USIZIMA — TECHNICAL INSIGHTS #001

001 / 2026 • V02

INDUSTRIAL EVAPORATION

Venteo en evaporadores de múltiple efecto

Efectos en la capacidad y la eficiencia energética

Alexandre Usizima

Consultor independiente de ingeniería

www.usizima.com

1. Introducción

El desempeño de un evaporador de múltiple efecto depende de diversos factores relacionados con el diseño térmico, la configuración del proceso y las condiciones de operación de la instalación.

Entre estos factores, el sistema de venteo, encargado de retirar los gases no condensables, no siempre recibe suficiente atención durante el diseño, la operación y el mantenimiento del equipo.

Aunque en muchos casos consta de tuberías de pequeño diámetro y placas de orificio sencillas, un sistema de venteo mal dimensionado puede reducir significativamente la capacidad de evaporación y la eficiencia energética de la instalación.

2. Origen de los gases no condensables

Los gases no condensables presentes en un evaporador industrial tienen tres fuentes principales:

- Gases presentes en el vapor de calentamiento;
- Gases disueltos o incorporados al producto procesado;
- Entrada de aire por fugas en la instalación.

Según la experiencia de campo del autor, la entrada de aire por fugas suele ser la principal fuente de gases no condensables, particularmente en equipos antiguos o con mantenimiento deficiente.

Las bocas de registro, juntas de sellado, conexiones bridadas y sellos mecánicos de bombas centrífugas son posibles puntos de entrada de aire en las zonas sometidas a vacío.

Con el envejecimiento de la instalación y el deterioro de los elementos de sellado, la entrada de aire tiende a aumentar, especialmente cuando el mantenimiento preventivo es insuficiente.

3. Influencia de los gases no condensables en la transferencia de calor

La presencia de gases no condensables del lado del vapor perjudica la transferencia de calor por varios mecanismos.

A una presión total dada, estos gases reducen la presión parcial del vapor y, por consiguiente, su temperatura de saturación. También añaden resistencia al transporte de vapor hacia las superficies de condensación.

En situaciones más críticas, los gases no condensables pueden acumularse localmente y formar bolsas que dificultan el acceso del vapor a las superficies de intercambio térmico.

Como consecuencia, parte del área de intercambio térmico instalada queda desaprovechada, lo que reduce el desempeño del evaporador.

Según la ley de Dalton, la presión total de la mezcla es la suma de la presión parcial del vapor y la de los gases no condensables (GNC) [3] [5].

$$P_{total} = P_{vapor} + P_{GNC}$$

La tasa de transferencia de calor puede expresarse como [4]:

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

En esta expresión, Q es la tasa de transferencia de calor, U es el coeficiente global, A es el área de intercambio y ΔT es la diferencia de temperatura representativa. La menor temperatura de saturación reduce ΔT, mientras que la resistencia adicional al transporte de vapor reduce el coeficiente global efectivo [1] [3].

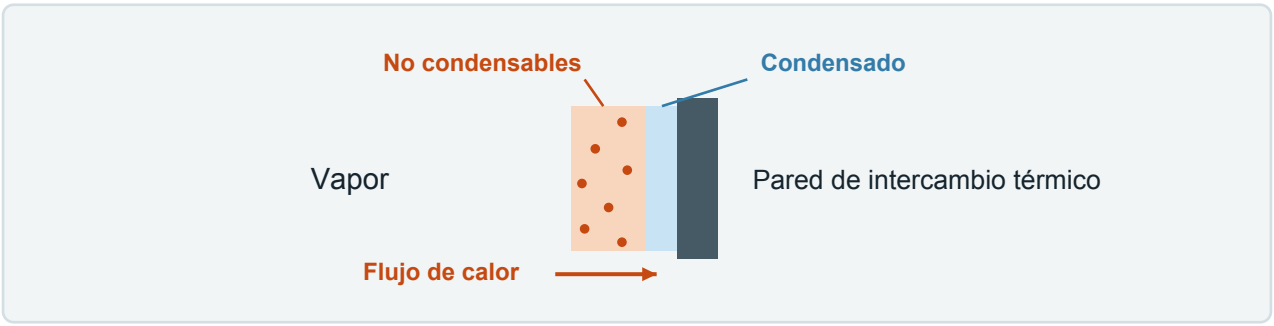

Figura 1 — Efecto de los gases no condensables. Los gases se acumulan junto a la superficie de condensación y añaden resistencia a la transferencia de calor y masa.

4. Venteo insuficiente y venteo excesivo

En condiciones ideales, un sistema de venteo retiraría exclusivamente los gases no condensables sin pérdida alguna de vapor.

En la práctica, esta condición es extremadamente difícil de alcanzar.

Se busca, por tanto, establecer un caudal de venteo suficiente para retirar los gases no condensables, admitiendo una pérdida de vapor pequeña y controlada.

Venteo insuficiente

Un caudal insuficiente favorece la acumulación de gases no condensables dentro del equipo, lo que perjudica la transferencia de calor y el aprovechamiento del área instalada.

Esto puede reducir la capacidad de evaporación y alterar el perfil térmico de la instalación.

Venteo excesivo

Un caudal excesivo provoca pérdidas innecesarias de vapor y penaliza el desempeño energético en ambos extremos de la instalación:

- En la entrada, desperdicia vapor que debería contribuir a la evaporación del producto;
- En la salida, aumenta la carga térmica del condensador y del sistema de agua de enfriamiento.

Parte de la energía suministrada al evaporador acaba en el sistema de condensación sin contribuir a la concentración del producto.

El equilibrio

El desafío consiste en establecer un caudal de venteo que permita retirar los gases no condensables y minimice al mismo tiempo las pérdidas de vapor.

Desde el punto de vista práctico, es preferible admitir una pequeña pérdida adicional de vapor a permitir que los gases no condensables remanentes perjudiquen el desempeño térmico del equipo.

Determinar este caudal es uno de los desafíos del dimensionamiento del sistema de venteo.

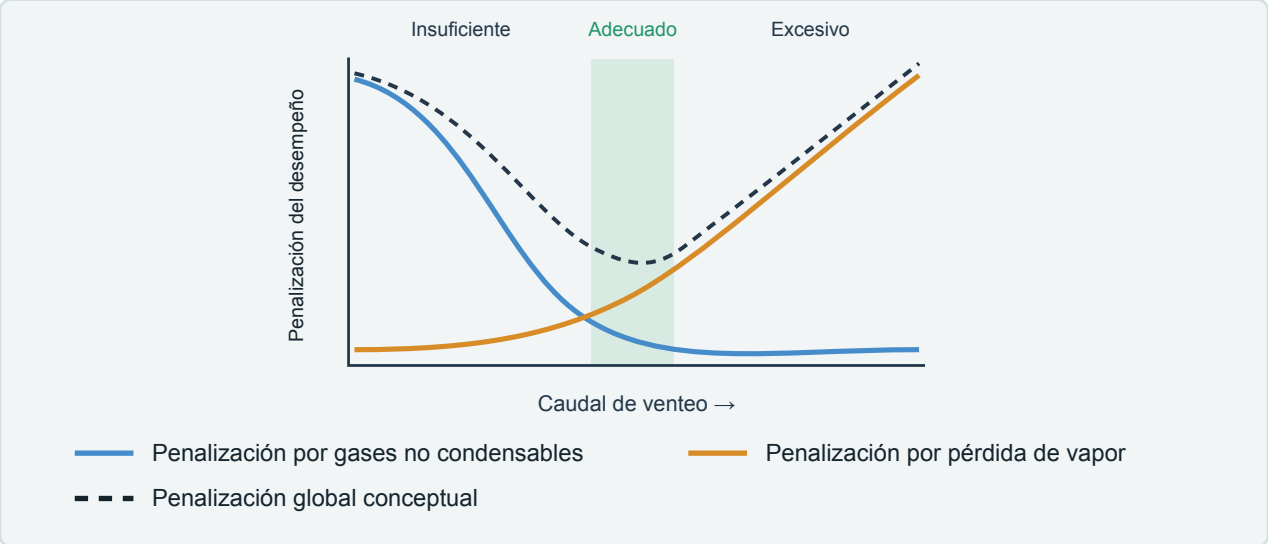

Figura 2 — Equilibrio del caudal de venteo. Gráfico cualitativo, sin escala numérica ni datos experimentales.

5. Configuración del sistema de venteo

Todos los equipos de una instalación de evaporación que utilizan vapor como fuente de calor por condensación deben contar con medios adecuados para retirar los gases no condensables.

Esto incluye calandrias tubulares, evaporadores de placas, pasteurizadores y precalentadores.

Se pueden considerar dos configuraciones para conducir los gases no condensables.

Sistema en cascada

En el sistema en cascada, los gases extraídos de un efecto se conducen al siguiente, y así sucesivamente, hasta alcanzar el sistema de condensación.

Esta configuración permite aprovechar parte del vapor presente en la corriente de venteo, pero transfiere los gases no condensables entre los efectos.

Sistema con colector común

El autor prefiere una configuración en la que los gases no condensables se extraen de forma independiente de cada equipo y se conducen directamente al sistema de condensación por un colector común.

Esta configuración evita la transferencia sucesiva de gases no condensables entre los cuerpos de evaporación, siempre que se dimensione y opere adecuadamente.

Cada punto de extracción tiene su propio elemento de restricción de caudal, dimensionado según las condiciones de operación del equipo correspondiente.

La elección debe considerar las características de la instalación y el equilibrio entre desempeño térmico, recuperación de energía y eficacia en la extracción de gases no condensables.

En *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Standiford describe el venteo en cascada para aprovechar parte del vapor en el efecto siguiente e indica el envío directo al condensador en instalaciones con una carga elevada de gases no condensables [1]. Minton recomienda conducir el venteo de los evaporadores de múltiple efecto directamente al condensador y, como criterio general, evitar la transferencia entre efectos [2].

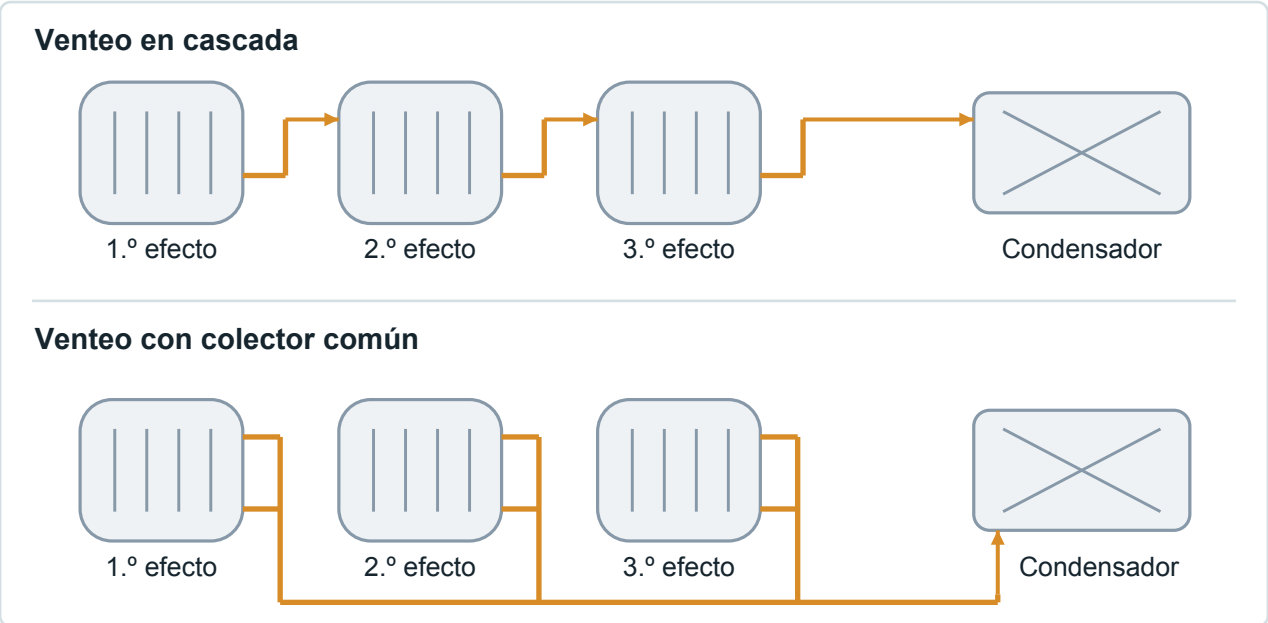

Figura 3 — Comparación de configuraciones de venteo. Solo se muestran las líneas de venteo. Se omiten las líneas principales de vapor, producto y condensado.

6. Ubicación de los puntos de extracción

La ubicación de los puntos de extracción es un aspecto importante del diseño.

Aunque el aire es más denso que el vapor de agua a la misma presión y temperatura, la diferencia de densidad por sí sola no determina la distribución de los gases dentro de una calandria.

La geometría del equipo, la dirección del flujo de vapor, la condensación y las zonas de estancamiento también influyen en esa distribución.

Como recomendación general, en las calandrias tubulares resulta ventajoso instalar puntos de extracción en las zonas superior e inferior del cuerpo.

La disposición debe ajustarse, en todo caso, a las características constructivas de cada equipo. El recorrido del vapor y la ubicación de las zonas de acumulación deben orientar la selección de los puntos de extracción [2] [3].

7. Dimensionamiento de las placas de orificio

En muchas instalaciones industriales, el caudal de venteo está determinado por placas de orificio instaladas en las tuberías de extracción.

El dimensionamiento inicial puede partir del caudal estimado de vapor de calentamiento de cada equipo, usando una fracción de ese caudal como referencia para el venteo.

El porcentaje adoptado depende de las características de la instalación, de las condiciones de proceso y de la experiencia del profesional responsable del dimensionamiento.

El diámetro del orificio se determina a partir del caudal estimado y de las condiciones de presión y temperatura aguas arriba y aguas abajo, teniendo en cuenta que el flujo es compresible.

El dimensionamiento inicial debe validarse posteriormente mediante una evaluación del desempeño operativo del evaporador.

8. Diagnóstico de problemas en instalaciones existentes

En la práctica industrial, rara vez se solicita una intervención técnica específicamente para evaluar el sistema de venteo.

Los problemas más habituales son:

- Capacidad de evaporación inferior a la nominal;
- Dificultad para alcanzar la concentración deseada;
- Dificultad para establecer o mantener el vacío;
- Temperaturas de operación superiores a las previstas;
- Perfil de temperaturas inadecuado entre los efectos.

Una deficiencia en el sistema de venteo suele identificarse por descarte, después de evaluar sistemáticamente las demás condiciones de operación.

El primer paso es recuperar las condiciones originales de diseño del equipo.

Como ejemplo, considérese un evaporador de leche diseñado para las siguientes condiciones:

Parámetro	Condición de diseño
Caudal de alimentación	10.000 kg/h
Contenido de sólidos en la alimentación	12%
Contenido de sólidos en el concentrado	50%
Caudal de concentrado	2.400 kg/h
Capacidad de evaporación	7.600 kg/h
Temperatura en la carcasa del primer efecto	76 °C
Temperatura en el separador del último efecto	49 °C

Una vez establecidas las condiciones de referencia, se evalúa el desempeño real del equipo.

Entre otras variables, deben comprobarse las condiciones del suministro de vapor, la disponibilidad de agua de enfriamiento y la limpieza del condensador.

Si los problemas persisten después de investigar las demás causas posibles, es necesario evaluar el sistema de venteo.

Un problema particularmente crítico en la industria es la ausencia de las placas de orificio.

Durante trabajos de mantenimiento o modificaciones de la instalación, estas piezas pueden retirarse y quedar sin reinstalar.

Dado que normalmente una inspección visual externa no permite confirmar su presencia, el evaporador puede operar durante años en estas condiciones, con pérdidas importantes de eficiencia energética.

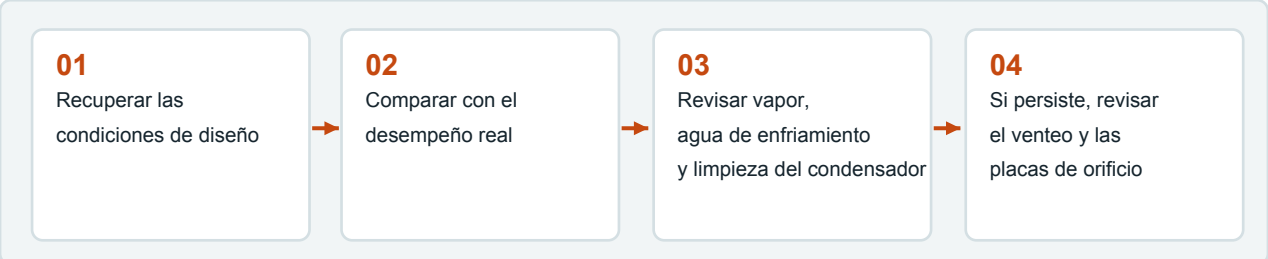

Figura 4 — Metodología de diagnóstico. Secuencia basada en la experiencia de campo del autor. El sistema de venteo se investiga después de evaluar las demás causas posibles.

9. Validación del dimensionamiento en campo

El dimensionamiento del sistema de venteo puede validarse indirectamente evaluando el desempeño global del evaporador.

Una vez instaladas las placas de orificio dimensionadas, el equipo vuelve a operar y se evalúan nuevamente sus condiciones de funcionamiento.

El restablecimiento de las condiciones originales de diseño es un indicador importante de que el sistema es adecuado.

Siempre que sea posible, esta evaluación debe complementarse con un análisis del consumo específico de vapor y de la carga térmica del sistema de condensación.

$$CE_v = \dot{m}_{\text{vapor vivo}} / \dot{m}_{\text{agua evaporada}}$$

El consumo específico de vapor se expresa en kg de vapor vivo por kg de agua evaporada.

$$Q_{cond} = \dot{m}_{agua} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Q_{cond} es la tasa de calor absorbida por el agua de enfriamiento, $\dot{m}_{agua}$ es su caudal másico, C_p es su calor específico medio y ΔT es el aumento de temperatura del agua entre la entrada y la salida del condensador. Con el caudal en kg/s y C_p en kJ/(kg·K), el resultado se expresa en kW.

Recuperar la capacidad nominal, por sí solo, no garantiza que la instalación opere con la mejor eficiencia energética posible.

Sin embargo, buscar la pérdida mínima absoluta de vapor no siempre se justifica desde el punto de vista técnico o económico.

Una pérdida pequeña y controlada de vapor debe aceptarse como parte del funcionamiento adecuado del sistema de venteo.

10. Estanqueidad, inspección y mantenimiento

Ante un aumento de la entrada de aire por fugas, la prioridad debe ser siempre recuperar la estanqueidad de la instalación.

El redimensionamiento del sistema de venteo no debe utilizarse para compensar deficiencias de mantenimiento.

Una vez correctamente dimensionado y validado, el sistema no debería requerir recalibración mientras se mantengan las condiciones de proceso y las características de la instalación.

La inspección periódica debe centrarse en verificar:

- La presencia de las placas de orificio;
- Su instalación en los puntos especificados;
- La conformidad de los diámetros;
- La ausencia de suciedad y obstrucciones;
- La integridad de las tuberías de venteo.

Los cambios importantes en las condiciones de proceso o en la capacidad de producción pueden, sin embargo, justificar una revisión del dimensionamiento original.

En el mantenimiento preventivo, la inspección periódica confirma que los componentes cumplen las especificaciones. Debe restablecerse la estanqueidad antes de revisar el dimensionamiento por un aumento de la entrada de aire.

11. Identificación y documentación técnica

En las instalaciones industriales es frecuente que los elementos de restricción del sistema de venteo carezcan de identificación.

Se recomienda identificar físicamente todas las placas de orificio con etiquetas resistentes a las condiciones industriales y fácilmente visibles en campo.

Esta identificación debe vincularse a la documentación técnica de la instalación.

Los diagramas de flujo del proceso y las hojas de datos técnicos actualizados deben permitir identificar los componentes, su ubicación y sus especificaciones.

La calidad de la documentación técnica es fundamental para preservar las características originales del equipo a lo largo de su vida útil.

12. Conclusión

A pesar de su aparente sencillez, el sistema de venteo cumple una función fundamental en la operación de los evaporadores de múltiple efecto.

El venteo insuficiente perjudica la transferencia de calor y la capacidad de evaporación. El venteo excesivo desperdicia vapor y aumenta la demanda energética del sistema de enfriamiento.

El dimensionamiento adecuado, junto con la conservación de la estanqueidad, la inspección preventiva y la documentación técnica, contribuye directamente a mantener el desempeño y la eficiencia energética de la instalación.

El sistema de venteo debe dimensionarse para cumplir las condiciones del proceso. Las deficiencias de mantenimiento deben corregirse en su origen.

La importancia del sistema de venteo radica en su impacto sobre el desempeño global del evaporador, independientemente del tamaño de sus tuberías o de la sencillez de sus componentes.

USIZIMA — EVAP & DRYING ENGINEERING
Consultoría independiente en evaporación, secado por atomización y tecnología de lecho fluidizado.
www.usizima.com

Referencias bibliográficas

1. STANDIFORD, F. C. Evaporators — Vent Systems. In: PERRY, R. H. et al. (ed.). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7.ª ed. McGraw-Hill, 1997. Sección 11, p. 11-117. Consultar fuente.

2. MINTON, P. E. *Handbook of Evaporation Technology*. Noyes Publications, 1986. Cap. 13, "Venting", p. 133–139. ISBN 0-8155-1097-7. Consultar fuente.

3. SPIRAX SARCO. *Air Venting Theory*. Consultar fuente.

4. SPIRAX SARCO. *Heat Transfer*. Consultar fuente.

5. SPIRAX SARCO. *Steam Quality*. Consultar fuente.