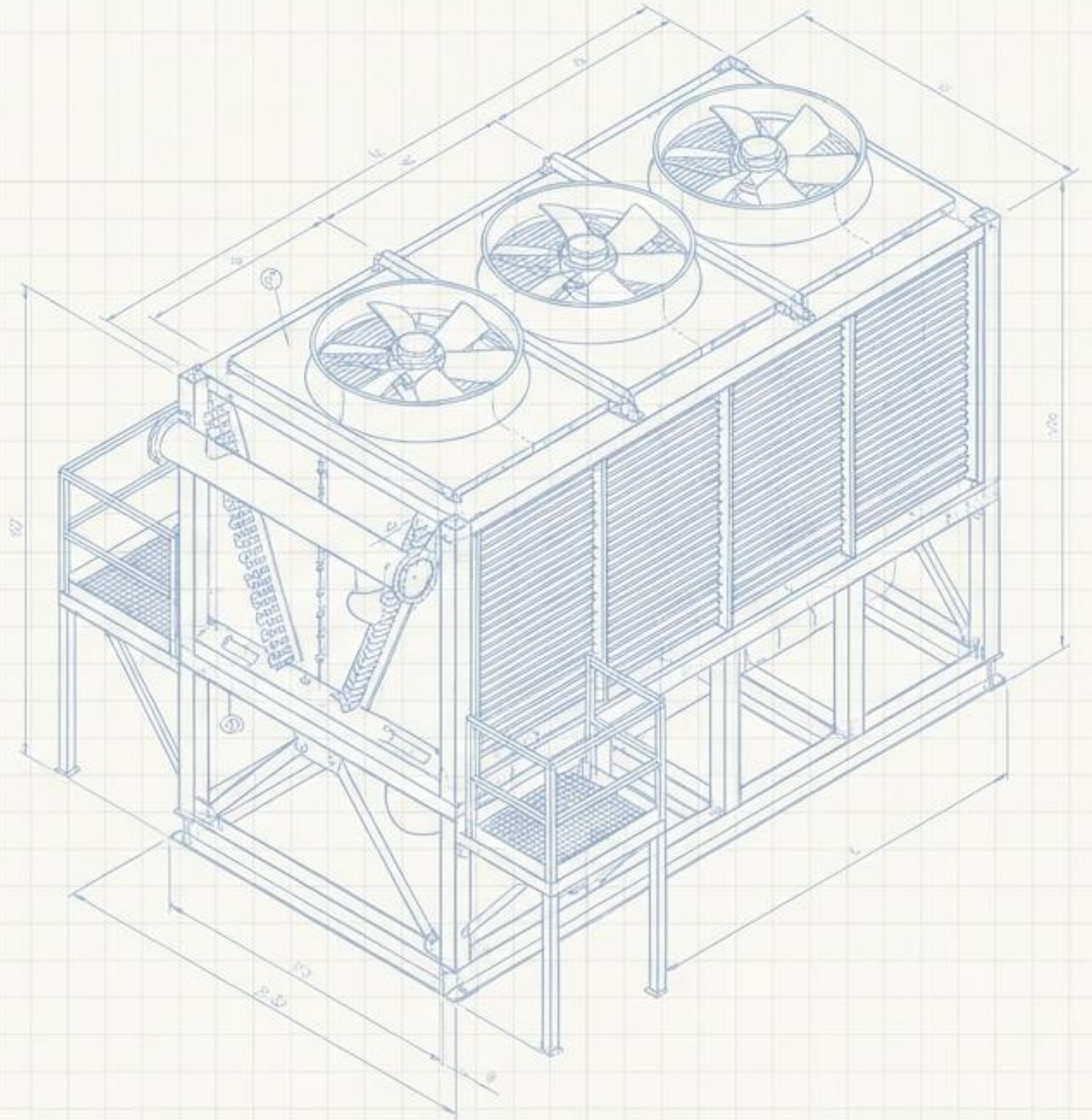


Aeroenfriadores: Del Fundamento Termodinámico al Diseño Mecánico

Un dossier técnico sobre superficies extendidas, arquitectura de equipos y criterios de diseño industrial.



EQUIPOS E INSTALACIONES INDUSTRIALES
UNCUYO
Profesor: Jorge Nozica

El Problema de los Coeficientes Peliculares Disímiles



Para equilibrar la transferencia de calor total, la **deficiencia en h_o debe compensarse** con un aumento exponencial del área física externa (A_{oe}).

La Ecuación del Área Efectiva (A_{oe})

$$A_{oe} = A_{uf} + A_f \Omega$$

Eficiencia de la aleta

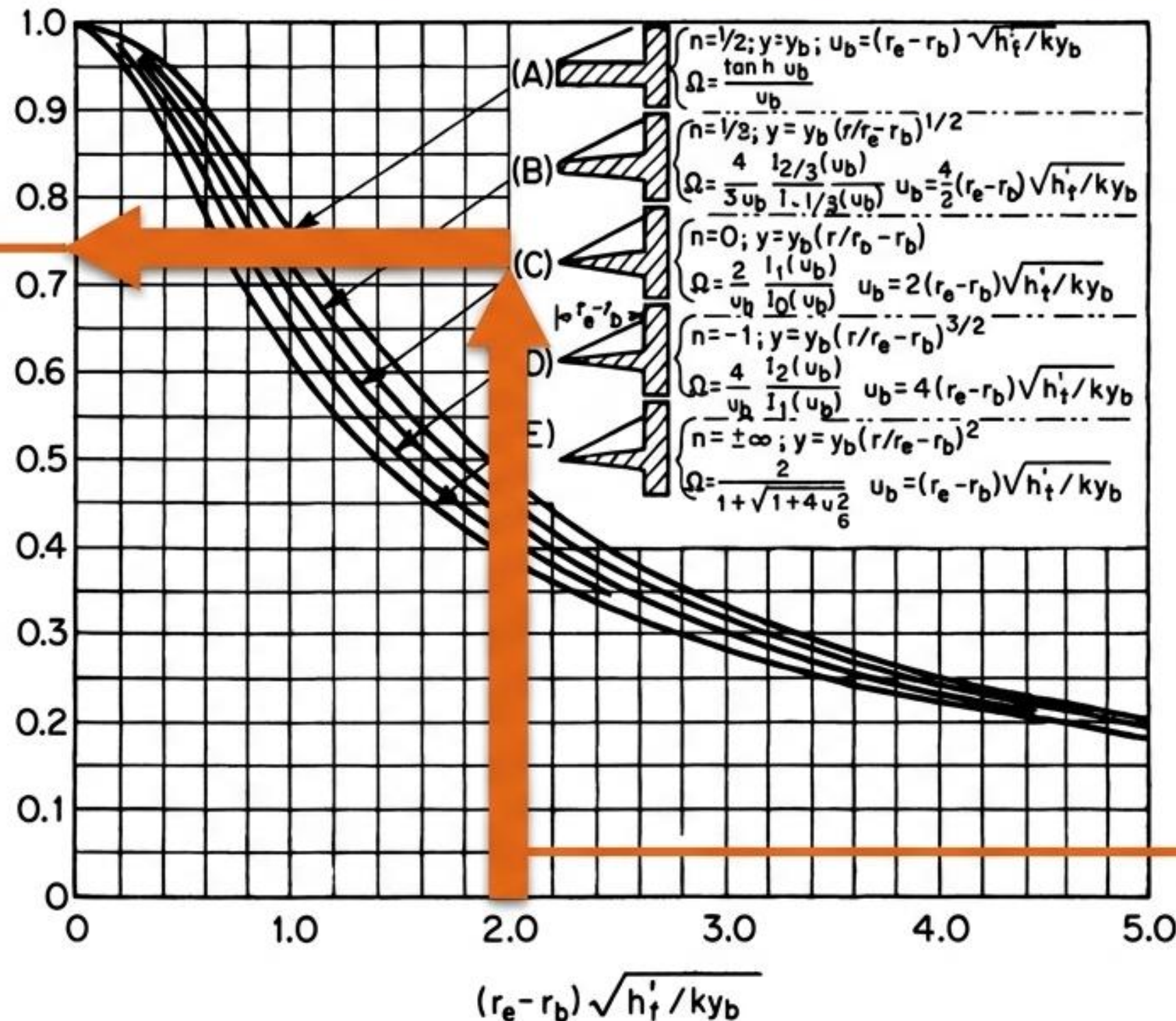
Penalización térmica debida a la resistencia a la conducción a través del metal de la aleta. El área añadida nunca es 100% eficiente.

Área efectiva de transferencia total

Área de aletas

A_{oe} : área efectiva de transferencia total
 A_{uf} : área de transferencia de tubo liso
 A_f : área de aletas
 Ω : eficiencia de aleta

Determinación de la Eficiencia de la Aleta (Ω)









3. Extraer el factor de eficiencia Ω (típicamente entre 0.6 y 0.95).

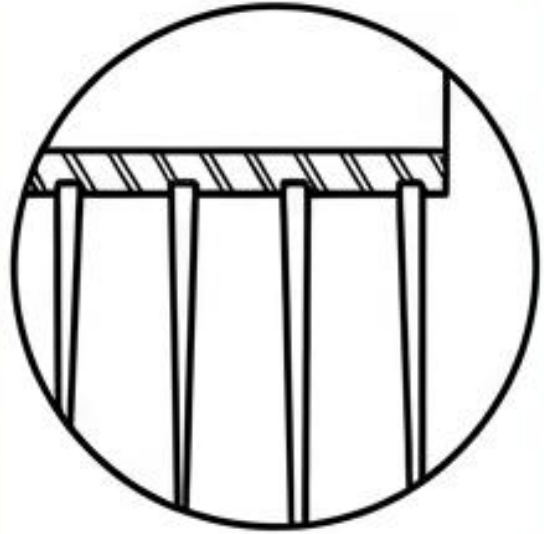
2. Intersecar la curva corr. a la geometría de la aleta (ej. Aleta longitudinal).

1. Calcular el parámetro físico asumiendo h constante y omitiendo gradientes térmicos en el espesor.

Matriz de Selección: Aletas Altas vs. Aletas Bajas

Aletas Transversales Altas	Aletas Bajas
 <p>Aplicación: Principalmente para gases de baja presión.</p>	 <p>Aplicación: Ebullición y condensación de corrientes no acuosas, y transferencia de calor sensible.</p>
 <p>Correlación de Diseño: Ecuación de Schmidt [Kaltetechnik, 1963] (para flujo cruzado).</p>	 $f = \frac{vH}{d_i^2}$ <p>Correlación de Diseño: Correlación de Nusselt (para condensados de baja tensión superficial < 30 dyn/cm).</p>
 <p>Restricción Geométrica: Separación mínima de 5 mm para evitar atrapamiento de partículas y ensuciamiento (coquización).</p>	 <p>Restricción Geométrica: No deben estar muy juntas para fluidos con alta tensión superficial (como el agua), ya que no drenan fácilmente.</p>

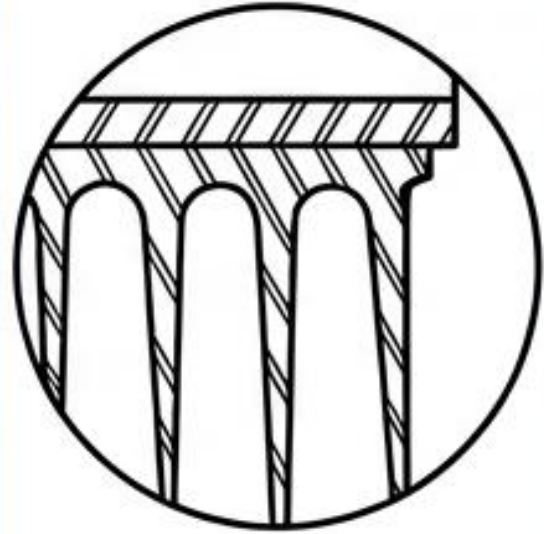
Métodos de Fabricación de Tubos Aleteados



1. Incrustado (Embedded)

Aleta rectangular tensada mecánicamente en una ranura espiral de 0.25mm en el tubo.

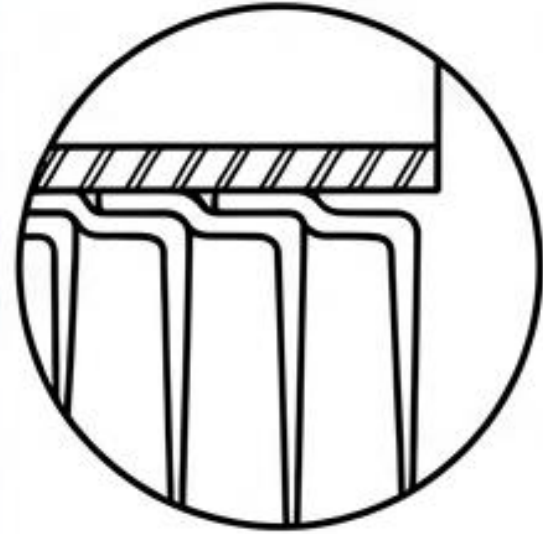
Temp Máx: 399 °C



2. Integral (Extruded)

Tubo exterior de aluminio extruido unido a un tubo interior.

Temp Máx: 288 °C



3. Pies Superpuestos (Overlapped Footed)

Aleta en "L" tensada; el tubo base queda completamente cubierto.

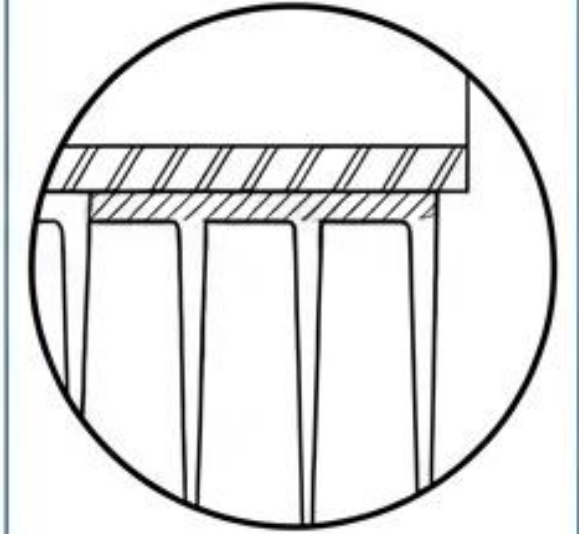
Temp Máx: 232 °C



4. Patas (Footed)

Aleta en "L" tensada; el tubo está cubierto por las patas entre las aletas.

Temp Máx: 177 °C



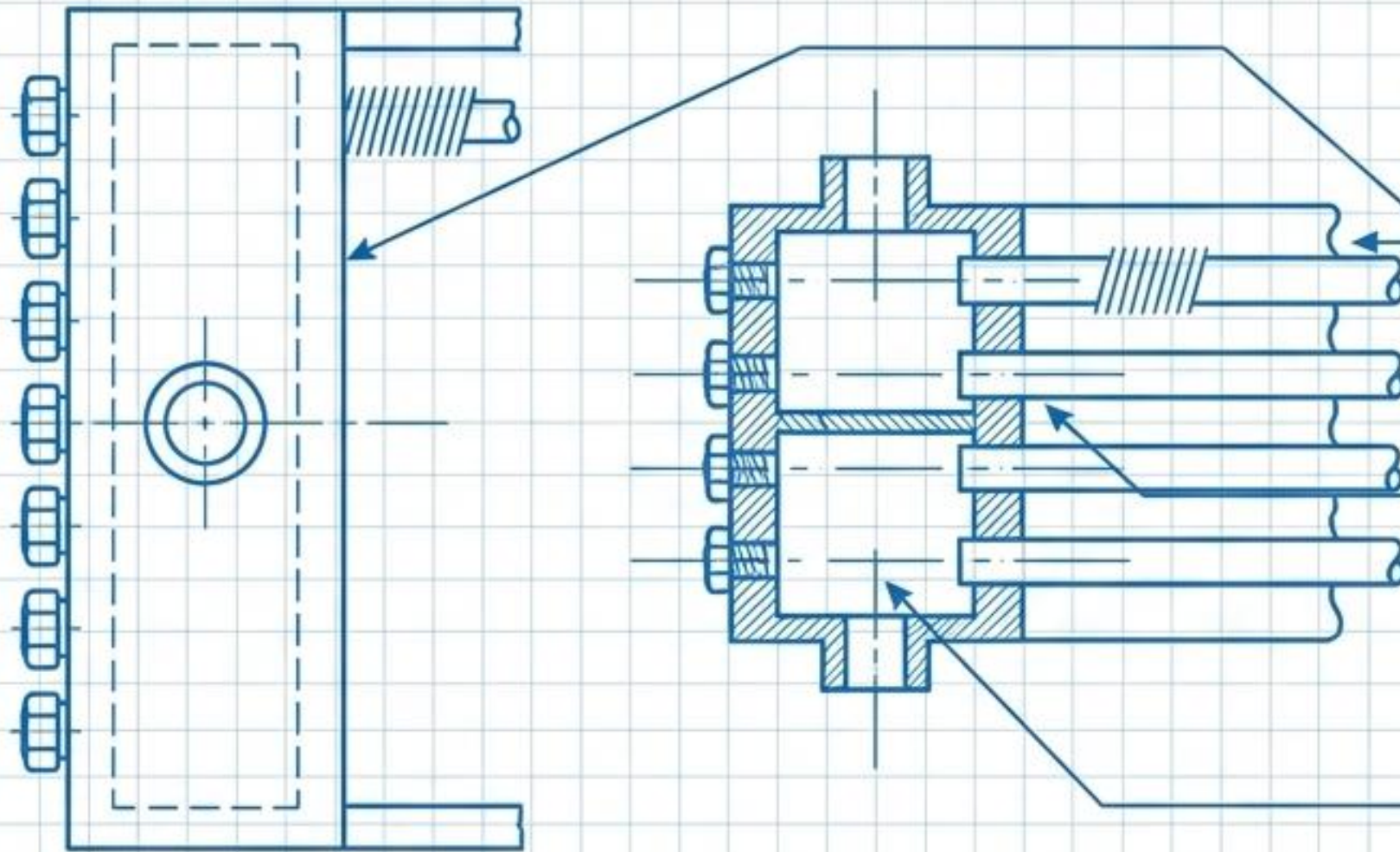
5. Vinculado (Bonded)

Aletas unidas por galvanizado en caliente o soldadura fuerte.

Anatomía del Haz de Tubos y Cabezales

Cabezal de Tapón (Plug Header)

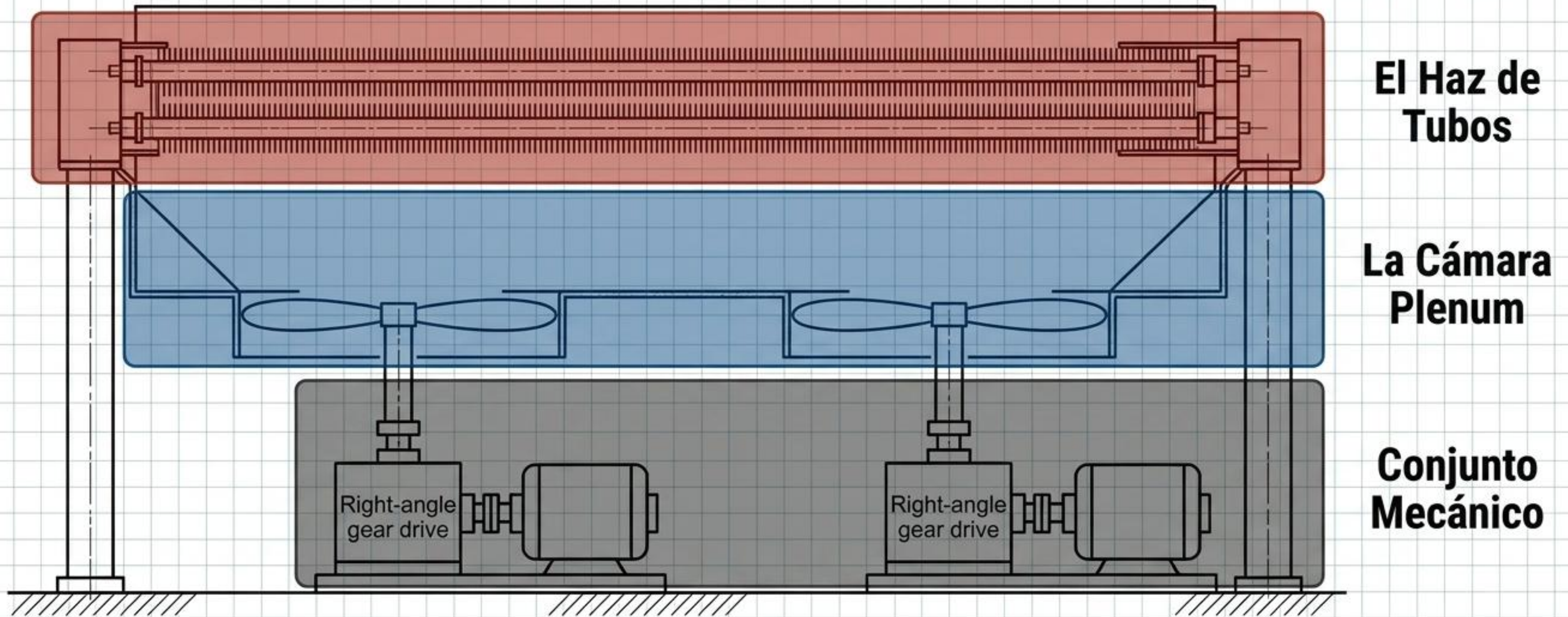
La caja soldada estándar para presiones de hasta 13,790 kPa (2000 psi).



- 1** **2** Placas: Placa de tubos (Tube sheet) y Placa de tapones (Plug sheet).
- 6** Partición de paso (Pass partition): Dirige el fluido de proceso a través del banco de tubos.
- 8** Tapones (Plugs): Permiten el acceso individual a los tubos para limpieza sin desarmar toda la unidad.

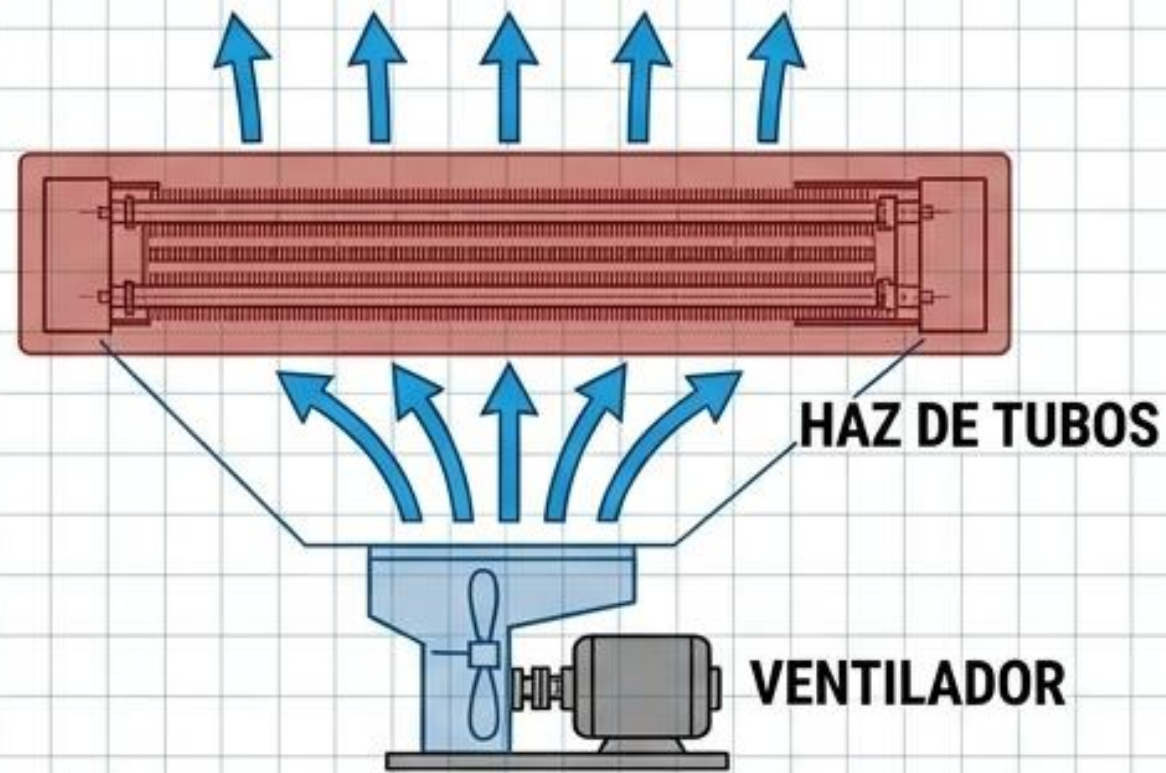
Los haces están diseñados para ser rígidos, autónomos y montados para expandirse térmicamente de manera independiente a la estructura de soporte.

Arquitectura General del Aeroenfriador



Dato Clave: La velocidad frontal (Face Velocity) estándar a través del haz es de 1.5 a 3.6 m/s.

Configuración de Flujo: Tiro Forzado vs. Tiro Inducido



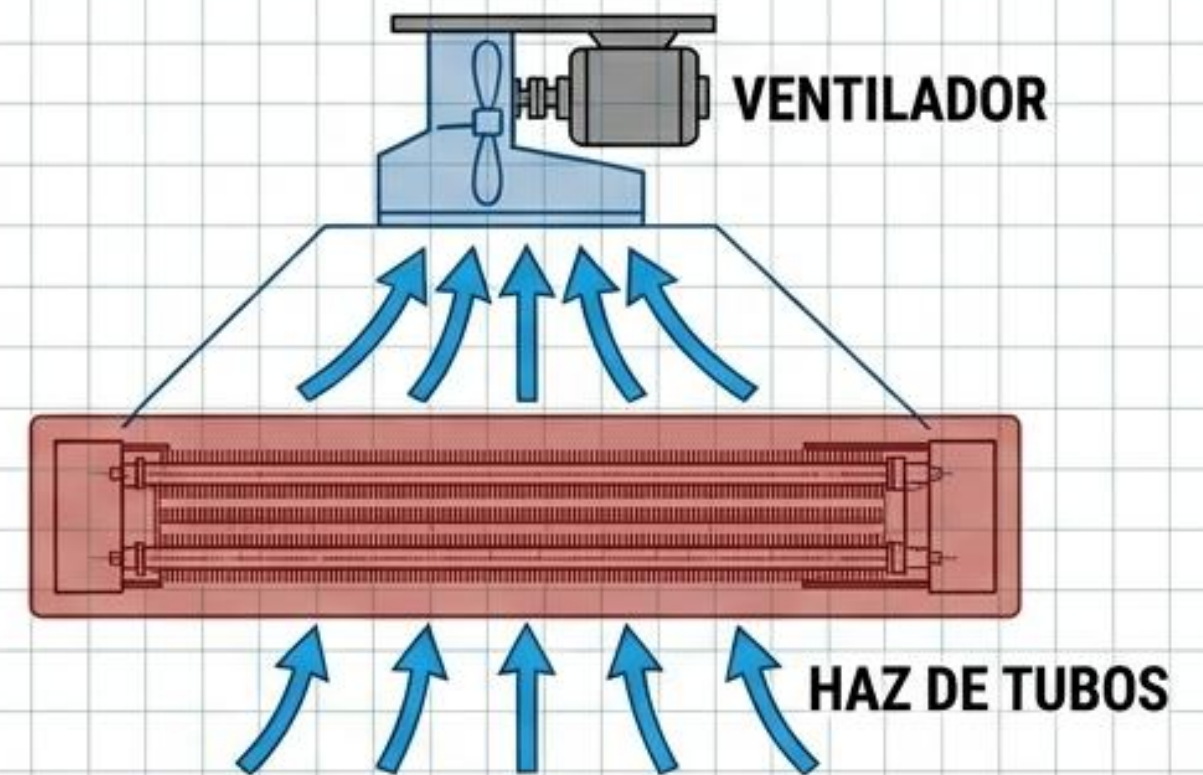
Tiro Forzado (Forced Draft)

Ventajas:

- Menor consumo de energía (si el ΔT del aire $>$ 30°C); fácil mantenimiento en flujo; conjunto mecánico protegido del aire caliente.

Desventajas:

- Distribución de aire menos uniforme; mayor riesgo de recirculación del aire de escape.



Tiro Inducido (Induced Draft)

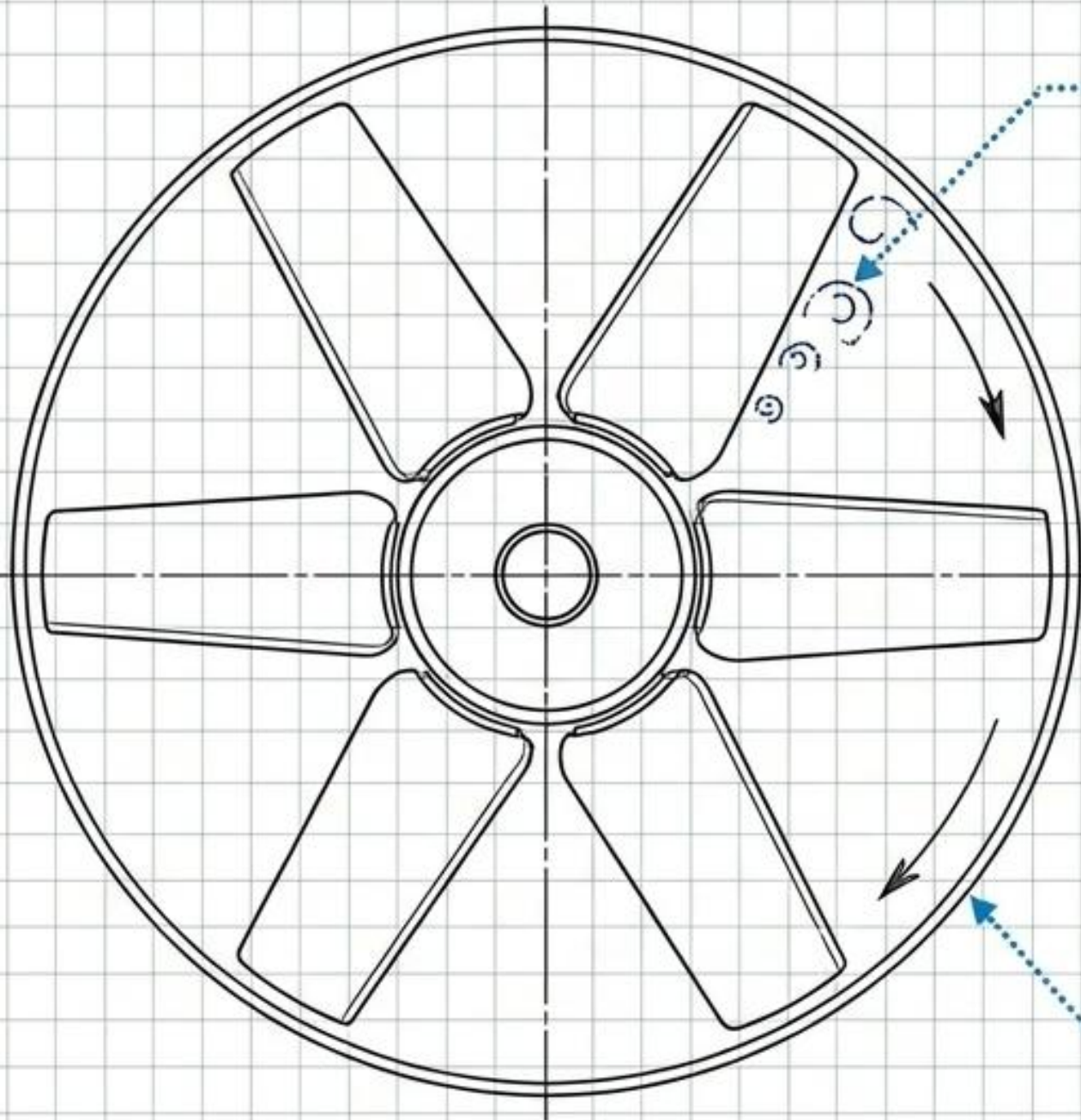
Ventajas:

- Distribución de aire más uniforme; menor riesgo de recirculación (alta velocidad de salida); mayor protección del equipo ante lluvia/nieve.

Desventajas:

- Mecánica expuesta al aire caliente; mantenimiento más complejo.

Aerodinámica de Ventiladores y Control de Ruido



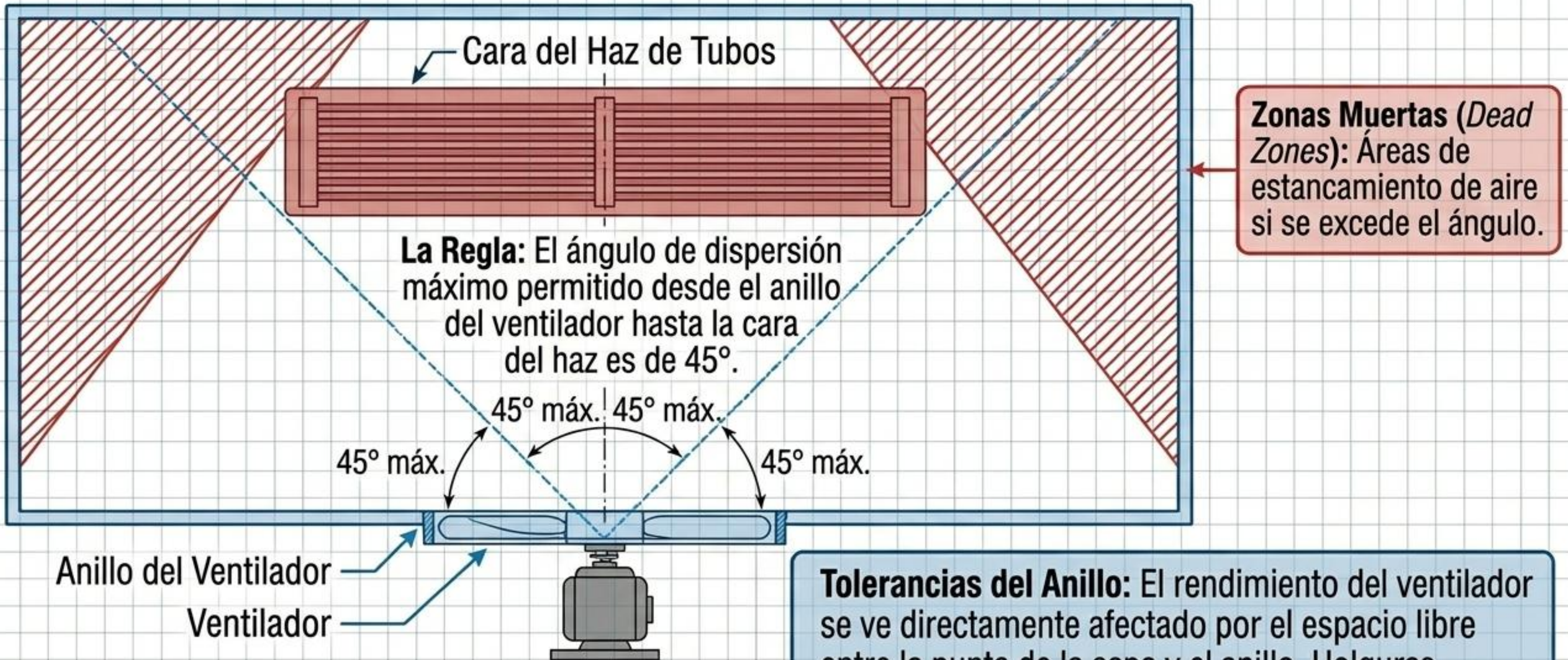
Génesis del Ruido: La fuente predominante de ruido es el desprendimiento de vórtices (*vortex shedding*) en el borde posterior de las aspas.

Características Base: Dispositivos de gran volumen y baja presión estática (≈ 2.5 mm de agua). Ajuste de flujo mediante variación del ángulo de las aspas.

Mitigación: Para reducir ruido sin perder flujo, la ingeniería dicta reducir velocidad de punta PERO aumentar el número de aspas y el ancho de pala.

El Límite de Velocidad (API 661): La norma API limita la velocidad en la punta de la pala (*Tip Speed*) a 61 m/s (12,000 ft/min) para controlar el ruido.

La Cámara Plenum y la Regla de Dispersión de 45°



Coeficientes Globales de Referencia (U)

Valores referenciales en Btu/(°F·ft²·h)

Condensación	Enfriamiento de Líquido	Enfriamiento de Gas
Vapor de baja presión: 135	Agua de camisa: 125	Aire/Gas de combustión (a 50 psi): 10
Amoníaco: 110	Nafta ligera: 70	Hidrocarburos (a 1000 psi): 80
Hidrocarburos ligeros: 90	Gasóleo ligero: 65	
	Alquitrán: 7	

Basado en tubo liso. Multiplicar por 5.6783 para W/(m²·K)

Matriz de Consideraciones de Diseño: Entorno y Planta

1. Temperatura de Diseño

Seleccionar la temperatura de bulbo seco superada solo el 2% del tiempo (meses cálidos) y sumar 1°C a 3°C por los microclimas industriales.

2. Recirculación y Espacio

La proximidad a edificios y calentadores requiere bancos ampliamente separados. La altura del haz sobre el suelo debe ser al menos la mitad de la longitud del tubo.

3. Acústica

El ruido es acumulativo. Dos ventiladores idénticos aumentan el nivel base en 3 dBa; ocho ventiladores en 9 dBa.

4. Seguridad y Corrosión

Fugas emiten vapores tóxicos directamente a la atmósfera (mitigado por la alta dilución de aire). Evitar colocar bajo chimeneas de ventilación corrosivas.

Matriz de Consideraciones de Diseño: Operación y Termodinámica

1. Temperatura de Aproximación (Approach)	2. Presión de Proceso
<p>Diferencia entre fluido de proceso a la salida y el aire ambiente. Mínimo práctico: 8°C a 14°C. (Hasta 5°C usando humidificadores).</p>	<p>Cabezales tipo tapón soportan hasta 13,790 kPa (2000 psi). Cabezales tipo palanquilla se requieren para extralimitaciones.</p>
3. Factor MTD (F)	4. Mantenimiento y Operación
<p>Corrección para flujo cruzado. Un paso = 0.91; Dos pasos = 0.96; Tres pasos = 0.99.</p>	<p>El ensuciamiento externo (lado aire) es marginal. El costo de mantenimiento es 0.3 a 0.5 veces menor que los equipos por agua. Limpieza interna de tubos es accesible mecánicamente.</p>

$$Q = U \times A_{oe} \times \Delta T_{\text{efectivo}}$$
$$\Delta T_e = \Delta T_{\ln} \times f$$

F= factor de corrección de diferencia de temperatura (ajuste a modelo de flujo)

Síntesis: El Ecosistema Interdependiente del Aeroenfriador

Paso 1: Cliente exige menor nivel de ruido ambiental.



Paso 2 (Cascada - Aerodinámica): La ingeniería exige reducir el Tip Speed del ventilador (<61 m/s).



Paso 3 (Cascada - Mecánica): Para mantener el volumen de aire con menor velocidad, se debe aumentar el número y ancho de las aspas.



Paso 4 (Cascada - Termodinámica): Si el flujo volumétrico cae, se afecta el h_o , lo que requiere mayor cantidad de aletas o un haz de tubos más largo para equilibrar la ecuación:

$$h_o A_{oe} \approx h_i A_i.$$

El diseño de un aeroenfriador no es la suma de sus partes; es un delicado equilibrio entre la transferencia de masa, el límite material acústico y la termodinámica del aleteado.