

O NEXO DA EFICIÊNCIA: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DE ADMISSÃO (TIT)

Uma visão técnica sobre a superação dos dois desafios metalúrgicos nas turbinas a gás industriais e aeroespaciais.

[TET_MAX: 1600°C]

[CYCLE: BRAYTON]

[SYS_EFF: >64%]

[ID_ROTOR: 1200 S MM]

[RPM_NOV: 15000]

[CYCLE: BRAYTON]

[COOLING_FLOW: 2.5K1]

[IN_FLOW: 80 KG/S]

[ID_ROTOR: 1000 S MM]

[ID_ROTOR: 1200 S MM]

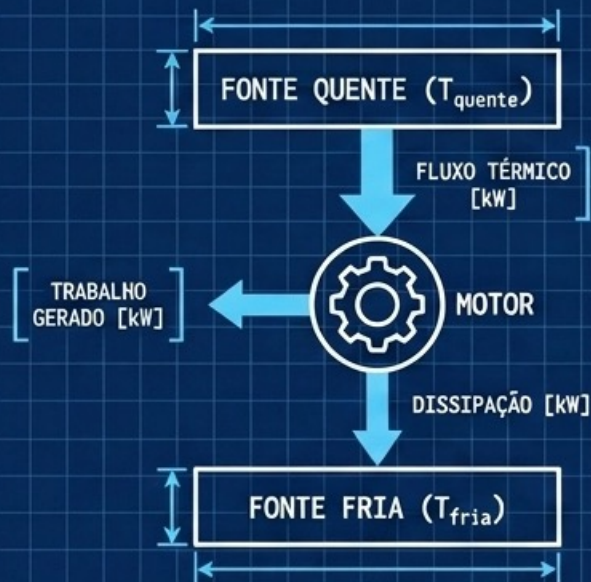
[RPM: 15000]



+	PROJ_ID: BLUEPRINT_TIT_EVO
+	REV: 1.0A
+	DATE: 2024-07-26
+	AUTH: CAD_ENGINEERING_DIVISION

O FUNDAMENTO TERMODINÂMICO

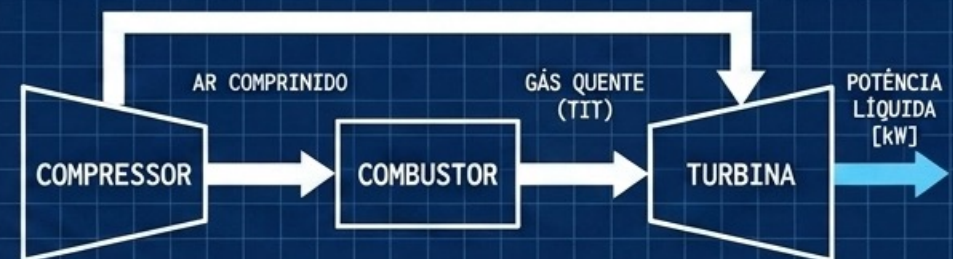
O Limite Teórico



$$\eta_{Carnot} = 1 - (T_{fria} / T_{quente})$$

η_{Carnot} : EFICIÊNCIA MÁXIMA TEÓRICA
 T_{fria} / T_{quente} : RELAÇÃO DE TEMPERATURA ABSOLUTA
UNIDADES: KELVIN [K]

A Aplicação Prática

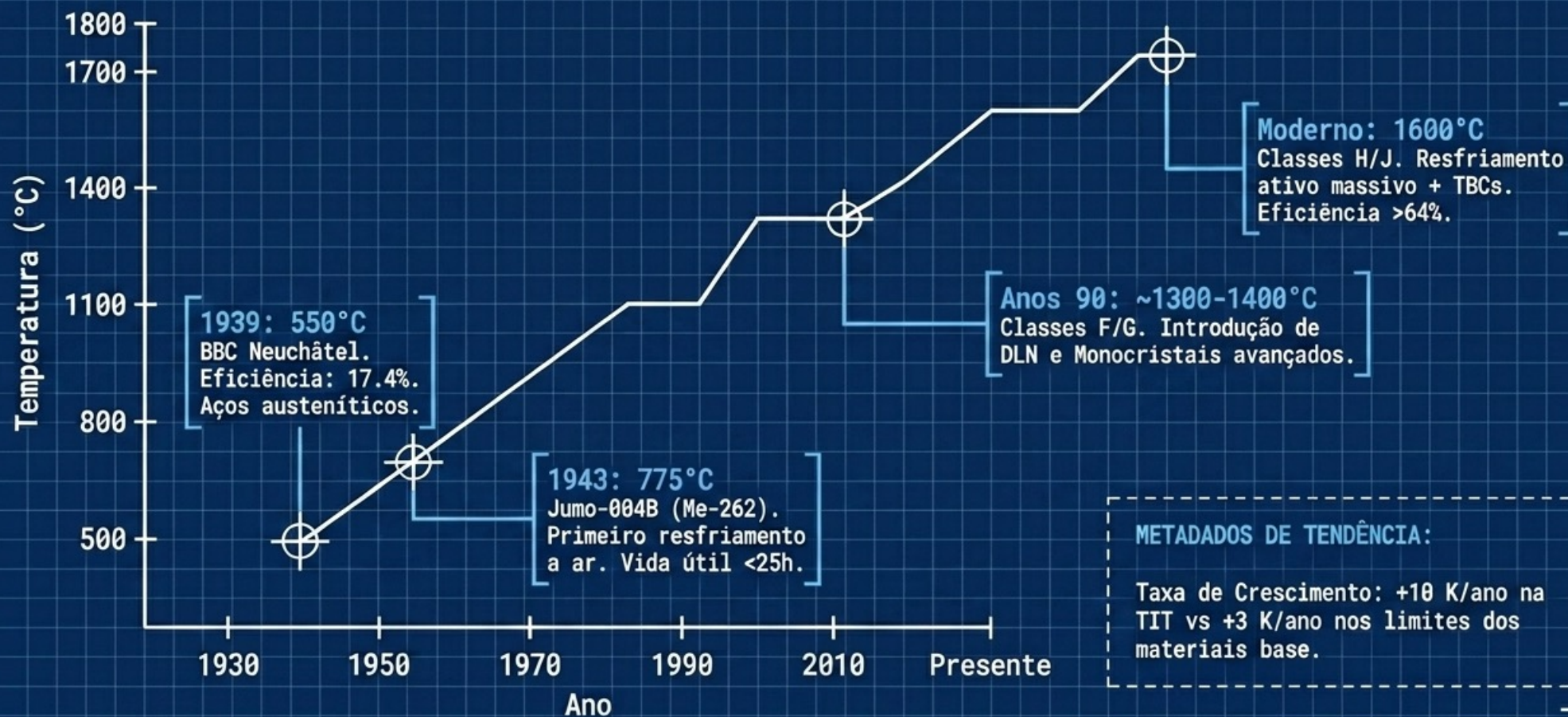


A RESTRIÇÃO AMBIENTAL:

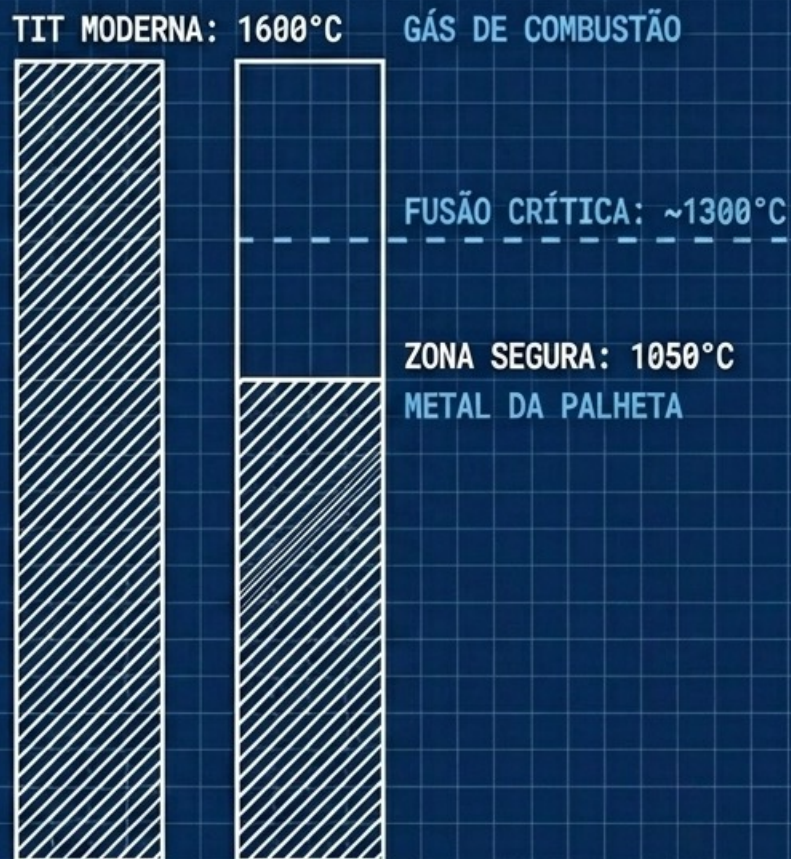
Como T_{fria} é ancorada à temperatura atmosférica local, a única alavanca de engenharia viável para ganhos massivos de potência líquida e eficiência é elevar a T_{quente} (TIT).

NOTA TÉCNICA: TIT (TEMPERATURA DE ENTRADA NA TURBINA) LIMITADA POR MATERIAIS CRÍTICOS

A ESCALADA DA TIT



O DESAFIO METALÚRGICO



[PILAR 4:
Matrizes Cerâmicas (CMC)]

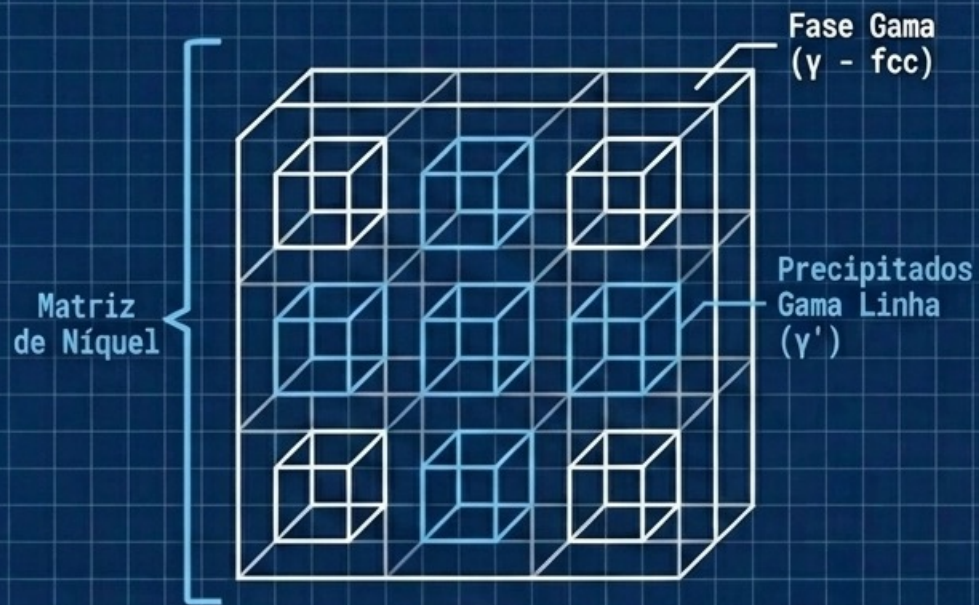
[PILAR 1:
Superligas SX]

**Como operar uma máquina
rotineiramente acima do seu
próprio ponto de fusão?**

[PILAR 3:
Barreiras Térmicas (TBC)]

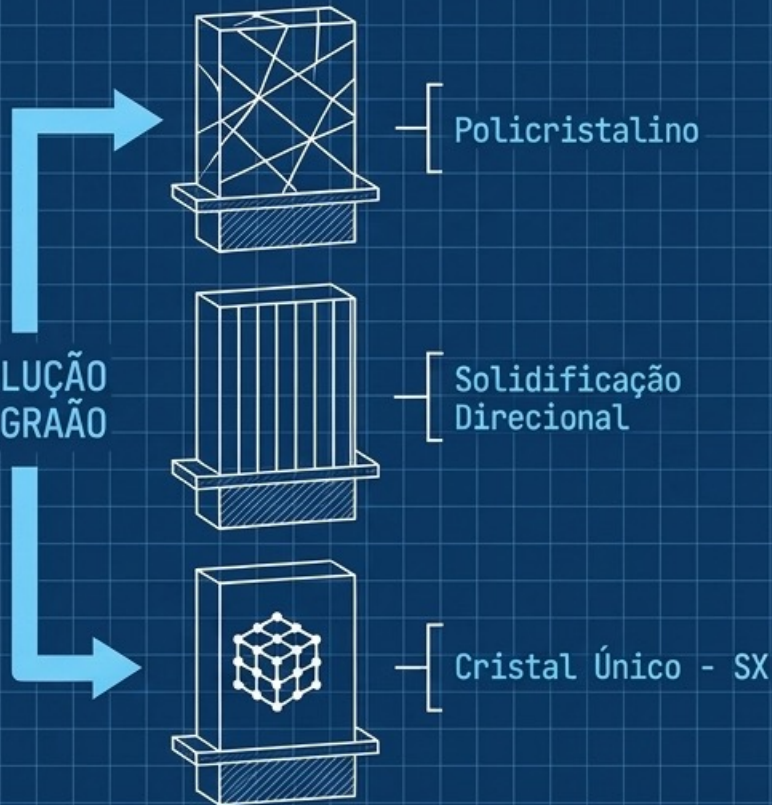
[PILAR 2:
Resfriamento Ativo]

PILAR 1: A REVOLUÇÃO DAS SUPERLIGAS



A EVOLUÇÃO MONOCRISTALINA (MATRIZ SX)

EVOLUÇÃO DO GRAÃO



MATRIZ DE SUPERLIGAS MONOCRISTALINAS

Geração	Mecanismo Metalúrgico	Ganho
1ª Gen (Cr, Co, W)	Eliminação total de contornos de grão. Fim do deslizamento intergranular.	Base sólida
2ª e 3ª Gen (+ Rênio)	Inclusão de 3% a 6% de Re. Retarda difusão e fortalece contra fluência.	+60 a 80°C
4ª Gen (+ Rutênio)	Estabiliza a fase e previne precipitação frágil de fases TCP devido ao excesso de Re.	+15 a 20°C

[A temperatura segura do metal avança progressivamente para o limiar prático de ~1090°C]

PILAR 2: TÉCNICAS DE RESFRIAMENTO AVANÇADO

01. CONVECÇÃO INTERNA

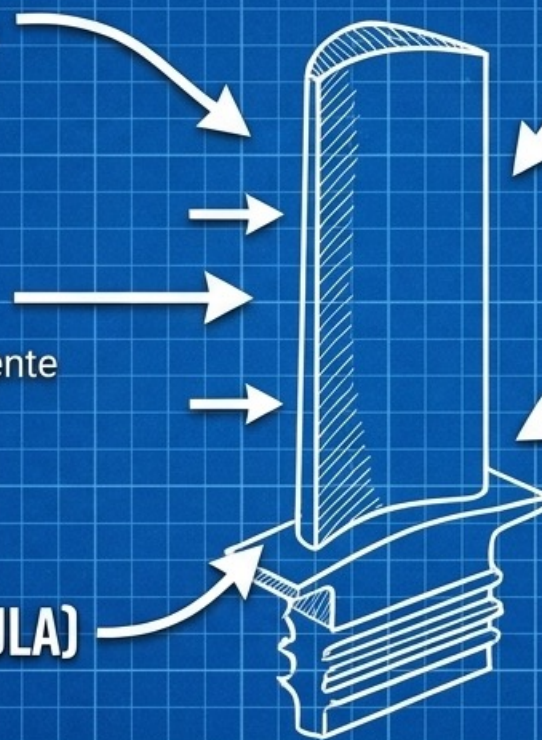
03. FILM COOLING (PELÍCULA)

02. IMPINGEMENT

Jatos internos colidindo brutalmente contra a borda de ataque para dissipar extremo estresse térmico.

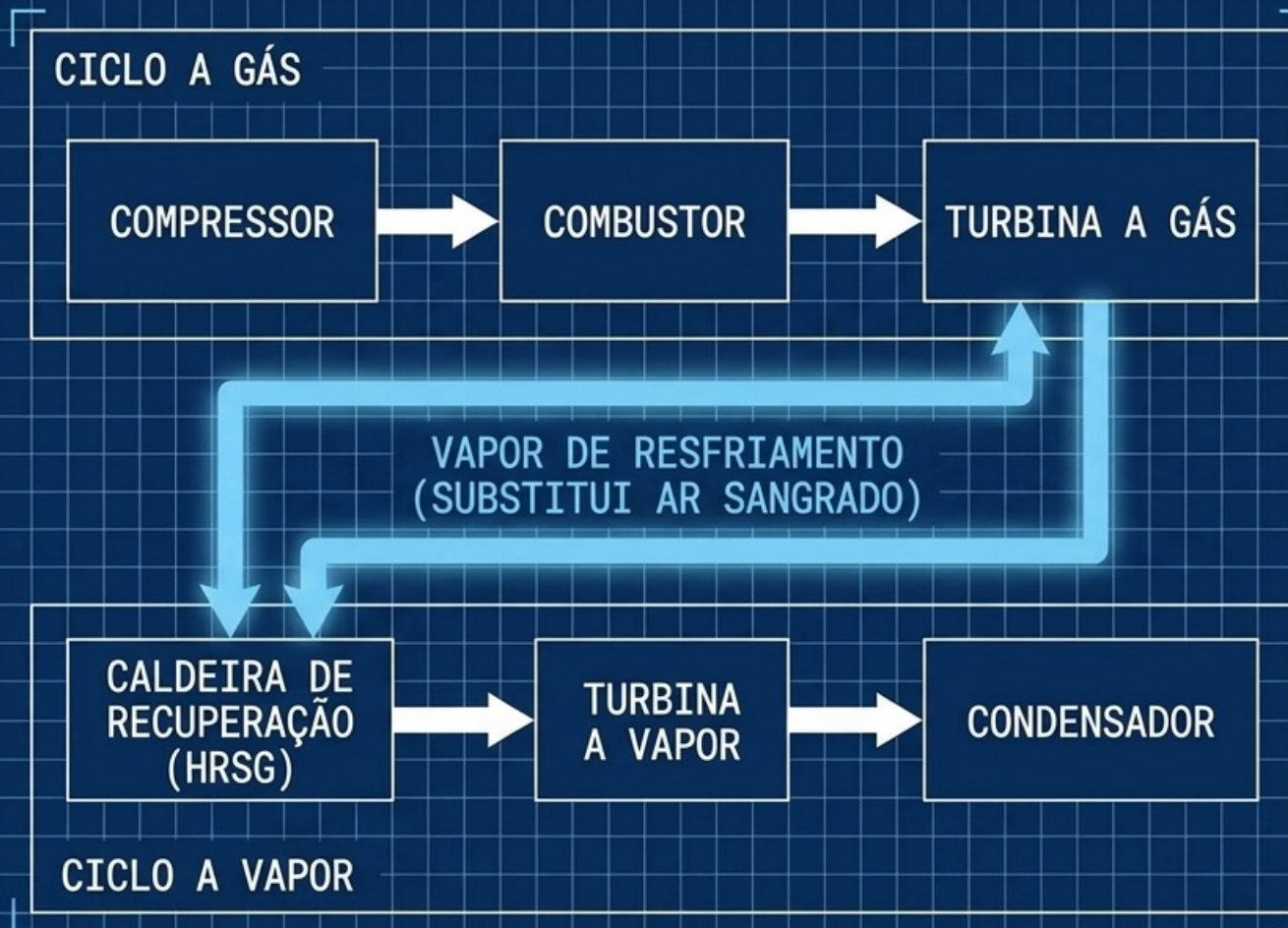
04. TRANSPIRAÇÃO

03. FILM COOLING (PELÍCULA)



MÉTRICA CHAVE

O SALTO DA CLASSE H: CIRCUITO FECHADO



PROBLEMA:

Ar sangrado do compressor penaliza a eficiência, pois não gera trabalho termodinâmico na turbina.

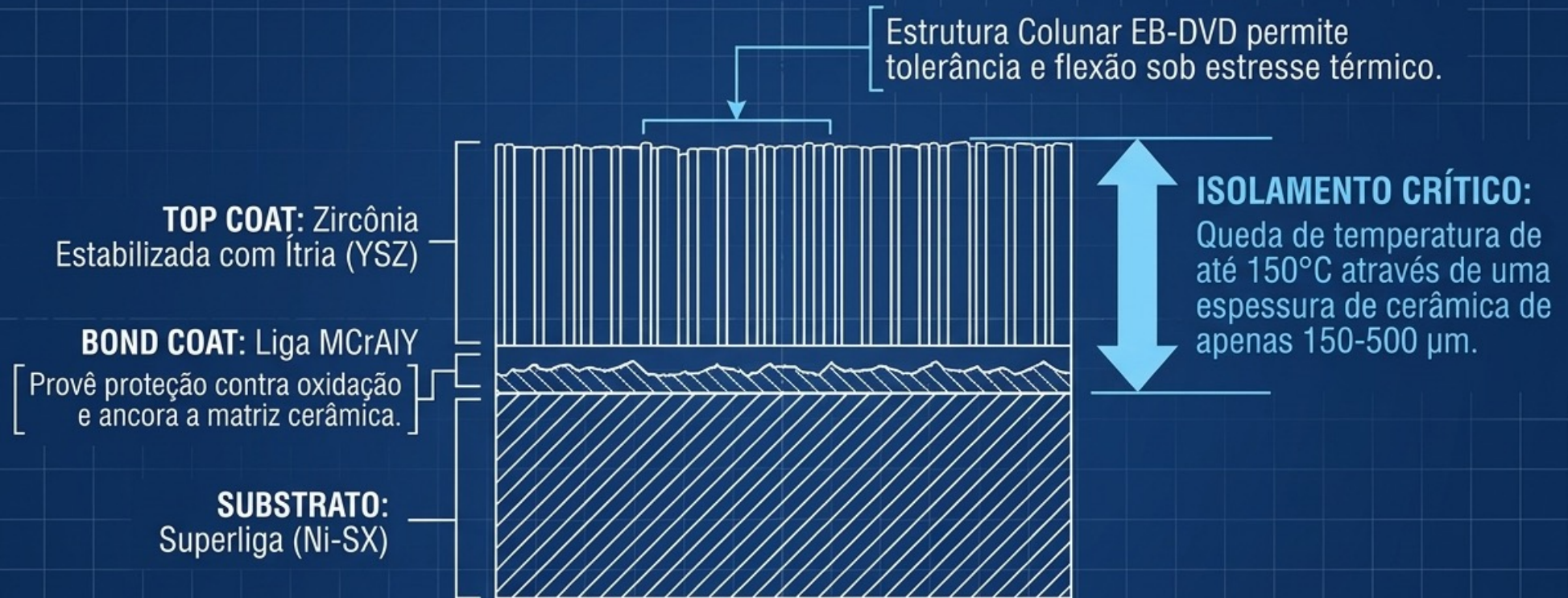
SOLUÇÃO GE H-SYSTEM:

Empregar vapor em circuito fechado, extraído do ciclo Rankine inferior, para resfriar as palhetas.

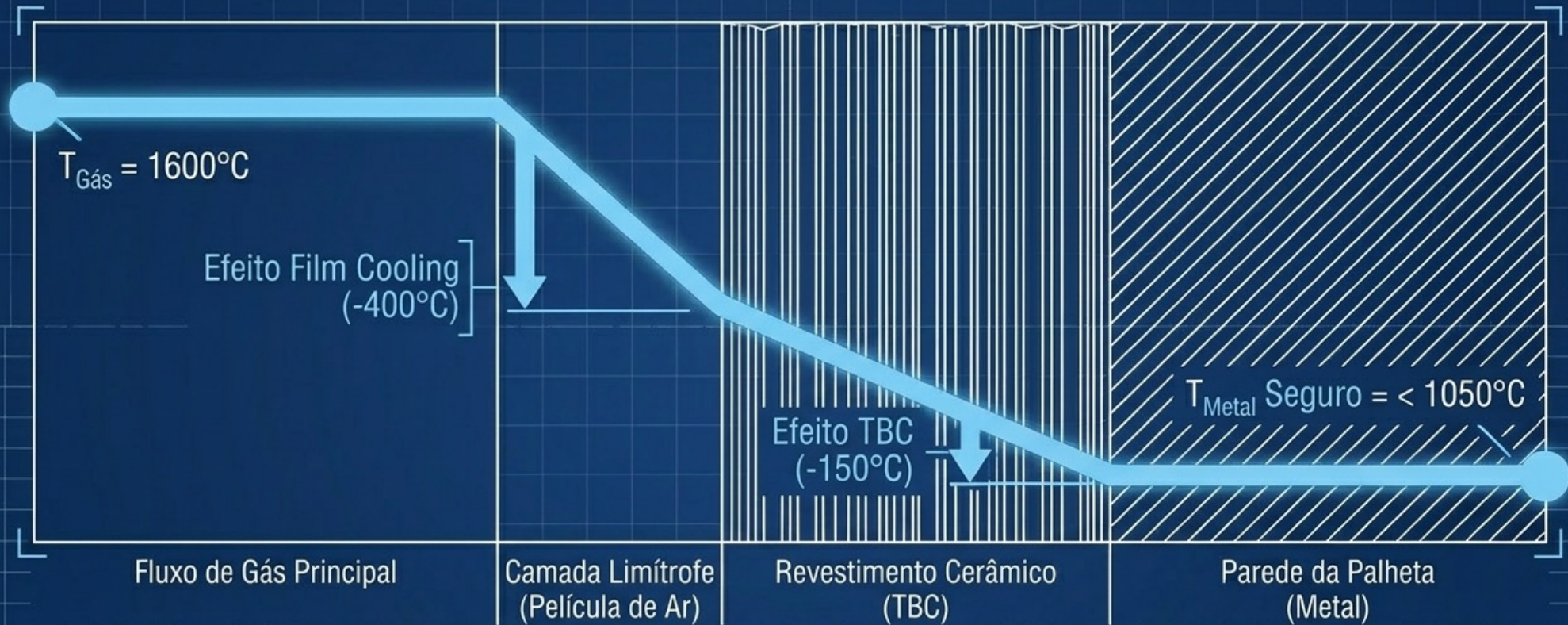
RESULTADO:

Salto imediato na eficiência do ciclo combinado de 55% para 60%.

PILAR 3: REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA (TBC)

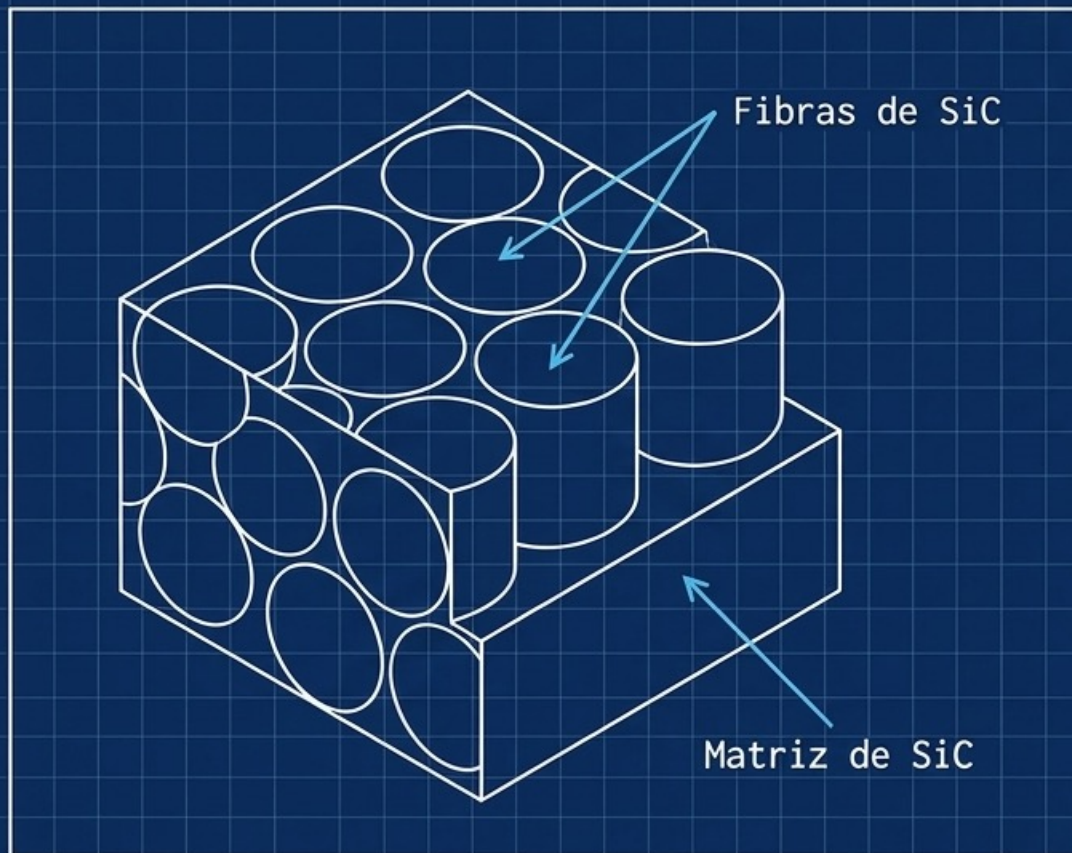


ANATOMIA DA SOBREVIVÊNCIA (SÍNTESE)



A integridade estrutural da máquina depende inteiramente de gradientes térmicos extremos forçados em distâncias milimétricas.

PILAR 4: COMPÓSITOS DE MATRIZ CERÂMICA (CMC)



A RESTRIÇÃO AMBIENTAL

Apesar da imensa tolerância térmica, a sílica contida nos CMCs baseados em SiC sofre recessão severa e volatiliza ao entrar em contato com o vapor d'água presente nos gases de combustão.

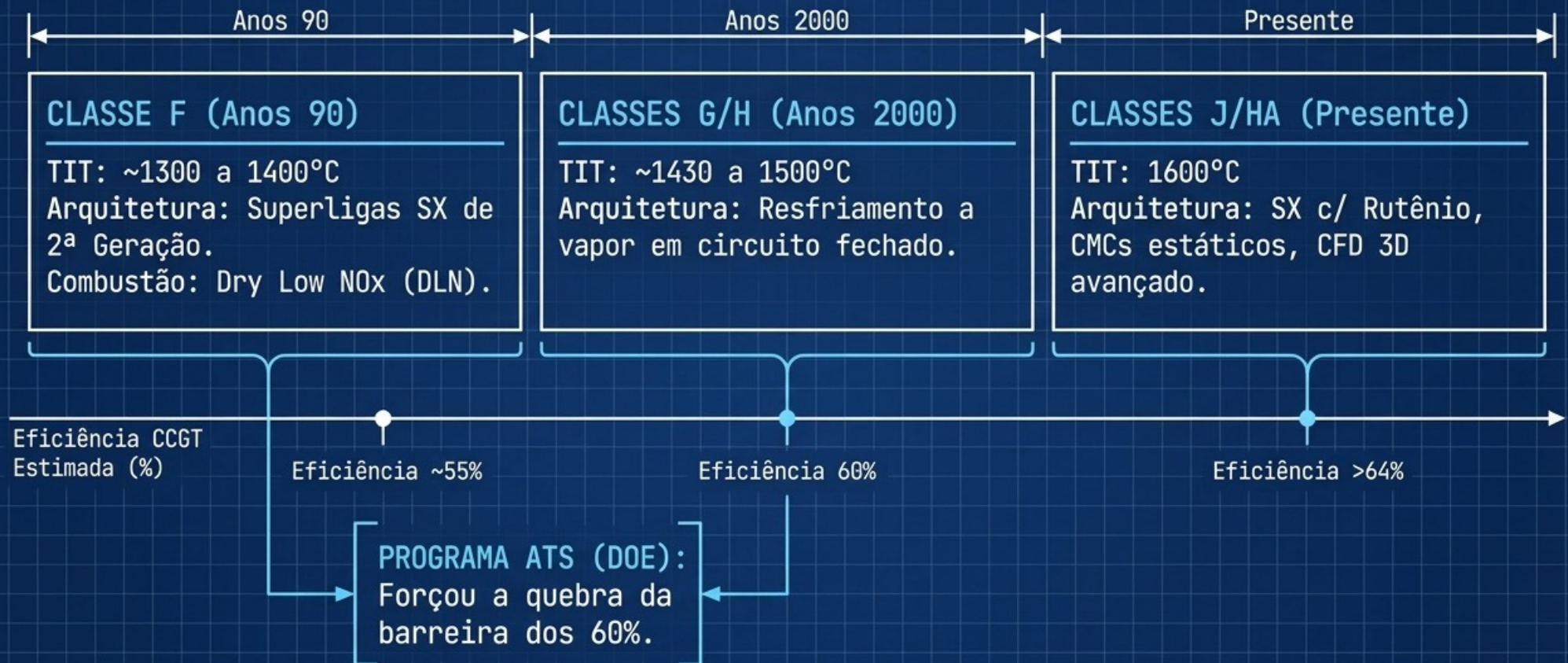
A SOLUÇÃO: BARREIRA AMBIENTAL (EBC)

Aplicação do Environmental Barrier Coating. Camadas de silicatos de terras raras (ex: Yb-silicato) são aplicadas para isolar quimicamente o CMC da água, permitindo a substituição das pesadas palhetas metálicas.

DIAGNÓSTICO: SUPERLIGAS vs. CMCs

MÉTRICA CHAVE	NÍQUEL (Ni-SX)	CMC (SiC/SiC)	IMPACTO SISTÊMICO
Densidade	~8.8 g/cm ³	~2.5 g/cm ³	A redução de 2/3 da massa alivia drasticamente o estresse centrífugo nas raízes dos rotores.
Tolerância Térmica Base	Limiar de ~1090°C	Contínuo em 1315°C	Eleva o teto operacional sem intervenção, afastando o abismo metalúrgico.
Orçamento de Resfriamento	12-18% do ar do compressor	Baixo, reduzido em até 50%	Liberação massiva de ar pressurizado para gerar trabalho termodinâmico no ciclo.
Tenacidade à Fratura	Alta (Comportamento Dúctil)	Pseudo-dúctil (Via arquitetura de fibras)	Supera a fragilidade fatal da cerâmica monolítica, tornando a estrutura viável.

MAPEAMENTO DE CLASSES INDUSTRIAIS





TECNOLOGIA

www.gt2.com.br