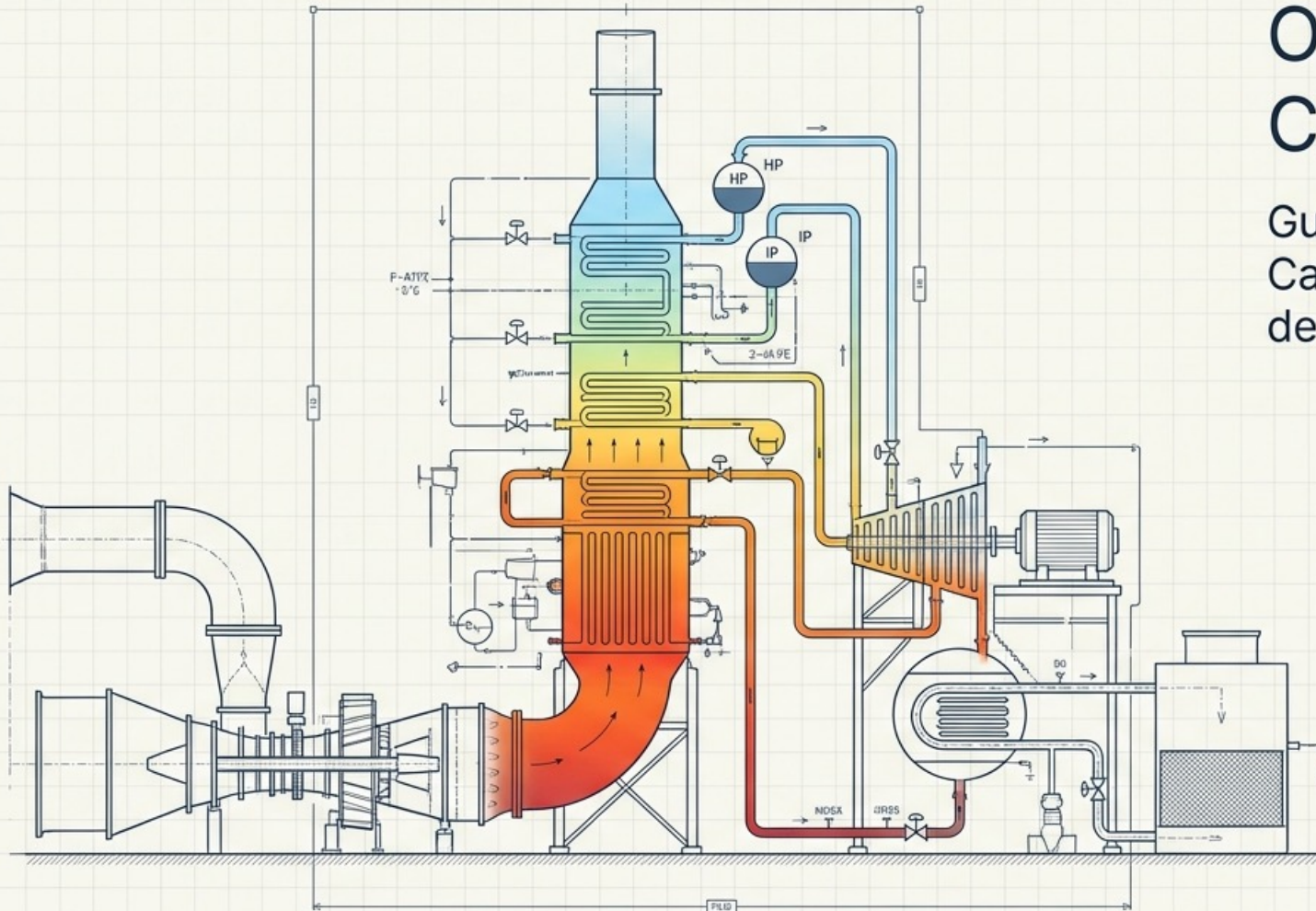


O Coração do Ciclo Combinado

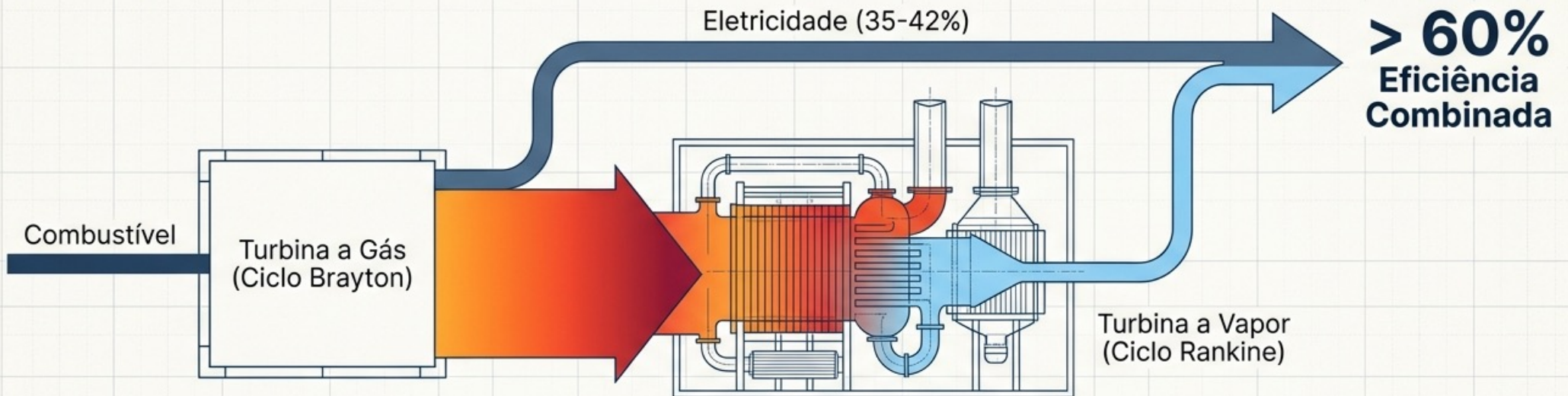
Guia Técnico e Executivo de
Caldeiras de Recuperação
de Calor (HRSG)



Síntese Executiva:

A engenharia, as geometrias e a termodinâmica por trás do equipamento estático que permitiu à geração termelétrica ultrapassar a barreira dos 60% de eficiência.

A Matemática da Eficiência Térmica



Ciclo Simples (Turbina a Gás)

Eficiência estagnada entre 35% e 42%. Foco exclusivo no Ciclo Brayton.

Ciclo Combinado (Integração HRSG)

Ultrapassa 60% de eficiência ao aproveitar o calor residual via Ciclo Rankine.

Fórmula do Valor:

$$\eta_{\text{Rankine}} = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}}}{Q_{\text{entrada}}}$$

$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

A combinação dos dois sistemas converte o desperdício em potência vital.

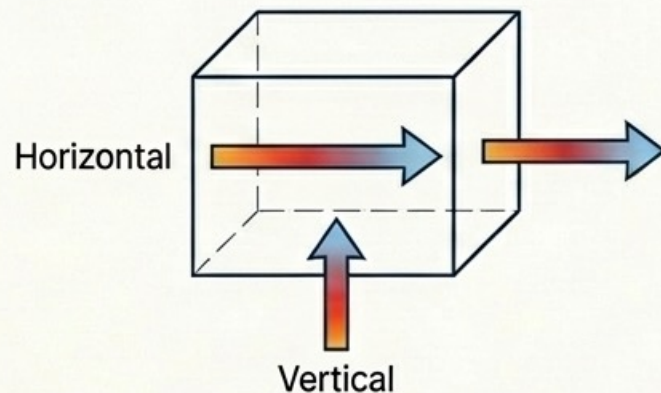
Os Dois Vetores Capitais de Projeto

O design de uma HRSG para qualquer planta termelétrica moderna é definido por duas decisões estruturais que ditarão seu desempenho técnico, footprint e viabilidade financeira.

O Vetor Físico (Geometria)

Orientação do fluxo de gases.
Determina espaço, peso, facilidade de
manutenção e dinâmica de drenagem.

(Vertical vs. Horizontal)

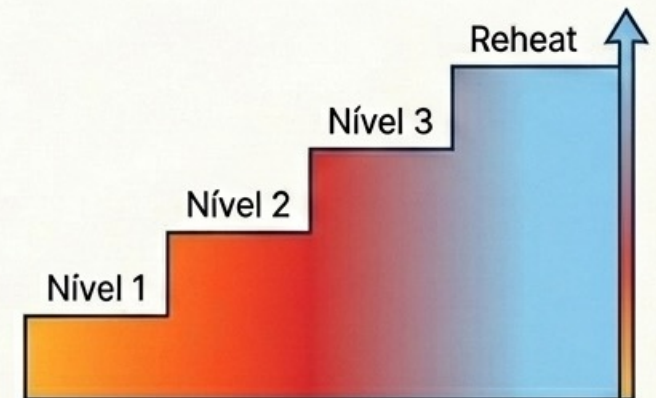


Gases de
Exaustão

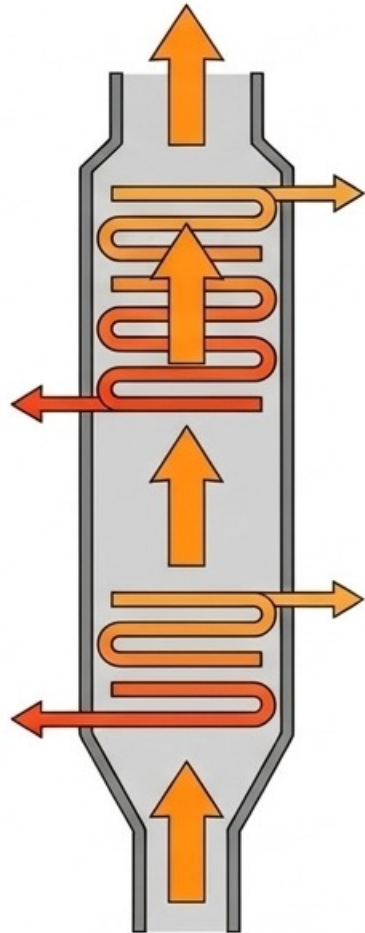
O Vetor Termodinâmico (Pressão)

Número de níveis de geração de vapor.
Determina a recuperação exergética,
complexidade e eficiência bruta.

(1, 2 ou 3 Níveis + Reheat)



Arquitetura Vertical: O Efeito Chaminé



Escoamento Vertical

Gases entram pela base e escoam verticalmente. Módulos de troca térmica posicionados horizontalmente em serpentinas (coils).

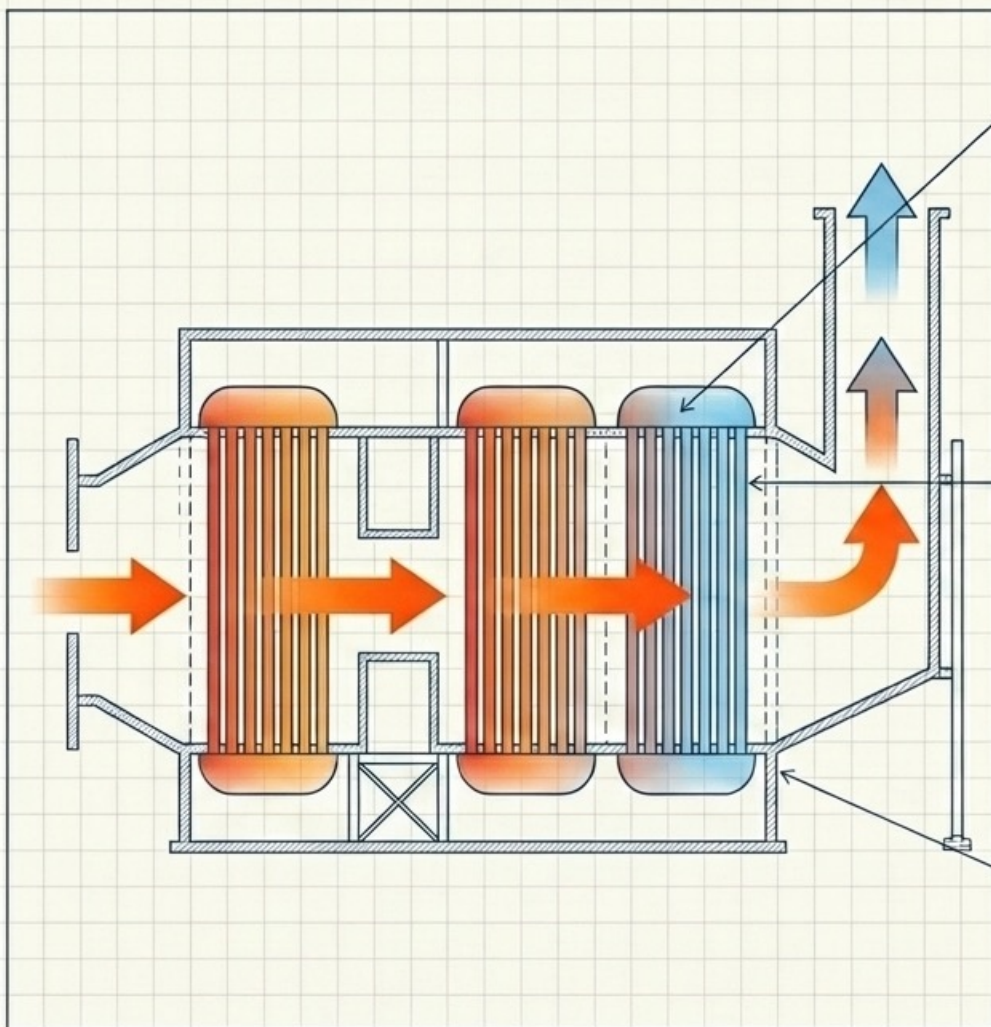
Vantagens Críticas

- **Footprint Compacto:** Ideal para locais com severa restrição de espaço (ex: plataformas offshore ou áreas urbanas densas).
- **Drenagem Natural:** Serpentinas exigem apenas dois coletores (headers), com tanque ao nível do solo.
- **Efeito Chaminé (Stack Effect):** Aumenta passivamente a potência efetiva da turbina a gás.

Desvantagens

- Aumento de 5% a 14% no peso estrutural (com isolamento interno).
- Necessidade frequente de bombas de circulação assistida, aumentando o consumo auxiliar.

Arquitetura Horizontal: O Padrão da Indústria



Escoamento Horizontal

Escoamento horizontal dos gases sobre painéis de tubos verticais. A configuração dominante no mercado global desde os anos 1990.






Vantagens Críticas

- **Manutenção e Acesso:** Facilidade extrema de acesso lateral para inspeção, limpeza e substituição de módulos.
- **Circulação Natural:** Os tubos verticais ligados aos balões (turbulões) facilitam a circulação natural da água/vapor.
- **Estrutura Otimizada:** Estrutura metálica mais leve e de menor custo de fabricação.

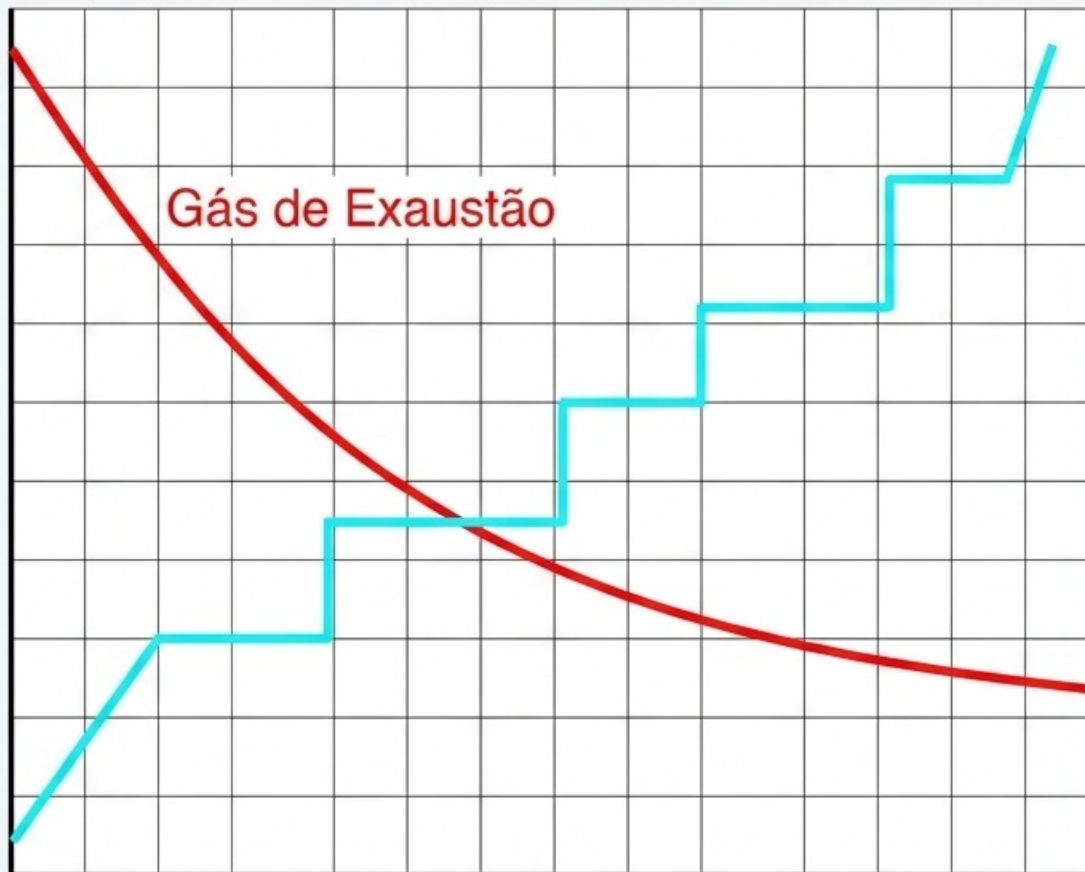
O Trade-off (Desvantagens)

- Ocupa consideravelmente mais área em planta (footprint).
- Drenagem complexa, exigindo válvulas e tanques de expansão subterrâneos.

Matriz de Decisão: Horizontal vs. Vertical

Métrica Operacional	Horizontal	Vertical
 Desempenho Termodinâmico	Bom ●●●●	Superior ●●●●
 Pegada no Solo (Footprint)	Alta ○○○○	Baixa/Compacta ●●●●
 Complexidade de Drenagem	Alta ○○○○	Baixa ●●●●
 Acesso para Manutenção	Fácil/Lateral ●●●●	Difícil/Andaimes ○○○○
 Peso Estrutural Relativo	Base ●●●●	+5% a 14% ○○○○
 Predominância Regional	EUA, Ásia ●●●●	Europa, Offshore ●●●●

A Batalha Termodinâmica Contra a Exergia



O Desafio Central

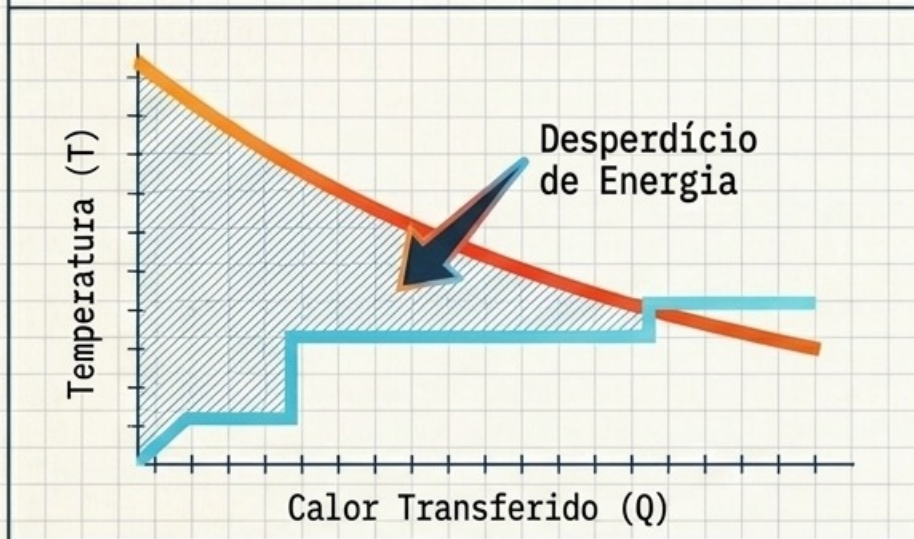
A eficiência máxima ocorre quando a curva de aquecimento da água reflete perfeitamente a curva de resfriamento do gás.

A Solução

Adicionar múltiplos níveis de pressão à HRSG cria uma curva de vapor em "degraus", aproximando-a da curva do gás e capturando o calor residual de forma escalonada.

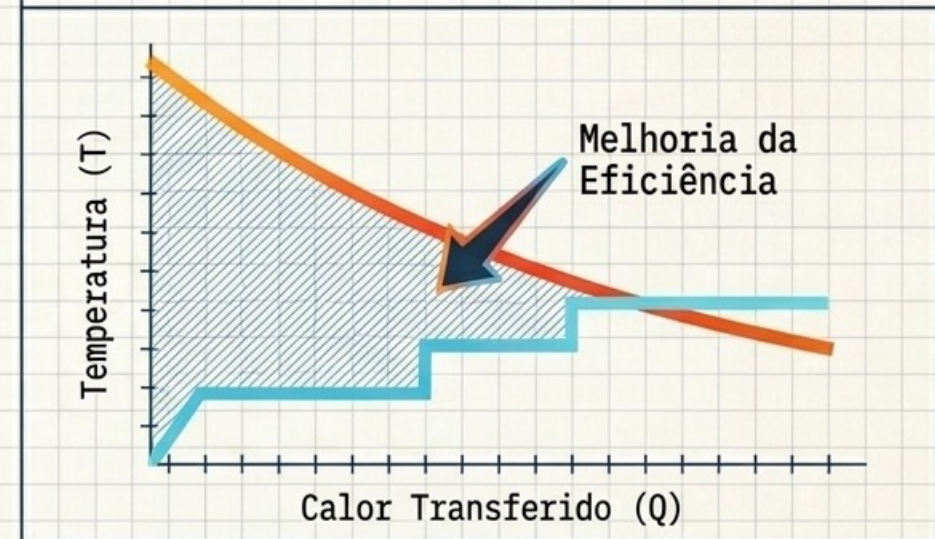
0 Espectro de Pressão: Níveis 1 e 2

Um Nível (Single Pressure)



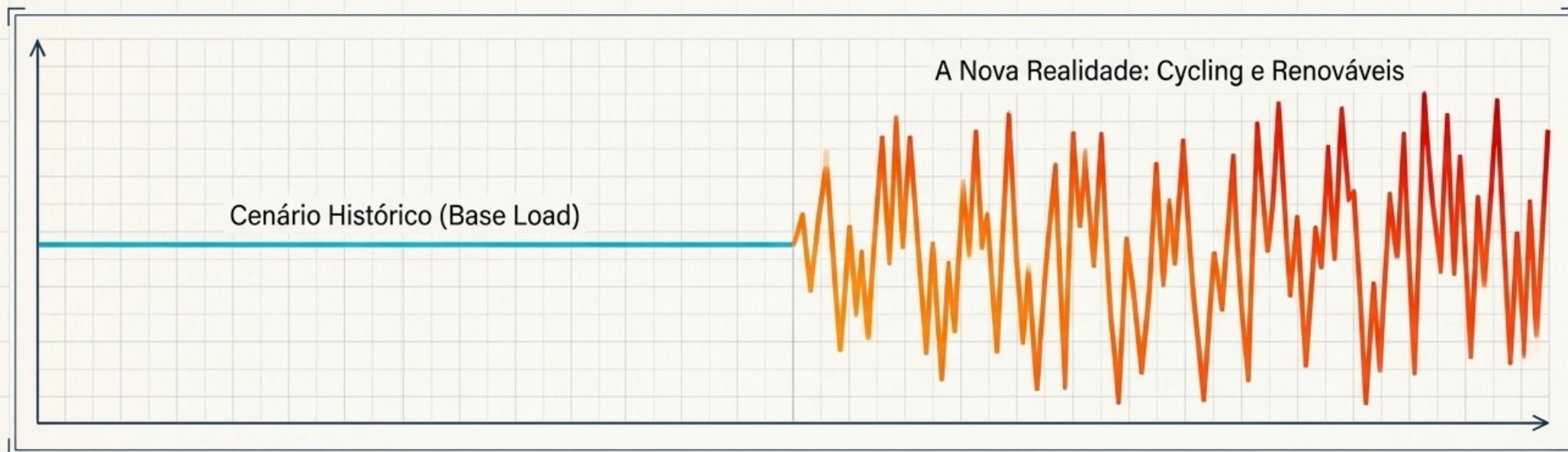
- Arquitetura: Apenas um tambor (drum). Opera entre 40-60 bar.
- Dinâmica: Menor custo de capital, design simples. Apresenta o maior desperdício de energia nos gases de exaustão.
- Aplicação: Cogeração industrial, plantas menores (<50 MW).

Dois Níveis (Dual Pressure)



- Arquitetura: Circuitos de Alta Pressão (HP) e Baixa Pressão (LP).
- Dinâmica: Otimiza o perfil térmico. Maior complexidade construtiva e necessidade de dois sistemas de controle.
- Aplicação: Plantas de médio porte buscando equilíbrio exato entre CAPEX e eficiência térmica.

O Impacto Oculto das Renováveis: A Era do 'Cycling'



A Quebra de Paradigma

Historicamente projetadas para operação em base contínua, as usinas de ciclo combinado agora funcionam como "baterias flexíveis" para compensar a intermitência solar e eólica.

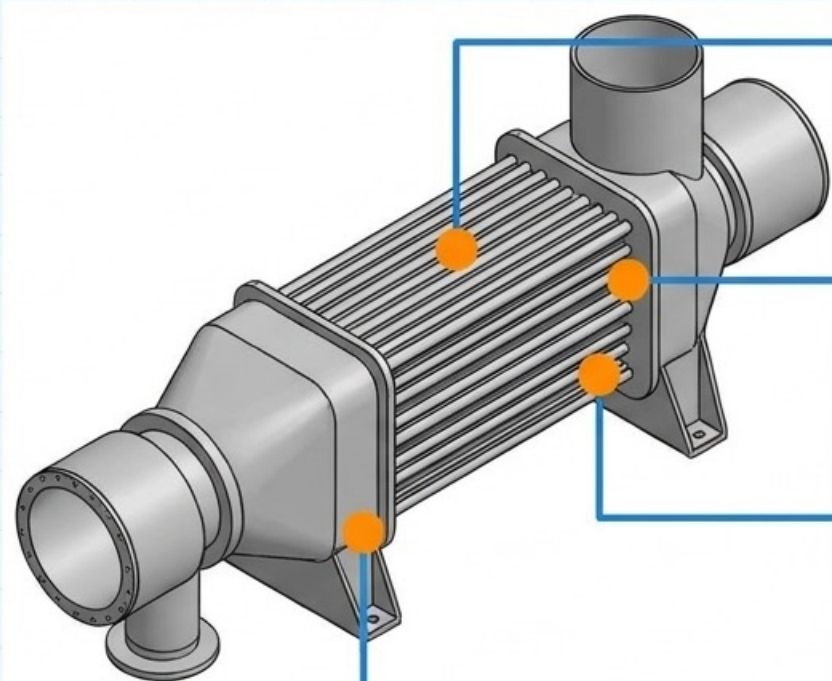
Operação sob Demanda

O regime de cycling impõe partidas e paradas diárias, rampas agressivas e operação contínua em cargas parciais.

O Preço Físico

Gradientes repetitivos de temperatura causam intensa fadiga de baixo ciclo, expandindo e contraindo violentamente componentes de parede espessa que não foram projetados para tal flexibilidade.

Anatomia da Degradação Estrutural



Turbulões e Coletores Grossos: Fadiga Térmica...

Gradientes térmicos repetitivos causam trincas por fadiga de baixo ciclo em componentes de parede espessa (tambores, coletores).

Curvas de Tubos: Erosão...

Partículas sólidas transportadas pelos gases podem desgastar progressivamente as curvas de tubulações e outras áreas de impacto.

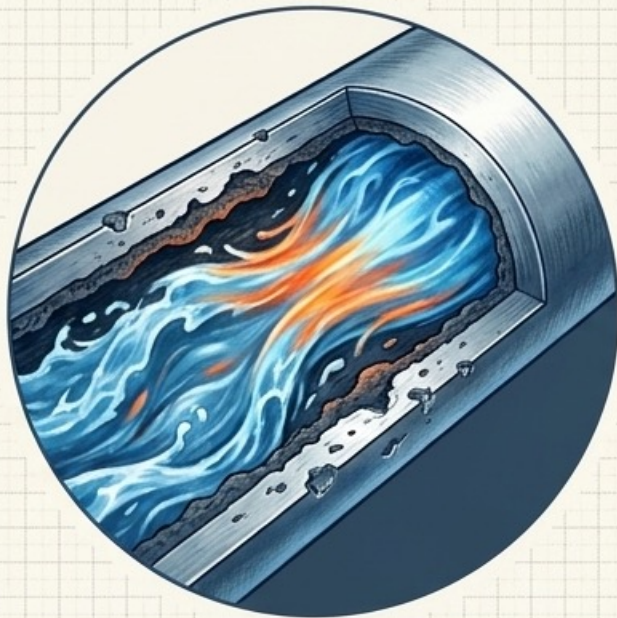
Aletas dos Tubos: Fouling...

Acúmulo de depósitos nas superfícies aletadas, reduzindo a transferência de calor e aumentando a perda de carga.

Soldas e Zonas de Transição: Vazamentos...

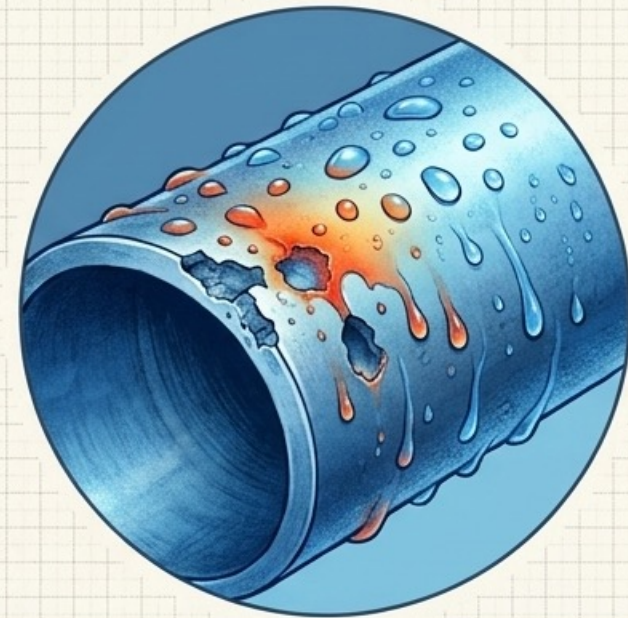
Zonas de transição de materiais e soldas dissimilares são pontos críticos para falhas devido à expansão térmica diferencial.

Patologia Química: FAC e Ponto de Orvalho



Flow-Accelerated Corrosion (FAC)

- **O Mecanismo:** O fluxo agressivo de água/vapor remove mecanicamente a camada protetora de óxido de ferro (magnetita).
- **O Risco:** Expõe continuamente o metal base a ataques corrosivos severos, sendo a principal causa de furos em economizadores e evaporadores de baixa pressão. Requer ligas específicas (baixo cromo) e controle de pH.



Corrosão por Ponto de Orvalho Ácido

- **O Mecanismo:** Nas seções mais frias (economizador LP), a temperatura da parede do tubo cai abaixo do ponto de orvalho dos gases.
- **O Risco:** Condensação de compostos de enxofre cria ácido sulfúrico altamente corrosivo diretamente sobre a superfície externa dos tubos.

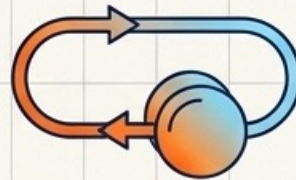
Arsenal Tecnológico de Mitigação e Flexibilidade



Single Row Harps

Substitui as múltiplas fileiras quentes por uma fileira única de tubos.

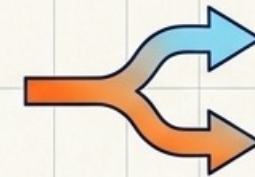
Impacto: Gera **3x** menos tensão térmica, viabilizando partidas rápidas e rampagem agressiva sem trincas.



Tecnologia Once-Through (OT)

Design de fluxo contínuo sem balões (drums) desenvolvido por empresas líderes do setor.

Impacto: Reduz drasticamente o inventário de água e inércia térmica, garantindo estabilidade imediata desde baixa carga até carga base.



Internal Bypass System

Integração direta em HRSGs verticais para turbinas industriais.

Impacto: Permite que a turbina a gás opere em ciclo simples instantaneamente enquanto a caldeira é aquecida de forma gradual e segura.

A Geografia da Decisão: Dinâmicas Regionais



América do Norte

Prioridade: Alta Disponibilidade.

Forte dependência de Duct Burners (queimadores suplementares) para maximizar geração rápida em horários de pico e suprir a expansão de grandes data centers.

Europa

Prioridade: High Cycling.

Design voltado para suportar ciclagem pesada devido à imensa penetração de matrizes renováveis. Demandas extremas de flexibilidade e partidas diárias rápidas.

Ásia

Prioridade: Máxima Eficiência (Base Load).

Busca inegociável por eficiência e redução do consumo de combustível. Foco em arquiteturas complexas operando continuamente em carga base.

O Guia de Seleção Executivo

Perfil do Projeto / Demanda

Plantas Greenfield Gigantes
(Turbinas F/H-class)

Locais com Severa Restrição
de Espaço
(Offshore / Urbano)

Mercados de Alta
Penetração Renovável
(Cycling Diário)

Cogeração Industrial /
Data Centers
(<50 MW)

Geometria Recomendada

Horizontal
(Facilidade de manutenção
em larga escala)

Vertical
(Efeito chaminé, redução
do footprint)

Horizontal com tecnologias
Once-Through ou Single Row
Harps

Horizontal
(Robustez estrutural e
operacional)

Pressão Recomendada

3 Níveis + Reheat
(Investimento compensado
pelo ganho exergetico)

2 Níveis (Otimização do
envelope de peso vs
eficiência)

2 ou 3 Níveis adaptados
com análise preditiva de
vida residual

1 Nível
(Simplicidade operacional
e baixo CAPEX)



www.gt2.com.br