

Sumário

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
SIMBOLOGIA	vii
LETRAS LATINAS	vii
LETRAS GREGAS	viii
SUPERESCRITOS	ix
SUBSCRITOS	x
ABREVIATURAS	x
SIGLAS	xi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Introdução	1
1.2 Contexto e Revisão Bibliográfica	2
1.2.1 Métodos de Análise do escoamento Potencial ao Redor de Aerofólios de Pás de Máquinas de Fluxo	4
1.2.2 Métodos de Otimização para Aerofólios de Turbomáquinas	7
1.3 Motivação do Presente Trabalho	10
1.4 Objetivos do Presente Trabalho	11
1.5 Delineamento do Presente Trabalho	11
CAPÍTULO 2	13
ANÁLISE DO ESCOAMENTO POTENCIAL EM GRADES LINEARES – MÉTODO DOS PAINÉS	13
2.1 Introdução	13
2.2 Definição das Grades Lineares de Máquinas de Fluxo Axiais	14
2.3 Fundamentos Teóricos para Cálculo do Escoamento Potencial em Grades Lineares	16

2.4 Solução Numérica – Método dos Painéis-----	20
2.5 Modificações na Matriz de Influência -----	27
2.5.1 Modificação na Diagonal da Matriz de Influência B'_{kj} -----	27
2.5.2 Modificação na Posição dos Pontos de Controle e nos Elementos Não-Diagonais da Matriz de Influência B'_{kj} -----	28
2.6 Efeitos Viscosos – Ajuste de Gostelow -----	29
2.6.1 Circulação Efetiva -----	31
CAPÍTULO 3 _____	34
PARAMETRIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE AEROFÓLIOS _____	34
3.1 Introdução -----	34
3.2 Parametrização para Geração dos Perfis-----	35
3.3 Procedimento para Geração de Perfis Viáveis -----	38
CAPÍTULO 4 _____	43
ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO _____	43
4.1 Introdução -----	43
4.2 Algoritmos de Busca Aleatória Controlada -----	44
4.2.1 O CRS Básico -----	45
4.2.2 Algumas Versões do CRS -----	45
4.2.3 Um Algoritmo Usando Reflexão Baseada em Variabilidade: CRS-VBR (Manzanares Filho et al.,2005)-----	47
4.3 Comentários sobre a Implementação e Utilização do Código Computacional -----	50
4.3.1 Dados de Entrada -----	50
4.3.2 Geração da População Inicial -----	51
4.3.3 Definição e Cálculo da Função Objetivo -----	52
4.3.4 Critério de Parada -----	52
CAPÍTULO 5 _____	53
APRESENTAÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS _____	53
5.1 Introdução -----	53
5.2 Informações Gerais -----	54
5.3 1º Caso – Perfil Alvo Descrito Exatamente pela Parametrização -----	57
5.4 2º Caso – Exemplo da Literatura -----	62
5.5 3º Caso – Dados Experimentais para a Distribuição de Pressões do Perfil Alvo -----	66

CAPÍTULO 6 _____	71
CONCLUSÕES E SUGESTÕES _____	71
6.1 Conclusões -----	71
6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros-----	73
APÊNDICE A _____	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	75

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Linha metodológica adotada nesta dissertação -----	12
Figura 2.1 – Esquema de uma bomba ou ventilador axial -----	14
Figura 2.2 – Sistema de uma máquina axial desenvolvida em grade Linear -----	15
Figura 2.3 – Parâmetros da grade de perfis aerodinâmicos idênticos -----	16
Figura 2.4 – Sentido positivo de ds -----	18
Figura 2.5 – Definição do ângulo α -----	18
Figura 2.6 – Relação entre as velocidades a montante e jusante e a circulação -----	19
Figura 2.7 – Polígono de “n” lados acompanhando o contorno do perfil-----	21
Figura 2.8 – Detalhe do ponto de controle do painel j -----	22
Figura 2.9 – Condição de Kutta -----	25
Figura 2.10 - Detalhe do ângulo de curvatura do perfil correspondente ao painel k -----	27
Figura 2.11 –Detalhe do deslocamento do ponto de controle z_{ck} -----	28
Figura 2.12 – Efeito do deslocamento do ponto de estagnação sobre a distribuição de pressões na região do bordo de fuga -----	30
Figura 2.13 – Circulação efetiva -----	31
Figura 2.14 – Ajuste de Gostelow -----	32
Figura 3.1 – Curvas Bezier para o arqueamento do perfil -----	36
Figura 3.2 – Curvas Bezier para a espessura do perfil -----	36
Figura 3.3 – Curvas de espessura (t representa a semi- espessura) -----	38
Figura 3.4 – Curva de espessura superposta à curva de arqueamento-----	38
Figura 3.5 – Perfis inviáveis (a) em função de arqueamento excessivo (b) em função do cruzamento da linha de espessura -----	38
Figura 3.6 – Definição dos intervalos para a viabilização dos perfis -----	39
Figura 4.1 – Parábola para obtenção da coordenada do novo ponto tentativo -----	46
Figura 4.2 – (a) Perfil alvo (b) Pior perfil gerado na inicial (c) Melhor perfil gerado na população inicial -----	51
Figura 5.1 – Caso 1 – Perfil alvo, pior e melhor aerofólios da população inicial -----	59
Figura 5.2 – Caso 1 – Evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS -----	59
Figura 5.3 – Caso 1 – Comparação entre aerofólios resultantes e o perfil alvo -----	60
Figura 5.4 – Caso 1 - Distribuições de pressões para aerofólios resultantes e o perfil alvo-----	61
Figura 5.5 – Caso 2 – Perfil de referência, pior e melhor aerofólios da população inicial ----	63

Figura 5.6 – Caso 2 - Evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS -----	63
Figura 5.7 – Caso 2 – Comparação entre os aerofólios resultantes -----	64
Figura 5.8 – Caso 2 – Distribuições de pressões para aerofólios resultantes e o perfil alvo --	65
Figura 5.9 – Caso 3 – Perfil NACA 1510 , pior e melhor aerofólios da população inicial (a) escoamento puramente potencial (b) escoamento com ajuste de Gostelow -----	67
Figura 5.10 – Caso 3 – Evolução do processo de convergência dos algoritmos CRS (a) escoamento puramente potencial (b) escoamento com ajuste de Gostelow -----	68
Figura 5.11 – Caso 3 – Comparação entre os aerofólios resultantes e o perfil NACA–1510 (a) escoamento puramente potencial (b) escoamento com ajuste de Gostelow -----	69
Figura 5.12 – Caso 3– Distribuições de pressões aerofólios resultantes e experimental -----	70

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Avaliação da Aferição do Fator de Deslocamento dos Pontos de Controle para Perfis Joukowsky Isolados -----	28
Tabela 3.1 – Coordenadas dos Pontos de Controle - Curvas de Bezier para Arqueamento ---	36
Tabela 3.2 – Coordenadas dos Pontos de Controle - Curvas de Bezier para Espessura -----	37
Tabela 3.3 – Definição da Nova Parametrização (Δ_i) em Função da Antiga (b_j) -----	40
Tabela 3.4 – Recuperação recursiva da Parametrização Antiga (b_j) em função da Nova Parametrização (Δ_i) -----	41
Tabela 5.1 – Valores b_j para Geração do Perfil Alvo do 1º Caso -----	58
Tabela 5.2 – Comparação das Normas Geométricas dos Melhores Aerofólios -----	58

Simbologia

Letras Latinas

A	Matriz com a população de perfis a serem verificados na otimização
A_{kj}	Matriz de contribuição no método dos painéis
b_k	Vetor com componentes cinemáticos
b_i	Pontos das curvas de Bezier – Variáveis de projeto
B_k	Matriz de influência
C_s	Coefficiente de sustentação aerodinâmica
C_a	Coefficiente de arrasto aerodinâmico
C_p	Coefficiente de pressão
C_{pG}	Coefficiente de pressão com ajuste de Gostelow
C_M	Coefficiente de momento
e	Base dos logaritmos neperianos de valor 2,71828
$f(p)$	Valor da função objetivo no ponto tentativo no processo de otimização
f_g	Valor médio entre os pontos definidos para reflexão
f	Fator de deslocamento do ponto de controle no método dos painéis
f^ℓ	Menor valor da função objetivo no processo de otimização
f^h	Maior valor da função objetivo no processo de otimização
g	Centróide
g_i	Valor ponderado das coordenadas do centróide
i	Unidade imaginária $i = (-1)^{1/2}$.
h	Pior ponto da população inicial
\Im	Parte imaginária da Equação de Fredholm
ℓ	Corda do perfil
l	melhor ponto da população inicial
\vec{n}	Vetor normal à superfície do rotor
n	Número de variáveis de projeto (17 valores de intervalos de projeto $\Delta(n)$)

N	Número de indivíduos na população
N_p	Número de painéis
p_i	Ponto tentativo
p	Pressão
P	População inicial
p_{TS}	Pressão no bordo de fuga pelo lado de sucção
p_{TP}	Pressão no bordo de fuga pelo lado de pressão
$P(u)$	Pontos para definição dos painéis pelas curvas de Bezier
Q	Vazão volumétrica.
r_1	coordenada do ponto de menor valor da função objetivo
r_2	coordenada do 1º ponto para geração da parábola que define o ponto tentativo
r_3	coordenada do 2º ponto para geração da parábola que define o ponto tentativo
\Re	Parte real da equação integral de Fredholm
s	Coordenada natural do perfil
t	Espaçamento entre os perfis na grade
w_s	distribuição de velocidades
W	Velocidade do escoamento
W_1	Velocidade a montante da grade
W_2	Velocidade a jusante da grade
w	Velocidade relativa.
x, y	Coordenadas cartesianas retangulares no plano z da grade linear.
z	Ponto no plano complexo da grade linear, $z = x + iy$.
Z_n	Pontos que definem o polígono formado no método dos painéis
Z_c	Pontos de controle definidos no meio de cada um dos painéis

Letras Gregas

α	Valor que define a variabilidade local para o processo de otimização com reflexão
α	Ângulo tomado entre o sentido positivo da tangente ao perfil e o eixo x
β	Distribuição de probabilidade

$\bar{\beta}$	Ângulo de montagem
β_1	Ângulo do escoamento na aproximação da grade
β_2	Ângulo do escoamento na saída da grade
$\Delta\beta$	Ângulo de deflexão
$\Delta_i^{L,U}$	Intervalos de projeto para viabilização dos perfis
Δ_s	Comprimento do painel
Δ_x^*	Deslocamento do bordo de fuga para o ajuste de Gostelow
ε_c	Erro circulatório
γ	Densidade de vórtices.
Γ	Circulação
Γ_{ef}	Circulação efetiva
δ_M	Ângulo de montagem da pá.
λ_I e λ_{II}	Núcleos das Equações de Fredholm
ζ	Ponto de cálculo e posição genérica das singularidades distribuídas.
\wp	Contorno do perfil
π	3,14159265...
ρ	Massa específica.
ϕ	Potencial de velocidades.
∇	Operador Nabla

Superescritos

L	Limite inferior
U	Limite superior

Subscritos

∞	Referente à distância longe da grade, ou ao número infinito de pás.
c	Referente ao ponto de controle.
G	Cálculo realizado com ajuste de Gostelow
i	Referente às abscissas e ordenadas dos intervalos de projeto
j	Referente ao ponto de controle genérico.
k	Referente à grade elementar genérica, ou painel correspondente.
MÍN	Referente à mínimo.
MÁX	Referente à máximo.

Abreviaturas

CRS	Busca aleatória controlada
CRSI	Busca aleatória controlada original
CRS6-BV	Busca aleatória controlada com busca local
CRS6_VBR	Busca aleatória controlada com reflexão
DE	Evolução Diferencial
FCNR	Sub-rotina para cálculo da função objetivo
GA	Algoritmo Genético
GRADLIN	Programa para cálculo do escoamento pelo método dos painéis
INIT_POP	Sub-rotina para geração da população inicial
ISSED_U	Semente para a geração da população inicial
ISSED_B	Semente para a distribuição Beta
MLOCMAX	Número máximo de buscas locais por rodada
RAND_PAR	Sub-rotina para viabilização dos aerofólios

TOL_G	Critério de parada
TRIAL_GLOBAL	Sub-rotina para busca global
TRIAL_LOCAL	Sub-rotina para busca local
OPT_L	Variável para definir a busca local
OPT_VBR	Variável para definir a reflexão
RAND_PAR	Sub-rotina para geração aleatória

Siglas

IEM	Instituto de Engenharia Mecânica
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics