

Multicriteria Analysis of Electrical Energy Storage Technologies in Chile: Strategic Evaluation and Development Perspectives

Felipe Reyes León, Claudio Ortega Lorca, Gerardo Blanco Bogado, Diego Altamirano Hernández

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Abstract—Currently, the implementation of energy storage systems has been increasing significantly, either to provide greater stability to the system or to take advantage of excess generation, among other reasons. For those reason, this work will analyze different energy storage technologies from various criteria to provide a comprehensive review of each. This analysis considers different scenarios where some criteria are prioritized over others, allowing for a general overview to devise a plan that is relevant and effective in meeting the established objectives.

Index Terms—AHP, Decarbonization, Energy Storage, Multi-criteria Decision Analysis (MCDA), VREs.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el escenario ambiental ha cobrado gran importancia, generando cuestionamientos generalizados sobre el sector energético debido al uso de recursos naturales y el vertimiento de desechos. En respuesta, las autoridades mundiales, a través del Acuerdo de París en la COP21, han decidido orientar el crecimiento energético hacia una matriz más sostenible [1].

Con el propósito de alinearse con estas políticas internacionales, Chile trazó en 2015 una hoja de ruta en la que estableció la meta de que al menos el 70% de la generación provenga de energías renovables variables (VREs) para 2050. Esta meta fue actualizada en 2020, trazándose como objetivo lograr este 70% al año 2030 y la carbono neutralidad para 2050 [2].

Las VREs provienen de recursos energéticos inagotables, caracterizados por no agotarse a escala humana durante su transformación y aprovechamiento, debido a su abundancia o capacidad de regeneración. Entre estas fuentes se encuentran las energías solar, eólica, mareomotriz, biomasa y geotérmica, siendo la solar y eólica las más estudiadas y utilizadas en Chile [3].

Si bien estas tecnologías ofrecen un combustible gratuito, su naturaleza variable significa que solo generan energía cuando hay recursos solares o eólicos disponibles, razón por la cual se les denomina energías renovables variables. Ocasionando lo que se conoce como Intermittencia Energética [4]. Por otra parte, el excesivo aumento de parques eólicos y fotovoltaicos ha generado que en Chile y en general en países con un aumento considerable de parques de generación de Energía Renovable No Convencional (ERNC) se tenga que hacer recortes de este

tipo de energía, acumulando hasta durante el periodo de 2023 la cantidad de 2667 GWh de energía generada no consumida [5].

Chile, para continuar con su compromiso energético, debe buscar soluciones a estos problemas de intermitencia y vertimientos. Aquí es donde surge la oportunidad para la tecnología de almacenamiento de energía (“Energy Storage System”, ESS por sus siglas en inglés). Estos sistemas permiten almacenar energía durante períodos de alta producción y liberarla cuando la demanda es muy alta o cuando las fuentes renovables no están disponibles, ofreciendo una mayor flexibilidad y capacidad para regular la red sin incrementar la generación neta de electricidad [6].

Entre los ESS más estudiados se encuentran el almacenamiento por embalse o bombeo hidráulico (PHS), el almacenamiento por aire comprimido (CAES), las baterías (BESS) y los volantes de inercia (FES). El PHS es estudiado por su capacidad de almacenamiento a gran escala, mientras que el CAES y el FES son valorados por su rápida respuesta a las fluctuaciones de la red [6]. Las BESS más estudiadas son las de ion litio y las de estado sólido. Las baterías de ion litio sobresalen por su alta densidad energética, larga vida útil, rápida respuesta y eficiencia [7]. Por otro lado, las baterías de estado sólido (SSB, por sus siglas en inglés) se investigan por su mayor seguridad, densidad energética aún más alta y capacidad para ofrecer un mejor rendimiento a temperaturas extremas, presentando un potencial significativo para el almacenamiento de energía avanzado y seguro [6].

En los países en vías de desarrollo, la formulación de políticas está fuertemente influenciada por intereses económicos y políticos, a menudo determinados por grupos específicos como partidos políticos. La inclusión o exclusión de criterios de decisión puede impactar significativamente los resultados, por lo que es crucial adoptar metodologías holísticas y participativas. En este contexto, el Análisis Multicriterio de Decisiones (MCDA) es una herramienta valiosa para evaluar la viabilidad de diferentes estrategias y decisiones, proporcionando una base científica sólida [8].

En cuanto a las distintas metodologías de MCDA se propone el uso del proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) en la formulación de políticas públicas en economías emergentes y en desarrollo, ya que puede apoyar la adopción de un enfoque más inclusivo en la formulación de políticas [8]. Especialmente en países con prácticas exclusivistas, es decir, no

participativas fomentadas por una autoritaria estructura política. Esto se ajusta a la dinámica de Chile, dado que es un país en vías de desarrollo que busca integrar tecnologías con responsabilidad y cautela respecto a su desempeño, buscando asegurar que la adopción de esta tecnología se realice de manera responsable, considerando cuidadosamente su impacto y efectividad [8].

El AHP, desarrollado por Thomas L. Saaty, es un método para facilitar la toma de decisiones multicriterio. Estructura el problema de decisión en una jerarquía con un objetivo general en la cima, criterios en niveles intermedios y alternativas en la base. Convierte comparaciones cualitativas en pesos numéricos, reflejando la importancia relativa de cada elemento e incluye un mecanismo para verificar la consistencia de las evaluaciones. Las comparaciones pareadas entre elementos utilizan una escala de importancia relativa, y los resultados se procesan matemáticamente para obtener prioridades ponderadas, permitiendo una decisión final clara y justificada [9].

En este trabajo se aplica esta metodología para identificar las tecnologías de almacenamiento más adecuadas para mitigar la intermitencia energética causada por la integración de generación en base a VREs al sistema eléctrico nacional de Chile. Además, se realiza un análisis de sensibilidad para examinar cómo cambian los resultados de la decisión con variaciones en los juicios o pesos asignados a los criterios y subcriterios. Esto es especialmente útil en entornos inciertos donde los supuestos iniciales pueden cambiar.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica de las distintas tecnologías de almacenamiento estudiadas considerando los criterios a estudiar.

A. Bombeo Hidráulico (PHS)

Respecto al bombeo hidráulico se presentan a continuación algunos elementos relevantes a considerar.

1) Criterio técnico

Para el caso del bombeo hidráulico (PHS), este sistema posee una eficiencia que oscila entre valores de 70% y 80%. En términos de almacenamiento se habla de una capacidad a gran escala (principalmente del orden de los 100 MW a 1000 MW) debido a que puede almacenar grandes cantidades de agua y que además permite almacenar esta energía por largos periodos de tiempo, llegando incluso a ser de manera anual. Hablando de la vida útil de estos sistemas se habla de una larga durabilidad, permitiendo alcanzar vida útil superior a los 50 años o 50.000 ciclos y, por último, sus tiempos de respuesta pueden ir desde los segundos a los minutos dependiendo de si la turbina se encuentra o no en sincronismo con la red [10] [11] [12].

2) Criterio económico

En las proyecciones de costos establecidas por la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) [13], se puede obtener el costo de inversión de tecnologías de bombeo de 6 y 18 horas, que se pueden observar a continuación.

Tabla 1

Costos de inversión de tecnologías de bombeo [13].

Tecnología	Costo de inversión (USD/kW)
Bombeo 6 horas	1374
Bombeo 18 horas	1823

3) Criterio ambiental

De acuerdo con [14], los principales impactos que generan estas bombas se pueden apreciar a continuación:

a) Impacto en el aire al producir las materias primas

Alta cantidad de emisiones de GEI en la fabricación, transporte y producción de materias primas, además de emisión de elementos contribuyentes a la formación de lluvia ácida.

b) Impacto en el aire al tener operativo el sistema

Emisión de GEI debido a la eliminación e inundación de biomasa existente en el terreno.

B. Aire comprimido (CAES)

Por su parte, en cuanto a CAES, se presentan a continuación algunos elementos relevantes a considerar.

1) Criterio técnico

En el caso de los sistemas de aire comprimido (CAES) los rangos de eficiencia varían del tipo de tecnología que se utilice (diabático o adiabático) para el almacenamiento, oscilando entre el 55% al 80%, cabe destacar que los costos de implementación suben en proporción al tipo de tecnología que se quiere utilizar. En temas de almacenamiento y vida útil, al igual que los sistemas de bombeo hidráulico se tiene una gran capacidad y vida útil, siendo estos estimados en valores similares. Por último, los tiempos de respuestas de esta tecnología oscilan en valores menores a los 5 minutos [10] [11] [12].

2) Criterio económico

Para esta tecnología y a menos que se indique lo contrario se tomará como referencia los valores que aparecen en el reporte realizado por el departamento de energía de Estados Unidos en agosto de 2022 [11] y el informe de la International Renewable Energy Agency (IRENA): Electricity Storage and Renewable: Costs and Markets to 2030 [10]. Como estos informes muestran rangos de precios que varían dependiendo de la capacidad que se vaya a instalar y las horas que se vaya a tener en funcionamiento la tecnología de almacenamiento es que se tomó un promedio de estas para los rangos inferiores y mayores y ocuparlos de referencia. De esta manera los costos de inversión para el CAES oscila entre \$1087-\$1639 USD/kW.

3) Criterio ambiental

De [14] se obtiene que los principales impactos que genera esta tecnología en el ambiente se producen en el proceso de extracción de materias primas para la construcción de esta y al entrar en operación, causando daño en el aire. Los detalles se pueden encontrar a continuación:

a) Impacto en el agua al extraer las materias primas:

Evaporación de moderadas cantidades de agua en el enfriamiento de la producción de metales.

Uso de moderadas cantidades de agua potable al momento de lavar los agregados, evitar la suspensión de polvo y en el proceso de manufacturación del concreto.

b) Impacto en el aire cuando se encuentra en operación:

Emisiones de gases invernadero en el caso de que el motor/compresor funcione a gas natural.

C. Volante de inercia (FES)

Respecto a los FES, se presentan a continuación algunos elementos relevantes a considerar.

1) Criterio técnico

Para el caso de los volantes de inercia (FESS) se tienen eficiencias que oscila entre el 80% y 85%, un almacenamiento orientado a baja escala y corto plazo, dada su baja capacidad de retener la energía, su vida útil es extensa, siendo esta de cientos de miles de ciclos, en un tiempo que va desde los 20 a los 30 años y un tiempo de respuesta muy rápido, del orden de los milisegundos (aproximadamente 10 milisegundos). [10]- [12]

2) Criterio económico

Los volantes de inercia presentan una gran variación en sus costos de inversión, oscilando entre los \$250 y \$1250 USD/kW [10]- [12].

3) Criterio ambiental

Respecto a su impacto en el ambiente se destaca los siguientes, en particular en temas de aire y suelo.

a) Impacto en el aire al extraer las materias primas

Moderada emisión de GEI en la producción de metales.
Moderada emisión de elementos contribuyentes a la formación de lluvia ácida en la producción de metales.

b) Impacto en el suelo al extraer materias primas

Emisiones de gases invernadero en el caso de que el motor/compresor funcione a gas natural.

D. Batería Ion Litio (LIB)

Por el lado de las LIB, se presentan a continuación algunos elementos relevantes a considerar.

1) Criterio técnico

Cuentan con eficiencias que pueden ir desde aproximadamente el 80% hasta alcanzar hasta el 95%, dependiendo de las propiedades químicas que tengan y el tiempo que se almacene la energía. Los niveles de capacidad que tienen varían en gran medida dado que este tipo de batería se utiliza desde la electrónica hasta para trasladar la energía en distintos horarios para satisfacer la demanda de la red, en estos últimos casos los parques de baterías alcanzan capacidades entre los 100 MW y 200 MW. Por otra parte, su vida útil oscila entre los 12-16 años y su tiempo de respuesta es rápido, del orden de los milisegundos. [10] [11] [12]

2) Criterio económico

Para el caso de las baterías Ion Litio la información de los costos de inversión se extrajo del Informe de Costos de Tecnologías de Generación y Almacenamiento proporcionado por la Comisión Nacional de Energía (CNE) [15]. Sacando los promedios obtenidos se tiene que el costo de inversión para estos sistemas de almacenamiento oscila entre \$1252 y \$1556 USD/kW.

3) Criterio ambiental

a) Impacto en el aire al extraer las materias primas

Moderada emisión de GEI atribuible a la extracción de litio.
Desgaste en la capa de ozono en la elaboración del aluminio para el cátodo.

b) Impacto en el aire en la operación de este sistema

Liberación de químicos que aumentan el potencial de oxidación fotoquímica.

E. Batería de flujo

Finalizando la revisión, a continuación, se presentan elementos importantes a considerar en cuanto a Sistema de Almacenamiento basados en Baterías de Flujo.

1) Criterio técnico

Se tienen eficiencias menores que en las de Ion-Litio, donde oscila entre 60% y 85%, pero se espera que este valor aumente a números entre 67% a 95%, su vida útil es mucho mayor, llegando a 20.000 ciclos y con una profundidad de descarga superior a las de Ion-Litio, siendo las baterías con mayor vida útil en ciclos, pero en periodo calendario bordean los 12 años. Tienen tiempos de respuesta rápidos, y el proyecto más grande actualmente de este tipo de baterías está en China con una capacidad de 100 MW, pero los demás proyectos son de niveles menores a los 15 MW. [10] [11] [12]

2) Criterio económico

De acuerdo con lo recopilado en los informes [10]- [12], los costos de inversión de las baterías de flujo oscilan entre \$2234 y \$2688 USD/kW.

3) Criterio ambiental

a) Impacto en el suelo al extraer las materias primas

Vanadio es un metal pesado tóxico que se acumula en el suelo.

b) Impacto en la flora y fauna en la extracción de materias primas

Óxido de vanadio es peligroso para los seres vivos.

En relación al AHP, en [16] y [17], entre otros, se puede observar que dentro de la industria este tipo de análisis multicriterio es aplicado para la toma de decisiones, como por ejemplo, en [17] se tomó como caso de estudio Malasia en la selección de fuentes de generación de energía renovable para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y dentro de las conclusiones del trabajo se establece que la utilización de herramientas de toma de decisión multicriterio son críticas para poder elaborar políticas y planificaciones para obtener una solución óptima.

III. METODOLOGÍA DE PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO AHP

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se realiza un análisis multicriterio utilizando AHP, con la finalidad de escoger entre distintas alternativas para lograr el objetivo general.

Para ello, se establece una pirámide jerárquica, colocando en la cima el objetivo general de este trabajo. En el nivel intermedio se ubican los criterios de comparación, cada uno con factores o indicadores de desempeño que facilitan la ponderación asignada a cada alternativa durante la comparación. Estas alternativas se encuentran en el nivel inferior de la pirámide.

Una vez estructurada la jerarquía y tal como se indica en [9], se realiza una comparación por pares en la que cada elemento en cada nivel de la jerarquía se compara entre sí, asignándole una ponderación con respecto a su contribución al objetivo presente en la cima. Primero, se comparan los criterios entre sí,

y luego se comparan las alternativas basadas en los criterios seleccionados. Estas alternativas se evalúan cuantitativamente según cada indicador de desempeño. La asignación de valores en esta comparación se realiza mediante una revisión bibliográfica sobre el desempeño de estas tecnologías en cada uno de los indicadores propuestos.

Para esto se utiliza la tabla de importancia relativa de Saaty, la cual se puede revisar en **Tabla 2**.

En situaciones específicas donde el nivel de importancia no está claramente definido o requiere un ajuste, se utilizan valores intermedios entre los niveles principales de importancia. Estos valores intermedios son 2, 4, 6 y 8.

Tabla 2

Escala de importancia relativa de Saaty.

Valor	Nivel de importancia	Comentarios
1	Igual	El criterio A es igual de importante que criterio B
3	Moderada	El criterio A es ligeramente más importante que el criterio B.
5	Grande	El criterio A es mucho más importante que el criterio B.
7	Muy grande	El criterio A es fuertemente más importante que el criterio B.
9	Extremadamente grande	El criterio A es extremadamente más importante que el criterio B.

Por ende, se asume que existen n criterios, cuyos pesos w_1, w_2, \dots, w_n son respectivamente conocidos. En el proceso de comparación se determina una matriz de relación por pares, cuyas filas dan las relaciones de pesos de cada criterio con respecto a los demás. Logrando así la ecuación matricial (1).

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n * w \quad (1)$$

Si “A” se define como la matriz normalizada de comparación pareada de la ecuación anterior, entonces “n” es un valor propio de “A”, y “w” es el vector propio asociado a este. Por lo tanto, para hacer que “w” sea único, normalizamos sus entradas dividiéndolas por una suma. La matriz normalizada “A” será consistente solo si satisface la ecuación (2).

$$a_{jk} = \frac{a_{ik}}{a_{ij}}, i, j, k = 1, \dots, n \quad (2)$$

Luego se procede a realizar comparación pareada de los elementos en el nivel más bajo de la jerarquía, es decir, se comparan las alternativas en pares con respecto a cada criterio de evaluación. En esta parte del proceso se evalúa la ponderación de cada alternativa con respecto a cada criterio. Posteriormente, multiplicamos la matriz resultante de las ponderaciones de cada criterio por el vector resultante de las

ponderaciones de cada alternativa con relación a cada criterio. Este producto nos proporciona un vector columna que representa el "peso global", mostrando las prioridades de las diversas alternativas en función de todos los criterios.

Finalmente, para cada comparación pareada en el proceso del AHP (criterios con respecto a objetivo, alternativas con respecto a los criterios) se analiza el índice de consistencia de los juicios emitidos. Cuando este índice muestra un valor superior al 10% indica que los juicios son inconsistentes, siendo posible que el tomador de decisión reconsidere y modifique los valores de la matriz de comparación pareada.

Para ello se debe encontrar el ratio o relación de consistencia (CR) recurriendo a la ecuación (3).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Donde el índice de consistencia (CI) está dado por (4).

$$CI = \frac{(n_{max} - n)}{n - 1} \quad (4)$$

El factor n_{max} está dado por la suma de todos los componentes del vector resultante de la multiplicación de la matriz pareada con el vector propio obtenido.

Por su parte, la consistencia aleatoria (RI) se calcula mediante la ecuación (5).

$$RI = \frac{1,98 * (n - 2)}{n} \quad (5)$$

Reemplazando (4) y (5) en (3) se revisa si el valor es menor a 0.1, en caso de ser así, se ha ponderado razonablemente. Es decir, se espera una consistencia mínima del 10%. En cuyo caso no se llegue a esta consistencia mínima se debe revisar los valores de importancia relativa dados y modificarlos.

IV. CASO DE ESTUDIO

Para la aplicación de la metodología del proceso analítico jerárquico, se proponen cinco alternativas tecnológicas basadas en tres criterios de evaluación: técnico, económico y ambiental. Tal como se dijo, cada criterio tiene su(s) indicador(es) de desempeño(s) para hacer más objetiva la comparación.

En la evaluación técnica, cada tecnología se valora en función de su eficiencia, capacidad de carga y descarga, vida útil y tiempo de respuesta. En la evaluación económica, el indicador de desempeño utilizado es la inversión de capital inicial (CAPEX). En términos ambientales, los indicadores son la magnitud del impacto medioambiental y la importancia del impacto, considerando su duración e influencia.

El objetivo del estudio es proporcionar una herramienta de toma de decisiones para los planificadores o *policy maker*, con el fin de mitigar la intermitencia energética causada por la generación a partir de VREs, mediante el uso de sistemas de almacenamiento de energía. Esto contribuirá a fortalecer el proceso de descarbonización de la matriz energética chilena.

En este contexto, se cree que un análisis de la implicancia de posibles perturbaciones o tendencias en la priorización de los

diferentes criterios por parte de los responsables de la toma de decisiones es de suma importancia. Es importante tener en cuenta que la decisión final en un proceso de formulación de políticas generalmente es tomada por una única autoridad política, la cual puede o no considerar la visión integral de los principales actores del sector.

Por esta razón, se establecerá un caso base en el que los tres criterios tienen igual relevancia o importancia. Luego, se realizará un análisis de sensibilidad probando distintas opciones de importancia, tal como se muestra en **Tabla 3**.

Tabla 3

Prioridades compuestas de criterios, Caso Base.

Criterio	Vector Propio
Técnico	0,33
Económico	0,33
Ambiental	0,33

$$\lambda_{max} = 12, CI = 12, CR = 0,003$$

La ponderación de las alternativas respecto al criterio técnico evaluado y el detalle de la comparación pareada entre ellas se muestra en la **Tabla 4**. Así mismo, en la **Tabla 5** se muestra el detalle respecto al criterio económico y por último en la **Tabla 6** se tiene la matriz que detalla el desempeño ambiental de cada una de las tecnologías de almacenamiento. Estas ponderaciones o datos de entrada de la matriz se realizaron basándose en los indicadores previamente mencionados. La información detallada sobre el desempeño de cada tecnología en relación con estos indicadores se puede consultar en la Sección II: Revisión Bibliográfica.

Estas tecnologías, tal como se dijo anteriormente contemplan las siguientes alternativas: A1: Bombeo Hidráulico (PHS), A2 Aire comprimido (CAES), A3: Volantes de Inercia (FES), A4: Baterías de Ion-Litio (BESS ION-LI), A5: Baterías de Flujo (BESS Flujo).

Estas alternativas permanecen constantes al realizar el análisis de sensibilidad ya que en este análisis solo se modifica la importancia relativa de los criterios según las preferencias del planificador.

Tabla 4

Matriz de comparación pareada de alternativas respecto al criterio técnico.

DESEMPEÑO TÉCNICO					
	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	3	5	1/2	5
A2	1/3	1	3	1/3	3
A3	1/5	1/3	1	1/5	2
A4	2	3	5	1	5
A5	1/5	1/3	1/2	1/5	1

Tabla 5

Matriz de comparación pareada de alternativas respecto al criterio económico.

DESEMPEÑO ECONÓMICO					
	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/2	1/5	1/2	3
A2	2	1	1/3	1	4
A3	5	3	1	1/3	7
A4	2	1	1/3	1	4
A5	1/3	1/4	1/7	1/4	1

Tabla 6

Matriz de comparación pareada de alternativas respecto al criterio ambiental.

DESEMPEÑO AMBIENTAL					
	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	1/2	1/5	1/2	3
A2	2	1	1/3	1	4
A3	5	3	1	1/3	7
A4	2	1	1/3	1	4
A5	1/3	1/4	1/7	1/4	1

Tabla 7

Vector de prioridades y ratio de consistencia de las alternativas bajo cada criterio.

Alternativas/Criterios	Técnico	Económico	Ambiental
A1	0,308	0,120	0,056
A2	0,152	0,213	0,320
A3	0,076	0,396	0,187
A4	0,406	0,213	0,115
A5	0,056	0,056	0,320
CR	0,049	-0,016	0,026

Tabla 8

Pesos Globales de las alternativas.

Alternativas	A1	A2	A3	A4	A5
Prioridad	0,161	0,228	0,220	0,245	0,144

Los resultados obtenidos en el caso base de estudio arrojan que la alternativa con mayor prioridad es el almacenamiento por baterías (Sistemas BESS) de Ion Litio (A4), además las alternativas A2 y A3, CAES y FES respectivamente tuvieron una alta prioridad.

Ahora, se evalúa cómo varía el desempeño de cada tecnología según cambia la perspectiva del *policy maker*.

La variación de los resultados para cada escenario se puede ver en **Fig. 1** y para mayor detalle de los escenarios que fueron considerados revisar la **Tabla 9**.

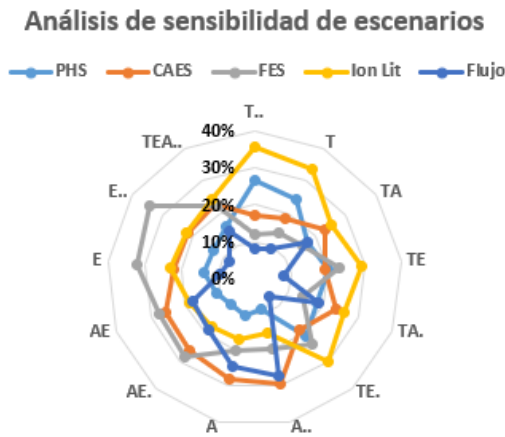


Fig. 1 Análisis de sensibilidad – Mapa estratégico.

Tabla 9

Detalle del análisis de sensibilidad mostrado en la Figura IV 1.

Escenario	Descripción
TA	Criterios técnico y ambiental tienen mayor preferencia (peso =5). Los demás (peso =1).
TA.	Criterio técnico y ambiental tienen preferencia absoluta (peso =5), los demás tienen peso = 0.
T..	Considera un solo criterio (peso =5), los demás tienen peso = 0.

V. CONCLUSIÓN

De las cinco opciones consideradas, el almacenamiento mediante baterías de ion litio (BESS) demostró el mejor desempeño y versatilidad, seguido por el almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) y los volantes de inercia (FES). Es crucial interpretar los resultados con cautela y recordar que cada tecnología tiene aplicaciones específicas. Un desarrollo que considere solo la alternativa ganadora es poco viable para reducir la intermitencia energética de un país; es recomendable un enfoque multisistémico. Por ejemplo, los BESS se podrían utilizar en plantas a gran escala, mientras que CAES y FES son más adecuados para manejar fluctuaciones de red debido a su rápida respuesta. El FES, en particular, es recomendable para inyectar inercia al sistema, proporcionando estabilidad a bajo costo.

Además, es importante tener en cuenta que, sin un sistema de transmisión eléctrica robusto y en condiciones adecuadas, las líneas podrían saturarse y la energía almacenada no podría distribuirse eficazmente a los centros de consumo. Por lo tanto, la planificación debe incluir una evaluación exhaustiva de la infraestructura de transmisión para garantizar la efectividad de estas tecnologías.

Por otra parte, el método AHP intenta realizar comparaciones

pareadas cuantificando algunos parámetros cualitativos, pero existen parámetros y situaciones que no se consideran en este análisis, y son importantes de mencionar. Por ejemplo, la ponderación económica del CAES es muy volátil debido a los costos asociados al precio y disponibilidad del gas utilizado. Recordemos que este estudio solo considera como indicador de desempeño económico el costo de capital (CAPEX), saliendo el CAES favorecido. Sin embargo, si no se dispone de un acuífero, una caverna subterránea o una excavación minera en desuso, la inversión inicial para esta tecnología puede aumentar considerablemente, lo que podría hacerlo menos atractivo económicamente, dependiendo de los objetivos del planificador en la toma de decisiones.

Para futuras investigaciones, se recomienda ampliar los criterios de evaluación para incluir aspectos sociales y políticos. Por ejemplo, se podría incorporar un criterio social realizando encuestas para conocer la preferencia o tendencia de la opinión pública respecto a estas tecnologías de almacenamiento o también tomar en cuenta el beneficio social que se generaría con cada tecnología al brindar nuevos puestos de trabajo.

Además, se podría añadir un criterio político que evalúe qué tan alineadas están las alternativas de almacenamiento con la hoja de ruta de descarbonización del país en el que se esté realizando el análisis, o bien, integrar la opinión de actores políticos y/o entes pertenecientes al mercado regulatorio. Esta aproximación permitiría una evaluación más holística y contextualizada de las opciones de almacenamiento energético.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Naciones Unidas, «El acuerdo de París,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>.
- [2] Ministerio de Energía, «Hoja de ruta 2050,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/hoja_de_ruta_cc_e2050.pdf.
- [3] Ministerio de Energía, «Qué son las Energías Renovables,» [En línea]. Available: <https://energia.gob.cl/educacion/que-son-las-energias-renovables>.
- [4] L. Bird, M. Milligan, and D. Lew, «Integrating variable renewable energy: Challenges and solutions,» *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, n° NREL/TP-6A20-60451, 2013.
- [5] ACERA, «ACERA,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.acera.cl/centro-de-informacion/>.
- [6] Zurita, B. de Dios Muñoz, «Evaluación técnica y económica de distintos tipos de tecnologías de almacenamiento de energía y posibles aplicaciones en el sistema eléctrico nacional,» Memoria para optar al título de Ingeniera Civil Eléctrica, Dept. Ing. Eléc., Univ. de Chile, Santiago, 2020.
- [7] N. G. Chatzigeorgiou, S. Theocharides, G. Makrides, y G. E. Georghiou, «A review on battery energy storage

systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector,» *Journal of Energy Storage*, vol. 86, p. 111192, 2024.

- [8] A. González, E. Ortigoza, C. Llamosas, G. Blanco, and R. Amarilla, «Multi-criteria analysis of economic complexity transition in emerging economies: The case of Paraguay,» *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 68, p. 100617, 2019.
- [9] Saaty, T. L., «How to make a decision: the analytic hierarchy process,» *European Journal of Operational Research*, vol. 48, n° 1, pp. 9-26, 1990.
- [10] IRENA, «International Renewable Energy Agency,» *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, IRENA, Abu Dhabi, 2017.
- [11] V. Viswanathan, K. Mongrid, R. Franks, X. Li, V. Sprengle y R. Baxter, «2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment,» 2022.
- [12] WSP Chile, «Criterios de Sustentabilidad, incorporando el Análisis de Ciclo de Vida, para el desarrollo de Energías Renovables y Tecnologías de Almacenamiento,» MInisterio de Energía, Santiago de Chile, 2019.
- [13] Planificación Energética de Largo Plazo, «Ministerio de Energía,» Ministerio de Energía, [En línea]. Available: <https://energia.gob.cl/pelp/proyecciones-de-costos>. [Último acceso: 23 Junio 2024].
- [14] M. L. Fernández Sepúlveda, «Evaluación ambiental de distintas tecnologías de almacenamiento de energía,» Santiago de Chile, 2018.
- [15] Comisión Nacional de Energía, «INFORME DE COSTOS DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO,» Santiago de Chile, 2024.
- [16] M. Baumann, M. Weil, J. F. Peters, N. Chibeles-Martins y A. B. Moniz, «A review of multi-criteria decision making approaches for evaluating energy storage systems for grid applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 516-534, 2019, 2019.
- [17] S. Ahmad y R. Tahar, «Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia,» *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 458-466, 2014.
- [18] F. Thomas, L. Mahdi, J. Lemaire y D. M. F. Santos, «Technological Advances and market Developments of Solid-State Batteries: A Review,» *Materials*, vol. 17, n° 239, 2024.
- [19] S. Sipahi y M. Timor, «The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications,» *Management decision*, vol. 48, pp. 775-808, 2010.

VII. BIOGRAFÍAS



Felipe Reyes León estudiante de último semestre de Ingeniería Civil Eléctrica en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Actualmente trabajando en su proyecto de titulación, con su práctica profesional en AES Andes S.A. importante empresa productora de energía en Chile, propiedad de AES corporation. Sus áreas de interés incluyen las energías renovables variables, los sistemas de almacenamiento de energía y los mercados eléctricos.



Claudio Ortega Lorca estudiante de último semestre de Ingeniería Civil Eléctrica en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Actualmente trabajando en su proyecto de titulación y realizando su práctica profesional en ENGIE Energía Chile. Sus intereses incluyen las energías renovables no convencionales, descarbonización, almacenamiento de energía y mercados eléctricos.

Gerardo Blanco Bogado, recibió su título de Ingeniero Electromecánico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (UNA) en 2004, donde también se desempeñó como vicepresidente del Centro de Estudiantes y presidente del Consejo de Delegados de dicha Facultad. Posteriormente, gracias a una beca del Gobierno Alemán, cursó estudios de Doctorado en Ingeniería, obteniendo su grado con calificación Summa Cum Laude en 2010. En 2010, fundó el Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos (GISE) en la Facultad Politécnica de la UNA. Hasta la fecha. Ha publicado más de 130 artículos científicos, además de siete libros y capítulos de libros. Su labor académica le ha valido la clasificación como Investigador Nivel II en el Programa Nacional de Incentivo a los Investigadores (PRONII) del CONACYT. Gerardo ha sido investigador y profesor visitante en el Institute of Power Systems and Power Economics (ie3) de la Technische Universität Dortmund, Alemania, en 2009 y 2012, y becario del Departamento de Estado de EE.UU. para el Programa International Visitor Leadership Program (IVLP) en 2014. Entre 2016 y 2019, fue Editor Asociado del IET Generation, Transmission and Distribution Journal, y en 2016 fue nombrado Senior Member del IEEE. En 2019, fue nombrado Miembro del Consejo de Administración de Itaipú Binacional por el Poder Ejecutivo de la República del Paraguay, cargo que desempeñó hasta septiembre del 2023. Desde 2024, es Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, liderando la línea de investigación en Mercados Eléctricos de Potencia y Economía de la Energía.



Diego Altamirano Hernández. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico el 2015 y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería el 2016, ambos en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. En su trayectoria profesional, destaca su labor en el sector privado como Profesional en Planificación de la Transmisión, en la Gerencia de Regulación del Grupo Saesa en Chile, en la cual lideró equipos de trabajo academia-empresa enfocados en desarrollar nuevas metodologías y métricas a considerar en los ejercicios de Planificación de la Transmisión Zonal o Subtransmisión considerando los insumos provenientes de los Sistemas de Distribución Eléctrica, en estos trabajos participaron principalmente la Universidad de Concepción (Chile) y la Universidad Nacional de San Juan (Argentina). Actualmente se desempeña como Académico de Jornada Parcial en la Escuela de Ingeniería Eléctrica PUCV, dictando asignaturas de pregrado en las áreas de Sistemas Eléctricos de Potencia y Mercados Eléctricos, y trabajando con estudiantes en sus proyectos de titulación. Igualmente se dedica a la consultoría asociada al desarrollo de proyectos de innovación en el Sector Eléctrico y Energético, apoyando a empresas, startups y emprendedores.