

Desalación 5.0

La próxima revolución no será una membrana



Introducción

La ósmosis inversa de agua de mar ha madurado hasta un punto paradójico: cuanto más eficiente se vuelve la planta, más evidente resulta que la planta no es el sistema. Este artículo propone Desalación 5.0 como una arquitectura de decisión que integra agua, energía, activos, recursos, inteligencia, ambiente y resiliencia en el punto de consumo. Chile funciona como prueba de estrés porque conecta el Pacífico con operaciones interiores y de gran altitud, haciendo visible una realidad que el consumo específico de energía de planta puede ocultar: a) Transportar el agua puede demandar más energía que producirla. Para ello se presentan dos métricas conceptuales System Specific Energy Consumption (SSEC) y Levelized Cost of Delivered Water (LCODW) para evaluar el servicio hídrico realmente entregado. No se proponen todavía como estándares, sino como una agenda verificable para comparar alternativas, transparentar fronteras y evitar que la optimización fragmentada sub-optimize el sistema completo. La tesis es sencilla y exigente: b) La siguiente ventaja competitiva no será un equipo aislado, sino la capacidad de diseñar, operar y gobernar una infraestructura hídrica que aprenda, resista y entregue un producto final con alta calidad y eficiencia.

1. El éxito de la planta hizo visible el límite del sistema

Durante décadas, la pregunta dominante fue cómo extraer sales del agua de mar con menos energía, menor costo y mayor confiabilidad. La industria respondió con membranas de mayor permeabilidad, dispositivos isobáricos de recuperación de energía, pretratamientos más robustos, bombas eficientes y control avanzado. El resultado es notable: análisis recientes sitúan a grandes plantas SWRO de última generación alrededor de 2,8 kWh/m³, mientras que la literatura reporta un intervalo típico de 2,5 a 4,0 kWh/m³ según salinidad, recuperación, calidad de producto y frontera de medición [3,4]. Incluso se han demostrado valores experimentales inferiores en instalaciones de menor escala y condiciones específicas; son hitos relevantes, pero no autorizan a comparar proyectos sin normalizar contexto, calidad y disponibilidad.

La mejora debe continuar. Sin embargo, el indicador que permitió optimizar la separación puede inducir una ilusión cuando se usa para describir el servicio completo. El agua no adquiere valor al cruzar la última membrana: lo adquiere cuando llega, conforme y en calidad, al punto donde una ciudad, una industria o una operación crítica puede utilizarla. Entre ambos puntos aparecen captación, postratamiento, almacenamiento, impulsión, ductos, reservorios, distribución, energía, mantenimiento, ciberseguridad, permisos y contingencias. La frontera correcta deja de ser el límite de batería de la planta y pasa a ser el límite contractual y social de la entrega.

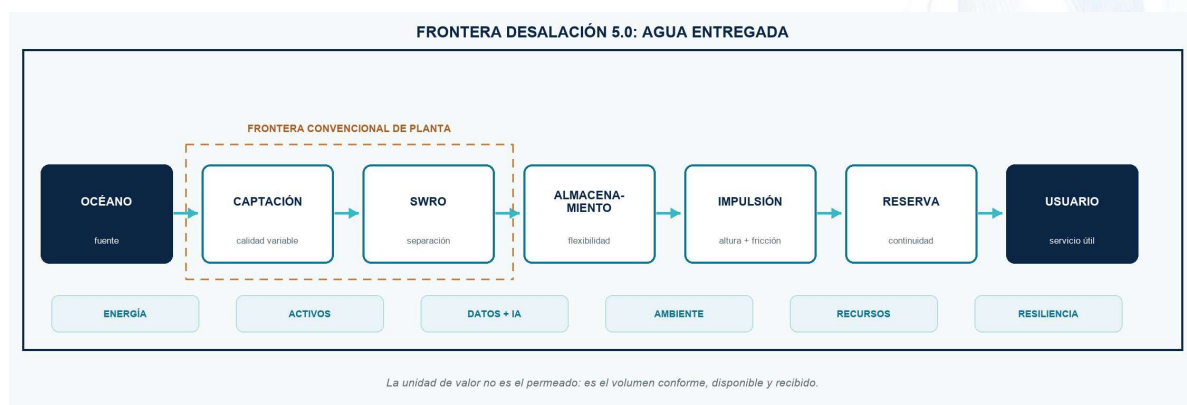


Figura 1. De la eficiencia de planta a la arquitectura de agua entregada. Elaboración original.

2. Desalación 5.0: Integrar antes de optimizar

Desalación 5.0 se propone como una taxonomía heurística, no como una periodización histórica aceptada. La etapa 1.0 representa la separación básica; 2.0, la consolidación de membranas; 3.0, la recuperación de energía y la escala industrial; 4.0, la digitalización y la incorporación progresiva de electricidad de menor carbono. La quinta etapa o 5.0, no sustituye esas conquistas: las conecta bajo una función de valor común. Agua, energía, recursos, activos, inteligencia, ambiente y resiliencia dejan de administrarse como paquetes independientes.

La consecuencia técnica es profunda. La planta deja de ser el producto final y pasa a ser un nodo dentro de una infraestructura territorial. La consecuencia gerencial es igual de importante: CAPEX, OPEX, disponibilidad, redundancia, obsolescencia, corrosión, ciberseguridad, exposición climática, licencia social y costo de interrupción deben resolverse como variables acopladas. Una solución que minimiza energía en la costa puede maximizar riesgo en la cordillera; una reserva que aumenta CAPEX puede evitar pérdidas de producción muy superiores; un contrato de energía barato puede transferir volatilidad o carbono al sistema. La investigación sobre hubs integrados de agua, energía y recursos

ya apunta en esta dirección. La contribución de Desalación 5.0 es fijar el resultado que debe gobernarla: seguridad hídrica entregada y verificable.

3. Chile: Cuando la geografía entra en la ecuación

El norte de Chile convierte la abstracción en física. Allí, la escasez hídrica convive con operaciones mineras situadas a cientos de kilómetros de la costa y, con frecuencia, a elevaciones significativas. La infraestructura debe unir el Pacífico con la cordillera de los Andes. No es sólo desalación: es hidráulica de alta carga, continuidad eléctrica, integridad de ductos, almacenamiento estratégico y operación remota bajo condiciones extremas.

$$e_{elev} = \rho \cdot g \cdot H / (3,6 \times 10^6 \cdot \eta) \approx 0,002725 \cdot H / \eta \text{ [kWh/m}^3\text{]}$$

Ecuación 1. H es la elevación neta y η la eficiencia compuesta desde la alimentación eléctrica hasta el agua impulsada. No incluye fricción, pérdidas singulares ni auxiliares; expresa un piso físico.

El orden de magnitud cambia la conversación. Elevar 1 m^3 a 1.000 m requiere idealmente $2,73 \text{ kWh}$; con una eficiencia compuesta de $0,80$, exige $3,41 \text{ kWh}$ antes de sumar fricción. A 3.000 m , el piso asciende a $8,18 \text{ kWh/m}^3$ y el valor con $\eta = 0,80$ a $10,22 \text{ kWh/m}^3$. En ciertos sistemas, por tanto, mover el agua puede demandar varias veces la energía de separarla.

Las proyecciones oficiales confirman la escala estratégica. Cochilco estima que el agua de mar pasará de $40,7\%$ del suministro hídrico de la minería del cobre en 2024 a $67,6\%$ en 2034; su uso aumentaría de $7,5$ a $13,9 \text{ m}^3/\text{s}$ [1]. En la proyección eléctrica 2025-2034, desalación e impulsión crecerían de $3,4$ a $5,4 \text{ TWh}$, y la impulsión representaría $81,7\%$ del consumo eléctrico asociado al uso de agua de mar en 2034 [2]. Son proyecciones, no destinos inevitables, pero revelan dónde se concentra el desafío: en el sistema que conecta la fuente con la demanda.



Figura 2. Chile como prueba de estrés conceptual: costa, impulsión, elevación, reserva y entrega. Ilustración original; no representa un proyecto real.

4. Medir el agua donde genera valor

4.1 SSEC: Energía específica del sistema

El SEC convencional sigue siendo indispensable para comparar procesos. El error comienza cuando se interpreta como la energía total del agua entregada. Se propone denominar SSEC al consumo específico de energía del sistema, calculado sobre el volumen conforme recibido en el punto contractual. La frontera, el período, la calidad, la presión y las reglas de asignación deben declararse de forma explícita.

$$\text{SSEC} = (\text{Ecap} + \text{Etrat} + \text{ERO} + \text{Epost} + \text{Ealm} + \text{Eimp} + \text{Edist}) / \text{Ventregado}$$

Ecuación 2. Incluye captación, tratamiento, RO, postratamiento, almacenamiento, impulsión y distribución. Ventregado es el volumen que cumple calidad, presión y disponibilidad definidas. Generación propia, exportaciones y energía recuperada deben informarse por separado para evitar doble contabilidad.

SSEC permite comparar arquitecturas que el SEC de planta puede presentar como equivalentes: una instalación costera con demanda cercana, una red regional con almacenamiento o una operación en altura. También castiga de forma transparente las pérdidas y la indisponibilidad, porque el denominador no es el agua producida sino el agua útil recibida. Su riesgo es metodológico: sin límites comunes, dos SSEC pueden parecer comparables sin serlo.

4.2 LCODW: Costo nivelado del agua entregada

El costo nivelado de producción tampoco representa necesariamente el costo del servicio. LCODW extiende la evaluación económica a toda la vida útil e incorpora únicamente costos atribuibles y auditables. La confiabilidad aparece en el volumen efectivamente entregado y, cuando exista evidencia probabilística suficiente, en el costo esperado de fallas y contingencias.

$$\text{LCODW} = \frac{\sum[(\text{CAPEX}_t + \text{OPEX}_t + M_t + \text{Camb}_t + \text{Criesgo}_t)/(1+r)^t]}{\sum[\text{Ventregado}_t/(1+r)^t]}$$

Ecuación 3. r es la tasa real de descuento. M incluye mantenimiento, reposiciones y obsolescencia planificada; Camb , costos ambientales internalizados; Criesgo , sólo consecuencias monetizadas con trazabilidad.

LCODW no reemplaza un modelo financiero. Lo disciplina. Permite confrontar menor inversión inicial con más almacenamiento, redundancia, otra ruta de ducto, generación renovable, contratos de energía o mantenimiento basado en condición. Un sistema barato en la costa puede ser caro en el punto de uso; uno más intensivo en capital puede reducir energía, indisponibilidad y exposición durante décadas. SSEC y LCODW deben leerse juntos y acompañarse de disponibilidad, carbono e impacto ambiental, sin esconder esas dimensiones dentro de un único índice opaco.

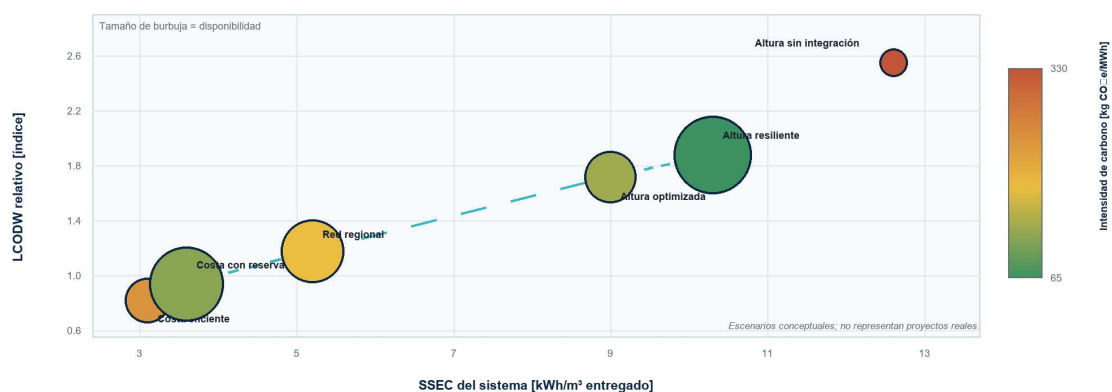


Figura 3. Marco conjunto SSEC-LCODW para comparar arquitecturas. Escenarios ilustrativos y valores sintéticos; elaboración original.

5. La confiabilidad no compite con la eficiencia

Una infraestructura crítica no puede evaluarse en su mejor punto energético. Una planta con SEC mínimo e indisponibilidad recurrente puede ser estratégicamente inferior a una configuración levemente menos eficiente que entrega de forma estable. Disponibilidad, mantenibilidad, flexibilidad y velocidad de recuperación no diluyen la eficiencia: definen la calidad del servicio al que esa eficiencia debe servir.

Esto lleva mantenimiento y gestión de activos al núcleo del diseño. Redundancias, repuestos críticos, preservación, corrosión, inspección de ductos, estaciones de bombeo, obsolescencia de control y ciberseguridad deben modelarse antes de la puesta en marcha. Cada hora de indisponibilidad reduce el denominador de SSEC y LCODW, pero su mayor efecto puede estar fuera del sistema hídrico: producción minera interrumpida, abastecimiento urbano restringido o procesos industriales detenidos. El costo directo del agua rara vez representa el costo total de no tenerla.

6. Del gemelo digital de planta al gemelo del servicio

La inteligencia artificial ya se utiliza para predecir ensuciamiento, rendimiento de membranas y necesidades de mantenimiento. La frontera siguiente es un gemelo digital del sistema completo: calidad de agua de mar, captación, trenes RO, estaciones de bombeo, ductos, reservorios, precios y restricciones de energía, condición de activos, ambiente y demanda. La pregunta operacional cambia: de buscar el set point óptimo de la planta a determinar qué configuración minimiza costo, energía y riesgo de entrega durante las próximas 24, 72 o 168 horas.

Ese salto exige datos gobernados, modelos hidráulicos y de degradación, incertidumbre explícita y decisiones explicables. Un gemelo que ignora fallas comunes, restricciones contractuales o degradación puede ofrecer precisión aparente y malas decisiones. Desalación 5.0 no significa automatizar más; significa convertir datos en decisiones de sistema respaldadas por física, trazabilidad y experiencia operacional.

7. Carbono, salmuera y recursos: Integrar sin prometer milagros

La electricidad domina numerosas categorías de impacto de ciclo de vida de SWRO, por lo que la fuente energética y el transporte deben evaluarse junto con la separación. La electrificación global de la desalación avanza y la ósmosis inversa representa la principal tecnología de expansión; ello vuelve más estrecha la relación entre seguridad hídrica, redes eléctricas y descarbonización. Una planta

eficiente alimentada por energía intensiva en carbono no es equivalente a un sistema coordinado con renovables, almacenamiento y flexibilidad de demanda.

La salmuera exige la misma honestidad. Recuperar agua, sales, minerales o energía es una oportunidad real, pero presencia química no equivale a negocio. Concentración, selectividad, pureza, corrosión, incrustación, escala, distancia a mercado y energía determinan la viabilidad. MLD y ZLD pueden ser valiosos en contextos específicos, aunque suelen añadir complejidad y demanda energética. La respuesta responsable no es imponer ZLD en todas partes, sino comparar descarga bien diseñada, reúso, concentración y recuperación selectiva según ecosistema receptor, regulación, composición y mercado.

8. Una agenda para convertir la visión en evidencia

El primer paso es normalizar fronteras: qué se incluye, dónde se mide el volumen y cómo se tratan almacenamiento, pérdidas, energía recuperada y usos múltiples. El segundo es construir casos comparables con datos horarios y mensuales de plantas costeras, redes regionales y sistemas en altura. El tercero es cuantificar incertidumbre para energía, disponibilidad, vida útil, tasa de descuento, carbono y costo de interrupción. El cuarto es comprobar si SSEC y LCODW cambian decisiones reales frente al SEC y al costo de planta.

Para la dirección, la consecuencia es inmediata: ruta, elevación, reserva estratégica, redundancia, contratación eléctrica y mantenimiento forman una cartera interdependiente. Para reguladores e inversionistas, métricas de entrega auditables pueden elevar la transparencia. Para investigadores, Chile ofrece un laboratorio adelantado del nexo agua-energía-activos. Para operadores, la oportunidad es quizás la más estimulante: dejar de recibir un conjunto de paquetes optimizados por separado y comenzar a operar una infraestructura que comparte contexto, aprende y anticipa.

Conclusión: Diseñar continuidad

Durante medio siglo, la industria realizó un trabajo extraordinario optimizando la planta desaladora. La próxima etapa exige optimizar el sistema de agua desalinizada. Chile demuestra que la geografía no es un dato externo: es una variable tecnológica capaz de dominar energía, costo y riesgo. SSEC y LCODW ofrecen un lenguaje inicial para hacer visible esa realidad, pero necesitan validación antes de convertirse en referencias sectoriales.

La próxima revolución seguirá necesitando mejores membranas, bombas y algoritmos. Pero no ocurrirá dentro de uno de ellos. Ocurrirá cuando conectemos, con rigor cuantitativo y responsabilidad, el océano, la energía, los activos, la geografía, el ambiente y la sociedad. El producto final nunca fue solamente agua. Es la confianza de que estará disponible mañana y la capacidad de demostrarlo.

Por: Pedro Calderón