-se um sistema de equações algébricas lineares resultante. A partir dessas intensidades, calculam-se diretamente o campo de velocidades e o campo de pressões, usando o teorema de Bernoulli.

A formulação usada por Hess e Smith baseia-se em distribuições de fontes e na condição de contorno de Neumann (impenetrabilidade). No caso de aerofólios com sustentação, uma distribuição de vórtices uniforme em todo o contorno é introduzida, com

intensidade determinada pela condição de Kutta. Por outro lado, é possível utilizar apenas distribuições de vórtices e a condição de Dirichlet (velocidade nula no interior do perfil), do modo introduzido por Martensen (1971) para perfis isolados ou em grades de turbomáquinas. Com esta formulação, a velocidade no contorno externo do perfil iguala-se à intensidade de vórtices. Assim como no caso da formulação de Hess-Smith, a formulação de Martensen conduz a uma equação integral de Fredholm de segunda espécie. Martensen (1971) apresenta um método de solução numérica para essa equação, diferente do método de painéis.

Mavriplis (1971) utilizou a formulação de Martensen (1971) e desenvolveu um método de painéis simples e eficaz para perfis isolados ou segmentados, objetivando o desenvolvimento de aerofólios de alta sustentação.

Amorim (1987) estendeu o método de painéis à formulação clássica de Martensen, visando o caso de grades lineares de máquinas de fluxo. Foram utilizados painéis retos e distribuições de vórtices constantes. Correções de curvatura foram introduzidas para aumentar a precisão do método. Posteriormente, Manzanares Filho (1994) propôs aprimoramentos adicionais, introduzindo correções baseadas no deslocamento dos pontos de controle. Efeitos viscosos também foram introduzidos através de uma técnica de ajuste proposta por Gostelow (1975), aferida sistematicamente através de dados experimentais disponíveis para grades de perfis da série NACA 65 (Emery *et al.*, 1958).

Petrucci (1998) aplicou o método de Hess-Smith (modificado) ao problema inverso de projeto de perfis isolados e em grades de turbomáquinas. Foram utilizadas distribuições constantes de fontes como no método original. Por outro lado, ao invés de uma distribuição uniforme de vórtices no contorno, foi empregada uma distribuição senoidal com valor nulo no bordo de fuga e máximo na região do bordo de ataque, segundo idéia de Plotkin (1990) e Girardi e Bizarro (1995). Foi proposto um controle iterativo da geometria do aerofólio, através de alterações sucessivas das inclinações dos painéis, partindo do bordo de fuga, contornando o perfil e retornando ao bordo de fuga. Essas alterações dependem de cálculos das velocidades normais induzidas por distribuições fictícias de vórtices, dadas pela diferença entre as velocidades tangenciais requeridas e as calculadas em cada iteração. Verificou-se posteriormente que esse procedimento seria melhor adaptado ao uso exclusivo de distribuições de vórtices com a condição de Neumann. Isso foi feito por Petrucci (2003), utilizando distribuições lineares de vórtices e um tratamento especial da condição de Kutta para o caso de bordos de fuga afilados. Com esse procedimento, foi possível obter resultados qualitativamente melhores em relação ao método de Hess-Smith. Melhorias adicionais

significativas puderam ainda ser obtidas aplicando-se uma metodologia híbrida, em que o método de painéis é combinado com o método de transformação conforme, com o aerofólio (plano físico) sendo mapeado em um quase-círculo (plano transformado). Petrucci (2003) verificou que é mais preciso e eficiente aplicar o método inverso ao quase-círculo do que aplicá-lo diretamente ao aerofólio pretendido no plano físico. Desse modo, a geometria do aerofólio pode ser obtida com um número menor de iterações e com maior suavidade ao longo de todo o contorno, principalmente na região do bordo de ataque.

Petrucci (2003) sugere ainda a continuidade dos trabalhos em problemas inversos por uma linha diferente, utilizando métodos de otimização e parametrizações geométricas que possam garantir certos requisitos geométricos *a priori*. Seguindo essa linha, não é preciso utilizar um método de painéis de alta ordem, pois o controle geométrico é feito pela própria parametrização. No presente trabalho, por exemplo, busca-se atacar o problema inverso utilizando o método de painéis desenvolvido por Amorim (1987) e Manzanares Filho (1994).

1.2.2 – Métodos de Otimização para Aerofólios de Turbomáquinas

Desde a década de 70, os métodos de otimização ganharam destaque nas mais diversas áreas da ciência e da tecnologia. No âmbito da aerodinâmica, o uso de métodos de otimização tem se dado em duas grandes vertentes: (i) com o objetivo de se minimizar uma variável aerodinâmica importante tal como o arrasto; (ii) com o objetivo de se resolver o problema inverso. No primeiro caso, em geral, uma distribuição de pressões não é fornecida e o procedimento é conhecido como método de otimização aerodinâmica, propriamente dito. No segundo caso, o método de otimização é utilizado para se minimizar uma medida da diferença entre a distribuição de pressões calculada iterativamente e a distribuição de pressões requerida para o perfil alvo. O interesse deste trabalho encontra-se neste último caso.

Uma vasta gama de métodos de otimização tem sido aplicada nas últimas décadas aos problemas aerodinâmicos. Os trabalhos de Hicks *et al.* (1974) e Vanderplaats (1979) podem ser considerados pioneiros na aplicação de métodos de otimização ao projeto de formas aerodinâmicas. Os métodos utilizados nesses trabalhos são métodos de busca local, baseados no cálculo dos gradientes da função objetivo e das restrições que, portanto, devem ser diferenciáveis. Esses métodos costumam convergir para um ponto de ótimo local na vizinhança do ponto de partida do processo de busca. Portanto, por questões de eficácia, é fundamental que o ponto inicial esteja em uma região promissora do espaço de soluções, e

isso depende fortemente do conhecimento do projetista. A vantagem principal de tais métodos está na sua rápida convergência para um ótimo local, o que pode representar um atrativo maior para a aplicação de códigos computacionais complexos como aqueles baseados em soluções numéricas das equações de Navier-Stokes.

Em casos onde não há confiabilidade no ponto inicial de busca, é possível ainda aplicar os métodos locais diversas vezes, partindo de diferentes pontos. Todavia, esse procedimento costuma ser ineficiente, se não vier acompanhado de um algoritmo de busca adequado. Surge assim a necessidade de métodos de otimização mais robustos, que não exijam a especificação de um único ponto de partida e possam escapar de mínimos locais.

Os métodos de otimização populacionais atendem a essa necessidade e estão hoje bastante difundidos. Tais métodos baseiam-se na especificação de uma “população inicial” de pontos no espaço de solução a ser aprimorada iterativamente por algum algoritmo especial. Destacam-se aqui os Algoritmos Genéticos (GA), os algoritmos de Evolução Diferencial (DE) e os algoritmos de Busca Aleatória Controlada (CRS), utilizados no presente trabalho (Ali e Törn, 2004).

Os Algoritmos Genéticos (GA) talvez sejam os algoritmos populacionais mais aplicados atualmente nas diversas áreas da engenharia. A estrutura dos Algoritmos Genéticos (GA) é descrita em Goldberg (1989), Davis (1991) e Holst e Pullian (2003). Exemplos de aplicação dos GA a problemas inversos em aerodinâmica podem ser encontrados no trabalho de Obayashi e Tsukahara (1996). Em um teste de maximização do coeficiente de sustentação de um aerofólio, Obayashi e Tsukahara (1997) verificaram a superioridade de um GA sobre um algoritmo de busca local e outro algoritmo baseado no conceito de recozimento simulado (*simulated annealing*).

Os GA baseiam-se na simulação dos mecanismos de seleção natural e de genética, encontrados na reprodução e evolução dos seres vivos. Neste processo, características denominadas genótipos (variáveis de projeto) produzem fenótipos (projetos) cujas modificações são definidas por parâmetros biológicos de aptidão (por exemplo, menor valor da função objetivo, em problemas de minimização). Partindo de uma população inicial, em cada geração os principais mecanismos (passos do algoritmo) são: escolha dos pais (por critérios de aptidão e aleatoriedade), recombinação de genótipos (cruzamentos que transferem características genéticas dos pais para os filhos), mutação (alterações não-genéticas de membros da população) e seleção de fenótipos (os mais aptos escolhidos dentre filhos gerados e membros que sofreram mutações irão substituir os pais para formar uma nova população).

Em princípio, os processos de reprodução (recombinação e mutação) e seleção devem produzir um aprimoramento evolutivo a cada geração (diminuição da função objetivo em problemas de minimização). A cada passo, apenas uma parcela da população é trocada para formar a nova população. Os GA costumam demandar um número elevado de chamadas da função objetivo e nem sempre são suficientemente robustos.

O algoritmo de Evolução Diferencial (DE) foi proposto por Storn e Price (1997) como opção robusta para a otimização de funções contínuas. Os DE trabalham com uma população intermediária (mutante) obtida por um processo de mutação dos membros da população atual. Cada membro i da população mutante é obtido por soma ponderada das diferenças de dois membros j, k da população atual a um terceiro membro l , com $j, k, l \neq i$. Em seguida, é efetuado o processo de cruzamento entre os membros da população atual e da população mutante, gerando uma população tentativa. Cada membro da população tentativa é avaliado e comparado com o membro correspondente da população atual para saber qual deles pertencerá à próxima geração (nova população). Note-se que, em cada geração, os algoritmos DE realizam um número de avaliações da função objetivo igual ao número de membros da população, podendo renovar toda ela para produzir a nova geração. Portanto, embora mais robustos, os algoritmos DE costumam ter um custo computacional mais elevado que os algoritmos GA.

Rogalsky *et al.* (1999) aplicaram o algoritmo DE ao projeto inverso de aerofólios de grades de turbomáquinas axiais. A distribuição de pressões requerida é baseada nas propostas de Liebeck (1973), para obtenção de perfis de alta sustentação. Além dos parâmetros geométricos do perfil, o ângulo de montagem e o espaçamento na grade foram também considerados variáveis de projeto. Os autores reportam números de chamadas da função objetivo da ordem de 50.000 a 100.000 para se obter soluções suficientemente precisas, reforçando a expectativa do alto custo computacional dos algoritmos DE.

Antes mesmo do desenvolvimento dos algoritmos evolutivos GA ou DE, outros algoritmos, de busca aleatória simples, foram utilizados para determinação de pontos ótimos de funções em que o cálculo de derivadas era impossível, proibitivo ou muito difícil. Price (1977) faz uma análise crítica de alguns desses algoritmos, no contexto de otimização global, e propõe um novo algoritmo de busca aleatória, denominado por ele mesmo de Busca Aleatória Controlada (CRS). Trata-se também de um algoritmo populacional, em que uma população inicial é gerada aleatoriamente e contraída iterativamente em direção a um único ponto (que se espera ser um ponto de ótimo global). A cada iteração, um único ponto tentativo

é construído heurísticamente, avaliado e comparado com o pior membro da população atual. Se for superior, o ponto tentativo é aceito e substitui o pior membro da população atual, formando uma nova população melhorada. Esse processo de busca é repetido até que certo critério de parada seja atingido. Note-se que o algoritmo CRS promove a substituição de um único ponto da população atual a cada “geração”, diferentemente dos algoritmos GA e DE. Contrariamente ao GA e igualmente ao DE, a aceitação de pontos tentativos no CRS não é compulsória. Aliás, os algoritmos CRS, GA e DE podem ser vistos dentro de um contexto evolutivo padrão, analisando os seus processos de seleção, reprodução (cruzamento e mutação) e aceitação (Ali e Törn, 2004). No CRS, a reprodução se dá apenas por mutação.

Uma descrição mais detalhada do algoritmo CRS básico e de diversas de suas versões é dada no Capítulo 4 desta dissertação.

1.3 – MOTIVAÇÃO DO PRESENTE TRABALHO

Basicamente, são duas as motivações principais para o presente trabalho. Primeiramente, pretende-se atender à sugestão de Petrucci (2003), no sentido de se estudar a aplicação de métodos de otimização ao projeto de pás de turbomáquinas, métodos esses que possam ser aplicados com quaisquer modelos de escoamento e com funções objetivo e restrições as mais gerais possíveis. A proposta desta dissertação é dar um passo preliminar nesse sentido, considerando apenas o projeto inverso, ainda com o emprego de um modelo potencial para cálculo do escoamento, deixando para trabalhos futuros os casos mais gerais de otimização e os modelos de escoamento mais complexos (por exemplo, aqueles baseados na solução numérica das equações de Navier-Stokes).

Por outro lado, como segunda motivação, verifica-se que é escassa a literatura técnica acerca do uso dos algoritmos de busca aleatória controlada (CRS) em projeto aerodinâmico. Trata-se, porém, de um algoritmo robusto, de fácil implementação e bastante geral no âmbito das funções contínuas. Além disso, o CRS já se mostrou eficaz na solução de problemas reais de otimização bastante complexos (Ali *et al.*, 1997b). Surge, portanto, o interesse em avaliá-lo em situações de projeto aerodinâmico.

1.4 – OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

Basicamente, são três os objetivos do presente trabalho:

1) Apresentar o desenvolvimento de uma metodologia de projeto inverso de aerofólios de grades de turbomáquinas utilizando técnicas de otimização. A geometria do aerofólio é parametrizada com arcos de Bezier conforme sugestão de Venkataraman (1995) e adaptações de Rogalsky *et al.* (1999). Utilizam-se algoritmos de otimização por busca aleatória controlada (CRS). O cálculo do escoamento é feito através de um método de painéis baseado na formulação de Martensen (1971), conforme descrito por Amorim (1987) e Manzanares Filho (1994).

2) Apresentar e testar uma nova versão do CRS (Manzanares Filho *et al.*, 2005), utilizando o conceito de reflexão baseada na variabilidade da função objetivo (CRS-VBR). Essa versão procura utilizar informações sobre a variação da função objetivo em torno do melhor ponto da população atual, de modo a balancear automaticamente as buscas globais e locais, aumentando a eficiência geral da busca.

3) Avaliar a eficácia da metodologia em três casos de teste, comparando o algoritmo CRS-VBR proposto com duas outras versões do CRS da literatura.

O presente trabalho não tem por objetivo comparar o algoritmo CRS com outros algoritmos de otimização, como os GA e os DE em problemas aerodinâmicos. Essa comparação é sugerida como trabalho futuro.

1.5 – DELINEAMENTO DO PRESENTE TRABALHO

O delineamento desta dissertação segue a estrutura metodológica ilustrada na Fig. 1.1. Opções diferentes poderiam ser feitas dentro de cada quadro indicado na Fig. 1.1. Todavia, conforme já salientado no item anterior, o presente trabalho utiliza as seguintes opções: problema: projeto inverso de grades lineares de **turbomáquinas** axiais; **cálculo do escoamento** com base no método dos painéis; **parametrização dos perfis** baseada em curvas polinomiais de Bezier; **processo de otimização** utilizando busca aleatória controlada.

Neste Capítulo 1, além deste delineamento, estão descritos o contexto e a revisão bibliográfica pertinente ao escopo da dissertação, bem como as motivações e os objetivos para a sua realização.

No Capítulo 2, descreve-se o procedimento utilizado para o cálculo do escoamento ao redor de aerofólios em grades lineares de turbomáquinas. A formulação é baseada no método das singularidades e a solução numérica no método dos painéis.

No Capítulo 3, é descrita a parametrização geométrica adotada para a representação dos perfis, baseada em curvas polinomiais de Bezier.

No Capítulo 4, apresenta-se o algoritmo básico de busca aleatória controlada (CRS). Discutem-se algumas das versões conhecidas do CRS, algumas delas utilizadas neste trabalho para fins de teste da metodologia. Apresenta-se também uma versão modificada, utilizando reflexões baseadas na variabilidade da função objetivo (CRS-VBR).

No Capítulo 5, são apresentados três casos de teste da metodologia desenvolvida na dissertação. Em cada caso, são feitas comparações entre o algoritmo CRS-VBR proposto e duas outras versões do CRS.

No Capítulo 6, são apresentadas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

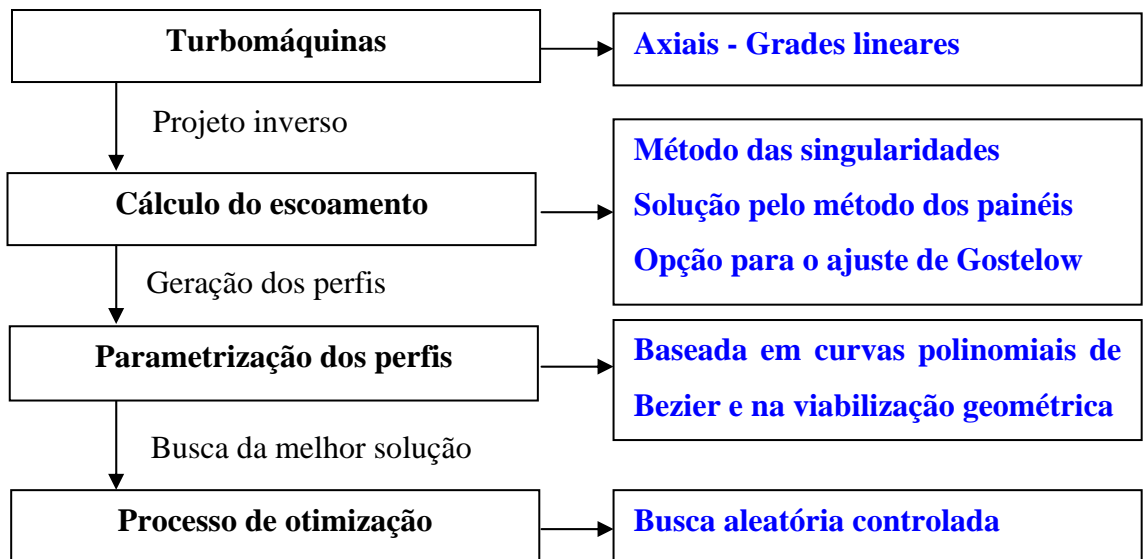


Figura 1.1 – Linha metodológica adotada nesta dissertação