



César Celis Pérez

**ENTRADAS DE AR SUBMERSAS PARA AERONAVES:
ESTUDO NUMÉRICO DA MELHORIA DE DESEMPENHO
OBTIDA PELO USO DE GERADOR
DE VÓRTICES**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Luís Fernando Figueira da Silva
Co-orientador: Sandro Barros Ferreira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2006



César Celis Pérez

**ENTRADAS DE AR SUBMERSAS PARA AERONAVES:
ESTUDO NUMÉRICO DA MELHORIA DE DESEMPENHO
OBTIDA PELO USO DE GERADOR
DE VÓRTICES**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luís Fernando Figueira da Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Sandro Barros Ferreira

Co-orientador

Instituto de Energia da PUC-Rio - IEPUC

Prof^a. Angela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Guilherme Lara Oliveira

Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. - EMBRAER.

Dr. João Luiz F. Azevedo

Instituto de Aeronáutica e Espaço - Centro Técnico Aeroespacial - CTA.

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio.

Rio de Janeiro, 20 de fevereiro de 2006.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

César Celis Pérez

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Peru) em 2002.

Ficha Catalográfica

Pérez, César Celis

Entradas de ar submersas para aeronaves: estudo numérico da melhoria de desempenho obtida pelo uso de gerador de vórtices / César Celis Pérez; orientador: Luís Fernando Figueira da Silva; co-orientador: Sandro Barros Ferreira. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

168 f.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Tomadas de ar. 3. Escoamento subsônico. 4. Aerodinâmica. I. Silva, Luís Fernando Figueira da. II. Ferreira, Sandro Barros. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. VI. Título.

CDD: 621

Para minha família.

Agradecimentos

Ao Professor Luís Fernando F. da Silva e ao Dr. Sandro Barros Ferreira pela dedicada orientação no desenvolvimento desta dissertação e pelo apoio durante o curso de mestrado.

A minha família, em especial a minha mãe Crescencia e meu irmão Juan Luis pelo apoio incondicional fornecido durante este período fora de casa.

A EMBRAER pelo suporte fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, em especial à Professora Angela O. Nieckele, pelos conhecimentos e conselhos fornecidos.

Ao pessoal da empresa Engineering Simulation and Scientific Software Ltda., ESSS, pela geração das malhas computacionais utilizadas neste trabalho.

A todos os colegas, em especial a Letícia Hime pela ajuda fornecida na parte inicial do trabalho.

A todos os amigos do mestrado pelos gratos momentos compartilhados.

A CNPq, FAPESP e à PUC-Rio pela ajuda financeira recebida durante o curso.

Resumo

Celis Pérez, César. **Entradas de Ar Submersas para Aeronaves: Estudo Numérico da Melhoria de Desempenho Obtida pelo Uso de Gerador de Vórtices.** Rio de Janeiro, 2006, 168p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Entradas de ar submersas são utilizadas em diversos sistemas de uma aeronave, tais como motor, ar-condicionado, ventilação e turbinas auxiliares. Neste trabalho visa-se estudar, através de simulações numéricas, a influência do uso de um gerador de vórtices sobre a espessura da camada limite a montante de uma entrada de ar submersa, com o intuito de reduzi-la e, assim, aumentar o desempenho deste tipo de entrada. O escoamento em uma entrada *NACA* convencional é analisado numericamente e seus resultados são tomados como referência para comparações subseqüentes. Em seguida, o gerador de vórtices é projetado e acoplado à entrada *NACA* convencional. Uma análise paramétrica numérica da influência da posição horizontal, do ângulo de ataque e da área do gerador de vórtices sobre a estrutura do escoamento e sobre os parâmetros de desempenho da entrada de ar é apresentada. Finalmente, um mastro de suporte do gerador de vórtices é projetado e são realizadas simulações do conjunto entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro para três ângulos de derrapagem do mastro. Os resultados mostram que a presença do gerador de vórtices livre leva a reduções consideráveis da espessura da camada limite e, conseqüentemente, a ganhos significativos nos parâmetros de desempenho da entrada de ar. Para o caso da entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, os ganhos obtidos em relação à entrada *NACA* convencional, em termos de eficiência e de vazão mássica, são de até 58% e 21%, respectivamente. No caso da entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro, o melhor resultado exhibe ganhos da ordem de 53%, em termos de eficiência, e de 19%, em termos da vazão mássica que ingressa na entrada de ar. A contribuição do arrasto provocado pela presença do gerador de vórtices com

mastro no arrasto total do conjunto entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro é pequena, menor que 10%.

Palavras chave

Tomadas de ar, escoamento subsônico, aerodinâmica.

Abstract

Celis Pérez, César. **Submerged Air Inlets for Aircrafts: Numerical Study of the Performance Improvement Obtained by the Use of a Vortex Generator.** Rio de Janeiro, 2006, 168p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Submerged air inlets are used for several systems of an aircraft, such as engine, air conditioning, ventilation, and auxiliary turbines. This work intends, through numerical simulations, to study the influence of the use of a vortex generator upon the boundary layer that develops upstream of a submerged air intake, with the aim of decreasing its thickness and, thus, to increase the inlet performance. The flow in a conventional *NACA* inlet is analyzed numerically and its results are considered as a reference for subsequent comparisons. Then, the vortex generator is designed and assembled to the conventional *NACA* inlet. A parametric analysis of the influence of the horizontal position, the angle of attack, and the area of the vortex generator on the flow field structure and on the performance parameters of the air inlet is presented. Finally, a support mast of the vortex generator is designed, and simulations are performed for the ensemble *NACA* inlet with vortex generator and mast for three sideslip angles of the support. The results show that the presence of the vortex generator is responsible for considerable reductions of the boundary layer thickness and, consequently, significant improvements of the performance parameters of the *NACA* inlet. The improvements, relative to the conventional *NACA* intake, in terms of ram recovery ratio and mass flow rate, may reach of 58% and 21%, respectively, for the case of the *NACA* inlet with the freely standing vortex generator. For the case of the *NACA* inlet with the vortex generator and support, improvements of up to 53%, in terms of ram recovery ratio, and 19%, in terms of mass flow rate ingested by the intake, were obtained. The contribution of the drag induced by the presence of the vortex generator with support on the total drag of the ensemble is smaller than 10%.

Keywords

Air inlets, subsonic flow, aerodynamics.

Sumário

1	Introdução	24
2	Revisão bibliográfica	29
2.1	Considerações iniciais	29
2.2	Primeiros trabalhos	30
2.3	Trabalhos recentes	34
2.4	Projeto atual das entradas NACA	39
3	Formulação matemática	42
3.1	Equações governantes	42
3.2	Modelos de viscosidade turbulenta	47
3.2.1	Modelo de Spalart e Allmaras	48
3.2.2	Modelos $k-\epsilon$	50
3.3	Tratamento da região da parede	52
3.3.1	Considerações iniciais	52
3.3.2	Funções de parede	55
3.4	Condições de contorno	58
3.5	Método numérico	60
4	Configurações estudadas	62
4.1	Descrição das configurações	62
4.1.1	NACA convencional	62
4.1.2	Gerador de vórtices	63
4.1.3	NACA com gerador de vórtices e mastro	66
4.2	Geração de malha	67
4.3	Aplicação das condições de contorno às diferentes configurações estudadas	74
5	Resultados e discussão	76

5.1	Entrada NACA convencional	78
5.1.1	Estrutura do escoamento	78
5.1.2	Influência do modelo de turbulência sobre a camada limite	82
5.1.3	Influência da pressão estática na saída do duto	89
5.1.4	Influência do nível de refinamento da malha computacional utilizada	91
5.2	Gerador de vórtices (GV) isolado	97
5.3	Anteprojeto do conjunto entrada NACA e gerador de vórtices	100
5.4	NACA com gerador de vórtices livre	102
5.4.1	Estrutura do escoamento	102
5.4.2	Influência do nível de refinamento da malha computacional utilizada	107
5.4.3	Influência da posição longitudinal do gerador de vórtices	110
5.4.4	Influência do ângulo de ataque do gerador de vórtices	119
5.4.5	Influência da área do gerador de vórtices	127
5.5	Anteprojeto do conjunto entrada NACA com gerador de vórtices e mastro	133
5.6	NACA com gerador de vórtices e mastro	136
5.6.1	Estrutura do escoamento	136
5.6.2	Influência do ângulo de derrapagem do mastro	141
5.7	Sumário dos resultados apresentados	147
6	Conclusões e perspectivas	152
7	Referências bibliográficas	156
8	Apêndices	159

Lista de figuras

Figura 1-1. Entrada de ar tipo <i>NACA</i> . ¹	24
Figura 1-2. Entrada de ar tipo <i>scoop</i> . ¹	25
Figura 2-1. Detalhe da entrada <i>NACA</i> com defletores. ⁸	31
Figura 2-2. Representação esquemática dos defletores de escoamento. ⁹	32
Figura 2-3. Representação esquemática do escoamento rotacional ao longo de uma entrada <i>NACA</i> . ⁹	32
Figura 2-4. Representação esquemática de uma entrada <i>NACA</i> modificada. ¹²	34
Figura 2-5. Estrutura do escoamento a jusante o gerador de vórtices <i>doublet</i> e <i>wishbone</i> (a) e (b) <i>Doublet</i> VG em camada limite laminar e turbulenta, respectivamente; (c) e (d) <i>Wishbone</i> VG em camada limite laminar e turbulenta, respectivamente. ¹⁴	35
Figura 2-6. Projeto conceitual do <i>BWB</i> . ¹⁵	36
Figura 2-7. Entrada <i>NACA</i> com gerador de vórtices. ¹	37
Figura 2-8. Entrada de ar submersa genérica. ¹⁶	38
Figura 2-9. Parâmetros usados na otimização da entrada. ¹⁷	39
Figura 2-10. Representação esquemática em corte transversal de uma entrada <i>NACA</i> convencional.	40
Figura 3-1. Lei da parede universal – Camada limite turbulenta sobre superfícies lisas. ²⁹	53
Figura 4-1. Geometria da entrada <i>NACA</i> convencional (dimensões em mm).	62
Figura 4-2. Exemplo de formação de vórtices sobre uma asa delta. ³¹	64
Figura 4-3. Coeficiente de sustentação em função do alongamento. ³¹	64
Figura 4-4. Vista em três dimensões do gerador de vórtices.	65
Figura 4-5. Configuração geométrica do gerador de vórtices (dimensões em mm).	65

Figura 4-6. Malha superficial da entrada <i>NACA</i> convencional.	67
Figura 4-7. Detalhe da malha da entrada <i>NACA</i> convencional – Plano de simetria.	68
Figura 4-8. Qualidade da malha da entrada <i>NACA</i> convencional: histograma de distribuição do número de elementos como função do alongamento e do ângulo.	70
Figura 4-9. Malha superficial do gerador de vórtices isolado.	71
Figura 4-10. Malha do gerador de vórtices isolado – Plano de simetria.	71
Figura 4-11. Malha superficial da entrada <i>NACA</i> com gerador de vórtices livre.	71
Figura 4-12. Detalhe da malha da entrada <i>NACA</i> com GV livre – Plano de simetria.	72
Figura 4-13. Qualidade da malha da entrada <i>NACA</i> com GV livre: histograma de distribuição do número de elementos como função do alongamento e do ângulo.	73
Figura 4-14. Malha superficial da entrada <i>NACA</i> com gerador de vórtices e mastro.	74
Figura 4-15. Aplicação das condições de contorno à configuração de entrada <i>NACA</i> com gerador de vórtices livre.	75
Figura 5-1. Linhas de corrente coloridas pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso N1A-1.	79
Figura 5-2. Detalhe da Figura 5 1 – Caso N1A-1.	79
Figura 5-3. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso N1A-1 (dimensões em mm).	80
Figura 5-4. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso N1A-1, plano de simetria (dimensões em mm).	80
Figura 5-5. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso N1A-1 (dimensões em mm).	81
Figura 5-6. Coeficiente de pressão, C_P - Caso N1A-1, plano de simetria (dimensões em mm).	82
Figura 5-7. Coeficiente de pressão, C_P - Caso N1A-1, plano da garganta da <i>NACA</i> (dimensões em mm).	82
Figura 5-8. Evolução da camada limite - 1m a montante do início da	

rampa inclinada, coordenadas internas.	84
Figura 5-9. Evolução da componente longitudinal da velocidade na camada limite - 1m a montante do início da rampa inclinada.	85
Figura 5-10. Evolução da camada limite - Início da rampa inclinada, coordenadas internas.	86
Figura 5-11. Evolução da componente longitudinal da velocidade na camada limite - Início da rampa inclinada.	87
Figura 5-12. Evolução da camada limite - 1m a montante do início da rampa inclinada, coordenadas internas.	90
Figura 5-13. Evolução da camada limite - Início da rampa inclinada, coordenadas internas.	90
Figura 5-14. Malha no plano de simetria – Caso N1A-1	92
Figura 5-15. Malha no plano de simetria – Caso N1B.	93
Figura 5-16. Malha no plano de simetria – Caso N1C.	93
Figura 5-17. Coeficiente de pressão, C_P – Caso N1B, Plano da garganta da <i>NACA</i> (dimensões em mm).	94
Figura 5-18. Coeficiente de pressão, C_P – Caso N1C, Plano da garganta da <i>NACA</i> (dimensões em mm).	94
Figura 5-19. Valor de y^+ - Caso N1A-1.	95
Figura 5-20. Valor de y^+ - Caso N1B.	95
Figura 5-21. Valor de y^+ - Caso N1C.	95
Figura 5-22. Coeficiente de pressão, C_P – GV com ângulo de ataque de 0° (dimensões em mm).	97
Figura 5-23. Coeficiente de pressão, C_P – GV com ângulo de ataque de 15° (dimensões em mm).	98
Figura 5-24. Coeficiente de pressão, C_P – GV com ângulo de ataque de 30° (dimensões em mm).	98
Figura 5-25. Intensidade dos vórtices em função do ângulo de ataque do GV.	99
Figura 5-26. Coeficiente de sustentação, C_L , do gerador de vórtices.	99
Figura 5-27. Polar de arrasto do GV, C_L vs. C_D .	100
Figura 5-28. Iso-superfície da componente longitudinal da vorticidade	

– GV com $\alpha = 15^\circ$.	101
Figura 5-29. Linhas de correntes coloridas pelo valor da componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA.	103
Figura 5-30. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA (dimensões em mm).	104
Figura 5-31. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVA, plano de simetria (dimensões em mm).	105
Figura 5-32. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA (dimensões em mm).	106
Figura 5-33. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA, plano de simetria (dimensões em mm).	106
Figura 5-34. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA, plano da garganta (dimensões em mm).	107
Figura 5-35. Comparação de malha - Casos NGVA e NGVA-1, plano situado a 0,2 m a jusante do GV.	108
Figura 5-36. Contornos de volume de elementos (m^3) - Caso NGVA (dimensões em mm).	109
Figura 5-37. Contornos de volume de elementos (m^3) - Caso NGVA-1 (dimensões em mm).	109
Figura 5-38. Comparação dos contornos de vorticidade (1/s) – Casos NGVA e NGVA-1, plano situado a 0,5 m a montante da entrada NACA.	110
Figura 5-39. Linhas de correntes pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVB.	111
Figura 5-40. Linhas de correntes pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVC.	112
Figura 5-41. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVB (dimensões em mm).	113
Figura 5-42. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVC (dimensões em mm).	113
Figura 5-43. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVB, plano de simetria (dimensões em mm).	114
Figura 5-44. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso	

NGVC, plano de simetria (dimensões em mm).	114
Figura 5-45. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVB (dimensões em mm).	115
Figura 5-46. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVC (dimensões em mm).	116
Figura 5-47. Coeficiente de pressão, C_P - Caso NGVB, plano da garganta da <i>NACA</i> (dimensões em mm).	116
Figura 5-48. Coeficiente de pressão, C_P - Caso NGVC, plano da garganta da <i>NACA</i> (dimensões em mm).	117
Figura 5-49. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-25 (dimensões em mm).	120
Figura 5-50. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-35 (dimensões em mm).	120
Figura 5-51. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-25, plano de simetria (dimensões em mm).	121
Figura 5-52. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-35, plano de simetria (dimensões em mm).	122
Figura 5-53. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-25 (dimensões em mm).	123
Figura 5-54. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-35 (dimensões em mm).	123
Figura 5-55. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA-25, plano de simetria (dimensões em mm).	124
Figura 5-56. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA-35, plano de simetria (dimensões em mm).	124
Figura 5-57. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA-25, plano da garganta (dimensões em mm).	125
Figura 5-58. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA-35, plano da garganta (dimensões em mm).	125
Figura 5-59. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-1,5A (dimensões em mm).	128
Figura 5-60. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-2,0A (dimensões em mm).	128

Figura 5-61. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-1,5A, plano de simetria (dimensões em mm).	129
Figura 5-62. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-2,0A, plano de simetria (dimensões em mm).	129
Figura 5-63. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-1,5A (dimensões em mm).	130
Figura 5-64. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-2,0A (dimensões em mm).	131
Figura 5-65. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA-1,5A, plano da garganta (dimensões em mm).	131
Figura 5-66. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVA-2,0A, plano da garganta (dimensões em mm).	132
Figura 5-67. Vista em três dimensões do mastro.	135
Figura 5-68. Características geométricas do mastro (dimensões em mm).	135
Figura 5-69. Linhas de correntes coloridas pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-0.	137
Figura 5-70. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-0 (dimensões em mm).	138
Figura 5-71. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-0, plano de simetria (dimensões em mm).	138
Figura 5-72. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVAM-0 (dimensões em mm).	139
Figura 5-73. Coeficiente de pressão, C_P – Caso NGVAM-0, plano de simetria (dimensões em mm).	140
Figura 5-74. Coeficiente de pressão, C_P - Caso NGVAM-0, plano da garganta da NACA (dimensões em mm).	140
Figura 5-75. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-5 (dimensões em mm).	142
Figura 5-76. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-10 (dimensões em mm).	142
Figura 5-77. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVAM-5, plano de simetria (dimensões em mm).	143

Figura 5-78. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVAM-10, plano de simetria (dimensões em mm).	143
Figura 5-79. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVAM-5 (dimensões em mm).	144
Figura 5-80. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVAM-10 (dimensões em mm).	144
Figura 5-81. Coeficiente de pressão, C_p - Caso NGVAM-5, plano da garganta da <i>NACA</i> (dimensões em mm).	145
Figura 5-82. Coeficiente de pressão, C_p - Caso NGVAM-10, plano da garganta da <i>NACA</i> (dimensões em mm).	145
Figura 5-83. Influência da posição horizontal do GV sobre os parâmetros de desempenho da entrada <i>NACA</i> .	148
Figura 5-84. Influência do ângulo de ataque (α) do GV sobre os parâmetros de desempenho da entrada <i>NACA</i> .	149
Figura 5-85. Influência da área do GV sobre os parâmetros de desempenho da entrada <i>NACA</i> .	150
Figura 5-86. Influência do ângulo de derrapagem do mastro sobre os parâmetros de desempenho da entrada <i>NACA</i> .	151
Figura 8-1. Resíduos – Caso N1A-1.	159
Figura 8-2. Resíduos – Caso N2A.	160
Figura 8-3. Resíduos – Caso N2B-1.	160
Figura 8-4. Resíduos – Caso N1A-2.	161
Figura 8-5. Resíduos – Caso N2B-2.	161
Figura 8-6. Resíduos – Caso N1B.	162
Figura 8-7. Resíduos – Caso N1C.	162
Figura 8-8. Resíduos – Caso NGVA.	163
Figura 8-9. Resíduos – Caso NGVA-1.	163
Figura 8-10. Resíduos – Caso NGVB.	164
Figura 8-11. Resíduos – Caso NGVC.	164
Figura 8-12. Resíduos – Caso NGVA-25.	165
Figura 8-13. Resíduos – Caso NGVA-35.	165
Figura 8-14. Resíduos – Caso NGVA-1,5A.	166
Figura 8-15. Resíduos – Caso NGVA-2,0A.	166

Figura 8-16. Resíduos – Caso NGVAM-0.	167
Figura 8-17. Resíduos – Caso NGVAM-5.	167
Figura 8-18. Resíduos – Caso NGVAM-10.	168

Lista de tabelas

Tabela 3-1. Termos de produção e destruição do modelo $k-\varepsilon$ realizável. ²⁶	51
Tabela 3-2. Resumo das condições de contorno.	59
Tabela 4-1. Parâmetros característicos da malha da entrada NACA convencional.	68
Tabela 4-2. Parâmetros característicos da malha da entrada NACA com GV livre.	72
Tabela 5-1. Condições de escoamento não perturbado.	76
Tabela 5-2. Sumário dos casos e configurações estudadas.	77
Tabela 5-3. Parâmetros de desempenho – Influência da escolha do modelo de turbulência.	88
Tabela 5-4. Parâmetros de desempenho – Influência da pressão estática na saída do duto.	91
Tabela 5-5. Parâmetros de desempenho da entrada NACA.	96
Tabela 5-6. Parâmetros de desempenho – Influência da posição longitudinal do GV	118
Tabela 5-7. Parâmetros de desempenho – Influência do ângulo de ataque do GV.	126
Tabela 5-8. Parâmetros de desempenho – Influência da área do GV.	132
Tabela 5-9. Parâmetros de desempenho – Influência do ângulo de derrapagem do mastro	146

Nomenclatura

A	Área
a	Velocidade do som
C	Corda na raiz do gerador de vórtices
C_D	Coeficiente de arrasto do gerador de vórtices
C_{Dfl}	Coeficiente de arrasto total da entrada de ar
C_L	Coeficiente de sustentação do gerador de vórtices
C_P	Coeficiente de pressão
C_v	Calor específico a volume constante.
D	Arrasto total
DH	Distância horizontal
d_H	Diâmetro hidráulico
e	Energia total por unidade de volume
e_i	Energia interna específica
H	Entalpia total específica
S	Envergadura do gerador de vórtices
I	Intensidade da turbulência
k	Energia cinética média de turbulência
k_P	Energia cinética da turbulência no ponto P
L_C	Comprimento característico do movimento turbulento
M	Número de Mach
M_w	Massa molecular do fluido
\dot{m}	Vazão mássica

n	Coordenada local normal à parede
p	Pressão estática
p_{op}	Pressão de operação
p_t	Pressão total
p_s	Pressão estática na saída do duto da entrada de ar
$Pr_{i\phi}$	Número de Prandtl em regime turbulento
\vec{q}	Vetor fluxo de calor.
R	Constante universal dos gases
S	Taxa de deformação média do escoamento
Sct_ϕ	Número de Schmidt
T	Temperatura
t	Tempo
U_P	Velocidade média do fluido no ponto P
\vec{u}	Vetor velocidade
u^+	Escala viscosa de velocidade
V	Velocidade
V_C	Velocidade característica do movimento turbulento
$\tilde{\nu}$	Viscosidade turbulenta modificada
y^+	Escala viscosa de comprimento
y_P	Distância do ponto P à parede
y_v	Espessura da subcamada viscosa
Letras gregas	
α	Ângulo de ataque do gerador de vórtices
β	Ângulo de derrapagem do mastro
Γ	Difusividade

γ	Razão de calores específicos
δ_{ij}	Símbolo de Kronecker
ε	Taxa de dissipação da energia cinética do movimento
η_D	Eficiência de recuperação de pressão dinâmica
κ	Constante de von Kármán
L	Alongamento do gerador de vórtices
μ_l	Viscosidade molecular ou absoluta
μ_t	Viscosidade turbulenta dinâmica
u_τ	Velocidade de atrito
ν_t	Viscosidade turbulenta cinemática
ρ	Densidade
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede
$\overline{\tau}$	Tensor de tensões viscosas
ϕ	Variável genérica
$\overline{\phi}$	Média no tempo da variável genérica
ϕ_f	Variável genérica na face de um elemento
Ω	Tensor vorticidade
Índices	
TH	Plano da garganta da entrada de ar
o	Condições de escoamento não perturbado