

UNIVERSIDADE  
BEIRA INTERIOR

# Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves

## Projeto de Aeronaves (15096)

Licenciatura em Engenharia Aeronáutica

2024

## Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais

Faculdade de Engenharia



# Conteúdo

- Introdução
- Estudos Paramétricos
- Apresentação dos Estudos
- Otimização Multivariável e Multidisciplinar
- Exemplo
- Conclusão



# 1. Introdução

- O processo de projeto é iterativo numa área definida por requisitos rígidos;
- Este processo é satisfatório para obter a configuração inicial;
- O resultado é muito dependente dos parâmetros que definem a aeronave;
- Os estudos paramétricos permitem compreender a influência dos vários parâmetros no resultado final;
- Os estudos computacionais são importantes e obrigatórios devido à extensão dos cálculos e dimensão do problema;
- É necessária experiência para definir corretamente as interações entre os vários parâmetros e as várias disciplinas.

# U) 2. Estudos paramétricos

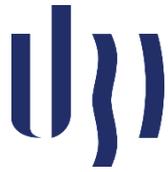
- Os estudos paramétricos fornecem as respostas às perguntas “E se...?”;
- A seleção e execução adequadas dos estudos é tão importante como uma configuração boa ou análise correta para que a aeronave “ótima” possa emergir



## 2. Estudos paramétricos

# Objetivos dos estudos paramétricos

- Determinação de combinações de parâmetros do projeto que satisfaçam os requisitos operacionais especificados;
- Cálculo dos valores para os parâmetros de configuração mencionados acima que resultam na função objetivo mais favorável (por exemplo, peso de descolagem ou custo de operação);
- Estudos de sensibilidade para avaliar os efeitos de pequenas mudanças na forma ou geometria, propriedades dos materiais, coeficiente de arrasto, etc.;
- Análise de missão/desempenho e estudos de compromisso para investigar o efeito de variações nos requisitos de desempenho;
- Verificação do efeito de certos constrangimentos tecnológicos em termos de prejuízos no peso e no custo.



## 2. Estudos paramétricos

# Categoria de estudos

- Estudos de projeto;
- Estudos de requisitos;
- Sensibilidades de crescimento.

### Estudos de projeto

T/W e W/S  
A,  $\Lambda$   
t/c,  $\lambda$   
Forma e curvatura do perfil  
Sistemas de alta sustentação  
Esbeltez da fuselagem  
Diâmetro da hélice  
Materiais  
Configuração

tipo de cauda  
enflechamento variável  
número e tipo de motor  
características de manutenção  
disposição dos passageiros

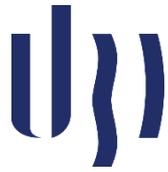
Tecnologias avançadas

### Estudos de requisitos

Alcance/carga útil/passageiros  
Tempo de espera  
Velocidade  
Taxa de volta,  $P_S$ ,  $n_{max}$   
Comprimento da pista  
Tempo de subida  
Nível de assinatura de radar  
Preço

### Sensibilidades de crescimento

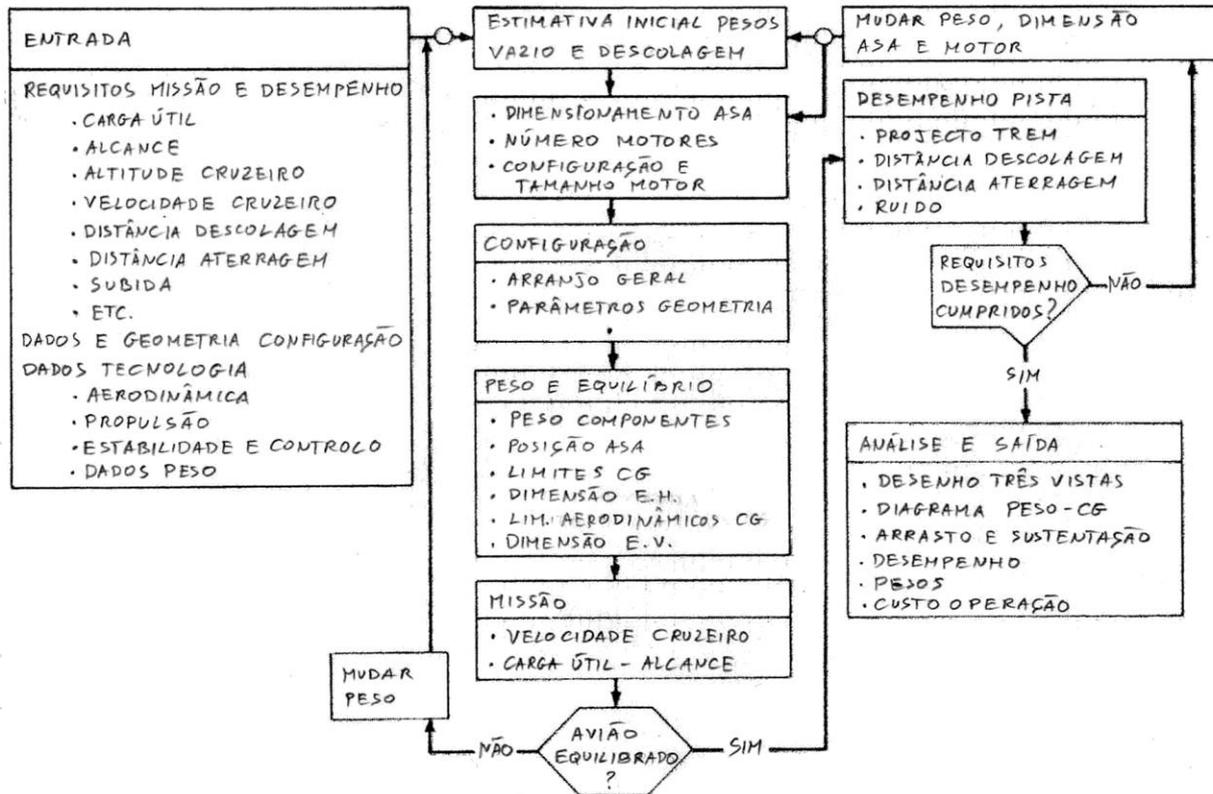
Peso vazio  
 $C_{D0}$  e  $KC_{Dwave}$   
 $C_{Lmax}$   
Tração e sfc instalados  
Preço do combustível



## 2. Estudos paramétricos

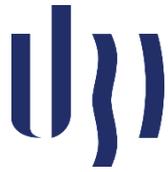
# Procedimento dos estudos

- Variar os parâmetros de projeto significa projetar muitos aviões diferentes.



# U) 3. Apresentação dos estudos

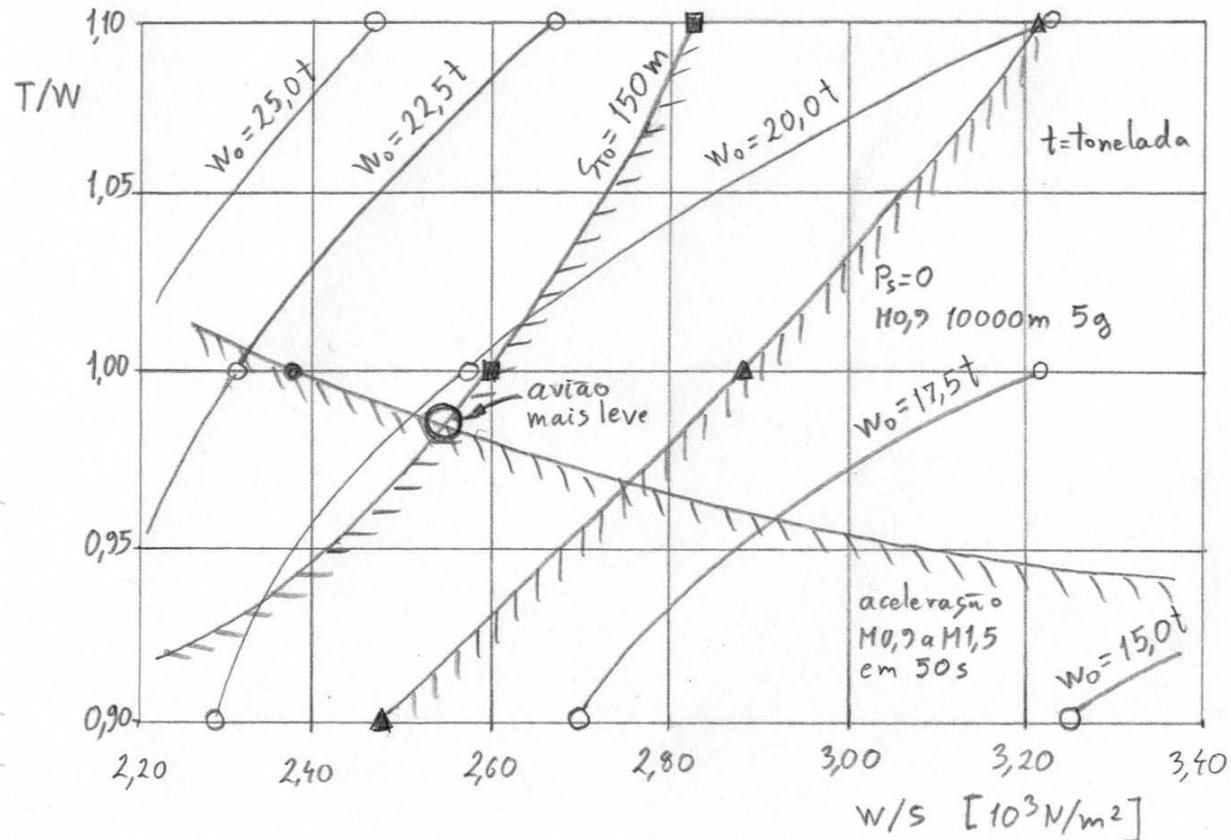
- Existem muitos parâmetros que podem ser investigados;
- Para manter o estudo tratável é preferível variar uma ou duas variáveis de cada vez;
- O tipo de estudo a usar deve ser escolhido com base nos aspetos que influenciam mais o projeto em questão.



### 3. Apresentação dos estudos

# Estudos de dimensionamento

- T/W vs W/S



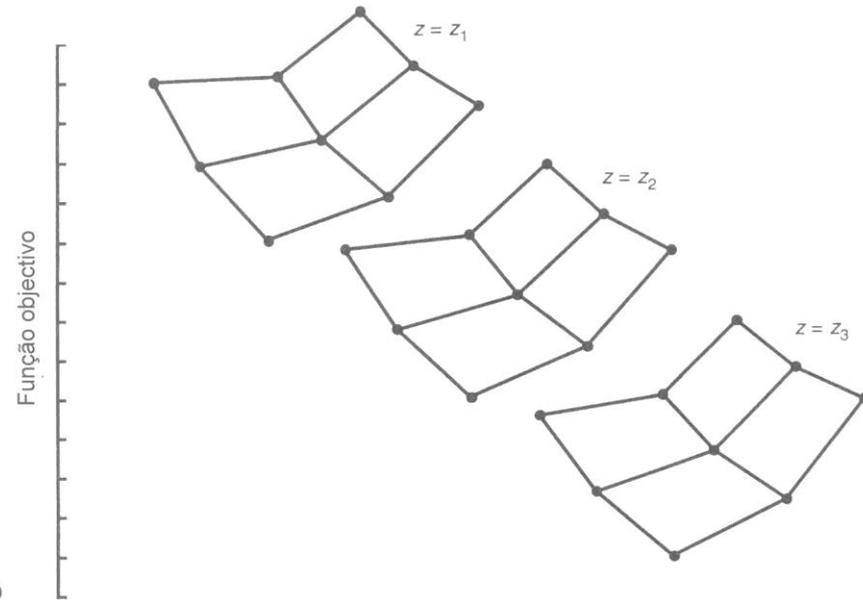
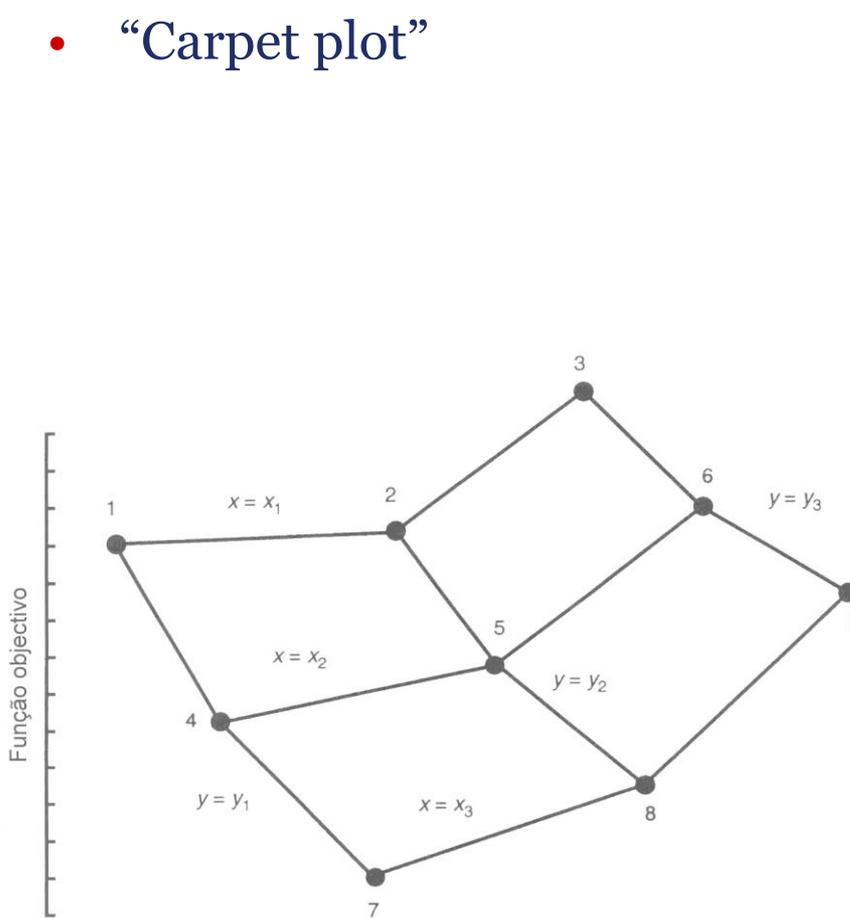


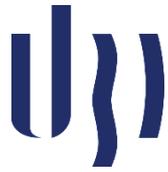
### 3. Apresentação dos estudos

# Estudos de nove pontos

- “Carpet plot”

Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves

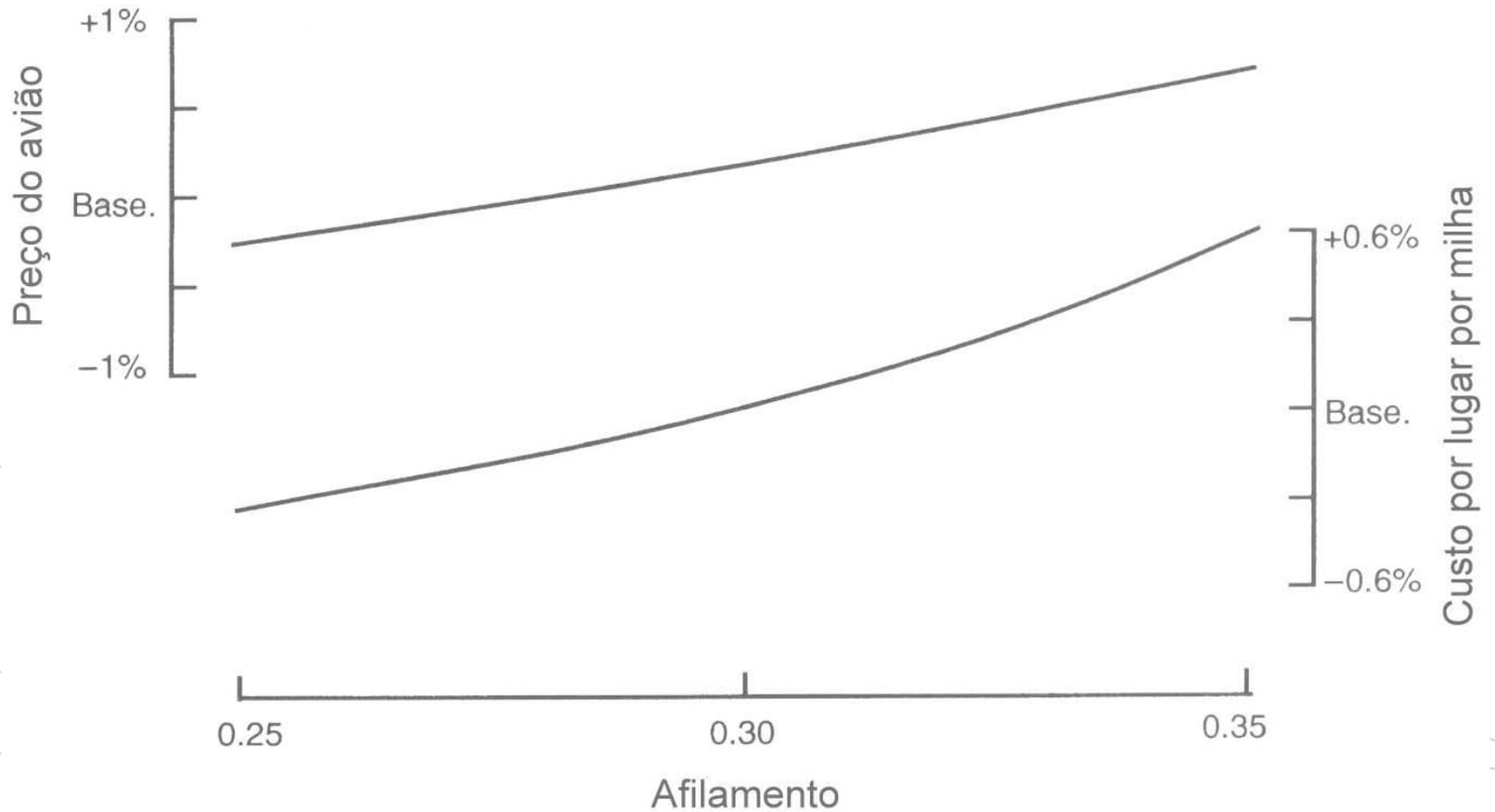




### 3. Apresentação dos estudos

## Estudos de variável única

Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves





# 4. Otimização multivariável e multidisciplinar

- O volume computacional envolvido em estudos paramétricos excede facilmente a capacidade de cálculo manual e a de grande parte dos programas de computador existentes;
- Para otimizar verdadeiramente uma aeronave devem ser incluídos dezenas de parâmetros nos estudos;
- A otimização multivariável é uma ferramenta poderosa para melhorar o projeto. Usa-se, por exemplo, o gráfico de dimensionamento repetidamente e as diferenças finitas;
- A otimização multidisciplinar do projeto, MDO, permite criar modelos matemáticos a partir de disciplinas diferentes. Usa-se, por exemplo, o método de gradientes (diferenças finitas) e algoritmos genéticos.

# U) 5. Exemplo 4

- Requisitos

Função:

Avião leveiro de observação.

Missão:

Vigilância de 5 horas a 300 km da base com reservas para 2 horas de vigilância;

Manobras durante 15 minutos;

Transporte de 2 tripulantes (86 kg cada) e 40 kg de bagagem.

Desempenho:

Operação em pistas de 250 m (nível do mar e condições ISA);

Velocidade de perda 83 km/h;

Velocidade de cruzeiro 200 km/h;

Velocidade de vigilância 140 km/h;

Razão de subida ao nível do mar 4 m/s.

# 5. Exemplo 4

- Equações para determinação do combustível para a missão

Fase da missão	$W_i/W_{i-1}$
Aquecimento, rolagem e descolagem	0,990
Subida	$1,0065 - 0,0324M$ com $M \geq 0,1$
Cruzeiro	$e^{-\frac{C_p}{\eta_p} g \left[ \frac{\rho V^2 C_{D0}}{2(W/S)} + \frac{2K}{\rho V^2} \left( \frac{W}{S} \right) \right]_R}$
Espera	$e^{-\frac{C_p}{\eta_p} \left[ \frac{\rho V^3 C_{D0}}{2(W/S)} + \frac{2K}{\rho V} \left( \frac{W}{S} \right) \right]_E}$
Manobras	$1 - \frac{C_p}{\eta_p} \frac{P}{W} \Delta t$
Descida	0,998
Aterragem e rolagem	0,998

# 5. Exemplo 4

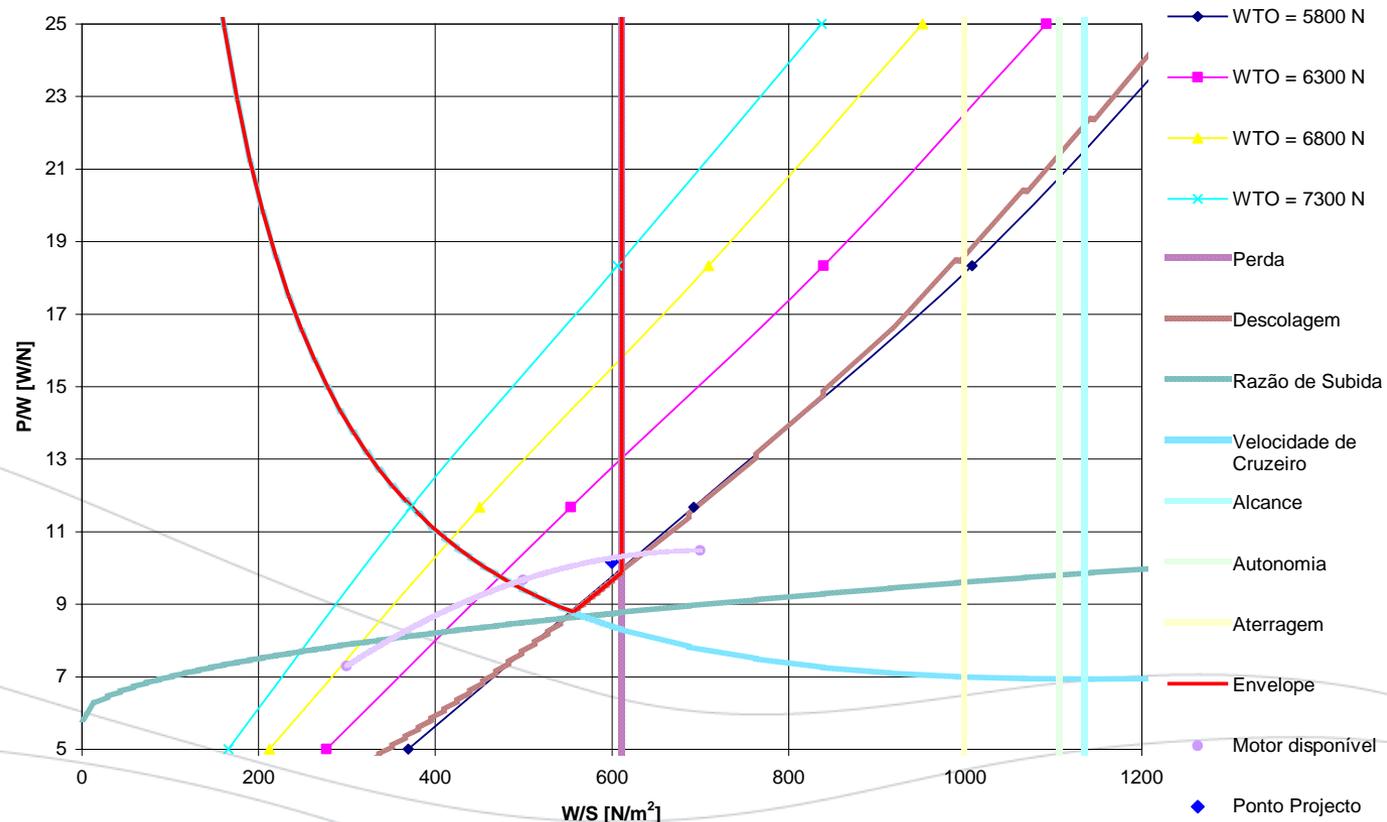
- Equações de constrangimento de desempenho

Requisito	Expressão
Vel. perda	$\frac{W}{S} = 0,5 \rho V_S^2 C_{L_{\max}}$
Descolagem	$\frac{P}{W} = \frac{1,2}{\eta_P \sqrt{\rho C_{L_{\max}}}} \sqrt{\frac{W}{S}} \left\{ \frac{1,44}{2 C_{L_{\max}}} \left[ \frac{2}{\rho g s_{TO}} \left( \frac{W}{S} \right) + (C_{D_0} - \mu C_L + K C_L^2) \right] + \mu \right\}$
Razão de subida	$\frac{P}{W} = \frac{1}{\eta_P} \left[ RC + \frac{\rho V^3 C_{D_0}}{2(W/S)} + \frac{2K}{\rho V} \left( \frac{W}{S} \right) \right]$
Vel. cruzeiro	$\frac{P}{W} = \frac{1}{\eta_P} \left[ \frac{\rho V^3 C_{D_0}}{2(W/S)} + \frac{2K}{\rho V} \left( \frac{W}{S} \right) \right]$
Alcance	$\frac{W}{S} = 0,5 \rho V^2 \sqrt{\frac{C_{D_0}}{K}}$
Autonomia	$\frac{W}{S} = 0,5 \rho V^2 \sqrt{\frac{3 C_{D_0}}{K}}$
Aterragem	$\frac{W}{S} = \frac{\rho g}{2} \left( s_L - \frac{h}{\operatorname{tg} \gamma} \right) \left[ \frac{2 \mu C_{L_{\max}}}{1,15^2} + (C_{D_0} - \mu C_L + K C_L^2) \right]$

# 5. Exemplo 4

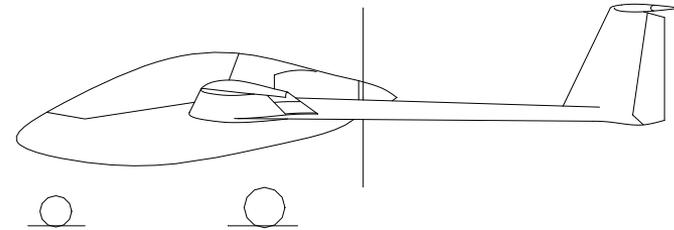
- Gráfico de dimensionamento

Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves

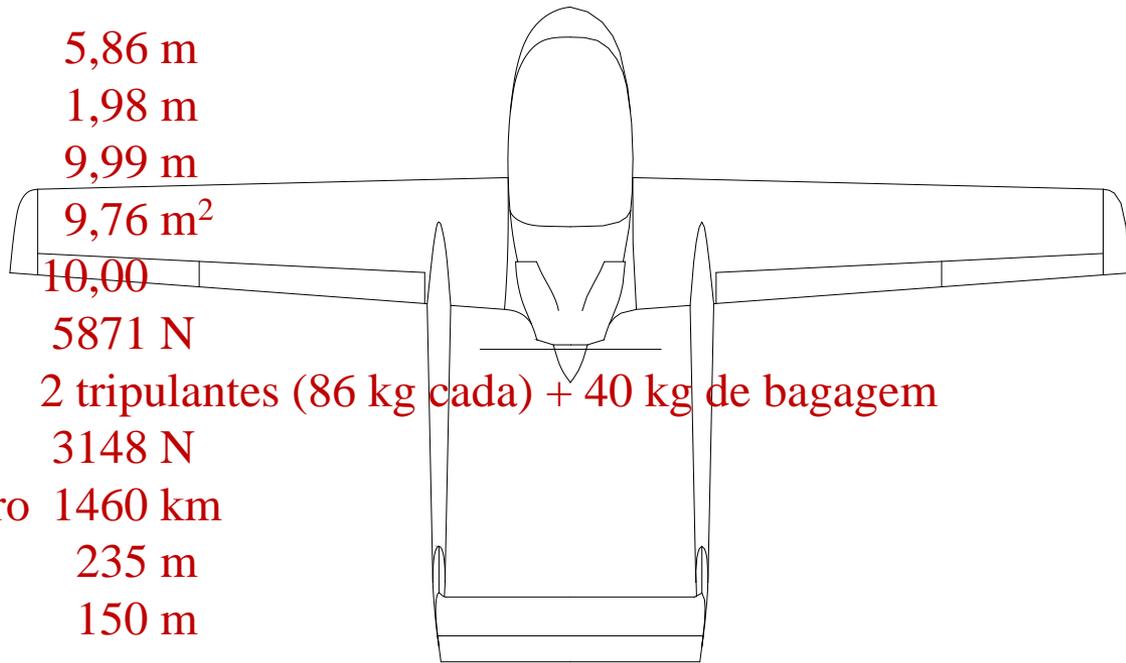


# 5. Exemplo 4

- Avião leveiro de observação



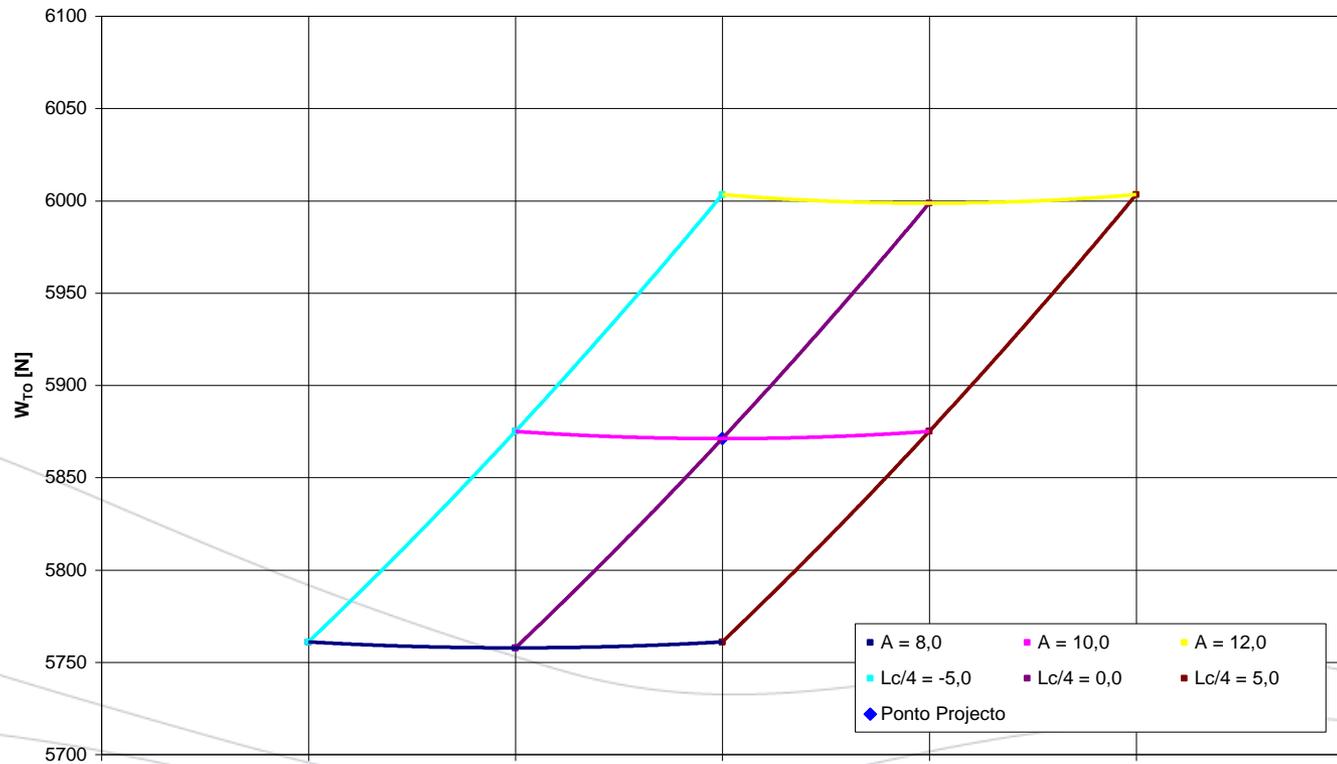
Comprimento total	5,86 m
Altura total	1,98 m
Envergadura	9,99 m
Área da asa	9,76 m <sup>2</sup>
Alongamento	10,00
Peso de decolagem	5871 N
Carga útil	2 tripulantes (86 kg cada) + 40 kg de bagagem
Peso vazio	3148 N
Alcance máximo em cruzeiro	1460 km
Distância de decolagem	235 m
Distância de aterrager	150 m



# 5. Exemplo 4

- Efeito de  $A$  e  $\Lambda_{c/4}$  em  $W_{TO}$  (motor fixo)

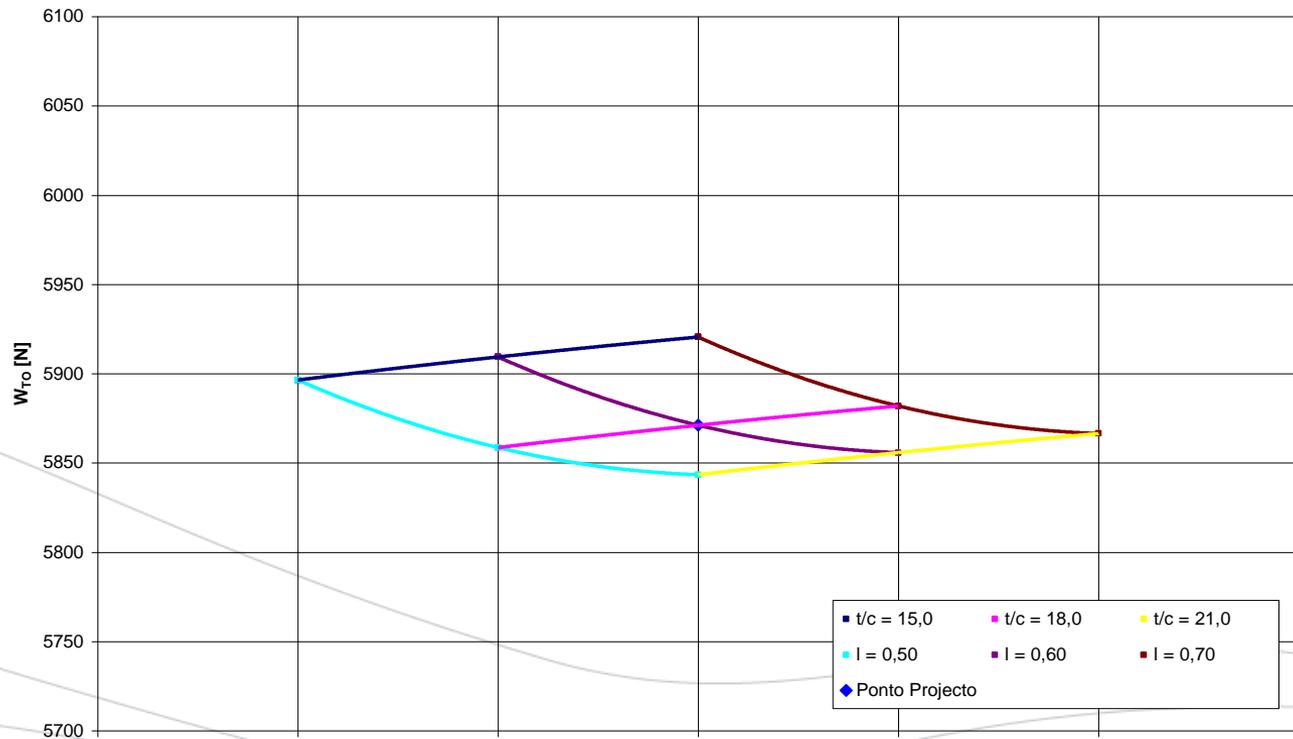
Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves



# 5. Exemplo 4

- Efeito de  $t/c$  e  $\lambda$  em  $W_{TO}$  (motor fixo)

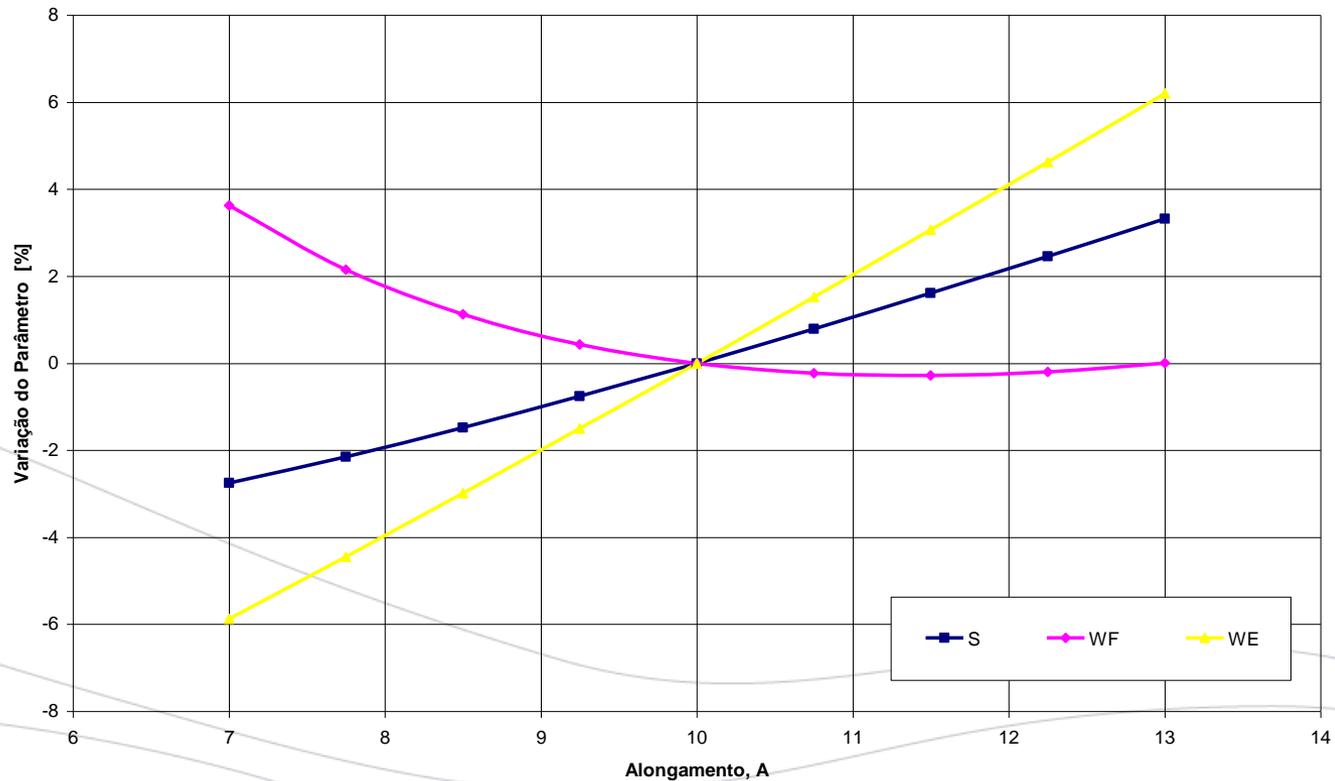
Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves



# 5. Exemplo 4

- Estudo do efeito do alongamento (motor fixo)

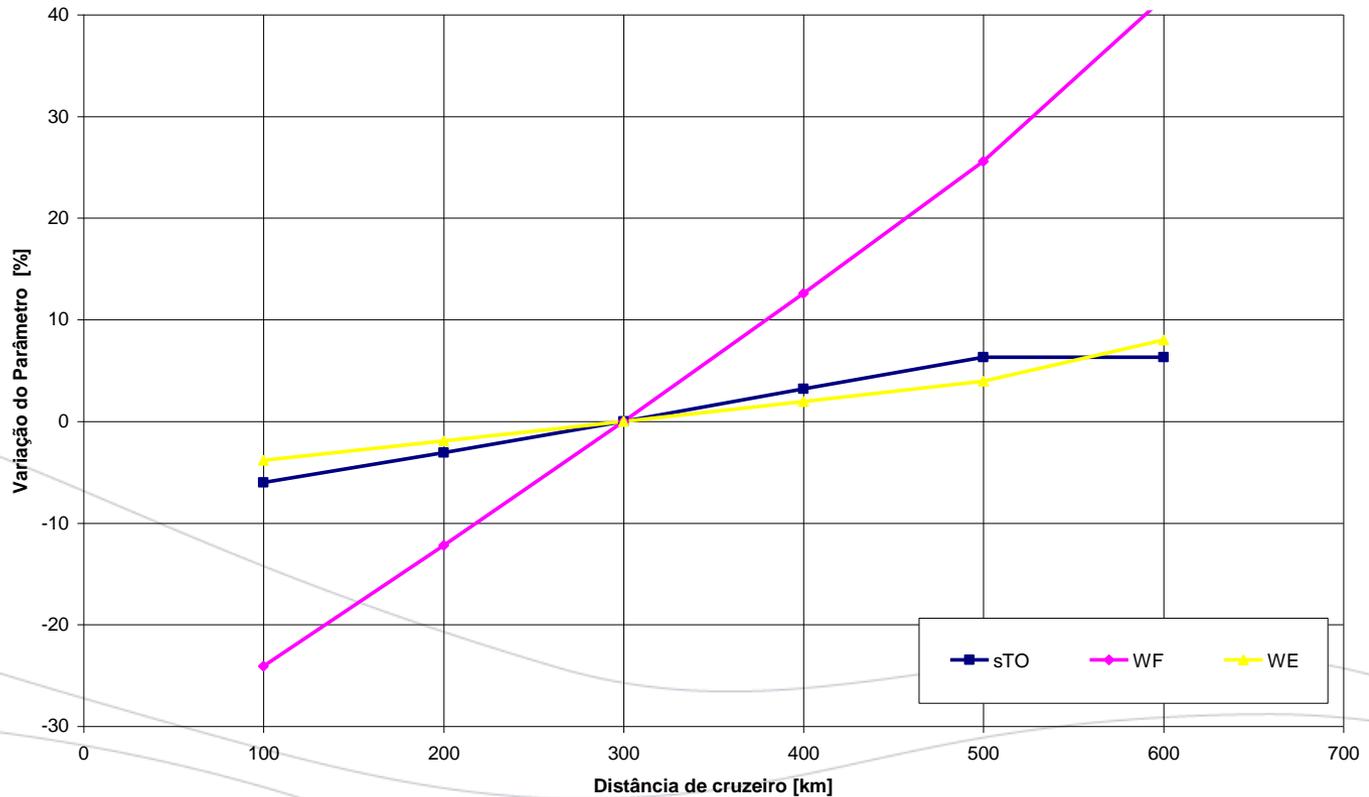
Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves



# 5. Exemplo 4

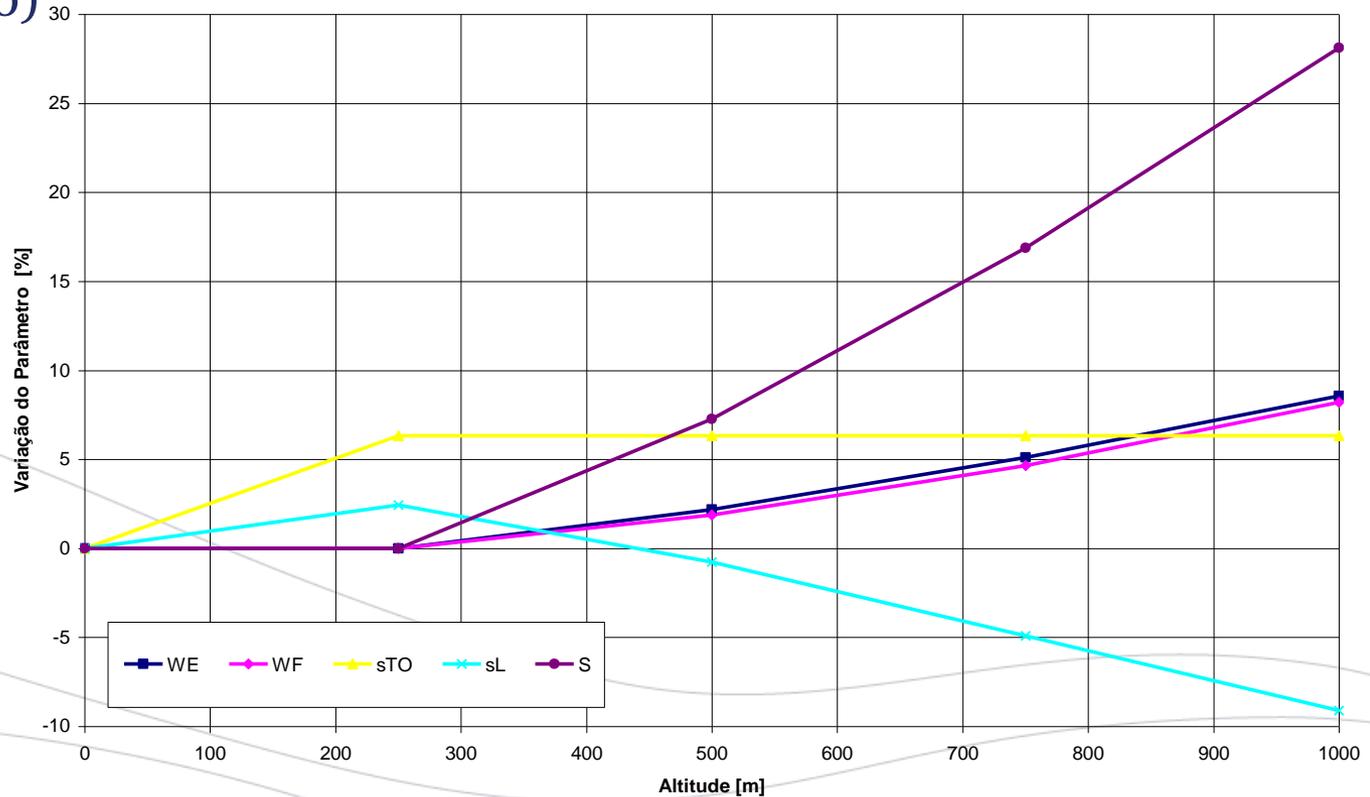
- Estudo do efeito da distância de cruzeiro (motor fixo)

Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves



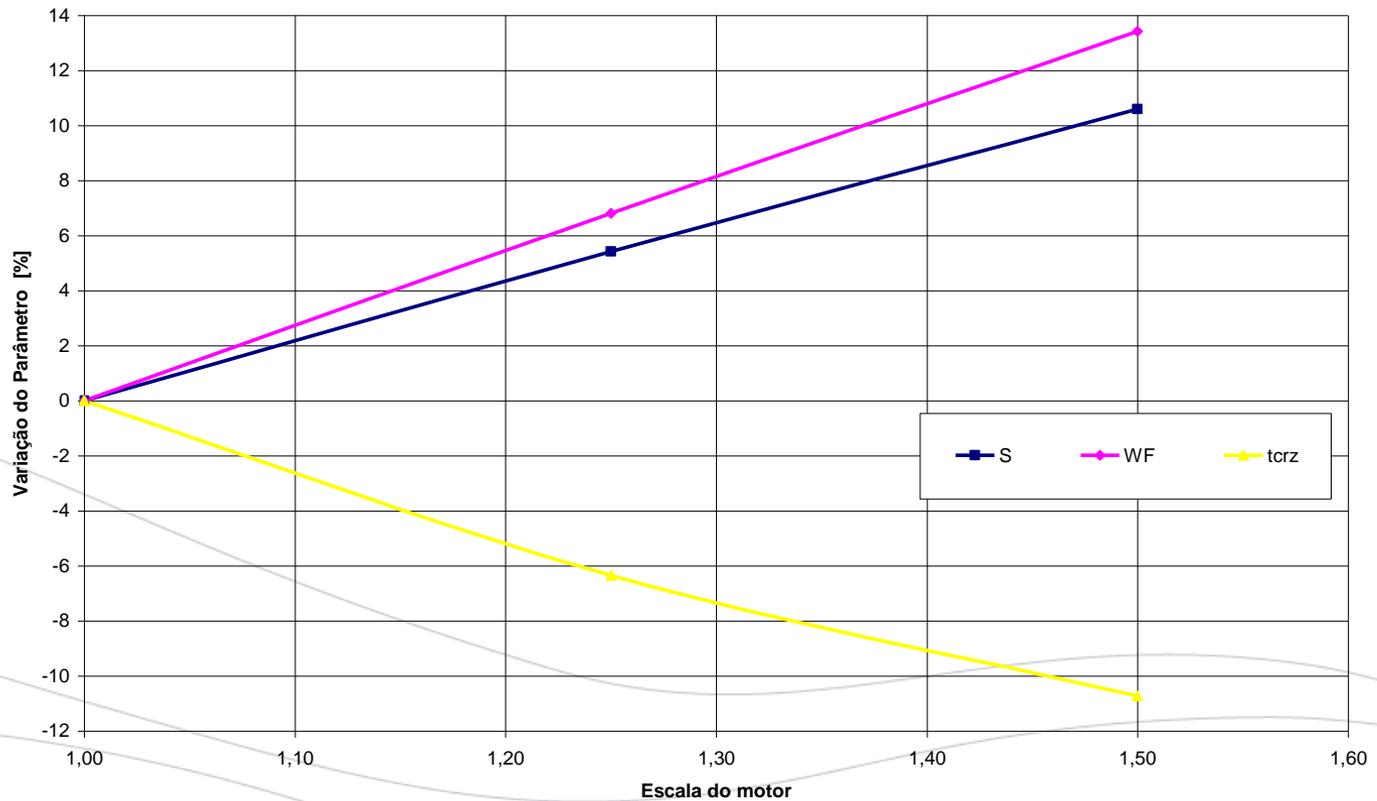
# 5. Exemplo 4

- Efeito da altitude para pista de dimensão constante (motor fixo)



# 5. Exemplo 4

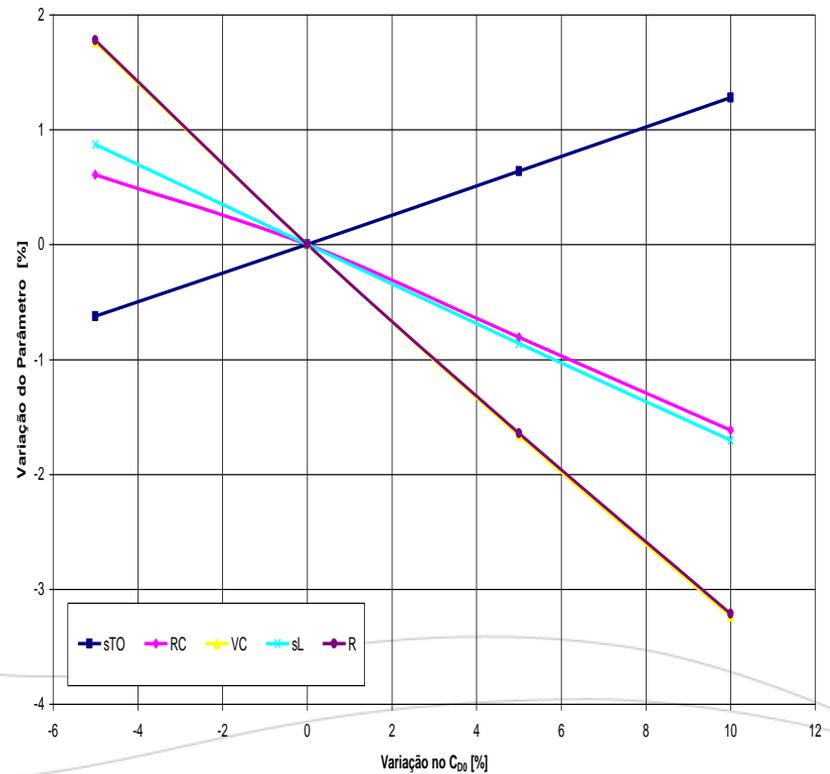
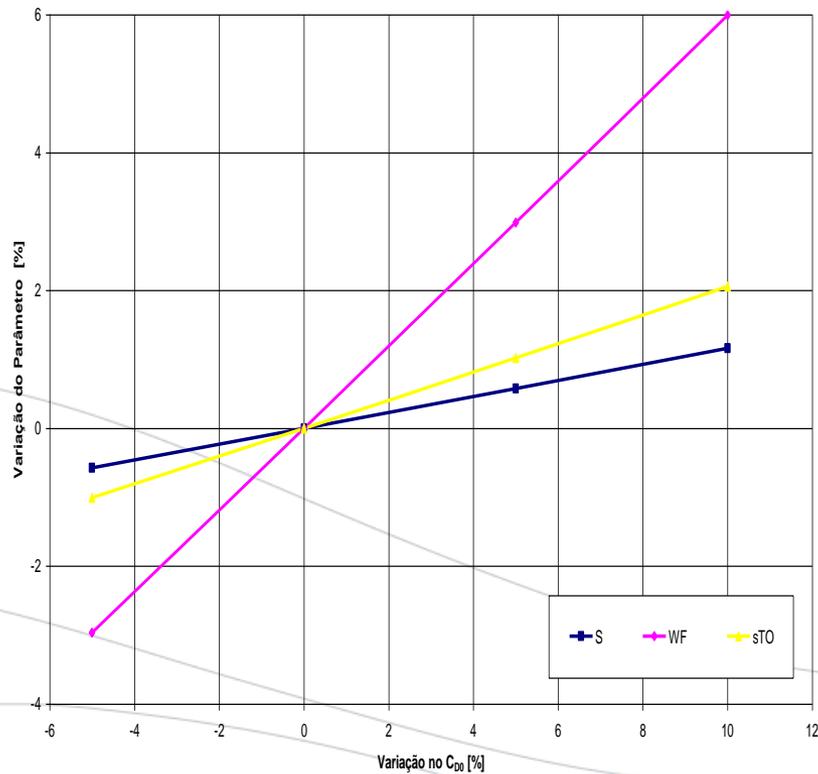
- Estudo de motor elástico



# 5. Exemplo 4

- Influência da variação do  $C_{D0}$

Estudos Paramétricos no Projeto de Aeronaves



# U) 6. Exemplo 5

- Requisitos

Função:

RPAS para vigilância costeira.

<b>Massa à descolagem, kg</b>	<b><math>\leq 750</math></b>
<b>Carga útil, kg</b>	150
<b>Autonomia em cruzeiro, h</b>	24
<b>Velocidade de cruzeiro, km/h</b>	$\geq 150$
<b>Altitude de cruzeiro, m</b>	4000

Assunções:

Massa dos sistemas de 115 kg.

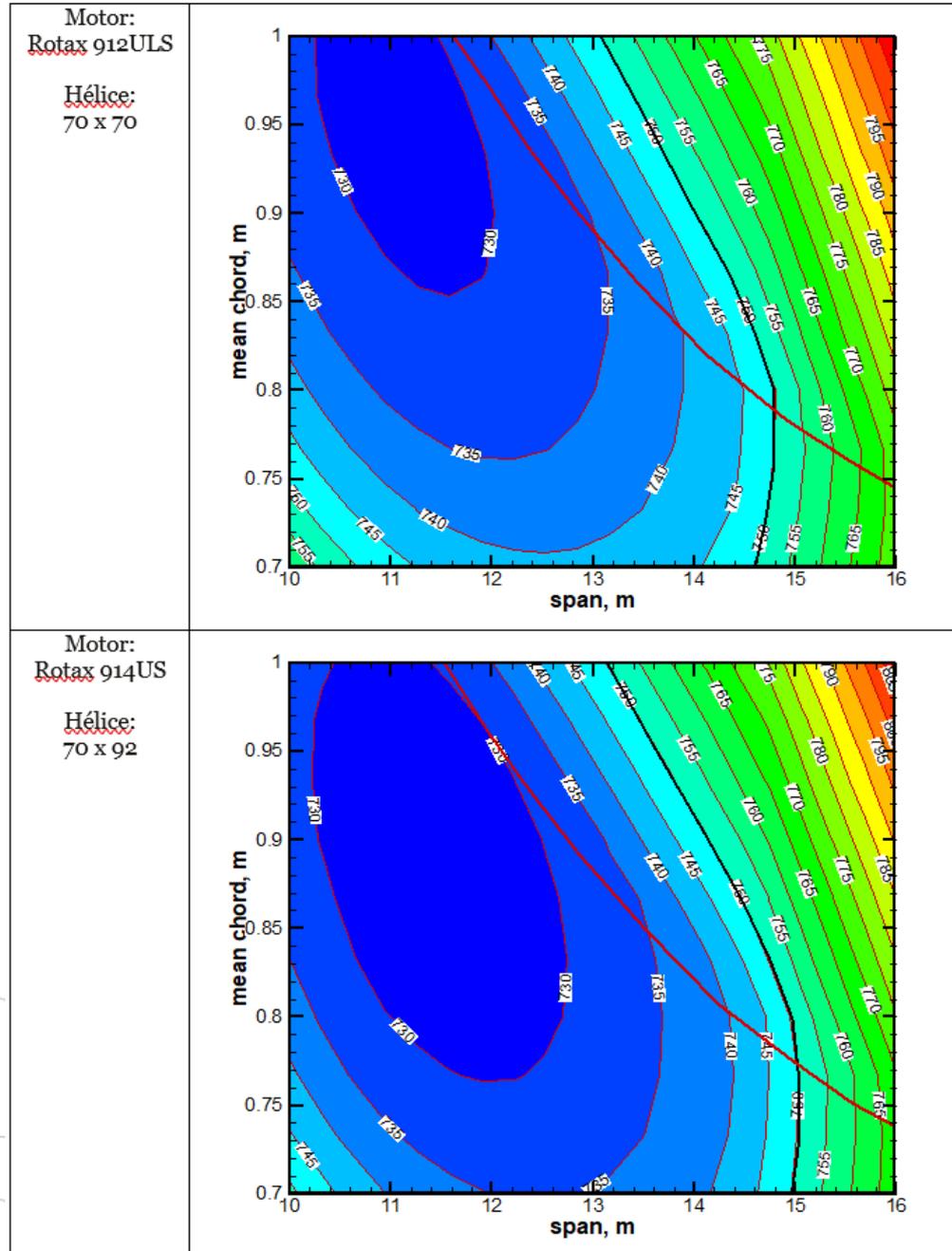
Hélice de passo fixo.

Tram de aterragem fixo

Comprimento e diâmetro da fuselagem de 7m e 0,75 m, respetivamente.

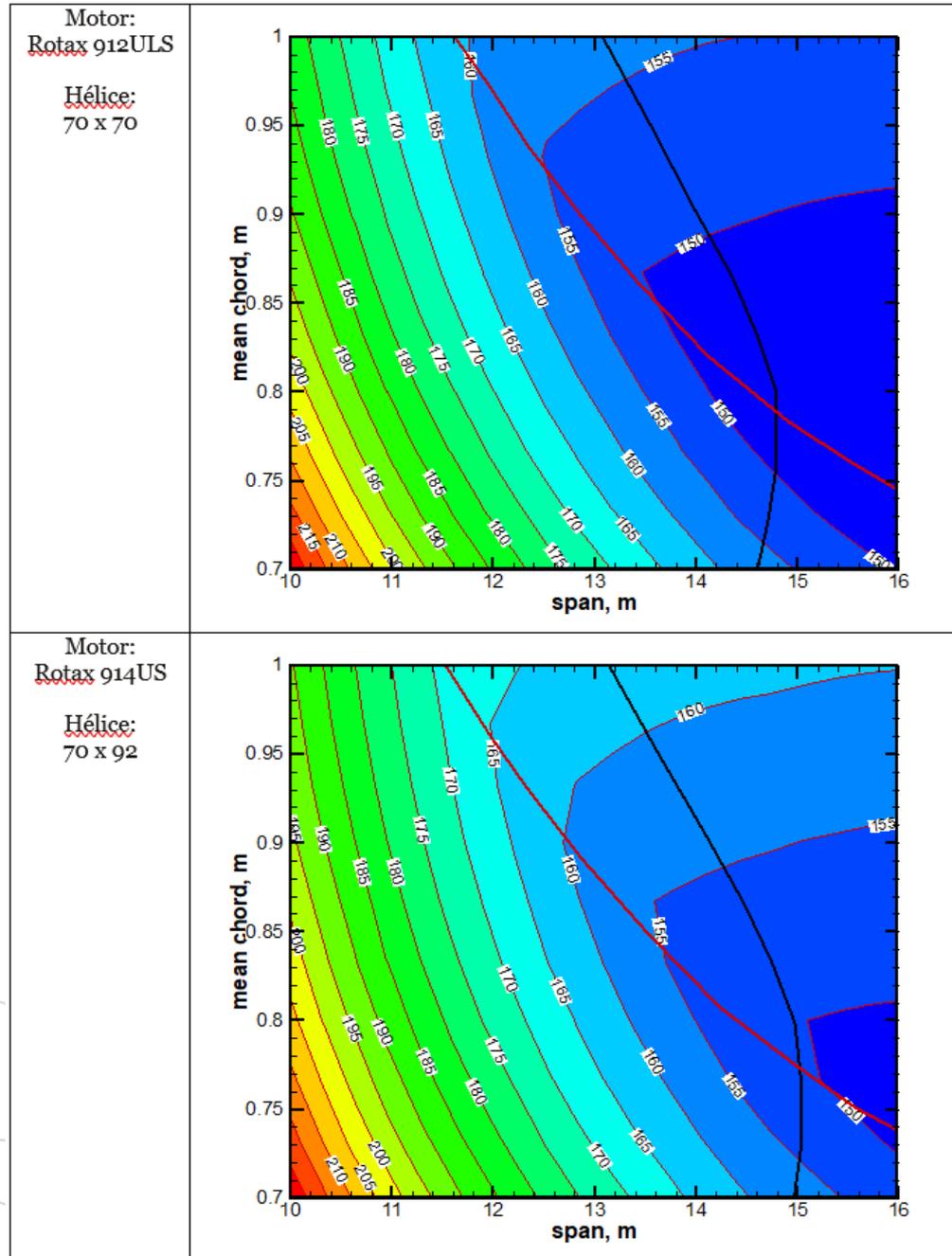
# 6. Exemplo 5

- Influência da envergadura, da corda média das asas e do motor/hélice na massa máxima à descolagem (kg)



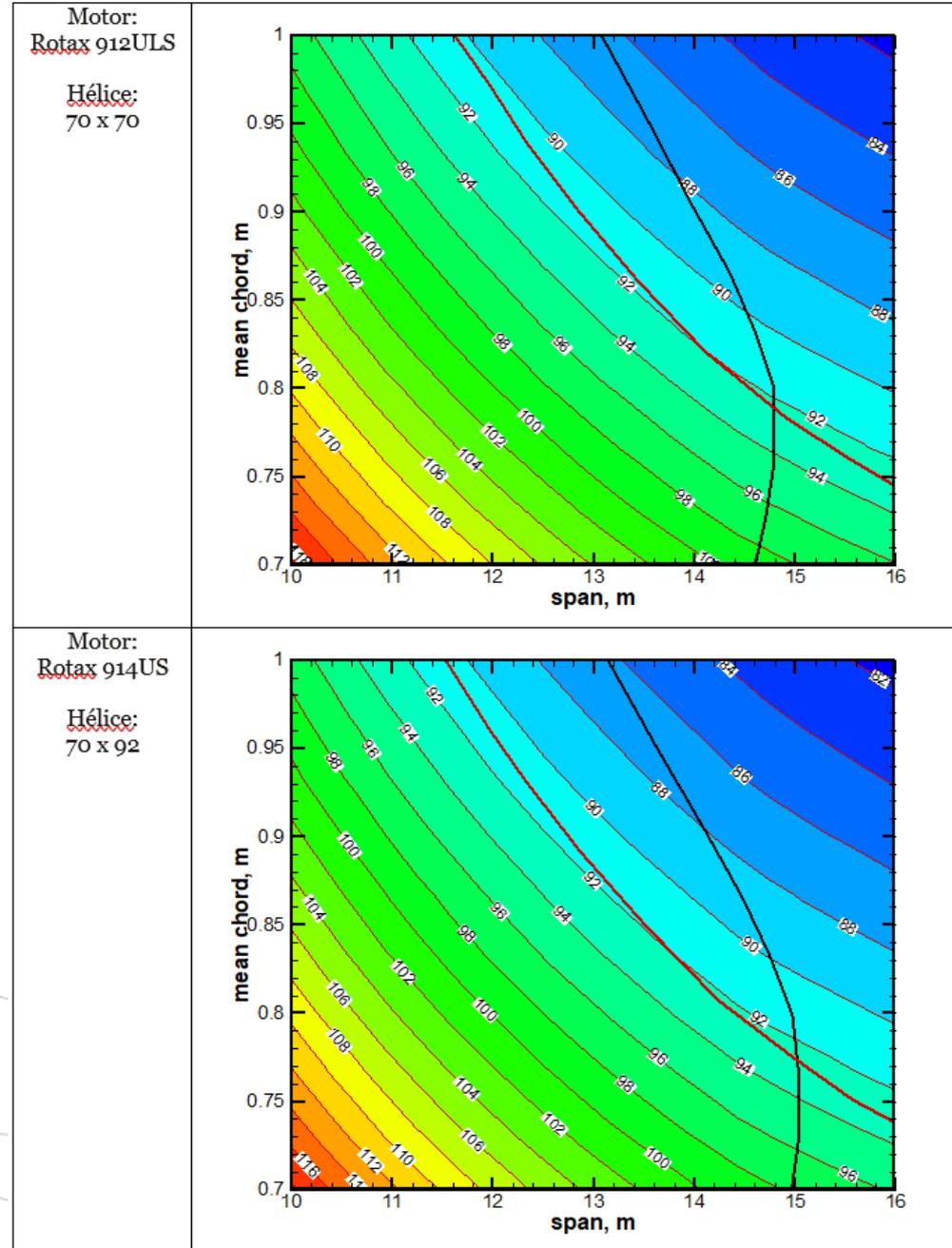
# 6. Exemplo 5

- Influência da envergadura, da corda média das asas e do motor/hélice na massa de combustível (kg)



# 6. Exemplo 5

- Influência da envergadura, da corda média das asas e do motor/hélice na velocidade de perda ao nível do mar (km/h)

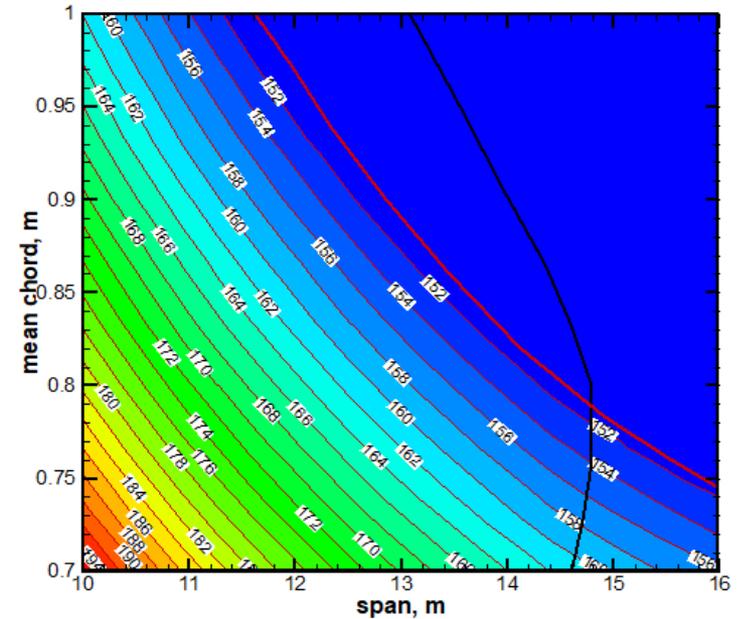


# 6. Exemplo 5

- Influência da envergadura, da corda média das asas e do motor/hélice na velocidade de cruzeiro a 4000 m (km/h)

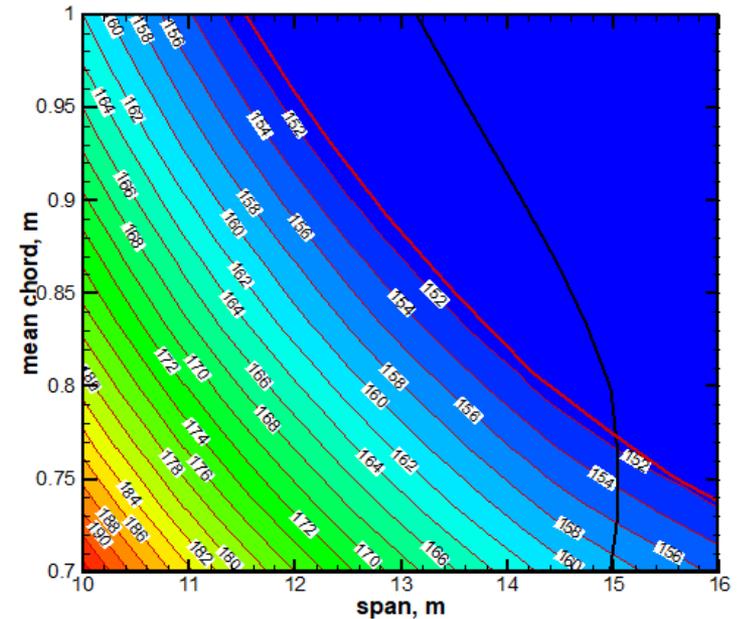
Motor:  
Rotax 912ULS

Hélice:  
70 x 70



Motor:  
Rotax 914US

Hélice:  
70 x 92

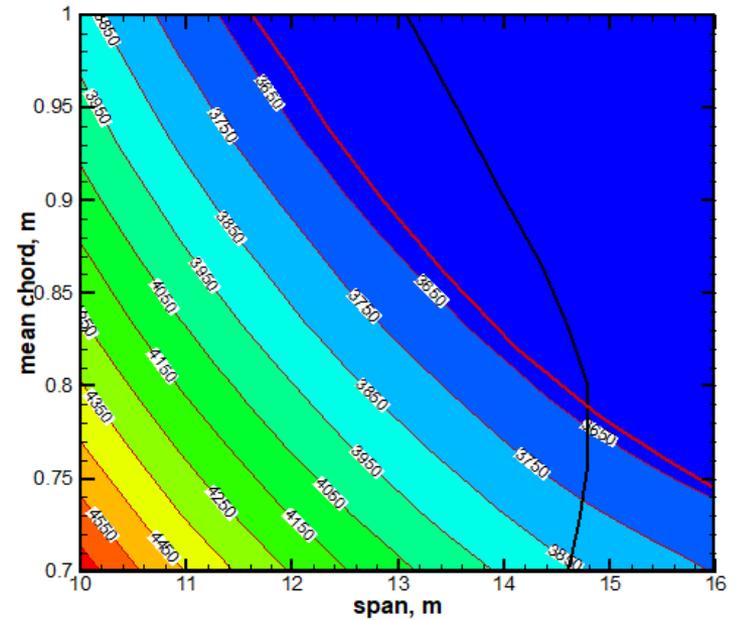


# 6. Exemplo 5

- Influência da envergadura, da corda média das asas e do motor/hélice no alcance de cruzeiro a 4000 m (km)

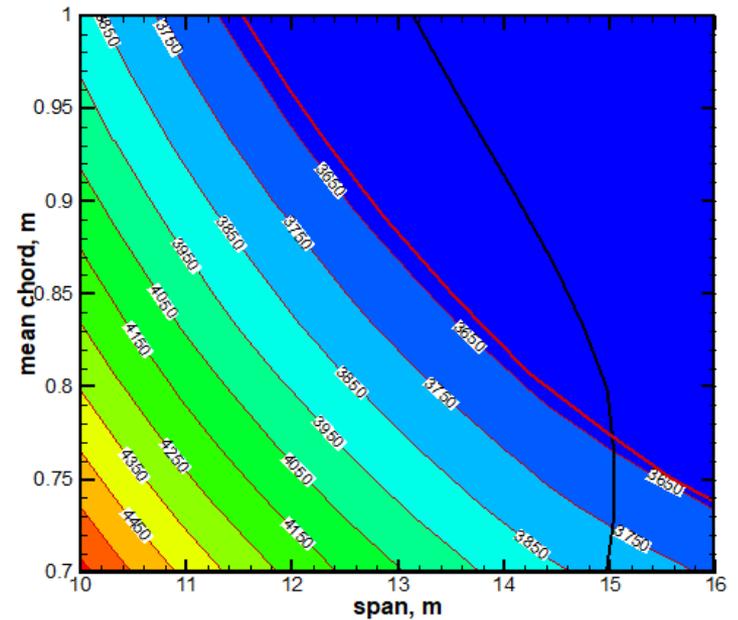
Motor:  
Rotax 912ULS

Hélice:  
70 x 70



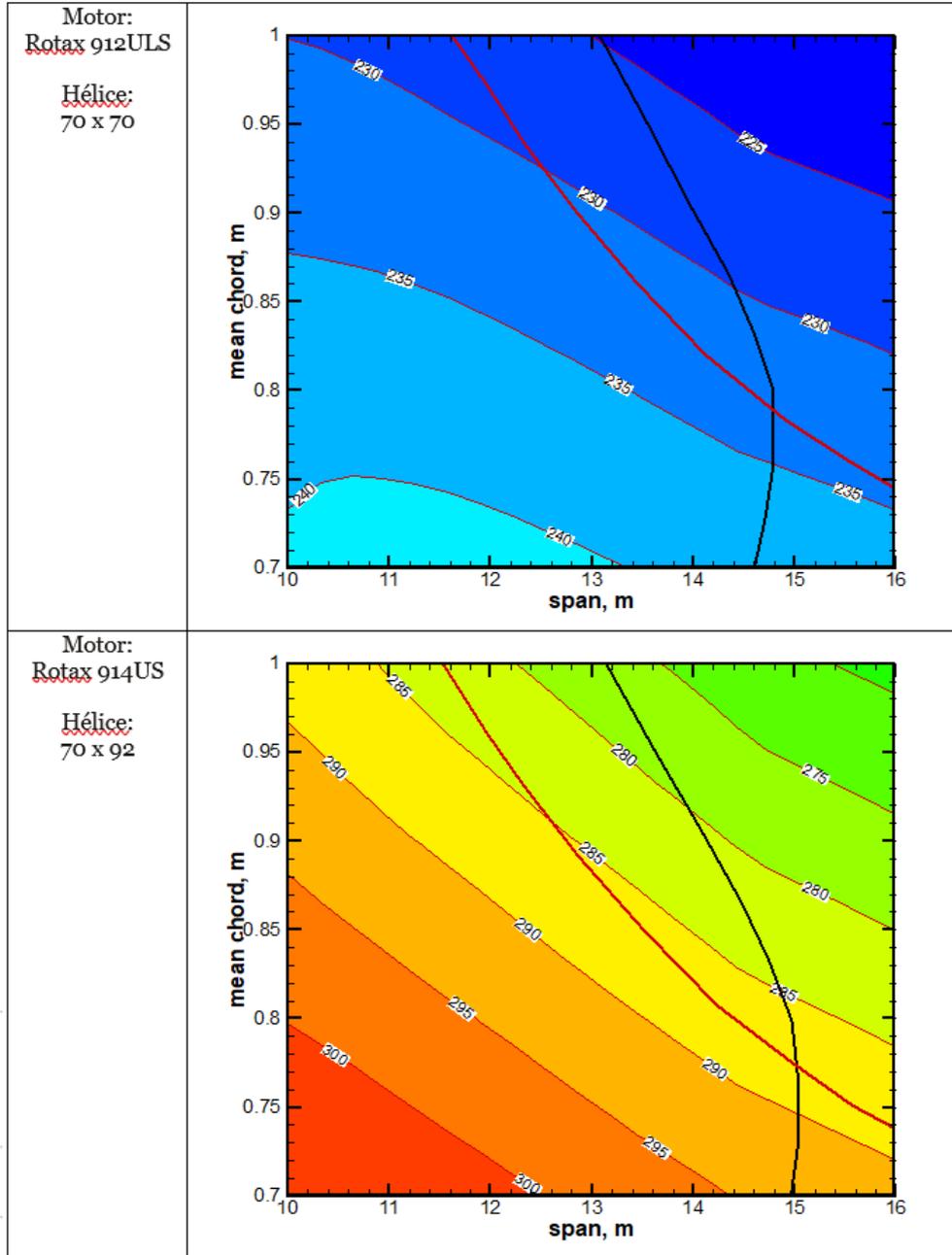
Motor:  
Rotax 914US

Hélice:  
70 x 92



# 6. Exemplo 5

- Influência da envergadura, da corda média das asas e do motor/hélice na velocidade máxima a 4000 m (km/h)



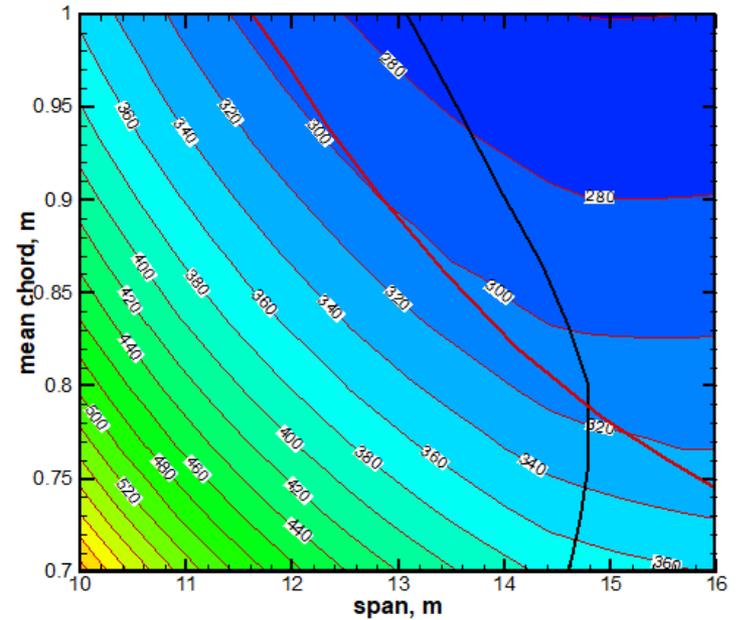


# 6. Exemplo 5

- Influência da envergadura, da corda média das asas e do motor/hélice na distância de decolagem ao nível do mar (m)

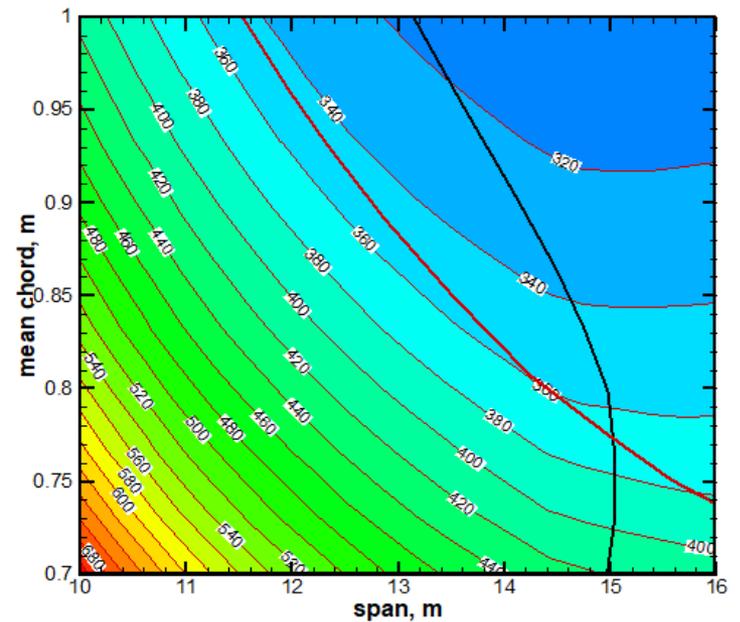
Motor:  
Rotax 912ULS

Hélice:  
70 x 70



Motor:  
Rotax 914US

Hélice:  
70 x 92



# U) 7. Conclusão

- A compreensão da influência dos vários parâmetros de projeto requer a aplicação dos estudos paramétricos;
- Os cálculos complexos inerentes a estes estudos exigem a necessidade de ferramentas computacionais;
- A experiência permite um estudo mais objetivo e realista;
- A aeronave óptima só é alcançada com o uso cuidadoso e sistemático dos estudos paramétricos;
- Tudo influencia tudo o resto, mesmo os métodos de análise usados.