



Exame de MMT-02

Reynaldo Santos de Lima

¹ Curso de Engenharia Mecânica-Aeronáutica
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
São José dos Campos – SP – Brasil

Professor: Cleverson Bringhenti

São José dos Campos, 5 de dezembro de 2021

Resumo. Este trabalho realiza o estudo de uma etapa inicial de projeto de otimização de motor turbofan considerando uma tração fixa fornecida de $T = 63kN$, jato residencial, motor com jatos separados. O texto percorre os diferentes scripts em MATLAB utilizados para escolher FPR, BPR, TIT e PRT que representam o projeto do motor. Após a análise e escolha gradual da região de projeto, alcança-se os valores da tabela 3 como ponto de projeto escolhido.

Sumário

1	Introdução	2
2	Procedimento e hipóteses	2
2.1	Hipóteses básicas	2
2.2	Construção do programa de otimização	2
3	Resultados e discussões	3
3.1	Estudo da região SFC vs F_s	3
3.2	Otimizando FPR	4
3.3	Variação de BPR	5
4	Conclusões	6
5	Referências	6

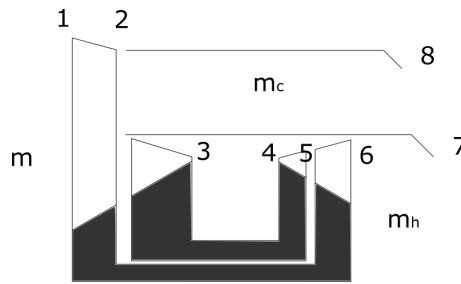


Figura 1. Configuração do Turbófan, estágios destacados com números.

1. Introdução

O trabalho tem como objetivo a otimização de um motor turbófan de **jatos separados**, de modo a obter um ponto de projeto adequado. Um esquema do motor considerado pode ser visto na figura 1. A contextualização do exercício propõe uma otimização do motor turbófan de um **jato regional** com tração demandada $T = 63 \text{ kN}$. Jatos regionais são aeronaves comerciais com 50 a 90 assentos (BALDANZA, 2021).

2. Procedimento e hipóteses

Seguindo o procedimento proposto em (SARAVANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 2021), temos de iniciar o projeto com 4 variáveis principais a serem otimizadas: razão de pressão total r (representado também por PRT), temperatura de entrada da turbina TIT , razão de pressão Fan FPR e razão de bypass BPR .

2.1. Hipóteses básicas

Como forma de realizar os cálculos, foram feitas considerações de ponto de projeto, rendimentos de componentes e constantes para o ar, combustível e o gás produto da combustão. Para o ponto de projeto, foram retiradas a altitude e velocidade do avião (HOW..., 2021). Escolheu-se 11 km de altitude por ser um valor comum para aviões comerciais. Similarmente, fez-se a escolha da velocidade. Estes valores, junto à tabela ISA (SARAVANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 2021), fornecem pressão atmosférica, temperatura atmosférica e velocidade do som no ponto de projeto escolhido para estudo. Estes valores estão representados na tabela 1.

2.2. Construção do programa de otimização

A otimização considera a variação de 4 parâmetros, os quais em conjunto alteram a tração específica e consumo específico de combustível. Desse modo, precisa-se da razão de massa de combustível pela de ar.

Utilizando a tabela de $f_{teorico}$ do querosene, (BRINGHENTI, 2021; SARAVANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 2021), o programa Reynaldo_Lima_Exame_MMT_02_f tem amostrados 923 pontos deste gráfico, de modo que com um input de temperatura na entrada da câmara de combustão e diferença de temperatura na câmara, é possível interpolar o valor de $f_{teorico}$. Há ainda uma entrada opcional booleana para a plotagem ou não do gráfico mostrado na figura 2.

Com isso, construiu-se a função Reynaldo_Lima_Exame_MMT_02_Regiao, que recebe BPR , FPR , PRT , TIT e uma struct com as constantes da tabela 1 e retorna

Tabela 1. Constantes consideradas para o ponto de projeto.

Constante	Valor [Un.]
R_{ar}	$286,8485 J/kg.K$
R_{gas}	$285,2729 J/kg.K$
γ_{ar}	1,4
γ_{gas}	1,333
$C_p^{(Ar)}$	$1005 J/kg.K$
$C_p^{(Gas)}$	$1148 J/kg.K$
T	$63 kN$
Eficiência dos exaustores	96%
Eficiência mecânica dos eixos	99%
Eficiência da câmara de comb. (C.C.)	99%
Perda de pressão na C.C. (Δp_{034})	2%
Eficiência politrópica (compressores e turbinas)	90%
Altitude	$11 km$
p_a	$22,7 kPa$
T_a	$216,8 K$
V_a	$231,3889 m/s$
a	$295,2 m/s$

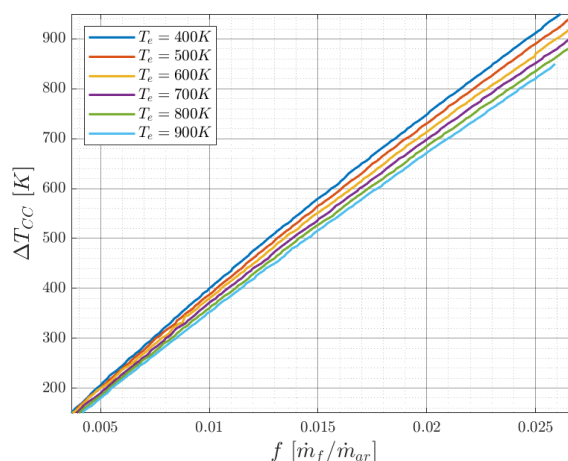


Figura 2. Razão de combustível por ar teórico para o querosene, amostrado de gráfico em (SARAVANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 2021).

o par (SFC, F_s) . Com estes dois programas, torna-se possível iterar-se automaticamente sobre um grande intervalo destas variáveis.

O programa Reynaldo_Lima_Exame_MMT_02_Regiao resolve a turbina, considerando a tração uma constante. Desse modo, há descontinuidades em transições de engasgamento de cada um dos exaustores. De forma geral isto não causa problemas na análise. Na próxima seção são mostrados os resultados obtidos do estudo e as discussões que levam ao conjunto de valores escolhidos para o motor.

3. Resultados e discussões

3.1. Estudo da região SFC vs F_s

No programa Reynaldo_Lima_Exame_MMT_02_gera_envelope, fixam-se inicialmente $BPR = 4$ e $FPR = 1,6$ por serem valores comuns para o projeto de

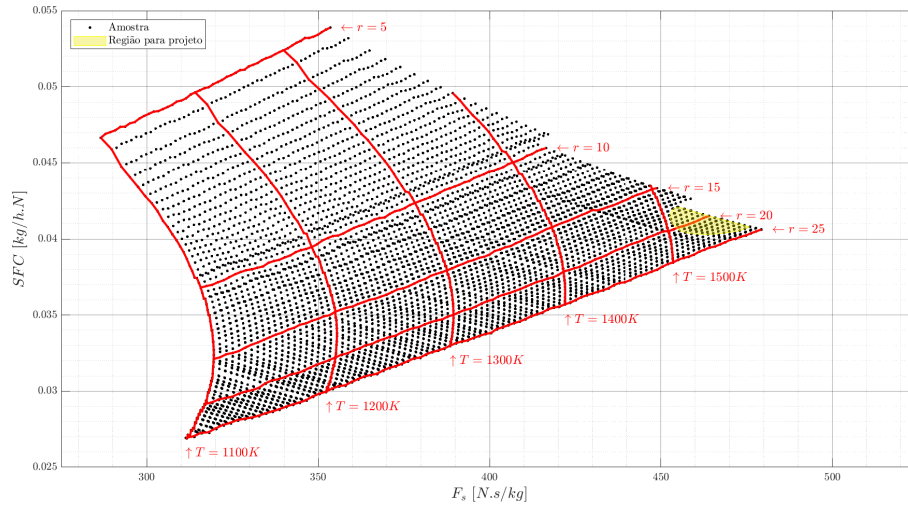


Figura 3. Conjunto de pontos de projeto amostrados, FPR e BPR fixos.

aviões comerciais subsônicos (SARAVANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 2021). Com estes valores fixados, variam-se em intervalos da razão de pressão total e da temperatura de entrada da turbina, com saída o conjunto de valores de projeto mostrados na figura 3.

Nota-se que o conjunto de valores não é fechado, pois na região superior direita começam a faltar correspondências da tabela de valores de $f_{teorico}$. De todo modo, a figura 3 serve para o projeto deste trabalho, uma vez que para aviões comerciais subsônicos deve-se buscar baixo consumo específico e alta tração específica, vista a frequência com a qual são feitos voos em um jato residencial de uma companhia aérea. Por esta razão, a figura 3 mostra a região em amarelo escolhida para o estudo do projeto.

3.2. Otimizando FPR

Da região do projeto escolhida, tomaram-se como valores para a otimização do FPR os mostrados na tabela 2. Escolheu-se um valor de $PRT = 20$ de modo a economizar tamanho (em relação aos maiores) enquanto ainda provendo alta tração específica. Similarmente, o valor da temperatura de entrada da turbina $TIT = 1520K$.

Medida	Valor [Un.]
TIT	1520K
PRT	20

Tabela 2. Temperatura de entrada da turbina TIT e razão de pressão total PRT.

O programa Reynaldo_Lima_MMT_02_Otimiza_FPR varia FPR de 1,5 a 3,4 e também retorna o valor do mínimo SFC neste intervalo. O resultado da figura 4 mostra o intervalo de valores observados. Nota-se que há uma descontinuidade pelas diferentes condições de engasgamento dos exaustores para a tração fixa. A figura mostra ainda a tendência com a qual as curvas se movem com a alteração da temperatura de entrada da turbina TIT , com uma tendência de aumento de F_s e diminuição de SFC . O programa considera $BPR = 4$ é fixo.

Desse modo, o ponto de mínimo do SFC ocorre para as condições da tabela 2 ocorre em $FPR = 2,9785$. Porém, como discutido no livro de Saravanamuttoo (SARA-

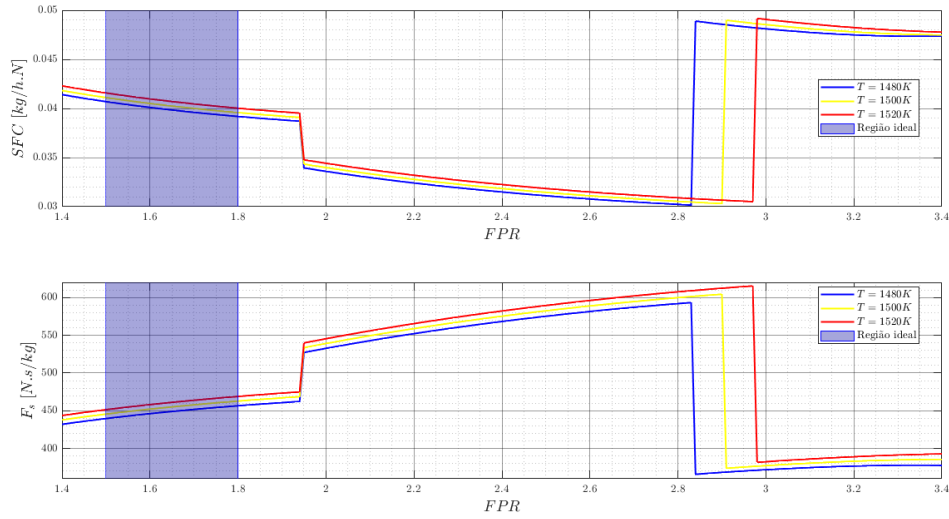


Figura 4. Variação do valor de FPR.

(VANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 2021), aviões comerciais devem ter FPR na faixa $[1,5; 1,8]$ de modo a minimizar os ruídos do motor. Esta região é marcada no gráfico e indica que o valor ótimo a ser escolhido nesta faixa é justamente $FPR = 1,8$, o qual corresponde a um $SFC = 0,04$.

3.3. Variação de BPR

Como última variável a ser analisada, seguindo o proposto em (SA-RAVANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 2021), sabe-se que um aumento de BPR pode diminuir SFC com uma penalidade à F_s . O programa Reynaldo_Lima_Exame_MMT_02_varia_bpr varia BPR para a faixa de FPR de $[1,5; 1,8]$, mostrado na figura 5.

Da curva, confirma-se que o ganho em diminuição de SFC vem a custo de uma alta diminuição da F_s . Desse modo, escolhe-se nesse trabalho o ponto de $BPR = 4$, comum em aviões comerciais e seguindo o aumento de tração específica para um baixo SFC adotado na escolha do ponto inicial da figura 3.

Com isso, as 4 variáveis de projeto do turbofan foram escolhidas e são mostradas na tabela 3, junto aos valores correspondentes de F_s e SFC .

Medida	Valor [Un.]
TIT	1520K
PRT	20
FPR	1,8
BPR	4
F_s	468,969N.s/kg
SFC	0,04003

Tabela 3. Valores escolhidos para o projeto.

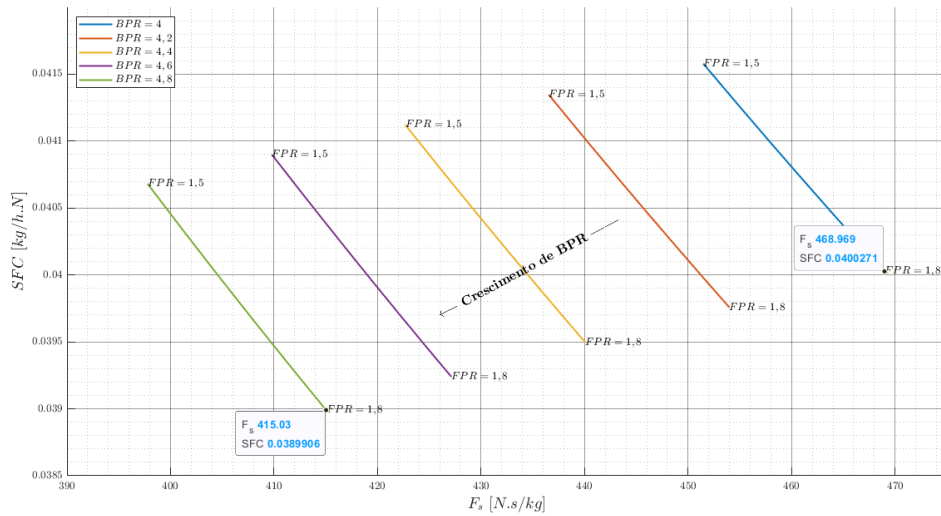


Figura 5. Variação de BPR e FPR na curva de SFC por F_s .

4. Conclusões

Com a análise do problema do motor turbofan feita em etapas, fixando-se duas variáveis e variando-se outras duas das quatro de interesse, tornou-se possível observar o efeito geral de FPR , BPR , PRT e TIT nos valores de SFC e F_s . Por fim, considerando-se que para um jato residencial deve-se priorizar muitos voos e economizar combustível, buscou-se minimizar SFC para altos F_s , chegando por fim ao conjunto de valores de projeto da tabela 3 como ponto de projeto do motor.

5. Referências

- BALDANZA, B. *Why The Airbus A220 Is A Real Game Changer For Airlines*. [S.l.]: Forbes, 2021. <https://www.forbes.com/sites/benbaldanza/2021/12/01/why-the-airbus-a220-is-a-real-game-changer-for-airlines/?sh=5cbe4dcc1bc3>. 2
- BRINGHENTI, C. *Gas Turbine Cycles for Aircraft Propulsion*: Capítulo 3 mmt-02 turbinas a gás. São José dos Campos - SP: Divisão de Engenharia Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021. 2
- HOW FAST DO COMMERCIAL AIRLINERS FLY? [S.l.]: Flight Deck Friend, 2021. <https://www.flightdeckfriend.com/ask-a-pilot/how-fast-do-commercial-aeroplanes-fly>. 2
- SARAVANAMUTTOO, H. I. H.; ROGERS, G. F. C.; COHEN, H. *Gas Turbine Theory*. 5th. ed. Padstow, Cornwall, Great Britain: Pearson Education, 2021. 2, 3, 4, 5