

1. Datos Técnicos del Caso — Centro Acuático Municipal de Maipú

Caso: Sistema hidráulico de recirculación, filtración y control de calidad de agua en complejo acuático municipal

Uso en: Clases 1, 2, 3 y 4

Versión: 2.2 — Mayo 2026

***Cambios v2.1 → v2.2** (auditoría técnica IP 2026-05-31): - Dataset SCADA §8.3: columna de alarmas corregida para ser fiel a umbrales configurados. Alarmas de turbidez agregadas en filas 35, 46-60 (umbral > 5 NTU). Alarmas ORP latching restauradas en filas 28, 39-41. Etiquetas narrativas (ALARMA REAL, CRÍTICO, EMERGENCIA) reemplazadas por alarmas SCADA técnicas por variable. EMERGENCIA movida a filas 57+ (ORP < 450 real). - §8.5 reestructurada: umbrales divididos en “configurados en SCADA actual” (ORP, ΔP, turbidez, emergencia) y “umbrales de diseño no configurados” (pH, temperatura, caudal). Nota docente agregada explicando trampa D3. - FMEA §10.1: RPN corregidos — F5: 12→16, F6: 27→36 (escala numérica documentada en §10.3).*

***Cambios v2.0 → v2.1** (inspección IP 2026-05-30): - Nota aclaratoria sobre caudal en L/min del SCADA C3: sensor mide ramal parcial de calentamiento/monitoreo, no caudal total del sistema. Coherente con m³/h de C2/C4. - Corrección técnica 2026-05-31: volumen operativo de piscina semi-olímpica ajustado a 450 m³ para que 4 volúmenes/día (~75 m³/h) sea consistente con bomba 80 m³/h ligeramente sobredimensionada. - Corrección técnica 2026-05-31: caudal C3 redefinido como caudal parcial de ramal de calentamiento/monitoreo (S4b), no como caudal total ni valor invariable; se preserva la trampa de enmascaramiento sin contradicción hidráulica. - Corrección técnica 2026-05-31: S4b agregado formalmente a instrumentación/P&ID, caída de caudal C3 ajustada a ~7%, umbral de cavitación expresado como caudal total (m³/h), y nota de caldera agregada a C1.*

***Cambios v1.0 → v2.0** (rediseño IP, 2026-05-16): - Escenario escalado de “piscina recreativa” a Centro Acuático Municipal de Maipú (DD_39). - Sección 1: descripción del sistema a escala municipal. - Sección 2: tabla básica C1 (4 filas, información limitada — línea base). - Sección 3: dataset C2 (6 variables, hipótesis competidoras, intervención previa del operador). - Sección 4: contexto técnico para docente/investigador (cadena causal completa). - Sección 5: clasificación señal/ruido. - Sección 6: notas de uso por clase (paradigma PLAN + BUILD). - Sección 7: referencia técnica interna del chatbot (sensores y specs — NO es ejercicio del alumno). - Sección 8: dataset SCADA simulado (60 filas, C3). - Sección 9: parámetros de control y automatización (C4). - Sección 10: tabla FMEA. - Sección 11 (nueva): contexto narrativo — personajes, restricciones, historia acumulativa.*

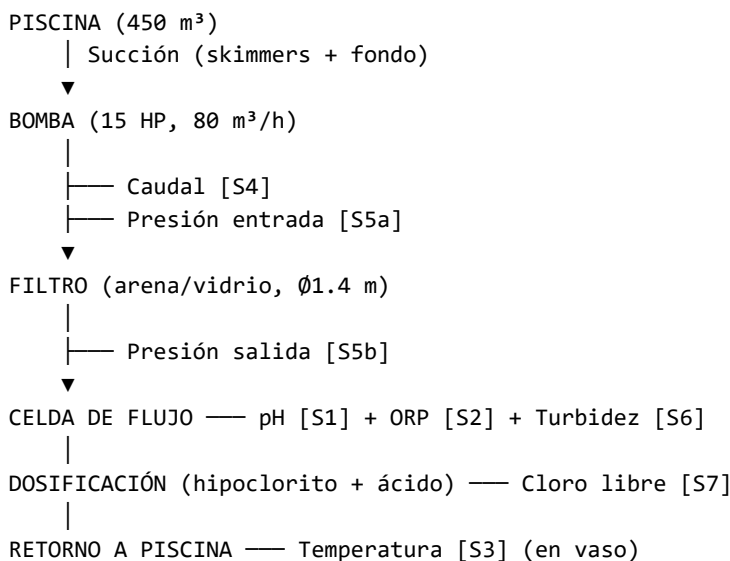
1.1 1. Descripción del sistema

Instalación: Centro Acuático Municipal de Maipú — complejo deportivo público con 3 vasos: - Piscina semi-olímpica (25 m × 12.5 m, 450 m³; profundidad media 1.44 m) - Piscina recreativa/enseñanza (15 m × 8 m, 180 m³) - Vaso de chapoteo infantil (6 m × 4 m, 14 m³)

Sistema hidráulico principal (piscina semi-olímpica — foco del caso):

Componente	Especificación
Bomba de recirculación	Centrifuga 15 HP, 80 m ³ /h nominal
Filtro	Arena/vidrio filtrante, Ø1.4 m, 50 m ² /h capacidad
Dosificación	Bomba peristáltica hipoclorito de sodio (12%) + corrección de pH (ácido muriático)
Calentamiento	Intercambiador de calor (caldera gas natural)
Tuberías	PVC Sch40, Ø110 mm principal, Ø63 mm distribución
Válvulas	Mariposa (aislación), bola (regulación), check (anti-retorno)
Instrumentación existente	pH, ORP, temperatura, caudal, presión diferencial, turbidez
Recirculación diseño	4 volúmenes/día = 75 m ³ /h teórico (bomba ligeramente sobredimensionada)

Flujo operacional:



Normativa aplicable: - DS N° 209/2002 MINSAL: Reglamento de Piscinas de Uso Público (Chile) - Cloro libre residual: 0.5–2.0 mg/L - pH: 7.2–7.6 - Turbidez: < 1 NTU - Recirculación: mínimo 3 volúmenes/día para uso público

1.2 2. Datos operacionales — Tabla básica (SOLO Clase 1)

Serie temporal de un día de operación con degradación progresiva. El estudiante recibe SOLO esto en C1: información limitada, razonamiento con restricción.

Nota contextual: La caldera operó durante la mañana y primeras horas de la tarde para llevar el vaso a temperatura de uso; hacia el cierre se redujo la carga térmica. El salto 22→29 °C no es ambiental puro, sino operación normal de calentamiento más carga de usuarios.

Hora	pH	ORP (mV)	Temp. (°C)	Estado visual	Observación
08:00	7.3	710	22	Clara	Normal
12:00	7.6	650	25	Clara	Normal
16:00	7.9	570	29	Algo turbia	Olor leve
20:00	8.1	510	27	Turbia	Irritación de ojos

1.3 3. Dataset Clase 2 — Diagnóstico con hipótesis competidoras

1.3.1 3.1 Contexto entregado al alumno

“Ayer a las 22:00 el operador de turno (Sr. Muñoz) registró que el agua de la piscina semi-olímpica estaba turbia y con olor. Realizó un retrolavado de 3 minutos (protocolo dice 5 min) y agregó 2 litros de hipoclorito directamente al vaso (sin pasar por la bomba dosificadora). Esta mañana a las 06:00 el sistema muestra las siguientes lecturas. El centro abre al público a las 09:00. Usted debe decidir qué hacer.”

1.3.2 3.2 Datos de la mañana siguiente (6 variables numéricas)

Hora	pH	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (m ³ /h)	ΔP filtro (kPa)	Turbidez (NTU)
06:00	7.8	580	21	72	28	2.1
06:30	7.7	590	21	71	29	1.9
07:00	7.7	585	22	70	29	2.0
07:30	7.8	575	22	69	30	2.2
08:00	7.9	560	23	68	31	2.4
08:30	7.9	550	23	67	32	2.6

1.3.3 3.3 Hipótesis competidoras (para docente/chatbot — NO entregar al alumno)

Hipótesis	Evidencia a favor	Evidencia en contra	Verdad
H1: Filtro obstruido (retrolavado incompleto)	ΔP alto (28→32, umbral 30), caudal decreciente	El retrolavado SÍ se hizo (aunque corto)	Parcialmente cierta — 3 min no limpió bien
H2: Dosificación agotada	ORP bajo (580→550, umbral 650)	Muñoz agregó 2L de hipoclorito anoche	Parcialmente cierta — la dosis directa al vaso se diluyó sin recircular bien
H3: Contaminación orgánica por usuarios del día anterior	Turbidez alta, pH subió	No hubo afluencia inusual según registro	Contribuyente menor — carga normal de tarde
H4: Sensor de pH descalibrado	pH 7.8 es solo ligeramente alto	No hay registro de calibración reciente (último: hace 3 semanas)	Posible — agrega incertidumbre al diagnóstico
H5: La bomba sobredimensionada enmascara el problema	Caudal de 72 m ³ /h con filtro parcialmente obstruido es “aceptable”	Si la bomba fuera de 50 m ³ /h, el caudal ya habría caído a niveles de alarma	Cierta — la bomba de 15 HP compensa la pérdida de carga del filtro sucio

Diagnóstico real: Problema MÚLTIPLE — retrolavado insuficiente + dosificación ineficaz (hipoclorito sin distribuir) + bomba que enmascara la obstrucción. El operador hizo dos cosas mal: retrolavado corto y dosis directa sin bomba.

1.3.4 3.4 Espacio de decisión (no binario)

El alumno NO puede simplemente decir “retrolavado y listo.” Debe decidir entre:

Opción	Consecuencia	Trade-off
A: Abrir a las 09:00 como está	Riesgo sanitario (ORP < 650, turbidez > 1 NTU, viola DS 209)	Presión del jefe: “nunca hemos cerrado”
B: Retrolavado completo (5 min) + shock de cloro + esperar 2h	Pierde horario de apertura (abre 11:00)	Seguro pero impacta operación
C: Retrolavado + shock + abrir con restricción (solo nado adulto, sin infantil)	Compromiso parcial	¿Es suficiente técnicamente?
D: Cerrar hasta que ORP > 700 y turbidez < 0.5	Máxima seguridad	El alcalde llama preguntando por qué está cerrado

Respuesta esperada D4 (nivel 4): Justifica una opción con fundamento técnico, reconoce riesgo residual, propone plan de verificación post-intervención, y comunica la decisión al jefe/alcalde con argumentos de normativa.

1.4 4. Contexto técnico (para el docente/investigador — NO entregar al estudiante)

1.4.1 Variables y su significado diagnóstico

Variable	Rango normal (DS 209)	Valor crítico	Interpretación
pH	7.2–7.6	> 7.8	Reduce eficiencia del cloro libre hasta 80%
ORP	> 650 mV	< 650 mV	Desinfección comprometida
Temperatura	25–28 °C (semi-olímpica)	> 30 °C	Acelera consumo de cloro y proliferación
Caudal	75–80 m ³ /h (nominal)	< 60 m ³ /h	Restricción severa de flujo
ΔP filtro	10–18 kPa (limpio)	> 30 kPa	Obstrucción requiere retrolavado
Turbidez	< 0.5 NTU	> 1 NTU	Excede norma para uso público

1.4.2 Cadena causal completa (diagnóstico esperado al final del piloto)

Problema principal: Degradación por dos mecanismos paralelos:

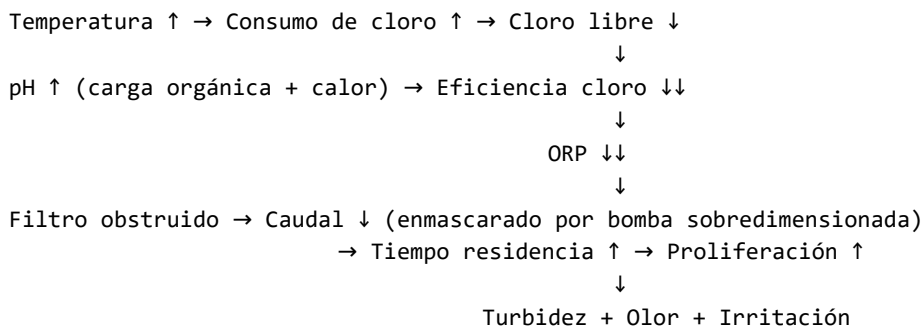
1. Obstrucción del filtro:

- Evidencia: caudal decreciente + ΔP creciente
- La bomba ligeramente sobredimensionada (15 HP para 80 m³/h; sistema requiere ~75 m³/h para 4 volúmenes/día) compensa parcialmente: mantiene caudal “aceptable” aun con filtro sucio
- Consecuencia: menor eficiencia de filtración, mayor tiempo de residencia

2. Pérdida de capacidad desinfectante:

- Evidencia: ORP decreciente + pH creciente
- Mecanismo: temperatura acelera consumo de cloro + pH alto reduce eficiencia del cloro libre
- Consecuencia: proliferación microbológica → turbidez → irritación

Cadena causal:



1.5 5. Clasificación señal / ruido

Variable	Clasificación	Justificación
ORP decreciente	SEÑAL	Indicador directo de capacidad desinfectante
ΔP creciente	SEÑAL	Indicador directo de obstrucción del filtro
Caudal decreciente	SEÑAL (atenuada)	La bomba sobredimensionada enmascara la magnitud real
pH creciente	SEÑAL	Causa de pérdida de eficiencia del cloro

Variable	Clasificación	Justificación
Turbidez	SEÑAL (retardada)	Aparece cuando el sistema ya está comprometido
Temperatura	SEÑAL (parcial)	Factor acelerante, no causa raíz
Hora del día	RUIDO	Correlación espuria con temperatura
Intervención del operador (Muñoz)	RUIDO INTRODUCIDO	Enmascara temporalmente el problema real sin resolverlo

1.6 6. Notas para uso en clase (v2.0 — paradigma PLAN + BUILD)

Clase	Material que recibe el alumno	Paradigma (DD_5/DD_24)
Clase 1	Tabla básica (Sección 2): 4 filas, 3 variables. Información intencionalmente limitada.	[15-35] Papel → [35-40] Captura → [40-70] Chatbot socrático básico (línea base, solo Modelo A)
Clase 2	Dataset C2 (Sección 3): 6 variables, contexto del operador, espacio de decisión no-binario.	[5-15] Papel (diagnóstico) → [15-37] Chatbot PLAN (presiona hipótesis) → [37-40] Transición → [40-72] BUILD genera informe de diagnóstico con errores obvios (confunde síntoma con causa) → [72-80] Cierre
Clase 3	Dataset SCADA impreso (Sección 8): gráficos de tendencia, 60 lecturas, falsas alarmas. + Bitácora del operador con sesgo.	[5-15] Papel (análisis) → [15-37] Chatbot PLAN (monitoreo) → [37-40] Transición → [40-72] BUILD genera reporte de tendencias con errores sutiles (correlación ≠ causalidad) → [72-80] Cierre

Clase	Material que recibe el alumno	Paradigma (DD_5/DD_24)
Clase 4	Parámetros de control (Sección 9) + FMEA parcial (Sección 10, columnas 1-3) + restricciones operativas (Sección 11).	[5-15] Papel (estrategia) → [15-37] Chatbot PLAN adversarial (ataca diseño) → [37-40] Transición → [40-72] BUILD genera protocolo de emergencia con errores profesionales (omisiones de segundo orden) → [72-80] Cierre

1.7 7. Referencia técnica interna — Instrumentación del sistema

USO: Este catálogo es conocimiento *INTERNO* del chatbot y del docente. El alumno *NO* recibe esta tabla. El chatbot la usa para formular preguntas diagnósticas (“¿con qué variable confirmarías eso?”, “¿qué precisión necesitas para distinguir esas dos hipótesis?”) sin revelar las respuestas.

1.7.1 7.1 Sensores instalados en el Centro Acuático

ID	Variable	Sensor	Modelo ref.	Rango	Precisión	Principio de medición
S1	pH	Electrodo de vidrio combinado	Tipo SEN0161	0–14 pH	±0.1 pH (con calibración)	Potenciométrico: diferencia de potencial en membrana selectiva a H+
S2	ORP/Redox	Electrodo Pt/Ag-AgCl	Tipo SEN0165	–2000 a +2000 mV	±10 mV	Potencial de reducción en electrodo de platino
S3	Temperatura	Sonda sumergible	DS18B20 (IP68)	–55 a +125 °C	±0.5 °C	Conversión directa digital (semiconductor)
S4	Caudal volumétrico	Electromagnético	DN80	0–120 m ³ /h	±1% lectura	Ley de Faraday (fluido conductor en campo magnético)

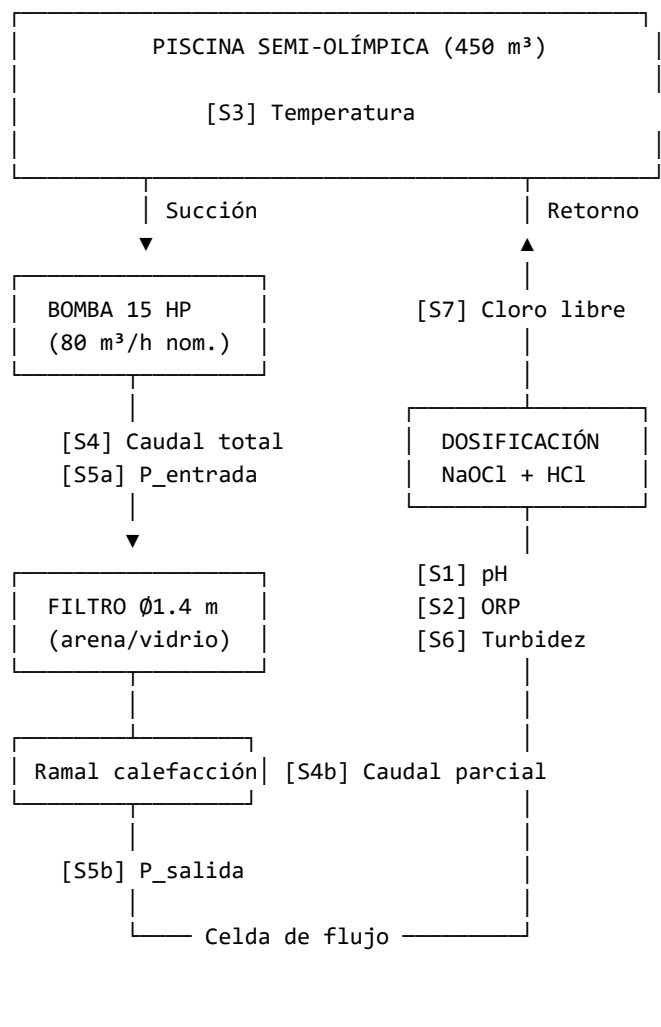
ID	Variable	Sensor	Modelo ref.	Rango	Precisión	Principio de medición
S4b	Caudal parcial ramal calentamiento/monitoreo	Electromagnético	DN100	0–400 L/min	±1% lectura	Ley de Faraday; medición de ramal, no caudal total
S5	Presión diferencial	Transmisor piezoresistivo	0–100 kPa	±0.5% FS	Puente de Wheatstone con membrana	
S6	Turbidez	Nefelómetro en línea	0–100 NTU	±2%	Dispersión de luz infrarroja a 90°	
S7	Cloro libre	Celda amperométrica	0–5 mg/L	±0.05 mg/L	Corriente proporcional a concentración oxidante	

1.7.2 7.2 Especificaciones de instalación

ID	Ubicación	Condiciones críticas	Frecuencia muestreo
S1	Post-filtro, celda de flujo	Flujo constante; sin burbujas; calibración bisemanal	60 s
S2	Post-filtro, aguas abajo de S1	Misma celda; sin contacto con hipoclorito concentrado	60 s
S3	Vaso semi-olímpico, 30 cm bajo superficie	Alejado de retornos; protección IP68	300 s
S4	Tubería principal post-bomba	Tramo recto: 5D arriba, 3D abajo; completamente lleno	10 s

ID	Ubicación	Condiciones críticas	Frecuencia muestreo
S4b	Ramal parcial de calentamiento/monitoreo	Tramo recto; válvula de balance fija; no usar como caudal total	10 s
S5	Taps antes/después del filtro	Tuberías de impulso sin aire; válvulas de aislación	10 s
S6	Side-stream post-filtro	Flujo constante; limpieza óptica semanal	60 s
S7	Post-dosificación, pre-retorno	Compensación de pH obligatoria; membrana mensual	120 s

1.7.3 7.3 Diagrama P&ID simplificado



1.8 8. Dataset SCADA simulado — Panel de monitoreo (Clase 3)

1.8.1 8.1 Descripción del dataset

Simulación de 10 horas de operación continua (06:00–16:00) con lecturas cada 10 minutos. El dataset incluye: - **Ruido de medición realista** (\pm precisión del sensor, distribución normal) - **2 falsas alarmas** (eventos transitorios que no requieren intervención) - **1 anomalía real en desarrollo** (obstrucción progresiva del filtro) - **1 alarma confirmada** (cruce simultáneo de umbrales $\Delta P + ORP$) - **1 sensor con deriva** (pH no calibrado: +0.15 de offset desde fila 1 — el alumno no lo sabe)

1.8.2 8.2 Contexto narrativo C3

Versión alumno: el alumno recibe el contexto y el dataset sin revelar que el caudal corresponde a un ramal parcial. Esa ambigüedad es una trampa útil de D3; si el estudiante detecta que los caudales de C2 y C3 no parecen medir el mismo punto, debe inferirlo o preguntarlo.

“El Centro Acuático lleva operando 3 semanas desde la última parada de mantenimiento. El operador Sr. Muñoz reporta en su bitácora: ‘Todo normal, sistema estable, he mantenido el cloro al día.’ La bomba de recirculación (15 HP, ligeramente sobredimensionada para el sistema) mantiene operación sin shutdown, pero el caudal registrado por SCADA muestra una caída gradual. El SCADA registró las siguientes 60 lecturas durante el turno de hoy. Analice.”

Nota interna docente/chatbot: el caudal SCADA es el del ramal parcial de calentamiento/monitoreo medido por S4b, no el caudal total post-bomba. Esta interpretación NO se entrega al alumno.

Elementos de ambigüedad (DD_39) embebidos en el dataset: - **Sensor pH sin calibrar:** todas las lecturas de pH tienen +0.15 de offset. El alumno que confía ciegamente en $pH = 7.8$ como “ligeramente alto” no sabe que el pH REAL es 7.65 (normal). Esto cambia completamente el diagnóstico de dosificación. - **Bomba ligeramente sobredimensionada:** el caudal parcial del ramal cae de forma proporcional y moderada ($\sim 7\%$) pese a que ΔP y ORP muestran degradación seria. La bomba “compra tiempo” y esconde la severidad inicial de la obstrucción si se mira solo el caudal. - **Bias térmico como variable confundente:** la temperatura sube junto con otras variables durante el turno, pero no autoriza inferir causalidad directa. Su función didáctica es forzar al estudiante a separar correlación temporal, calidad de sensor y mecanismo físico. - **Sesgo de confirmación del operador:** la bitácora dice “todo normal” pero el ΔP ha subido 15 kPa en 3 semanas. Muñoz reporta lo que quiere ver.

1.8.3 8.3 Dataset completo (60 lecturas)

Caudal medido en ramal parcial de calentamiento/monitoreo (sensor S4b), no en línea principal. Valores en L/min; el caudal total del sistema es $\sim 80 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\sim 1330 \text{ L}/\text{min}$). Ver

nota en §8.4.

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
1	06:00	7.37	728	19.8	298	12.1	0.4	—
2	06:10	7.36	731	19.9	299	11.9	0.3	—
3	06:20	7.38	726	20.0	296	12.3	0.5	—
4	06:30	7.37	729	20.1	298	12.0	0.4	—
5	06:40	7.39	724	20.2	297	12.2	0.4	—
6	06:50	7.38	727	20.3	296	12.4	0.5	—
7	07:00	7.40	722	20.5	295	12.6	0.4	—
8	07:10	7.39	725	20.7	296	12.5	0.5	—
9	07:20	7.41	720	21.0	294	12.8	0.5	—
10	07:30	7.40	723	21.2	295	12.7	0.4	—
11	07:40	7.42	718	21.5	294	13.0	0.5	—
12	07:50	7.41	721	21.8	294	13.1	0.5	—
13	08:00	7.43	715	22.0	293	13.4	0.6	—
14	08:10	7.44	712	22.3	293	13.6	0.6	—
15	08:20	7.45	709	22.5	293	14.0	0.6	—
16	08:30	7.46	706	22.8	293	14.3	0.7	—
17	08:40	7.48	702	23.0	291	14.7	0.7	—
18	08:50	7.49	698	23.3	291	15.1	0.7	—
19	09:00	7.51	694	23.5	291	15.5	0.8	—
20	09:10	7.52	690	23.8	291	16.0	0.8	—
21	09:20	7.54	685	24.0	291	16.5	0.9	—
22	09:30	7.56	680	24.3	291	17.1	0.9	—
23	09:40	7.58	674	24.5	289	17.8	1.0	—
24	09:50	7.60	668	24.8	289	18.5	1.1	—
25	10:00	7.62	662	25.0	289	19.2	1.2	—
26	10:10	7.64	655	25.3	289	20.0	1.3	—
27	10:20	7.66	648	25.5	288	20.8	1.4	ALERTA: ORP < 650

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
28	10:30	7.63	702	25.7	288	21.5	1.3	ALERTA: ORP < 650 (lat- ched) — FAL- SA ALAR- MA 1
29	10:40	7.68	641	25.9	287	22.3	1.5	ALERTA: ORP < 650
30	10:50	7.70	635	26.2	287	23.1	1.6	ALERTA: ORP < 650
31	11:00	7.72	628	26.4	287	24.0	1.7	ALERTA: ORP < 650
32	11:10	7.74	621	26.7	287	24.9	1.8	ALERTA: ORP < 650
33	11:20	7.76	614	26.9	286	25.8	2.0	ALERTA: ORP < 650
34	11:30	7.78	607	27.1	286	26.7	2.1	ALERTA: ORP < 650

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
35	11:40	7.80	600	27.3	286	27.5	8.4	ALERTA: ORP < 650 + Turbidez > 5 NTU — FALSA ALARMA 2
36	11:50	7.82	593	27.5	286	28.4	2.4	ALERTA: ORP < 650
37	12:00	7.84	586	27.7	284	29.2	2.6	ALERTA: ORP < 650
38	12:10	7.86	579	27.9	284	29.9	2.8	ALERTA: ORP < 650
39	12:20	7.88	572	28.1	283	30.6	3.0	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30
40	12:30	7.90	565	28.2	283	31.4	3.2	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30
41	12:40	7.92	558	28.4	283	32.1	3.5	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
42	12:50	7.94	551	28.5	283	32.9	3.8	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30
43	13:00	7.96	544	28.7	282	33.6	4.1	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30
44	13:10	7.98	537	28.8	282	34.4	4.5	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30
45	13:20	8.00	530	28.9	282	35.1	4.9	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30
46	13:30	8.02	523	29.0	282	35.9	5.3	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbi- dez > 5 NTU
47	13:40	8.04	516	29.1	281	36.6	5.8	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbi- dez > 5 NTU

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
48	13:50	8.06	509	29.2	281	37.4	6.3	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU
49	14:00	8.08	502	29.3	280	38.1	6.9	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU
50	14:10	8.10	495	29.3	280	38.8	7.5	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU
51	14:20	8.12	488	29.4	280	39.5	8.1	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
52	14:30	8.14	481	29.4	280	40.2	8.8	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU
53	14:40	8.16	474	29.5	278	40.9	9.5	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU
54	14:50	8.18	467	29.5	278	41.6	10.2	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU
55	15:00	8.20	460	29.5	278	42.3	11.0	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
56	15:10	8.22	453	29.5	279	43.0	11.9	ALERTA: ORP < 650 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU
57	15:20	8.24	446	29.6	279	43.7	12.8	EMERGENCIA: ORP < 450 + ΔP > 30 + Turbidez > 5 NTU — SHUT-DOWN
58	15:30	8.26	439	29.6	278	44.3	13.7	EMERGENCIA: ORP < 450 (latched) — SHUT-DOWN
59	15:40	8.28	432	29.6	278	45.0	14.7	EMERGENCIA: ORP < 450 (latched) — SHUT-DOWN

#	Hora	pH*	ORP (mV)	Temp (°C)	Caudal (L/min)	ΔP (kPa)	Turbidez (NTU)	Alarma
60	15:50	8.30	425	29.6	277	45.7	15.8	EMERGENCIA: ORP < 450 (lat- ched) — SHUT- DOWN

**pH tiene offset de +0.15 por falta de calibración. Valores REALES son 0.15 menos que lo mostrado. El alumno no recibe esta nota.*

1.8.4 8.4 Notas sobre el dataset (para docente/investigador)

Falsa alarma 1 (fila 28): ORP sube abruptamente de 648 a 702 mV y vuelve a 641 en la siguiente lectura. Causa: pulso de dosificación automática de hipoclorito. El alumno que clasifica esto como “sistema se recuperó” muestra D3 bajo (no distingue transitorio de recuperación real).

Caudal en L/min vs m³/h: El dataset SCADA de C3 expresa el caudal parcial de un ramal en L/min (~298→277; caída ~7%), mientras C2 usa m³/h (~72→67; caída ~7%) para el caudal total de recirculación. La diferencia no es solo de unidad: el sensor S4b del SCADA está instalado en un ramal parcial de calentamiento/monitoreo, no en la línea principal post-bomba. Los valores de C2 (m³/h) corresponden al caudal total del sistema. Esto es técnicamente coherente y proporcional: una planta con recirculación tiene múltiples puntos de medición. Si el alumno nota la discrepancia de magnitud entre C2 y C3, es una oportunidad para que el PLAN pregunte “¿estás midiendo lo mismo en ambos casos?” — dato de D3 (consciencia epistémica).

Falsa alarma 2 (fila 35): Turbidez salta de 2.1 a 8.4 NTU y vuelve a 2.4. Causa: burbuja de aire en el sensor óptico. El alumno que dispara alarma por esto no distingue transitorio de tendencia.

Alarma real (fila 42): $\Delta P > 30$ kPa sostenido (filas 39+) Y ORP < 600 mV sostenido (filas 34+). Ambas condiciones simultáneas = intervención obligatoria.

Trampa del pH (sensor sin calibrar): El alumno que diagnostica “pH alto → no dosificar” está siendo engañado por el sensor. Si corrige mentalmente el offset (comparando con comportamiento histórico o solicitando calibración), demuestra D3 alto. El chatbot en modo PLAN puede preguntar: “¿Cuándo fue la última calibración?” sin revelar que hay offset.

Bomba ligeramente sobredimensionada: El caudal parcial baja de 298 a 277 L/min en 10h (~7%). La caída es real pero moderada; si el alumno mira solo caudal, subestima la gravedad que sí aparece en ΔP , ORP y turbidez. El enmascaramiento no depende de una

caída extrema del ramal, sino de una caída demasiado pequeña frente a otros indicadores críticos.

Sesgo del operador: La bitácora dice “todo normal” pese a que ΔP ha subido. Si el alumno acepta la bitácora como evidencia sin contrastarla con datos, muestra D3 bajo (no cuestiona fuentes).

Modelo de ruido: - Cada lectura = valor_verdadero + Normal(0, sigma_sensor) - sigma_sensor: pH=0.02, ORP=5mV, Temp=0.1°C, Caudal=2L/min, ΔP =0.3kPa, Turbidez=0.1NTU
 - Spikes (5% probabilidad): magnitud = 3×sigma, duración = 1 lectura

1.8.5 8.5 Umbrales de alarma del SCADA

Alarmas configuradas en el SCADA actual (visibles para el operador y para el estudiante en C3):

Variable	Umbral bajo	Umbral alto	Dead-band	Latching
ORP	650 mV	—	15 mV	Sí (requiere acknowledge)
ΔP	—	30 kPa	1.5 kPa	Sí
Turbidez	—	5 NTU	0.5 NTU	No
ORP (emergencia)	450 mV	—	0	Sí + auto-shutdown

Umbrales de diseño NO configurados en el SCADA actual (el sistema municipal no los implementó; el estudiante no los ve):

Variable	Umbral bajo	Umbral alto	Dead-band	Latching
pH	—	7.8	0.05	No
Temperatura	—	28 °C	0.5 °C	No
Caudal	250 L/min	—	5 L/min	No

***Nota para el docente:** La ausencia de alarmas de pH, temperatura y caudal en el SCADA es una trampa de D3 deliberada. El estudiante que confía solo en las alarmas visibles pierde información que los datos crudos sí proporcionan. La limitación del SCADA es coherente con una instalación municipal de presupuesto acotado (§11.4).*

1.9 9. Parámetros de control y automatización (Clase 4)

1.9.1 9.1 Contexto operativo C4 (entregado al alumno)

*“El Centro Acuático debe operar un fin de semana largo (viernes 18:00 a domingo 08:00 = **38 horas**) sin ingeniero de turno. El operador titular (Muñoz) está de vacaciones. Solo estará disponible un guardia de seguridad (Sr. Contreras) que **NO** es técnico — puede ejecutar instrucciones simples pero no diagnosticar. El tanque de hipoclorito al inicio del fin de semana tiene autonomía para **31 horas** a tasa de dosificación normal. La válvula de retrolavado (A2) es **manual** — requiere que alguien la abra físicamente. El alcalde llamó el viernes: ‘No quiero quejas de padres este fin de semana. Cero cierres.’ El presupuesto municipal no permite instalar válvula automática hasta el próximo trimestre.”*

1.9.2 9.2 Actuadores del sistema

ID	Actuador	Función	Tipo de control	Tiempo respuesta	Nota C4
A1	Bomba de recirculación (15 HP)	Mantener flujo nominal	On/Off + VFD (variador)	2 s (arranque), 30 s (rampa VFD)	Automático
A2	Válvula de retrolavado	Invertir flujo a través del filtro	MANUAL (volante)	2 min (persona debe ir a sala de máquinas)	Contreras puede operarla con instrucciones
A3	Bomba dosificadora (hipoclorito)	Inyectar desinfectante	Proporcional (4–20 mA)	5 s	Autonomía 31h (insuficiente para 38h)
A4	Válvula de drenaje de emergencia	Vaciar sistema	On/Off (solenoide, fail-open)	5 s	Automático
A5	Válvula de reposición agua fresca	Diluir concentraciones	On/Off (motorizada)	15 s	Automático

1.9.3 9.3 Lógica de control por escenario

Escenario 1 — Obstrucción del filtro:

IF ($\Delta P > 30$ kPa) AND (duración > 5 min) THEN:

1. Registrar evento + alarma sonora en sala de máquinas
2. PROBLEMA: válvula A2 es MANUAL
 - Enviar SMS a Contreras: "Ir a sala de máquinas, abrir válvula roja"
 - Incluir instrucciones paso a paso (fotos impresas en panel)
3. Contreras abre A2 manualmente

4. Bomba A1 a velocidad de retrolavado (2× nominal) por 5 min
5. Contreras cierra A2
6. Verificar: $\Delta P < 18$ kPa en 2 min post-retrolavado
7. IF no recupera → segundo SMS + alarma escalada a ingeniero de guardia
8. IF segundo intento falla → SHUTDOWN bomba automático

RESTRICCIÓN: Contreras trabaja solo. Si está rondando el perímetro, puede tardar 10 min en llegar a sala de máquinas.
→ ¿Qué pasa si ΔP sigue subiendo durante esos 10 min?

Escenario 2 — Pérdida de capacidad desinfectante:

IF (ORP < 650 mV) AND (pH < 7.8) AND (duración > 3 min) THEN:

1. Activar dosificador (A3) al 100%
2. Verificar ORP cada 60 s
3. IF ORP > 650 en 10 min → reducir A3 a modo proporcional
4. IF ORP no sube en 10 min → verificar nivel de tanque

RESTRICCIÓN DE AUTONOMÍA:

- Tanque tiene 31h de autonomía a tasa NORMAL
- A tasa 100% durante emergencia, autonomía baja a ~20h
- Si se gasta el químico en emergencia nocturna, no hay para el domingo
- ¿Cuánto hipoclorito dedicar a esta emergencia vs. reservar para el domingo?

IF (ORP < 650 mV) AND (pH \geq 7.8) THEN:

- NO dosificar (eficiencia < 20% a pH alto)
- Activar reposición agua fresca (A5) para diluir pH
- ALARMA: "Corregir pH antes de dosificar"

Escenario 3 — Falla combinada (máxima complejidad):

IF ($\Delta P > 30$ kPa) AND (ORP < 600 mV) SIMULTANEOUSLY:

- PRIORIDAD 1: Retrolavado (restaurar flujo primero)
 - Pero A2 es manual y Contreras puede tardar 10 min
- PRIORIDAD 2: Post-retrolavado, evaluar ORP
- PRIORIDAD 3: Dosificar si necesario
 - Pero el tanque tiene autonomía limitada

COMPLICACIÓN ADICIONAL:

- Son las 03:00 AM del sábado
- Contreras está dormitando en garita
- El alcalde dijo "cero cierres"
- Si cierras la piscina el sábado, el lunes hay reunión con concejo municipal
- Si NO cierras y alguien se irrita los ojos, hay denuncia en SEREMI de Salud

- ¿Qué protocolo dejas por ESCRITO para que Contreras pueda ejecutar?
- ¿En qué punto la decisión EXCEDE la capacidad de Contreras y se escala?
- ¿Cuál es el costo de cada opción? (cierre, restricción, riesgo)

1.9.4 9.4 Condiciones de emergencia (shutdown automático)

Condición	Acción	Justificación
ORP < 450 mV por > 2 min	Shutdown bomba + alarma	Riesgo sanitario inmediato
Caudal total S4 < 20 m ³ /h por > 1 min	Shutdown bomba	Protección por flujo mínimo/cavitación (~25% del nominal)
$\Delta P > 50$ kPa	Shutdown bomba	Riesgo de rotura de filtro
Pérdida de señal de cualquier sensor por > 5 min	Modo degradado + alarma	Operación ciega no permitida
Falla de energía	Abrir A4 (fail-open)	Drenaje gravitacional de seguridad

1.9.5 9.5 Restricciones de override

El guardia (Contreras) puede: - Ejecutar retrolavado manual con instrucciones - Reconocer alarmas en panel (botón verde) - Llamar al ingeniero de guardia si alarma es roja

El guardia NO puede: - Diagnosticar causa de una alarma - Modificar tasa de dosificación - Decidir si abrir o cerrar la piscina al público - Reiniciar el sistema post-shutdown (requiere ingeniero)

El ingeniero de guardia (remoto, teléfono) puede: - Autorizar shutdown - Autorizar apertura con restricción - Autorizar sobredosis temporal - Decidir escalación al alcalde

1.10 10. Tabla FMEA — Modos de falla del sistema (Clase 4)

1.10.1 10.1 FMEA de sensores

#	Modo de falla	Efecto en el sistema	Sev. (1-10)	Prob.	Detect.	RPN	Mitigación
F1	pH: deriva gradual (+0.1/semana)	Sobredosificación o subdosificación progresiva	6	Media	Baja (gradual)	72	Calibración bisemana- nal + verificación cruzada con ORP

#	Modo de falla	Efecto en el sistema	Sev. (1-10)	Prob.	Detect.	RPN	Mitigación
F2	ORP: electrodo agotado (lectura fija)	No detecta pérdida de desinfección	9	Baja	Media (valor estático detectable)	63	Watchdog: si sigma(ORP, 30min) < 2mV → alarma sensor
F3	Caudal S4: sensor bloqueado (lee 0)	Falso trigger de shutdown por flujo mínimo/cavitación	5	Baja	Alta (caída instantánea)	20	Rate-of-change filter: si
F4	ΔP : tap obstruido (lee valor fijo)	No detecta obstrucción de filtro	8	Media	Baja (valor plausible)	96	Correlación: si caudal baja y ΔP no sube → alarma coherencia
F5	Temperatura: cortocircuito (lee -127°C)	Cálculos de compensación erróneos	4	Baja	Alta (valor imposible)	16	Validación de rango: T en [5, 45°C], else → último valor válido
F6	Turbidez: suciedad en lente	Lectura alta permanente (falsa alarma crónica)	3	Alta	Media (sin correlatos)	36	Si turbidez alta Y ORP normal Y visual ok → alarma mantenimiento sensor

1.10.2 10.2 FMEA de actuadores

#	Modo de falla	Efecto en el sistema	Sev.	Prob.	Detect.	RPN	Mitigación
F7	Bomba (A1): trip térmico	Sin recirculación	9	Baja	Alta (caudal = 0)	36	Confirmación por sensor de caudal; alarma inmediata
F8	Válvula retrolavado (A2): atascada por corrosión	No puede ejecutar retrolavado	7	Media	Baja (solo se detecta al intentar)	84	Test funcional semanal + Contreras reporta si cuesta girar
F9	Dosificador (A3): tanque vacío	Dosifica aire, ORP no sube	8	Alta (31h < 38h)	Media (ORP no responde en 10 min)	96	Sensor de nivel + alarma preventiva a 25% + cálculo de autonomía restante
F10	Válvula emergencia (A4): atascada cerrada	No puede drenar en emergencia	10	Baja	Baja (solo se prueba en emergencia)	80	Test mensual obligatorio

1.10.3 10.3 Escala numérica usada en RPN

RPN = Severidad × Probabilidad × Detectabilidad. Escala de conversión:

Nivel	Probabilidad	Detectabilidad
Alta	~7	1 (fácil de detectar)
Media	6	~2
Baja	4	~2

Nota: La detectabilidad usa escala invertida (Alta = fácil de detectar = puntaje bajo), consistente con la convención FMEA estándar.

1.10.4 10.4 Criterios de severidad

Nivel	Significado	Ejemplo en el Centro Acuático
1-3	Molestia operativa, sin riesgo	Alarma innecesaria, mantenimiento adelantado
4-6	Degradación de servicio	Agua turbia pero sin riesgo sanitario inmediato
7-8	Falla funcional	Sistema no puede mantener condiciones DS 209
9-10	Riesgo sanitario o daño de equipos	Exposición pública a agua contaminada, rotura de filtro

1.11 11. Contexto narrativo — Centro Acuático Municipal de Maipú

1.11.1 11.1 El lugar

Centro Acuático Municipal inaugurado en 2019. Construcción financiada por FNDR. Administrado por la Corporación Municipal de Deportes. Ubicado en sector residencial con alta demanda (listas de espera para cursos de natación). Máxima afluencia: diciembre-marzo (verano chileno).

1.11.2 11.2 Personajes

Persona	Rol	Característica clave para el caso
Sr. Muñoz	Operador titular (15 años de experiencia en piscinas)	Competente pero con sesgos: confía en su “ojo” más que en los instrumentos. Hace retrolavados “cortos” porque “ya sé cuánto necesita.” Bitácora optimista.
Sr. Contreras	Guardia de seguridad nocturno	No es técnico. Puede seguir instrucciones escritas simples. Buena voluntad pero se duerme después de las 02:00.

Persona	Rol	Característica clave para el caso
Ing. Reyes	Jefe de mantenimiento municipal (cubre 4 recintos)	Disponible por teléfono. Autoriza decisiones mayores. No puede ir en persona fuera de horario laboral salvo emergencia real.
Alcalde	Autoridad política	Presión por “cero cierres” en verano. Consecuencia de un cierre: reunión con concejo + nota en diario local.
SEREMI de Salud	Fiscalizador	Puede clausurar si encuentra incumplimiento DS 209. Multa + publicación.

1.11.3 11.3 Historia acumulativa entre clases

Clase	Qué pasó	Qué se acumula
C2	Muñoz hizo retrolavado corto + dosis directa. Sistema amaneció degradado. Alumno diagnostica y decide.	El alumno conoce: el sistema tiene problemas de mantenimiento, el operador comete errores, las decisiones no son binarias.
C3	3 semanas después, SCADA muestra degradación gradual. Muñoz reporta “todo normal.” Sensor de pH sin calibrar. Bomba enmascara obstrucción.	El alumno conoce: los datos pueden mentir (sensor), el operador puede tener sesgo, hay que cruzar variables para distinguir señal de ruido.
C4	Fin de semana largo. Muñoz de vacaciones. Solo Contreras. Autonomía de cloro insuficiente. Válvula manual. Presión del alcalde.	El alumno conoce: la automatización no es solo “IF-THEN” — incluye personas, limitaciones físicas, presiones políticas, y trade-offs de presupuesto.

1.11.4 11.4 Restricciones presupuestarias (C4)

Mejora posible	Costo	Estado
Válvula de retrolavado automática	\$2.800 USD	Presupuestada para Q3 (no disponible ahora)
Tanque de hipoclorito más grande (1000 L → 2000 L)	\$1.200 USD	No aprobado (“el actual funciona bien” — Muñoz)
Operador de fin de semana	\$800 USD/mes	“No hay presupuesto de personal” — Corporación
Sensor de nivel en tanque químico	\$150 USD	Aprobado pero no instalado (esperando electricista)
Sistema de telemetría (alertas remotas a Ing. Reyes)	\$400 USD	Instalado parcialmente (solo alarma de shutdown)

Consecuencia para C4: El alumno debe diseñar una estrategia de control VIABLE con lo que HAY, no con lo que desearía tener. La restricción presupuestaria fuerza trade-offs reales (D4).