4
Regime Transitório de Turbinas a Gás

4.1.
Introdução

O regime transitório das turbinas a gás é caracterizado pela condição de mudança do seu regime de funcionamento. O período de mudança de uma condição de regime permanente para outra condição de regime permanente como, por exemplo, quando há uma mudança de carga demandada, é caracterizado como um regime transitório.

A simulação do regime transitório de turbinas a gás leva em consideração a inércia dos conjuntos rotativos (transitório de eixo), a dinâmica do escoamento em volume (transitório de fluido) e também o transitório de transferência de calor (transitório térmico) entre as partes metálicas e o fluido, influenciando nas dimensões dos componentes do motor.

Os cálculos do desempenho no ponto de projeto e fora do ponto de projeto são realizados de forma a satisfazer os requisitos de compatibilidade de fluxo e de potência entre os componentes. Porém, durante o regime transitório as condições de compatibilidade devem ser modificadas. O transitório de eixo é resultante da relação entre o torque sobre o conjunto rotativo e a sua variação de quantidade de movimento. Este fenômeno ocorre quando há um desbalanceamento entre a potência gerada pela turbina a gás e a demanda requisitada pela carga.

As turbinas a gás industriais de um eixo utilizadas para geração de energia elétrica são acopladas a um gerador elétrico, girando a uma velocidade rotacional constante síncrona. Requisitos de geração limitam a variação de freqüência da energia elétrica gerada em apenas 2%. Portanto, para se avaliar a qualidade da energia elétrica produzida, o estudo do transitório é de suma importância.

As equações que regem a dinâmica dos gases dentro do volume de controle e as equações da dinâmica do eixo serão apresentadas nas seções 4.2 e 4.3, Alves [12].

4.2. Análise da Dinâmica dos Gases

As variações da quantidade de movimento, energia e massa armazenadas nos volumes dos componentes da turbina a gás determinam o seu comportamento durante o período transitório. A composição de cada uma destas variações determina os tempos relacionados aos fenômenos transitórios.

Os componentes com volumes grandes, como a câmara de combustão, irão influenciar o desempenho do regime transitório. Dentro destes volumes ocorre acúmulo de massa devido à variação de pressão e temperatura, o que resultará em uma diferença entre a vazão mássica na entrada e na saída dos componentes, Alves [12]. As equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento serão descritas nas seções 4.2.1., 4.2.2 e 4.2.3.

4.2.1. Equação de Conservação de Massa

A equação da conservação descreve a variação líquida de massa dentro do volume de controle como a diferença entre a variação de massa entrando e saindo no volume de controle, conforme Figura 21. Observa-se que a quantidade de massa na região de entrada e saída não são necessariamente iguais e que a quantidade de massa contida dentro do volume de controle pode mudar ao longo do tempo, caracterizando uma condição de regime transitório. Por outro lado, se as quantidades de massa entrando e saindo no volume de controle forem iguais, não existirá variação de massa no interior do volume de controle, caracterizando-se assim, uma condição de regime permanente.

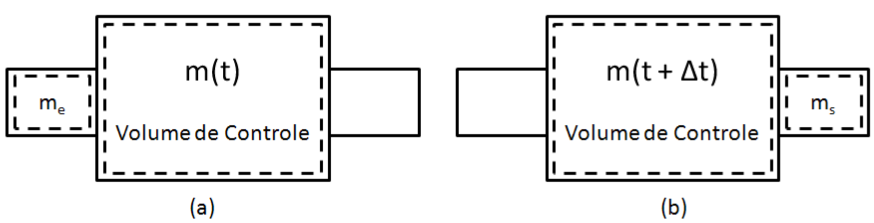

Figura 21 – Diagrama esquemático para o desenvolvimento da equação da conservação de massa para um volume de controle.

Conforme Eastop [18] e Van Wyler [19], a equação de conservação de massa é expressa da seguinte maneira:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s = \Delta\dot{m}, \qquad (8)$$

onde:

$\dot{m}_e$ é a vazão mássica na entrada do volume de controle em [kg/s];

$\dot{m}_s$ é a vazão mássica na saída do volume de controle em [kg/s];

$\frac{dm}{dt}$ é a variação de massa dentro do volume de controle em [kg/s].

4.2.2. Equação da Conservação de Energia

A equação da conservação de energia estabelece que a variação de energia (trabalho, calor, energia interna, energia potencial e cinética) dentro do volume de controle é igual à quantidade de energia entrando menos a quantidade de energia saindo do volume de controle, conforme ilustra a Figura 22.

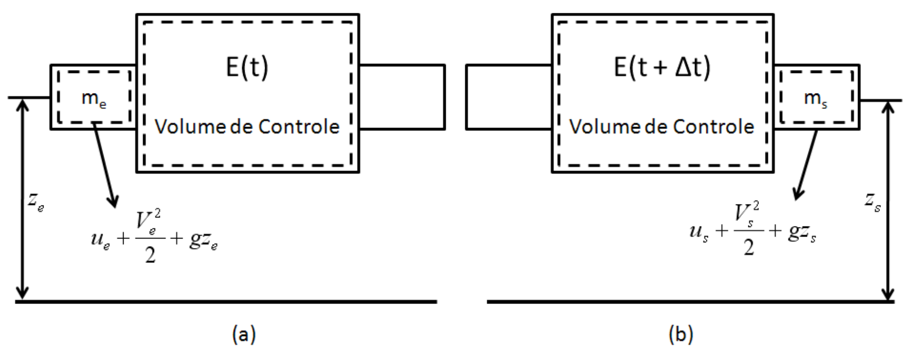

Figura 22 – Diagrama esquemático para o desenvolvimento da equação de conservação de energia para um volume de controle.

Conforme Eastop [18] e Van Wyler [19], a equação de conservação de energia é expressa da seguinte maneira:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e\left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + gz_e\right) - \dot{m}_s\left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + gz_s\right), \qquad (9)$$

onde:

h_e é a entalpia da massa entrando no volume de controle em [J/kg],

$\frac{C_e^2}{2}$ é a energia cinética da massa entrando no volume de controle em [m^2/s^2],

gz_e é a energia potencial da massa entrando no volume de controle em [m^2/s^2],

$\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor que atravessa a fronteira do volume de controle em [J/s].

$\dot{W}$ é a taxa de transferência de trabalho que atravessa a fronteira do volume de controle em [J/s],

$\frac{dE}{dt}$ é a variação da energia dentro do volume de controle em [J/s].

4.2.3. Equação da Quantidade de Movimento

Conforme Eastop [18] e Van Wyler [19], a soma de todas as forças agindo no volume de controle é igual à soma da taxa de variação da quantidade de movimento dentro do volume de controle e da taxa resultante de fluxo de quantidade de movimento através deste volume, conforme Equação (10).

$$\sum F = \frac{d(mC)_{VC}}{dt} + \dot{m}_s V_s - \dot{m}_e V_e, \qquad (10)$$

onde:

$\dot{m}_e C_e$ é a quantidade de movimento que entra no volume de controle em [kg.m/s^2],

$\dot{m}_s C_s$ é a quantidade de movimento que sai do volume de controle em [kg.m/s^2],

$\frac{d(mC)_{VC}}{dt}$ é a taxa de variação da quantidade de movimento dentro do volume de controle em [kg.m/s^2],

$\sum F$ é o somatório das forças que agem sobre o volume de controle em [kg.m/s^2].

Além disto, as forças que agem sobre o sistema são iguais à soma das componentes das forças de pressão menos a força de atrito nas paredes do volume. Portanto, a Equação (10) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$(p_e - p_s)A - R = \frac{d(mC)_{VC}}{dt} + \dot{m}_s C_s - \dot{m}_e C_e, \qquad (11)$$

onde:

$(p_e - p_s)A$ é a força de pressão em [kg.m/s^2],

R é a força de atrito nas paredes do volume de controle em [kg.m/s^2].

4.2.4. Modificação das Equações de Conservação

As equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento serão reescritas para possibilitar a determinação da variação dos parâmetros de pressão, temperatura e vazão mássica dentro do volume dos componentes da turbina a gás.

Utilizando-se da equação de estado para um gás ideal, a equação de conservação de massa, Equação (8), pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{pV}{RT}\right) = \Delta\dot{m}, \tag{12}$$

A derivada temporal do lado esquerdo da Equação (12) pode ser reescrita, conforme Equação (13).

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{pV}{RT}\right) = \frac{V}{R}\frac{d}{dt}\left(\frac{p}{T}\right), \tag{13}$$

Por sua vez,

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{p}{T}\right) = \frac{1}{T}\frac{dp}{dt} - \frac{p}{T^2}\frac{dT}{dt} \tag{14}$$

Portanto, a Equação (12) resulta em:

$$\frac{1}{T}\frac{dp}{dt} - \frac{p}{T^2}\frac{dT}{dt} = R\frac{\Delta\dot{m}}{V} \tag{15}$$

$$\frac{dp}{dt} = RT\frac{\Delta\dot{m}}{V} + \frac{p}{T}\frac{dT}{dt} \tag{16}$$

A Equação (9), que descreve a conservação de energia dentro do volume, pode ser reescrita, desprezando-se o trabalho e negligenciando-se as energias potencial e cinética, da seguinte maneira:

$$\frac{dU}{dt} + \dot{m}_s\left(h_s + \frac{C_s^2}{2}\right) - \dot{m}_e\left(h_e + \frac{C_e^2}{2}\right) = \dot{Q} \tag{17}$$

Escrevendo que,

$$\dot{m}_s\left(h_s + \frac{C_s^2}{2}\right) - \dot{m}_e\left(h_e + \frac{C_e^2}{2}\right) = -\Delta(\dot{m}H) \tag{18}$$

Onde:

$$H = h + \frac{C^2}{2}$$

e

$$\Delta(\dot{m}H) = \dot{m}_e H_e - \dot{m}_s H_s$$

Portanto, a Equação (17) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d(mu)}{dt} = \Delta(\dot{m}H) + \dot{Q} \tag{19}$$

$$\frac{d(mu)}{dt} = u\frac{dm}{dt} + m\frac{du}{dt} = u\Delta\dot{m} + \frac{pV}{RT}\frac{du}{dt} = \Delta(\dot{m}H) + \dot{Q} \qquad (20)$$

Isolando-se o termo da derivada temporal da energia interna da Equação (17), tem-se:

$$\frac{du}{dt} = \frac{RT}{p}\left(\frac{\Delta(\dot{m}H) - u\Delta\dot{m} + \dot{Q}}{V}\right) \qquad (21)$$

Finalmente, a Equação (11), que representa a conservação da quantidade de movimento, pode ser reescrita conforme Equação (24):

$$\frac{d(mC)}{dt} = \frac{d(\rho ALC)}{dt} = A(p_e - p_s) + \dot{m}_e C_e - \dot{m}_s C_s - R \qquad (22)$$

$$L\frac{d(\rho AC)}{dt} = L\frac{d(\dot{m})}{dt} = A\Delta p + \Delta(\dot{m}C) - R \qquad (23)$$

$$\frac{d(\dot{m})}{dt} = \frac{A\Delta p + \Delta(\dot{m}C) - R}{L} \qquad (24)$$

O método de resolução numérica adotada para as equações diferenciais (16), (21) e (24) foi o de Euler implícito.

4.3. Transitório de Eixo

Nas turbinas a gás, o transitório de eixo é fortemente dependente da inércia do conjunto rotativo (rotor do compressor, rotor da turbina e rotor do gerador). O torque que promoverá a variação da quantidade de movimento angular e, portanto, da rotação do conjunto rotativo, é decorrente do desbalanceamento entre a potência produzida pela turbina e a potência consumida pelo compressor. Se a potência da turbina for maior do que a do compressor, o conjunto rotativo acelera. Caso contrário, o conjunto rotativo desacelera. Este desbalanceamento pode ser produzido devido às variações do ângulo das geometrias variáveis do compressor (VIGVs), da vazão de combustível ou da potência demandada pelo sistema elétrico.

A segunda Lei de Newton estabelece que o torque externo que atua sobre um sistema é igual à taxa de variação da quantidade de movimento angular do sistema, conforme Equação (25).

$$\tau_{ext} = \frac{dL}{dt}, \qquad (25)$$

onde:

$L = I.w$, é a quantidade de movimento angular em [kg.m^2/s],
I é o momento de inércia em [kg.m^2],
w é a velocidade angular em [rad/s].

Portanto, a Equação (25) resulta em:

$$\tau_{ext} = \frac{d(I.w)}{dt}, \tag{26}$$

$$\tau_{ext} = I.\alpha, \tag{27}$$

onde o torque τ_{ext} que atua no sistema é o agente que afeta a velocidade angular w, resultando na aceleração angular α. O momento de inércia, I, é a medida da resistência a alterações do movimento de rotação.

A velocidade angular em função da rotação é:

$$w = \frac{2\pi}{60} N, \tag{28}$$

onde N é a velocidade de rotação do eixo em [rpm].

A potência do sistema rotativo é dada por:

$$\dot{W} = \tau_{ext}.w \tag{29}$$

Além disto, a potência que será a responsável pela variação de rotação é expressa da seguinte maneira:

$$\dot{W} = \dot{W}_T - \dot{W}_c - \dot{W}_A, \tag{30}$$

onde:

$\dot{W}_T$ é a potência produzida pela turbina em [MW],

$\dot{W}_c$ é a potência consumida pelo compressor em [MW],

$\dot{W}_A$ é a potência consumida pelos auxiliares em [MW].

Das Equações (29) e (30), a variação da rotação é dada por:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\dot{W}}{I.N} \left(\frac{\pi}{30} \right)^{-2} \tag{31}$$

A Equação (31) é utilizada para o cálculo da rotação em cada instante durante o transitório, e o método utilizado na solução é o de Euler implícito.