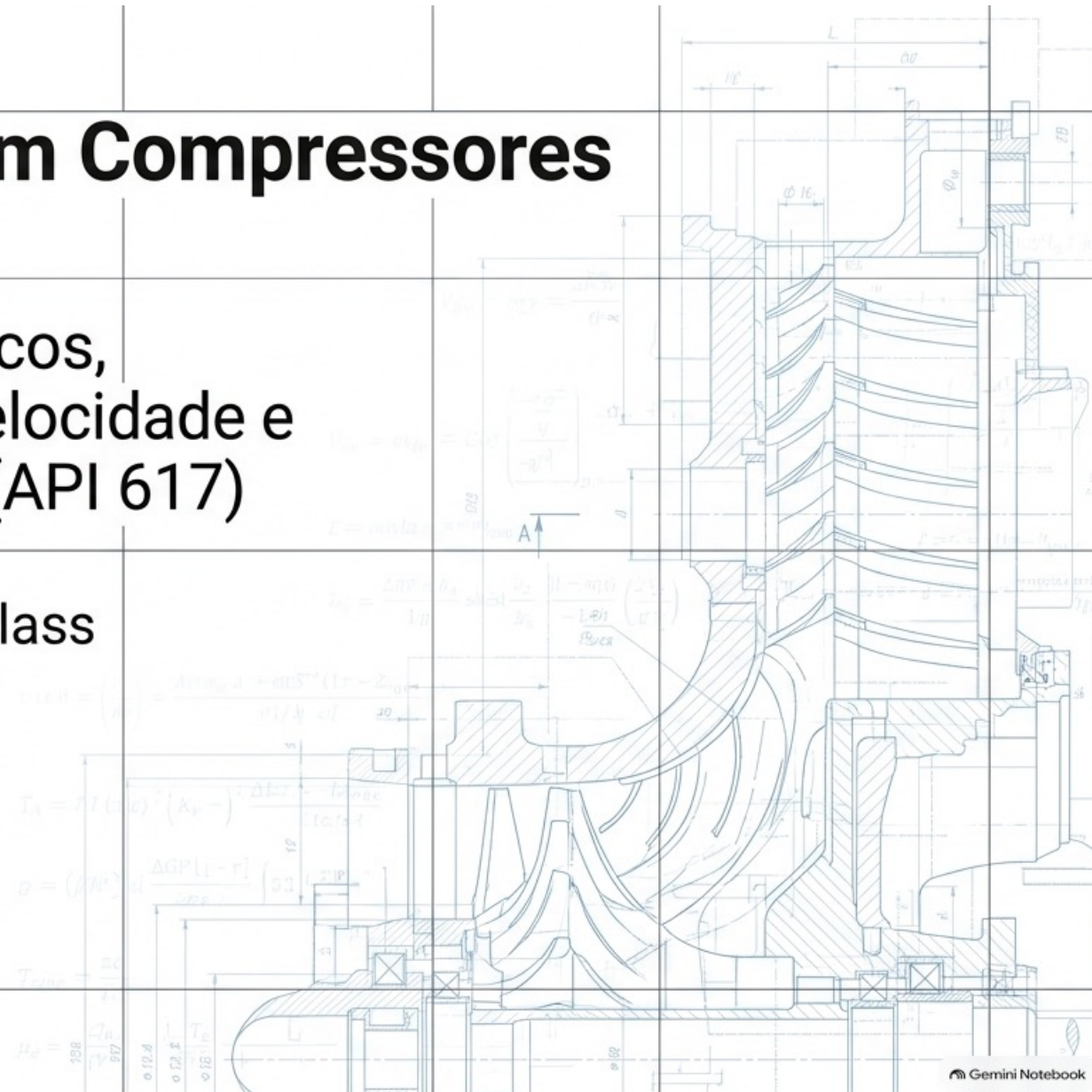


Controle de Surge em Compressores Axiais e Radiais

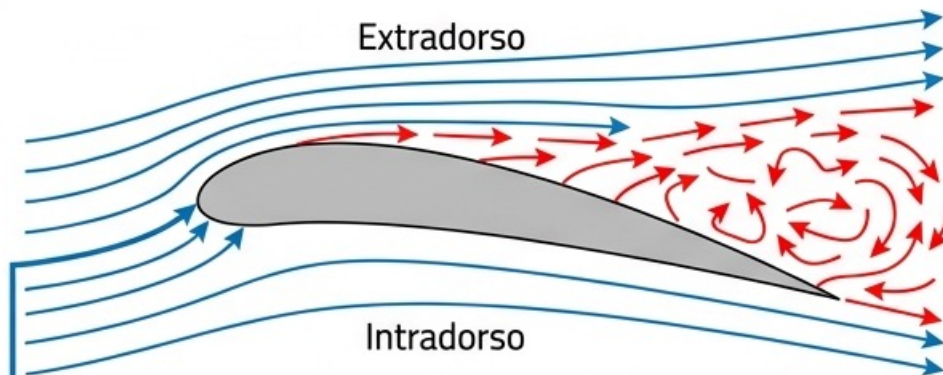
Fundamentos Aerodinâmicos,
Instrumentação de Alta Velocidade e
Estratégias de Mitigação (API 617)

Documento Técnico / Masterclass



Fundamentos da Instabilidade: Surge vs. Stall

Stall (Separação Local)

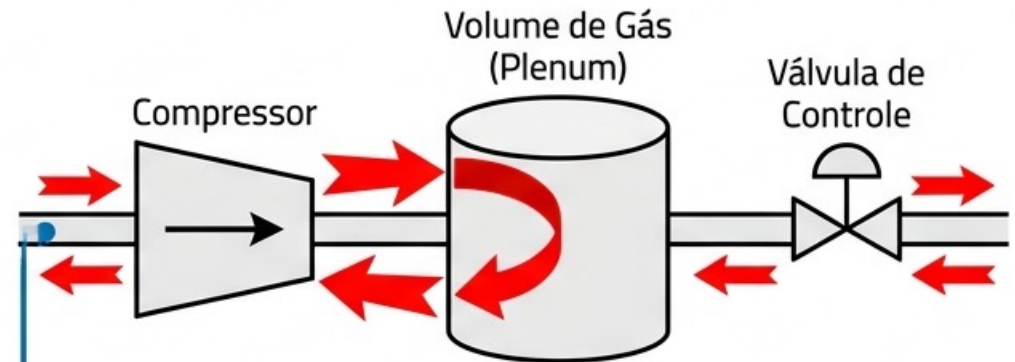


Separação local do escoamento (camada limite) nas pás ou difusores.

Pode ocorrer de forma localizada sem que o sistema perca estabilidade.

Atua como precursor aerodinâmico (ex: rotating stall).

Surge (Instabilidade Sistêmica)

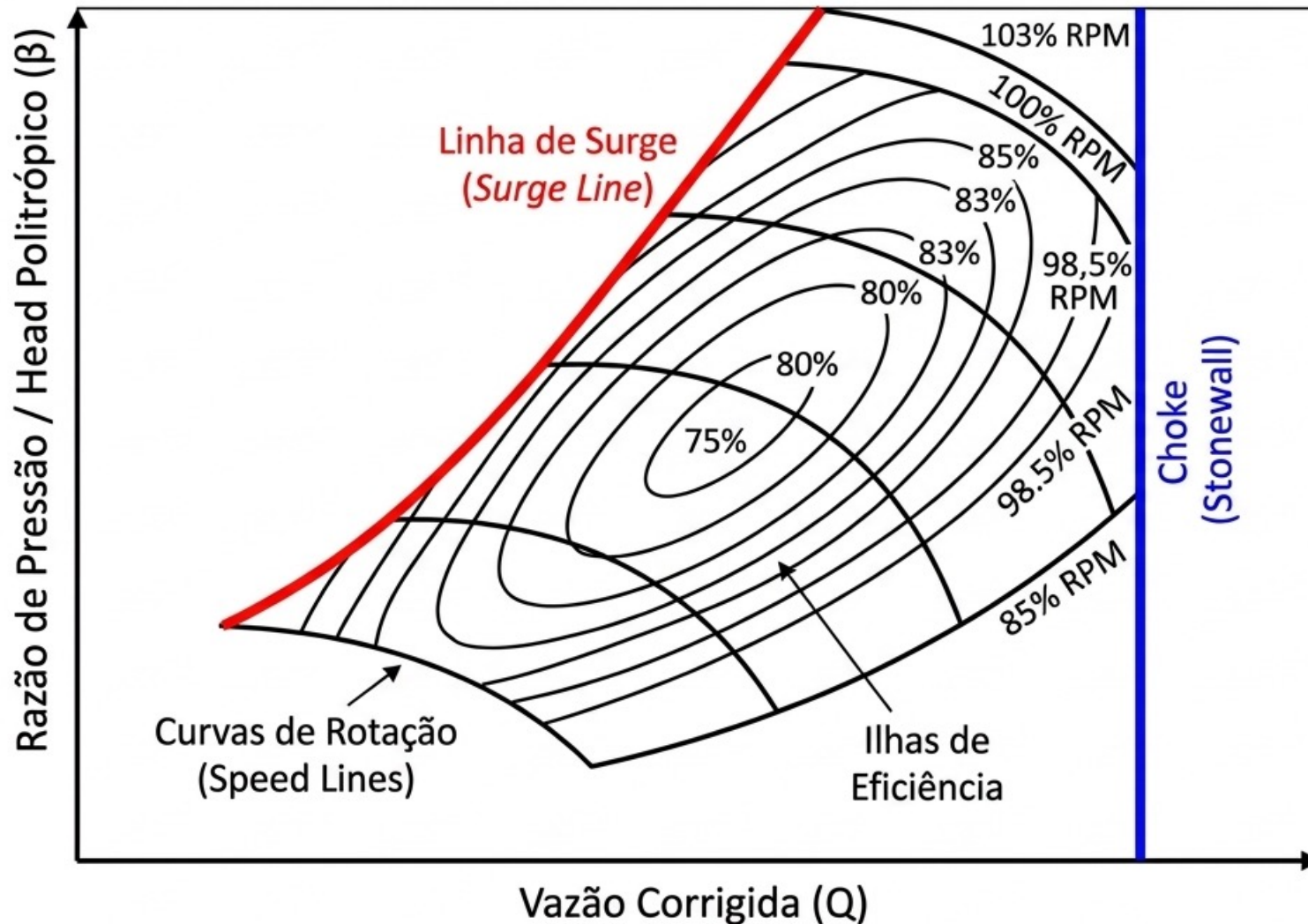


Resposta dinâmica global do conjunto compressor acoplado ao sistema de tubulação.

Caracterizado por severas oscilações de pressão e reversão total do escoamento.

Gera forças axiais destrutivas (empuxo), exigindo trip imediato do equipamento.

O Mapa de Desempenho do Compressor



O mapa cartesiano descreve a assinatura termodinâmica intrínseca da turbomáquina — estabelecendo a relação entre o trabalho realizado (elevação de pressão) e a massa de gás movimentada.

Limites de Estabilidade e Linhas de Proteção

Linha de Surge:

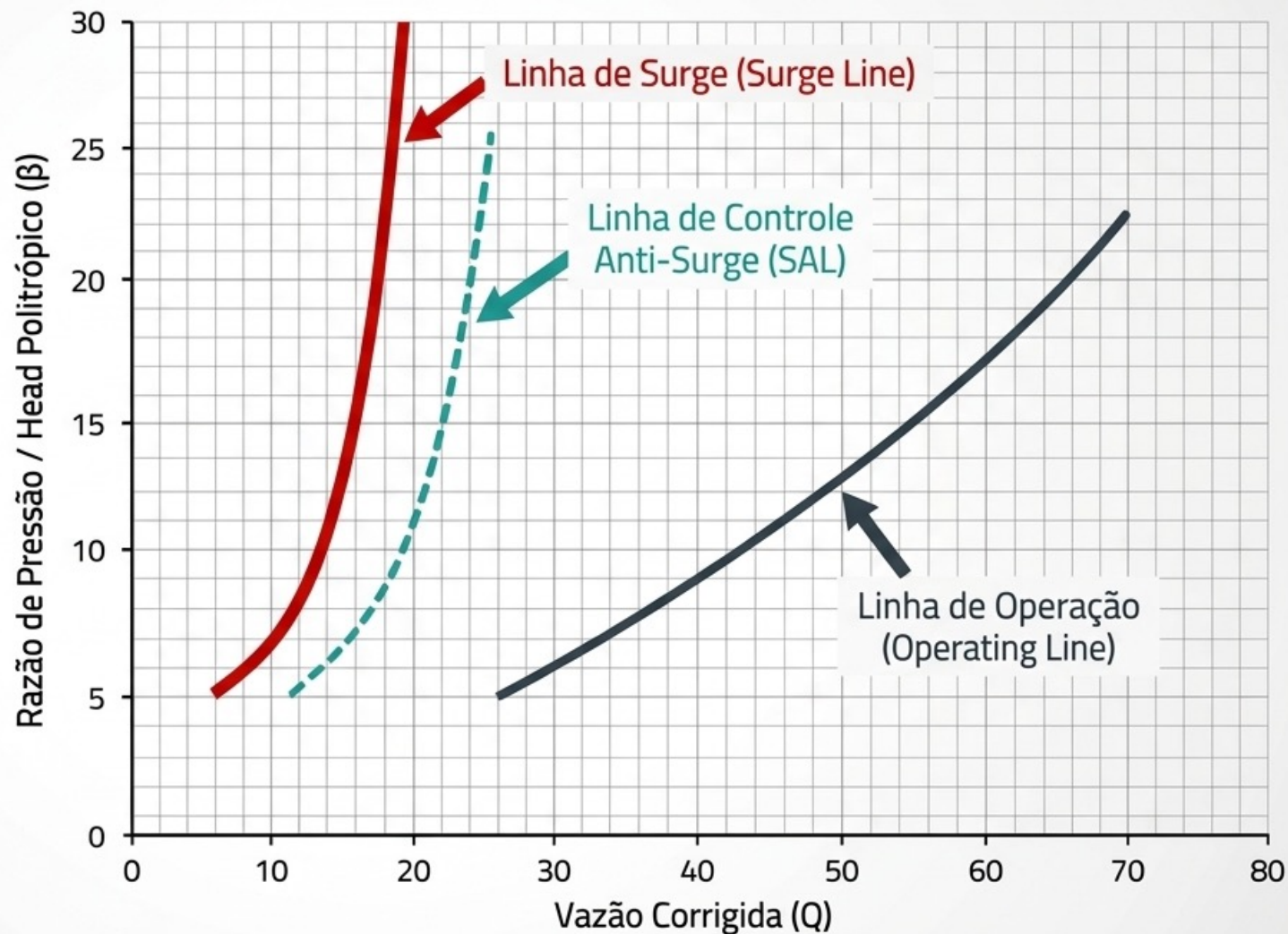
O limite absoluto de estabilidade aerodinâmica em baixa vazão. Cruzar esta fronteira resulta em reversão catastrófica de fluxo.

Linha de Controle Anti-Surge (SAL):

A margem defensiva configurada no controlador PID. Define o ponto de gatilho para a abertura da válvula de reciclo, tipicamente mantendo de 10% a 15% de distância de segurança.

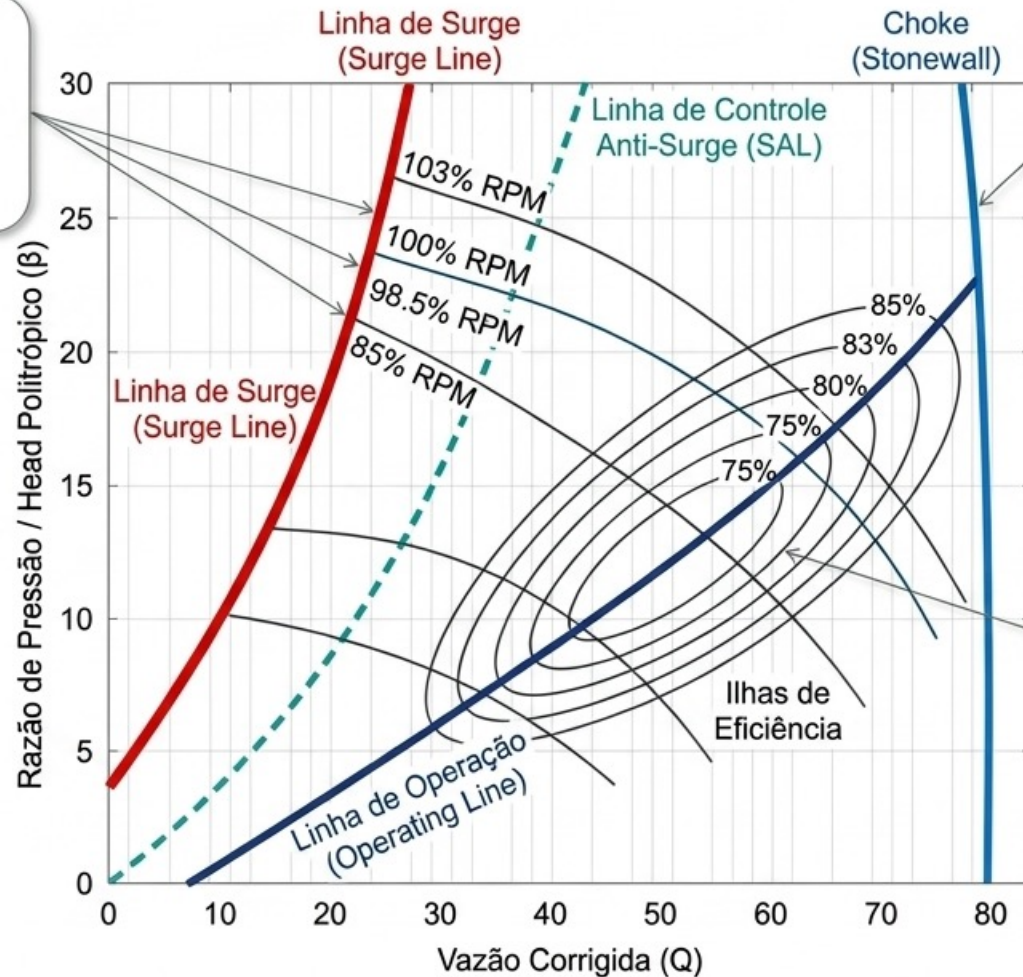
Linha de Operação:

A trajetória transiente e de regime permanente que o processo efetivamente percorre sob controle dinâmico.



Parâmetros de Operação, Capacidade e Eficiência

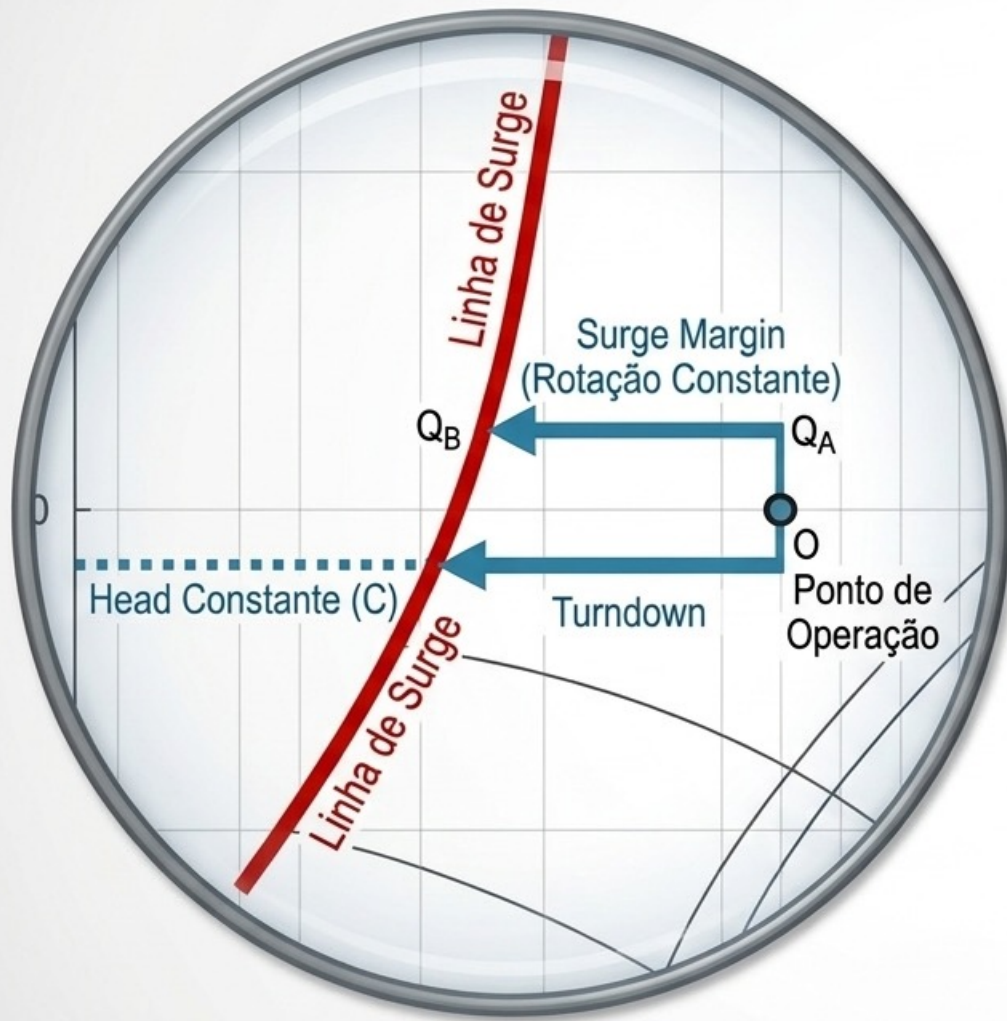
Curvas de Rotação (Speed Lines): Mapeiam o comportamento aerodinâmico para velocidades corrigidas (% RPM) constantes.



Linha de Choke / Stonewall: O limite físico absoluto de alta vazão, onde o gás atinge velocidade sônica na garganta do rotor (Mach 1).

Ilhas de Eficiência: Contornos de eficiência adiabática/politrópica. Determinam a topologia ideal do ponto de projeto.

Formulação Matemática: Distância até a Instabilidade



Margem de Surge (Surge Margin - SM)

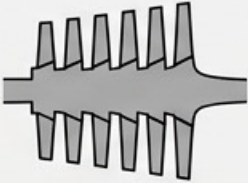
$$SM = \frac{Q_A - Q_B}{Q_B} \times 100\%$$

Onde Q_A é a vazão volumétrica real de operação e Q_B é a vazão de surge projetada para a mesma linha de velocidade corrigida.

Turndown

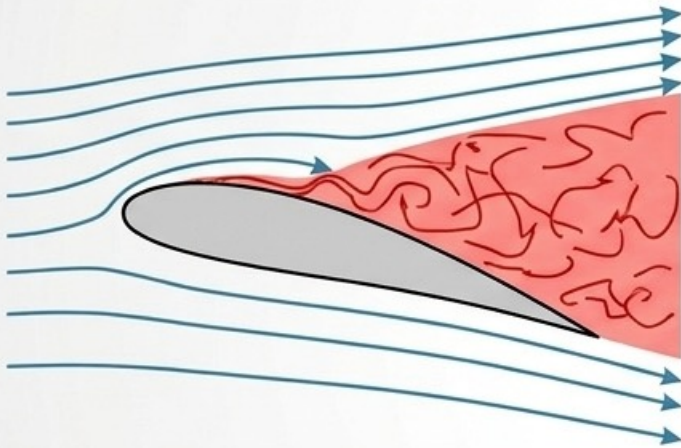
Define a capacidade útil e a margem de segurança entre o ponto de operação e a linha de surge mantendo a restrição de um head (elevação de pressão) estritamente constante.

Matriz de Diferenciação: Compressores Axiais vs. Radiais

	Axial (Multiestágio) 	Radial (Centrífugo) 
Aerodinâmica	Escoamento estritamente paralelo ao eixo rotativo. Projetado para máxima eficiência e altíssima capacidade de vazão volumétrica.	Escoamento perpendicular ao eixo (do olho do impelidor ao difusor radial). Projetado para gerar altíssima razão de pressão por estágio individual.
Estabilidade e Mapa	Curva característica muito íngreme. Margem de surge estreita. Comportamento aerodinâmico altamente sensível a qualquer variação transiente de velocidade.	Curva característica mais plana. Margem de surge tipicamente ampla. Estabilidade ditada majoritariamente pela dinâmica dos volumes de gás e tubulações acopladas.
Mitigação Primária de Surge	Geometria Variável (VIGV) manipulando o ângulo de incidência, em conjunto com válvulas de sangria (Bleed valves) inter-estágio.	Válvulas de reciclo rápido de gás (Discharge-to-Suction), garantindo vazão mínima através do sistema.

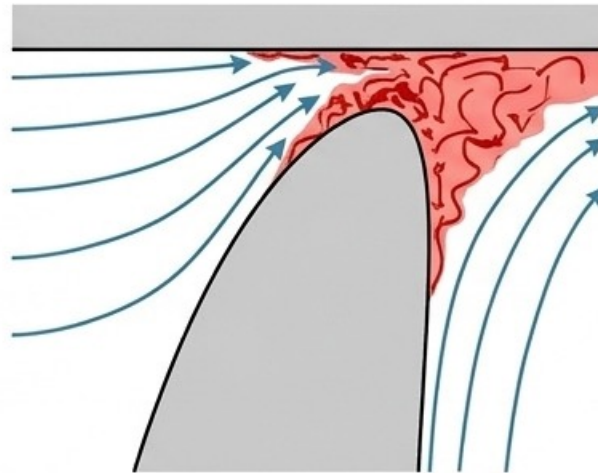
A Mecânica do Estol (Stall Dynamics e Precursores)

Blade Stall (Estol de Pá)



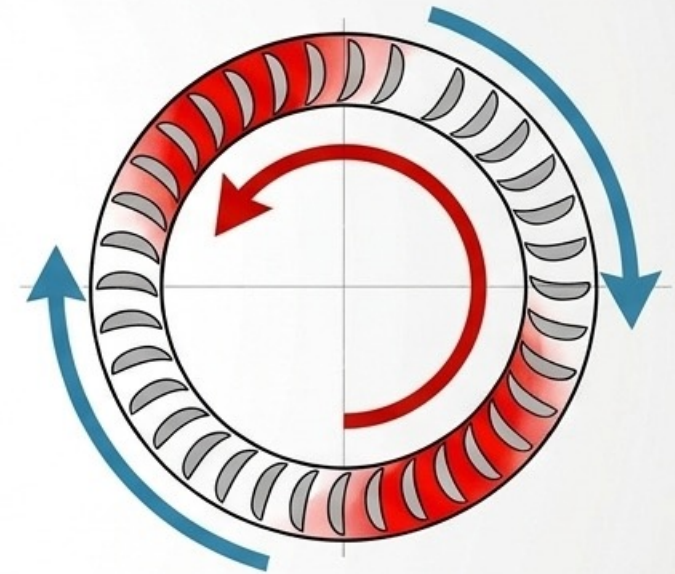
Descolamento bidimensional clássico da camada limite na superfície de sucção da pá. Gera uma esteira turbulenta de baixa pressão e alta perda (*wake*) atrás do perfil aerodinâmico.

Wall Stall (Estol de Parede)



Separação aerodinâmica complexa associada puramente à camada limite na carcaça externa (*annulus wall*). Frequentemente engasga a região da ponta das pás.

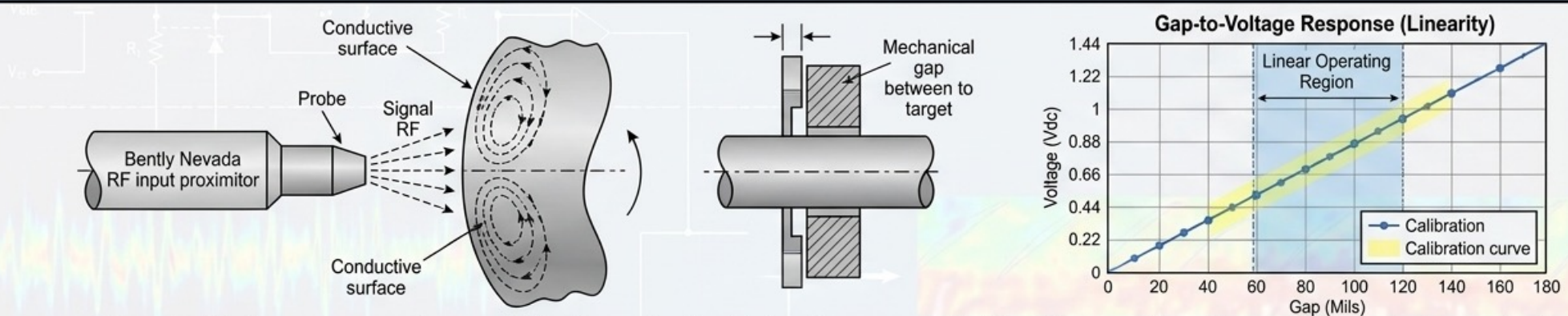
Rotating Stall (Estol Rotativo)



O precursor clássico do surge profundo. Células de estol não estacionárias viajam ao redor do anel do compressor, propagando-se transversalmente a 15-30% da velocidade nominal do rotor.

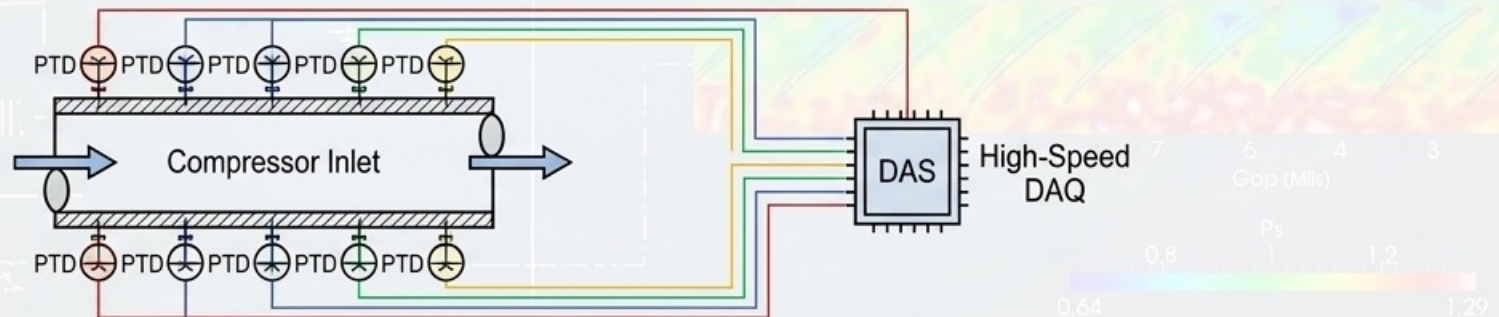
Instrumentação de Alta Velocidade e Detecção de Precusores

Proximidores Bently Nevada (Série 3500 – Correntes Parasitas)



Sensores Gap-to-Voltage operando por rádio frequência (RF eddy currents). Monitoram vibração radial mecânica e deslocamento axial (thrust) do eixo em tempo real. Essenciais para identificar as severas perturbações sub-síncronas associadas ao Rotating Stall.

Transdutores de Pressão Dinâmica (Sensores Kulite)

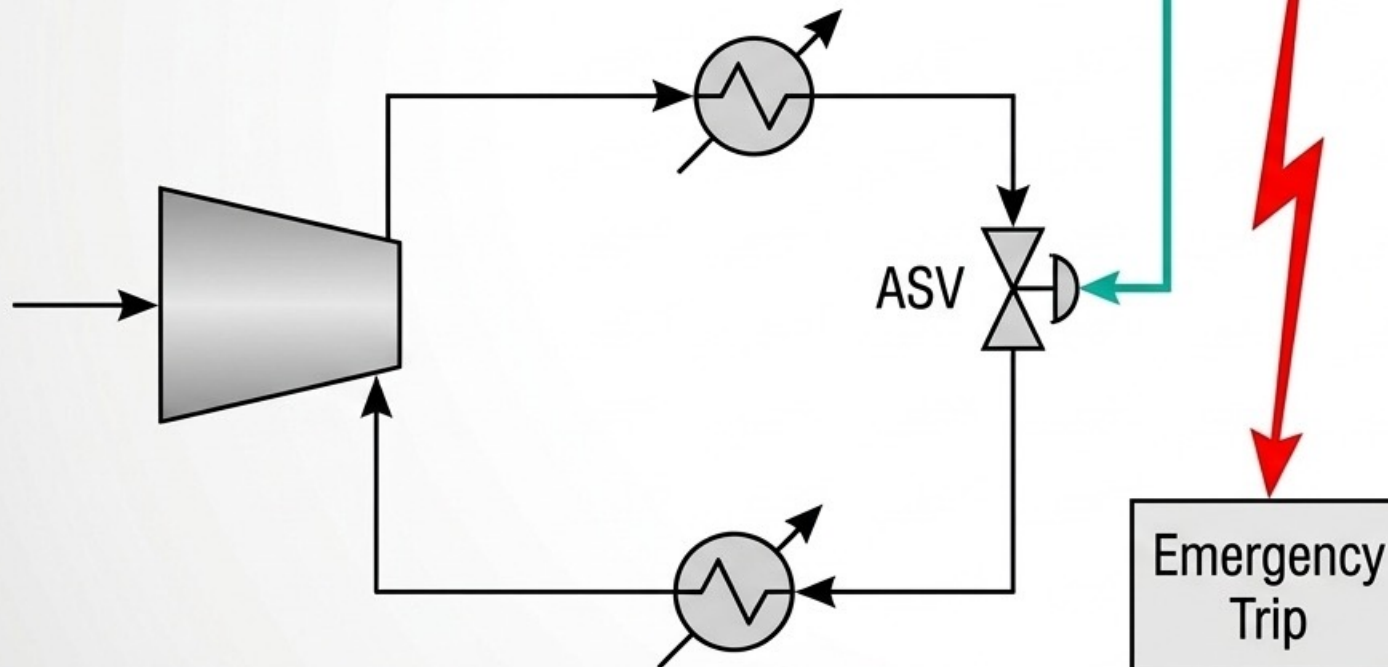


Sensores piezoresistivos em miniatura com resposta acústica ultrarrápida (capazes de medir frequências de célula de estol superiores a 15 Hz). Instalados circunferencialmente na admissão para a detecção milissegundo a milissegundo de precusores aerodinâmicos antes.

Estratégias de Controle: Compressores Radiais (Centrífugos)

Válvulas de Reciclo Rápido (ASV):

Devolvem o gás quente da linha de descarga diretamente para a sucção (através do resfriador). O dimensionamento termodinâmico correto e um tempo de pré-curso inferior a 1 a 2 segundos são criticamente mandatórios.



1. Malha Fechada (PID):

O controle contínuo em **Safety Teal**. Rastreia ativamente a distância matemática até a Linha de Controle (SAL) e modula a abertura da válvula em transientes operacionais lentos.

2. Malha Aberta (Open-Loop Backup / Trip):

Atuação de contingência em **Alert Red**.

Diante de perturbações violentas (ex: ESD - Emergency Shut Down), ignora o PID e comanda uma abertura rápida total e imediata (Fast Blow-Off) para abortar a reversão de fluxo.

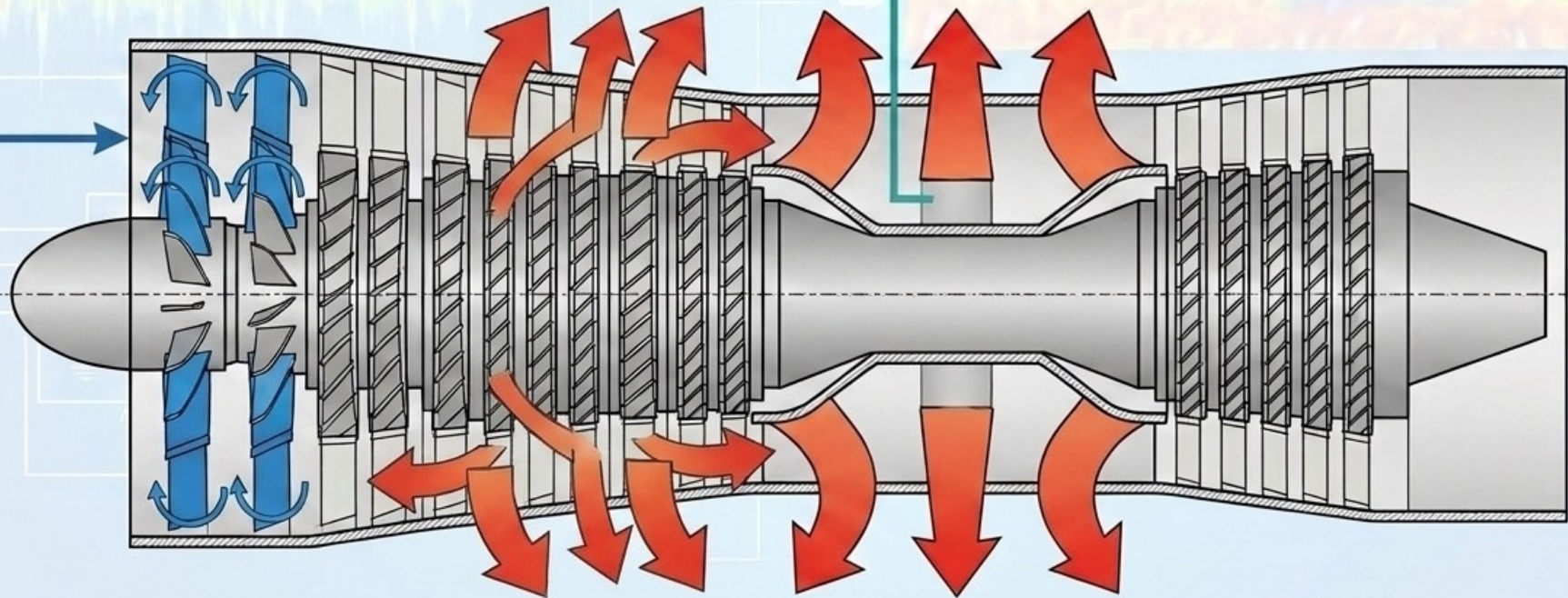
Estratégias de Controle: Compressores Axiais

Geometria Variável (VIGV e VSV)

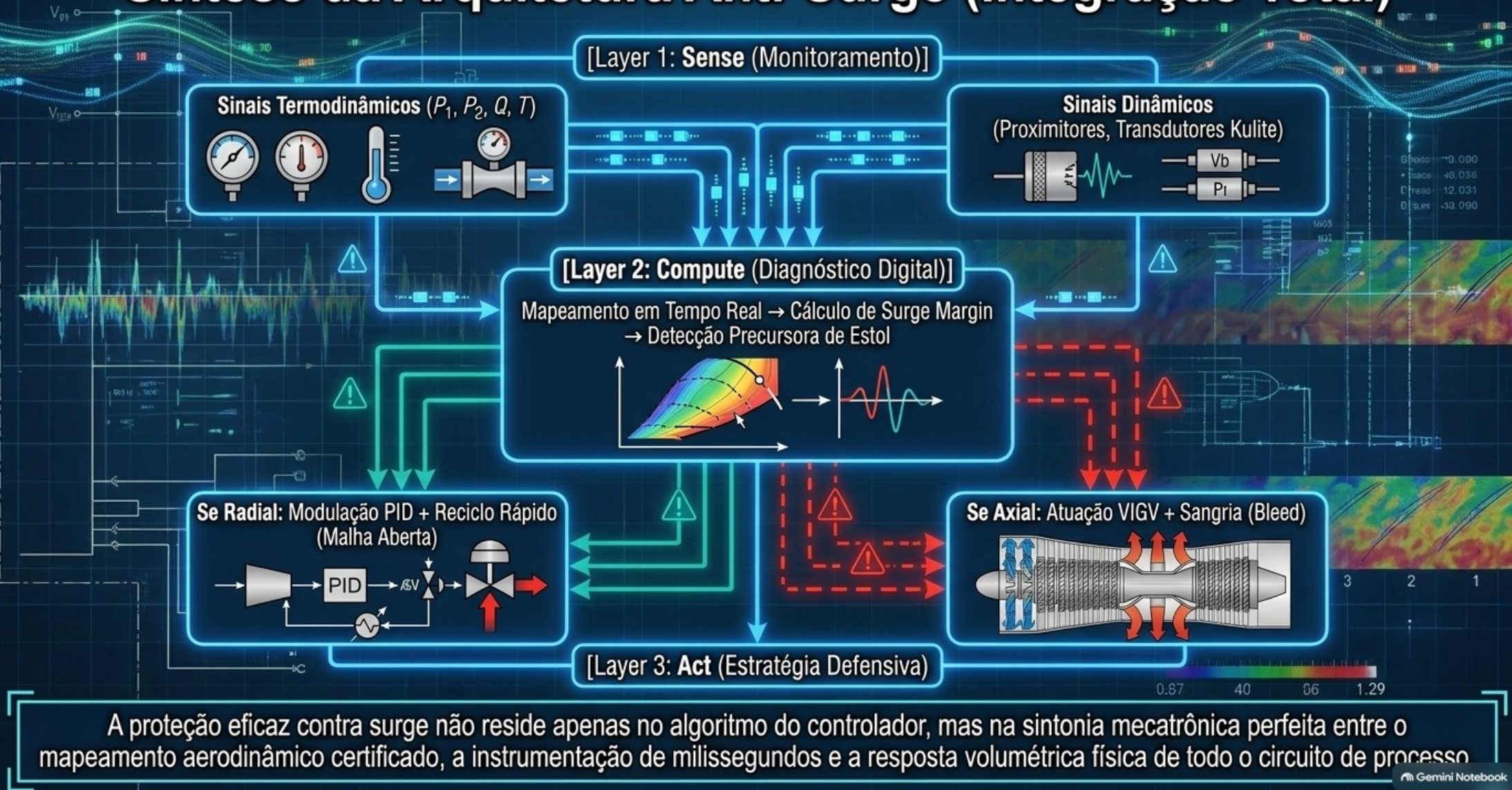
As Pás Guia de Entrada (*Inlet Guide Vanes*) e Estatores Variáveis modificam ativamente o ângulo absoluto de incidência do escoamento. Isso redistribui o rigoroso carregamento aerodinâmico entre os estágios durante acelerações bruscas e variações extremas de carga.

Válvulas de Sangria (*Inter-stage Bleed*)

Descarregam e aliviam a massa de ar de estágios intermediários do compressor durante regimes de baixa velocidade (partidas ou desligamentos). Essa manobra evita criticamente que os estágios traseiros engasguem aerodinamicamente os estágios dianteiros.



Síntese da Arquitetura Anti-Surge (Integração Total)





www.gt2.com.br