

Método Aguas SB T1

Recirculación, tratamiento combinado y contraste experimental

Edición 2.1 · Motor 2.3 · 8 de octubre de 2026. Preparada para revisión editorial y publicación autorizada.

Aguas SB

Electrocoagulación · Electrooxidación · Cavitación · Aireación Venturi

Ejemplos públicos sintéticos. Datos comerciales privados excluidos.

Contenido

01. Método T1 y pregunta de ingeniería	3
02. Hidráulica y significado de las vueltas	6
03. Ecuaciones del motor y techos operativos	9
04. Electrocoagulación: de la carga eléctrica a la separación	13
05. Electrooxidación: electrones, transformación y selectividad	16
06. Cavitación hidrodinámica: presión, cavidades y exposición	19
07. Aireación Venturi: del caudal de gas al oxígeno transferido	22
08. Interacciones: secuencia, balances y causalidad	25
09. Escalado: conservar condiciones, explicar diferencias	29
10. Energía, materiales y comparación económica	32
11. Medición, datos y destino de la materia	35
12. Calibración, identificabilidad e incertidumbre	38
13. Protocolo reproducible para investigadores e ingenieros	41
14. De una analítica a una comparación válida	45
15. Ejemplos calculados y reproducción	48
16. Decisiones de diseño y preguntas difíciles	51
17. Contribución y evolución del método	54
18. Glosario y equivalencias de unidades	56
19. Bibliografía y alcance de consulta	58

01. Método T1 y pregunta de ingeniería

El método Aguas SB T1 organiza el dimensionamiento preliminar de un tratamiento combinado alrededor de tres preguntas: cuánto tratamiento recibe el agua, qué parte de su carga responde bajo las condiciones elegidas y dónde termina la materia retirada. Relaciona recirculación, composición, módulos, horario y consumo mediante un modelo ejecutable. Su aportación es hacer esas relaciones examinables, no sustituir la química por un porcentaje universal.

Esta edición 2.0 describe el núcleo T1 2.3, capturado el 7 de octubre de 2026. Aguas SB desarrolla y comercializa los equipos. Por tanto, el método tiene interés aplicado y comercial; su publicación permite revisión, no constituye una evaluación independiente de su fabricante. Los ejemplos numéricos públicos son sintéticos salvo que se atribuyan expresamente a una publicación científica.

El problema que se quiere resolver

Una industria puede conocer sus metros cúbicos diarios y una analítica, pero no saber cuántas horas debe operar una unidad ni qué resultado esperar. Un investigador puede conocer la eliminación obtenida en un reactor pequeño, pero no disponer de información suficiente para trasladarla a una instalación. Ambas preguntas se encuentran en la misma dificultad: un porcentaje sin exposición, matriz y frontera de medida no especifica un tratamiento.

Decir que un equipo elimina un 60 % no identifica si se refiere a DQO, color, sólidos o un compuesto concreto. Tampoco dice si el valor se midió después de decantar, si hubo dilución, cuánto duró el ensayo o qué dosis eléctrica se aportó. Dos porcentajes iguales pueden describir procesos muy distintos. Dos porcentajes distintos pueden ser compatibles con el mismo mecanismo bajo cargas o exposiciones diferentes.

El método propone transformar una descripción comercial en una pregunta calculable: con esta agua, este objetivo, esta topología y este presupuesto de exposición, ¿qué salida estima el modelo y qué comprobación permitiría aceptarla o corregirla? La respuesta contiene una concentración, un balance operativo y un ámbito de aplicación. No termina en el número de módulos.

Tres pilares conectados

Exposición. La recirculación contabiliza volumen pasado por las unidades respecto al volumen de referencia. Debe acompañarse de corriente y tiempo, energía, presión, aireación y separación. La misma cantidad de vueltas no implica la misma dosis si cambia el equipo o su punto de funcionamiento.

Capacidad tratable. Una curva de eliminación puede aproximarse a una meseta. En T1 se representa mediante techos operativos y factores de matriz. Esa meseta puede reflejar dosis finita, una fracción persistente, transporte lento, composición cambiante o una separación incompleta. El valor propuesto permite calcular; su interpretación física requiere distinguir esas posibilidades.

Destino de la materia. Reducir un contaminante en la fase acuosa es una función útil aunque parte pase al lodo. Pero transferencia, transformación y mineralización no son sinónimos. Un balance de planta debe conservar la gestión de los sólidos y otras corrientes, incluso cuando el agua de salida mejora mucho.

Un ejemplo sintético muestra la conexión. En 10 m³, una DQO de 1000 mg O₂/L representa 10 kg de demanda equivalente. Si el agua separada sale a 400 mg O₂/L y se conserva ese volumen, quedan 4 kg en esa corriente. Los 6 kg de diferencia no se pueden declarar mineralizados sin estudiar sólidos, otras

corrientes y transformación. Si, además, se desconoce la duración o la carga eléctrica, ese resultado no permite dimensionar otra unidad solo por litros de depósito.

Relación con la literatura

La literatura ya utiliza modelos de rendimiento por pasada para cavitación hidrodinámica y estudia su dependencia de la escala. Esto proporciona antecedentes relevantes para nuestra coordenada de exposición, sin identificar automáticamente los coeficientes T1. [Modelo por pasada, escalado de dispositivos vortex](#).

El informe institucional sobre tratamientos industriales aporta una perspectiva de selección de operaciones. La tesis de Hernández Lehmann estudia electrocoagulación. Un trabajo sobre efluentes de almazara combina separación con Fenton. Cada referencia aborda una parte diferente del problema; reunir las no equivale a sumar sus eficacias ni a atribuir a sus autores aprobación del tren T1. [Informe madri+d, tesis UPM, integración de tratamientos](#).

El hueco que aborda esta edición es práctico: una formulación integrada y reproducible para la configuración comercial estudiada, conectada con preguntas de escala y con condiciones de ensayo comparables. No requiere afirmar que nadie haya combinado procesos antes, ni demostrar una inexistencia mundial de modelos próximos.

Qué significa una inferencia de ingeniería

La experiencia de instalación permite proponer relaciones antes de contar con una campaña completa de identificación. Por ejemplo: retirar sólidos entre etapas podría cambiar la respuesta de una segunda etapa; una matriz más concentrada podría consumir más capacidad de tratamiento; una variación hidráulica podría modificar el rendimiento por exposición. Son propuestas útiles si indican qué se mantiene constante y qué resultado las contradice.

Una inferencia se vuelve más sólida cuando combina balance, experiencia y contraste externo, pero no cambia de categoría por repetirse en varias páginas. Una regla que se adopta para dimensionar debe seguir identificada como regla del modelo. Un coeficiente medido debe conservar las condiciones bajo las cuales fue estimado. Esta separación permite mejorar el método sin reconstruir retrospectivamente una supuesta validación.

La pregunta no es elegir entre experiencia o ciencia. Es convertir la experiencia en hipótesis observables y utilizar la literatura para diseñar una comparación más precisa. Una discrepancia bien localizada aporta conocimiento: puede revelar una separación omitida, una diferencia de unidades o un límite de transferencia que el modelo reducido no representa.

Cómo utilizar el corpus

Para dimensionar, empiece por hidráulica, ecuaciones y ejemplos calculados. Para comparar un artículo, identifique primero matriz, régimen y frontera energética; después consulte el capítulo del mecanismo correspondiente. Para proponer una campaña, use medición, incertidumbre y protocolo. Para incorporar resultados al software, conserve la versión anterior y las condiciones que justifican el cambio.

El resultado mínimo reproducible contiene entrada, unidades, topología, horario, caudales, opciones, versión del motor y salida. La palabra «cumple» solo tiene sentido respecto a objetivos definidos; una comparación numérica no sustituye una autorización, un proyecto ni un ensayo de seguridad del agua.

Una universidad puede ensayar la hipótesis de exposición con su propio dispositivo. Si la relación no se conserva, ese resultado delimita su transferibilidad; no hace inútil el conjunto del corpus. Del mismo modo, una buena coincidencia en un efluente no demuestra universalidad. La finalidad es ofrecer un lenguaje común que permita aprender de ambas situaciones.

El criterio editorial es concreto: cada capítulo resuelve una pregunta diferente; cada ejemplo declara su origen; cada recomendación identifica las variables que la condicionan. La extensión sirve a esa tarea. La calidad del método se juzga por la posibilidad de repetir, discutir y mejorar sus cálculos, no por el número de páginas o de citas.

02. Hidráulica y significado de las vueltas

Una vuelta de recirculación es una razón de volúmenes, no una garantía de que cada porción de agua haya recibido una pasada idéntica. Para utilizarla como variable de diseño hay que declarar el volumen de referencia, el caudal real, el periodo y el régimen hidráulico. La distinción cambia tanto la predicción de concentración como el cálculo de capacidad.

Cuatro magnitudes que no deben confundirse

Denominamos V_b al volumen útil de líquido en el depósito, Q_r al caudal que atraviesa el circuito de tratamiento, Q_f al caudal neto alimentado y V_d al volumen tratado durante un día. Si el caudal de alimentación varía, V_d es su integral, no una lectura puntual multiplicada automáticamente por 24.

Para un lote cerrado de volumen constante, la exposición hidráulica media es $c = Q_r \cdot t / V_b$. Con caudal variable se usa $c = \int (Q_r(t) / V_b) dt$. Si se extraen muestras importantes, hay purgas o evaporación apreciable, debe actualizarse el volumen y cerrarse el balance. Mantener en el cálculo un volumen que ya no existe distorsiona la exposición y la carga.

El índice diario del configurador es $c_d = \sum (q_i \cdot h_i) / V_d$. Su denominador es producción diaria, no capacidad del tanque. Es adecuado como descriptor operativo de volúmenes tratados por las unidades respecto a producción; por sí solo no determina la distribución de residencia ni la exposición mínima de cada fracción.

Ejemplo sintético: un lote de 5 m³ recirculado a 15 m³/h alcanza $c=4$ después de $4 \cdot 5 / 15 = 1,3333$ h, es decir, 80 minutos. Otra instalación mueve 15 m³/h durante 20 horas y trata 75 m³/día: también obtiene $c_d=4$. La coincidencia numérica no convierte el segundo sistema en el primer ensayo.

Pasadas discretas y mezcla continua

Si toda una porción atraviesa una unidad, se recoge aparte y solo después vuelve a atravesarla, puede aproximarse una sucesión discreta de pasadas. Para una fracción eliminada constante ϕ , el residual después de n pasadas es $(1-\phi)^n$. La hipótesis excluye bypass y presupone que las condiciones de cada pasada son comparables.

Un tanque perfectamente mezclado con extracción y retorno continuos funciona de otra manera. En cada instante se extrae agua representativa de la concentración del tanque, que cambia gradualmente. Si el reactor lateral elimina la fracción ϕ del contaminante susceptible, el balance es:

$$V_b \cdot dC/dt = -Q_r \cdot \phi \cdot C$$

$$C/C_0 = \exp(-\phi \cdot c)$$

La diferencia no es una corrección cosmética. Con $\phi=0,5$ y $c=4$, la secuencia discreta deja 6,25 % de la fracción inicial; el tanque mezclado deja 13,53 %. Una curva numéricamente más optimista no demuestra que el equipo sea mejor: puede corresponder a otro régimen.

Bajo una idealización de visitas aleatorias independientes a un reactor lateral de volumen despreciable, el número de visitas puede representarse mediante Poisson de media c . Entonces, la fracción que no ha visitado el reactor es $\exp(-c)$: a cuatro vueltas medias, 1,83 %. Esta construcción es una explicación matemática de la mezcla, no una medición de distribución de residencia en T1. Un tanque con cortocircuito o zonas muertas puede apartarse mucho de ella.

La curva del motor no fija por sí sola el régimen

La identidad $0,5^c = \exp(-\ln(2) \cdot c)$ permite leer la curva T1 como una respuesta exponencial efectiva. No demuestra ni excluye un tanque mezclado. Para una fracción tratable fija $\theta = 0,64$, a cuatro vueltas la curva actual da 60 % de reducción total. Un balance mezclado que suponga por separado $\phi = 0,5$ daría 55,34 %; si su coeficiente efectivo fuera $\ln(2)$, daría también 60 %. Las diferencias proceden de los supuestos, no de nuevas mediciones.

Por eso no se reemplaza automáticamente la curva actual por la de menor rendimiento. Primero debe identificarse qué representa el coeficiente y contrastarlo con caudal, mezcla y serie de exposición. Hasta entonces, el cálculo T1 es un escenario de ingeniería con exposición efectiva, no una identificación experimental de la hidráulica real.

Alimentación continua

En un tanque mezclado estacionario con alimentación Q_f , salida igual a Q_f y circuito lateral Q_r , sin otras reacciones, el balance lleva a:

$$\begin{aligned} Q_f(C_{in} - C) &= Q_r \phi C \\ \beta &= Q_r / Q_f \\ C / C_{in} &= 1 / (1 + \beta \phi) \end{aligned}$$

Si $\beta = 4$ y $\phi = 0,5$, la reducción es 66,67 %. Aquí hay entrada permanente de carga y salida permanente de agua. No debe compararse sin explicación con un lote que sigue tratándose hasta el final de un tiempo elegido. El tiempo hidráulico neto $\tau = V_b / Q_f$ y la razón β complementan la descripción.

Estos balances ideales ayudan a interpretar la literatura por pasadas; no sustituyen la hidráulica medida. Una perspectiva específica de reactores de cavitación discute regímenes y parámetros efectivos.

[Modelización de reactores de cavitación.](#)

Módulos en paralelo o en serie

En dos ramas paralelas independientes de 15 m³/h puede haber 30 m³/h de recirculación total, siempre que la instalación realmente mantenga esos caudales. La curva de la bomba, pérdidas de carga y reparto entre ramas determinan el valor real; duplicar unidades no garantiza duplicar caudal.

En dos módulos hidráulicamente en serie, el mismo caudal de 15 m³/h atraviesa ambos. Se producen dos exposiciones a unidades por circuito, pero el depósito no recibe 30 m³/h de retorno. Es válido contabilizar exposición acumulada a módulos si se declara así; no es válido utilizar esa suma para dimensionar tuberías o afirmar vueltas hidráulicas del tanque.

Una tercera disposición son depósitos sucesivos con separación entre ellos. En ese caso cada etapa tiene volumen, tiempo y composición propios. Un agrupamiento matemático de módulos no demuestra que esa disposición física exista. Antes de aplicar una cascada numérica conviene dibujar alimentación, retorno, purgas, separadores y puntos de muestreo.

Cómo comprobar la hidráulica con poco trabajo

Una comprobación inicial combina lectura de caudal, volumen útil y registro horario. Debe medirse en condiciones operativas: filtros cargados, válvulas en posición habitual, altura de líquido representativa y gas si altera la lectura. El dato de catálogo sirve para comenzar, no para sustituir el caudal real.

Si el rendimiento depende de la distribución de tiempos, un ensayo de trazador compatible con el proceso permite detectar llegada temprana, colas y volumen mal aprovechado. La selección del trazador y del detector corresponde a condiciones de seguridad y matriz. No se propone introducir un reactivo concreto sin evaluar su compatibilidad.

En un ensayo estacionario, medir varios puntos durante el arranque y estabilización ayuda a no confundir una muestra transitoria con el rendimiento sostenido. Si las concentraciones de entrada cambian, las muestras entrada/salida deben relacionarse mediante el retraso y mezcla del sistema, no solo por compartir fecha.

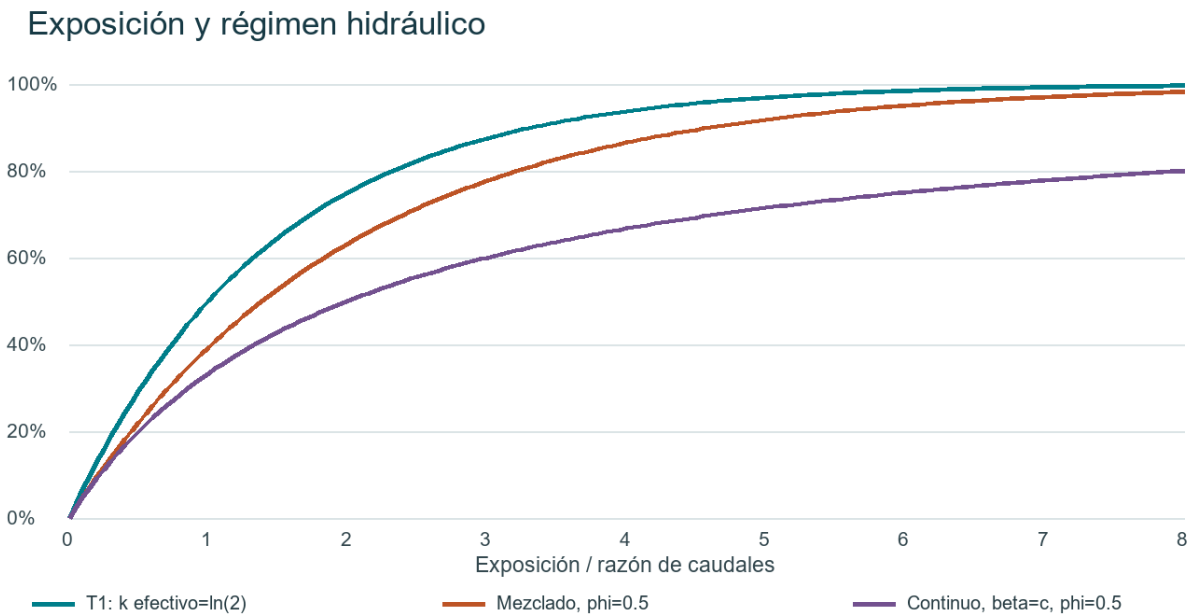
Ejemplo: una muestra de entrada tomada a las 10:00 y una de salida a las 10:00 pueden corresponder a cargas distintas si el sistema retiene agua varias horas. El cálculo aritmético del porcentaje sería sencillo pero físicamente mal emparejado. Una muestra compuesta y un registro de caudal pueden ser más útiles que muchos decimales en la ecuación.

Qué aporta una vuelta adicional

La exposición extra no identifica qué operación limita el proceso. Si la corriente permanece fija y aumenta Q_r , aumenta el número de circuitos por hora pero no la carga eléctrica por hora. Si aumenta la presión a igual caudal, cambia la energía hidráulica sin cambiar c . Si se retira lodo entre circuitos, cambia la matriz aun cuando la suma de volúmenes recirculados sea igual.

Por eso se propone acompañar c de energía específica, carga eléctrica por volumen, presiones, gas y separación. El indicador no pierde utilidad: adquiere un significado verificable. Permite comparar configuraciones manteniendo visibles las otras variables en lugar de absorberlas silenciosamente dentro de la palabra «vuelta».

La decisión práctica es sencilla. Use vueltas para planificar exposición y tiempo; use balances para distinguir regímenes; use medición para confirmar la hidráulica. Cuando dos instalaciones tienen el mismo c y resultados diferentes, investigue primero las condiciones que ese número no representa antes de cambiar arbitrariamente la ecuación.



03. Ecuaciones del motor y techos operativos

El núcleo T1 2.3 combina una curva de exposición, una capacidad operativa dependiente de la entrada, factores de configuración y una agrupación de módulos en etapas. Este capítulo describe esa versión, no una ecuación nueva ajustada a posteriori. El código congelado que acompaña la edición permite reproducir los ejemplos y comprobar cada rama.

Procedencia y estado de los parámetros

La trazabilidad distingue dos preguntas: dónde está implementado un valor y qué evidencia identifica su magnitud. La primera está resuelta por los activos congelados; la segunda no se resuelve mostrando ese código. En el material examinado para esta edición no se ha localizado un ajuste reproducible que vincule cada coeficiente decisivo con una serie experimental identificada. Esto no niega la experiencia operativa ni las mediciones de aplicación; delimita qué puede comprobar independientemente el lector.

Grupo	Base disponible en esta edición	Contraste que falta para identificarlo
Curva 1-0,5 ^{^c}	Regla del motor e identidad exponencial; no ajuste experimental recuperable	Serie de exposición con régimen, dosis y residual registrados
Techos, transiciones de carga y sensibilidades	Parametrización de ingeniería reproducible en el código	Lotes comparables y contraste reservado dentro de cada dominio
Factores químicos y de módulos	Reglas de configuración; no especifican dosis ni prueban independencia de efectos	Contrastes equiparados y registro de reactivo activo y disposición física
Bono desde c=12	Condición discreta del programa	Medidas alrededor del umbral; no consta transición física demostrada
Envolvente global/serie	Selección del mejor resultado numérico	Comparación con la serie física real y su separación intermedia
Suelos de concentración	Límites numéricos de salida	Dominio de uso y comportamiento a baja entrada; no son límites del laboratorio
Caudales y potencias de equipos	Valores nominales y declarados por el fabricante	Caudal y energía medidos en el punto de operación
Balances de volumen, masa y energía	Identities físicas bajo sus fronteras y supuestos	Datos medidos para comprobar cierre; la identidad no calibra la eficacia

El banco carga t1_parametros.js antes de t1_motor_v2.js. Los parámetros efectivos prevalecen sobre los valores de respaldo; una configuración externa T1_CONFIG, cuando exista, puede volver a sobrescribirlos. Este banco no añade esa configuración externa. Reproducir una ejecución de la web exige conservar también sus posibles sobrescrituras, no solamente el número de versión.

Las ramas con bonificaciones o etapas se presentan como escenarios del modelo, no como mejoras medidas automáticamente. El dominio predictivo validado no se declara universal ni se deduce de que una combinación ejecute sin errores. Cada resultado debe conservar sus opciones y distinguir cálculo, estimación y observación.

Aproximación a la capacidad tratable

La función de exposición es $A(c)=1-0,5^c$. Sus valores a una, dos y cuatro vueltas son 0,5; 0,75 y 0,9375. No son automáticamente porcentajes de eliminación de toda la DQO: actúan sobre un techo efectivo que depende del parámetro y las condiciones.

Si ese techo se mantiene fijo en θ , la reducción es $r(c)=\theta*(1-0,5^c)$ y la concentración, antes de aplicar el suelo del software, $C_{out}=C_{in}*(1-r)$. El residual asintótico de esa formulación es $C_{in}*(1-\theta)$. Llamarlo operativo significa que describe las condiciones de la etapa; no demuestra que esa masa sea químicamente imposible de tratar con otro proceso.

La forma exponencial equivalente es $A(c)=1-\exp(-\ln(2)^*c)$. En un balance ideal de tanque mezclado, el coeficiente efectivo sería $\ln(2)=0,693147$, no una fracción física de 0,5 por visita al reactor. Si se quiere estimar ese coeficiente desde una serie experimental, debe ajustarse bajo la hidráulica y el residual declarados, no importarse de una identidad algebraica.

Techos base y carga

Para DBO5, DQO, SST y P, el código interpola un techo base $B(C)$ entre dos concentraciones. Por debajo de C_OK conserva el primer techo; por encima de C_MAL conserva el segundo. En el intervalo:

$$u = (C - C_OK) / (C_MAL - C_OK)$$

$$B(C) = B_OK + u * (B_MAL - B_OK)$$

Parámetro	B_OK a B_MAL	C_OK a C_MAL, mg/L	TMAX / suelo
DBO5	0,72 a 0,55	1200 a 7000	0,90 / 3
DQO	0,64 a 0,55	2000 a 12000	0,80 / 15
SST	0,67 a 0,58	800 a 5000	0,84 / 5
P	0,88 a 0,78	20 a 90	0,94 / 0,2

DBO5 y DQO se expresan como O2; P como P. TMAX es una fracción, mientras que el suelo tiene la unidad de concentración del parámetro. Son valores adoptados por el motor, no constantes universales extraídas de las referencias. El fichero de parámetros efectivo prevalece sobre valores de respaldo presentes en el JavaScript.

Por ejemplo, para DQO de 7000 mg/L, la posición entre 2000 y 12000 es 0,5 y el techo base es 0,595. Este cálculo no basta para obtener la salida: todavía intervienen dificultad, configuración, exposición y eventualmente etapas.

Dificultad de matriz

El factor combinado es $f=f_ratio*f_N*f_pH$. El código utiliza estas reglas:

```
f_ratio = clamp(1 - 0,2*(DQO/max(1,DBO)-2,4), 0,4, 1)
f_N = clamp(1 - 0,4*max(0,N-50)/150, 0,6, 1)
f_pH = 1 entre pH 6,5 y 8,5
f_pH = clamp(1 - 0,5*d/3, 0,55, 1) fuera del intervalo
```

d es la distancia al extremo más próximo del intervalo. Cada parámetro responde mediante $1-S*(1-f)$, con sensibilidades DBO y DQO 0,25; SST 0,12; P 0,10; N 0,35. Es una representación reducida: la

relación DQO/DBO no identifica sustancias y la misma relación puede corresponder a toxicidad, biodegradabilidad o mezclas diferentes.

Ejemplo sintético: una relación DQO/DBO de 4 produce $f_ratio=0,68$. Si N y pH no penalizan, el factor final de DQO es $1-0,25*(1-0,68)=0,92$. No significa que la literatura haya medido una pérdida universal del 8 % para esa relación; describe exactamente la corrección del modelo.

Nitrógeno y opciones químicas

El motor distingue una fracción amoniacal a , expresada como N amoniacal respecto a N total. Su techo base es $0,63*(1-a)+0,72*a$; con la opción oxidante, el segundo coeficiente pasa a 0,85. El máximo N es 0,79, o 0,90 con oxidante. La reducción de N no se aplica en cascada como la de DQO.

Esta regla predice concentración acuosa bajo una parametrización; no identifica si el nitrógeno acaba en sólidos, gas u otra especie. Para interpretar una analítica es indispensable distinguir mg N/L de mg NH_4^+/L . La interfaz de cálculo utiliza el factor 1,2878 para convertir masa de ion amonio a masa de N. Una fracción amoniacal no debe introducirse donde se espera una concentración.

Con química activada, los factores de DBO, DQO, N, P y SST son 1,05; 1,06; 1,03; 1,12 y 1,15. Para N, si también se activa oxidante, 1,10 sustituye a 1,03; no se multiplican entre sí. Sin química, este factor de N es 1 aunque la opción oxidante modifique sus techos específicos. Estos bonos no especifican un reactivo ni una dosis activa y no deben convertirse en instrucciones de dosificación.

Módulos, vueltas y ecuación global

El factor de módulos es 1 por debajo de tres módulos; después crece como $\min(1,6; 1+0,1*(n-2))$. El factor de vueltas permanece en 1 hasta $c=12$, donde pasa a 1,1. Para los parámetros distintos de N, el máximo efectivo escala como $TMAX*\min(1, B/B_OK)$.

La expresión compacta de una etapa es:

```
r = min(B*F_quimica*F_modulos*F_ciclos, cap)
* (1-0,5^c) * (1-S*(1-f))
Cout = max(suelo, Cin*(1-r))
```

La rama N conserva su denominador y reglas específicas en el código; no debe reconstruirse desde la tabla de DQO. Las opciones y la versión forman parte de cualquier resultado reproducible.

Etapas numéricas y persistencia

El motor forma grupos de módulos según una condición mínima de exposición y una regla de bono. Recalcula DBO, DQO, SST y P sobre la salida del grupo anterior, vuelve a evaluar parte de la dificultad y conserva el mejor resultado entre la formulación global y la seriada. N no recibe esa reducción sucesiva.

Para dos etapas de reducción $r1$ y $r2$ sobre el remanente, la identidad es $r_total=1-(1-r1)*(1-r2)$. Pero aplicar nuevamente un techo al residual implica que ese residual puede seguir respondiendo. Si una fracción fuese permanentemente intratable, no debería reiniciarse como susceptible en cada etapa. La separación entre techo operativo y residual persistente es, por tanto, una condición física de la interpretación, no una simple etiqueta.

Se plantean dos hipótesis: exposición adicional que continúa actuando sobre materia susceptible y renovación de condiciones mediante separación o cambio de matriz. Comparar a igual dosis y energía, con y sin separación intermedia, permite distinguirlas. El banco no transforma la envolvente numérica en una prueba de ambas.

Inversión y rendimiento marginal

Mientras theta sea fijo y no se cambie de rama, un objetivo r_{obj} requiere:

```
c_obj = -ln(1-r_obj/theta)/ln(2)
condición: 0 <= r_obj < theta
dr/dc = theta*ln(2)*2^(-c)
```

Con $\theta=0,64$, lograr 60 % exige cuatro vueltas. Lograr 75 % no tiene solución finita en esa rama, porque supera el techo. Esto no demuestra que el agua sea intratable; demuestra que prolongar esa misma formulación no resuelve el objetivo. Una nueva configuración exige su propia justificación.

El rendimiento marginal disminuye al crecer c , mientras la energía suele crecer aproximadamente de forma lineal a potencia y caudal constantes. Esa combinación explica por qué aumentar horas puede volverse poco productivo. No garantiza que otra etapa mejore la relación energética: hay que contabilizar sus consumos y separaciones.

Particularidades que debe conocer el usuario técnico

El cambio de factor a doce vueltas produce un salto programado. No debe interpretarse como transición química demostrada. Los suelos pueden superar entradas extremadamente bajas y producir una salida numérica mayor que la entrada; ese dominio no admite lectura física directa. La elección inicial de equipo por vueltas mínimas tampoco equivale a optimizar todos los objetivos analíticos.

Estas características se conservan en el núcleo congelado para poder repetir los resultados. Corregirlas requiere una nueva versión y pruebas de regresión, no alterar silenciosamente el código dentro de un libro. El método se vuelve más útil cuando permite ver estas decisiones y diseñar el ensayo que determine si deben cambiar.

04. Electrocoagulación: de la carga eléctrica a la separación

Una operación con dos resultados distintos

La electrocoagulación, EC, genera especies metálicas mediante electrodos consumibles y favorece la agregación o incorporación de componentes del agua a una fase separable. Su evaluación exige distinguir la producción de coagulante de la retirada posterior. Formar flóculos no equivale a extraerlos del circuito. Una muestra tomada antes de sedimentar, flotar o filtrar puede contener sólidos procedentes del propio electrodo y mostrar más sólidos suspendidos que la alimentación, aunque haya cambiado favorablemente su separabilidad.

En el método comercial propietario T1 de Aguas SB, esta distinción permite formular una pregunta operativa: ¿qué parte de la mejora procede de transformar la dispersión y qué parte de retirar material? La respuesta requiere observar el agua y el residuo. Una disminución de demanda química de oxígeno, DQO, en el sobrenadante no identifica por sí sola oxidación, y mucho menos mineralización. Puede representar materia orgánica incorporada al lodo, un resultado útil que debe nombrarse correctamente.

Faraday y sus unidades

Para una reacción anódica ideal, cada mol de metal liberado requiere una cantidad definida de electrones. La carga acumulada se calcula integrando la corriente realmente medida:

$$\begin{aligned} Q_e &= \int I(t) dt \\ m_{\text{teórica}} &= M \cdot Q_e / (z \cdot F) \\ D_{\text{eléctrica}} &= Q_e / V \end{aligned}$$

Q_e es carga eléctrica en culombios, no caudal; I se expresa en amperios y el tiempo en segundos. $F = 96485 \text{ C/mol}$ es la constante empleada aquí; z representa electrones por átomo liberado y M la masa molar en gramos por mol. Así, $M \cdot Q_e / (z \cdot F)$ tiene unidades de gramos. Para corriente constante, la integral se reduce a $I \cdot t$. Un amperio-hora equivale a 3600 C: omitir esta conversión introduce un error de tres órdenes de magnitud.

El cociente entre masa y volumen también necesita atención. Un gramo distribuido en un metro cúbico corresponde a un miligramo por litro. El resultado es una concentración equivalente de metal aportado, no necesariamente metal disuelto a la salida, concentración activa de coagulante ni masa seca de lodo. Los precipitados incorporan otros elementos y pueden retener contaminantes y agua.

La densidad de corriente $j = I/A_{\text{activa}}$ añade una coordenada distinta. Dos celdas con la misma corriente y el mismo tiempo tienen igual carga total, pero pueden tener densidades distintas, distribuciones diferentes de reacción y distinta respuesta superficial. Debe declararse cómo se cuenta el área mojada y activa, incluyendo las caras que participan y la conexión eléctrica. No es correcto multiplicar indiscriminadamente la corriente de fuente por todas las placas.

Ejemplo sintético 1: 2 A durante una hora en 5 m3

Considérese exclusivamente un balance estequiométrico, sin asignarlo a un equipo ni a un agua real. Se supone corriente constante de 2 A, tiempo de 3600 s, volumen de 5 m3 y disolución ideal del metal indicado:

Qe = 2 * 3600 = 7200 C

D_electrica = 7200 / 5 = 1440 C/m3

m_Al = 26.9815 * 7200 / (3 * 96485) = 0.67115 g

m_Fe = 55.845 * 7200 / (2 * 96485) = 2.08366 g

Supuesto anódico	Masa teórica	Equivalente en agua
Al, z = 3	0,67115 g	0,13423 mg/L
Fe, z = 2	2,08366 g	0,41673 mg/L

La diferencia se explica por M/z, no por una superioridad de tratamiento del hierro. El cálculo de Fe presupone liberación como Fe(II); no establece la especiación posterior. Tampoco permite escoger una dosis óptima: para ello faltan composición, objetivo, disponibilidad química, captura y separación. Los decimales permiten revisar la aritmética, pero no representan precisión alcanzable en una campaña de pesaje.

Si la corriente varía, se integra su registro, no se utiliza el valor de consigna como sustituto. Si el volumen cambia por muestreo o purga, debe reconstruirse la masa y el volumen pertinentes antes de expresar una concentración equivalente.

Aluminio, hierro y matriz

Los esquemas $Al \rightarrow Al(III) + 3e^-$ y $Fe \rightarrow Fe(II) + 2e^-$ sirven para contar electrones. Las especies que interaccionan con coloides no se reducen a esos símbolos: intervienen hidrólisis, formación de sólidos, complejación y evolución de la química local. En hierro también importa la transformación entre estados de oxidación. El pH medido en el tanque no describe necesariamente el entorno inmediato de cada superficie.

La selección entre aluminio y hierro debe tratarse como una comparación de proceso. Interesan el residual de metal, el volumen y manejo del lodo, la consistencia de la separación y la compatibilidad con operaciones posteriores. Igualar solamente amperios no iguala masa metálica ni química. Una comparación informativa declara qué se mantiene constante: carga, moles de metal, concentración equivalente o resultado final.

La matriz puede cambiar simultáneamente conductividad, demanda de coagulación y estado superficial. Por ello, una reducción de tensión tras cambiar el agua no demuestra mejor coagulación; podría reflejar menor resistencia eléctrica. Un estudio con agua formulada y electrodos de Al/Fe encontró respuestas diferentes de pasivación frente a carbonato, cloruro e inversión de polaridad. Respalda investigar dependencia de matriz, no prescribir una adición universal. [Estudio de pasivación, 2025](#).

Eficiencia medida y significado del pesaje

Conviene definir indicadores que no mezclen observables:

eta_perdida = masa_perdida_electrodo / masa_teorica

eta_recuperada = metal_recuperado_corregido / masa_teorica

La segunda razón exige descontar el metal presente inicialmente y sumar las fases incluidas en la frontera. La primera puede incluir desprendimientos, corrosión química y errores asociados a depósitos o limpieza. Por tanto, una razón superior a uno no prueba que se hayan producido más electrones de los suministrados; indica que el pesaje no representa exclusivamente la reacción farádica seleccionada. Un

trabajo experimental sobre aguas de cocción de corcho contrastó desgaste observado y predicción de Faraday e identificó contribución de disolución química. [EC en matriz real, 2022](#).

Denominar una razón «eficiencia farádica» requiere definir qué masa y qué mecanismo se están contando. Para ingeniería de mantenimiento interesa la pérdida total; para explicar el proceso interesa además qué fracción alcanza el líquido, precipita o queda adherida. Ningún indicador aislado responde a ambas preguntas.

Ejemplo sintético 2: reconciliar pérdidas y recuperación

Supóngase una masa teórica de 10,0 g, una pérdida de electrodo de 12,0 g y 9,0 g de metal recuperado, corregido por el fondo inicial, entre líquido y sólidos. Se obtiene $\eta_{\text{perdida}} = 1,20$ y $\eta_{\text{recuperada}} = 0,90$. Estos datos inventados para el cálculo no demuestran una eficiencia química del 120 %.

Los 3,0 g que separan pérdida y recuperación obligan a buscar depósitos, fracciones no muestreadas o sesgos de limpieza y digestión. No se asignan automáticamente a metal disuelto ni a una reacción desconocida. Repetir el balance con electrodos acondicionados y recuperando depósitos puede discriminar esas explicaciones. La predicción comprobable es que una frontera más completa reducirá el descuadre si la causa principal era material retenido.

Mini-protocolo 3: superficie y separación

Un contraste práctico comienza con un lote homogeneizado dividido entre tratamiento EC y control hidráulico sin corriente. Se registran corriente, tensión, temperatura, conductividad y pH a lo largo del tiempo; se documentan área, estado inicial y procedimiento de limpieza del electrodo. El procedimiento de pesada debe ser reproducible y tener un blanco que permita estimar pérdida causada por la propia limpieza.

Después se toman muestras antes y después de una separación definida, con idéntico tiempo de reposo o procedimiento de filtración en ambos brazos. Se analizan las fracciones pertinentes de metal, sólidos y DQO; se conserva el residuo para cerrar el balance. La filtración analítica no debe presentarse como separación industrial instalada. Si la ventaja aparece solo después de separar, la conclusión corresponde a EC más separación, no a la celda aislada.

Una subida de tensión a corriente constante orienta la inspección, pero no diagnostica por sí sola pasivación: deben descartarse variaciones de conductividad, temperatura, conexiones y geometría. Como recomendación inferida, conviene comparar también ciclos sucesivos, porque una primera prueba con superficies recién preparadas puede ocultar deriva operativa.

Evidencia y preguntas de diseño

La tesis de Pablo Santiago Hernández Lehmann, de 2011, describe en su resumen una planta de 144 L/h y aborda tratamiento, separación y energía. Aquí se ha consultado la ficha y el resumen, no las ecuaciones íntegras ni las condiciones completas de ensayo. Su director no debe confundirse con el autor. [Tesis UPM](#).

Para T1, las preguntas comprobables son si la masa recuperada sigue la carga, si la superficie conserva su respuesta y si el contaminante retirado del agua aparece en una fase controlada. Cambiar pH, material o limpieza puede motivar un nuevo ensayo; no modifica automáticamente las reglas del motor. La contribución de EC queda mejor descrita por carga, metal, superficie y separación que por un porcentaje aislado.

05. Electrooxidación: electrones, transformación y selectividad

Definir qué cambia

La electrooxidación, EO, busca transformar sustancias mediante reacciones electroquímicas y especies reactivas generadas en el sistema. A diferencia de la electrocoagulación, su descripción principal no es la producción de una masa de coagulante. Sin embargo, una instalación puede combinar ambas funciones, y una disminución de concentración en su salida no permite repartirlas retrospectivamente sin controles.

Para el método comercial propietario T1, conviene separar tres preguntas: ¿disminuye la sustancia analizada?, ¿disminuye la demanda oxidante del agua?, ¿se transforma su carbono orgánico en carbono inorgánico? Estas respuestas pueden divergir. Una molécula puede dejar de detectarse porque se transforma en otra; una fracción puede pasar a sólidos; una oxidación parcial puede reducir DQO conservando carbono orgánico. La mineralización requiere evidencia adicional de destino, no una etiqueta aplicada al porcentaje de DQO.

Vías directas y mediadas

En una vía directa, el contaminante intercambia electrones en la interfaz del electrodo. En una vía mediada, especies generadas electroquímicamente reaccionan con él en la interfaz o en el líquido. Ambas pueden coexistir con reacciones que consumen corriente sin producir el resultado analítico buscado. La evolución de oxígeno es un ejemplo de competencia que obliga a distinguir corriente total y corriente útil.

El transporte hasta la superficie importa porque la reacción no puede consumir sostenidamente más sustrato que el disponible en su entorno. Una representación conceptual es $J = k_m \cdot (C_{\text{bulk}} - C_{\text{superficie}})$, donde el flujo molar J depende del coeficiente de transferencia k_m y del gradiente de concentración. No es una ecuación cinética de T1: ayuda a entender por qué elevar corriente no garantiza una mejora proporcional cuando disminuye la concentración o se limita el transporte.

No se presupone que el radical hidroxilo sea siempre dominante. Material, potencial, composición del agua, pH y especies competidoras determinan las rutas plausibles. Identificar una ruta exige mediciones específicas y controles de sus interferencias; observar decoloración, burbujeo o variación de potencial redox no basta. El potencial redox es una señal conjunta del medio, no un contador universal de radicales.

Zou y colaboradores estudiaron EO con ánodo de diamante dopado con boro, BDD, en agua textil real y observaron dependencia de corriente, pH y cloruro. Su estudio respalda esa sensibilidad experimental; ni el material ni sus condiciones se transfieren por identidad al T1. [Estudio EO, 2017](#). Citar BDD no acredita que el equipo comercial lo incorpore ni que reproduzca sus mecanismos.

Equivalente electrónico de la DQO

La DQO se expresa como masa equivalente de oxígeno. El balance de reducción completa de un mol de oxígeno implica cuatro moles de electrones. Una representación estequiométrica en medio ácido es:

$$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$$

$$Q_{\text{equivalente}} = (4 * F / 32) * \text{delta_m_DQO}$$

$$\text{m_DQO_equivalente} = (32 / (4 * F)) * Q_e$$

Aquí delta_m_DQO está en gramos de O₂ equivalente, Q_e en C y F = 96485 C/mol. El factor 32/(4*F) vale aproximadamente 8.2914e-5 g O₂/C, o 0.29849 g O₂/Ah. Esta conversión cuenta equivalentes; no afirma que se inyecte oxígeno molecular ni reproduce el mecanismo del análisis de DQO.

Si el volumen es constante y las concentraciones están en mg O₂/L, delta_m_DQO = V_L*(C₀-C_t)/1000. Con volúmenes distintos se calculan masas iniciales y finales, sumando entradas y retiradas de muestra. La mera diferencia de concentraciones es insuficiente cuando hay dilución, evaporación o purgas.

Ejemplo sintético 1: una cota de atribución

Con 2 A durante una hora, Q_e = 7200 C. Su equivalente es 0.59698 g O₂. En 5 m³ corresponde a 0.11940 mg O₂/L. Estas cifras son un cálculo ideal, no una previsión de eficacia de T1 ni un límite universal para un tren que recibe otros oxidantes o separa sólidos.

Su utilidad es detectar una atribución incompleta. Si una caída de DQO acuosa requiere muchos más equivalentes que los suministrados eléctricamente, no puede explicarse íntegramente como oxidación neta alimentada solo por esa carga bajo la frontera propuesta. Deben investigarse separación, oxidantes externos, oxígeno suministrado, procesos biológicos y sesgos analíticos. La comparación no invalida la disminución observada; cuestiona la explicación exclusiva que se le ha asignado.

Tampoco convierte toda la corriente en tratamiento. La cifra ideal supone utilización completa de electrones para el cambio de DQO seleccionado. En el ensayo real, las reacciones paralelas y el destino de mediadores obligan a medir cuánto de ese equivalente aparece en el objetivo.

Eficiencia aparente y sus límites

Puede definirse una eficiencia aparente de corriente respecto de DQO:

$$\text{eta_DQO_aparente} = 4 * F * \text{delta_m_DQO} / (32 * Q_e)$$

El adjetivo «aparente» es sustantivo: el numerador se obtiene de una diferencia analítica y el denominador de una medida eléctrica. No se conoce necesariamente la fracción de corriente que siguió cada reacción. Solo bajo una frontera sin otras fuentes oxidantes ni retiradas materiales, con analítica adecuada y balance compatible, puede aproximarse a una eficiencia electroquímica del objetivo.

Un valor superior a uno obliga a revisar esas condiciones. No debe corregirse a cien por cien para esconder la discrepancia ni anunciarse como producción extraordinaria de electrones. Un valor pequeño tampoco prueba mal funcionamiento global: la carga puede dirigirse a sustancias no bien representadas por la DQO o a un objetivo distinto, que tendrá que medirse separadamente.

Ejemplo sintético 2: interpretar un cociente

Supóngase una prueba idealizada de 10 L que recibe 10 Ah. El equivalente eléctrico es 2.9849 g O₂. Una disminución hipotética de DQO de 100 mg/L representa 1,000 g O₂ equivalente; resulta eta_DQO_aparente = 0.3350. No es un rendimiento medido ni una recomendación de intensidad.

Si la misma diferencia se calcula tras filtrar solo la muestra final, el cociente pierde su interpretación como oxidación: incluye potencialmente material retenido en el filtro. Si además se añadió agua, habrá que rehacer la comparación en masas. El ejemplo enseña que una fórmula dimensionalmente correcta puede responder a una pregunta equivocada cuando cambia la preparación de muestra.

Cloruro, cloraminas y subproductos

La conductividad no resume el papel del cloruro. En ciertas condiciones electroquímicas puede originar especies de cloro activo y rutas de oxidación mediada. Con compuestos nitrogenados, la química incluye posibles cloraminas. Un estudio sobre tratamiento electroquímico de amonio con BDD examinó formación de cloraminas, clorato y perclorato en medios con cloruro, incluyendo lixiviados. La cobertura utilizada aquí es su resumen, no una reproducción de su protocolo. [Estudio primario, 2012](#).

Otro trabajo con agua residual de letrinas examinó subproductos inorgánicos y orgánicos bajo distintas condiciones electroquímicas y materiales anódicos. Demuestra que la evaluación debe incluir productos no deseados, no solo desaparición de carga. Se ha consultado su resumen; no se importan sus concentraciones como pronóstico para T1. [Subproductos de EO, 2017](#).

La consecuencia práctica inferida es definir un panel analítico conforme a la matriz y al destino del agua, con asesoramiento de laboratorio y evaluación de riesgos. No se ofrece aquí una receta de cloración, ajuste ácido o mezcla de oxidantes. Una reducción de DQO o un residual oxidante no acreditan potabilidad ni ausencia de subproductos. Tampoco la desaparición de amonio prueba conversión exclusiva a nitrógeno gas: hacen falta las demás formas de nitrógeno.

Mini-protocolo 3: atribución sin promesas de mecanismo

Se compara un lote homogeneizado con un control hidráulico y una rama energizada, conservando temperatura, tiempo de contacto y preparación de muestra. Se documentan material real de electrodo, área, corriente integrada, tensión y estado superficial. Las muestras se obtienen antes de cualquier separación y, si procede, después de una separación idéntica en ambos brazos.

El laboratorio acuerda previamente conservación, tratamiento de oxidantes residuales e interferencias de DQO. Se miden DQO y carbono orgánico cuando la pregunta lo exige; si se investiga una sustancia específica, se buscan también productos pertinentes. Los blancos deben comprobar que la conservación o neutralización no crea la diferencia atribuida al reactor. La inspección superficial complementa el balance: en un estudio piloto de EO urbana se informaron películas no conductoras y pérdidas energéticas adicionales. [EO continua, 2013](#).

Las preguntas finales son si el cambio sigue la carga útil, si persiste a preparación analítica equivalente y si los productos satisfacen el objetivo de tratamiento. El motor T1 no identifica automáticamente estos mecanismos. Su contrastación mejora cuando transformación, transferencia de fase y seguridad de salida se evalúan como resultados distintos.

06. Cavitación hidrodinámica: presión, cavidades y exposición

Qué se produce en el líquido

La cavitación hidrodinámica, HC, aparece cuando el movimiento del líquido genera regiones de presión suficientemente baja para favorecer la formación y crecimiento de cavidades. Su evolución posterior depende de la recuperación de presión y de la historia del flujo. El interés de ingeniería reside en los efectos locales y en cómo modifican transporte, dispersión o transformación, no simplemente en que el circuito tenga una bomba potente.

Una cavidad no es sinónimo de burbuja de aire. Puede contener vapor y gas no condensable en proporciones variables; una burbuja introducida por aireación tiene otra historia de formación y puede persistir cuando cambia la presión. Ambas poblaciones pueden interactuar, pero fotografiar burbujas a la salida de un Venturi no demuestra por sí solo cavitación ni intensidad de colapso. Esta separación conceptual evita atribuir toda la respuesta de un sistema gas-líquido a un único fenómeno.

En el método comercial propietario T1, la HC se trata como una operación cuya contribución debe identificarse bajo una geometría y una condición hidráulica determinadas. El número de vueltas expresa exposición acumulada al circuito; no mide directamente el número de colapsos ni su distribución espacial.

Caudal y presión: variables relacionadas, no intercambiables

El caudal Q_r informa del volumen que atraviesa el dispositivo por unidad de tiempo. La caída de presión Δp representa una diferencia entre puntos de medida. Ninguna de las dos magnitudes, aislada, determina el mínimo local de presión. Una geometría puede concentrar aceleración en una garganta; otra distribuirla mediante un campo vortical. Por ello, deben identificarse las tomas, la contrapresión y el tipo de lectura: absoluta o manométrica.

Una expresión habitual para ordenar condiciones es el número de cavitación:

$$\sigma = (p_{\text{ref_absoluta}} - p_{\text{vapor}}) / (0.5 * \rho * u_{\text{ref}}^2)$$

La densidad ρ está en kg/m³, la velocidad u_{ref} en m/s y ambas presiones en Pa; el cociente es adimensional. Su valor solo resulta comparable si se conserva la definición de presión y velocidad de referencia. No existe aquí un umbral universal que certifique el régimen de cualquier dispositivo T1. Utilizar presión manométrica sin convertirla a absoluta puede incluso cambiar indebidamente el signo del numerador.

En un conducto de sección conocida, $u_{\text{media}} = Q_r/A$, con unidades coherentes. Es una velocidad media, no el máximo local ni la velocidad de una cavidad. El régimen de flujo depende además de geometría y propiedades del líquido. Los registros de caudal y presión deben acompañar a cada serie analítica, porque obstrucción, acumulación de gas o cambios de válvulas pueden alterar la exposición real sin cambiar el tiempo programado.

Vapor, gas, temperatura y viscosidad

La presión de vapor depende de la temperatura. Al calentarse el líquido, cambia la condición termodinámica de formación de vapor, pero también pueden cambiar la cantidad de vapor en la cavidad y la dinámica de su colapso. No se deduce una mejora monótona del tratamiento por el solo hecho de aumentar temperatura. El calentamiento durante recirculación es una variable experimental que debe registrarse, no un detalle que pueda omitirse por trabajar con el mismo volumen.

El gas no condensable participa en la nucleación y modifica compresibilidad y evolución de cavidades. Más gas puede facilitar ciertas interacciones y amortiguar otras; una observación de mayor volumen gaseoso no decide cuál domina. La viscosidad afecta el flujo y la disipación, y puede variar con temperatura y composición. Por eso un ajuste obtenido en agua con un compuesto modelo no caracteriza automáticamente una suspensión concentrada o un líquido con tensioactivos.

Sarvothaman, Nagarajan y Ranade estudiaron presión, temperatura, aireación y escala con contaminantes modelo y dispositivos vortex. Encontraron dependencia del factor por pasada respecto de condiciones y compuesto. Su trabajo aporta una base experimental para seleccionar variables de contraste, no valores universales del reactor T1. [Estudio primario, 2018](#).

Tamaño y distribución: evitar un criterio único

El tamaño de una cavidad es una variable dinámica: cambia durante formación, crecimiento y colapso. Además, una imagen registra una distribución condicionada por posición, instante, iluminación y resolución. No debe confundirse el diámetro observado de burbujas persistentes con el tamaño inicial que emplea un modelo de dinámica de cavidades.

La afirmación «más pequeño es siempre mejor» mezcla objetivos diferentes. Mayor superficie interfacial puede favorecer transferencia, pero no determina por sí sola intensidad de colapso, tiempo de residencia ni rendimiento químico. Dos dispositivos con igual diámetro medio pueden tener distribuciones, fracción gaseosa y trayectorias distintas. Una descripción útil declara qué población se mide y con qué técnica, y conserva la distribución en lugar de reducir toda la interpretación a un promedio.

El modelo de Sarvothaman, Simpson y Ranade integra rendimiento por pasada, cálculo de flujo y dinámica de cavidades, contrastado con acetona en agua. Es un antecedente para conectar escalas de descripción; no identifica la distribución de cavidades de T1. [Modelo publicado en volumen de 2019, disponible en línea en 2018](#).

Ejemplo sintético 1: potencia hidráulica

La potencia transmitida al flujo a través de una caída de presión se obtiene mediante:

$$P_{\text{hidraulica}} = Q_r \cdot \Delta p$$

$$P_{\text{entrada_estimada}} = Q_r \cdot \Delta p / \eta$$

Con Q_r en m³/s y Δp en Pa, el resultado es W. Considérese un circuito hipotético de 15 m³/h, caída total de 280000 Pa y eficiencia global supuesta de 0,65 entre entrada eléctrica y potencia hidráulica:

$$Q_r = 15 / 3600 = 0.0041667 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{\text{hidraulica}} = 0.0041667 \cdot 280000 = 1166.7 \text{ W}$$

$$P_{\text{entrada_estimada}} = 1166.7 / 0.65 = 1794.9 \text{ W}$$

No son potencias medidas de T1. Si 280 kPa representa solo el dispositivo, faltan las pérdidas del resto del circuito para estimar la entrada de la bomba. Si la eficiencia es únicamente hidráulica de bomba,

faltan motor y accionamiento. La frontera y la definición de eficiencia son parte del cálculo, no notas opcionales.

Ejemplo sintético 2: igual potencia, distinta condición

Un segundo circuito hipotético opera a 30 m³/h y 140 kPa. También entrega aproximadamente 1,167 kW al flujo. No puede concluirse que produce la misma cavitación: duplica caudal, reduce caída de presión y puede presentar otra distribución de velocidades y mínimos de presión.

En un tanque de 5 m³, una hora representaría tres volúmenes recirculados en el primer caso y seis en el segundo. La igualdad de potencia no iguala exposición, y la mayor exposición no demuestra mayor transformación. Este ejemplo ofrece una pregunta experimental concreta: ¿qué resultado permanece al igualar separadamente carga hidráulica, duración y número medio de visitas? No propone una fórmula alternativa para el motor.

Qué aporta la evidencia de escala

El estudio de Ranade, Sarvothaman y colaboradores sobre dispositivos vortex comparó gargantas de 3, 6, 12 y 38 mm, con caudales de 1,3 a 247 L/min y caída de presión de 280 kPa, para 2,4-dicloroanilina en agua. El rendimiento por pasada disminuyó con escala y tendió a estabilizarse. Es evidencia específica, no una ley general de toda HC. [Estudio de escalado, volumen 2021; publicación en línea 2020.](#)

Los caudales nominales de 15, 30 y 60 m³/h utilizados para módulos T1 equivalen a 250, 500 y 1000 L/min. Son datos nominales de diseño, no mediciones de esta exposición. La proximidad de 250 a 247 L/min no establece equivalencia; tampoco permite trasladar el ensayo hasta 1000 L/min. Geometría, matriz, gas, temperatura y definición de pasada siguen siendo determinantes. Esta comparación delimita el antecedente sin repetir el capítulo general de escalado.

Mini-protocolo 3: comprobar la contribución hidráulica

Se propone comparar un control de circulación y una condición de HC técnicamente caracterizada sobre un mismo lote homogeneizado. Se documentan caudal real, presiones absolutas pertinentes, temperatura, gas aspirado y configuración. Si cambiar la condición cavitante altera mezcla o calentamiento, esas diferencias se cuantifican: el control deja de aislar un solo factor si se ignoran.

El muestreo distingue muestra total y fracción separada. Una disminución del tamaño de partícula puede cambiar turbidez, filtrabilidad o DQO soluble sin mineralizar materia. Por eso la interpretación se apoya en balances y análisis pertinentes, no solamente en apariencia. Se registran también depósitos y estado del dispositivo, para no atribuir una deriva hidráulica a agotamiento químico.

La recomendación inferida es conservar una ficha hidráulica junto a cada muestra. Las preguntas comprobables son si la respuesta persiste a temperatura comparable, si cambia al modificar gas manteniendo la hidráulica caracterizada y si el efecto se encuentra en transformación o separación. Ni las burbujas observadas ni una corrección de pH actualizan automáticamente los coeficientes T1; aportan variables para contrastarlos.

07. Aireación Venturi: del caudal de gas al oxígeno transferido

Aspiración, dispersión y transferencia

Un Venturi puede aspirar gas cuando su campo de presión y las condiciones de conexión lo permiten. El líquido transporta y dispersa ese gas, y una parte del oxígeno pasa a la fase acuosa. Estas son tres operaciones diferentes: admitir aire, crear contacto gas-líquido y transferir oxígeno. La observación de burbujas o la lectura de un caudalímetro de aire solo acredita una parte de esa cadena.

La presión de aspiración, la contrapresión, el nivel de líquido y las pérdidas de la conducción gaseosa condicionan el funcionamiento. Un caudal de agua nominal no fija el caudal de aire real. Una modificación del circuito puede alterar simultáneamente mezcla, aspiración y tiempo de permanencia de las burbujas; atribuir el resultado a «más oxígeno» exige medir la transferencia.

Para el método comercial propietario T1, la aireación se describe como un aporte potencial de oxígeno y una modificación del contacto entre fases. No constituye por sí misma mineralización. El oxígeno transferido puede acumularse, ser consumido biológicamente, reaccionar con especies reducidas o volver a salir del agua. Su destino requiere un balance temporal.

La fuerza impulsora y kLa

En una representación de tanque bien mezclado, la transferencia se expresa como:

$$\begin{aligned} \text{OTR}_{\text{vol}} &= kLa * (C_{\text{estrella}} - C) \\ dC/dt &= kLa * (C_{\text{estrella}} - C) - \text{OUR} \end{aligned}$$

C es oxígeno disuelto, DO, en mg O₂/L; C_{estrella} es la concentración de equilibrio correspondiente al gas y a las condiciones del líquido; kLa es un coeficiente volumétrico, por ejemplo en h⁻¹. OTR_{vol} es la tasa volumétrica de transferencia, en mg O₂/L/h, y OUR la tasa volumétrica de consumo de oxígeno en las mismas unidades. La ecuación supone que entradas, salidas y otras contribuciones son nulas o se contabilizan por separado.

El producto kLa reúne un coeficiente de transferencia y un área interfacial por volumen. No permite identificar ambos factores por separado a partir de una sola curva de DO. Una mayor área aparente tampoco garantiza un aumento equivalente del producto: cambian movilidad de interfaces, coalescencia, mezcla y condiciones del líquido.

Para volumen V en m³, la tasa total en kg O₂/h es OTR = V*kLa*(C_{estrella}-C)/1000. Cerca de saturación, la fuerza impulsora disminuye aunque el gas siga circulando. Un registro de DO casi constante puede significar escasa transferencia o transferencia elevada compensada por consumo. La curva sola no distingue esas situaciones sin información adicional.

Agua limpia y matriz: alpha y beta

El factor alpha se define aquí como el cociente entre kLa en la matriz y en agua limpia a condiciones comparables. El factor beta es el cociente entre las concentraciones de equilibrio correspondientes. Sus definiciones operacionales deben indicar temperatura, presión, composición del gas, geometría y caudales; comparar ensayos incompatibles produce factores sin significado transferible.

$$\begin{aligned} \alpha &= kLa_{\text{matriz}} / kLa_{\text{limpia}} \\ \beta &= C_{\text{estrella}_{\text{matriz}}} / C_{\text{estrella}_{\text{limpia}}} \end{aligned}$$

No se asigna un α universal al agua residual ni se adopta β por simple inspección visual. Las propiedades interfaciales y la composición disuelta justifican medirlos o declarar explícitamente la incertidumbre de estimarlos. Tampoco deben mezclarse una tasa real de operación y una tasa normalizada, SOTR, sin especificar las condiciones de referencia de esta última.

Un estudio de sistemas Venturi y Venturi-Vortex cuantificó kLa , SOTR y eficiencia bajo configuraciones experimentales. Respalda evaluar transferencia con magnitudes definidas, no transportar automáticamente sus coeficientes a otra matriz. [Estudio de aireación, 2022](#).

Ejemplo sintético 1: demanda y saturación

Supónganse, solo para ilustrar el balance, un tanque de 5 m³, $kLa_{limpia} = 4 \text{ h}^{-1}$, $\alpha = 0.60$, $C_{estrella_limpia} = 8 \text{ mg/L}$, $\beta = 0.95$ y $C = 2 \text{ mg/L}$. Los valores son entradas hipotéticas, no parámetros medidos de T1. Resulta:

```
kLa_matriz = 0.60 * 4 = 2.4 h-1
C_estrella_matriz = 0.95 * 8 = 7.6 mg/L
OTR_vol = 2.4 * (7.6 - 2) = 13.44 mg/L/h
OTR = 5 * 13.44 / 1000 = 0.0672 kg/h
```

Si OUR = 10 mg/L/h, la pendiente inicial es 3.44 mg/L/h. Con consumo constante y los demás supuestos mantenidos, el equilibrio sería $C_{equilibrio} = 7.6 - 10 / 2.4 = 3.433 \text{ mg/L}$, no 7,6 mg/L. Airear no implica alcanzar saturación cuando existe demanda.

Si se pretende mantener 4 mg/L, la transferencia disponible sería $2.4 * (7.6 - 4) = 8.64 \text{ mg/L/h}$, inferior al consumo supuesto. Esa condición no sostendría la consigna. La conclusión es una incompatibilidad entre demanda y transferencia bajo esos supuestos, no un fracaso observado de un equipo. Si el cálculo produce DO negativo, el modelo de OUR constante deja de ser físicamente admisible cerca del agotamiento; no se debe publicar una concentración negativa como predicción operacional.

Ejemplo sintético 2: aire que entra y oxígeno que queda

Considérese 1 m³/h de aire seco medido a unas condiciones para las que se adopta un volumen molar ideal de 24,5 L/mol y fracción molar de O₂ de 0,2095. La masa de oxígeno introducida sería:

```
n_aire = 1000 / 24.5 = 40.816 mol/h
m_O2_entrada = 40.816 * 0.2095 * 32 = 273.63 g/h
```

Si, como segundo supuesto sintético, un balance independiente asigna 40 g/h a transferencia neta gas-líquido, el cociente sería $40 / 273.63 = 0.1462$. No se propone ese cociente como rendimiento de Venturi ni como cifra de eficacia T1. Se muestra que 273,63 g/h introducidos no son 273,63 g/h transferidos.

El caudal normalizado y el caudal real no se intercambian sin corregir condiciones. Para cerrar el lado gaseoso se necesitan salida, composición y humedad pertinentes; para cerrar el líquido, acumulación y consumo. Además, DO acumulado no equivale a transferencia total: cuando existe OUR, parte del oxígeno transferido desaparece de la lectura por consumo durante la prueba.

Mini-protocolo 3: reoxigenación en agua limpia y matriz

Primero se verifica la respuesta del sensor de DO, su calibración y la representatividad del punto de medida. Se caracteriza volumen útil, temperatura, presión y caudales de líquido y gas. En agua limpia sin consumo apreciable, y con kLa y $C_{estrella}$ constantes, la integración del balance da:

```
ln[(C_estrella - C_t) / (C_estrella - C_0)] = -kLa * t
```

La pendiente permite estimar kLa si se cumple la mezcla supuesta y se considera el tiempo de respuesta del sensor. Los puntos muy próximos a saturación amplifican la influencia del error en la diferencia; no conviene tratarlos como información igualmente robusta. El procedimiento para establecer el DO inicial debe ser evaluado por personal competente y no introducir una demanda residual inadvertida.

Se repite después con la matriz conservando condiciones comparables. Si existe consumo, se estima OUR en un ensayo complementario compatible o se ajusta un balance que lo incluya con información suficiente. Forzar la ecuación de agua limpia a una curva con respiración atribuiría al transporte lo que corresponde a consumo. Un estudio con Jetventurimixer en agua y licor mezcla, con 1,5 m³ efectivos, muestra precisamente la importancia de interpretar conjuntamente transferencia y consumo. Su dispositivo no es intercambiable con cualquier inyector externo. [Estudio JVM, 2022](#).

Si una pausa de aireación permite estimar consumo, debe mantenerse mezcla suficiente y contabilizar transferencia superficial residual. La hipótesis de OUR constante se comprueba en el intervalo utilizado; no se extiende automáticamente a horas de evolución biológica. Como recomendación inferida, conviene registrar DO en más de una posición durante la caracterización inicial para detectar gradientes antes de ajustar un único coeficiente de tanque.

Interpretación para el tren

Oxigenar es aportar oxígeno al líquido; oxidar es transferir electrones en una transformación; mineralizar es convertir materia orgánica en productos inorgánicos. Estas operaciones pueden relacionarse, pero no son equivalentes. Una bajada de olor o una mejora visual tampoco sustituye los análisis necesarios para distinguirlas.

Las preguntas comprobables son si el gas adicional aumenta OTR a igual hidráulica, si la matriz cambia α y si la demanda observada explica la evolución de DO. El tamaño de burbuja ayuda a describir contacto, pero no actualiza automáticamente la respuesta del motor. El dato útil para integrar aireación en T1 es una transferencia y una demanda documentadas, junto con su condición de medida, no la presencia visible de aire.

08. Interacciones: secuencia, balances y causalidad

Integrar no es sumar rendimientos

El tren T1 reúne electrocoagulación, electrooxidación, cavitación hidrodinámica y aireación. Su interés como método comercial propietario reside en organizar operaciones que pueden cambiar mutuamente sus condiciones de trabajo. La salida de una operación no es necesariamente la misma matriz con menor concentración: puede contener nuevas especies, otros tamaños de partícula, distinta demanda de oxígeno y sólidos generados durante el tratamiento.

Por ello, una biblioteca de resultados publicados no constituye una fórmula que sume cuatro porcentajes. Los estudios pueden emplear matrices, dosis, materiales, tiempos y preparaciones de muestra diferentes. Incluso con un mismo afluente, la respuesta de una operación aislada no determina automáticamente su respuesta después de otra. Integrar exige describir qué llega a cada etapa y qué sale de la frontera del proceso.

Conviene distinguir complementariedad, intensificación y sinergia. La complementariedad significa que operaciones diferentes resuelven fracciones o funciones distintas. La intensificación indica una mejora de una métrica definida, por ejemplo tiempo necesario bajo condiciones comparables. La sinergia requiere superar una referencia explícita de ausencia de interacción; no basta con que el tren completo mejore respecto de cada operación individual.

El orden cambia la pregunta

En una secuencia EC seguida de separación y EO, retirar sólidos puede reducir la materia que llega a la celda posterior. La hipótesis favorable es que se libera capacidad para tratar otra fracción; una hipótesis alternativa es que se retiran sustancias que contribúan al transporte o a determinadas rutas. La dirección neta del efecto no se decide con el diagrama.

Si se aplica HC antes de EC, la modificación de partículas o dispersión puede cambiar la coagulación posterior. Si se aplica después de formar flóculos, puede modificar su integridad y la separación. Ambas son hipótesis de ingeniería que requieren medir tamaño, fracción separable y destino de la carga. No se declara que la HC siempre mejore o destruya flóculos.

La aireación introduce otra dependencia: puede modificar DO, mezcla y contacto gas-líquido a la vez. Al acoplarla con HC no resulta correcto atribuir todo cambio al oxígeno sin controlar la modificación hidráulica. Al combinarla con EO, la presencia de oxígeno tampoco demuestra que domine una ruta electroquímica concreta. Deben observarse las variables que permitirían distinguir explicaciones.

Secuencia propuesta	Pregunta causal	Observación decisiva
EC, separación, EO	¿Cambia la carga accesible?	Fracciones antes de EO
HC antes de EC	¿Cambia la agregación?	Separabilidad final
HC después de EC	¿Cambia el floculo?	Sólidos y distribución
HC con aire	¿Gas o hidráulica?	OTR y presiones

Estas preguntas no prescriben una secuencia universal. Ayudan a elegir un ensayo cuyo resultado pueda refutar la explicación favorita del diseñador.

Agua, sólidos y gas dentro de una misma frontera

El balance empieza por el agua. Deben contabilizarse alimentación, agua añadida, muestras, purgas, humedad del lodo y pérdidas pertinentes. De otro modo, una caída de concentración puede reflejar dilución. Para cada componente conservativo se utiliza la estructura:

$$\text{acumulacion} = \text{entradas} - \text{salidas} + \text{generacion} - \text{consumo}$$

Para un elemento, como carbono total, generación y consumo netos desaparecen si se incluyen todas sus formas y no hay reacciones nucleares. Para una especie química sí existen transformación y formación. La DQO no es una masa elemental conservativa: es una propiedad expresada en equivalentes de oxígeno. No debe forzarse un cierre elemental utilizando solo DQO.

En carbono, el líquido puede contener fracciones orgánica e inorgánica; los sólidos retienen ambas, y el gas puede transportar carbono inorgánico o compuestos orgánicos volátiles. El CO₂ detectado no demuestra por sí solo mineralización de contaminantes: también puede proceder del carbono inorgánico inicial liberado al cambiar condiciones. Se requieren fondos y una frontera coherente.

En EC entra metal desde el electrodo; en aireación entra gas; en cualquier dosificación entra materia adicional. El balance no puede tratar estas operaciones como cajas que solamente eliminan. Asimismo, las muestras de lodo deben referirse a masa seca o humedad declarada, evitando comparar kilogramos húmedos con concentraciones en agua como si fueran magnitudes equivalentes.

Ejemplo sintético 1: seguir carbono, no una etiqueta

Imagínese un lote con 1,00 kg de carbono orgánico inicial y sin otras entradas de carbono. Al final, un inventario hipotético identifica 0,55 kg de carbono orgánico en agua, 0,30 kg en sólidos, 0,10 kg de incremento de carbono inorgánico recuperado y 0,05 kg sin localizar. Todas las cifras son supuestos didácticos, no mediciones T1.

La disminución de carbono orgánico acuoso es 0,45 kg. No equivale a 0,45 kg mineralizados: 0,30 kg se asignan a sólidos. Los 0,10 kg inorgánicos son compatibles con transformación solo después de corregir el fondo y excluir fuentes alternativas; los 0,05 kg restantes siguen siendo un descuadre, no una reacción demostrada.

La decisión práctica es mejorar recuperación y muestreo antes de atribuir el término no localizado. Si se hubiese medido únicamente agua, la interpretación habría confundido separación con transformación. Este razonamiento también explica por qué una separación intermedia puede mejorar la calidad de salida sin aumentar necesariamente la mineralización.

Referencia aditiva y sinergia

Para dos etapas hipotéticamente independientes que actúan sobre la misma fracción, con reducciones r_A y r_B definidas respecto de sus propias entradas, la combinación secuencial es:

$$C_{AB} = C_0 * (1-r_A) * (1-r_B)$$

$$r_{AB_referencia} = r_A + r_B - r_A * r_B$$

No es $r_A + r_B$, porque la segunda etapa recibe menos masa. Tampoco es una ley para operaciones reales: presupone que el valor de r_B sigue siendo válido después de A y que la variable analítica y la frontera no cambian. Precisamente esa transferibilidad es una hipótesis que debe contrastarse.

Para comparar efectos sobre masa retirada puede definirse un contraste $I = Y_{AB} - Y_A - Y_B + Y_0$, con Y como respuesta y Y_0 como control. Un valor favorable solo indica interacción en esa escala de respuesta y bajo ese diseño; no identifica un mecanismo químico. El contraste requiere mantener la dosis de A entre A y AB, y la de B entre B y AB, controlando tiempo y condiciones hidráulicas. Que AB consuma la suma de ambos recursos no invalida por sí solo el contraste; cambiar esas dosis entre brazos sí confunde interacción y dosis. El modelo de referencia debe escribirse antes de interpretar el resultado, no escogerse después para fabricar una ventaja.

Ejemplo sintético 2: presupuesto comparable

Supóngase un presupuesto por lote de 12 Ah de carga total y 1,20 kWh de energía total medida. Un tren hipotético reparte 4 Ah a EC y 8 Ah a EO; la energía incluye bombas, fuentes, aireación y separación dentro de la frontera acordada. Estos números son exclusivamente un ejercicio contable, no consignas operativas.

Comparar ese tren con EC a 12 Ah y con EO a 12 Ah iguala carga total, pero no garantiza igual energía: las tensiones y auxiliares pueden diferir. Compararlo con cada proceso a 1,20 kWh tampoco garantiza igual carga. Por ello se necesita registrar ambas magnitudes y definir si el presupuesto es una igualdad o un límite.

Una solución metodológica es estudiar condiciones factibles bajo los mismos límites y comunicar el recurso efectivamente consumido por cada una. Para aislar interacción local, otra comparación conserva la dosis de cada componente y utiliza controles de tiempo y circulación; responde a una pregunta diferente de la comparación económica a presupuesto fijo. No debe derrocharse energía artificialmente para fingir equivalencia. Si no se pueden igualar ambas restricciones, se declara qué pregunta queda sin resolver.

Mini-protocolo 3: distinguir secuencia y separación

Se divide un lote homogeneizado entre control hidráulico, EC con separación, EO sola y EC con separación seguida de EO. Se añade, cuando la pregunta lo requiere y es técnicamente seguro, una rama EC seguida de EO sin separación intermedia. El tiempo de espera, muestreo y preparación analítica se mantienen comparables; se registran los recursos de cada etapa.

La comparación con y sin separación investiga si retirar una fase explica la diferencia. Para probar el orden se prepara otra rama EO seguida de EC, conservando las dosis de cada operación y observando sus entradas reales. Si la operación apagada modifica el circuito, se caracteriza esa modificación: «sin corriente» no equivale necesariamente a «sin interacción con el electrodo».

HC y aireación se incorporan mediante controles específicos, no atribuyéndoles el residuo inexplicado del balance. Un control de circulación caracteriza mezcla y temperatura; un ensayo de transferencia distingue aire aspirado de oxígeno transferido. Las preguntas son si cambia la fracción disponible para la etapa siguiente y si la ventaja persiste cuando se igualan preparación de muestra y recursos pertinentes. El diseño de replicación pertenece al capítulo estadístico; aquí se fija la comparación causal que debe replicarse.

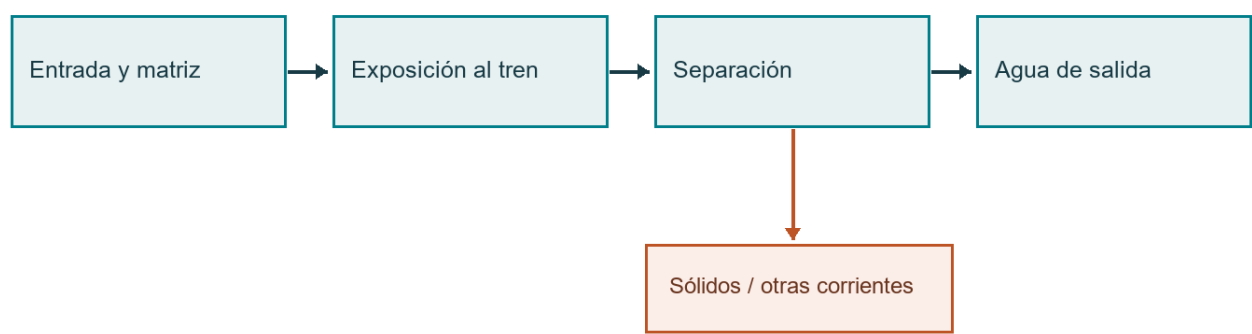
Antecedentes sin apropiación de resultados

Paramanik y colaboradores estudiaron EC previa a HC con variantes que incluían aire y oxidantes en efluente de molino de arroz. El resumen confirma que existen híbridos próximos; no acredita la combinación exacta EC, EO, HC y Venturi ni una curva conjunta T1. La cobertura utilizada es el resumen, no el texto completo. [Estudio híbrido, 2026](#).

Amaral-Silva, Martins, Castro-Silva y Quinta-Ferreira integraron separación física, coagulación/floculación y Fenton en aguas de almazara. Su resumen aporta un ejemplo distinto de integración y de separación posterior a oxidación. No estudia T1 ni demuestra cavitación por recirculación; no se infiere la escala a partir del título. [Estudio de integración, 2016](#).

La utilidad de estos antecedentes es formular comparaciones, no importar eficacias. Una interacción defendible deja trazabilidad de materia, exposición y recursos, admite resultados desfavorables y explica qué observación separaría hipótesis rivales. Así puede mejorarse el método sin presentar la biblioteca como una validación automática de sus coeficientes.

Frontera del tratamiento combinado



Retirada del agua no equivale a mineralización. Balancear todas las salidas.

09. Escalado: conservar condiciones, explicar diferencias

La pregunta de transferencia

Escalar el método comercial propietario Aguas SB T1 significa trasladar una operación a otra capacidad conservando aquello que determina su respuesta, o midiendo cómo cambia. No consiste en multiplicar el volumen y mantener un porcentaje de retirada. El objeto de comparación es un sistema definido: agua, equipo, régimen hidráulico, exposición, dosis, separación y frontera de medida. Antes de preguntar si una planta reproduce un piloto, debe precisarse qué resultado se pretende transferir: concentración de salida, masa retirada del agua, consumo específico o estabilidad durante una campaña.

T1 2.3 permanece congelado en esta edición. Sus reglas sirven como hipótesis de dimensionamiento, no como una correlación de escala públicamente calibrada. Una diferencia entre predicción y observación puede proceder de entradas mal representadas, condiciones no equivalentes o estructura insuficiente del modelo. Atribuirle inmediatamente al tamaño impediría investigar esas alternativas. Tampoco una coincidencia demuestra semejanza física: dos mecanismos distintos pueden producir la misma DQO final y dejar diferentes cantidades de sólidos, carbono orgánico o nitrógeno.

Cinco semejanzas que conviene separar

La semejanza hidráulica describe recorridos, mezcla y distribución de tiempos de residencia. Requiere identificar alimentación, recirculación, volumen útil, presión y conexiones. Igualar el cociente de caudal y volumen no asegura igual distribución de exposición si aparece una zona muerta o una derivación preferente. En paralelo se suman caudales independientes medidos; en serie, el mismo caudal atraviesa varios módulos. Contar contactos con módulos no convierte esa serie en un caudal de depósito multiplicado.

La semejanza de exposición relaciona cuánto y durante cuánto tiempo circula el agua. Para un lote de volumen constante, $c = Q_r \cdot t / V_b$; con caudal variable, $c = \int (Q_r(t) / V_b(t)) dt$. La segunda expresión exige registrar también cambios de volumen. En continuo interesa además Q_r / Q_f y V_b / Q_f . La razón diaria del configurador, $c = \sum (q_i \cdot h_i) / V_d$, utiliza volumen tratado diario; no constituye por sí sola una distribución de pasadas individuales.

La semejanza de dosis distingue carga eléctrica por volumen, reactivo activo, metal aportado y oxígeno transferido. La semejanza energética añade energía total y su distribución entre bombeo, transformación eléctrica y auxiliares. Finalmente, la semejanza de matriz requiere composición y estado físico: dos aguas con idéntica DQO pueden diferir en fracción soluble, partículas, conductividad, alcalinidad o demanda de oxidantes. Estas cinco semejanzas forman una lista de comprobación, no cinco números que deban mantenerse simultáneamente a cualquier coste.

Ejemplo 1: igual exposición, distinta operación

Considérese un cálculo enteramente sintético. Un lote piloto de $V_b = 0,5 \text{ m}^3$, recirculado a $Q_r = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ durante $t = 1 \text{ h}$, tiene $c = 6$. Otro lote de $V_b = 5 \text{ m}^3$, recirculado a $Q_r = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ durante $t = 2 \text{ h}$, también tiene $c = 6$. El segundo recibe el mismo volumen relativo recirculado, pero tarda el doble. No puede concluirse igualdad de carga eléctrica específica, temperatura, aireación o envejecimiento del electrodo.

Si ambos operasen hipotéticamente a corriente constante de $I=10$ A, la dosis eléctrica sería $D=I \cdot t_s / V_b$: 72000 C/m³ en el piloto y 14400 C/m³ en el lote mayor. Son magnitudes de diseño inventadas para mostrar el balance, no condiciones recomendadas ni mediciones T1. Igualar c ha dejado una diferencia de cinco veces en carga eléctrica específica. Si cambian los resultados, este diseño no permite atribuirlos exclusivamente a escala hidráulica.

La comparación útil establecería qué magnitud se mantiene: c , dosis eléctrica o energía. Si no pueden conservarse todas, se programa una segunda comparación que desacople las variables. Esa restricción es información de ingeniería: revela qué semejanzas impide la arquitectura, en vez de ocultarlo mediante un único factor corrector.

De los mecanismos a una extrapolación defendible

En cavitación, la geometría y el campo de presión intervienen en la exposición local; una cavidad de vapor no es una burbuja de aire aspirado. La observación de gas visible no acredita intensidad cavitacional. Un estudio primario de dispositivos vortex encontró dependencia de la degradación por pasada con la escala dentro de su geometría y compuesto ensayados. Ese resultado justifica medir la transferencia de respuesta, no imponer la misma penalización a T1. [Estudio de escalado vortex](#).

La extrapolación entre mecanismos exige reconocer que cada operación tiene otra variable dominante posible. La electrocoagulación requiere dosis y destino del metal; la electrooxidación, condiciones eléctricas y transferencia de materia; la aireación, gas realmente transferido; la separación, captura y evacuación de sólidos. Un diseño que conserva energía total puede redistribuirla entre operaciones. Por ello, energía igual tampoco significa tratamiento equivalente.

Una estrategia práctica consiste en comparar primero la arquitectura completa y después investigar la discrepancia con controles parciales. Desactivar una operación puede cambiar pérdidas de carga o mezcla; el control debe medir esos cambios. No es obligatorio construir una descomposición perfecta para aprender, pero sí declarar qué contribuciones siguen confundidas. Los efectos de pH y burbujas observados experimentalmente se registran como resultados; no modifican automáticamente constantes o ramas del motor congelado.

Meseta operativa y residual persistente

Una meseta observada indica que aumentar exposición dentro de las condiciones ensayadas apenas cambia la respuesta resoluble. No identifica por sí sola una fracción intratable. Puede corresponder a limitación de dosis, transferencia, separación o resolución analítica. Para formular una hipótesis de residual persistente hace falta preguntar si ese remanente conserva su comportamiento cuando se renuevan condiciones y se mide su composición.

En una aproximación de etapa, $r(c)=\theta \cdot (1-\exp(-k \cdot c))$. Aquí θ es una amplitud operativa y k una sensibilidad a exposición. Interpretar θ como proporción susceptible inmutable supone más que ajustar una curva. Si se repite una reducción fraccional sobre todo el residual, el cálculo permite seguir retirando materia; si existe una masa realmente persistente, debe conservarse explícitamente entre etapas. Las dos hipótesis no pueden intercambiarse después de conocer el resultado.

Ejemplo 2: tres pruebas para una meseta

Un miniprotocolo propuesto divide un mismo lote en tres ramas después de alcanzar una meseta definida previamente mediante precisión analítica y cambio mínimo relevante. La primera continúa con las mismas condiciones. La segunda introduce separación intermedia y sigue operando. La tercera renueva una condición limitante elegida de antemano, por ejemplo el estado del electrodo, manteniendo las demás magnitudes registradas. Se contabilizan los volúmenes y masas extraídos.

Si solo mejora la segunda rama, se obtiene apoyo a una limitación relacionada con separación, no prueba definitiva de un mecanismo único. Si la tercera recupera respuesta, el residual no era inmutable frente a esa intervención. Si ninguna cambia, persisten varias explicaciones, incluida falta de sensibilidad experimental. La lectura final debe comparar agua total y fracción soluble, energía adicional y residuos producidos. Retirada del agua y mineralización siguen siendo resultados distintos.

Ejemplo 3: comparar piloto y planta

La ficha de transferencia propuesta empieza por un lote o ventana de alimentación caracterizados, sin identificar públicamente instalaciones. En cada escala se mide volumen efectivo, caudales, trazador cuando sea necesario, energía integrada, dosis y condiciones de separación. Se obtienen pares de entrada y salida coherentes con la residencia. Después se comparan respuestas en unidades físicas, antes de calcular porcentajes o cocientes de rendimiento.

Dimensión	Variable de comparación	Pregunta comprobable
Hidráulica	RTD y caudales	¿Hay cortocircuito?
Dosis	C/m3 y masa activa	¿Es comparable?
Recursos	kWh/m3 y residuos	¿Cambia el reparto?
Matriz	Total y soluble	¿Cambia el sustrato?

Conviene reservar una condición que no intervenga en la interpretación inicial para ensayar una predicción explícita. Por ejemplo, si la hipótesis atribuye la discrepancia a dosis eléctrica, se predice qué comparación debería acercarse al igualarla, sin anticipar una cifra de eficacia. Una nueva concordancia apoyaría esa explicación en el dominio probado; una discrepancia persistente obligaría a revisar otra semejanza.

Decidir sin una penalización universal

El informe de escalado debe terminar con un dominio, no con un coeficiente mágico: matrices representadas, intervalos operados, variables conservadas y limitaciones observadas. La planta puede rendir mejor, igual o peor que el piloto por razones medibles. La decisión comercial requiere además capacidad, mantenibilidad y calidad final, no solo máxima retirada por pasada. El banco de reproducibilidad permite comprobar lo que calcula T1 2.3; la comparación experimental propuesta permite investigar cuándo esos cálculos son transferibles. Son trabajos complementarios y no intercambiables.

10. Energía, materiales y comparación económica

Definir qué se consume y qué se compara

El balance de recursos convierte una propuesta de tratamiento en una operación evaluable. Su primera decisión no es el precio eléctrico, sino la frontera: qué equipos, horarios, volúmenes y residuos se incluyen. El consumo del módulo no es necesariamente el consumo del tren; el consumo del tren tampoco coincide siempre con el incremento atribuible a incorporarlo en una instalación existente. Mezclar estas fronteras puede producir un ahorro aparente aunque cada lectura individual sea correcta.

Para el método comercial propietario Aguas SB T1, el cálculo preliminar utiliza los valores declarados de T1 2.3. Estos valores permiten reproducir una estimación, pero no sustituyen la submedición de una campaña. La comparación debe conservar el mismo volumen útil tratado y una calidad final comparable. Reducir gasto a costa de incumplir el objetivo de tratamiento no constituye una mejora energética del servicio prestado.

De potencia a energía específica

Si la potencia es constante, $E=P \cdot t$, con P en kW, t en h y E en kWh. Si cambia durante el funcionamiento, $E=\int P(t) dt$; un contador integrador evita sustituir una carga variable por una lectura puntual. Para varios consumidores, se suman energías de intervalos equivalentes y se divide entre el volumen neto realmente tratado, no entre el volumen que ha pasado repetidas veces por la bomba.

En módulos iguales, con caudal q y exposición $c=n \cdot q \cdot t/V$, resulta $E/V=n \cdot P \cdot t/V=(P/q) \cdot c$. La cancelación de n y t es algebraica, no una afirmación de que cualquier montaje tenga idéntico rendimiento o potencia real. Requiere que q y P correspondan a la condición operada y que no existan consumos adicionales omitidos. En series hidráulicas, c puede contar contactos con unidades; debe mantenerse esa definición al interpretar el resultado.

Equipo	P declarada, kW	q nominal, m3/h	P/q, kWh/m3
T1-16	1,925	15	0,12833
T1-32	2,425	30	0,08083
T1-50	3,850	60	0,06417

La última columna corresponde a una unidad de c. No es una clasificación universal de eficiencia: los equipos deben compararse también por exposición realizable, calidad obtenida, capacidad y auxiliares. Una máquina mayor puede tener menor cociente nominal y ser inadecuada para el horario o caudal requerido.

Ejemplo 1: estimación y lectura de contador

Para cuatro vueltas, el cálculo declarado da 0,5133, 0,3233 y 0,2567 kWh/m3, respectivamente. Son resultados aritméticos del modelo, no medidas nuevas de eficacia ni de consumo real. En un escenario sintético de 10 m3 con T1-16 y c=4, el tiempo equivalente es $t=4 \cdot 10/15=2,6667$ h; la energía estimada es $1,925 \cdot 2,6667=5,1333$ kWh.

Supóngase, únicamente para ilustrar la frontera, que un auxiliar independiente consume 0,25 kW durante ese intervalo. Añadiría 0,6667 kWh, y el total sintético sería 5,8 kWh, equivalente a 0,58 kWh/m³. Antes de sumarlo en un proyecto real debe comprobarse que no esté ya incluido en la potencia declarada. La duplicación de consumos y su omisión son errores simétricos.

El miniprotocolo de verificación registra contador inicial y final, volumen neto, arranques, paradas y estado de cada auxiliar. Una segunda columna conserva la estimación nominal. La diferencia entre ambas no se corrige silenciosamente: se investiga si procede de horario, carga, caudal, rendimiento eléctrico o frontera. En corriente continua se mide tensión y corriente del circuito correspondiente; no se multiplica esa corriente por la tensión alterna de alimentación.

Qué significa energía por kilogramo retirado

Con concentración en mg/L y volumen en m³, la masa equivalente retirada de una fase acuosa cerrada es $\Delta m = V \cdot (C_{in} - C_{out}) / 1000$, en kg. La energía específica másica es $SEC = E / \Delta m$. Si existen entradas, purgas o cambios de volumen, se reemplaza esa diferencia por un balance de cargas. El denominador debe nombrarse: kg de DQO equivalente retirados del agua, kg de nitrógeno retirados o kg de sólidos separados no son intercambiables.

Cuando la diferencia de concentración se aproxima a la incertidumbre analítica, SEC puede resultar inestable. Una pequeña variación del denominador produce grandes cambios del cociente. En ese dominio conviene informar energía por volumen y la diferencia de carga con su incertidumbre, evitando presentar un cociente espectacular como propiedad del equipo. Una retirada negativa tampoco se transforma en cero antes de examinar el balance.

Ahorro bruto, ahorro neto y orden del tren

El ahorro bruto energético es el consumo evitado en una operación de referencia. El neto resta los consumos añadidos: $S_{neto} = E_{evitada} - E_{adicional}$. Ambos deben conservar su signo y compartir horizonte temporal. Un ahorro bruto positivo puede coexistir con un neto negativo. El valor energético evitado tampoco equivale automáticamente al ahorro de factura, que depende de términos fijos, potencia contratada, precios horarios y otros conceptos del contrato.

Si T1 precede al tratamiento biológico, una reducción de carga susceptible puede cambiar la demanda de aireación, pero el ahorro depende de la respuesta real de soplares y controles. Mínimos de mezcla, mantenimiento de oxígeno, nitrificación y variación de carga limitan una conversión proporcional entre DQO retirada y kWh evitados. Además, retirar carbono puede modificar su disponibilidad para operaciones biológicas posteriores. Deben medirse el tren y sus objetivos, no solo una caída de DQO.

Si T1 se coloca después del biológico, su función puede ser de acabado y no debe acreditarse retrospectivamente energía de aireación evitada aguas arriba. El núcleo denomina combo al orden tradicional seguido de T1, mientras el cálculo energético puede estudiar T1 previo al biológico. Son escenarios distintos. El diagrama de proceso forma parte del resultado económico y debe figurar junto a cualquier cifra comparativa.

Ejemplo 2: conservar un ahorro negativo

En un ejercicio sintético diario, una operación de referencia consume 120 kWh/día. Tras una intervención que mantiene el mismo servicio, esa operación consumiría 95 kWh/día, pero el tratamiento añadido y sus auxiliares consumirían 32 kWh/día. El ahorro bruto sería 25 kWh/día; el neto, -7 kWh/día. El sistema completo pasaría de 120 a 127 kWh/día. Ninguna cifra describe una instalación real.

La conclusión no es que la intervención carezca de utilidad: podría perseguir otra calidad o capacidad. La conclusión energética es que, bajo esas hipótesis, consume más. Afirmar ahorro requeriría otro escenario comprobado. Para un ensayo antes/después, se registran caudal, cargas, temperatura, calidad final y reglas de control; sin esa comparabilidad, la variación de consumo puede deberse a cambios de servicio y no al tratamiento incorporado.

Materiales y mantenimiento como balances

El capítulo 04 desarrolla la ley de Faraday y sus supuestos; aquí interesa conectar aquel contraste físico con la contabilidad de materiales, sin repetir su derivación. La masa teórica de electrodo no es una factura ni la masa necesariamente recuperada en el lodo. Se pesan electrodos bajo un procedimiento reproducible, se registra limpieza y se distingue material perdido, metal disuelto y metal retenido en sólidos.

La pasivación y las reacciones paralelas justifican acompañar corriente y tiempo con observaciones materiales. Estudios experimentales de electrocoagulación muestran que el desgaste real y la respuesta a pasivación dependen de las condiciones ensayadas, por lo que no procede una eficiencia correctora universal. [Disolución de electrodos, pasivación y composición](#).

Ejemplo 3: cierre práctico de consumibles

El tercer miniprotocolo pesa el inventario inicial, identifica reposiciones y contabiliza el inventario final durante una campaña definida. Registra por separado reactivo comercial y fracción activa, agua de dilución, lodo húmedo y materia seca. El consumo específico se divide por volumen neto tratado. Una variación de humedad no debe interpretarse como producción adicional de sólidos secos, ni una tarifa por metro cúbico como dosis metálica medida.

Conviene añadir horas de mantenimiento, limpieza, tiempo fuera de servicio y piezas sustituidas. Así se puede distinguir consumo variable de una reposición excepcional. El registro permite preguntar si operar más horas reduce la capacidad disponible o altera el coste unitario, incluso cuando el gasto eléctrico por volumen permanece parecido.

Coste del modelo y decisión comercial

T1 2.3 incorpora hipótesis económicas, entre ellas electrodo 0,12 EUR/m³, química activada 0,22 EUR/m³, piezas anuales del 6% del CAPEX y amortización de ocho años. Son entradas del cálculo, no consumos medidos ni oferta vinculante. Su uso requiere revisar qué incluyen y evitar contabilizar dos veces una partida. Impuestos, financiación, gestión de residuos y condiciones contractuales necesitan delimitación propia.

La métrica $\text{savingM3} = \max(0, \text{referencia-total})$ recorta costes adicionales a cero. Por ello, debe acompañarse de la diferencia firmada referencia-total: cero en la primera no demuestra equilibrio. La decisión defendible compara alternativas que prestan el mismo servicio, declara partidas ausentes y conserva escenarios desfavorables. Reproducir un coste con el banco público demuestra trazabilidad aritmética; verificar consumo y presupuesto requiere evidencias operativas y comerciales distintas.

11. Medición, datos y destino de la materia

La unidad de evidencia

Un dato útil para el método comercial propietario Aguas SB T1 no es solo una concentración. Es una concentración vinculada a muestra, punto, tiempo, matriz, método analítico, unidad y estado operativo. La unidad mínima de evidencia para una comparación es el ensayo identificable, con su frontera y sus condiciones. Una salida aislada describe esa muestra; no permite calcular retirada sin una entrada correspondiente. Dos informes próximos en el calendario tampoco constituyen automáticamente un par.

El sistema de datos debe separar valor comunicado, interpretación y cálculo derivado. La transcripción original conserva signos, unidades y observaciones del laboratorio. La capa normalizada convierte magnitudes mediante reglas explícitas. La capa de análisis calcula cargas y contrastes sin sobrescribir las anteriores. Esta separación permite corregir una conversión sin reconstruir el ensayo desde documentos dispersos y evita que una decisión de limpieza se convierta retrospectivamente en una medición.

Emparejar afluente y efluente

AF y EF designan aquí afluente y efluente de la frontera estudiada. En un lote, el par procede del mismo inventario inicial, con corrección por muestras extraídas, adiciones y separaciones. En continuo, sincronizar significa relacionar ventanas de entrada y salida según el tránsito del agua; no necesariamente tomar ambas muestras a la misma hora. La distribución de tiempos de residencia, RTD, determina cuánto se solapan materiales de distintas edades.

Un tiempo medio puede orientar el desfase, pero no representa por sí solo una RTD ancha. Si la alimentación fluctúa, una muestra puntual puede asociar una entrada de alta carga con una salida procedente de otro periodo. Las muestras compuestas ponderadas por caudal aproximan mejor la carga de una ventana cuando el protocolo y la conservación lo permiten. Deben quedar registrados los incrementos, sus volúmenes, la duración y el criterio de ponderación.

Ejemplo 1: dos ventanas, dos preguntas

En un escenario sintético, una instalación presenta una residencia media estimada de dos horas, pero el trazador muestra una cola apreciable. Comparar AF de 08:00 a 10:00 con EF de 10:00 a 12:00 es una primera hipótesis de emparejamiento, no garantía de correspondencia exacta. El miniprotocolo propuesto mide la RTD, amplía ventanas si procede y documenta qué fracción de la alimentación puede quedar fuera de la comparación.

Si el objetivo es describir la calidad descargada, basta una estrategia representativa del EF bajo condiciones declaradas. Si el objetivo es atribuir una reducción al módulo, se necesitan AF y EF de ese módulo y su balance. Una pareja de extremos de planta incluye todas las operaciones intermedias. No se reasigna al T1 aislado aunque el equipo forme parte del tren. Esta distinción debe decidirse antes del análisis estadístico, no al elegir el resultado más favorable.

Censura analítica y unidades

Un resultado $<L$ significa que el laboratorio no cuantifica o detecta por encima del umbral indicado según su método. LOD y LOQ no se equiparan: debe conservarse cuál se comunicó. El dato contiene información de intervalo, no una observación igual a L , cero o $L/2$. Una sustitución puede servir para un análisis de sensibilidad declarado, pero no debe ocupar la columna de resultados originales.

El registro mínimo incluye analito, valor o límite, comparador, unidad, método y calificador. Para nitrógeno se distingue mg N/L de mg NH₄⁺/L. La conversión adoptada es $NH_4_mg/L = N_amoniacal_mg/L * 1,2878$; en sentido inverso se divide por ese factor. La entrada nh₄ del motor representa fracción de N amoniacal respecto a N total, no concentración del ion. N total, nitrógeno Kjeldahl y amonio requieren etiquetas diferentes.

Ejemplo 2: un límite y una conversión

Con una entrada sintética de 100 mg/L y salida <5 mg/L, bajo igual volumen y correspondencia de muestras, la retirada nominal es >95% y como máximo 100% si se impone concentración no negativa. No se informa 97,5% por sustituir el límite por su mitad. La incertidumbre de entrada y el significado del umbral deben acompañar ese intervalo; no se ha calculado aquí un intervalo de confianza.

En otro registro sintético, 12,878 mg NH₄⁺/L equivalen a 10 mg N/L. Si N total es 20 mg N/L, la fracción amoniacal es $a = 10/20 = 0,5$. Dividir directamente 12,878 entre 20 produciría una fracción equivocada por mezclar bases. La comprobación automática de unidades previene este error antes de ejecutar el motor, y una fracción fuera de [0,1] activa revisión, no recorte silencioso.

Balances que separan transformación y traslado

Para una especie conservable, la estructura es entrada+generación-salida-consumo=acumulación. En un balance elemental de carbono o nitrógeno, generación y consumo internos se sustituyen por transferencias y cambios de especie; deben incluirse agua, sólidos y gas cuando sean relevantes. Para DQO se trata de equivalentes de oxidación, no de una masa elemental de carbono. COT y DQO aportan información distinta y no se convierten mediante un factor universal.

La DQO total y la fracción operacionalmente soluble requieren procedimientos de preparación comparables. Filtrar antes de una muestra y no antes de otra cambia la pregunta. El tamaño de corte, tratamiento de coloides y recuperación deben documentarse. Una diferencia total-soluble puede orientar sobre la fracción retenida por ese procedimiento, pero no identificar por sí sola todas las especies particuladas.

Una disminución de DQO acuosa puede acompañar acumulación en lodo, transformación o mineralización. Para estudiar esta última se requiere evidencia del destino del carbono, no solo decoloración ni una caída de COT en agua si pudo transferirse a sólidos. Del mismo modo, una disminución de N acuoso no prueba conversión a N₂. Amonio, nitrito, nitrato, N orgánico, sólidos y posibles salidas gaseosas deben investigarse según la hipótesis.

Ejemplo 3: control de balance y analítica positiva/negativa

Un ejercicio sintético considera 2 m³ de agua a 600 mg DQO/L: el inventario acuoso inicial es 1,2 kg de equivalente DQO. Tras tratar y separar, quedan 1,9 m³ a 400 mg/L, es decir 0,76 kg. La diferencia de 0,44 kg no demuestra destrucción: el líquido y los sólidos separados también transportan carga. Se analizan esas corrientes o se declara el balance incompleto; no se asigna automáticamente la diferencia a oxidación.

El control de calidad propuesto acompaña muestras reales de matriz con un blanco de procedimiento como control negativo y un material de control o una adición conocida como control positivo. El blanco investiga contaminación o señal espuria; el positivo investiga recuperación dentro del alcance del método. Sus criterios de aceptación se acuerdan con el laboratorio antes de interpretar los ensayos. No se inventan aquí recuperaciones aceptables universales ni resultados reales de controles.

Se añade un duplicado de preparación para distinguir heterogeneidad y manipulación de la repetibilidad instrumental. Si el blanco falla o la recuperación resulta incompatible con el criterio predefinido, se marca el lote analítico afectado y se investiga. No se eliminan selectivamente solo los valores que empeoran la retirada. Los resultados positivos, negativos y nulos del tratamiento permanecen igualmente visibles, con sus calificadores de calidad.

Mecanismos observables y factores de confusión

Una medición debe elegirse por la explicación que puede discriminar. Caudal y presión informan de operación hidráulica; corriente, tensión y masa de electrodo, de condiciones electroquímicas; oxígeno disuelto y transferencia, de aireación; sólidos y metales, de separación y destino. Ninguna señal aislada identifica el conjunto del mecanismo. Un aumento de oxígeno disuelto puede reflejar mayor transferencia o menor consumo del líquido.

En estudios Venturi se ha evaluado transferencia de oxígeno mediante indicadores específicos del sistema, lo que respalda medirla en lugar de deducirla de burbujas visibles. No aporta un coeficiente universal para T1. [Transferencia en configuraciones Venturi](#). Una cavidad de vapor y una burbuja de aire son fenómenos distintos; una fotografía no sustituye la caracterización hidráulica.

El pH puede variar junto con temperatura, composición o dosificación. Atribuirle todo el cambio requiere un diseño que desacople esas variables. Análogamente, una mejor salida después de separar sólidos puede reflejar el propio procedimiento de muestreo. Las observaciones se anotan con tiempos y operaciones; no activan ajustes automáticos de pH o burbujas en T1 2.3.

Del cuaderno al conjunto reproducible

La tabla final conserva identificadores de lote, réplica independiente y alícuota analítica; entradas y salidas; marcas temporales; volumen y caudales; límites y unidades; incidencias y motivos de exclusión. Los datos faltantes permanecen faltantes. Los resultados desfavorables no son errores por definición. Las correcciones mantienen una trazabilidad que permite recuperar el valor anterior y la razón del cambio.

Para publicación se usan identificadores no reversibles y se revisa la posible identificación indirecta por fechas, composición o descripción de instalaciones. Este capítulo no incorpora analíticas privadas. El conjunto público distingue inequívocamente datos observados, cálculos sintéticos y salidas de modelo. Solo entonces tiene sentido comparar medición y predicción: la calidad del contraste depende tanto del significado de cada fila como de la ecuación empleada.

12. Calibración, identificabilidad e incertidumbre

Qué se calibra y qué permanece congelado

Calibrar significa estimar parámetros mediante un conjunto definido de observaciones, una función objetivo y supuestos declarados. No significa elegir constantes hasta reproducir un caso favorable. Validar exige evaluar predicciones frente a información que no haya intervenido en esas decisiones. En esta edición, el motor comercial propietario T1 2.3 permanece congelado: las alternativas de este capítulo son propuestas de investigación, no ajustes ejecutados ni calibración pública verificada de sus constantes.

El primer paso no sería abrir un optimizador, sino construir una tabla de correspondencia entre parámetro, mecanismo propuesto y dato capaz de identificarlo. Un parámetro puede ser computable y, sin embargo, no identificable con las observaciones disponibles. Si distintas combinaciones producen respuestas indistinguibles dentro del error experimental, publicar muchos decimales no resuelve la ambigüedad. La conclusión útil es diseñar el siguiente contraste o reducir el número de parámetros libres.

Techo y velocidad: una confusión estructural

Para estudiar identificabilidad considérese la familia propuesta $r(c) = \theta(1 - \exp(-\beta \cdot c))$. θ representa amplitud operativa y β controla acercamiento por exposición. Aquí β no es el cociente de recirculación utilizado en otros balances hidráulicos. En T1, el término de acercamiento corresponde algebraicamente a $\beta = \ln(2)$ mientras las demás reglas permanecen constantes. Permitir β libre sería una alternativa de calibración, no una descripción de una modificación ya realizada.

Si $\beta \cdot c$ es pequeño, la expansión de primer orden da $r(c) \approx \theta \cdot \beta \cdot c$. Los primeros puntos informan principalmente del producto $\theta \beta$ por c . Un techo alto con aproximación lenta puede parecerse a un techo bajo con aproximación rápida. Para distinguirlos se necesita ampliar el rango de exposición y mantener comparables las condiciones que afectan a θ . Una meseta aparente ayuda solo cuando supera las limitaciones de resolución y no se explica por cambios de dosis o matriz.

Las sensibilidades son $dr/d\theta = 1 - \exp(-\beta \cdot c)$ y $dr/d\beta = \theta \cdot c \cdot \exp(-\beta \cdot c)$. Cerca del origen ambas contienen c y aportan información parecida; a exposiciones altas disminuye la sensibilidad a β . Por tanto, concentrar todas las muestras al principio o todas al final puede desperdiciar capacidad de identificación. La distribución de puntos debe responder a la pregunta, no únicamente a la comodidad del muestreo.

Ejemplo 1: un dato, varias curvas

En un ejercicio sintético se fija una respuesta algebraica $r(2) = 0,30$, sin atribuirla a ningún ensayo. Con $\theta = 0,60$ se obtiene $\beta = -\ln(1 - 0,30/0,60)/2 = 0,3466$; con $\theta = 0,80$, $\beta = -\ln(1 - 0,30/0,80)/2 = 0,2350$. Ambas curvas pasan por el mismo punto. La igualdad muestra que una observación no identifica simultáneamente amplitud y aproximación, aunque el ajuste residual sea exactamente cero.

El miniprotocolo derivado añade condiciones de exposición distintas y réplicas independientes, conservando dosis y matriz o registrando sus variaciones. Antes de medir se define qué divergencia entre curvas sería resoluble. Si el intervalo viable de operación no permite distinguirlas, se informa un

conjunto de parámetros compatibles o se fija uno mediante una hipótesis explícita. No se declara identificado el parámetro que el algoritmo haya elegido por conveniencia numérica.

Fracción retirada, concentración o carga

Ajustar $r=1-C_{out}/C_{in}$ facilita comparar fracciones, pero introduce a C_{in} en el denominador y comparte su error con la respuesta. A entradas bajas, el cociente puede amplificar incertidumbre. Ajustar C_{out} en unidades físicas cambia la ponderación: una desviación absoluta igual tiene significados relativos distintos según la matriz. Ajustar cargas incorpora caudal y volumen, pero también sus errores. No existe una transformación que elimine automáticamente todos estos problemas.

La función objetivo debe corresponder al uso previsto. Si interesa predecir calidad final, el error de concentración merece protagonismo. Si interesa masa retirada y consumo específico, se necesitan cargas comparables. Conviene informar ambos resultados cuando existan datos adecuados, sin cambiar de métrica después de ver cuál favorece más al modelo. Pesos basados en incertidumbre requieren incertidumbres justificadas; no se inventan para mejorar el aspecto del ajuste.

Ejemplo 2: mismo porcentaje, distinta importancia másica

Supónganse dos escenarios sintéticos de igual caudal neto 10 m³/día, con entradas de 100 y 1000 mg/L. Un error de diez puntos porcentuales en retirada equivale, respectivamente, a 10 y 100 mg/L de error en salida, o 0,1 y 1 kg/día en carga. Una regresión no ponderada de fracciones les asignaría el mismo error cuadrático, aunque su diferencia másica sea diez veces distinta.

El ejercicio no prescribe favorecer siempre la carga mayor: un objetivo de baja concentración podría hacer más importante el primer escenario. Obliga a declarar la finalidad de la pérdida estadística. Para comparaciones entre matrices se recomienda conservar tablas de error por concentración, carga y grupo, en vez de resumir toda la campaña con un único coeficiente de determinación.

Separación de entrenamiento y contraste

Las filas de una misma instalación, lote o campaña comparten características. Repartir aleatoriamente alícuotas del mismo lote entre entrenamiento y validación produce fuga de información: el modelo ve durante el ajuste parte de aquello que supuestamente debía predecir. La partición se realiza por grupos coherentes con el uso futuro. Para transferencia entre instalaciones, se reservan instalaciones; para nuevos lotes en una instalación conocida, se reservan lotes o periodos completos.

La selección de variables, normalización, imputación y elección de hiperparámetros se realizan dentro del conjunto de entrenamiento. Si se usan repetidamente resultados de validación para decidir, ese conjunto deja de ser un contraste final independiente. Un grupo final reservado puede proteger la evaluación, siempre que su tamaño y diversidad permitan responder a la pregunta. Con pocos grupos, la variabilidad de transferencia puede seguir siendo muy incierta.

Una validación agrupada propuesta podría dejar fuera cada instalación por turno para explorar transferibilidad, manteniendo juntas sus campañas. Es un diseño posible, no un análisis aplicado aquí. Debe explicarse si el objetivo es interpolar condiciones conocidas o extrapolar matrices y escalas nuevas; una buena interpolación no acredita automáticamente la segunda tarea.

Incertidumbre condicional, no intervalos inventados

Hay incertidumbre analítica, de muestreo, de entradas operativas, paramétrica y de estructura. Un intervalo que propaga solo error de caudal y concentración no cubre la posibilidad de que la ecuación sea inadecuada. Debe rotularse como condicional a la versión, los supuestos y las distribuciones utilizadas. Variar deliberadamente entradas en una cuadrícula produce escenarios de sensibilidad, no probabilidades ni intervalos de confianza.

Los resultados censurados requieren conservar su límite en el ajuste propuesto, mediante una función compatible con censura o un análisis de intervalos justificado. Reemplazarlos todos por cero modifica artificialmente el residual. Un remuestreo por grupos podría evaluar variabilidad entre unidades independientes, pero no crea grupos inexistentes ni corrige falta de cobertura. Sin datos suficientes, la respuesta honesta es incertidumbre no cuantificada, acompañada de la medición que permitiría reducirla.

Sensibilidad y reglas discontinuas del código

Dentro de una rama suave puede calcularse una derivada local. En T1 2.3 hay cambios de regla que exigen otra lectura: el multiplicador de exposición cambia al alcanzar $c=12$, los agrupamientos de etapas pueden variar discretamente y la salida aplica suelos. Una diferencia finita que cruce estas fronteras mezcla sensibilidad local con salto programado. No debe interpretarse como constante cinética ni transición física observada.

Los suelos son 3 para DBO, 15 para DQO, 5 para SST, 2 para N y 0,2 para P, con las unidades propias de cada parámetro. No son límites analíticos. Cuando la entrada está por debajo del suelo, la salida calculada puede superarla; ese comportamiento se conserva como limitación del código y se excluye de interpretación física, sin modificar el motor para este capítulo.

Ejemplo 3: auditar fronteras sin recalibrar

El tercer miniprotocolo ejecuta el mismo escenario a $c=11,999$, 12 y 12,001, manteniendo las demás entradas. Registra salida, rama activa y diferencias, sin ajustar una curva suave a los tres puntos. Otra serie sitúa concentraciones a ambos lados de cada suelo y comprueba si el cálculo representa retirada interpretable. Los casos son pruebas del software, no ensayos de agua.

Después se varía una entrada cada vez en zonas interiores y se complementa con combinaciones seleccionadas, porque pueden existir interacciones. Se conserva la configuración efectiva y se contrastan resultados con el banco reproducible. Cualquier alternativa futura, como una aproximación suave o un modelo explícito de residual, necesitaría nueva versión, criterios previos y evaluación reservada. Este capítulo propone cómo aprender de los datos; no atribuye a T1 2.3 una calibración que aún no está públicamente documentada.

13. Protocolo reproducible para investigadores e ingenieros

Formular una pregunta que el ensayo pueda responder

El protocolo convierte una incertidumbre de diseño en una comparación interpretable. Su finalidad es contrastar el método comercial propietario Aguas SB T1, no presentar la actividad como un programa universitario ni convertir el ensayo en demostración promocional. Una campaña debe empezar por una pregunta principal: transferencia entre escalas, respuesta a exposición, efecto de separación o capacidad predictiva de una versión del modelo. Acumular objetivos sin priorización suele producir muchas mediciones y pocas conclusiones identificables.

La pregunta se traduce en resultado primario, contraste y criterio de aceptación antes de observar las respuestas. Por ejemplo, estudiar separación intermedia exige comparar configuraciones con exposición equivalente y registrar la materia retirada. Estudiar predicción exige congelar entradas, versión y reglas antes de abrir los resultados reservados. Los criterios deben expresar relevancia de ingeniería y precisión requerida, no limitarse a una significación estadística elegida después.

Prerregistro operativo

El registro previo identifica responsable, fecha, versión T1 2.3, configuración efectiva, unidades, pregunta, hipótesis, variables primarias y secundarias. Describe lotes, asignación de tratamientos, réplicas, puntos de muestreo, exclusiones admisibles y tratamiento de valores censurados. Incluye el plan de análisis y las condiciones que harían el ensayo inconcluyente. Puede mantenerse bajo control documental comercial; su función es establecer anterioridad y trazabilidad, no revelar información confidencial.

Conviene separar tres aceptaciones. La aceptación operativa confirma que el montaje funcionó dentro del intervalo permitido. La analítica confirma que los controles del laboratorio satisfacen criterios acordados. La aceptación de la hipótesis utiliza los resultados válidos del contraste. Fallar la primera o segunda puede impedir evaluar la tercera; no equivale a demostrar que el tratamiento funciona o no funciona. Las desviaciones se registran y se analizan con su alcance.

Agua de entrada, lote y preparación

Cada lote necesita un identificador, origen descrito sin datos públicos identificativos, condiciones de recogida, almacenamiento y preparación. La caracterización inicial se elige según la pregunta: DQO total y soluble, COT, sólidos, N total y formas de N, P, pH, conductividad, alcalinidad y temperatura cuando sean pertinentes. No es obligatorio medir todo en cualquier ensayo; sí justificar que las variables omitidas no impiden interpretar el resultado primario.

La homogeneización debe producir alícuotas comparables sin alterar innecesariamente la matriz. Se registran sedimentación previa, tamizado, filtración, dilución y adiciones. Una muestra preparada de otra forma constituye otra condición, aunque proceda del mismo recipiente original. El agua sintética sirve para aislar factores; el agua real permite investigar transferibilidad. Ninguna sustituye universalmente a la otra. La composición elegida y sus limitaciones forman parte de la evidencia.

Hidráulica y exposición antes de tratamiento

Se dibuja el circuito con depósito, alimentación, recirculación, purgas, módulos y separadores. Se mide volumen útil y caudal real en la condición operada. En paralelo se identifican ramas y reparto; en serie se conserva el caudal común y se cuentan separadamente los contactos con módulos. La exposición de lote es $c=Q_r \cdot t/V_b$ bajo condiciones constantes; cambios de caudal, volumen o periodos activos requieren integración y registro temporal.

Cuando la correspondencia de muestras depende de mezcla y residencia, se propone un ensayo de trazador compatible con la instalación y la matriz, previa evaluación de seguridad. La RTD se usa para diseñar ventanas AF/EF, no para corregir retrospectivamente cualquier discrepancia. El tiempo nominal V/Q no demuestra por sí solo ausencia de cortocircuitos. Las pruebas hidráulicas y químicas deben distinguirse si el trazador modifica las condiciones relevantes.

Ejemplo 1: serie de exposición en lote

El primer diseño propuesto usa un lote homogeneizado y puntos $c=0,1,2,4,8$, añadiendo otros si la pregunta lo requiere. Esta serie no es óptima universal ni recomendación de dosis. En un montaje sintético de $V_b=0,75 \text{ m}^3$ y $Q_r=3 \text{ m}^3/\text{h}$, los tiempos correspondientes son 0, 0,25, 0,5, 1 y 2 h. Son cálculos de programación, no resultados de eficacia.

Se toma la línea base antes del tratamiento y se registra el volumen de cada muestra. Si las extracciones alteran apreciablemente V_b , se actualiza la exposición integrada o se usan reactores independientes para cada punto. Las observaciones sucesivas de un mismo lote son una serie correlacionada, no cinco réplicas independientes. Si se investiga el salto programado de doce vueltas, se añaden puntos próximos a esa frontera, sin presumir un umbral físico.

Energía, carga eléctrica y materia

El registro temporal incluye potencia o energía integrada, corriente y tensión del circuito electroquímico, estado de electrodos, temperatura, presiones, caudal de gas y reactivos cuando existan. Se mantiene una frontera explícita de auxiliares. La energía específica se calcula con volumen neto tratado; la carga eléctrica, con corriente integrada y unidades coherentes. La ley de Faraday y su interpretación material se desarrollan en el capítulo 04, sin convertir su masa teórica en medición.

Se contabilizan líquido residual, muestras, lodo, espuma, reposiciones y separaciones. Se define antes del ensayo qué corrientes podrán analizarse y qué cierre será posible. Una reducción acuosa útil no exige demostrar mineralización, pero debe nombrarse correctamente. Si se propone mineralización o transformación de nitrógeno, el diseño necesita observables de destino específicos y no solo porcentajes de desaparición del agua.

Ejemplo 2: control hidráulico y separación equiparada

El segundo diseño divide lotes comparables entre recirculación sin separación intermedia y dos periodos de tratamiento con retirada de sólidos entre ellos. Se igualan, hasta donde el montaje permita, exposición total, carga eléctrica, dosis activa y condiciones térmicas. Se mide cualquier diferencia energética o hidráulica introducida por separar. Un control hidráulico adicional conserva circulación sin activar la operación investigada, siempre que sea técnicamente viable y seguro.

Si resulta imposible igualar todas las dosis, se declara qué contraste se ha obtenido realmente: comparación de configuraciones completas, no efecto puro de separación. Se analiza agua total y soluble, materia separada y recursos. La diferencia entre ramas puede apoyar una hipótesis

operacional, pero no acredita sinergia entre todos los mecanismos. Una interacción exige un diseño que permita estimar también las contribuciones pertinentes bajo condiciones comparables.

Réplicas, orden y estadística práctica

Una réplica independiente repite la unidad experimental pertinente; una segunda lectura de la misma alícuota evalúa otra fuente de variación. Deben etiquetarse por separado lote, reactor, corrida, muestra y lectura. Un piloto con, por ejemplo, tres corridas independientes por condición puede orientar sobre dispersión y viabilidad, pero no garantiza potencia estadística ni precisión suficiente. La cifra definitiva depende del efecto mínimo relevante, la variabilidad y la estructura de dependencia.

El orden se aleatoriza cuando sea posible y se bloquea por lote o jornada cuando esas diferencias sean importantes. Así se evita confundir un tratamiento con calentamiento progresivo, desgaste o envejecimiento de la muestra. El análisis informa magnitud de efecto, dispersión, tamaño muestral y resultados individuales pertinentes. Un valor p aislado no reemplaza relevancia técnica ni cobertura de matrices. Las pérdidas y fallos permanecen en el diagrama de seguimiento.

Ejemplo 3: predicción reservada y aceptación

El tercer diseño separa lotes completos para desarrollo y contraste. Antes de conocer el grupo reservado se archivan entradas, salidas previstas por T1 2.3 y criterios de error aceptable definidos para la decisión de ingeniería. Se comparan concentración, carga cuando proceda y energía, manteniendo límites analíticos. No se fija aquí una tolerancia universal: debe corresponder al método de medida y al uso previsto.

Si la predicción falla, se examinan calidad de datos, correspondencia hidráulica y dominio del modelo. Una explicación posterior puede generar una nueva hipótesis, pero no convierte el mismo conjunto reservado en validación independiente de un reajuste. Cualquier calibración futura se versiona y necesita otro contraste. Una prueba inconcluyente se comunica como tal, sin seleccionar únicamente analitos o condiciones favorables.

Primer contraste acotado y criterio de decisión

El primer contraste puede reunir los diseños anteriores sin intentar validar todos los mecanismos a la vez. Se elige una matriz, una configuración y una respuesta primaria; se registra un lote de desarrollo y se reserva otro lote independiente para evaluar la predicción antes de reajustar. La circulación de control, el tren activado y la separación equiparada se comparan solo cuando el montaje permita distinguirlos con seguridad. No se crean controles nominales que cambien a la vez todas las condiciones.

La decisión queda predefinida: reproducir la curva permite aceptar esa representación únicamente dentro de las condiciones ensayadas; un sesgo relevante exige restringir el dominio o proponer otra parametrización; datos hidráulicos, analíticos o energéticos insuficientes dejan la pregunta inconcluyente. Una pareja de concentraciones puede mostrar retirada, pero no identificar simultáneamente velocidad, techo y efecto de separación. No se ajustan todos los factores a esa misma pareja.

Este contraste tampoco verifica por extensión todas las matrices, tamaños, opciones químicas o combinaciones en serie. Su valor es resolver una incertidumbre prioritaria y dejar un resultado transferible con límites, no convertir un piloto favorable en validación universal.

Seguridad, calidad y entrega reproducible

La operación requiere evaluación de riesgos eléctricos, presión, gases, productos químicos y residuos por personal competente. El protocolo no prescribe combinaciones reactivas ni atmósferas improvisadas. El laboratorio define conservación, neutralización de oxidantes e interferencias según sus métodos; blancos, controles positivos y duplicados comprueban calidad analítica. Cavidades de vapor y burbujas de aire se caracterizan de forma distinta, y las observaciones de pH no alteran automáticamente el motor.

La entrega incluye protocolo y desviaciones, esquema, datos originales y normalizados, diccionario de unidades, configuración, registro energético y material, reglas de exclusión y resultados de contraste. Se separan públicamente escenarios sintéticos, mediciones autorizadas y salidas de modelo. El banco de reproducibilidad verifica la ejecución congelada; el ensayo verifica hipótesis bajo condiciones concretas. El resultado valioso es una conclusión repetible, incluso cuando refuta una expectativa comercial o delimita un dominio menor del previsto.

14. De una analítica a una comparación válida

Una analítica puede acreditar una concentración con mucho rigor y, al mismo tiempo, no permitir calcular el rendimiento del equipo. La diferencia reside en la pregunta. Una muestra de salida responde qué había en esa muestra; una pareja bien relacionada permite estimar cambio; una serie temporal ayuda a identificar respuesta; una comparación con controles permite atribuir diferencias a una operación.

El método utiliza evidencia de aplicación para orientar hipótesis y diseño. Esta edición pública no reproduce expedientes comerciales ni identifica instalaciones. Los ejemplos de este capítulo son inventados para explicar el procedimiento, no versiones disfrazadas de clientes. Las referencias publicadas mantienen la atribución y las condiciones de sus autores.

Mediciones internas y ejemplos públicos

La preparación del método localizó informes de laboratorio con parejas de entrada y salida, registros de aplicación a planta y otros resultados de salida sin entrada comparable. Su existencia no se confunde con los ejemplos sintéticos publicados. Tampoco se presenta su conjunto como una calibración del motor: la correspondencia entre lote, tren, separación, dosis y exposición debe examinarse caso por caso.

El contraste real prioritario es una pareja analítica recuperable asociada a un ensayo de tratamiento combinado. Se mantiene en el expediente interno hasta resolver permiso, identificabilidad y condiciones necesarias para comparar. La edición pública no utiliza sus concentraciones ni un alias para insinuar validación que el lector no pueda reproducir. Un caso histórico ya examinado tampoco será un ensayo reservado independiente de una futura calibración.

Cuatro tipos de evidencia útiles

Una **salida aislada** puede mostrar que se obtuvo determinada calidad en un momento. Es relevante para operación y para decidir qué investigar después. No permite calcular una eliminación sin entrada comparable ni afirmar que se mantuvo esa calidad durante todo el año.

Una **pareja entrada/salida** añade capacidad de cálculo si representa el mismo lote o un periodo hidráulicamente emparejado. Necesita unidades, métodos, conservación y separación consistentes. Si cambió el volumen por adición de agua, el porcentaje de concentración debe acompañarse de un balance de masa.

Una **serie de respuesta** contiene varios tiempos o niveles de exposición. Ayuda a separar una respuesta rápida de otra lenta y a investigar una meseta. Pero si cada punto procede de un agua distinta, la curva mezcla variación de matriz y exposición.

Un **contraste independiente** evalúa una predicción que estaba fijada antes de observar el resultado reservado. Su independencia no depende solo de que el laboratorio sea externo: un resultado usado para seleccionar coeficientes no se vuelve validación independiente al medirlo una segunda vez sobre el mismo caso.

Frontera del sistema

Una entrada a planta y una salida final incluyen todo lo que ocurre entre ambos puntos: ecualización, procesos previos, recirculaciones internas, separaciones y tratamiento posterior. El rendimiento de esa pareja pertenece a la frontera de planta. Para atribuir una contribución a T1 se necesitan puntos que delimiten el módulo o controles que separen su efecto.

Esta distinción permite aprovechar un buen resultado sin exagerarlo. «La instalación alcanzó esta salida mientras utilizaba el tren» y «el módulo por sí solo produjo toda la reducción» son afirmaciones diferentes. La segunda necesita más información que la primera.

Ejemplo sintético: entrada general 800 mg DQO/L, entrada al módulo 300 y salida final 80. El conjunto reduce 90 % respecto a 800, pero no se puede asignar ese 90 % al módulo. Incluso el cambio 300 a 80 puede incluir separación posterior. El diagrama de proceso decide qué frontera corresponde a cada porcentaje.

Concentración y masa

La carga de una corriente con volumen V en m³ y concentración C en mg/L es $M=V \cdot C/1000$, en kg. Si entran 10 m³ a 1000 mg/L y salen 12 m³ a 500 mg/L, la concentración cae 50 %, pero la carga acuosa pasa de 10 a 6 kg: 40 % menos. Los 2 m³ añadidos explican parte de la caída de concentración.

Si hay varias salidas, se suman sus cargas. Una purga no desaparece del balance porque no sea la corriente principal. Para sólidos y espuma se necesitan masas y composición, no solo volumen aparente. El cierre imperfecto debe informarse; no se asigna automáticamente a mineralización lo que no se midió.

La DQO es una medida operacional de demanda equivalente de oxígeno, no una báscula directa de carbono. Su disminución puede combinar retirada de materia, cambios de oxidabilidad y oxidación. El COT aporta otra perspectiva; tampoco debe interpretarse sin conocer qué fases se analizaron.

Valores inferiores al límite

Un informe $C_{out} < 20$ mg/L no dice que la concentración sea exactamente 20 ni cero. Con entrada medida de 500 mg/L, bajo correspondencia de muestras y la misma base analítica, la eliminación de concentración es mayor del 96 %. La incertidumbre de entrada y método puede requerir una interpretación adicional.

En una gráfica puede mostrarse un intervalo o un símbolo de censura. Para un ajuste estadístico deben utilizarse métodos compatibles con datos censurados, o presentar sensibilidad al tratamiento elegido. Reemplazar todos los valores por la mitad del límite es una decisión de análisis, no recuperar el valor que el laboratorio no cuantificó.

El suelo del simulador es distinto del límite de cuantificación. Un mínimo programado de 15 mg/L no significa que un laboratorio sea incapaz de medir por debajo de 15. Confundir ambos produce una aparente concordancia que no representa un contraste real.

Cómo comparar predicción y observación

Primero se fija el objeto: concentración final, carga retirada, energía específica o una combinación. Después se reúnen entrada y condiciones equivalentes. Si falta el horario real, no se escoge el que hace coincidir mejor el resultado y se presenta después como dato observado.

Puede construirse una banda de escenarios para horarios desconocidos, etiquetada como sensibilidad. Su utilidad es identificar qué registro faltante reduciría más la incertidumbre. No es un intervalo estadístico de confianza ni una reconstrucción probada del ensayo.

Una comparación completa conserva también resultados desfavorables. Si disminuye DQO pero aumenta SST antes de separar, eso puede ser compatible con formación de flóculo; si SST aumenta en la salida final, es una cuestión operativa que no debe ocultarse bajo el porcentaje de DQO. La interpretación depende del punto y momento de muestra.

Los residuos de predicción deben expresarse en unidades físicas y con signo. En un ejemplo sintético, predecir 100 y medir 180 mg/L produce una infrapredicción de salida de 80 mg/L, importante aunque ambos valores parezcan bajos frente a la entrada. Una media global puede ocultar errores sistemáticos precisamente en el rango cercano al objetivo.

Evidencia que cambia una decisión

Antes de pedir un nuevo análisis, conviene preguntar qué decisión cambiaría. Para saber si basta más tiempo, una serie de exposición puede ser más útil que otra salida aislada. Para saber si hay transferencia a lodo, interesa cerrar fases. Para conocer el ahorro, interesa submedición a igual calidad. Para separar geometría de matriz, interesa dividir un mismo lote entre condiciones.

Este criterio evita campañas grandes pero poco informativas. No exige medirlo todo en cada ensayo: exige que lo medido responda a la pregunta. Un dato ausente se convierte en una tarea concreta en lugar de una duda general sobre el trabajo realizado.

La documentación comercial puede contener observaciones valiosas sin un diseño experimental original completo. Conservar su alcance correcto permite utilizarlas: evidencia de factibilidad, calidad alcanzada o mecanismo plausible. El paso posterior es planificar el contraste específico, no inventar la información que no se registró.

Publicación y trazabilidad

Los resultados destinados a publicación necesitan autorización y una revisión de identificabilidad. Quitar el nombre no elimina necesariamente la identificación por combinación de sector, ubicación, fechas y valores singulares. La versión pública y la ficha interna pueden conservar distinto detalle sin perder coherencia.

Para una publicación autorizada, la ficha debe incluir qué se ensayó, qué se midió, qué se infirió y qué parte del resultado reproduce el motor. La referencia recuperable puede ser un informe técnico compartible, un conjunto de datos o un artículo. Una imagen atractiva del agua no sustituye esas relaciones, aunque sea útil para describir el montaje.

La evidencia más convincente no es la que carece de reservas, sino la que permite reconstruir el cálculo y entender por qué el resultado pertenece a ese sistema y esas condiciones. Así se puede ampliar el corpus sin convertir cada caso en una afirmación universal.

15. Ejemplos calculados y reproducción

Todos los casos de este capítulo son sintéticos. Algunos ejecutan directamente el núcleo T1 2.3; otros son balances independientes utilizados para interpretar sus entradas y salidas. Mantener esa separación permite detectar un error del modelo, de las unidades o del esquema sin confundirlos.

Ejemplo 1: cuatro vueltas no son 94 % de DQO

Se adopta entrada DQO 500, DBO5 250, SST 220, N 40 y P 8 mg/L; pH 7,2 y fracción amoniacal 0,8. DQO/DBO=2, por lo que la matriz no recibe penalización en este escenario. Con un T1-16, cuatro vueltas y sin opciones químicas, el techo DQO es 0,64 y el factor de exposición 0,9375.

```
r_DQO = 0,64 * 0,9375 = 0,60
DQO_salida = 500 * (1-0,60) = 200 mg O2/L
r_DBO = 0,72 * 0,9375 = 0,675
DBO_salida = 250 * (1-0,675) = 81,25 mg O2/L
```

Estos resultados se verifican ejecutando el JavaScript congelado. El 93,75 % mide el acercamiento al techo, no la eliminación de toda la concentración. Confundir ambos valores exageraría de forma importante la capacidad propuesta.

Ejemplo 2: una vuelta adicional

En la misma rama, a cinco vueltas $A=0,96875$, por lo que la reducción DQO es 62 % y la salida 190 mg/L. Frente a cuatro vueltas, una exposición adicional mejora diez mg/L. El coste energético de esa exposición no disminuye porque el beneficio sea menor.

Con potencia declarada 1,925 kW y caudal nominal 15 m3/h, cada vuelta cuesta $P/q=0,128333$ kWh/m3. Pasar de cuatro a cinco añade esa energía para retirar 0,010 kg DQO/m3 adicionales en este ejemplo: 12,8333 kWh/kg de retirada marginal. No contradice el consumo medio menor del tratamiento completo; responde a otra pregunta.

Ejemplo 3: horario y volumen

Para 75 m3/día, una unidad de 15 m3/h durante 20 h/día proporciona $c_d=15*20/75=4$. La energía estimada es $1,925*20=38,5$ kWh/día, o 0,513333 kWh/m3.

Si la producción sube a 100 m3/día sin cambiar equipo ni horario, el índice cae a tres. Mantener cuatro requeriría 26,6667 horas de una sola unidad en el mismo día, físicamente imposible. Debe cambiarse capacidad, estrategia de almacenamiento, periodo o configuración. Un cálculo que devuelve más de 24 horas diarias no es un horario operativo aceptable.

Ejemplo 4: tres tamaños a igual exposición

Usando las potencias declaradas del núcleo y caudales nominales, a cuatro vueltas:

Modelo	q, m3/h	P, kW	E/V, kWh/m3
T1-16	15	1,925	0,513333
T1-32	30	2,425	0,323333
T1-50	60	3,850	0,256667

La diferencia procede de P/q, no demuestra por sí sola igualdad química entre tamaños. Para comparar rendimiento deben mantenerse o medirse otras exposiciones. Tampoco incluye automáticamente cualquier auxiliar exterior a la potencia declarada.

Ejemplo 5: objetivo alcanzable y objetivo fuera de rama

Con techo fijo 0,64, bajar de 500 a 250 mg/L exige 50 % de reducción. La inversión da $c = -\ln(1-0,5/0,64)/\ln(2) = 2,192645$. La regla mínima orientativa de la unidad puede exigir mayor exposición que esa solución matemática. El objetivo matemático y el criterio comercial de operación son comprobaciones distintas.

Bajar de 500 a 125 mg/L exige 75 %, superior al techo fijo. No existe solución de tiempo en esa rama. El motor completo contiene bonos y etapas, por lo que debe ejecutarse la configuración concreta; no se puede prolongar esta inversión a través de cambios de regla. Que otra configuración prediga el objetivo no equivale a que haya sido validada experimentalmente.

Ejemplo 6: igual concentración, distinta carga

Dos aguas tienen 500 mg DQO/L. A 30 m3/día entran 15 kg/día; a 300 m3/día entran 150 kg/día. Un porcentaje igual multiplica por diez la carga retirada necesaria. Si el tiempo y la corriente de una sola unidad no cambian, la dosis eléctrica por volumen cae al aumentar producción.

Esta cuenta explica por qué «la misma agua» no implica la misma instalación. Composición y cantidad son variables distintas. También explica por qué deben comunicarse caudal tratado y recirculación: una bomba de 15 m3/h no produce automáticamente 360 m3 diarios de agua tratada al objetivo.

Ejemplo 7: dos interpretaciones de una segunda etapa

Partiendo de 500 mg/L, una primera etapa que retira 60 % deja 200. Una segunda que retirase 50 % de ese remanente dejaría 100: 80 % global. Es un balance correcto bajo esas eficacias, no una predicción experimental de T1.

Si se postula en cambio un residual persistente de 180 mg/L, ninguna repetición del mismo mecanismo puede reducirlo a 100 bajo esa hipótesis. La divergencia permite diseñar el ensayo: comprobar si la segunda etapa actúa sobre material todavía susceptible o si la primera meseta era persistente. Separar sólidos y controlar dosis ayuda a interpretar el resultado.

Ejemplo 8: ahorro neto con signos

Supóngase, exclusivamente para ilustrar el balance, que se evitan 6000 kWh/año de aireación y que el tratamiento añadido consume 9000 kWh/año, con 500 kWh/año auxiliares. El ahorro neto es $6000-9000-500 = -3500$ kWh/año. Hay un incremento energético aunque pueda existir otra utilidad, como cumplir un objetivo de calidad.

Si una optimización posterior permite evitar 14000 kWh/año con los mismos consumos añadidos, el ahorro neto sería 4500. La segunda cifra no sustituye la primera sin una condición operativa que la respalde. Ninguna de las dos es una medición de una EDAR concreta.

Ejemplo 9: resultado censurado

Con entrada 500 y salida <20 mg/L, el límite de reducción es >96 %, no 96 % exacto ni 100 %. Si el simulador da 19 mg/L, el dato censurado es compatible con ese resultado, pero no demuestra un error de solo 1 mg/L. Una concentración real de 2 o de 18 también sería compatible con el informe.

Ejemplo 10: discontinuidad conocida

En el escenario del ejemplo 1, ejecutar 11,999 y 12 vueltas revela el cambio del bono. La eliminación DQO salta aproximadamente 6,40 puntos porcentuales. Un ensayo físico a ambos lados permitiría investigar la continuidad real, pero el programa ya explica por qué aparece en la tabla: una condición discreta cambia de rama.

El comportamiento se conserva como prueba de regresión del núcleo, no como resultado a promocionar. Si una futura versión suaviza la transición, debe cambiar versión, registrar motivo y repetir los casos de comparación.

Reproducir y aportar un contraste

El paquete incluye el núcleo capturado, sus parámetros, entradas públicas y resultados. La ejecución local con Node.js no requiere API de IA ni enviar datos a un servidor. reproduce.cjs comprueba la versión y las salidas DQO/DBO a cuatro vueltas mediante tres aserciones. book_checks.cjs añade 33 comprobaciones concretas de ejemplos, conversiones y balances numéricos, identificadas en BOOK_CHECKS.json. No es un validador universal de unidades o balances: las aserciones acreditan consistencia computacional de esos casos, no validación científica.

Para aportar una comparación, conserve el JSON de entrada, nombre y hash de los activos, configuración y resultados. Añada después las mediciones con su procedencia y la frontera del ensayo. No cambie constantes antes de calcular el error del resultado reservado. Esta secuencia permite distinguir reproducción, evaluación y actualización del modelo.

Abrir el banco desde este PDF

Este PDF adjunta T1_REPRO_2_1.zip. Extráigalo mediante un visor compatible con adjuntos, función ausente en algunos navegadores, o utilice el mismo ZIP separado del paquete. El banco no se ejecuta al abrir el PDF: requiere Node.js instalado y ejecución voluntaria según su README, sin conexión ni API.

El archivo FILES_SHA256.json identifica el contenido del banco. Los hashes SHA-256 de los activos del núcleo capturado son:

```
t1_parametros.js
24f0d7e82a97efdc1c6310e35845e243225f2536ff9021d820fc10b8d970fc25
t1_motor_v2.js
5e306ae6953271efed422eccd9664b7a1d5c2353f6f552bb73e43556f888527d
```

La coincidencia acredita que se ejecutan los mismos bytes, no que los rendimientos estén medidos. El banco carga parámetros y después motor, sin configuración externa T1_CONFIG. Una modificación de configuración en la web exige registrar esa diferencia; la edición congelada no se actualiza automáticamente con el sitio.

16. Decisiones de diseño y preguntas difíciles

Un método útil no solo calcula una salida: ayuda a elegir la siguiente actuación. Este capítulo convierte los límites del modelo en decisiones concretas. El objetivo es distinguir cuándo basta corregir una entrada, cuándo hace falta medir y cuándo existe una cuestión de interpretación que debe resolverse antes de dimensionar.

¿Más vueltas o una configuración diferente?

Si el objetivo queda por debajo del techo efectivo y lejos de discontinuidades, la inversión de la curva ofrece una exposición inicial. Después se comprueban horas disponibles, capacidad hidráulica, energía y calidad. Si el objetivo supera ese techo, el mismo cálculo no tiene solución; añadir horas sin cambiar condiciones no resuelve la contradicción.

Una nueva etapa puede ser razonable cuando modifica una condición limitante, pero debe describirse físicamente. ¿Se retiran sólidos? ¿Se renueva la matriz? ¿Se aumenta dosis total? ¿Se conserva el mismo caudal? La respuesta permite separar un cambio real de instalación de una repetición numérica del porcentaje.

¿El modelo es conservador?

Puede haberse elegido una parametrización con intención prudente. Eso no convierte toda predicción en un límite inferior garantizado de rendimiento. Una matriz no representada, una separación insuficiente o un caudal distinto pueden producir un resultado peor. Para acreditar conservadurismo se necesita una distribución de errores de contraste dentro de un dominio definido.

La formulación operativa adecuada es «estimación de diseño bajo estas condiciones». Si existe margen, debe indicarse si es margen frente a concentración objetivo, exposición, carga o incertidumbre. Un 25 % sobre una variable no se traslada automáticamente a todas las demás.

¿Por qué una menor potencia no siempre ahorra energía?

Porque el balance incluye lo que realmente se evita. Una EDAR puede necesitar aireación mínima para mezcla o nitrificación aunque caiga parte de la carga orgánica. Si el consumo evitado es menor que el tratamiento añadido, el balance neto es negativo. Aun así, puede existir una ventaja de calidad, capacidad o materiales que debe evaluarse separadamente.

Para demostrar ahorro se comparan periodos o configuraciones equivalentes en caudal, carga y calidad final, con fronteras energéticas consistentes. No se redefine retrospectivamente la referencia hasta obtener un resultado positivo.

¿Una bajada de DQO acredita mineralización?

No por sí sola. La materia puede haberse transferido a flóculos, espuma u otra corriente. Tampoco una mejora de biodegradabilidad significa que ya se haya consumido biológicamente toda la materia. La siguiente medición depende de la afirmación: balance de fases, carbono orgánico/inorgánico, especies o seguimiento biológico.

Para diseño de vertido, retirar contaminantes del agua puede ser valioso aunque queden en lodo. La cuestión no es negar el rendimiento acuoso, sino presupuestar y gestionar su destino. Una comparación que omite residuos puede desplazar costes y riesgos fuera de la frontera elegida.

¿Se pueden sumar cuatro mecanismos?

Se pueden integrar operaciones, no sumar sus porcentajes como si actuaran sobre masas independientes. Una etapa cambia la alimentación de la siguiente; algunas interacciones favorecen y otras dificultan el resultado. La palabra sinergia requiere un referente calculado y controles comparables, no simplemente que el conjunto funcione.

Una pregunta más productiva es qué operación cambia la variable que limita a la siguiente. Por ejemplo, retirar partículas podría cambiar transferencia o demanda química. Es una hipótesis comprobable mediante controles, no una mejora numérica que deba incorporarse automáticamente al simulador.

¿Sirve cualquier artículo con una ecuación parecida?

La semejanza algebraica orienta, pero no resuelve la equivalencia física. Deben coincidir las definiciones de concentración, exposición y régimen. Un coeficiente de un contaminante modelo no se convierte en coeficiente DQO de agua industrial por compartir una exponencial.

Una referencia también puede ser útil precisamente por mostrar una diferencia: otra escala, otra energía, un residual importante o una respuesta adversa. Una bibliografía que conserva esos contraejemplos es más útil para ingeniería que una selección exclusiva de porcentajes altos.

¿Qué ocurre si la burbuja cambia?

Primero debe identificarse qué burbuja: gas aspirado para transferencia o cavidad transitoria cuyo colapso forma parte de la cavitación. Tamaño, distribución, contenido gaseoso, presión y residencia pueden cambiar efectos distintos. No existe en esta edición un coeficiente T1 medido que permita corregir universalmente por diámetro.

La decisión inmediata es registrar la geometría y condiciones relevantes. La decisión de modelo vendrá de un ensayo que varíe esa característica sin cambiar simultáneamente todos los demás factores. Así se incorpora conocimiento de la literatura sin inventar una precisión que los datos no proporcionan.

¿Qué debe provocar una revisión del dimensionamiento?

Un cambio importante de composición, sólidos, pH, salinidad, temperatura, caudal real o separación puede alterar la aplicabilidad. También un cambio de objetivo: un resultado aceptable para un uso no demuestra aptitud para otro. La revisión debe empezar por la variable modificada, no necesariamente por repetir todos los cálculos desde cero.

Observación	Comprobación prioritaria	Decisión posible
Caudal real menor	Exposición y presión	Recalcular horario
Salida con más sólidos	Punto de muestra y separación	Revisar retirada de flóculo
Meseta temprana	Dosis, fases y matriz	Diseñar prueba de límite
Ahorro negativo	Frontera y consumo evitado	Optimizar o conservar otro objetivo

¿Cuándo está listo un resultado para comunicar?

Cuando puede decirse qué se calculó o midió, con qué condiciones, qué significa y qué no significa. La comunicación puede ser breve sin ocultar la información decisiva. Un resultado reproducible debe permitir recuperar su configuración y fuente; los decimales por sí solos no aportan esa garantía.

Para un investigador, conviene comunicar primero la pregunta abierta y el contraste propuesto. Para un operador, la siguiente medición o ajuste. Para un cliente, el alcance orientativo y lo necesario para confirmar una solución. Son diferentes niveles de detalle sobre el mismo conocimiento, no versiones incompatibles de los hechos.

¿Qué cuenta como mejora del método?

Una mejora puede ser corregir unidades, identificar un límite o simplificar una variable redundante, no solo aumentar porcentajes. Debe conservar un caso de regresión que detecte el problema original y una explicación del cambio. Si se recalibra con datos nuevos, esos datos dejan de ser contraste independiente para esa versión.

La fortaleza del corpus reside en que una crítica precisa pueda transformarse en una prueba y, después, en una versión mejor. Mantener abiertas las hipótesis pertinentes no debilita la propuesta: evita que un error local invalide una arquitectura que sí resulta útil para dimensionar y aprender.

17. Contribución y evolución del método

La contribución de T1 es una propuesta de ingeniería expuesta de forma reproducible: conectar recirculación, composición, configuración y recursos de un tren combinado, y especificar qué observaciones permitirían mejorar esa conexión. Se publica una versión del modelo junto a sus supuestos, ejemplos y preguntas abiertas. Esto permite discutir el método sin confundir discusión científica con aceptación de una oferta comercial.

Qué puede aportar una formulación reducida

Un modelo reducido no resuelve todas las reacciones ni toda la dinámica del flujo. Selecciona variables que permiten estimar una respuesta en un dominio operativo. Puede ser útil aunque sus parámetros no tengan una interpretación mecánica única, siempre que su ámbito, errores y condiciones sean visibles.

El beneficio práctico es formular decisiones coherentes: cómo cambia la exposición al aumentar producción, cuánto cuesta una vuelta adicional, cuándo un objetivo queda fuera de la rama y qué dato falta para comparar una instalación. Resolver esas preguntas evita decisiones basadas únicamente en potencia nominal o un porcentaje recordado.

La contrapartida es que un parámetro agregado puede absorber varios mecanismos. Si se añade un factor de burbuja o temperatura sin comprobarlo, podría contarse dos veces un efecto ya contenido en la respuesta agregada. La ampliación del modelo debe demostrar utilidad predictiva, no solo añadir una explicación plausible.

Tres hipótesis que organizan el programa experimental

H1, exposición condicionada. Para una matriz y configuración estables, la respuesta puede representarse mediante una curva de exposición con parámetros efectivos. Se pone a prueba con series temporales y controles de dosis; una variación sistemática no explicada por la curva delimita el dominio.

H2, capacidad operativa renovable. Parte de una meseta puede depender de separación, disponibilidad de reactivo o transporte, y cambiar al renovar condiciones entre etapas. Se prueba comparando exposición total equivalente con y sin esa renovación. No presupone que todo residual sea tratable.

H3, escalado multivariable. Mantener vueltas no basta cuando cambian matriz, energía, carga eléctrica, presión, aireación o residencia. La transferencia entre escalas mejora si se registran esas diferencias y se identifica cuáles predicen el desvío. Un ensayo que conserva la curva a pesar de cambios grandes también es un resultado importante.

Estas hipótesis no son tres coeficientes nuevos ya incorporados al motor. Son un programa de contraste que utiliza la formulación actual como punto de partida y conserva explicaciones alternativas.

Cómo discutir con un investigador

La primera comparación debería responder una pregunta acotada. Por ejemplo: «su estudio describe rendimiento por pasada; nuestro núcleo usa una exposición efectiva. ¿Qué régimen y mediciones permitirían comparar ambos sin identificar fracción por visita con coeficiente exponencial?». La pregunta es más útil que pedir un aval general de la tecnología.

Una segunda discusión puede centrarse en escala: elegir un resultado publicado con condiciones conocidas, reproducir su balance con las definiciones originales y explicar qué variable de T1 carece de correspondencia. Cuando no exista equivalencia, debe conservarse la diferencia. La ausencia de una correspondencia exacta es información para diseñar el ensayo, no un motivo para forzar el ajuste.

El investigador no necesita aceptar todos los componentes para aportar valor. Puede contrastar la hidráulica, una dosis, una separación o el tratamiento estadístico. Una crítica que identifique un parámetro no identificable es una contribución al método aunque no produzca un porcentaje mejor.

De la respuesta a una nueva versión

Toda propuesta de cambio debe incluir observación, mecanismo posible, efecto esperado y prueba. Si solo mejora el ajuste sobre datos ya usados, todavía no establece mejor generalización. Debe reservarse un caso o condición antes del ajuste y evaluar el error sin modificar después el criterio de éxito.

Las nuevas versiones deben conservar configuración anterior, datos que motivaron el cambio y comparación de resultados. Una modificación de interfaz no debe alterar silenciosamente unidades o parámetros. Una traducción tampoco debe cambiar el régimen descrito o convertir «estimado» en «demostrado».

La continuidad del conocimiento depende de esa disciplina, no de un gran volumen de texto duplicado. Un mismo capítulo sirve para lectura humana, una ficha recuperable y explicación del simulador. Cuando cambia una ecuación, deben regenerarse ejemplos y documentos derivados desde la misma fuente editorial.

Qué significa cerrar esta edición

Cerrar una edición significa entregar definiciones consistentes, contenido completo, cálculos repetibles y límites claros para la evidencia disponible. No significa terminar para siempre la investigación. Un método científico aplicado puede estar editorialmente cerrado y seguir abierto a datos que modifiquen su interpretación.

La siguiente mejora de mayor valor no es añadir páginas indistintas. Es obtener un contraste que separe hipótesis hoy confundidas: exposición frente a dosis, separación frente a oxidación, techo operativo frente a residual persistente. El corpus permite que ese trabajo empiece con un lenguaje común y que sus resultados no dependan de la memoria de una sola persona.

18. Glosario y equivalencias de unidades

La notación debe conservar su significado entre el libro, el simulador y los datos de laboratorio. Las traducciones se relacionan aquí para evitar que un cambio de idioma altere la magnitud. Las concentraciones necesitan tanto unidad como base química.

Agua y carga

DQO / COD. Demanda química de oxígeno, expresada habitualmente en mg O₂/L. Describe la respuesta de un método analítico de oxidación. No es masa de carbono ni identifica por sí sola los compuestos.

DBO₅ / BOD₅. Demanda bioquímica de oxígeno medida bajo el método y periodo de cinco días. Sus condiciones analíticas importan; su cociente con DQO es un descriptor agregado, no un inventario de biodegradabilidad de cada sustancia.

SST / TSS. Sólidos suspendidos totales. La muestra y su separación previa determinan qué se cuantifica. Una medición tras decantar no equivale a una tomada del tanque mezclado.

COT / TOC. Carbono orgánico total bajo el método utilizado. Aporta información diferente de DQO; para discutir mineralización interesa conocer las fases y formas de carbono incluidas.

N total / total N. Masa expresada como elemento N. No se intercambia sin conversión con masa de ion amonio. El nitrógeno Kjeldahl no es automáticamente idéntico a N total cuando existen formas oxidadas.

P total / total P. Concentración expresada como elemento P. Si se informa fosfato como ion, debe conservarse esa base y convertirla de forma explícita antes de comparar.

Carga / load. Cantidad por periodo o lote. Con m³ y mg/L, $kg = V \cdot C / 1000$. Con m³/día, la misma operación produce kg/día. Concentración y carga responden a preguntas distintas.

Hidráulica y exposición

Q_r. Caudal de recirculación por el circuito, normalmente m³/h. Debe medirse en el punto de funcionamiento, no deducirse solo de una bomba nominal.

Q_f. Caudal de alimentación neta. En estacionario sin cambios de volumen ni otras entradas/salidas, coincide con el efluente neto, no con la recirculación.

V_b y V_d. Volumen útil de depósito y volumen tratado diario, respectivamente. Comparten dimensión de volumen, pero tienen significados diferentes.

c. Razón adimensional de exposición. En lote cerrado $Q_r \cdot t / V_b$; en el indicador diario $\sum(q \cdot h) / V_d$. Declarar qué definición se utiliza.

Pasada / pass. Exposición de una porción a una unidad. No equivale necesariamente a una vuelta media del depósito. En este libro «turnover» se reserva preferentemente para la razón hidráulica.

RTD. Distribución de tiempos de residencia. Describe cómo se reparte la permanencia y permite investigar cortocircuitos y zonas de intercambio lento.

Modelo y medida

theta. Techo efectivo de la rama que se está analizando. Solo puede considerarse constante al invertir una curva si las reglas y condiciones no cambian.

phi. Fracción eliminada por una visita física en un balance especificado. Un coeficiente exponencial efectivo no debe recibir el mismo valor por identidad de nombre.

Suelo / floor. Límite inferior numérico del programa. No es un límite de cuantificación del laboratorio ni una concentración residual demostrada.

Calibración. Uso de datos para elegir parámetros. **Validación independiente.** Comparación con resultados no utilizados para elegirlos, dentro de una pregunta y dominio declarados.

Sensibilidad. Variación de una salida al cambiar entradas o parámetros. No es una distribución probabilística salvo que exista un modelo explícito para esas variaciones.

Incertidumbre. Limitación del conocimiento de una magnitud o predicción. Puede incluir muestreo, análisis, parámetros y estructura; no se resume automáticamente en decimales.

Energía y materiales

P eléctrica. Potencia, kW. No confundir con P de fósforo: el contexto y subíndice deben distinguirlos. Energía es integral de potencia, kWh.

Carga eléctrica. I*t, en C si t está en segundos. Una hora equivale a 3600 segundos. No es carga contaminante.

Energía específica. kWh/m3 o kWh/kg retirado, indicando el contaminante y la frontera. Son denominadores distintos y requieren concentración para convertirse.

Eficiencia farádica. Relación de carga asociada a la reacción de interés respecto a carga suministrada, bajo la definición utilizada. Pérdida de electrodo puede incluir corrosión química y no debe confundirse con ese cociente sin balance.

kLa. Coeficiente volumétrico de transferencia, normalmente en h-1 o s-1. Convertir unidades antes de comparar. No es caudal de aire ni concentración de oxígeno.

OTR y OUR. Tasa de transferencia y tasa de consumo de oxígeno, respectivamente. El aumento de oxígeno disuelto resulta del balance de ambas y otras entradas/salidas.

Conversiones de uso frecuente

Desde	Hacia	Operación
L/min	m3/h	multiplicar por 0,06
mg/L	kg/m3	dividir entre 1000
m3/h constantes 24 h	m3/día	multiplicar por 24
mg NH4+/L	mg N/L	dividir entre 1,2878 en este núcleo
kPa	Pa	multiplicar por 1000
kW por horas	kWh	multiplicar

La conversión de caudal horario a volumen diario solo es válida para el periodo indicado. Si una planta funciona veinte horas, el volumen de ese horario se calcula con veinte. Un ajuste de interfaz que multiplique por 24 debe revisarse frente a la definición original del dato.

19. Bibliografía y alcance de consulta

Selección de veinte fuentes científicas y técnicas, no revisión sistemática mundial. Se distingue lectura de secciones, consulta de resumen y descripción institucional. La identidad bibliográfica no equivale a validación de parámetros T1.

R01 Modelling of vortex based hydrodynamic cavitation reactors

2019. [10.1016/j.cej.2018.08.025](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.025). Metadatos, resumen o extractos.

R02 Scale-up of vortex based hydrodynamic cavitation devices: A case of degradation of di-chloro aniline in water

2021. [10.1016/j.ultsonch.2020.105295](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105295). Secciones del texto completo.

R03 Performance evaluation of a novel pilot-scale pinned disc rotating generator of hydrodynamic cavitation

2021. [10.1016/j.ultsonch.2020.105431](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105431). Secciones del texto completo.

R04 Treatment of Solvent-Contaminated Water using Vortex-Based Cavitation: Influence of Operating Pressure Drop, Temperature, Aeration, and Reactor Scale

2018. [10.1021/acs.iecr.8b01688](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01688). Metadatos, resumen o extractos.

R05 Electrocoagulation and Hydrodynamic Cavitation, a Hybrid Process for Efficient COD Removal From Rice Mill Effluent

2026. [10.1002/wer.70555](https://doi.org/10.1002/wer.70555). Metadatos, resumen o extractos.

R06 Intensification of industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation combined with advanced oxidation at operating capacity of 70 L

2019. [10.1016/j.ultsonch.2018.12.016](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.016). Metadatos, resumen o extractos.

R07 Design and experimental evaluation of a Venturi and Venturi-Vortex microbubble aeration system

2022. [10.1016/j.heliyon.2022.e10824](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10824). Metadatos, resumen o extractos.

R08 Application of jetventurimixer for developing low-energy-demand and highly efficient aeration process of wastewater treatment

2022. [10.1016/j.heliyon.2022.e11096](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11096). Secciones del texto completo.

R09 Uncovering the key determinants of electrode passivation and faradaic efficiency in electrocoagulation: Depassivation and sustainable performance via polarity reversal

2025. [10.1016/j.envres.2025.121889](https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121889). Metadatos, resumen o extractos.

R10 Electrocoagulation treatment of cork boiling wastewater

2022. [10.1016/j.jece.2022.107750](https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107750). Metadatos, resumen o extractos.

R11 Electrocoagulation flotation as a municipal wastewater (pre-)treatment technology: Effect of weather conditions and current density

2023. [10.1016/j.jenvman.2023.118906](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118906). Metadatos, resumen o extractos.

R12 Electrochemical oxidation of COD from real textile wastewaters: Kinetic study and energy consumption

2017. [10.1016/j.chemosphere.2016.12.065](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.065). Metadatos, resumen o extractos.

R13 Analysis and Modeling of the Continuous Electro-oxidation Process for Organic Matter Removal in Urban Wastewater Treatment

2013. [10.1021/ie303021v](https://doi.org/10.1021/ie303021v). Metadatos, resumen o extractos.

R14 Performance analysis of a continuous serpentine flow reactor for electrochemical oxidation of synthetic and real textile wastewater: Energy consumption, mass transfer coefficient and economic analysis

2017. [10.1016/j.jenvman.2017.02.046](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.046). Metadatos, resumen o extractos.

R15 Modeling of Hydrodynamic Cavitation Reactors: Reflections on Present Status and Path Forward

2022. [10.1021/acsengineeringau.2c00025](https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.2c00025). Ecuaciones y discusión seleccionadas.

R16 Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales

2006. [madri+d](#). Ficha y descripción institucional; no lectura integral.

R17 Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación

2011. Pablo Santiago Hernández Lehmann. [10.20868/UPM.thesis.7755](https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.7755). Ficha y resumen; no lectura integral.

R18 Integration of traditional systems and advanced oxidation process technologies for the industrial treatment of olive mill wastewaters

2016. [10.1080/09593330.2016.1153158](https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1153158). Ficha y resumen; no lectura integral.

R19 Assessment of the formation of inorganic oxidation by-products during the electrocatalytic treatment of ammonium from landfill leachates

2012. [10.1016/j.watres.2012.02.015](https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.015). Ficha y resumen; no lectura integral.

R20 Toxic Byproduct Formation during Electrochemical Treatment of Latrine Wastewater

2017. [10.1021/acs.est.7b01002](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01002). Ficha y resumen; no lectura integral.

Lectura de las referencias

El año del DOI puede diferir del año del volumen. En la tesis UPM el autor es Hernández Lehmann y el director es Aurelio Hernández Muñoz. El informe de 2006 tiene una reseña institucional publicada en 2007. Los capítulos atribuyen cada afirmación al proceso y condiciones pertinentes; una cita no convierte el estudio en ensayo del equipo T1.