

Algoritmo genético aplicado à otimização de um perfil aerodinâmico de uma aeronave rádio controlada

Wesley Cardoso Silva (UFV-CAF) wesley.cardoso@ufv.br

Resumo: O projeto de uma aeronave rádio controlada é constituído de uma série de fatores que exigem do projetista decisões minuciosas acerca de cada parte da aeronave. Em grande parte das vezes, tais decisões estão diretamente relacionadas à experiência do projetista, de forma que o sucesso do projeto depende muito do conhecimento deste desenvolvedor. Neste trabalho é proposto o uso de um algoritmo genético na otimização de um perfil aerodinâmico de asa, com o objetivo de auxiliar nas decisões de projeto da aeronave para maximizar a carga transportada pelo veículo aéreo, considerando as regras da competição SAE BRASIL AeroDesign. Os dados gerados foram obtidos por meio da equação analítica original da distância e por uma expressão aproximada gerada por programação genética. Como resultado são realizadas comparações dos valores obtidos tanto com a equação analítica quanto com a expressão aproximada. Os resultados obtidos apresentaram configurações de perfis aerodinâmicos satisfatórios capazes de transportar massas cujos valores superam alguns perfis aerodinâmicos conhecidos na literatura.

Palavras-chave: Algoritmo genético; Otimização; AeroDesign.

1.Introdução

A competição SAE BRASIL AeroDesign é um programa que desafia estudantes a se envolverem em um projeto multidisciplinar que visa a construção de uma aeronave capaz de atender requisitos conflitantes como minimização do peso da aeronave e maximização da carga transportada por ela, instrumentação e ensaios em voos dos protótipos (SAE, 2019). Esse desafio, realizado anualmente, impulsionou o surgimento da equipe Acauã na Universidade Federal de Viçosa- Campus Florestal, que desde o ano de 2011 participa da competição. Inicialmente a equipe foi formada por estudantes do curso de física, no entanto, atualmente é composta por discentes de outras áreas como engenharia e ciência da computação.

Projetar um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) exige dos desenvolvedores conhecimentos que são adquiridos de experiências anteriores, que influenciam em decisões

assertivas sobre vários aspectos importantes da construção da aeronave. As possibilidades são inúmeras, portanto, é necessário que se tenha uma ideia que norteie o projeto e recursos que auxiliem na tomada de decisão, de forma que possam ser adaptados às necessidades e características de um determinado problema.

Em Pellegrini (2015) a pergunta norteadora trata-se do comprimento de pista necessário para a decolagem e pouso de uma aeronave. Tendo em vista um fator importante que é a distância máxima que o VANT pode percorrer, distância essa que é fornecida pela competição, assim será preciso encontrar os parâmetros ideais, de partes específicas da aeronave para se alterar, e também é necessário saber quais seriam seus melhores valores para obtenção de um bom projeto.

Em Hua et al (2003) é destacada a importância da experiência do projetista para a construção da aeronave e o surgimento de métodos para redução dessa dependência. Diante das mais variadas possibilidades de solução, torna-se necessário que os envolvidos no projeto tenham ferramentas que deem respaldo positivo para as decisões tomadas e até mesmo reduza o tempo dedicado a determinadas tarefas.

Nesse contexto, a computação evolucionária é uma técnica que possui potencial para auxiliar no desenvolvimento do projeto de um VANT. O presente trabalho objetiva resolver, por meio de um algoritmo genético, um problema de otimização da distância percorrida por um VANT em sua decolagem, a fim de se determinar neste projeto a carga máxima que essa aeronave conseguirá transportar.

2. Otimização em *aero design*

Desde melhorias no processo de desenvolvimento de uma aeronave até o aperfeiçoamento de perfis aerodinâmicos, a otimização em *aerodesign* tem sido proposta como uma das mais confiáveis alternativas para obtenção de bons resultados para os mais variados projetos. As demandas apresentadas pela competição SAE BRASIL AeroDesign podem ser vistas como uma subárea dos problemas de *aerodesign* dos quais os algoritmos genéticos atendem com eficácia e podem gerar inovações para soluções de problemas em outros setores da aviação.

Com a otimização tão presente em soluções diversas, vale ressaltar propostas como em Da Silva, Gelaim e Egert (2016) que apresentam o desenvolvimento de metodologia automatizada para obtenção de um layout de aeronave, a qual leva em conta um número de 1563 perfis aerodinâmicos

conhecidos e, pelo uso de algoritmo genético, obtém-se resultados que levam em consideração a distância percorrida na decolagem. Destaca-se também Ng e Leng (2002) que apresentam configurações para aeronaves rádio controladas que priorizam a redução de peso e obtenção de parâmetros geométricos com métodos auxiliares ao algoritmo genético, como um algoritmo gerador de malhas para obtenção de parâmetros da forma da asa e do aerofólio.

Portanto, pela variedade e versatilidade de soluções que os algoritmos genéticos fornecem para os problemas, este trabalho apresenta mais uma alternativa para obtenção de valores da carga transportada pela aeronave, fornecendo assim alguns parâmetros de perfis aerodinâmicos para sua asa capazes de satisfazer tais demandas.

3. Descrição do problema

A abordagem inicial proposta para este trabalho consistia em utilizar uma equação analítica específica que envolve a carga paga (carga transportada pelo VANT) a fim de maximizá-la. Entretanto, isolar a carga paga da expressão não foi algebricamente possível, pois a equação em questão é transcendental. Sendo assim, uma possível abordagem é a obtenção de uma expressão equivalente gerada por programação genética na qual seja possível isolar a carga paga. Até o momento, conseguiu-se obter diversas expressões aproximadas de qualidade, mas em nenhuma delas foi possível isolar a carga paga ainda. Desta forma, os experimentos realizados neste trabalho consistiram na utilização de um algoritmo genético, o qual possui como função objetivo a equação analítica original da distância ou sua expressão aproximada gerada por programação genética, para se obter perfis aerodinâmicos de asa e em seguida realizar um estudo comparativo entre os valores obtidos por essas duas expressões.

A equação da distância, embora não envolva explicitamente a carga paga¹ em seus termos, apresenta grande potencial para a solução do problema por também envolver parâmetros importantes na obtenção de um perfil aerodinâmico de asa e estar associada à massa total do conjunto aeronave e carga transportada.

¹ A equação da distância tem em seus termos a massa total, que consiste na soma da massa da aeronave e da carga paga.

As características da asa, especialmente seu formato na projeção horizontal influenciam fortemente sobre o seu desempenho, de forma a comprometer a estabilidade do voo e a máxima sustentação (ROSA, 2006). Com base nesses conceitos a escolha de perfil aerodinâmico para a asa é de extrema importância e se encaixa perfeitamente nos requisitos levantados para obtenção de um modelo matemático que envolva a distância e massa da carga.

O perfil aerodinâmico pode ser definido como uma superfície construída com o intuito de se obter uma reação aerodinâmica pelo escoamento do fluido ao seu redor (RODRIGUES, 2014). Pela análise do perfil pode-se notar características geométricas que influenciam diretamente no desempenho do avião e são responsáveis tanto pela sustentação da aeronave durante o voo quanto para a decolagem. A Figura 1 apresenta características geométricas de um perfil aerodinâmico.

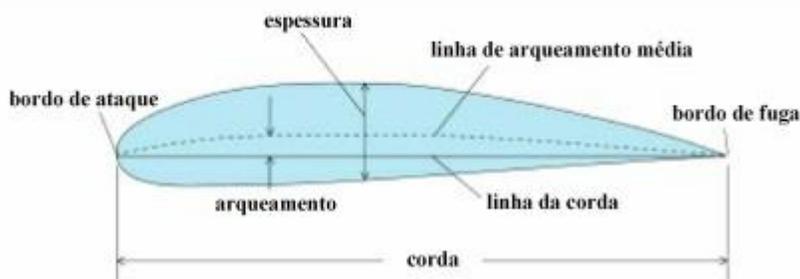


Figura 1- Características geométricas de um perfil aerodinâmico. Fonte Rodrigues (2014).

4. Metodologia

Otimização de projetos de *aerodesign* com foco no perfil aerodinâmico, levando em consideração elementos que são influenciados pelas características geométricas, como o coeficiente de sustentação, tem se apresentado como uma possibilidade de bons resultados e por isso vem sendo muito explorada, como em Ng e Leng (2002) que apresenta uma análise sobre soluções conhecidas como a montagem dos componentes do VANT diretamente na asa para se excluir a necessidade de uma fuselagem, uma configuração em que a aeronave não possui cauda, e também propõe um projeto que se destaca por acrescentar uma solução que inclui um elemento o qual os autores chamam de “vazamento de fluxo”.

Assim, o problema encontrado visa propor um perfil aerodinâmico que resulte em bons valores de carga transportada pelo VANT, sendo solucionado pelo uso da equação da distância como função objetivo e tendo como variáveis de decisão M , CL_{Max} , α e ao . A Tabela 1

apresenta a definição das variáveis que serão usadas como genes no algoritmo genético e seus respectivos valores de máximo e mínimo que serão utilizados como restrições de cada variável.

TABELA 1 - Variáveis de decisão com restrições de limite e descrição.

Símbolo	Mínimo	Máximo	Unidade	Descrição
ao	0,100	0,150	(°) ⁻¹	Coefficiente linear curva cl-alfa perfil
αo	-2,224	-0,050	°	Ângulo de ataque para sustentação nula
clmax	1,000	1,300	adm	Coefficiente de sustentação máxima
M	2,303	2,997	Kg	Massa total (massa vazio + massa carga paga) na decolagem

A equação da distância, que será a função objetivo ou *fitness* do problema é apresentada na Equação 3 em função das Equações 1 e 2, essa equação corresponde à distância que a aeronave deverá percorrer durante a decolagem, dado um conjunto de parâmetros que serão calculados a partir da atribuição de valor das variáveis de decisão e de constantes previamente definidas.

$$f_1(x) = \frac{M}{2 * (A1 + 0.5 * \rho * S * (\mu * CLto - CDmin - \phi * K * (CLto - CLmd)^2))} \quad (1)$$

$$f_2(x) = \frac{(A1 + 0.5 * \rho * S * (\mu * CLto - CDmin - \phi * K * (CLto - CLmd)^2)) * 2 * \gamma^2 * M * g}{(C1 - \mu * M * g) * \rho * S * CLmax} \quad (2)$$

$$f(x) = f_1(x) * \ln(f_2(x) + 1) \quad (3)$$

A Tabela 2 mostra as variáveis calculadas e suas respectivas faixas de valores aceitáveis. A execução da função *fitness* depende do cálculo prévio dessas variáveis, sendo que estas também possuem dependência dos valores das variáveis de decisão, portanto a ordem de execução da função *fitness* começa com a definição de valores aceitáveis para Alphao, M, CLMax e ao, para em seguida executar as funções que calculam os valores dessas variáveis e finalizar aplicando tais valores na função *fitness*.

TABELA 2 - Variáveis calculadas.

Símbolo	Mínimo	Máximo	Unidade	Fórmula
W	22,523	29,311	N	$M * g$
a	0,065	0,086	(°) ⁻¹	$\frac{(rad * ao * \cos(A))}{\sqrt{\left(1 + \frac{(rad * ao * \cos(A))}{((\pi * ef * AR)^2)} + \frac{(rad * ao * \cos(A))}{((\pi * ef * AR)^2)}\right)}}{rad}$
CLmd	0,002	0,094	adm	$-0,5 * a * \alpha o$
CLmax	0,689	0,985	adm	$clmax * (a / (0,85 * ao))$
CDmin	0,032	0,033	adm	$CDo - \varphi * K * CLmd^2$
CLto	0,204	0,296	adm	$CLmd + (m / (2 * \varphi * K))$
Vestol	10,811	14,083	m/s	$(2 * M * g / (\rho * S * CLmax))^{1/2}$
Vto	14,054	18,308	m/s	$\gamma * Vestol$

A Tabela 3 apresenta as constantes calculadas que são usadas para obtenção de algumas variáveis calculadas.

Tabela 3 - Tabela de constantes calculadas.

Símbolo	Valor	Unidade	Fórmula
Φ	0,852	adm	$((16 * h/b)^2) / (1 - (16 * h/b)^2)$
AR	4,971	adm	b^2/s

As constantes apresentadas na Tabela 4 estão presentes na equação da distância, ou são necessárias para se calcular algum valor o qual esta equação dependerá. Vale ressaltar que a distância representada por d na Tabela 4 não é a mesma distância que se pretende calcular na *fitness*. A distância contida na Tabela 4 é o tamanho máximo de pista que o avião pode percorrer durante a decolagem na competição.

TABELA 4 - Tabela de constantes.

Símbolo	Valor	Unidade	Descrição
S	0,340	m^2	Área da asa
b	1,300	m	Envergadura da asa
A1	-0,026	N* s/m	Coefficiente angular da curva T(v)
C1	10,800	N	Coefficiente linear da curva T(v)
g	9,780	m/s	Gravidade
ρ	1,225	kg/m^3	Densidade do ar
CDo	0,033	adm	Coefficiente de arrasto parasita
μ	0,030	adm	Coefficiente de atrito estático
M0	1,200	Kg	Massa da aeronave vazia
d	59,00	m	Distância percorrida na decolagem
ef	0,980	adm	Razão de eficiência da asa
h	0,195	m	Altura da asa
γ	1,300	adm	Fator de segurança na decolagem
K	0,087	adm	Fator K
Λ	0,524	radiano	Ângulo de enflechamento
rad	57,300	°/rad	Grau

4.1 Algoritmo genético

De acordo com Von Zuben (2000) a computação evolucionária pode ser vista como técnicas e procedimentos, bioinspirados, genéricos e adaptáveis, utilizados para obtenção da solução de problemas complexos, em que outras técnicas são ineficazes ou não são aplicáveis. Neste trabalho a aplicação da computação evolucionária se dá pelo uso de um algoritmo genético, o qual possui a estrutura descrita pela Figura 2.

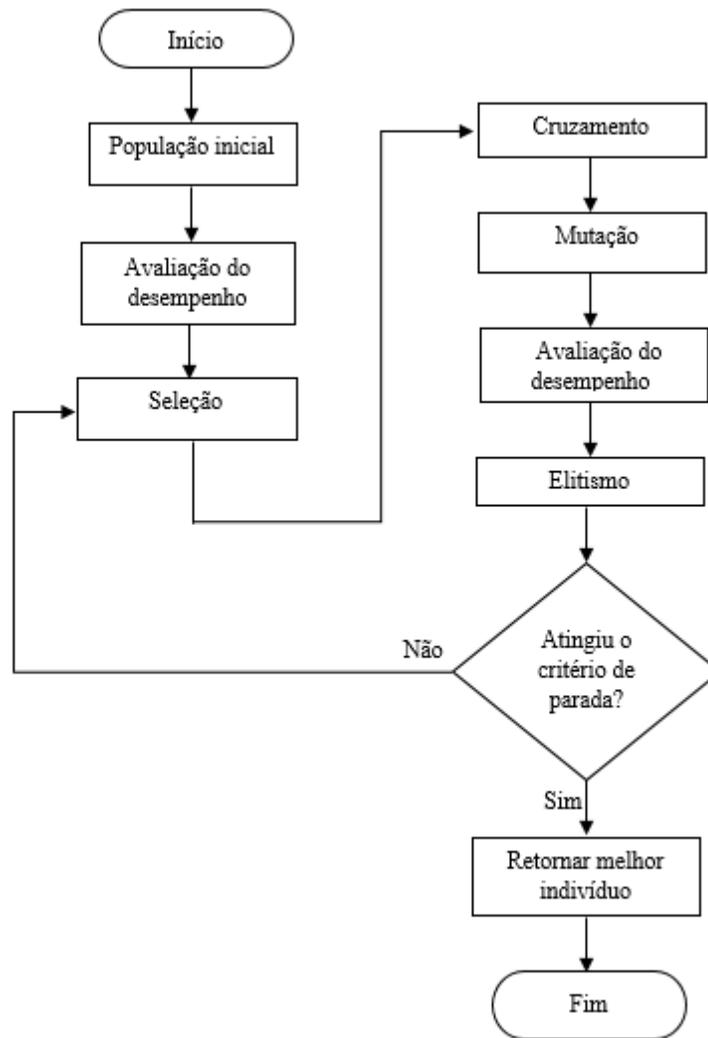


Figura 2 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.

Uma breve explicação das funções descritas no fluxograma pode ser dada começando pela função *População Inicial* que tem como característica importante a geração de uma população a qual seus indivíduos são vetores de números reais no presente trabalho, de tamanho definido pela quantidade de variáveis de decisão do problema. Os valores atribuídos a cada posição do vetor são chamados de genes e são definidos pela restrição de cada variável de decisão e inicialmente gerados de forma aleatória.

A função *Avaliação do Desempenho* se dá pela aplicação dos valores da população na função objetivo, sendo que cada indivíduo gerará uma solução e seu desempenho está associado ao quão boa é essa solução para o problema.

A *Seleção* é uma forma de se obter os melhores indivíduos, de modo que todos participem desse processo, levando em consideração os resultados dos indivíduos, obtidos na função objetivo,

como um fator decisivo para definir seu grau de aptidão para participar da próxima geração. O método utilizado neste trabalho para realizar a seleção foi o método *Torneio* de tamanho dois.

O *Cruzamento* é uma função que combina os genes de dois indivíduos e gera um novo indivíduo, esse cruzamento possui uma taxa que define qual percentual da população irá cruzar, uma vez que essa taxa faz parte dos parâmetros de cada algoritmo genético é possível que até toda a população faça parte do cruzamento. A taxa utilizada neste trabalho foi de 50% de probabilidade de cruzamento, sendo que este cruzamento foi polarizado.

A *Mutação* ocorre em apenas um percentual da população, o qual é definido como parâmetro do algoritmo, e pode ser explicada como uma perturbação do indivíduo que modifica parte de seus genes. O método utilizado foi de mutação não uniforme e a probabilidade de ocorrência é inicialmente igual a 30%, sendo diminuída ao longo das gerações. E finalmente a função *Elitismo* que pode ser definida como a seleção dos indivíduos que apresentaram melhor desempenho e, portanto, farão parte da nova geração. Em todos os experimentos realizados neste trabalho foram feitas cinquenta execuções com cem iterações cada, para uma população de oitenta indivíduos

Para o caso específico deste trabalho, a programação genética foi utilizada como uma ferramenta para obtenção de uma expressão equivalente para a equação da distância, a fim de tentar obter uma expressão na qual a carga paga pudesse ser isolada. Desta forma vale ressaltar que as técnicas de programação genética e algoritmo genético fazem da parte da computação evolucionária, e por estarem nesse mesmo grupo apresentam características comuns como o fato de fazerem uso de operadores de *cruzamento*, *seleção* e *mutação*. A diferença entre estas técnicas se destaca na forma como suas características são apresentadas e o formato em que são representadas as soluções (FOGEL, 2000 apud FRANZEN, 2002).

Como no algoritmo genético, a programação genética começa com uma população inicial gerada de forma aleatória, entretanto os indivíduos são programas de computador compostos por funções e terminais apropriados ao domínio do problema, representados por estruturas de árvores sintáticas. Essas funções podem ser operações aritméticas, funções lógicas e até mesmo funções matemáticas padrões (KOZA, 1992).

5. Experimentos e resultados

Foram realizados quatro experimentos com o objetivo de encontrar um perfil aerodinâmico de asa para um VANT que fosse capaz de ter um bom desempenho na competição. O primeiro experimento realizado fornece informações a respeito da distância mínima e máxima que a aeronave deverá percorrer e seus respectivos parâmetros de perfil aerodinâmico.

O segundo experimento é direcionado a se obter o maior valor de massa transportada pelo VANT realizando minimizações da distância em várias etapas, obtendo em cada uma delas um novo perfil aerodinâmico, sendo que a cada etapa o valor da faixa de massa é acrescida de uma quantidade pré-determinada, fornecendo ao fim do experimento uma evolução da distância com relação à massa transportada.

O terceiro experimento é semelhante ao segundo, entretanto não se estabelece uma faixa de variação para a massa, essa massa é definida com um valor fixo para cada minimização. A ideia de se fixar o valor de massa surgiu por não ter sido possível isolar a carga paga de sua expressão analítica. Desta forma, neste experimento resolve-se sucessivos problemas de minimização, sendo que cada minimização consiste em uma etapa e a cada etapa o valor de massa é acrescido de 0,05 Kg.

O quarto experimento fixa os valores de a_0 , α_{max} e CL_{max} para se minimizar a distância, obtendo assim valores para a massa total. Os valores fixos dos parâmetros são configurações de perfis aerodinâmicos conhecidos que se pretende verificar o máximo de massa transportada com uma distância de até 59 metros.

5.1 Primeiro experimento: perfis aerodinâmicos para distância mínima e máxima

O primeiro experimento realizado é desenvolvido em duas etapas, a primeira consiste em minimizar a distância percorrida pela aeronave a fim de se obter um comprimento base de pista que servirá como parâmetro de referência para o projeto. Este comprimento mínimo poderá ajudar o projetista a desenvolver a aeronave com a noção do menor valor disponível para ser percorrido e até mesmo obter premiação para equipe em casos que se valorize a mínima distância percorrida na decolagem. Portanto pretende-se com esse experimento descobrir o perfil que levanta voo utilizando o menor comprimento de pista disponível.

Na segunda etapa executa-se o algoritmo com o intuito de maximizar a distância, dentro de uma faixa que respeite as normas da competição, e encontrar o melhor valor de massa. Ou seja, objetiva-se descobrir o perfil que levanta voo utilizando o maior comprimento de pista disponível. Desta forma, ao final das duas etapas será possível oferecer uma faixa de distância mínima e máxima que a aeronave precisará para a decolagem sendo que a cada distância mínima ou máxima um perfil aerodinâmico é obtido, bem como um valor total de massa.

A Figura 3 apresenta o desempenho do algoritmo para minimização utilizando a fórmula original da distância e uma aproximação obtida por programação genética (vide anexo A). Ressalta-se que a expressão aproximada gerada por programação genética possui valores de 0,843 e 2,664 para a raiz do erro quadrático médio no treinamento e na validação, respectivamente.

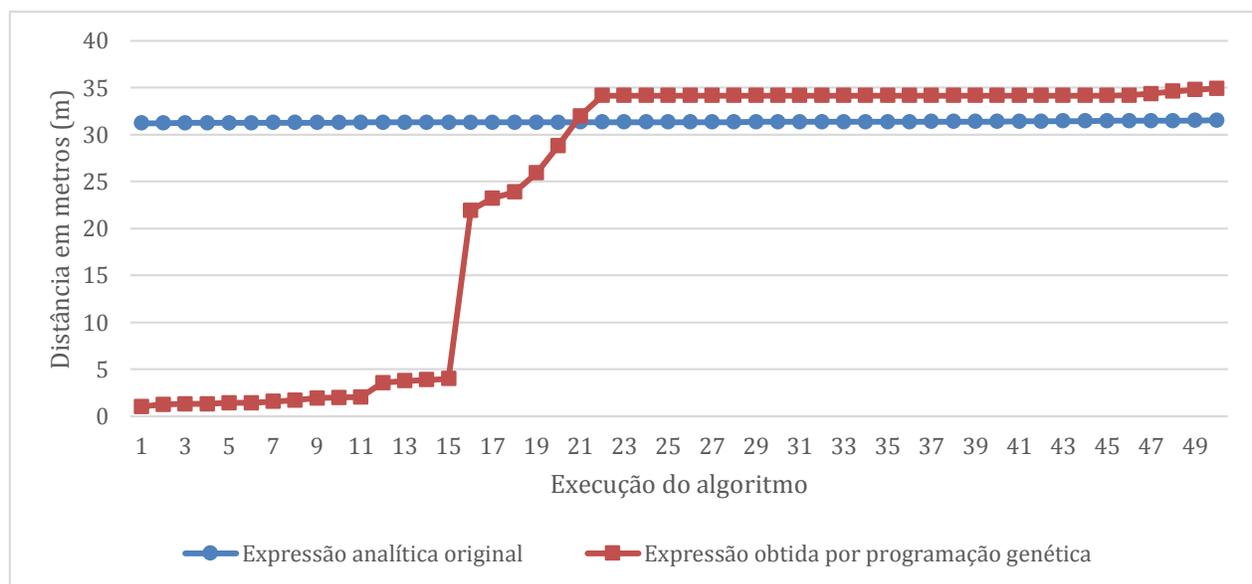


Figura 3 - Gráfico de resultados da minimização da distância.

Na Tabela 5 é possível ver que os valores obtidos pela equação analítica da distância apresentaram pouca discrepância entre si, entretanto se comparados aos resultados obtidos pela fórmula gerada por programação genética nota-se uma diferença considerável. Nos dados usados para treinamento da programação genética, o menor valor de distância utilizado foi 35,21 metros, sendo que ao realizar a minimização, o resultado obtido foi abaixo deste valor e, portanto, passou a ser uma extrapolação ao que foi treinado. Provavelmente por essa razão, o erro ficou acentuado em boa parte das execuções.

Vale ressaltar que ao minimizar a distância percorrida pelo VANT todos os valores de massa obtidos para o perfil foram de 2,303 kg, esse valor é o mínimo, configurado como restrição

do valor da massa no algoritmo, e já era esperado pelo fato da massa influenciar no desempenho do aeromodelo em fatores importantes como alcance de velocidade máxima na decolagem. A configuração para o perfil que obteve melhor desempenho, ou seja, menor distância para decolagem, com a expressão analítica original foi ao: 0,100, α : -2,133, CLMax: 1,300, M: 2,303 e para a expressão obtida por programação genética foi ao: 0,101, α : -1,300, CLMax: 1,224, M: 2,309. Foi realizado um teste com os parâmetros que geraram o menor valor de distância obtido na expressão equivalente, aplicando-os na expressão analítica original. O resultado obtido foi de 35,062 metros, sendo que na expressão equivalente o valor de distância resultante foi de 1,016 metro.

TABELA 5 - Resultados da minimização da distância.

Versão	Mínimo (m)	Média(m)	Máximo(m)	Desvio Padrão (m)
Fórmula original	31,220	31,348	31,534	0,072
Fórmula gerada por programação genética	1,016	23,609	34,910	14,509

A Figura 4 apresenta os valores alcançados na maximização da distância, os resultados obtidos foram 59 metros, sendo que 60 metros é o máximo permitido pelas regras da competição. Este 1 metro é definido como faixa de segurança usada para que ocorra a rotação da aeronave.

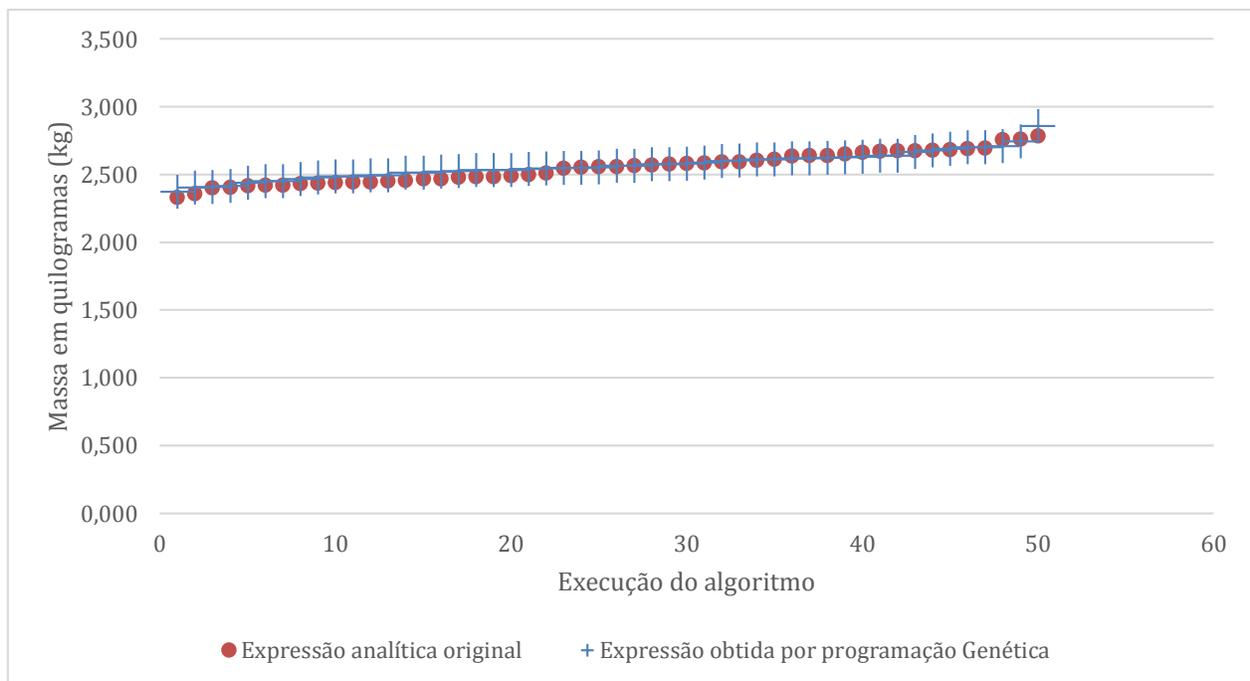


Figura 4 - Gráfico dos valores de massa obtidos na maximização da distância.

Os resultados alcançados, na maximização da distância, pela equação obtida por programação genética não extrapolou a faixa de erro e a configuração de perfil aerodinâmico para o modelo que atingiu melhor desempenho, ou seja, maior massa total foi $\alpha_o: 0,105$, $\alpha_{phao}: -1,828$, $CL_{Max}: 1,263$ $M: 2,785$ para a fórmula original e para expressão obtida por programação genética foi $\alpha_o: 0,101$, $\alpha_{phao}: -1,482$, $CL_{Max}: 1,298$, $M: 2,858$.

A Tabela 6 apresenta dados estatísticos para comparação do desempenho das duas expressões utilizadas.

TABELA 6 - Resultados da massa para o uso de 59 metros de pista na decolagem (máxima distância).

Versão	Mínimo (Kg)	Média (Kg)	Máximo (Kg)	Desvio Padrão (Kg)
Expressão analítica original	2,331	2,552	2,785	0,112
Expressão gerada por programação genética	2,373	2,567	2,858	0,096

5.2 Segundo experimento: obtenção do maior valor de massa

O segundo experimento implementado foi desenvolvido com o objetivo de se alcançar os maiores valores de massa transportada pelo VANT utilizando a expressão analítica original da distância como função objetivo para o problema. A Figura 5 apresenta um algoritmo em alto nível que descreve o funcionamento do experimento 2.

```

01 Massa mínima = 2,303 kg;
02 Massa máxima = Massa mínima + 0,05 Kg;
03 Minimiza distância;
04 Se distância é menor que 59 metros:
05   Massa mínima = Massa máxima;
06   Voltar para o passo 2;
07 Fim Se
  
```

Figura 5 - Algoritmo do Processo de minimização da distância do experimento 2.

O segundo experimento apresentou melhor desempenho em relação ao aumento de massa transportada pelo avião, sendo 2,853 kg o maior valor de massa atingido, tendo como parâmetro máximo de massa definido em 2,997 kg e perfil aerodinâmico gerado com configuração de $\alpha_o: 0,100$, $\alpha_{phao}: -2,209$, $CL_{Max}: 1,300$, $M: 2,853$. O perfil obtido foi testado com o procedimento

do experimento 4 deste trabalho, que confirmou o valor de massa alcançado. Os resultados do experimento 2 são apresentados no gráfico da Figura 6, os valores representados pela linha tracejada correspondem à massa obtida quando a distância extrapolou 59 metros.

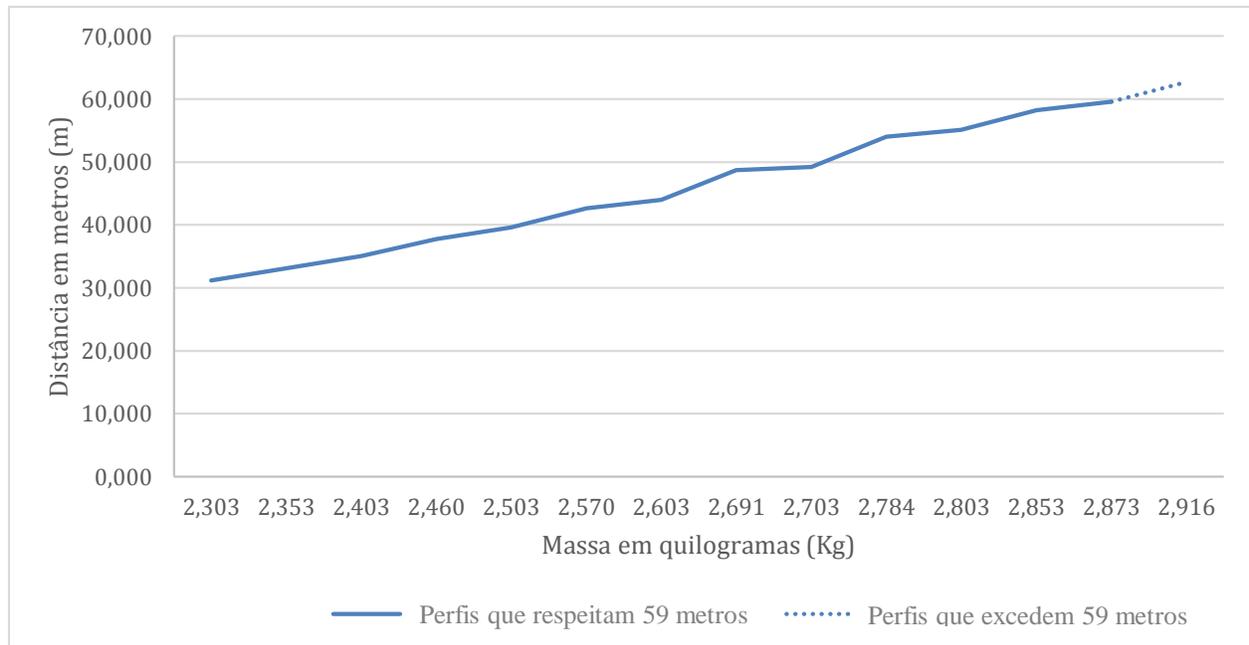


Figura 6 - Gráfico da minimização de distância por faixa de massa. Fonte: Autores (2019).

Foi realizado também um teste da expressão aproximada com os valores dos parâmetros obtidos na fórmula original, sendo que o valor de distância alcançado nessa expressão foi de 57,253 m. Este valor não é exatamente igual, entretanto deve-se considerar o erro da fórmula aproximada.

5.3 Terceiro experimento: minimização da distância

O terceiro experimento é semelhante ao segundo, entretanto não se estabelece uma faixa de valor mínimo e máximo para a massa. Neste experimento fixa-se o valor da massa e a minimização é realizada, em seguida, assim como no experimento 2, a massa é acrescida de 0,05 Kg e é executada uma nova minimização. Este processo inicia-se com o mesmo valor de massa do segundo experimento, que é 2,303 Kg, e finaliza quando a distância ultrapassar 59 metros.

Os resultados deste experimento estão na Figura 7 e apresentaram valores próximos aos obtidos no experimento 2. O maior valor de massa obtido nesse experimento, para uma distância válida, foi de 2,853 Kg e distância de 58,319 metros, o perfil aerodinâmico tem a configuração ao:

0,100, α : -2,050, CL_{max} : 1,300 e M : 2,853. A linha tracejada representa os valores que extrapolaram a distância máxima permitida de 59 metros.

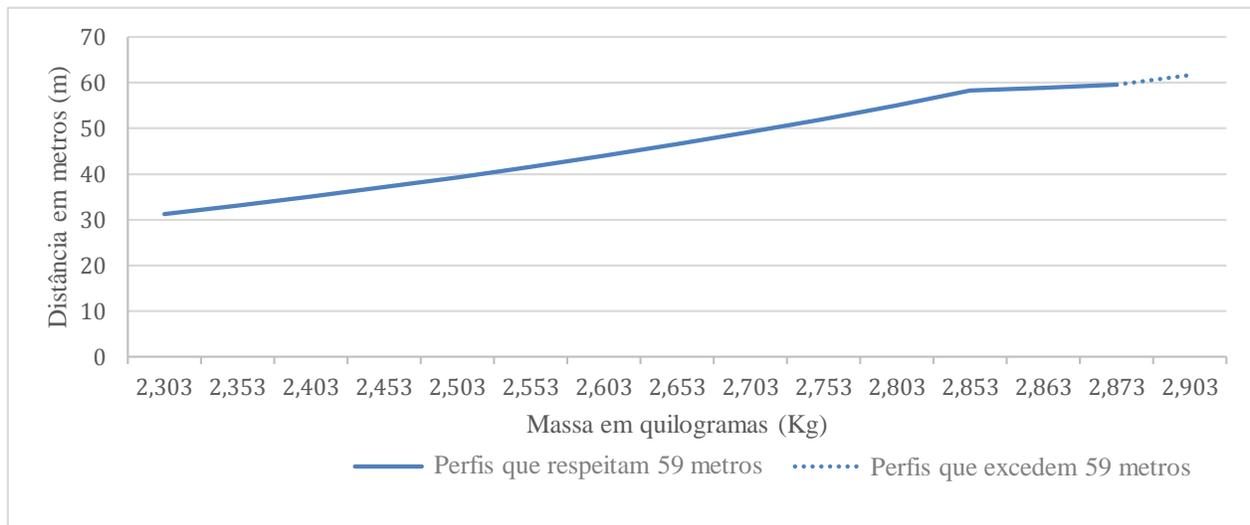


Figura 7 - Gráfico da minimização de distância por faixa de massa.

5.4 Quarto experimento: otimização utilizando perfis aerodinâmicos conhecidos

O quarto experimento consiste em fixar os parâmetros α_o , α e CL_{max} , utilizando valores conhecidos para eles e realizar a maximização da distância, utilizando a expressão analítica original como função objetivo e deixando apenas a massa variar. Os valores fixos dos parâmetros fazem parte de perfis aerodinâmicos conhecidos e que possuem grande potencial para um bom projeto. Neste experimento, para cada perfil, foram 50 execuções do algoritmo, com 100 iterações cada, em todas execuções de um mesmo perfil o valor de massa obtido foi exatamente o mesmo, os valores encontrados estão presentes na Tabela 7.

TABELA 7 – Resultados da maximização da distância com apenas a massa variando.

Nome do perfil aerodinâmico	M (Kg)	α_o ($^{\circ}$) ⁻¹	α ($^{\circ}$)	CL_{max} (adm)
Fauvel	2,618	0,134	-0,050	1,240
Zagi	2,365	0,122	-1,430	1,025
Fx05h	2,77	0,103	-2,200	1,242
Hortenstandard	2,514	0,138	-0,968	1,164
Mh78	2,639	0,141	-0,144	1,271

6. Conclusão

A utilização de um algoritmo genético, como ferramenta para projetos de *aerodesign*, vem se mostrando como um recurso poderoso e versátil para obtenção de modelos satisfatórios, de

acordo com as mais variadas demandas. Neste trabalho foi possível comprovar sua eficiência na obtenção de valores de distância para desenvolvimento do VANT e também encontrar um perfil capaz de carregar maior massa que perfis de grande potencial para bons projetos, já conhecidos na literatura. Obtém-se também um esclarecimento maior a respeito da utilização de uma expressão gerada por programação genética, ressaltando que na etapa 2 do experimento 1 a programação genética apresentou resultados satisfatórios em todas as execuções.

7. Trabalhos futuros

Como trabalho futuro pretende-se realizar a otimização do perfil aerodinâmico da asa utilizando uma equação que envolva a carga paga. Uma expressão analítica para a função objetivo do modelo já foi obtida, porém algebricamente não consegue-se isolar um termo (Carga paga) que é justamente o que se pretende maximizar. Assim, essa carga paga aparece múltiplas vezes na expressão analítica. Será preciso encontrar um meta-modelo preciso em que a carga paga fique isolada, ou seja, em função dos outros parâmetros da expressão analítica, sendo que a programação genética poderá ser uma alternativa viável para obtenção deste meta-modelo.

Referências

- DA SILVA, L. J., GELAIM, T. R., EGERT, F. A. Desenvolvimento de uma metodologia numérica automatizada para layout mais eficiente de uma aeronave rádio controlada. Congresso SAE Brasil 2016, São Paulo.
- FOGEL, David B. *Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*. New York IEE: press, 2000. 270 p. Apud: FRANZEN, Evandro. *Estudo e implementação da programação genética para síntese de fala*. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 12 p.
- HUA, J., KONG, F. M., LIU, P. J., ZINGG, D. W. (2003), *Optimization of Long Endurance Airfoils*, Proceedings of 21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, Orlando, Florida, Junho de 2003. AIAA-2003-3500.
- KOZA, J., R. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge: The MIT press, 1992. 74 p.
- PELLEGRINI, C. RODRIGUES, M. S. (2015). *Um Estudo Analítico da Dinâmica da Decolagem e do Pouso de Aeronaves com Forças Dependentes da Velocidade*, Revista Brasileira de Ensino de Física.
- RODRIGUES, L.E.M.J., *Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-Aerodesign: Aerodinâmica e desempenho*. Salto/SP . 1 ed., 2014. 29 p.

ROSA, E., Introdução ao Projeto Aeronáutico: uma contribuição à Competição SAE Aerodesign. Florianópolis: UFSC/GRANTE : Ed Tribo da Ilha,2006. 3 p. Aerodesign”; UFSC.

SAE; (2019). Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>, acesso em 24/05/2019.

T.T.H., Ng, G.S.B. Leng, 2002, “Application of Genetic Algorithms to Conceptual Design of a Micro-Air Vehicle”. Engineering Applications of Artificial Intelligence 15 (2002) 439–445.

VON ZUBEN, F. J. Computação Evolutiva: uma abordagem pragmática. I Jornada de Estudos em Computação de Piracicaba e Região, v. 1, pp. 25-45, Piracicaba, 2000.

ANEXO A - Expressão aproximada obtida por programação genética utilizada no artigo.

$$\begin{aligned}
 \text{Fitness} = & ((((((0.37868414897573366)^5 \cdot (\text{AR})^8) + (((((6.0)^9 + ((\text{AR} + (\text{PI} + 1.0)) + (8.0 + \\
 & 7.698317371377549\text{E}-6)))) + ((10.0 \cdot (\text{W} \cdot ^5.0)) + (7.0 - (((- \\
 & 0.005043618983894127 + (7.0 \cdot ^9.0)) \cdot (5.0)^9) - \\
 & (5.0)^9)))) + ((\text{AR})^8 + ((\text{W} + ((((\text{d} + \text{PI}) \cdot (\text{PI} + (10.0 \cdot ^10.0))) + (\text{W} \cdot ^5.0)) + (((\text{W} \cdot ^{(5.0 + \text{PI})} + (10.0 / (4.0 \\
 & + -1.991075058403559\text{E}-22)))) + (((((((((6.936378014207371\text{E}-5 - (((\text{d} - \\
 & ((7.0)^6 \cdot (((((2.0 + (0.43925120450922883 + ((\text{d} + (\text{W} \cdot (0.16121381059170636 + (\text{W} \cdot ((0.05052589 \\
 & 3975211233 \cdot \text{PI}) \cdot (\text{PI} \cdot ^{\text{gamma}})))))) + (\text{Vestol} - \\
 & 3.0) + (((9.0 + (0.07215306759316831 / \text{d})) + 10.0) \cdot (((((\text{W} + (\text{W} + (\text{W} + (\text{PI} + 8.0)))) / ((2.0 / \text{CLmax}) + \text{W} \\
 &)) + \text{W}) \cdot ^4.0) \cdot ^10.0)) + (- \\
 & 0.001985643557259871 + (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}})))))) / ((5.0)^8 \cdot \text{d}) + \text{W} + 6.0) + 5.742803557345638\text{E}- \\
 & 16)) - (6.0)^8) - (((8.0 + (9.0 \cdot ^2.0)) \cdot (5.0)^9 + 7.0)) - (5.0 / \text{W}) / 0.9361046727713672) - \text{PI} - \\
 & ((((((((((((\text{C1} / ((\text{AR})^8 \cdot \text{rad})) / (\text{AR} \cdot \text{rad})) - 10.0) - ((((((5.0 + \text{C1}) \cdot ^{\text{W}})^9 - \\
 & (5.0 \cdot ((\text{Vestol} + (((5.0 \cdot ^{\text{Vestol}}) / 1.0) - (\text{Vestol} / \text{PI})))^1)) / (((2.0 / -5.134563998045419\text{E}-4) - \\
 & (6.0 \cdot ^{\text{Vestol}})) / ((\text{AR})^7 - \\
 & \text{W}))) \cdot (7.0)^{11} + 9.0) + (10.0 \cdot ^{\text{Vestol}})) / ((5.0)^8 \cdot \text{d}) + (\text{d} / ((\text{CLto})^9 \cdot \text{d})) / (7.245307304147787\text{E} \\
 & -27 + 10.0)) / ((6.0 - 1.9910750584035587\text{E}- \\
 & 17) + (((5.0 \cdot ^8.0) / (7.0 \cdot \text{rad})) + (\text{Vestol} + 7.0))) + (\text{W} \cdot ^6.0)) \cdot (5.0)^9 + (5.0 - 5.0)) - \\
 & (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}}) / ((\text{AR})^8 \cdot \text{rad}) - 7.0)^8 \cdot 1.9910750584035584\text{E}-9) - \\
 & (4.0 \cdot ((1.9910750584035584\text{E}-9 + ((((-1.9910750584035585\text{E}-11 \cdot (5.0 \cdot ^9.0)) + (\text{PI} + (8.0 - \\
 & ((\text{W} \cdot (9.0 \cdot ^6.0)) \cdot (9.0)^9) - (1.0 \cdot (7.801366840135759\text{E}-9 - 10.0)) \cdot ^9)))) + - \\
 & 6.790362861114142\text{E}-12) \cdot (\text{Vestol} + \text{W})) / (5.0)^{10})))) + (((((10.0 + (3.0 \cdot ^7.0)) \cdot (((((((((8.0)^8 \cdot \text{d} - \\
 & \text{a}) + (((((9.0 + (2.0 + (1.0 \cdot (((\text{W} \cdot (((5.0 \cdot (((6.0 + ((5.0)^9 \cdot 0.7826917258867383)) + \text{W}) + (\text{Vestol} / - \\
 & 1.9910750584035584\text{E}-10) + 4.0) + (((((1.0 \cdot (\text{AR} - ((((\text{Vestol} + \text{W}) + 9.0) + \text{d}) \cdot (5.0)^{10}) / 1.0))) - \\
 & (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}}) / ((\text{AR})^8 \cdot \text{rad}) - 7.0)^8) \cdot \text{W})) + \text{PI} + 10.0)))) / ((5.0)^7 \cdot \text{d}) - 9.0) - \\
 & \text{W}) + (((((((((1.0 + (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}})) + ((3.0 \cdot ^3.0) \cdot (6.0 + ((9.0 \cdot ^{(5.0 + \text{W})} / ((5.0 + (6.365629622122103\text{E}- \\
 & 20 \cdot (\text{rad} + (3.0)^9) \cdot ((9.0 \cdot (10.0 + ((\text{W} \cdot ^8.0) + (\text{d} \cdot ^{\text{Vestol}})))) / ((\text{AR})^8 \cdot \text{rad})) - - \\
 & 0.024026208882933733))) - (\text{Vestol} / (5.0 \cdot \text{g})) + 0.996449947767231))) \cdot (((\text{d} + ((8.0 + ((6.0 - \\
 & 3.0) + \text{PI} + (((((5.0 \cdot (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}})) + (2.0 \cdot ((\text{AR} \cdot ^{\text{Vestol}}) + (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}}))) + (1.0 \cdot 0.7628220713883 \\
 & 095) + (10.0 / ((6.4504650089662255\text{E}-12 + (((((\text{W} + 5.0) - (1.9910750584035586\text{E}- \\
 & 13 + ((\text{d} / (0.0014165125553585525 \cdot 0.23341562201389776) + ((\text{W} \cdot ^3.0) + (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}})) - \\
 & ((4.0 \cdot ^2.0) + (0.22907228452529416 - \text{d})))))) / ((5.0)^8 \cdot \text{d}) - 1.4556096529172386\text{E}- \\
 & 25))^7) \cdot 1.9910750584035584\text{E}- \\
 & 9) \cdot (3.0 \cdot 0.025565852688161517))) + 9.0)))) / ((\text{AR})^8 \cdot \text{rad}) + \text{W})) + 10.0) + 10.0)) + ((2.0 + - \\
 & 3.1509080730551724\text{E}-22) + (-1.691538909489053\text{E}- \\
 & 10 + (((10.0 \cdot (0.031833965259038546 \cdot ^{\text{PI}})) \cdot ((\text{Vestol} / 0.44750021369798676) \cdot ^{(4.0 + - \\
 & 1.991075058403559\text{E}-22)) - \\
 & (6.0)^9) + (5.0 \cdot ^{\text{Vestol}})))))) / ((\text{AR})^8 \cdot \text{d}) + \text{W}) \cdot ((((\text{d} + 10.0) / (((1.942684525202057\text{E}-5 - \\
 & ((3.0861815382895624\text{E}-5 - 6.634444987632672\text{E}-9) - (\text{AR} + ((\text{W} + (((7.0)^10 - \\
 & (6.0 \cdot ^{\text{Vestol}})) / ((\text{AR})^8 \cdot ^5.0)) / ((5.0 \cdot ^{(7.0 / (\text{alphao})^8}) - 4.0))) \cdot (9.475310111670767\text{E}-19 + ((1.0 - \\
 & ((10.0 \cdot ((1.9910750584035587\text{E}- \\
 & 16 \cdot (\text{W} \cdot ^{\text{Vestol}})) + (5.0 \cdot ^{(5.0 + (\text{PI} / 10.0)))) \cdot ^{(((\text{AR} \cdot ^{\text{Vestol}}) / (5.0 \cdot ^{10.0}) + \text{W}) \cdot ^1.0) - \\
 & \text{rad})) + 3.0)) \cdot ^3.0)))))) / ((\text{CLto})^9 \cdot ^9.0) - (6.0 \cdot ^{\text{Vestol}}) / ((\text{AR})^9 \cdot ^{\text{PI}})) \cdot (7.0)^{10} \cdot ^1.0) - - \\
 & 4.771370569295084\text{E}- \\
 & 6) / ((10.0 \cdot ^{\text{AR}} \cdot (\text{W} + \text{d})) / \text{d})) / ((5.0)^8 \cdot \text{d}) + ((\text{d} + (\text{alphao})^9) \cdot ((7.0 \cdot ^3.0) - \text{W})) + ((5.0 \cdot (((\text{rad} - \\
 & (\text{AR} \cdot ^{\text{Vestol}})) / ((\text{AR})^7 \cdot \text{rad})) + \text{rad}) + 10.0)) \cdot (((6.919665232152939\text{E}-
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 7 + ((6.0 * (3.0 * ((9.0 * W) * (7.0 - ((10.0 * (W.^5.0)) + (9.0.^6.0) - \\
& (((7.0 + (8.0 * 8.0)) * (5.0)^9 + W)))))) + ((Vestol / (2.0)^7) / (((9.0 + ((0.7248078447781285 * (((0.2 \\
& 1517561038607058 - W) / \text{PI}) - \\
& W) + (0.6140768587350608 * ((5.0 * (W + Vestol)) * 10.0))) / (\text{PI})^7 + (6.0 / (9.0 * ((5.0 + (((5.0 - \\
& (5.0.^{Vestol}) / (Vestol + W) - Vestol))^7) * 1.9910750584035584E - \\
& 9)))))) + (\text{ao}.^3.6285384227440544E - 4))^{\text{alphao} * (0.024572646010304844.^{7.0 - \\
& (((5.0 * ((Vestol.^{\text{PI}} - (9.0 * 10.0))) / \text{rad}) - (6.0 + -6.790362861114141E - \\
& 11)))))) / ((\text{rad} + (9.0 + W)) * (6.0)^{11})) / ((\text{AR})^9 * \text{rad}) + 2.0) + ((10.0 + ((10.0 * (5.0 * ((((((4.0.^{0. \\
& 34853353352055005.^W)) + d) / ((8.0 - (5.5631483737001036E - 11 + (8.0 * 10.0))) - (((2.0 + \text{alphao}) - \\
& Vestol).^1.0) - 7.533622324461258E - 4)))^10 - (9.0 / (((2.0.^3.0) - (1.0 + 5.0)) - \\
& W)) * 6.0) + 9.0) + \text{rad})) / ((4.0 * 0.07033032374258939) + \text{CLmax})) - \\
& (W + 9.0)))) / (1.0 + (5.0.^{Vestol})))) / ((\text{AR})^8 * d) + W) + W)
\end{aligned}$$