

Estudo de Coeficientes Aerodinâmicos Utilizando a Ferramenta VBA – Excel

Prof. Dr. Marcos Antônio Barros

Tálito Borges Brito

Este trabalho visa o tratamento de dados a partir de planilhas do Microsoft Excel para a resolução de questões relacionadas com os coeficientes aerodinâmicos para aeronaves em escoamento subsônico. O trabalho prima pela interdisciplinaridade, aliando elementos da grade curricular do curso de Ciências Aeronáuticas referentes à Física aerodinâmica, como a apresentação dos conceitos de coeficientes tais como arrasto e sustentação, e a disciplina de informática, utilizando a linguagem de programação VBA – Excel. Esta linguagem permitiu a análise potencializada das curvas de polar de arrasto, as quais determinam as características qualitativas de perfis aerodinâmicos. Foi abordado o exemplo que trata da curva polar de arrasto da aeronave Beechcraft Queen Air, que exemplifica algumas das atividades desenvolvidas durante o projeto. Os resultados obtidos mostraram que a aeronave é capaz de gerar uma quantidade de sustentação 13 vezes maior do que o arrasto, dando uma noção do quão seguro é o projeto de uma aeronave e das capacidades da mesma. A utilização de planilhas tornou muito mais fácil e visível quais são os valores dos coeficientes em que há máxima eficiência aerodinâmica, fato que ajuda a desenvolver uma percepção para estimativas em outras aeronaves em que, levando-se em conta as características de projeto, é possível determinar suas capacidades. O trabalho demonstrou ser oportuna a incorporação de novas metodologias no ensino, especificamente, a abordagem de linguagens de programação com vistas ao tratamento analítico.

Palavras-chave: Planilhas Excel; Coeficientes aerodinâmicos; Aerodinâmica; Arrasto; Sustentação.

Abstract

This study aims the processing of data from Microsoft Excel spreadsheets for solving issues related to aerodynamic coefficients for subsonic flow aircraft. The study primes for the interdisciplinarity, combining Aeronautical Sciences course elements such as aerodynamic principles, with the explanation of the coefficients concepts such as drag and lift, besides computer science, using VBA – Excel programming language. This language allowed a potentialized analysis of the drag polar diagram, wich determines qualitative characteristics of aerodynamic profiles. It was shown the Beechcraft Queen Air aircraft example that deals with the drag polar curve, which exemplifies some of the activities developed during the project. The results obtained show that the aircraft is capable of generating an lift amount 13 times bigger than drag, giving a insight of how safe an aircraft's design is and their capabilities. The use of spreadsheets has become much easier and visible to assess the values of coefficients in which there is maximum aerodynamic efficiency, a fact that helps to develop a perception for estimations in other aircraft in which, taking into account design features, it is possible to determine their capabilities. The study shows that the use of programming languages can be a helpfull tool in relation to the analytical treatment.

Keywords: Excel spreadsheets; Aerodynamic coefficients; Aerodynamics; Drag; Lift.

1. INTRODUÇÃO

O setor de aviação é marcado por intenso desenvolvimento tecnológico. Os elevados padrões de segurança e eficiência fazem com que surjam, constantemente, atualizações, melhoramentos e correções nos diversos ramos desta indústria. Devido a isto, é essencial que a formação dos futuros profissionais da aviação acompanhe tais mudanças com vistas a uma melhor qualificação para assumir funções que exigem alta responsabilidade.

Um estudo conduzido pela CANSO (Civil Air Navigation Services Organization) em parceria com a IFATCA (International Federation of Air Traffic Controller's Associations), aponta para a mudança no mundo da navegação aérea, tal como sua profissionalização. Segundo o estudo, para que se possa garantir o sucesso das operações aéreas, faz-se necessário o desenvolvimento de novas competências.

Dentro dessa perspectiva, buscamos entender sobre o que diz o relatório que trata das Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) para os cursos de graduação em Ciências Aeronáuticas, do Ministério da Educação. Segundo essas Diretrizes, os cursos de Ciências Aeronáuticas devem ensinar, como perfil desejado do graduado, capacidade e aptidão para desenvolver conhecimentos a partir de pesquisas, contribuindo com o desenvolvimento e inovação tecnológica, além de promover a elevação da cultura e da competitividade no segmento da Aviação Civil Nacional.

Ainda segundo o DCN, esses cursos devem possibilitar competências e habilidades no sentido de desenvolver raciocínio lógico, crítico e analítico para operar com valores e formulações matemáticas. Deve contemplar Estudos Quantitativos e suas Tecnologias, abrangendo pesquisa operacional, teoria de jogos, modelos matemáticos e estatísticos. São ensinados, também, estudos de caráter transversal e interdisciplinar para enriquecimento do perfil do formando.

Nota-se, portanto, a importância da familiarização com a tecnologia e raciocínio lógico. Desta forma, torna-se bastante interessante o oferecimento de uma ferramenta computacional, que possibilite estimular o aprendizado de uma linguagem de

programação, voltada para questões aeronáuticas, tornando-se uma grande aliada no desenvolvimento das capacidades intelectuais.

Santos e Costa (2006), analisando metodologias, ambientes de ensino e programação para iniciantes em computação e informática afirmam que, para produzir melhores resultados no processo de aprendizagem, é necessária a atualização das didáticas de ensino de forma geral. Desta forma, seria possível, através da utilização de produtos de software, induzir uma melhor compreensão dos tópicos abordados e maior interação entre aluno e o objeto de trabalho, tornando os processos menos abstratos.

Em consonância com estes resultados, Soares *et al.* (2004), na implementação de uma proposta metodológica para o aprendizado de algoritmos, observaram que dentro de disciplinas de graduação houveram melhores resultados no aprendizado por meio de atividades práticas de desenvolvimento de simuladores e ferramentas visuais didáticas de representação de conceitos abstratos.

A possibilidade de entender de forma analítica o desempenho de aeronaves, desde as de instrução até os jatos comerciais, é motivo de estímulo para quem almeja a carreira de piloto, além de um diferencial teórico no currículo.

No Curso de Ciências Aeronáuticas os alunos se deparam com situações que muitas vezes exigem capacidade de abstração e criatividade para que possam compreender o assunto abordado. Especificamente, no estudo da aerodinâmica, é necessário ter em mente a atuação de forças das mais variadas naturezas.

Forças de sustentação, peso, tração e arrastos são algumas das variáveis a serem consideradas (Figura 1). Neste sentido, a utilização de ferramentas computacionais pode ajudar bastante na hora de “visualizar” tais forças a fim de serem estimados coeficientes como o de arrasto, sustentação e número de Reynolds.



Figura 1. Forças atuantes numa aeronave em voo reto horizontal (RODRIGUES, L. E. M. J, 2013).

O fato de termos na grade curricular do curso de Ciências Aeronáuticas da ESAC a disciplina de introdução a informática, possibilitou-nos o contato com planilhas do Microsoft Excel, juntamente com a linguagem de programação Visual Basic for Applications – VBA. As possibilidades de aplicação desta linguagem são inúmeras, podendo abranger áreas como aerodinâmica, termodinâmica, meteorologia e tantas outras ciências que necessitem de análises mais aprofundadas no estudo dos respectivos fenômenos. Com o VBA-Excel pode ser desenvolvido, por exemplo, modelos de escoamento do ar em diferentes perfis aerodinâmicos, obtendo-se os parâmetros envolvidos na produção de sustentação das asas de qualquer aeronave. Sendo assim, utilizando-se dessa ferramenta, na forma de planilhas eletrônicas, este trabalho tem por objetivo a análise teórica de alguns parâmetros relacionados aos arrastos intermitentes, presentes em aeronaves em voo de escoamento subsônico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 AERODINÂMICA

Entender como os objetos se movem através de um fluido é parte do estudo da aerodinâmica. No caso do fluido ser o ar, a compreensão de suas propriedades, características e forças que exerce em corpos sólidos despertam bastante interesse na comunidade científica devido à sua influência na construção de arranha-céus, carros de corrida e aeronaves. A eficiência aerodinâmica de um projeto que interage com escoamentos é um dos principais fatores na determinação do sucesso do produto final.

Há uma gama de produtos cujos aspectos aerodinâmicos são fundamentais para seu correto desempenho e funcionalidade. Desta forma, divide-se a aerodinâmica entre os ramos de construção, veículos (nos quais as aeronaves estão inseridas) e dispositivos especiais (NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2009).

Os fenômenos aerodinâmicos são de fundamental importância para o projeto global de uma aeronave. Muitos aspectos são considerados para se definir a melhor configuração possível para uma melhor análise de desempenho, estabilidade e cálculo estrutural, uma vez que existem muitas soluções de compromisso entre um bom projeto aerodinâmico e um excelente projeto total da aeronave.

Eastlake (2002), em seu artigo sobre os métodos de abordagem do estudo aerodinâmico, defende que tanto as leis de Newton quanto o princípio de Bernoulli podem ser corretamente utilizados para explicar a sustentação gerada pelas asas de um avião. O autor chama a atenção para algumas ideias errôneas (como a igualdade dos tempos de trânsito) e o perigo que se corre ao se fazer um número excessivo de simplificações nos modelos teóricos. Para ele, a conveniência das duas abordagens depende apenas dos tipos de dados que se dispõe para fazer os cálculos.

2.2 FORÇAS ENVOLVIDAS NO ESCOAMENTO

A força de sustentação representa a maior qualidade que uma aeronave possui em comparação com outros tipos de veículo e define a habilidade de uma aeronave se manter em voo, o que, basicamente, significa vencer o peso da aeronave. Considerando-se a asa de um avião (Figura 2), a forma transversal obtida pela intersecção da asa com um plano perpendicular é chamado de *aerofólio*. A terminologia das partes do aerofólio está ilustrada na Figura 3.

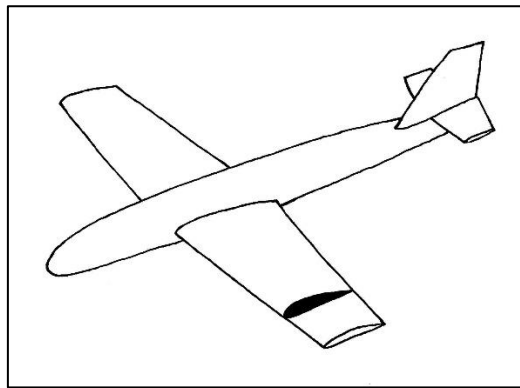


Figura 2. Esquema de uma asa e aerofólio (RODRIGUES, L. E. M. J, 2013).

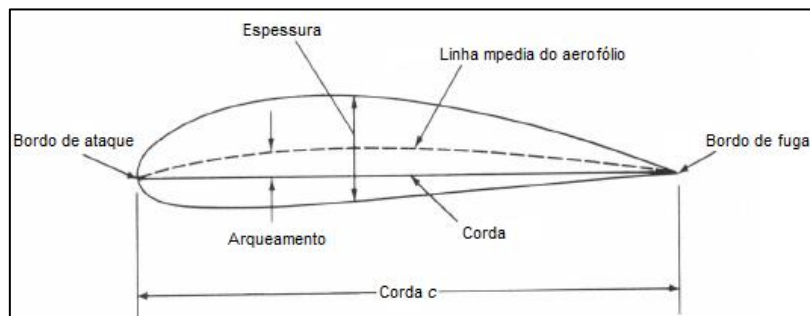


Figura 3. Nomenclatura de aerofólio (RODRIGUES, L. E. M. J, 2013).

A principal característica de projeto de um aerofólio é a *linha média do aerofólio*, que é o local dos pontos intermediários entre as superfícies superior e inferior, como mensurados perpendicularmente à linha média do aerofólio em si. Os pontos mais dianteiros e traseiros da linha média do aerofólio são os *bordos de ataque* e *de fuga*, respectivamente. A linha reta que liga o bordo de ataque ao de fuga é a *corda* do aerofólio, e a distância exata entre o bordo de ataque e o de fuga mensurada ao longo da corda também é chamada de *corda* do aerofólio, sendo representada pelo símbolo c . O *arqueamento* é a distância máxima entre a linha média do aerofólio e a corda, mensurada perpendicularmente à corda. O arqueamento, a forma da linha média do aerofólio e, em menor nível, a distribuição de espessura do aerofólio, basicamente controlam as características de sustentação e momento do aerofólio.

A Figura 4, que mostra um aerofólio inclinado contra uma parede de ar, ilustra mais definições. A velocidade de corrente livre V_{∞} é a velocidade do ar distante e à frente em relação ao aerofólio. A direção de V_{∞} é definida como o *vento relativo*. O

ângulo entre o vento relativo e a corda é o *ângulo de ataque* α do aerofólio. Uma força aerodinâmica é criada pelas distribuições de pressão e de tensão de cisalhamento sobre a superfície da asa. A força resultante é mostrada pelo vetor R . Por sua vez, uma força aerodinâmica R pode ser decomposta em duas forças, uma paralela e outra perpendicular ao vento relativo. O *arrasto* D sempre é definido como o componente da força aerodinâmica *paralelo ao vento relativo*. A *sustentação* L é sempre definida como a componente da força aerodinâmica *perpendicular ao vento relativo*.

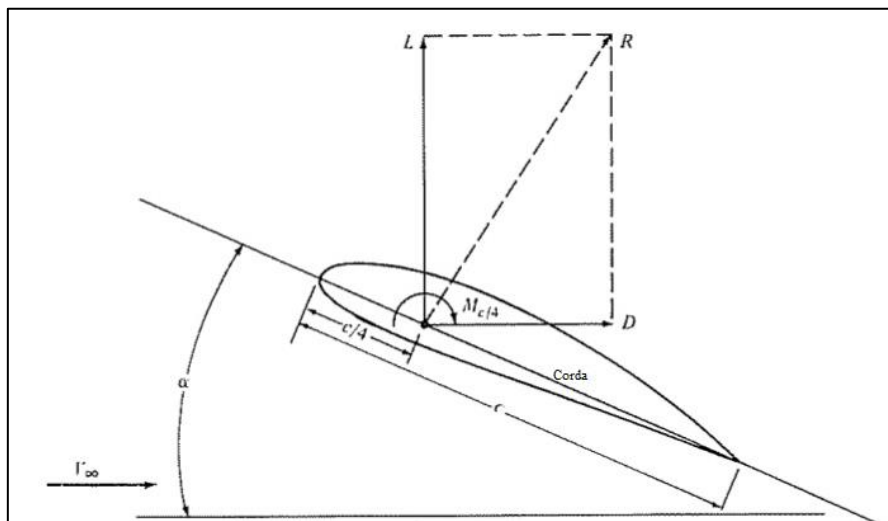


Figura 4. Vento relativo (RODRIGUES, L. E. M. J, 2013).

Além da sustentação e do arrasto, as distribuições de pressão e de tensão de cisalhamento criam um *momento* M que tende a *rotacionar* a asa. Para aerofólios subsônicos, é mais comum analisar momentos em torno de um ponto na corda a uma distância $c/4$ em relação ao bordo de ataque, o *ponto de um quarto da corda*. Esse momento em torno de um quarto da corda é designado $M_{c/4}$.

É intuitivo notar que sustentação, arrasto e momentos em uma asa mudam à medida em que o ângulo de ataque α muda. Variações dessas quantidades aerodinâmicas com α representam algumas das informações mais importantes que os projetistas das aeronaves precisam conhecer. Contudo, há certo ponto sobre o aerofólio em torno do qual os momentos basicamente *não* variam com α . Esse ponto é definido como *centro aerodinâmico*, e o momento em torno do centro aerodinâmico é designado M_{ac} .

Para um avião em voo real, as magnitudes da sustentação (L), arrasto (D) e momento (M) dependem de variáveis tais como:

- Velocidade de corrente livre (V_{∞});
- Densidade de corrente livre (ρ_{∞});
- Tamanho da superfície aerodinâmica, ou seja, a área da asa (S);
- Ângulo de ataque (α);
- Formato do aerofólio;
- Coeficiente de viscosidade (μ_{∞});
- Compressibilidade do fluxo de ar (a_{∞}).

Desta forma, pode-se inferir que para um determinado formato de aerofólio a um determinado ângulo de ataque, as forças envolvidas podem ser representadas do seguinte modo:

$$L = f(V_{\infty}, \rho_{\infty}, S, \mu_{\infty}, a_{\infty}) \quad \text{Equação 1}$$

As forças D e M são funções similares.

Em princípio, para um determinado aerofólio a um certo ângulo de ataque, pode-se encontrar a variação de L realizando-se uma infinidade de experimentos em túneis de vento nos quais V_{∞} , ρ_{∞} , S , μ_{∞} e a_{∞} são variados individualmente e a grande quantidade de resultados gerados é interpretada. Esta é uma forma bastante trabalhosa de se proceder. Para contornar este problema, tenta-se achar relações simplificadoras entre as variáveis através da *análise dimensional*. Utilizando-se, por exemplo, a sustentação L para demonstração:

$$L = ZV_{\infty}^a \rho_{\infty}^b S^d a_{\infty}^e \mu_{\infty}^f \quad \text{Equação 2}$$

na qual Z , a , b , d , e e f são constantes sem dimensão. Como o termo do lado esquerdo da equação envolve uma força, é notório que o lado direito deva, também, ter dimensões de força. Designando-se as dimensões básicas de massa comprimento e tempo respectivamente por m , l e t , tem-se as dimensões das quantidades físicas envolvidas. A Tabela 1 abaixo, esquematiza estas dimensões:

Tabela 1: Variáveis aerodinâmicas e suas dimensões

Quantidade física	Dimensão
L	ml/t^2
V_{∞}	l/t
ρ_{∞}	m/l^3
S	l^2
a_{∞}	l/t
μ_{∞}	$m/(lt)$

Desta forma, equacionando-se as dimensões dos lados esquerdo e direito da Equação 1, tem-se:

$$\frac{ml}{t^2} = \left(\frac{l}{t}\right)^a \left(\frac{m}{l^3}\right)^b (l^2)^d \left(\frac{l}{t}\right)^e \left(\frac{m}{lt}\right)^f \quad \text{Equação 3}$$

Através de sistemas de equações, além do uso de suposições simplificadoras e substituições, as quais não são o escopo deste projeto, é possível expressar a força de sustentação como:

$$L = q_{\infty} \times S \times c_l \quad \text{Equação 4}$$

na qual q_{∞} representa a pressão dinâmica $\left(q_{\infty} \equiv \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2\right)$ e c_l é o coeficiente de sustentação.

A Equação 4 é de extrema importância para o estudo de perfis aerodinâmicos. Ela afirma que a sustentação é diretamente proporcional à pressão dinâmica (e, logo, ao quadrado da velocidade), diretamente proporcional à área da asa S e ao coeficiente de sustentação c_l . Isolando-se c_l , tem-se que:

$$c_l \equiv \frac{L}{q_{\infty} S} \quad \text{Equação 5}$$

O coeficiente de sustentação é adimensional e varia com o ângulo de ataque, número Mach (M_{∞}) e o número de Reynolds (Re). Portanto, pode-se escrever:

$$c_l = f(\alpha, M_\infty, Re) \quad \text{Equação 6}$$

Esta forma de análise representa uma economia significativa no esforço e tempo com testes em túnel de vento. Realizando-se uma análise dimensional semelhante sobre o arrasto e momentos, é possível obter equações análogas a equação da sustentação:

$$D = q_\infty S c_d \quad \text{Equação 7}$$

$$M = q_\infty S c c_m \quad \text{Equação 8}$$

na qual c_m é o coeficiente de momento e c é o comprimento da corda.

Em resumo, para um aerofólio de determinado formato, os coeficientes de sustentação, arrasto e momento são definidos como

$$c_l = \frac{L}{q_\infty S} \quad c_d = \frac{D}{q_\infty S} \quad c_m = \frac{M}{q_\infty S c} \quad \text{Equação 9}$$

nas quais

$$c_l = f_1(\alpha, M_\infty, Re) \quad c_d = f_2(\alpha, M_\infty, Re) \quad c_m = f_3(\alpha, M_\infty, Re) \quad \text{Equação 10}$$

3.3 MÉTODOS COMPUTACIONAIS NO ENSINO E VBA

Uma rápida pesquisa sobre o tema é satisfatória para ser perceber que são abundantes as ferramentas computacionais disponíveis para o desenvolvimento de estudos envolvendo aerodinâmica. Apenas a título de exemplo, pode ser empregado o ANSYS (Programa de simulação para Engenharias) para estudar a performance aerodinâmica de um aerofólio NACA (nomenclatura da asa) para baixos valores do número de Reynolds, como indicado na Figura 5, ou utilizar o software LabVIEW (Figura 6) para aferir a distribuição de pressão em um aerofólio para diferentes ângulos de ataque (MATSSON, 2007).

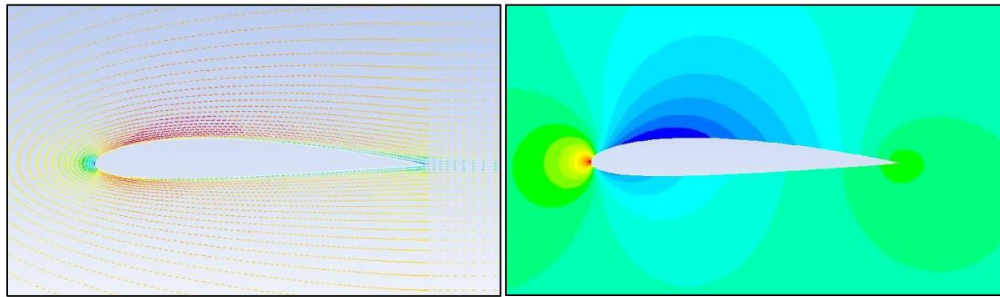


Figura 5. Escoamento utilizando o ANSYS (MATSSON et al., 2016).

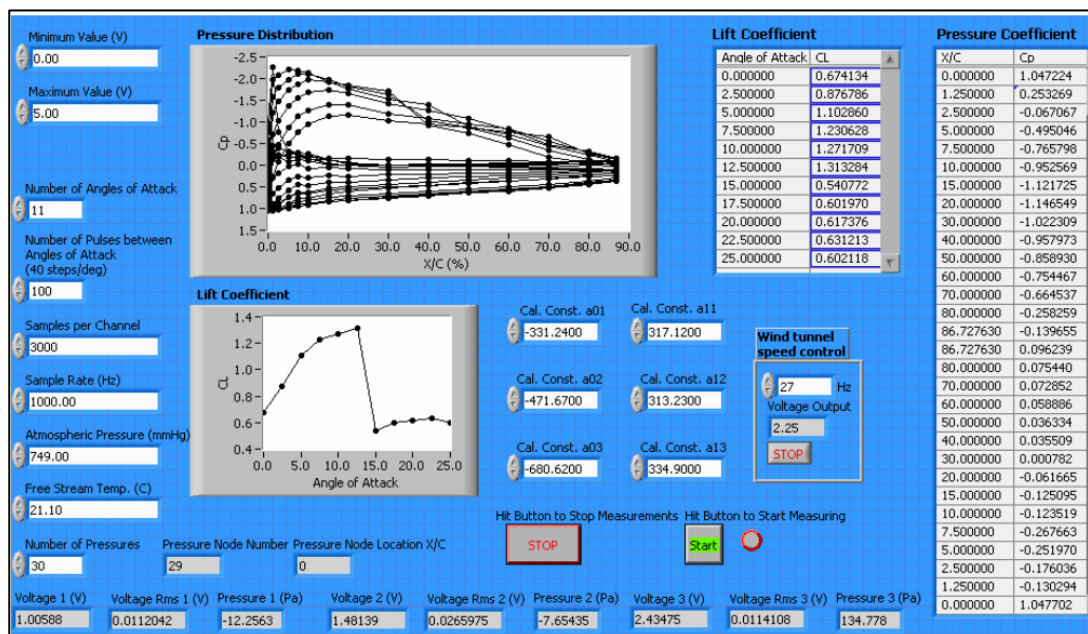


Figura 6. Análise no LabVIEW (MATSSON et al., 2016).

Sales (2015) cita Dreux e Azevedo (2009) acerca dos conceitos do VBA. Segundo os autores, o Visual Basic ou VB é uma linguagem de programação que tem por base a linguagem BASIC tratando-se de uma linguagem de alto nível, que utiliza como modelo de programação a orientação a objetos. O VBA (Visual Basic for Applications) é uma ramificação do VB, desenvolvido para atuar em harmonia com as aplicações do Microsoft Office, tais como: Excel, Word, PowerPoint, Access e outras. Está estreitamente ligado ao desenvolvimento de macros, sendo macro um conjunto de instruções fornecidas ao computador para eliminar trabalhos repetitivos.

As utilidades de programação no Excel são inúmeras. Alguns exemplos podem ser citados:

- Análise de dados científicos;
- Preparação de orçamentos e previsões financeiras;

- Criação de formulários;
- Desenvolvimento de gráficos de dados.

É possível automatizar quase tudo que se faz no Excel desde que sejam escritas as instruções corretas para a realização de uma tarefa. Automatizar uma tarefa utilizando VBA oferece várias vantagens pois o Excel sempre executa-as exatamente do mesmo jeito, com rapidez e sem erros (desde que todas as instruções estejam corretas). Outra vantagem é que qualquer um sem conhecimentos em programação pode executar as tarefas que foram configuradas.

Ao iniciar o Excel, é necessário habilitar a função Desenvolvedor para poder gravar Macros (Figura 7):

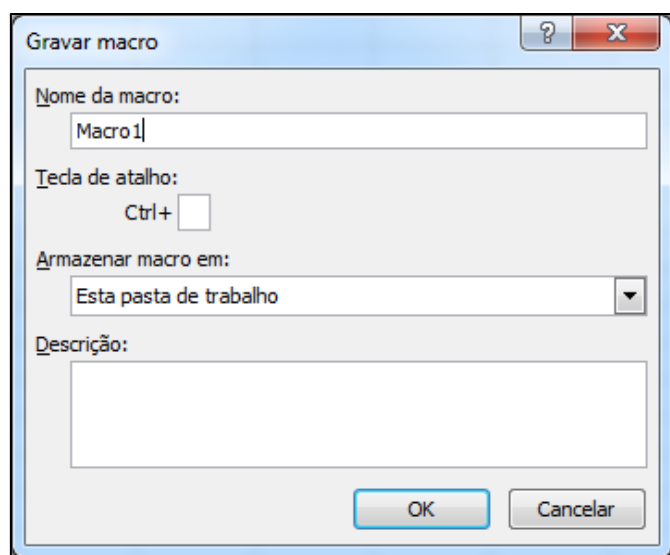


Figura 7. Janela para gravação da macro (fonte nossa).

Para ver o código da Macro escrita, é preciso ativar o Visual Basic Editor-VBE (Figura 8) que é um aplicativo separado no qual se pode escrever e editar as Macros. A partir do Visual Basic, pode-se fazer todas as transformações e depurações necessárias para se chegar na Macro desejada à realização de uma tarefa. Apenas a título de exemplo, pode-se determinar alguns dos inúmeros procedimentos possíveis de serem utilizados:

- Definir procedimentos Sub;
- Designar valores para variáveis;
- Concatenar strings;
- Usar funções VBA integradas;

- Usar constantes VBA integradas;
- Usar construções If-Then.

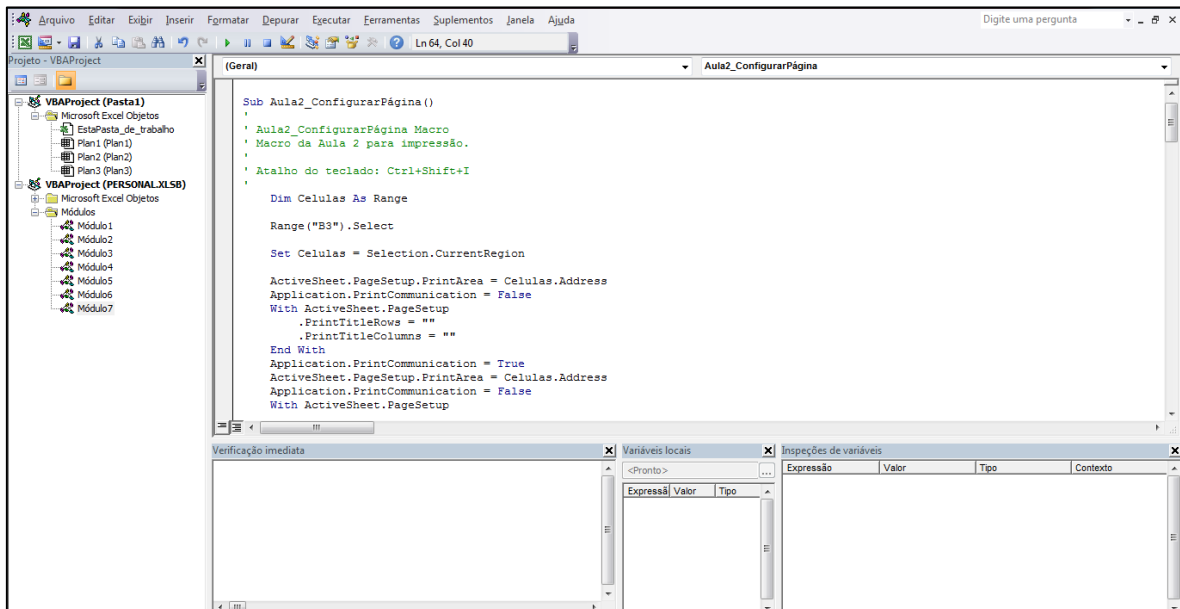


Figura 8. Janela do Visual Basic Editor (fonte nossa).

De início, fizemos um levantamento em relação aos principais tópicos e questões com as quais a maioria dos alunos apresenta dificuldades, segundo Eastlake (2002), dentro de uma perspectiva teórica e prática. A partir dessas informações, selecionamos alguns desses tópicos, ligados diretamente ao voo de uma aeronave e que tem haver com a nossa pesquisa, procurando ter um entendimento de forma mais contextualizada dos aspectos conceituais e matemáticos ali envolvidos. Nesse contexto nos foi importante à leitura de dois livros (Rodrigues, 2013; Anderson, 2015), que apresenta de forma clara e moderna os conceitos básicos da análise das forças aerodinâmicas em voo, viabilizando os assuntos de maneira prática, com diversos exemplos resolvidos e propostos, criando uma ponte entre os aspectos conceituais e uma possível aplicação computacional.

Dentre os tópicos que se mostram de mais difícil assimilação pelos estudantes ligados as Ciências Aeronáuticas, segundo Eastlake (2002), e que nos levou a esta pesquisa, refere-se à curva polar de arrasto de uma aeronave. A partir dessa escolha, o passo seguinte foi escolher uma aeronave em pudéssemos ter acesso ao seu manual, obtendo assim os dados necessários a pesquisa.

A aeronave Beechcraft Queen Air (Figura 9) foi a escolhida. Trata-se de um bimotor utilizado na aviação executiva. Em geral, o seu peso é da ordem de 38300 N , área de asa $27,3\text{ m}^2$, alongamento de 7,5, fator de eficiência de Oswald igual a 0,9, $C_{L\text{máx}} = 1,6$ e $C_{D0} = 0,03$. Com esses dados, retirados do seu manual, nos foi possível determinar a equação polar de arrasto, para em seguida usarmos as ferramentas computacionais. Faremos comentários desse resultado no capítulo seguinte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como já havíamos informado sobre a Aeronave utilizada na pesquisa, cabe aqui relatarmos sobre os cálculos que foram realizados durante a pesquisa, a partir dos dados informados no seu manual de operação. Basicamente, toda a relação existente entre a força de sustentação e a força de arrasto, bem como importantes detalhes sobre o desempenho da aeronave, podem ser obtidos por meio da leitura direta da curva polar de arrasto. Ela representa uma curva que mostra a relação entre o coeficiente de arrasto e o coeficiente de sustentação de uma aeronave completa. Durante as fases iniciais do projeto de uma aeronave, muitas vezes há a necessidade da realização de uma série de interações e refinamentos até se chegar a uma equação ideal que defina a polar de arrasto para o propósito do projeto em questão. A equação da curva é dada abaixo:

$$C_D = C_{D0} + K \cdot C_L^2 \quad \text{Equação 10}$$

Foi utilizado apenas o Excel para todos os cálculos. Inicialmente, foi determinada a constante de proporcionalidade K que é obtida da seguinte forma:

$$K = \frac{1}{\pi \cdot e_0 \cdot AR} \quad \text{Equação 11}$$

$$K = \frac{1}{\pi \cdot 0,9 \cdot 7,5} \quad \text{Equação 12}$$

$$K = 0,047157 \quad \text{Equação 13}$$

Portanto, de acordo com a equação que define a polar de arrasto, tem-se:

$$C_D = 0,030 + 0,047157 \cdot C_L^2$$

Equação 14

Para o traçado do gráfico, foi necessário montar a Tabela 2 de dados com o C_L de 0 até $C_{Lmáx}$. Foi considerado um incremento de 0,2 nos valores do C_L . É importante destacar que quanto maior o número de pontos avaliados mais precisa será a curva obtida. Os outros índices que constam na tabela são: coeficiente de arrasto parasita (C_{D0}), área das asas (AR), número de eficiência de Oswald (e_0), coeficiente de arrasto (C_D) e a relação (C_L/C_D).

Tabela 2: Dados para a curva polar de arrasto.

Polar de arrasto da aeronave Beechcraft Queen Air						
Cl	CD0	AR	e0	K	CD	Cl/CD
0	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,03	0
0,2	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,031886	6,27229
0,4	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,037545	10,65385
0,6	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,046977	12,77234
0,8	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,06018	13,29335
1	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,077157	12,96059
1,2	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,097906	12,25664
1,4	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,122428	11,43532
1,6	0,03	7,5	0,9	0,047157	0,150722	10,61558

De posse dos dados, foram elaborados alguns gráficos mostrados na Figura 10 abaixo:

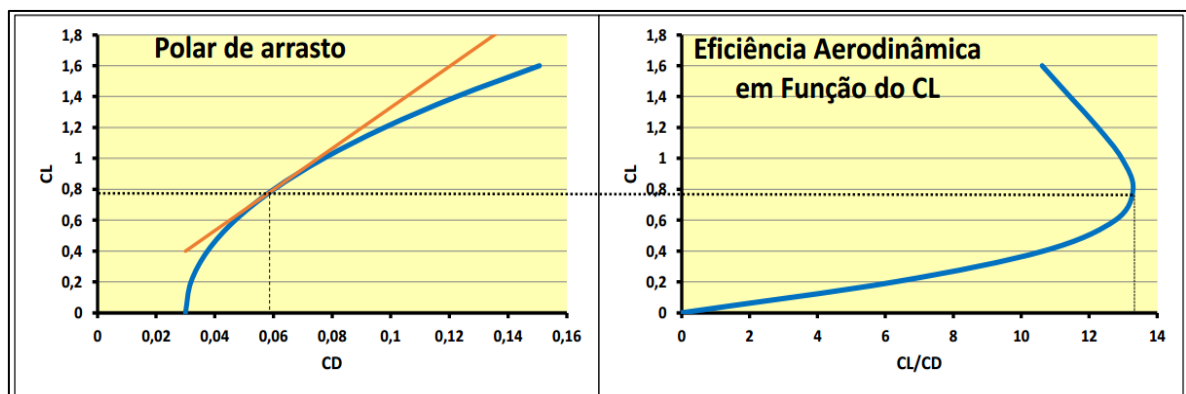


Figura 10. Gráficos da polar de arrasto.

Com estes resultados, pode-se determinar a *eficiência aerodinâmica* ($E_{m\acute{a}x}$). O valor de $E_{m\acute{a}x}$ representa o ângulo de ataque no qual é possível manter o voo da aeronave com a máxima força de sustentação e a menor penalização de arrasto, acarretando importantes características de desempenho da aeronave. Desta forma, $E_{m\acute{a}x}$ é obtida da seguinte forma:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{C_L^*}{C_D} \quad \text{Equação 15}$$

Mas, o coeficiente de sustentação de projeto (C_L^*) e o coeficiente de arrasto de projeto (C_D^*) são calculados como segue:

$$C_L^* = \sqrt{\frac{C_{D0}}{K}} \quad \text{Equação 16}$$

$$C_L^* = \sqrt{\frac{0,030}{0,047157}} \quad \text{Equação 17}$$

$$C_L^* = 0,7976 \quad \text{Equação 18}$$

$$C_D = C_{D0} + K \cdot C_L^2 \quad \text{Equação 19}$$

$$C_D = 0,030 + 0,047157 \cdot 0,7976^2 \quad \text{Equação 20}$$

$$C_D = 0,060 \quad \text{Equação 21}$$

Então, $E_{m\acute{a}x}$ tem o valor de

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{0,7976}{0,060} \quad \text{Equação 22}$$

$$E_{m\acute{a}x} = 13,2934 \quad \text{Equação 23}$$

A Figura 11 mostra como foi preparada a planilha para os dados de entrada no Excel. A depender da necessidade, a entrada de valores pode ser alterada, tendo-se o cuidado de observar a validade das equações para as mudanças.

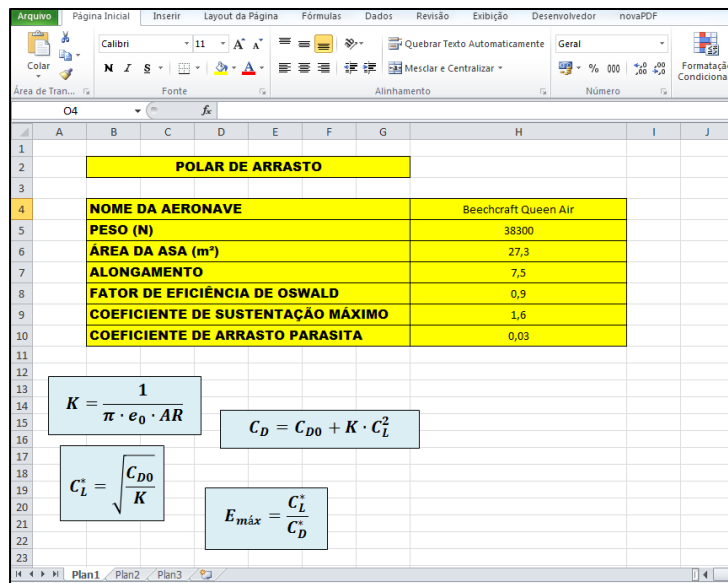


Figura 11. Planilha para a entrada dos dados.

Antes de se chegar no resultado final, ou seja, os gráficos da polar de arrasto e as avaliações sobre os mesmos, foi preciso testar qual a melhor maneira de apresentação dos gráficos (Figura 12). Isto é importante, pois, a depender do incremento utilizado nos valores dos coeficientes, a curva pode dar uma impressão enganosa acerca da eficiência da aeronave.

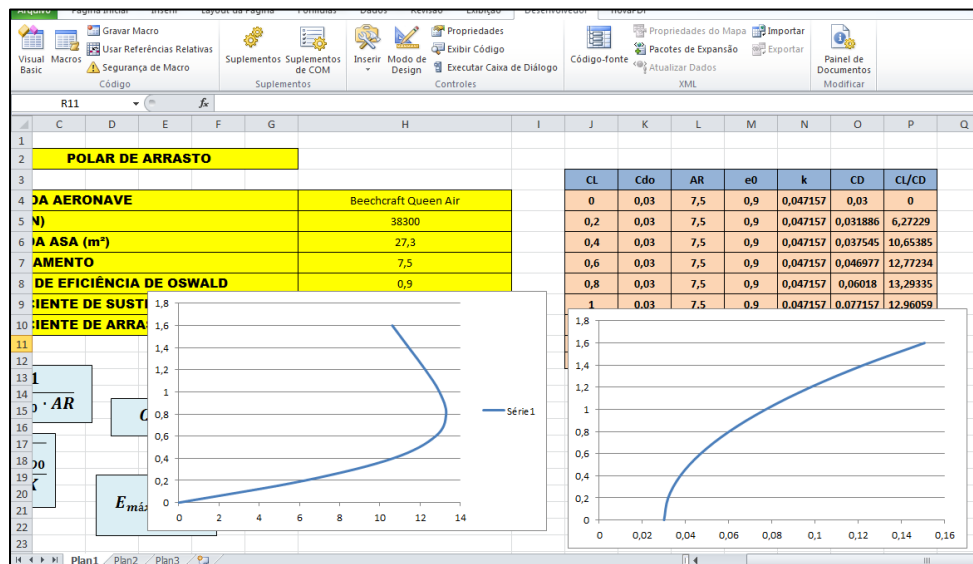


Figura 12. Teste do incremento dos gráficos.

Na janela do Visual Basic Editor (Figura 13), o código pode ser depurado e melhorado de acordo o objetivo:

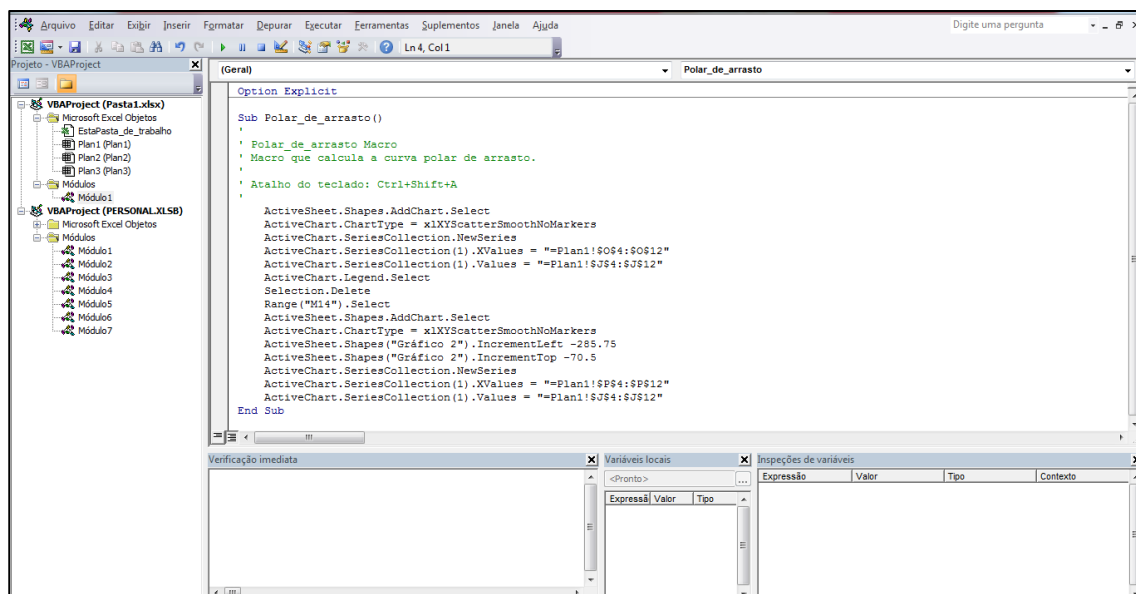


Figura 13. Janela de código.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que a aeronave é capaz de gerar uma quantidade de sustentação mais de 13 vezes maior do que o arrasto. Isto dá uma noção do quão seguro é o projeto de uma aeronave e das capacidades da mesma. A utilização de planilhas tornou muito mais fácil e visível quais são os valores dos coeficientes em que há máxima eficiência aerodinâmica. Poder ‘brincar’ com as planilhas, fazendo variar e extrapolar valores, nos permitiu avaliar as dimensões do projeto da aeronave com as capacidades informadas pelo fabricante, em seu manual. Isso ajuda a desenvolver uma percepção para estimativas em outras aeronaves, em que, levando-se em conta as características de projeto, é possível determinar suas capacidades como limites de manobras, por exemplo. É importante citar que o modelo apresentado é válido para escoamentos subsônicos e que os resultados obtidos são satisfatórios a esta condição de voo.

Com a realização deste trabalho, foi possível tirar algumas conclusões:

- O Excel é uma ferramenta de análise poderosa que pode auxiliar bastante no aprendizado;
- A manipulação de macros no ambiente VBA permite uma infinidade de aplicações que podem ser utilizadas nos mais diversos campos de atuação;

- É extremamente útil a incorporação de novas metodologias no ensino, especificamente, a abordagem de linguagens de programação;
- Os futuros profissionais de Ciências Aeronáuticas devem primar pelo desenvolvimento de habilidades e competências voltadas à solução de problemas do meio aeronáutico; neste sentido, a familiarização com programação pode ser um auxílio para uma profissão que está imersa em constante aprimoramento tecnológico.

7. REFERÊNCIAS

CIVIL AIR NAVIGATION SERVICES ORGANISATION (CANSO); INTERNATIONAL FEDERATION OF AIR TRAFFIC CONTROLLER'S ASSOCIATIONS (IFATCA). **The next generation aviation professional**, fev. 2010. Disponível em: <<http://letani.vsb.cz/wp-content/uploads/Joint-View-on-the-Next-generation-Aviation-Professional-CANSO-IFATCA.pdf>> Acesso em: 15 nov. 2017.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de graduação em Ciências Aeronáuticas, bacharelado**. Distrito Federal, 2012.

Eastlake (2002),

MATSSON, J. A: a student project on airfoil performance. **Mechanical Engineering**, 2007.

MATSSON, J. E. et al. Aerodynamic Performance of the NACA 2412 Airfoil at Low Reynolds Number. **2016 ASEE Annual Conference & Exposition**, 2016.

NÚÑEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. Uso do Túnel de Vento como Ferramenta de Projeto no Design Aerodinâmico. **Design e Tecnologia**, v. 4, p. 1–23, 2009.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica**. 1. ed. São Paul, 2013.

SANTOS, R. P. DOS; COSTA, H. A. X. Análise de Metodologias e Ambientes de Ensino para Algoritmos , Estruturas de Dados e Programação aos iniciantes em Computação e Informática. **Infocomp Journal of Computer Science**, v. 5, p. 41–50, 2006.