

ANÁLISE DE ENTRADAS DE AR TIPO NACA COM GERADOR DE VÓRTICES

William Nogueira de Faria

EMBRAER S/A – Empresa Brasileira de Aeronáutica
Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170 – 12227-901 – São José dos Campos – SP – Brasil
william.nogueira@embraer.com.br

Guilherme Lara Oliveira

EMBRAER S/A – Empresa Brasileira de Aeronáutica
Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170 – 12227-901 – São José dos Campos – SP – Brasil
guilherme.oliveira@embraer.com.br

Resumo. Este trabalho visa estudar, através de simulação numérica, a influência de parâmetros geométricos de geradores de vórtices sobre a eficiência de recuperação de pressão dinâmica e arrasto das entradas de ar tipo NACA, para utilização aeronáutica. Inicialmente, uma NACA foi dimensionada teoricamente para uma dada condição crítica de projeto. O escoamento nesta geometria foi então analisado numericamente, sendo os resultados utilizados como referência. Em seguida, vários modelos geométricos de geradores de vórtices foram acoplados à NACA, simulados e analisados, sendo seus resultados de eficiência e arrasto comparados aos da NACA de referência. Os resultados obtidos indicam que, para o caso estudado, a performance da NACA é predominantemente sensível à área do gerador de vórtices. Não foi possível identificar os efeitos benéficos esperados decorrentes da formação dos vórtices. Novas configurações com geometrias mais propensas a geração de vórtices deverão ser estudadas.

Palavras chave: entrada de ar, gerador de vórtices, CFD.

1. Introdução

Atualmente dois tipos de entradas de ar são tipicamente utilizados na indústria aeronáutica: “NACA” e “SCOOP”. As entradas de ar tipo NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), mostrada na Fig. (1), não possuem saliências externas, são de baixo arrasto aerodinâmico e não exigem reforços estruturais específicos, não acarretando em impactos de peso. Em contrapartida, esse tipo de entrada é em geral pouco eficiente, pois grande parte do ar ingerido é proveniente da camada limite a montante. Seu princípio de funcionamento baseia-se no desvio do fluxo de ar para a garganta da entrada de ar, ocasionado pela rampa divergente e pela geração de vórtices em suas paredes laterais.



Figura 1. Entrada de ar tipo NACA.

As entradas de ar tipo SCOOP, mostrada na Fig. (2), por outro lado, são excrescências projetadas para operar fora da camada limite, recuperando pressão dinâmica do ar com alta eficiência. A grande desvantagem desse tipo de instalação é o seu expressivo arrasto que acarreta em aumento de peso estrutural e prejudica a performance aerodinâmica do avião. Outra desvantagem é que entradas do tipo SCOOP funcionam basicamente como coletores de gelo.

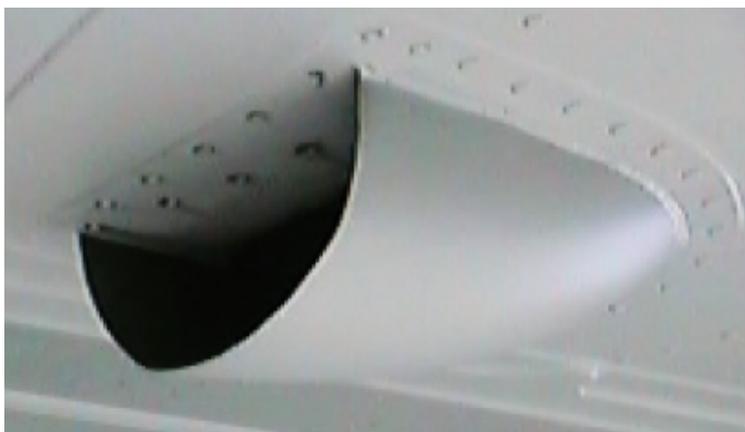


Figura 2. Entrada de ar tipo SCOOP.

Neste trabalho pretende-se avaliar a possibilidade de aumentar a eficiência de entradas de ar tipo NACA com rampa curvada divergente através da utilização de geradores de vórtices. Algumas indústrias aeronáuticas já têm utilizado essa tecnologia com aparente sucesso, porém muito pouca, ou quase nenhuma informação, encontra-se disponível na literatura. Devine (2002) reporta um aumento de 34% da eficiência de uma entrada de ar tipo NACA, em uma condição de baixa velocidade, graças à inclusão de geradores de vórtices tipo *vane* sobre a parede antes da entrada de ar, reduzindo-se consideravelmente a espessura da camada limite que entra na NACA. Este aumento de eficiência, previsto primeiramente através de simulações numéricas foi confirmado em seguida por experimentos em túnel de vento. Assim, uma série de simulações numéricas foi realizada com o intuito de se melhor entender a influência de determinados parâmetros geométricos do gerador de vórtices, principais dimensões e posicionamento, sobre a eficiência e o arrasto da NACA. Inicialmente, a eficiência e o arrasto de uma entrada de ar tipo NACA simples, sem gerador de vórtices, obtido numericamente e através de correlações teóricas e empíricas são comparados. Os principais mecanismos de introdução de perda nesta configuração, dita de referência, são identificados. Em seguida, diferentes configurações de entradas de ar, com gerador de vórtices, são avaliadas numericamente.

2. Dimensionamento da entrada de ar tipo NACA

O dimensionamento da entrada de ar tipo NACA com rampa curvada divergente operando à máxima eficiência de recuperação de pressão dinâmica foi realizado segundo as metodologias preconizadas pelo ESDU 86002 (1986) e ESDU 68020 (1968), (Engineering Sciences Data Unit).

Os cálculos consideram a instalação da NACA em uma região de escoamento turbulento, aproximadamente a 5 m da origem da camada limite externa, onde a espessura da mesma é de aproximadamente 0,06 m.

A condição de projeto analisada corresponde à operação típica de uma aeronave em cruzeiro a 35000 ft, número de Mach 0,7, desvio de temperatura de +10°C em relação à atmosfera padrão (ISA) e fluxo de massa de projeto da NACA de 0,174 kg/s.

Os resultados dos cálculos teóricos indicaram a necessidade de uma NACA com uma área de garganta de $7,905 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ e com características geométricas conforme mostrado na Fig.(3).

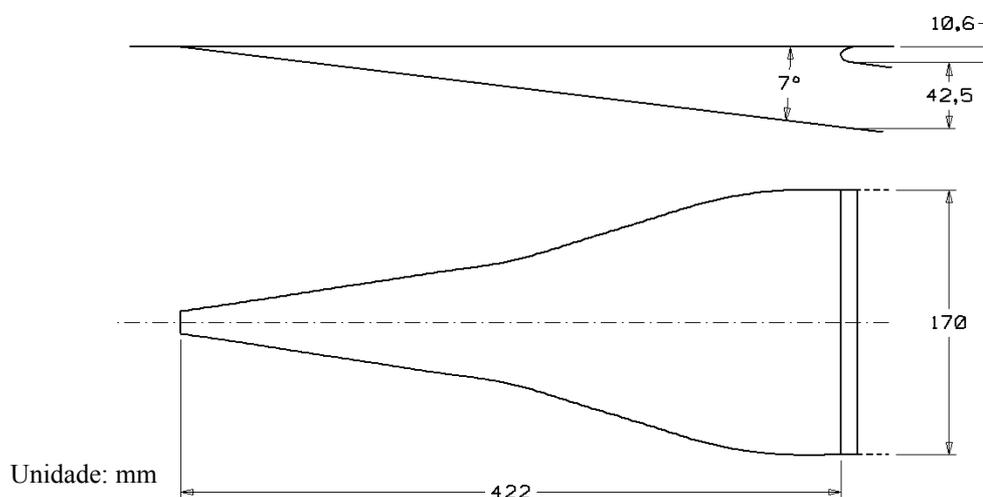


Figura 3. Geometria da NACA.

A eficiência de uma entrada de ar pode ser definida como a razão entre a pressão dinâmica na garganta da NACA e a pressão dinâmica no infinito, conforme a Eq. (1).

$$\eta_{\beta} = \frac{Pt_{th} - Ps_{inf}}{Pt_{inf} - Ps_{inf}} \quad (1)$$

A Figura (4) mostra a variação de eficiência da entrada de ar em função da razão entre o fluxo de massa que entra na NACA e o máximo fluxo de massa (\dot{m}_0) que poderia entrar na NACA sob fluxo livre, Eq. (2), considerando sua área de garganta.

$$\dot{m}_0 = \rho_0 \cdot V_0 \cdot A_{TH} \quad (2)$$

Onde \dot{m}_0 é o máximo fluxo de massa que poderia entrar na NACA sob fluxo livre; ρ_0 é a densidade do ar; V_0 é a velocidade do fluxo de ar; e A_{TH} é a área da garganta da NACA.

A máxima eficiência de recuperação de pressão da entrada de ar é obtida quando $\dot{m} / \dot{m}_0 = 0,3124$. Nesta condição, tem-se, $\eta_{\beta} = 0,709$.

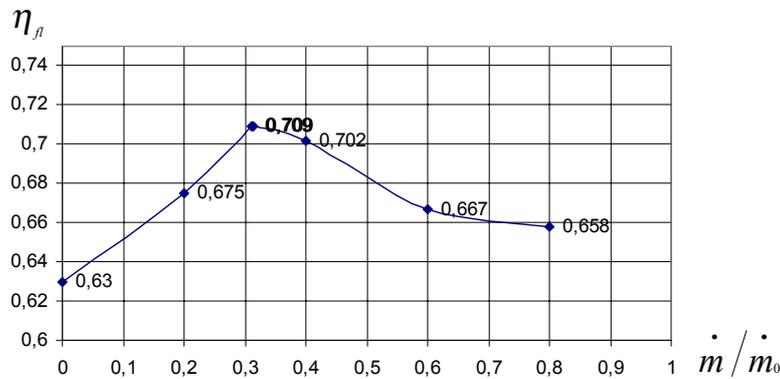


Figura 4. Curva característica da eficiência da NACA.

O coeficiente de arrasto total ($C_{D\beta}$) de uma entrada de ar nivelada, Eq. (3), é decorrente da soma de dois termos: um termo de arrasto de pressão (ram drag), proporcional ao fluxo de massa que entra na NACA; e um termo de arrasto viscoso (spillage drag), função da razão entre fluxos de massa \dot{m} / \dot{m}_0 .

$$C_{D\beta} = \frac{D}{P_{din.inf} \cdot A_{TH}} \quad (3)$$

Onde D é o arrasto total (componente da força na direção da velocidade no infinito), $P_{din.inf}$ é a pressão dinâmica no infinito e A_{TH} é a área da garganta da NACA.

A Figura (5) mostra a variação de $C_{D\beta}$ em função de \dot{m} / \dot{m}_0 . Para o ponto de máxima eficiência ($\dot{m} / \dot{m}_0 = 0,3124$), tem-se $C_{D\beta} = 0,3724$.

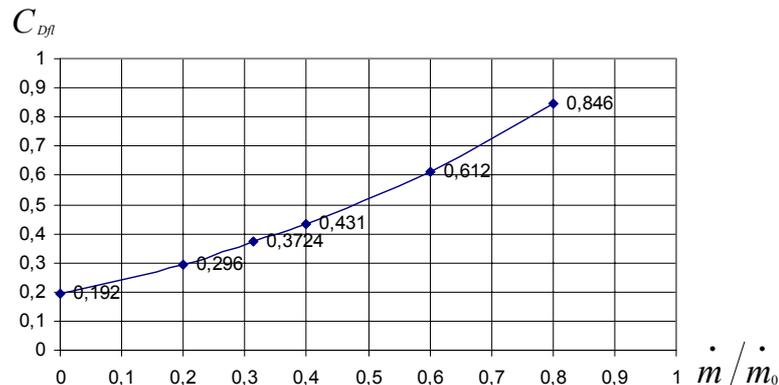


Figura 5. Curva característica do arrasto da NACA.

3. Análise numérica

O domínio de cálculo consiste de uma entrada tipo NACA, com ou sem gerador de vórtices, instalada no centro de uma placa plana de 10 metros de comprimento (5 m do ponto de origem da camada limite), de um duto de seção retangular acoplado a garganta da NACA e uma semi-esfera de 10 m de raio em torno da NACA, onde se impõem as seguintes condições de contorno do infinito: $P_s = 21663,7$ Pa; $M = 0,7$; $T_s = 226,5$ K; $V_x = 211,1$ m/s; $V_y = V_z = 0$ m/s; $\mu_{turb}/\mu_{lam} = 30$, conforme Fig (6).

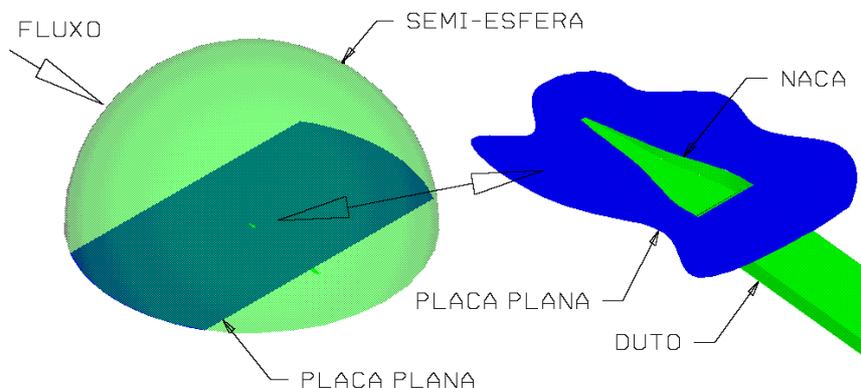
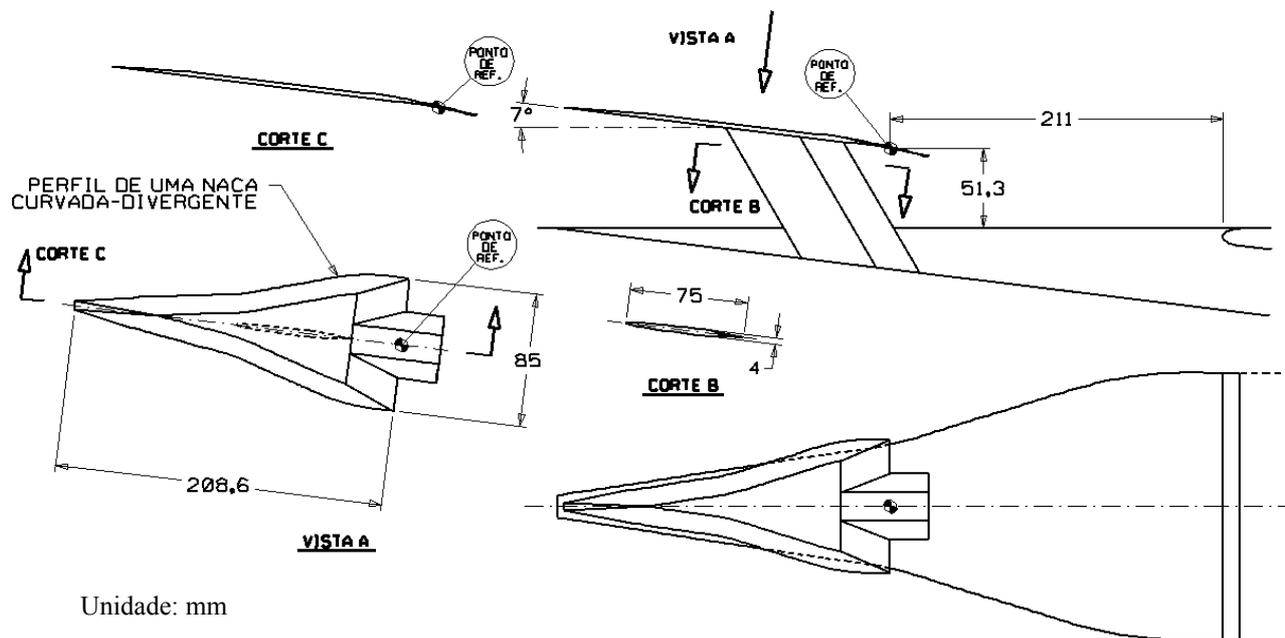


Figura 6. Domínio de cálculo.

Inicialmente calculou-se o escoamento para a geometria da NACA sem gerador de vórtices, e os resultados foram comparados àqueles de projeto. Em seguida, foi feita uma análise com um gerador de vórtices (GV), dito padrão, com as características geométricas conforme Fig. (7). Esta configuração de gerador de vórtices é utilizada, por exemplo, pelos aviões B737 para a entrada de ar do gerador de força auxiliar (APU).



Unidade: mm

Figura 7. Geometria da NACA com gerador de vórtices padrão.

As malhas foram criadas com o auxílio do software comercial IcemCFD, provendo-se especial atenção para o refinamento dos geradores de vórtices, da NACA e do duto, conforme Fig. (8). A malha espacial, de aproximadamente 1 milhão de elementos, foi adaptada na região da camada limite durante as simulações. As malhas utilizadas são do tipo tetraédrica com refinamento adaptativo por gradiente de velocidade para um y^+ menor que 500 em todas as paredes.

As simulações foram realizadas com o software comercial Fluent, que resolve as equações de Navier-Stokes através de uma formulação do tipo volumes finitos, *cell-center*, para malhas não-estruturadas. Foi empregado um esquema *upwind* de segunda ordem para o cálculo de fluxos e um esquema explícito para a integração temporal. O modelo de turbulência tipo Spalart-Allmaras de uma equação de transporte, foi utilizado por apresentar um bom compromisso entre precisão e custo computacional, principalmente para problemas de aerodinâmica externa.

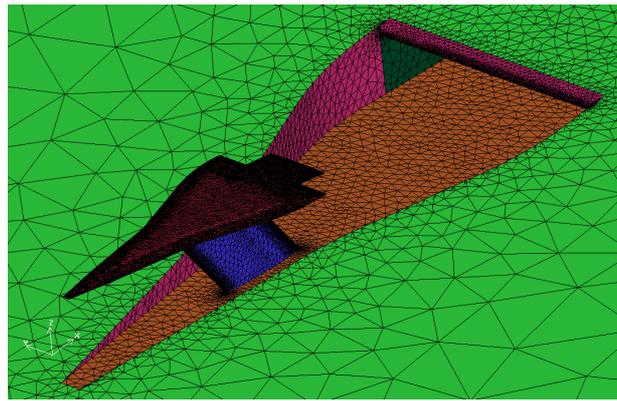


Figura 8. Malha superficial da NACA com gerador de vórtices padrão.

A Figura (9) apresenta a distribuição do número de Mach sobre as paredes da NACA com e sem gerador de vórtices padrão. A presença do gerador de vórtices praticamente não altera o campo de velocidades sobre a NACA. Cabe notar a acentuada aceleração do escoamento na região de sucção logo após o ponto de estagnação no bordo de ataque da NACA, em ambos os casos. Para condições de operação a Mach infinito maior que o avaliado ($M \cong 0,70$) provavelmente uma onda de choque deve aparecer, introduzindo perdas de eficiência. Nesse caso, um bordo de ataque mais fino seria recomendável.

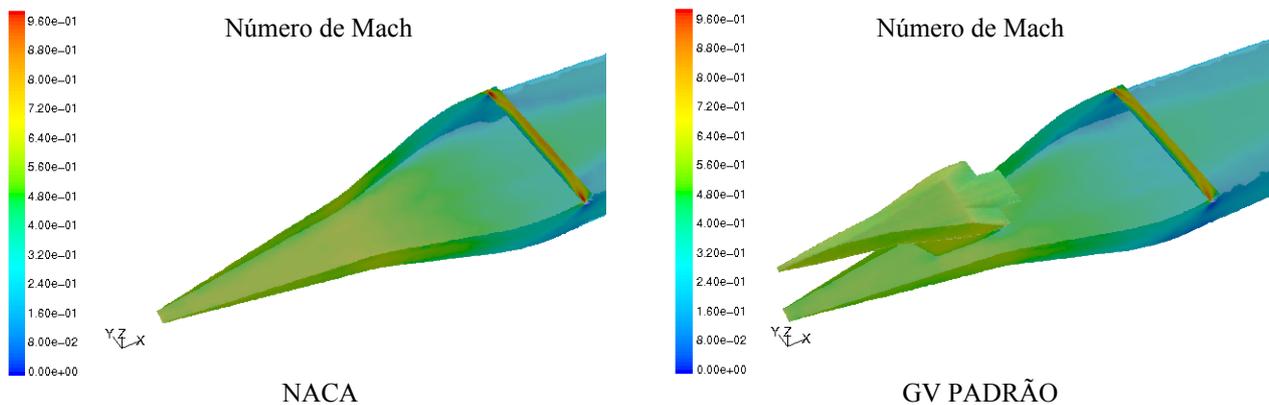


Figura 9. Número de Mach: NACA sem GV x NACA com GV padrão.

São apresentados na Fig. (10) os resultados de pressão total no plano da garganta da NACA com e sem gerador de vórtices padrão. Em ambos os casos, nota-se uma região central de alta pressão total e outras duas regiões laterais superiores onde as perdas são maiores. No resultado da NACA com gerador de vórtices, observa-se níveis mais baixos de pressão total máxima, bem como uma região adicional de fortes perdas no centro inferior da garganta da NACA. As regiões de perda nos cantos superiores correspondem ao núcleo dos vórtices da NACA, e no centro inferior à esteira do suporte do gerador de vórtices. Conforme indicado na Fig. (11), dois vórtices são formados ao longo das paredes laterais da NACA. Estes vórtices são responsáveis por convectar para a garganta da NACA todas as perdas existentes a jusante do degrau formado pelas paredes laterais em relação ao escoamento externo. A presença destes vórtices foi observada também por Taskinoglu (2002). Da mesma forma, a esteira do suporte do gerador de vórtices é ingerida pela NACA aumentando-se as perdas na garganta.

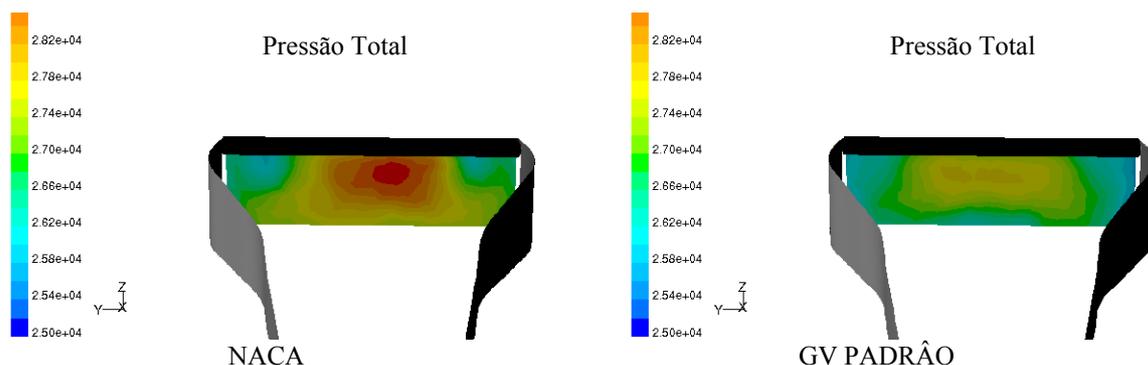


Figura 10. Pressão total na garganta da NACA: NACA sem GV x NACA com GV padrão.

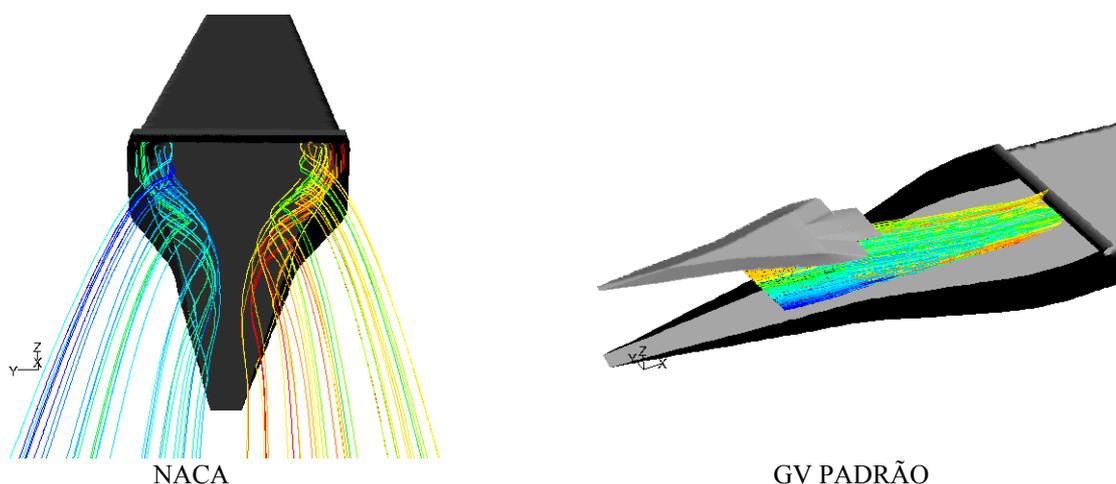


Figura 11. Linhas de corrente nos vórtices da NACA e na esteira do suporte do gerador de vórtices.

Vários outros modelos também foram gerados a partir do primeiro, com a introdução de geradores de vórtices, porém, com modificações geométricas e dimensionais conforme Tab. (1). Nesta primeira etapa do estudo, limitou-se a análise de apenas três pontos por parâmetro geométrico: o padrão, um extremo inferior e um extremo superior, com exceção do ângulo de incidência, que sempre aumentou. Pretende-se, numa etapa posterior do estudo, detalhar a evolução das curvas de influência dos parâmetros geométricos analisados através de novos cálculos com geometrias intermediárias.

Tabela 1. Variação dos parâmetros geométricos dos geradores de vórtices.

Tipo	Característica
GV - A +20%	Acréscimo de 20% da área do GV padrão.
GV - A -20%	Decréscimo de 20% da área do GV padrão.
GV - I +9,5°	Acréscimo de 2,5° do ângulo de incidência do GV padrão.
GV - I +12°	Acréscimo de 5° do ângulo de incidência do GV padrão.
GV - X +25%	Deslocamento axial do GV padrão em +25%, ou +53 mm. Porém, com mesma altura relativa da rampa.
GV - X -25%	Deslocamento axial do GV padrão em -25%, ou -53 mm. Porém, com mesma altura relativa da rampa.
GV - Y +25%	Deslocamento da altura do GV padrão em +25%, ou +13 mm.
GV - Y -25%	Deslocamento da altura do GV padrão em -25%, ou -13 mm.

A análise preliminar dos resultados obtidos para a NACA com e sem gerador de vórtices é suficiente para indicar diversos fatores que podem influenciar a performance das entradas de ar. A eficiência da NACA, por exemplo, é significativamente afetada pelo desvio do escoamento de ar para a garganta da NACA, devido à rampa e à incidência do gerador de vórtices, pela formação de vórtices, tanto na parede lateral da rampa curvada divergente da NACA quanto nos geradores de vórtices, e pela esteira do gerador de vórtices e do seu suporte de fixação. Em contrapartida, outros fatores influenciam o arrasto, tais como a área molhada e a área frontal do modelo geométrico, a sustentação do gerador de vórtices, onde quanto maior a sustentação, mais intensos são os vórtices e conseqüentemente o arrasto induzido do gerador de vórtices (proporcional ao quadrado da sustentação), e quando for o caso, a presença de ondas de choque. Portanto, tendo-se em vista o aumento das áreas frontal e molhada, é realmente de se esperar que as configurações com gerador de vórtices possuam valores de arrasto superiores àqueles da NACA sem gerador de vórtices.

A Tabela (2) mostra os valores de eficiência e arrasto provenientes dos cálculos.

Tabela 2. Eficiência da NACA nos modelos simulados.

Tipo	η_{fl}	C_{Dfl}
NACA	0,699	0,295
GV - PADRÃO	0,608	0,418
GV - A +20%	0,599	0,411
GV - A -20%	0,537	0,370
GV - I +9,5°	0,636	0,436
GV - I +12°	0,615	0,402
GV - X +25%	0,642	0,440
GV - X -25%	0,590	0,408
GV - Y +25%	0,661	0,451
GV - Y -25%	0,615	0,429

Vale observar que o valor de eficiência da NACA de referência, obtido através da análise de CFD, está bem próximo do valor de eficiência de projeto da NACA (0,709), conforme Fig. (4). O mesmo não é válido para o arrasto, onde a estimativa da análise de CFD para a NACA é 20% menor que o valor de projeto, Fig. (5). Tal diferença está em acordo com outros trabalhos da literatura, como DPW (2001), que evidencia as dificuldades de se prever arrasto através de análises de CFD.

De uma maneira geral, pode-se verificar que os resultados obtidos com as diferentes configurações de geradores de vórtices testadas não atenderam as expectativas, provendo performances piores que a da NACA. As eficiências obtidas com os geradores de vórtices são de 5 a 23 % menores, os arrastos são de 25 a 53 % maiores que os da NACA.

Além disso, levando-se em consideração as variações extremas aplicadas a cada parâmetro, observa-se uma sensibilidade relativamente pequena dos resultados de eficiência e arrasto do gerador de vórtices. As maiores sensibilidades foram obtidas pela modificação na área em planta do gerador de vórtices. Resta analisar a sensibilidade para combinações de modificações. Em termos de eficiência, a combinação que aparentemente poderia fornecer melhores resultados seria: gerador de vórtices com área padrão e ângulo de incidência de 9,5°, posicionado a +25% axialmente e verticalmente.

Dentre as configurações de gerador de vórtices testadas, as que deram melhores resultados de eficiência são aquelas nas quais o gerador de vórtices é movido 25% para frente e para cima. Nestas condições, o desvio do escoamento de ar externo pelo gerador de vórtices parece ser mais efetivo e a esteira do mesmo não é ingerida pela NACA. Em contrapartida, o gerador de vórtices nestas posições encontra-se fora da camada limite, sendo portanto seu arrasto mais importante.

As Figuras (12) a (15) apresentam os mesmos dados da Tab. (2), porém sob forma de curvas, que permitem avaliar melhor as influências de cada um dos parâmetros geométricos analisados.

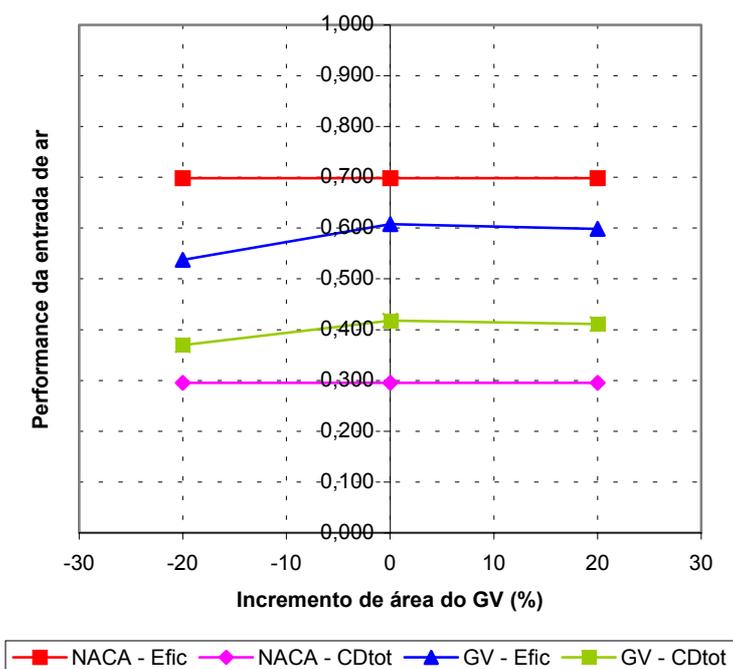


Figura 12. Influência da área do gerador de vórtices na eficiência e arrasto da NACA.

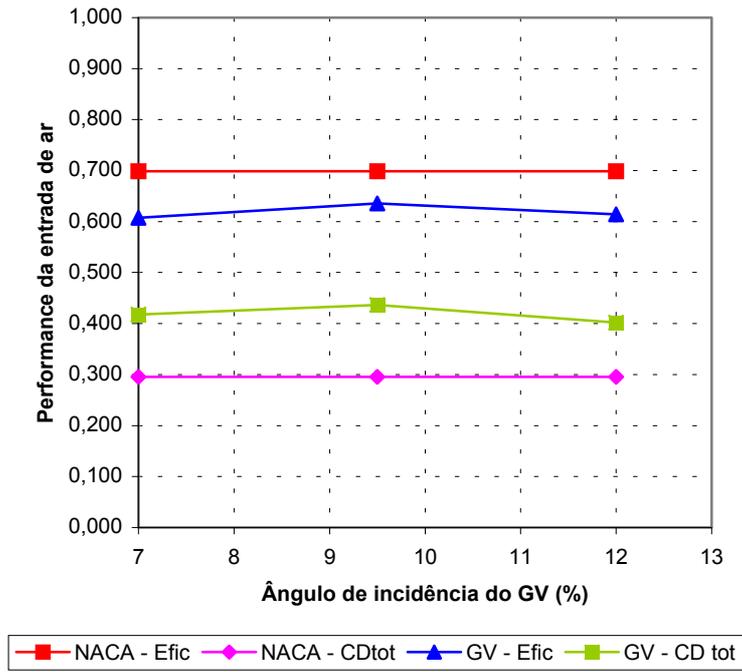


Figura 13. Influência do ângulo de incidência do gerador de vórtices na eficiência e arrasto da NACA.

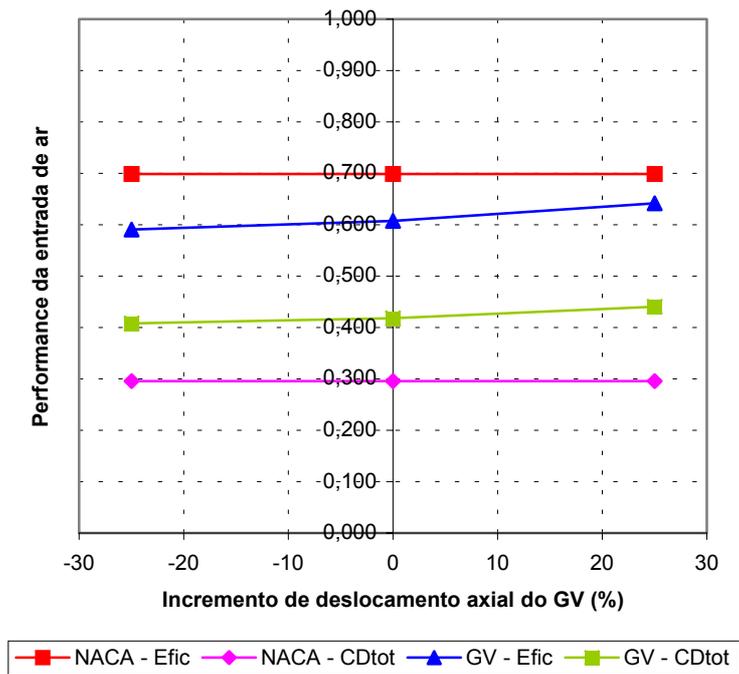


Figura 14. Influência do deslocamento axial do gerador de vórtices na eficiência e arrasto da NACA.

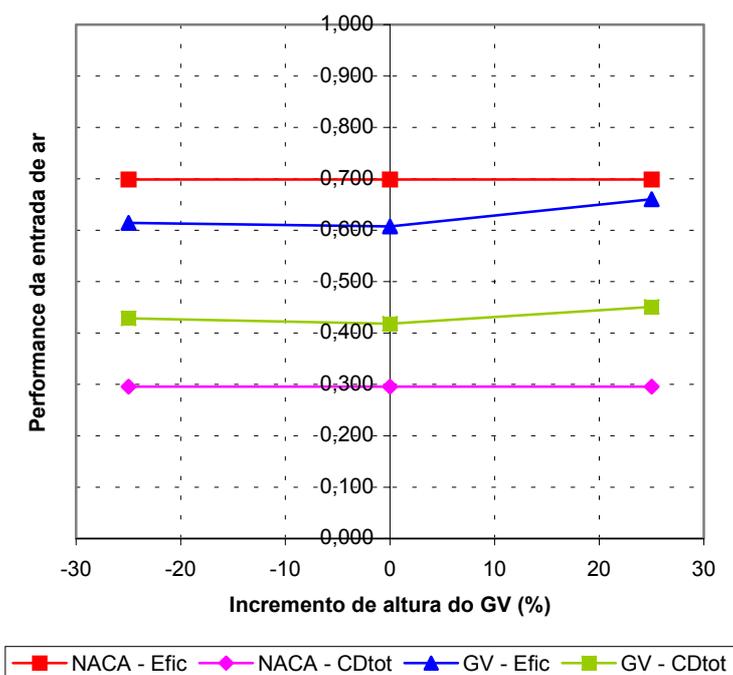


Figura 15. Influência da altura do gerador de vórtices na eficiência e arrasto da NACA.

A Fig. (16) apresenta uma vista frontal do gerador de vórtices e as linhas de corrente do escoamento próximo a sua parede, para a condição de máxima incidência. Pode-se observar a presença de alguns vórtices gerados a partir do bordo de ataque, principalmente próximo do ponto de inflexão na geometria da asa do gerador de vórtice (aproximadamente 50 % da envergadura). Esses vórtices, observados também em outras configurações, são de baixa intensidade e produzem praticamente nenhum efeito sobre o escoamento que entra na NACA. Isto pode ser confirmado pelos baixos valores de sustentação e arrasto de pressão (induzido) obtidos em todas as configurações, mesmo para o caso a alta incidência.

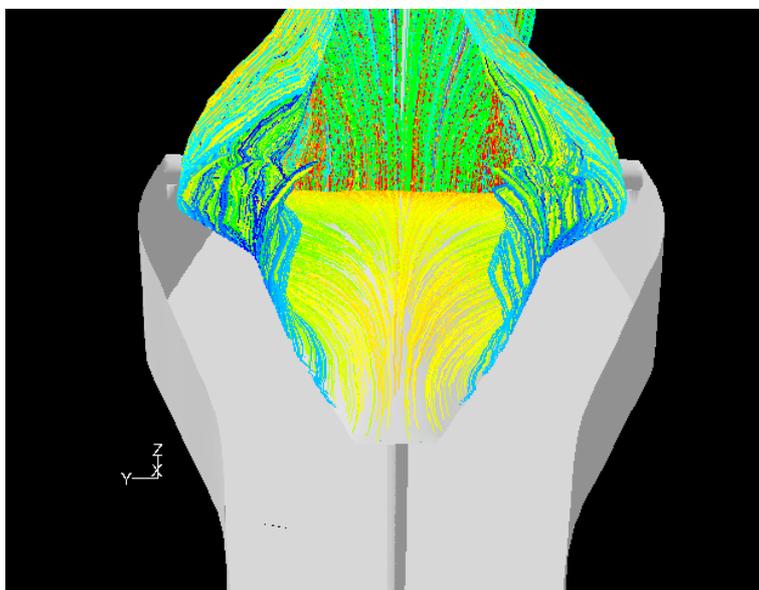


Figura 16. Linhas de corrente do escoamento em torno do gerador de vórtices para o caso de máxima incidência.

Acredita-se que com uma geometria mais propensa a geração de vórtices e principalmente, melhor posicionada em relação à entrada de ar, os resultados possam mudar de maneira considerável. Assim, uma nova geometria para o gerador de vórtices foi definida e testada. Os resultados obtidos são promissores. A Fig. (17) mostra as linhas de corrente dos vórtices gerados nessa nova geometria, em uma condição de baixa incidência. O próximo passo será o acoplamento deste gerador de vórtices ao mesmo domínio de cálculo com a NACA de referência. Serão testadas as mesmas variações geométricas. O gerador de vórtices padrão será testado em outras posições em relação à entrada,

notadamente posições mais adiantadas, com e sem a presença do suporte de fixação, para que sua influência nos resultados seja melhor compreendida.

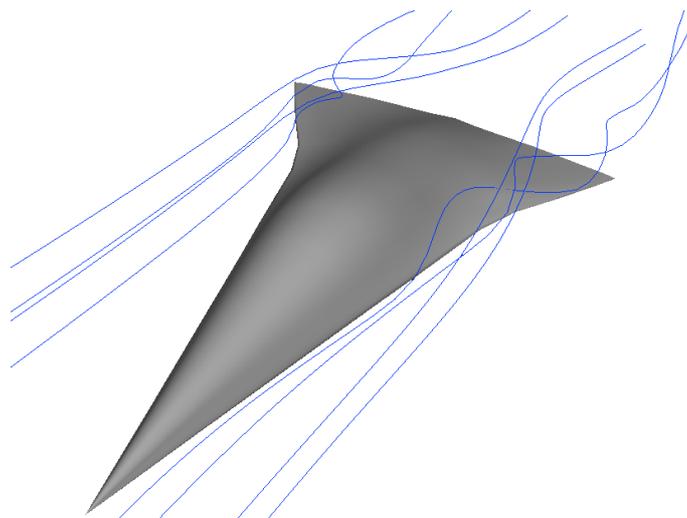


Figura 17. Linhas de corrente dos vórtices do gerador de vórtices com nova geometria.

4. Conclusões

Uma metodologia de análise baseada em CFD está sendo estabelecida para a avaliação de configurações complexas de entrada de ar, cuja tecnologia não está disponível em literatura aberta. Neste primeiro estágio do trabalho, avaliou-se a influência de certos parâmetros geométricos de um gerador de vórtices na performance de uma entrada de ar tipo NACA em uma condição típica de operação de uma aeronave em cruzeiro. Os resultados obtidos com CFD para a NACA sem gerador de vórtices são comparáveis aos valores de projeto da entrada de ar. De uma maneira geral, a introdução do gerador de vórtices nas diversas configurações testadas não foi benéfica, resultando em perdas de eficiência da ordem de 5 a 23 % e aumento de arrasto de 25 a 53 %. As sensibilidades de performance em relação às variações paramétricas impostas à geometria do gerador de vórtices foram relativamente pequenas. A combinação de parâmetros que aparenta prover melhores resultados é: gerador de vórtice de área padrão; ângulo de incidência de $9,5^\circ$; e posição a +25% axial e vertical. Acredita-se que em parte, os resultados com gerador de vórtices não foram benéficos porque a principal característica necessária para aumentar a eficiência da NACA é justamente a formação de vórtices acima da rampa, energizando-se o escoamento que passa pela garganta. No presente caso, os vórtices observados são de baixa intensidade e mal posicionados em relação à entrada da NACA, não conseguindo influenciar positivamente a eficiência da entrada de ar. Assim, com uma nova geometria para o gerador de vórtices, mais propensa a sua formação, e uma análise mais detalhada do seu posicionamento em relação à garganta da entrada de ar, espera-se obter sensibilidades maiores e melhores valores para a eficiência da NACA.

O presente estudo está inserido em um contexto amplo de pesquisa aplicada a novas tecnologias desenvolvidas no âmbito do Grupo de CFD da Embraer. O trabalho apresentado aqui é apenas o início, devendo ser estendido a outras variáveis (inclusive combinações), outras condições no infinito e por fim outras formas geométricas para os geradores de vórtices. Eventuais configurações que apresentarem bons resultados nas análises de CFD, devem ser experimentadas em túnel de vento e/ou ensaio em voo.

5. Referências

- DPW Drag Prediction Workshop, 2001, "Applied aerodynamics conference", AIAA, Anaheim, CA, USA.
- ESDU, 1968, "The compressible two-dimensional turbulent boundary layer, both with and without heat transfer, on a smooth flat plate, with application to wedges, cylinders and cones", Item No. 68020 with amendment C, March 1988, Engineering Sciences Data Unit, London.
- ESDU, 1986, "Drag and pressure recovery characteristics of auxiliary air inlets at subsonic speeds", Item No. 86002 with amendments A and B, July 1996, Engineering Sciences Data Unit, London.
- Devine, R.J. and Cooper, R.K., 2002, "An Investigation into Improving the Performance of Low Speed Auxiliary Air Inlets using Vortex Generators", AIAA, 2002-3264, St. Louis, Missouri, USA.
- Taskinoglu, E.S. and Knight, D., 2002, "Numerical Analysis of Submerged Inlets", AIAA, 2002-3147, St. Louis, Missouri, USA.
- IcemCFD, <http://www.icemcfd.com>
- Fluent, <http://www.fluent.com>

NACA AIR INLET ANALYSIS WITH VORTEXES GENERATOR

William Nogueira de Faria

EMBRAER S/A – Empresa Brasileira de Aeronáutica
Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170 – 12227-901 – São José dos Campos – SP – Brasil
william.nogueira@embraer.com.br

Guilherme Lara Oliveira

EMBRAER S/A – Empresa Brasileira de Aeronáutica
Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170 – 12227-901 – São José dos Campos – SP – Brasil
guilherme.oliveira@embraer.com.br

Abstract. *This report intends to study and analyze, through the numeric simulation, the influence of the geometric parameters of vortex generators upon the efficiency of dynamic pressure recovery and the drag of NACA air inlet, for aeronautical utilization. Initially, a NACA was in theory designed for a certain critical condition of design. The flow on that geometry was numerically analyzed, and the results were used as a reference to the project. Hereinafter, several geometric models of vortex generators were coupled to the NACA, simulated and analyzed, and the results of efficiency and drag were compared with the reference NACA. The results obtained point out that, for the studied case, the NACA performance is predominantly sensitive to the area of the vortex generators. It was not possible to identify the beneficial effects due to the vortex generation. New configurations with improved geometries for vortex generation shall be studied.*

Keywords. *air inlet, vortex generator, CFD.*