



The background of the slide features a detailed process flow diagram of an industrial evaporator system. The diagram is rendered in white and light blue lines on a dark blue background. It shows a complex network of pipes, pumps, and heat exchangers. Key components include a feedwater inlet at the top left, several vertical cylindrical vessels (likely reboilers or condensers), and a central horizontal vessel. The flow is indicated by arrows, showing a multi-stage process. Various symbols for pumps, valves, and temperature sensors (labeled 'TT') are distributed throughout the system. The overall layout is organized and technical in nature.

Diseño y Operación de Evaporadores Industriales

Principios termodinámicos, selección tecnológica y desafíos operativos.

El Objetivo



A diferencia de la destilación o el secado, el objetivo primordial es concentrar una solución mediante la vaporización del solvente (generalmente agua).

La Ley Fundamental

$$q = U \times A \times \Delta T$$



q = Flujo de calor (Heat flux)

Modo, 3.5 MW



U = Coeficiente global de transferencia

1200 W/m²K



A = Área de intercambio

25 m²



ΔT = Gradiente de temperatura

30 °C


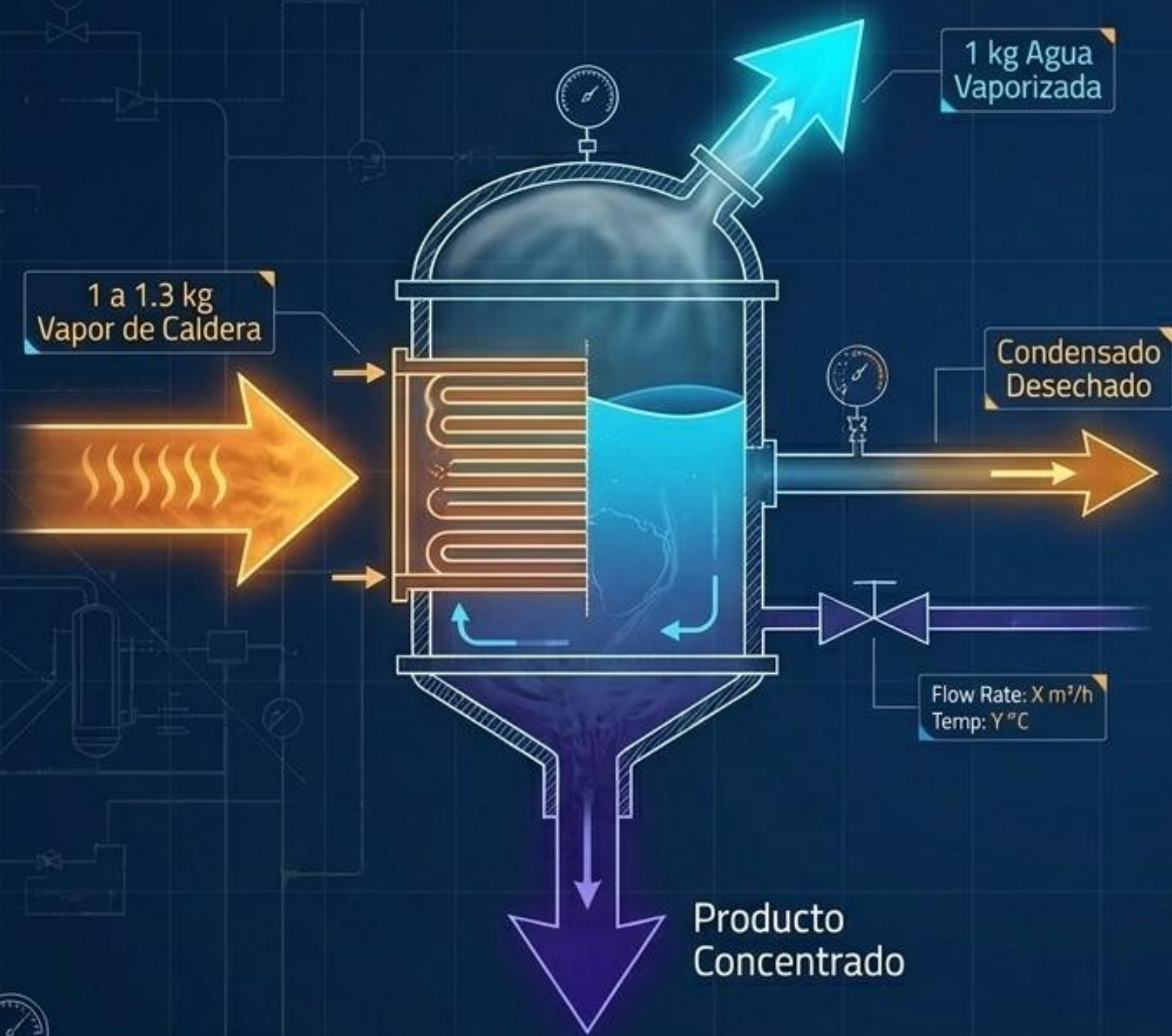


35 MW

$Y \text{ }^\circ\text{C}$

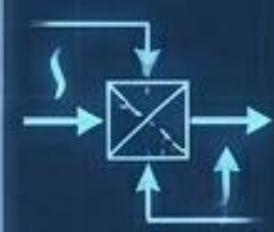
El Problema del Simple Efecto

Temp: 100°C Presión: 1 bar




El Problema **Térmico**

En un evaporador de simple efecto, el vapor generado simplemente se condensa y se desecha, perdiendo todo su calor latente.



La Ineficiencia

Para evaporar 1 kg de agua de la solución, se requieren entre 1 y 1.3 kg de vapor vivo.



Diagnóstico

Operación térmicamente ineficaz e inviable para altos volúmenes industriales.

35 MIN Y °C

La Economía del Vapor: Sistemas de Múltiples Efectos



Al reducir la presión en cada etapa sucesiva, disminuye la temperatura de ebullición del líquido, permitiendo reutilizar el calor latente del vapor anterior.

Doble Efecto:
~500 Btu / 1000 Btu

Triple Efecto:
~330 Btu / 1000 Btu

Quíntuple Efecto:
~200 Btu / 1000 Btu

Regla de Diseño:
 $U \times A \times \Delta T = \text{Constante}$

Taxonomía de Evaporadores Industriales

Temp: 100°C Presión: 1 bar

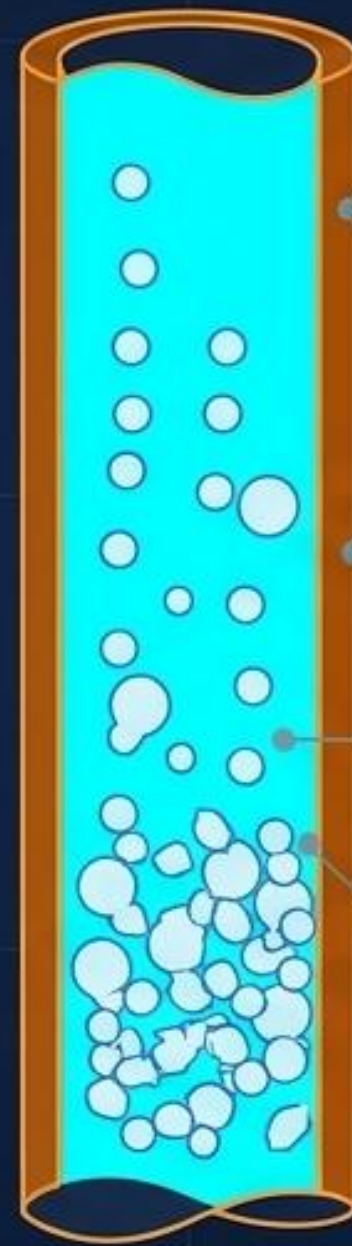
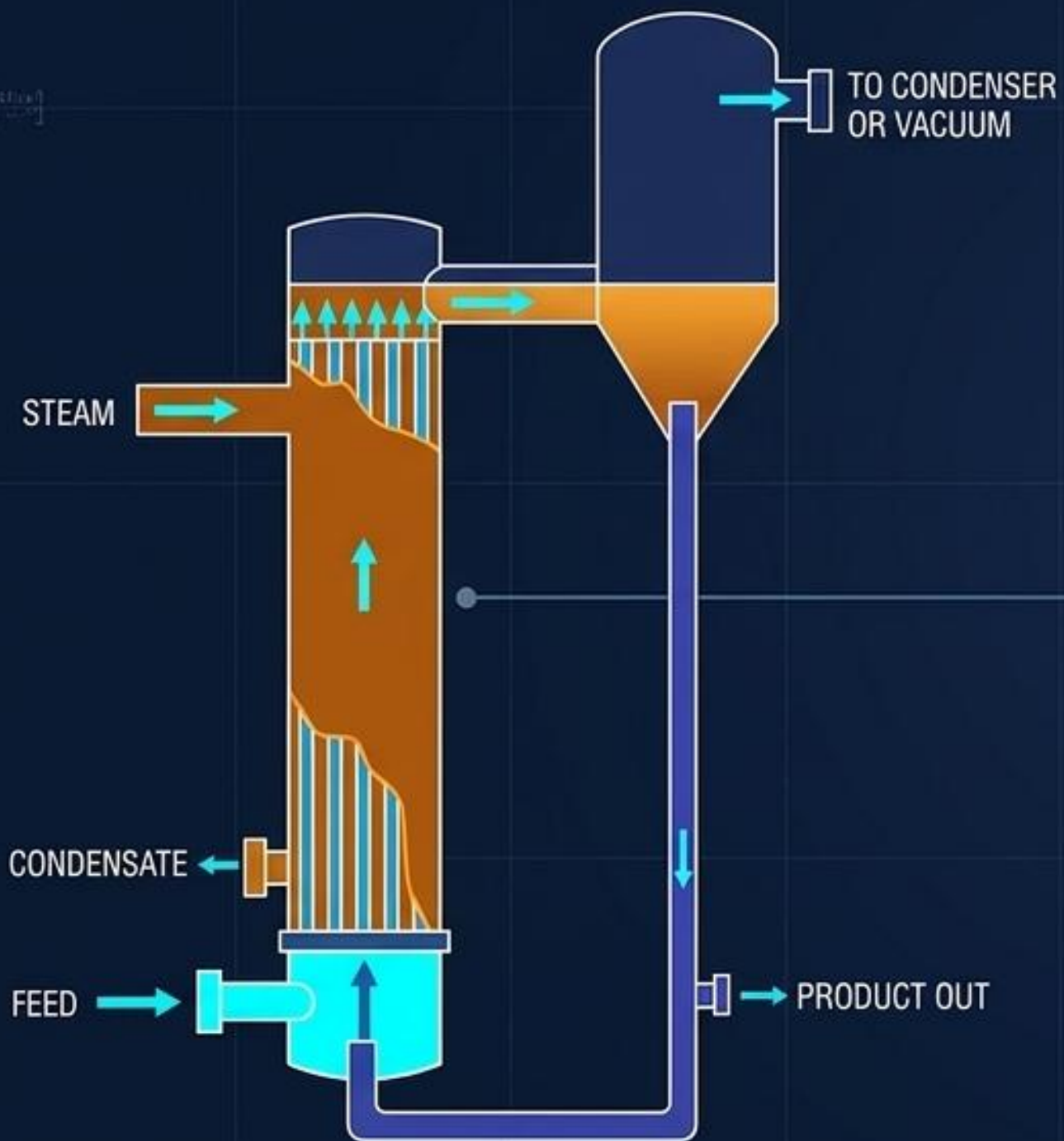


Nota de Ingeniería: La selección depende críticamente de la reología del fluido: viscosidad, termosensibilidad y tendencia al ensuciamiento (fouling).



55 MIN Y°C

Corriente Ascendente (Rising Film)



Anatomía

Tubos largos de 5 a 6 metros de longitud.

Dinámica

El fluido asciende impulsado por la expansión térmica. La ebullición ocurre en co-corriente (interior de los tubos).

Velocidad & Residencia

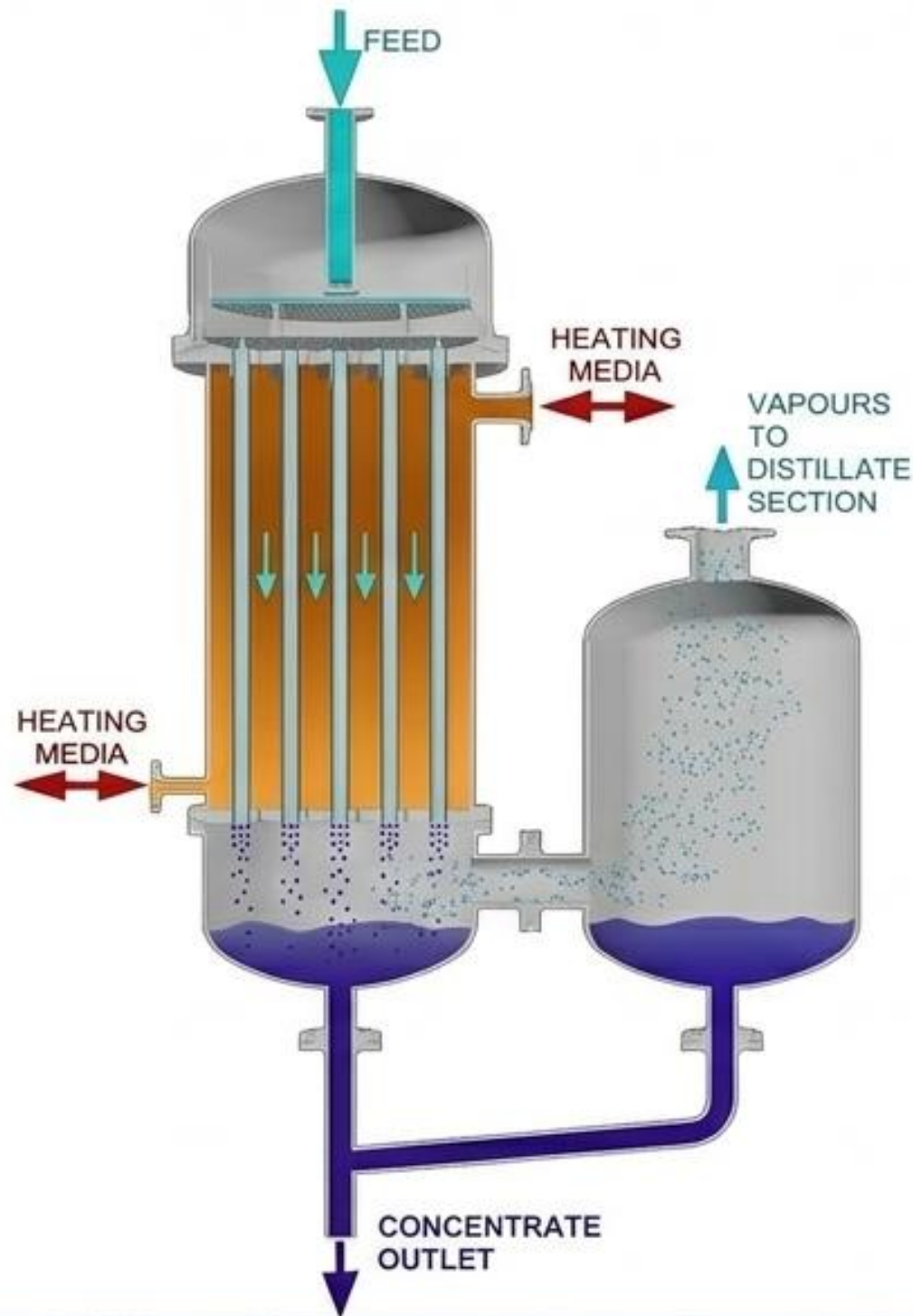
Las burbujas de vapor en el centro ascienden a altísima velocidad (>100 m/s). Tiempo de retención (T_r) de 3 a 4 minutos.

Aplicación Ideal

Útil para sistemas grandes con baja viscosidad y baja elevación del punto de ebullición (BPE).

Película Descendente (Falling Film)

Temp: < 30 s Presión: 1 bar



Anatomía

Tubos largos (5-6 m, Ø 2 a 4").

Dinámica

Fluido desciende por gravedad. Vapor condensa por fuera de forma descendente. Flujo altamente fluido.

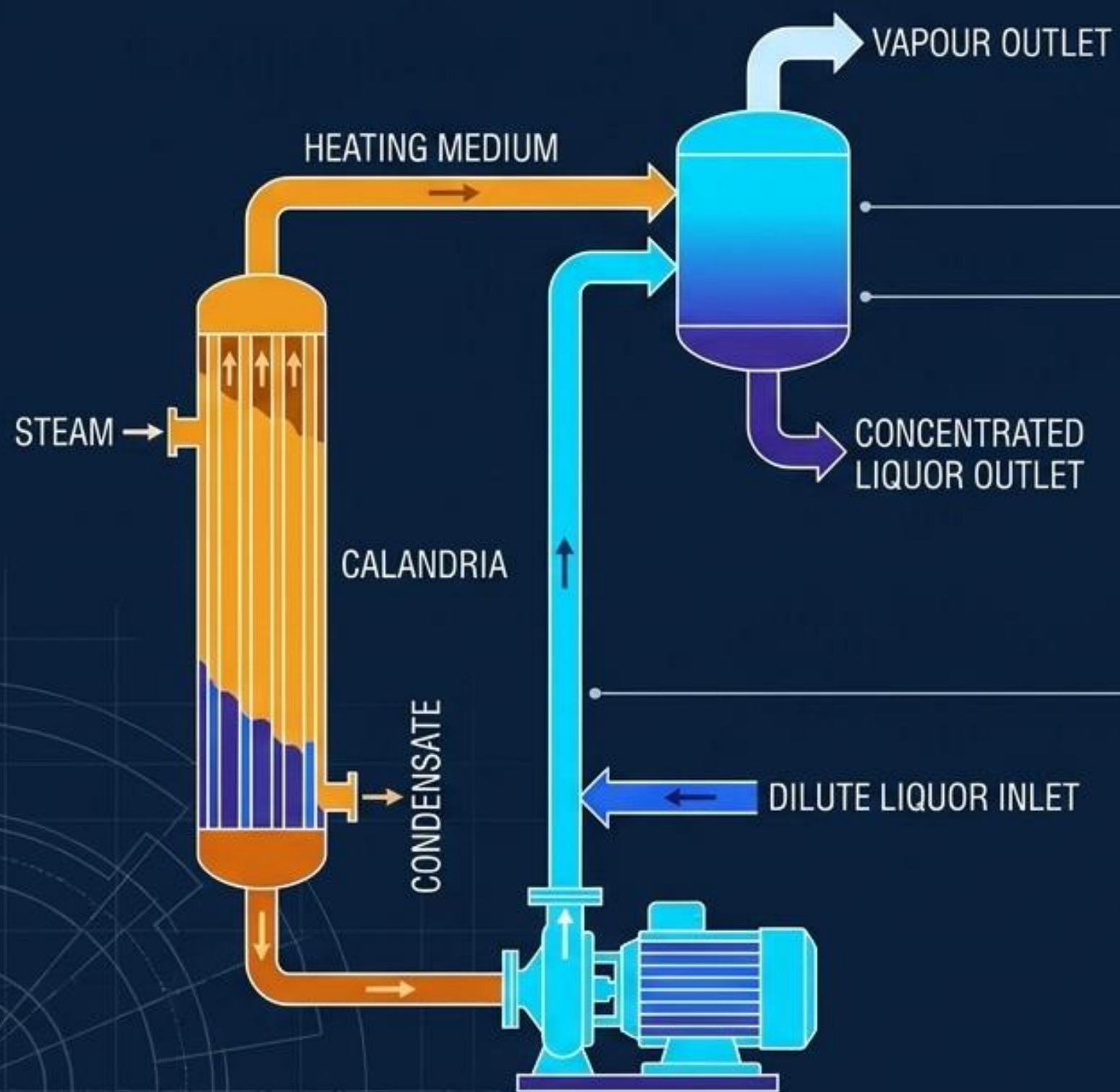
El Desafío Técnico

Requiere distribuidores (placas perforadas o boquillas) para garantizar una película uniforme en el interior del tubo y evitar puntos secos.

La Ventaja Suprema

Tiempo de residencia ultra bajo ($Tr \leq 30$ segundos). Supremo para productos altamente termosensibles (ej. jugo de naranja, farmacéutica).

Circulación Forzada (Forced Circulation)



Dinámica Mecánica

Impulsado por bombas centrífugas de alto caudal. Flujo de múltiples pasos por los tubos.

Supresión de Ebullición

El líquido no ebulle dentro de los tubos debido a la presión hidrostática. Ebulle externamente en la cámara de expansión (Flash).

Velocidad Extrema

Velocidades de purga en tubos entre 4 y 7 m/s, destruyendo resistencias de película.

Aplicación Ideal

Soluciones altamente viscosas, cristalización, líquidos con altos sólidos en suspensión o severa tendencia al ensuciamiento (fouling).

Arquitectura de Intercambio: Tubo y Coraza vs. Platos

Parámetro	Platos (Plate Evaporators)	Tubo y Coraza (Tubular)
Coeficiente de Transferencia (HTC)	 [Full Circle] (Superior, especialmente en fluidos viscosos)	 [Half Circle] (Estándar)
Espacio Requerido (Headroom)	 [Full Circle] (Bajo perfil, ultra compacto)	 [Empty Circle] (Requiere gran altura vertical)
Expansión / Mantenimiento	 [Full Circle] (Rápido, fácil adición de área de intercambio)	 [Empty Circle] (Fijo, limpiezas mecánicas complejas)
Manejo de Sólidos (Slurries)	 [Empty Circle] (Pobre, altísimo riesgo de obstrucción)	 [Full Circle] (Excelente)
Fluidos Corrosivos / Peligrosos	 [Half Circle] (Limitado por la resistencia de las juntas)	 [Full Circle] (Altamente resiliente, uso de materiales exóticos)



55 MIN

9°C

Espectro Tecnológico: Dinámica de Fluidos Comparada

1. Ascendente

Fuerza Motriz

Flotabilidad
(Termosifón natural)

Tiempo de Residencia

Alto (Minutos)



Riesgo de Fouling

Moderado

2. Descendente

Fuerza Motriz

Gravedad
(Película delgada)

Tiempo de Residencia

Ultra-bajo (< 30s)



Riesgo de Fouling

Alto (Riesgo de puntos secos por ruptura de película)

3. Forzada

Fuerza Motriz

Bomba mecánica
(Alta turbulencia)

Tiempo de Residencia

Variable
(Recirculación)



Riesgo de Fouling

Mínimo (Autolimpieza por velocidades > 4 m/s)

Espectro de Viscosidad y Ensuciamiento Manejable

Ecuación Maestra de Transferencia de Calor

q (Capacidad Térmica)

Requerimiento absoluto de diseño. Cuánta energía neta se necesita para vaporizar el agua objetivo.

U (Coeficiente Global)

La "salud" termodinámica del equipo. Depende enteramente de la tecnología elegida y las propiedades físicas del fluido.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

A (Área de Transferencia)

El tamaño físico del evaporador. A menor U, se requiere mayor Área, elevando drásticamente el costo de capital (CAPEX).

ΔT (Fuerza Impulsora)

Diferencia térmica entre vapor vivo y líquido. Estrictamente limitada por el punto de ebullición local y la termosensibilidad del producto.

Anatomía de las Resistencias Térmicas (U_o)



Película de Vapor (h_o):
Requiere purgar incondensables.

Pared del Tubo (k_m):
Resistencia del metal (Inox, Titanio).

Película de Líquido (h_i):
Controla la velocidad global.
Altamente dependiente de viscosidad.

Incrustación Exterior:
Generalmente despreciable.

Fouling Interior:
Acumulación de producto
que desploma el U .

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{D_o}{D_i h_i} + \frac{D_o}{D_i h_{if}} + \frac{x_w}{k_m} \left(\frac{D_o}{D_L} \right) + \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{do}} \right)}$$

Fenómenos de Interferencia y Degradación

Enemigos operativos que reducen drásticamente el U (Coeficiente Global).



1. Fouling (Ensuciamiento)

Acumulación gradual de proteínas o sólidos en las paredes.

Solución: Aumentar velocidad (Circulación forzada >8 ft/s).



2. Scaling (Incrustación)

Cristalización dura y calcárea (ej. sales) por cambios violentos en la solubilidad local.



3. Foaming (Espuma)

Arrastre de líquido hacia los equipos de vapor.

Solución: Aumentar velocidad de vapor (Vapor shear) o inyección de antiespumantes.



4. Degradación del Material

Corrosión (electroquímica) y Erosión (mecánica).

Solución: Acero inoxidable 304/316, o aleaciones de grafito.

El Ecosistema Periférico



Producción de Vacío

Bombas de anillo líquido o Eyectores de vapor (Steam jets). Vitales para reducir la presión en los últimos efectos y remover gases no condensables (aire).

Sistema de Condensación

Pierna barométrica (Barometric condenser) o intercambiadores acoplados a una Torre de Enfriamiento. Necesarios para colapsar el vapor del último efecto y crear el vacío natural.

Manejo de Condensados

Trampas de vapor (Steam traps). Esenciales para drenar el condensado sin perder presión termodinámica de vapor vivo.

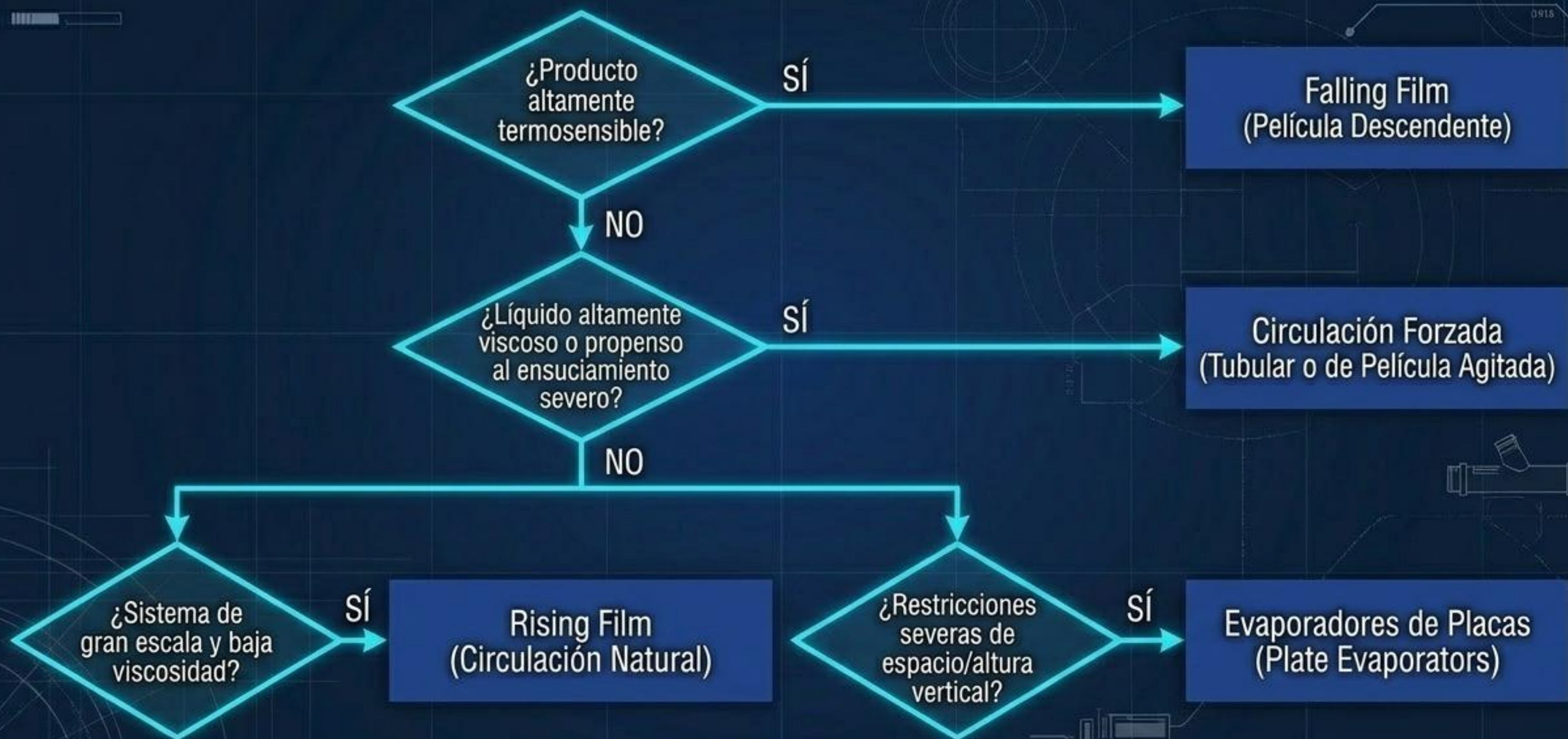
Guía Definitiva de Selección de Equipos

Propiedad del Fluido	P. Descendente	P. Ascendente	C. Forzada	Placas
Termosensible (Ej. Jugos)	VERDE (Ideal) ✓	AMARILLO ⚠	ROJO ✗	AMARILLO ⚠
Alta Viscosidad (>100 P)	ROJO ✗	ROJO ✗	AMARILLO ⚠	VERDE (Ideal) ✓
Sólidos en Suspensión (Slurries)	ROJO ✗	AMARILLO ⚠	VERDE (Ideal) ✓	ROJO ✗
Tendencia al Fouling	ROJO ✗	AMARILLO ⚠	VERDE (Ideal) ✓	AMARILLO ⚠

Nota Crítica de Diseño

Si la viscosidad rompe la película formando puntos secos en el tubo, se debe abandonar inmediatamente la tecnología de Película y transicionar a Circulación Forzada o Película Agitada.

Síntesis: Matriz de Selección Tecnológica



Checklist de Diseño de Instalaciones



Tasas Térmicas Base

¿Se han establecido las tasas máximas permitidas evaluando rigurosamente la termosensibilidad y el riesgo de precipitación del soluto?



Definición de Perfil de Flujos

¿Se definió la configuración (co-corriente vs. contra-corriente) basándose en la curva térmica y de viscosidad del líquido procesado?



Distribución en Múltiple Efecto

Para mantener flujos de calor estables entre efectos en serie, ¿se verificó que la relación $U \times A \times \Delta T = \text{Constante}$?



Dimensionamiento de Equipos Accesorios

¿Están correctamente dimensionados la bomba de vacío, el condensador barométrico, los eyectores y las trampas de purga de gases incondensables?

El Equilibrio del Ingeniero de Procesos

Costo de Capital (CAPEX)

Dictado por el Área Física (A), número de efectos instalados y metalurgia exótica.

Costo Operativo (OPEX)

Dictado por eficiencia energética (Btu/lb), integración térmica y consumos mecánicos.

Confiability (Uptime)

Dictado por vencer el Fouling, Scaling y manejar la Viscosidad límite.

El diseño óptimo no es minimizar un solo factor. Es encontrar el punto exacto donde la termodinámica dicta la geometría, y la reología del fluido exige la tecnología.

Consideraciones Finales de Diseño



Perfil Térmico

Establecer las **tasas de transferencia (U)** recomendadas respetando estrictamente los límites de **termosensibilidad** del producto y calculando la **Elevación del Punto de Ebullición (BPE)**.



Reología y Flujo

Definir la tecnología de intercambio basándose primariamente en la **viscosidad dinámica**, el riesgo inminente de **precipitación** (sólidos) y la tendencia a la **formación de espuma** (foaming).



Economía Total

Optimizar el número de efectos equilibrando el **costo de capital (Capex)** - instalar más evaporadores) contra el **costo operativo (Opex)** - consumo perpetuo de energía). Sistemas **MVR/TVR** pueden justificar menores saltos térmicos.

El diseño óptimo es siempre un delicado equilibrio entre la termodinámica teórica y la viabilidad mecánica en la planta.