

# SISTEMAS TÉRMICOS DE POTÊNCIA

PROF. RAMÓN SILVA



Engenharia de Energia

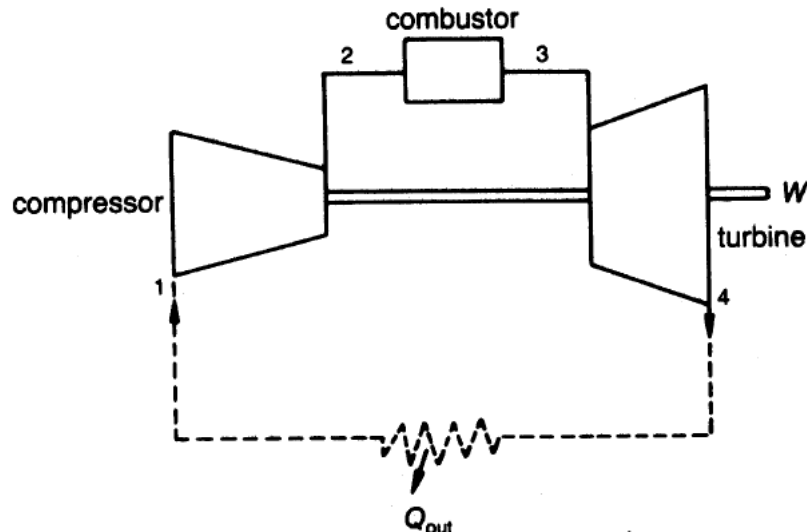
Dourados MS - 2013



# CICLO REAL

# CICLO SIMPLES -REAL

- No **ciclo real** deve-se considerar as irreversibilidades nos componentes.





# CICLO SIMPLES -REAL

- Considerando-se que não haja perda de carga nos dutos de admissão e escapamento, o seguinte exercício pode ser utilizado para ilustrar o cálculo de desempenho de uma turbina a gás.
- Determinar os parâmetros de desempenho de um conjunto gerador de gases de eixo único considerando-se a atmosfera padrão ISA.

# CICLO SIMPLES -REAL

## ○ Parâmetros de projeto

Ambiente		
Temperatura	288	K
Pressão	101325	Pa
Compressor		
Razão de compressão	10,3	
Eficiência isoentrópica	88	%
Vazão mássica de ar	108	Kg/s
Câmara de Combustão		
Perda de pressão total	5	%
PCI do Combustível (querosene)	41	MJ/kg
Eficiência de combustão	99	%
Turbina		
Eficiência isoentrópica	89	%
Temperatura de entrada na turbina (TIT) máxima	1190	K
Temperatura de saída da turbina (TOT)	873	K



# CICLO SIMPLES -REAL

- Parâmetros de projeto

Geral		
Eficiência mecânica do motor	99	%
Calor específico a pressão constante – parte fria	1004,5	J/kgK
Calor específico a pressão constante – parte quente	1148,9	J/kgK
Constante do ar	287	J/kgK
Razão entre calores específicos	1,4	

- Notar que foi fixada uma temperatura máxima na saída da turbina que poderá ser utilizada para outros fins, ou seja, apenas parte da energia dos gases quentes é extraída.

# CICLO SIMPLES -REAL

## ○ Compressor

- O compressor tem uma razão de compressão de 10,3; portanto a temperatura isoentrópica ( $T_2'$ ) na saída do compressor é calculada pela Eq.

$$T_2' = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 288 \cdot 10,3^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 561,05 K$$



# CICLO SIMPLES -REAL

- Compressor
- Rearranjando para definir a temperatura real de saída do compressor.

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2'} - T_1}{\eta_{comp}} = 288 + \frac{560,76 - 288}{0,88} = 598,26K$$



# CICLO SIMPLES -REAL

- Compressor
- A pressão na saída do compressor fica

$$P_2 = RC.P_1 = 10,3 * 101325 = 1043647,5 Pa$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Compressor
- E a potência consumida pelo compressor

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{p,frio} \cdot (T_2 - T_1) = 108.1004,5 \cdot (598,26 - 288) = 3,364 \cdot 10^7 \text{ W}$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Compressor
- E a potência consumida pelo compressor

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{p,frio} \cdot (T_2 - T_1) = 108.1004,5 \cdot (598,26 - 288) = 3,364 \cdot 10^7 \text{ W}$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Câmara de combustão
  - A temperatura de saída da câmara de combustão deve ser a temperatura máxima de entrada na turbina.
  - Portanto o ganho de temperatura na câmara de combustão deve ser a diferença entre a TIT e T<sub>2</sub>.

$$\Delta T_{cc} = (TIT - T_2) = 1190 - 598,26 = 591,74K$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Câmara de combustão
  - A potência térmica recebida pelos gases no interior da câmara é definido pela Eq.

$$Q_{cc,g} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{p,q} (T_{IT} - T_2)$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Câmara de combustão
  - A potência térmica liberada pelo combustível é

$$Q_{cc,f} = \dot{m}_f \cdot PCI_f$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Câmara de combustão
  - A eficiência de combustão pode ser definida como a razão entre essas duas grandezas.

$$\eta_{cc} = \frac{\dot{m}_{ar} \cdot c_{p,q} (T_{IT} - T_2)}{\dot{m}_f \cdot PCI_f}$$



# CICLO SIMPLES -REAL

- Câmara de combustão

- Portanto a razão combustível/ar é definida por

$$f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{ar}} = \frac{c_{p,q}(TIT - T_2)}{\eta_{cc} PCI_f} = \frac{1148,9.591,74}{0,99 * 41000000} = 0,01693$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Câmara de combustão

- Então a vazão mássica de combustível é determinada por

- $$\dot{m}_f = \dot{m}_{ar} \cdot f = 0,01693 \cdot 108 = 1,809 \text{ kg} / \text{s}$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Câmara de combustão

- E a pressão na saída da câmara é determinada por

$$P_3 = P_2 \cdot (1 - \Delta P_{cc}) = 1043647,5 * (1 - 0,05) = 991465,1 Pa$$

# CICLO SIMPLES -REAL

## ○ Turbina

- A vazão dos gases na turbina é a soma das vazões de combustível e ar

$$\dot{m}_{gturb} = \dot{m}_f + \dot{m}_{ar} = 1,809 + 108 = 109,809 \text{ kg} / \text{s}$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Turbina
- A potência na turbina será

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{gturb} \cdot c_{p,q} \cdot (T_4 - TIT) = 109,809.1148,9 \cdot (1190 - 873) = 3,99 \cdot 10^7 \text{ W}$$

# CICLO SIMPLES -REAL

- Turbina
- A potência na turbina será

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{gturb} \cdot c_{p,q} \cdot (T_4 - TIT) = 109,809.1148,9 \cdot (1190 - 873) = 3,99 \cdot 10^7 \text{ W}$$

# CICLO SIMPLES -REAL

## ○ Motor

- A potência líquida do gerador de gases é

$$\dot{W}_{liq} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{turb}}{\eta_{mec}} = \frac{3,99 \cdot 10^7 - 3,364 \cdot 10^7}{0,99} = 6,14 \cdot 10^6 W$$



# CICLO SIMPLES -REAL

- Motor
- E a eficiência do motor

$$\eta_{eng} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{m}_f . PCI} = \frac{6,14 \cdot 10^6}{1,809 \cdot 41 \cdot 10^6} = 0,086 = 8,6\%$$

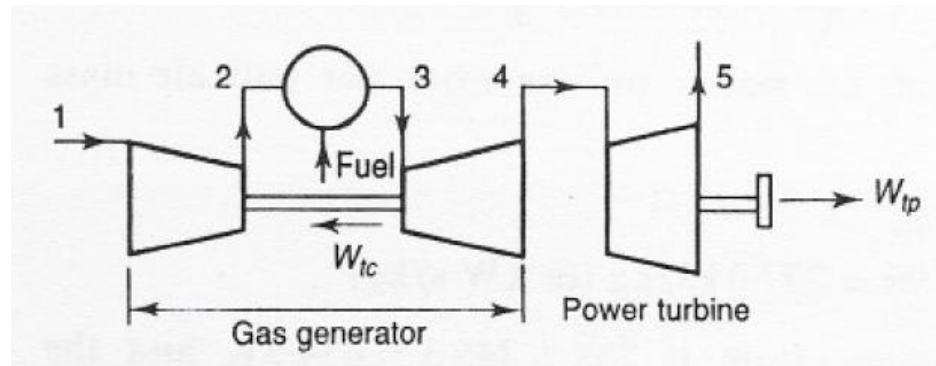
# CICLO SIMPLES -REAL

- Motor
- E o consumo específico

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_{liq}} = \frac{1,809}{6,14} = 0,282 \text{ kg / s.MW}$$

# TURBINA LIVRE

- Exercício 2.3 – Considerando-se o gerador de gases do exercício anterior, determinar a potência no eixo da turbina livre, utilizada para aplicação marítima, a relação ar/combustível e o consumo específico.



Turbina de Potência		
Eficiência isoentrópica	89	%
Eficiência mecânica	99	%

# TURBINA LIVRE

- Gerador de gases

- Para o compressor e para a câmara de combustão continuam valendo os cálculos realizados no exercício anterior, porém para a turbina do compressor deve-se considerar somente a potência gerada para suprir o compressor. Portanto:

$$\dot{W}_{turbcomp} = \frac{\dot{W}_{comp}}{\eta_{mec}} = \frac{3,364 \cdot 10^7}{0,99} = 3,398 \cdot 10^7 W$$

# TURBINA LIVRE

- E a temperatura real

$$T_4 = TIT - \frac{TIT - T_{4'}}{\eta_{turb}} = 1190 - \frac{1190 - 920,36}{0,89} = 887,34K$$



# TURBINA LIVRE

- E a pressão na saída da turbina do compressor

$$P_4 = P_3 \left( \frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 991465,1^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 354966 Pa$$



# TURBINA LIVRE

- Considerando-se que não há perdas no escapamento a temperatura isoentrópica na saída da turbina de potência é:

$$T_5' = T_4 \left( \frac{P_5}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 920,36 \cdot \left( \frac{101325}{354966} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 620,2K$$



# TURBINA LIVRE

- E a temperatura real

$$T_5 = T_4 - \eta_{tp} (T_4 - T_{5'}) = 887,34 - 0,89(887,32 - 620,2) = 649,58K$$

# TURBINA LIVRE

- E então a potência de eixo da turbina livre é

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{gturb} \cdot c_{p,q} \cdot (T_4 - T_5) = 109,809.1148,9 \cdot (887,34 - 649,58) = 3,0 \cdot 10^7 W$$



# TURBINA LIVRE

- Considerando-se o rendimento mecânico

$$\dot{W}_{tl} = \eta_{TL} \dot{W}_{turb} = 0,99 \cdot 3,0 \cdot 10^7 = 26,7 \cdot 10^6 W$$

# TURBINA LIVRE

- Portanto o consumo específico

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_{tl}} = \frac{1,809}{26,67} = 0,067 \text{ kg / s.MW}$$

# TURBINA LIVRE

- E a eficiência

$$\eta_{eng} = \frac{\dot{W}_{tl}}{\dot{m}_f . PCI} = \frac{26,67.10^6}{1,809.41.10^6} = 0,36 = 36\%$$



## BIBLIOGRAFIA

Barbosa, J – MEM 41 – Notas de aula

Boyce, M. P. Gas turbine engineering handbook Boston Gulf, ;  
c2006. 936 p. : il.

Cohen, H. Rogers, G.F.C. Saravanamuttoo, H.I.H., Gas turbine  
theory.E, Pearson, 5th Ed. 2001