WHITE PAPER

Surge e stall em compressores de turbinas a gás

Fundamentos aerodinâmicos, geometria variável, sangria de ar e impactos no desempenho

GT2 Tecnologia | White paper técnico | Novembro de 2026

Resumo

A operação estável de uma turbina a gás depende não apenas do desempenho do compressor axial no ponto de projeto, mas também de sua capacidade de trabalhar com segurança durante partida, aceleração, desaceleração e variações de carga. Dois fenômenos delimitam essa capacidade: o stall, associado à separação do escoamento em palhetas ou regiões do compressor, e o surge, uma instabilidade global que pode produzir grandes oscilações de pressão e vazão. Este artigo explica suas origens, consequências e principais estratégias de prevenção, com destaque para as pás diretoras de entrada variáveis (VIGVs/IGVs), os estatores variáveis (VSVs) e as válvulas de sangria ou descarga (bleed/blow-off valves). Também discute os compromissos entre margem de estabilidade, potência, eficiência térmica e desempenho em carga parcial.

Palavras-chave: turbina a gás; compressor axial; surge; rotating stall; VIGV; VSV; blow-off; surge margin; carga parcial.

1. Por que a estabilidade do compressor é tão importante?

O compressor de uma turbina a gás precisa elevar a pressão do ar consumindo parte relevante do trabalho produzido pela turbina. Seu funcionamento é governado por um delicado equilíbrio entre rotação, vazão, razão de pressão, eficiência e geometria dos estágios. Em um compressor axial, cada rotor e estator é projetado para trabalhar dentro de uma faixa de ângulos de incidência e carregamento aerodinâmico. Afastar-se dessa faixa pode provocar separação da camada-limite e instabilidades.

O mapa do compressor representa, em geral, a razão de pressão total em função da vazão mássica corrigida para diferentes rotações corrigidas; ilhas de eficiência e uma linha-limite de estabilidade completam a representação. A linha de operação da turbina resulta do matching entre compressor, câmara de combustão, turbina, perdas de pressão e sistema de controle. Na operação real, a distância entre essa linha e o limite de instabilidade é a margem de segurança aerodinâmica; a definição quantitativa de surge margin varia segundo o fabricante e o procedimento de ensaio.

Para um gás ideal, utilizando uma condição de referência, a rotação corrigida e a vazão mássica corrigida podem ser expressas por:

$$N_{\mathrm{corr}} = \frac{N}{\sqrt{T_{t1}/T_{\mathrm{ref}}}}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{corr}} = \dot{m}\,\frac{\sqrt{T_{t1}/T_{\mathrm{ref}}}}{P_{t1}/P_{\mathrm{ref}}}$$

Nessas expressões, N é a rotação, $\dot{m}$ a vazão mássica, T_{t1} e P_{t1} a temperatura e a pressão totais na entrada do compressor, e T_{ref} e P_{ref} os respectivos valores de referência. Essas correções permitem comparar pontos sob diferentes condições de admissão; a aplicação a uma máquina específica deve seguir as convenções do OEM.

2. O que é stall?

Stall é a perda de capacidade de uma palheta ou de um conjunto de passagens de sustentar o campo de pressão desejado devido, tipicamente, à separação do escoamento. Em termos físicos, a incidência se afasta da faixa adequada, a camada-limite não consegue vencer o gradiente adverso de pressão e surgem regiões de recirculação ou bloqueio aerodinâmico. Isso reduz o incremento de pressão e deteriora o rendimento do estágio.

O fenômeno pode ser localizado e aproximadamente estacionário, ou assumir a forma de rotating stall: uma ou mais células de escoamento separado se propagam circunferencialmente pelo compressor, frequentemente a uma fração da velocidade do rotor. Nesse caso, sondas ou transdutores em diferentes posições angulares detectam perturbações de pressão defasadas no tempo. Nem todo stall evolui para surge, e um compressor pode experimentar rotating stall sem reversão global da vazão.

3. O que é surge?

O surge é uma instabilidade do sistema de compressão como um todo, caracterizada por oscilações substanciais de pressão e vazão, acompanhadas, em casos severos, por reversão temporária do escoamento. Em vez de se restringir a algumas passagens de palhetas, envolve a interação dinâmica entre a característica do compressor e os volumes, dutos e restrições a jusante. Um evento pode produzir pulsações de baixa frequência, ruído intenso, vibração e perda abrupta da razão de pressão.

É comum representar o limite de surge no mapa como uma fronteira de baixa vazão e elevada razão de pressão. Contudo, essa fronteira é uma aproximação operacional: sua posição depende de rotação, geometria, condições de entrada, dinâmica do sistema e método de identificação. Stall e surge estão relacionados, mas não são sinônimos: o stall descreve um mecanismo aerodinâmico de separação, enquanto o surge descreve uma resposta instável global do sistema.

4. Por que stall e surge ocorrem?

O principal mecanismo local é a combinação de ângulo de incidência inadequado e carregamento aerodinâmico excessivo. Quando a vazão diminui sem que a geometria e a rotação se ajustem de maneira compatível, a componente axial da velocidade cai; o ângulo relativo visto pelo rotor se altera e o escoamento pode se separar. Nos estatores, mudanças no perfil de velocidade e na difusão também favorecem a separação. Nos compressores de múltiplos estágios, a incompatibilidade de vazão entre seções dianteiras e traseiras agrava o problema, sobretudo em baixa rotação.

Entre os fatores operacionais relevantes estão: partida e parada, acelerações ou desacelerações rápidas, mudanças bruscas de carga ou combustível, distorção ou turbulência na admissão, sujeira e erosão das palhetas, degradação de folgas nas pontas, condições ambientais e falhas de atuadores ou sensores. A câmara de combustão e a turbina também influenciam a contrapressão e, portanto, a linha de operação. Em máquinas aeronáuticas, ingestão de objetos, perturbações de admissão e manobras podem acentuar o risco; em unidades industriais, transientes de operação e deterioração aerodinâmica merecem atenção especial.

Não existe uma única vazão crítica universal. A estabilidade depende do mapa de cada compressor, do regime transitório e da programação coordenada de geometria variável, sangrias e combustível. Por essa razão, um ajuste de controle aparentemente pequeno pode deslocar significativamente a margem de estabilidade em certos pontos do envelope operacional.

5. Consequências para a turbina a gás

Eventos leves podem causar flutuações de pressão, perda momentânea de desempenho ou atuação de proteções. Eventos intensos ou repetidos impõem cargas aerodinâmicas alternadas sobre pás, discos, mancais e carcaças. Rotating stall persistente pode gerar excitação não síncrona e fadiga de alto ciclo em palhetas, enquanto surge severo pode provocar vibração, esforços axiais transientes, perturbações na combustão, apagamento de chama, trips e danos mecânicos.

As consequências dependem da severidade, da duração e do projeto. Não é correto pressupor que cada episódio de surge destrua o compressor; tampouco se deve tratar o evento como inofensivo. A repetição de transientes reduz a confiabilidade e pode antecipar inspeções, restringir a disponibilidade e elevar o custo de manutenção. O sistema de proteção normalmente monitora assinaturas de pressão, rotação, temperatura, vibração e condições de combustão, mas critérios e limites são específicos da máquina.

6. Como prevenir: geometria variável e sangria de ar

6.1. Pás diretoras de entrada variáveis - VIGVs / IGVs

As inlet guide vanes são palhetas estacionárias instaladas antes do primeiro rotor do compressor. Quando são variáveis (VIGVs), sua posição angular altera o pré-redemoinho (prewhirl) e a direção da velocidade absoluta na entrada. Assim, modifica o ângulo relativo de incidência no primeiro rotor e, conforme o projeto, a vazão admitida e a característica aerodinâmica do conjunto. A programação das VIGVs é normalmente função de rotação, carga, temperatura e outras variáveis de controle.

A abertura ou o fechamento das VIGVs não deve ser entendido simplesmente como uma válvula de estrangulamento convencional. Além de afetar a área efetiva e a vazão, o pré-redemoinho altera o trabalho de Euler e o matching dos estágios. Sua ação pode melhorar a estabilidade e o desempenho em parte do envelope, mas uma posição excessivamente fechada ou inadequada também eleva as perdas e reduz a eficiência. O sentido positivo do ângulo e a estratégia de abertura dependem do fabricante.

6.2. Estatores variáveis - VSVs

As variable stator vanes (VSVs) são fileiras ajustáveis de estatores, frequentemente nos estágios iniciais de compressores de alta pressão. Diferentemente das VIGVs, que agem antes do primeiro rotor, as VSVs corrigem o direcionamento do escoamento entre estágios. Em baixas rotações, ajudam a compatibilizar as condições de incidência e difusão ao longo do compressor, permitindo uma faixa operacional mais ampla com margem de estabilidade adequada. Em arquiteturas aeroderivadas, VIGVs, VSVs e válvulas de sangria podem trabalhar em conjunto.

6.3. Sangria intermediária e válvulas blow-off / bleed

As válvulas de sangria retiram parte do ar de um estágio intermediário ou da descarga do compressor e a conduzem, conforme o projeto, para a atmosfera, para um duto apropriado ou para outro circuito. Ao aliviar a pressão e redistribuir a vazão entre as seções do compressor, podem aumentar a vazão que atravessa os estágios a montante e reduzir a carga aerodinâmica sobre regiões suscetíveis a stall. São particularmente úteis em partida, parada e transientes, quando a compatibilidade entre estágios ainda não corresponde à condição de regime.

A localização da sangria importa. Uma sangria intermediária pode melhorar o matching dos estágios dianteiros e traseiros de maneira diferente de uma descarga na saída final; por isso, afirmar simplesmente que abrir a válvula sempre aumenta a vazão em todos os estágios seria incorreto. Em muitos projetos, a abertura é temporária e as válvulas se fecham progressivamente com a aceleração. Algumas máquinas empregam modulação contínua, sujeita à lógica definida pelo fabricante.

É importante distinguir a sangria anti-surge de ar extraído para resfriamento de componentes quentes, vedação, controle de emissões ou anti-icing. Embora utilizem ar comprimido e afetem balanços de massa e energia, essas funções têm finalidades e estratégias de controle distintas. Também não se deve confundir blow-off de turbinas a gás com válvulas de reciclo anti-surge de compressores de processo.

6.4. Outras formas de prevenção

O projeto também utiliza margem aerodinâmica adequada, escolha de número de eixos, leis de aceleração e combustível, coordenação com a temperatura de exaustão e monitoramento de saúde do compressor. Manutenção de filtros, lavagem do compressor, verificação de atuadores, calibração de sensores e inspeções de folga e erosão contribuem para conservar a margem originalmente prevista. Controles ativos por injeção localizada de ar e detecção de pré-stall são áreas de pesquisa, mas não substituem automaticamente os dispositivos certificados de cada máquina.

7. Como os controles afetam o desempenho?

7.1. Efeitos da geometria variável

Ao alterar os ângulos de entrada e a distribuição de carregamento, VIGVs e VSVs deslocam as características do compressor e podem reduzir a potência absorvida em determinadas condições de carga parcial. Entretanto, o fechamento das VIGVs normalmente reduz a vazão de ar e limita a potência máxima disponível naquele ajuste; a eficiência isentrópica do compressor pode aumentar ou diminuir conforme o ponto operacional e a programação da geometria. Portanto, não há um ganho percentual universal aplicável a todas as turbinas.

Em ciclos combinados, a modulação das IGVs frequentemente também ajuda a manter a temperatura de exaustão em carga parcial, o que pode favorecer a recuperação de calor na HRSG. Esse benefício sistêmico deve ser avaliado juntamente com a redução de vazão de gases, as condições de combustão e as restrições de emissões. O melhor ajuste para a eficiência do compressor isolado não é necessariamente o melhor para a eficiência líquida da usina.

7.2. Efeitos da sangria

O ar sangrado já consumiu trabalho de compressão, mas deixa de contribuir integralmente para a vazão através da câmara de combustão e da turbina, quando descarregado para fora do caminho principal dos gases. Em termos simplificados, a potência líquida é:

$$\dot{W}_{\mathrm{liq}} = \dot{W}_{\mathrm{turbina}} - \dot{W}_{\mathrm{compressor}} - \dot{W}_{\mathrm{auxiliares}}$$

Nessa expressão, $\dot{W}$ representa potência, ou taxa de transferência de trabalho; os subscritos identificam turbina, compressor e equipamentos auxiliares. A sangria altera os dois primeiros termos e, em geral, penaliza a eficiência térmica e a potência útil se mantida desnecessariamente aberta. A magnitude depende do estágio de extração, da vazão sangrada, da arquitetura dos eixos e da condição de controle.

Em uma representação idealizada do balanço de massa, para uma sangria descarregada para fora do caminho principal dos gases:

$$\dot{m}_{\mathrm{turbina}} \approx \dot{m}_{\mathrm{entrada}} - \dot{m}_{\mathrm{sangria}} + \dot{m}_{\mathrm{combustivel}}$$

Os subscritos de $\dot{m}$ identificam as vazões mássicas que atravessam a turbina, entram no compressor, são sangradas e correspondem ao combustível. A relação desconsidera extrações e reinjeções adicionais, inclusive os circuitos internos de resfriamento. Essa expressão torna explícito o custo da sangria: parcela do ar foi comprimida sem percorrer integralmente o caminho de expansão útil. Como medida temporária de proteção durante partida ou aceleração, essa perda é aceitável; em operação contínua, uma válvula que vaza ou permanece indevidamente aberta pode produzir perda de potência e aumento do heat rate.

7.3. O compromisso entre segurança e eficiência

Uma programação agressiva de fechamento de VIGVs ou de sangrias pode parecer favorável ao rendimento em certo ponto, mas reduzir a margem contra stall e surge. A estratégia correta não consiste em maximizar isoladamente a vazão, a razão de pressão ou a eficiência: é preservar uma margem robusta em todo o envelope, com consumo específico e desempenho transitório compatíveis com o projeto. Comparações de campo devem separar efeitos de temperatura ambiente, deterioração do compressor, combustível, carga, IGVs, sangrias e limitações do controle.

8. Resumindo

- **VIGVs:** modificam pré-redemoinho e incidência no primeiro rotor; modulam vazão e característica do compressor; úteis para estabilidade e controle de carga parcial; efeito energético dependente do ponto operacional.
- **VSVs:** ajustam a incidência e o matching entre estágios; ampliam a faixa de operação estável; comuns em compressores multieixos e de elevada razão de pressão; exigem programação coordenada.
- **Bleed / blow-off:** descarregam ar comprimido de uma seção selecionada; aliviam carregamento e melhoram a compatibilidade aerodinâmica sobretudo em transientes; têm penalidade energética quando o ar não realiza expansão útil.

9. Conclusão

Surge e stall são manifestações diferentes de um mesmo desafio: manter o escoamento compatível com o carregamento aerodinâmico dos estágios do compressor. O stall começa como perda local de estabilidade e pode se organizar em células rotativas; o surge caracteriza uma oscilação global do sistema, eventualmente com reversão da vazão. Ambos podem afetar disponibilidade, integridade mecânica e desempenho de turbinas a gás.

As VIGVs e VSVs atuam sobre os ângulos e o matching aerodinâmico; as sangrias atuam sobre a distribuição de vazão e pressão. A combinação dos três recursos, integrada às leis de combustível e proteção, permite ampliar a faixa operacional sem abrir mão da segurança. Na análise de desempenho, entretanto, toda mudança de geometria ou sangria deve ser examinada no contexto do ciclo completo e não apenas do compressor.

Referências

[1] NASA NTRS. Huntley, S. C.; Braithwaite, W. M. Effect of Variable-Position Inlet Guide Vanes and Interstage Bleed on Compressor Performance of a High-Pressure-Ratio Turbojet Engine. NACA-RM-E56E23a, 1956. https://ntrs.nasa.gov/citations/19930088889

[2] NASA Glenn. Active Control of Rotating Stall Demonstrated for a Multistage Compressor With Inlet Distortion. NASA NTRS, 2001. https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050196613.pdf

[3] NASA. Practical Techniques for Modeling Gas Turbine Engine Performance. NASA/TM-2016-219147, 2016. https://ntrs.nasa.gov/search?q=NASA%2FTM-2016-219147

[4] GE Vernova. Variable Inlet Guide Vanes (VIGV) with EFS - LM6000. https://www.gevernova.com/gas-power/services/gas-turbines/upgrades/variable-inlet-guide-vanes-with-efs

[5] Liu, M.; Tan, L.; Cao, S. A Review of Prewhirl Regulation by Inlet Guide Vanes for Compressor and Pump. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A. DOI: 10.1177/0957650918820795.

[6] Shulhan, G.; Saravanamuttoo, H. Variable Geometry Compressors for Improvement of Gas Turbine Part Load Performance. SAE Technical Paper 760283, 1976. DOI: 10.4271/760283.

[7] Pampreen, R. C. The Use of Variable Inlet Guide Vanes for Automotive Gas Turbine Engine Augmentation and Load Control. SAE Technical Paper 760285, 1976. DOI: 10.4271/760285.

[8] GE / IAGT. Gas Turbine Basics - Compressor Section. IAGT Workshop, 2016. https://na.eventscloud.com/file_uploads/7cab61b6ad654487f39eb91267b3becd_GasTurbineBasics.pdf

[9] Saravanamuttoo, H. I. H. et al. Gas Turbine Theory. Pearson, edições recentes. Referência bibliográfica de fundamentos.

[10] Walsh, P. P.; Fletcher, P. Gas Turbine Performance. Blackwell Science. Referência bibliográfica de desempenho.