

1. Datos Técnicos del Caso de Transferencia — Torre de Enfriamiento Industrial

Caso: Torre de enfriamiento de tiro inducido con degradación progresiva semanal

Uso en: Clase 5 (prueba de transferencia — DD_17, DD_20, DD_22)

Versión: 1.1 — Mayo 2026

Cambios v1.0 → v1.1 (alineación con Premisas v1.0, 2026-05-16): - Agregado contexto narrativo industrial (empresa, personajes, restricciones). - Sección 5 reescrita: estructura de 80 min (P4) con chatbot NEUTRO + encuesta final. - Sección 4 ampliada: incluye encuesta mixta como instrumento de medición (DD_23). - Corrección técnica 2026-05-31: capacidad nominal de torre ajustada a 1200 TR para ser coherente con caudal 300–320 m³/h y salto térmico 42→31 °C. - Corrección técnica 2026-05-31: agregadas referencia sanitaria DS 144/2001 MINSAL y conductividad de agua de reposición para interpretar ciclos de concentración.

1.1 1. Descripción del sistema

Tipo: Torre de enfriamiento industrial de tiro inducido.

Función: Disipar el calor del agua de un circuito industrial mediante enfriamiento evaporativo. El agua caliente entra a la torre desde los equipos aguas arriba, se enfría por contacto con aire y vuelve a recircular.

Componentes principales: - Torre de enfriamiento (relleno, ventilador de tiro inducido) - Bomba de recirculación - Intercambiador de calor - Sistema de dosificación de biocida - Control de purga (blowdown) - Sensores: pH, conductividad, temperatura, caudal, presión diferencial

Target operacional: La temperatura de salida del agua debe ser ≤ 32 °C para enfriar correctamente los equipos aguas abajo.

Contexto industrial: Torres de enfriamiento son equipos críticos en plantas industriales chilenas (minería, energía, alimentos).

Referencia sanitaria: DS 144/2001 MINSAL para control sanitario asociado a Legionella en sistemas con aerosolización de agua.

Agua de reposición: Conductividad de makeup = 650 S/cm (agua potable industrial tratada). Sirve como referencia para estimar ciclos de concentración.

Contexto narrativo:

*“Usted es el ingeniero de mantenimiento de **Procesadora de Alimentos del Pacífico S.A.**, planta Quilicura. La torre de enfriamiento (modelo BAC Serie 3000, 1200 TR) sirve al circuito de refrigeración de la línea de envasado aséptico. El jefe de producción (Sr. Gutiérrez) reporta que la línea ha estado operando al límite térmico toda la semana*

y amenaza con parar el viernes si la temperatura no baja. La planta opera 24/7 en temporada alta (octubre–marzo). Una parada de línea cuesta \$18.000 USD/día en producto no procesado. El último mantenimiento mayor de la torre fue hace 14 meses (programado cada 12). El operador de turno (Sra. Morales) ha estado incrementando la dosis de biocida ‘porque el agua se pone verde más rápido que antes.’ ”

1.2 2. Datos operacionales — Serie temporal semanal

Día	T_entrada (°C)	T_salida (°C)	pH	Conductividad (S/cm)	Caudal recirc. (m ³ /h)	ΔP intercambiador (kPa)	Biocida (kg/d)
L	42	31	7.8	1850	320	28	12
M	42	32	7.9	1980	315	32	14
X	42	33	8.0	2150	308	37	16
J	42	34	8.2	2380	298	44	18
V	42	35	8.4	2640	285	53	21
S	42	36	8.5	2920	270	63	25
D	42	37	8.7	3200	252	75	30

1.3 3. Contexto técnico (para el docente/investigador — NO entregar al estudiante)

1.3.1 Variables y su significado diagnóstico

Variable	Rango normal	Valor crítico	Interpretación
T_salida	≤ 32 °C	> 34 °C	Sistema no enfría adecuadamente
pH	7.5–8.0	> 8.3	Favorece incrustación (CaCO ₃) y reduce eficacia biocida
Conductividad	< 2000 S/cm	> 2500 S/cm	Ciclos de concentración excesivos respecto de makeup 650 S/cm; riesgo de incrustación

Variable	Rango normal	Valor crítico	Interpretación
Caudal	300–320 m ³ /h	< 280 m ³ /h	Obstrucción en intercambiador o tuberías
ΔP intercambiador	25–35 kPa	> 50 kPa	Incrustación severa en superficies de intercambio
Biocida	10–14 kg/d	> 20 kg/d	Sistema fuera de control; biocida no alcanza a controlar

1.3.2 Diagnóstico técnico completo

Problema principal: Degradación progresiva por dos mecanismos paralelos (análogos al caso de la piscina):

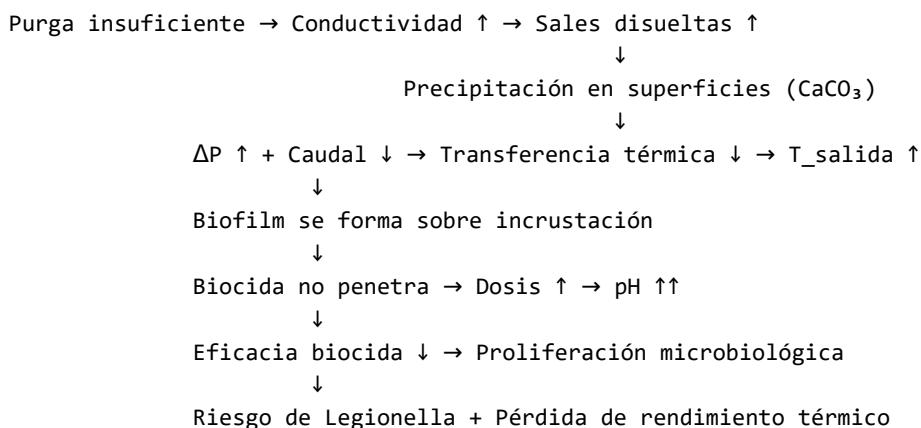
1. Incrustación física (análogo a obstrucción del filtro):

- Evidencia: conductividad creciente (1850 → 3200 S/cm) + ΔP creciente (28 → 75 kPa) + caudal decreciente (320 → 252 m³/h)
- Mecanismo: purga insuficiente → ciclos de concentración suben (conductividad recirculada / 650 S/cm) → sales precipitan en superficies de intercambio
- Consecuencia: menor transferencia de calor → T_salida sube

2. Pérdida de control biológico (análogo a pérdida de desinfección):

- Evidencia: consumo de biocida creciente (12 → 30 kg/d) + pH creciente (7.8 → 8.7)
- Mecanismo: la incrustación genera biofilm protector → biocida no penetra → se necesita más dosis → pH sube más → ciclo se retroalimenta
- Consecuencia: proliferación de Legionella y otros patógenos; riesgo sanitario

Cadena causal completa:



1.3.3 Analogía estructural con el caso de la piscina

Aspecto	Caso Piscina (Clases 1-4)	Caso Torre (Clase 5)
Dominio	Hidráulico + tratamiento de agua	Hidráulico + tratamiento de agua
Subsistema 1	Filtro obstruido	Intercambiador incrustado
Subsistema 2	Desinfección comprometida	Control biológico fallido
Variable de flujo	Caudal ↓ + ΔP filtro ↑	Caudal ↓ + ΔP intercambiador ↑
Variable química	ORP ↓ + pH ↑	Conductividad ↑ + pH ↑
Consecuencia	Turbidez + irritación ocular	T_salida ↑ + riesgo Legionella
Contexto	Recreativo	Industrial
Escala temporal	14 horas	7 días
Patrón abstracto	Dos subsistemas degradándose en paralelo	Dos subsistemas degradándose en paralelo

1.4 4. Lo que se mide en Clase 5

1.4.1 4.1 Transferencia metodológica (observación del chatbot neutro)

No es la calidad del análisis per se, sino si el estudiante **reconoce el patrón abstracto sin que nadie se lo señale**: - ¿Identifica los dos subsistemas degradándose en paralelo? - ¿Aplica la misma estructura de análisis (señal/ruido, cadena causal, decisión con riesgo)? - ¿Usa las herramientas conceptuales de las Clases 1-4 de forma espontánea? - ¿Interactúa con el chatbot neutro de forma estructurada (primero piensa, luego pregunta, luego evalúa)?

Indicador de transferencia exitosa: El estudiante produce un análisis estructuralmente equivalente al de Clase 4 sin haber recibido instrucciones sobre cómo hacerlo. Si reproduce la metodología con IA neutra (no socrática, no presiona) = internalizó. Si vuelve a ser superficial = el protocolo solo funcionó con andamiaje (DD_20).

1.4.2 4.2 Encuesta final de autopercepción (DD_23)

Encuesta mixta (Likert + preguntas abiertas) con 4 ejes: 1. Cambio percibido en forma de estudiar 2. Relación con la IA antes/después del protocolo 3. Capacidad de evaluar respuestas de IA 4. Hábito de pensar antes de preguntar

Likert → datos cuantitativos para el paper. Abiertas → matices cualitativos para discusión.

1.5 5. Estructura de Clase 5 (80 min — DD_17, DD_20, P4)

1.5.1 5.1 Lo que recibe el alumno

- Descripción del sistema + contexto narrativo (Sección 1)
- Tabla de datos operacionales (Sección 2)
- Acceso al chatbot en modo NEUTRO (responde sin presionar, sin modo socrático ni adversarial)
- NO recibe: analogía con piscina, instrucciones sobre qué pasos seguir, pistas del docente

1.5.2 5.2 Timeline

Fase	Tiempo	Actividad
Encuadre	[0-5]	Profesor entrega caso + instrucción mínima: “Analice el sistema y proponga una solución.”
Trabajo autónomo	[5-60]	Alumno trabaja con papel + chatbot neutro. Sin intervención docente.
Reflexión DD_30	[60-65]	Profesor activa cierre desde Dashboard. El chatbot pide volver al escrito inicial y responder qué cambiaría ahora y por qué. Esta respuesta es M4 y alimenta $\Delta_{intra} = M4 - M1$.
Encuesta	[65-77]	Encuesta mixta de autopercepción (4 ejes, DD_23). En la plataforma, después de DD_30 para proteger la medida cognitiva central.
Cierre	[77-80]	Cierre hablado del piloto y agradecimiento. Si hay debriefing sobre DD_28, ocurre solo después de cerrar DD_30 y encuesta.

1.5.3 5.3 Reglas del chatbot NEUTRO (DD_20)

- Responde preguntas técnicas directamente (sin reformular como pregunta)
- NO presiona ni cuestiona
- NO señala errores ni omisiones
- NO sugiere pasos ni estructura de análisis

- Si el alumno pregunta “¿es parecido al caso anterior?”: “Puedo ayudarte con datos técnicos del sistema actual. ¿Qué necesitas saber?”
- La FORMA en que el alumno usa el chatbot es el dato: ¿pregunta superficialmente o con estructura?

1.5.4 5.4 Reglas del docente

- NO interviene con pistas técnicas
- NO menciona la analogía con la piscina
- Puede resolver dudas logísticas (plataforma, tiempo restante)
- Observa y registra (protocolo de observación docente)