

Propuesta de sistema de almacenamiento de energía como respaldo para sistema de generación renovable para un campus universitario

Smith, Aidaelena Dr. , Gascón, María Laura, Br , Montero, Kevin, Br 

Universidad Metropolitana, UNIMET, Venezuela

asmith@unimet.edu.ve, mgascon@correo.unimet.edu.ve, kmontero@correo.unimet.edu.ve

Abstract— La selección de un sistema de almacenamiento que acompañe un aerogenerador de baja capacidad a ser instalado en el techo de un edificio de cuatro pisos debe tomar en cuenta muchos factores para que sea adecuado. Los desarrollos tecnológicos de los sistemas de almacenamiento obligan a los interesados en implantar soluciones a mantener una revisión de los cambios para identificar aquellos aspectos resaltantes para la institución, sus necesidades y características. En este trabajo, luego de una investigación exhaustiva de los mecanismos de almacenamiento, se escogen cinco alternativas de sistemas de almacenamiento de energía (2 electroquímica en baterías que son ión-litio y flujo Redox y 3 no electroquímicos como lo son los supercondensadores, almacenamiento en hidrógeno y volantes de energía) que fueron luego priorizados con el método de decisión multicriterio AHP. La priorización destaca la importancia que le dan los expertos participantes en la decisión a las baterías de ión-litio y a los supercondensadores, habiendo obtenidos estas dos tecnologías más del 62% entre las dos opciones. Dada las implicaciones de los sistemas de almacenamiento, luego del AHP se vuelve a realizar un estudio para estas dos opciones y se decide, finalmente recomendar el uso de baterías de ión-litio.

Keywords—Baterías, almacenamiento electroquímico, energía eólica, AHP.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica a partir de plantas de energías renovables ha aumentado considerablemente en recientes años por la creciente preocupación por el cambio climático entre otras razones. Este documento presenta la metodología y los hallazgos del estudio realizado que permiten proponer una solución de almacenamiento de energía limpia y eficiente que acompañe a un sistema de generación renovable de baja capacidad a ser diseñado para el campus de la Universidad Metropolitana (UNIMET), Caracas - Venezuela, con el apoyo del Centro de Desarrollo de Energías Renovables de la UNIMET. Con la solución planteada se busca optimizar la generación de fuente renovable y permitir el uso de la energía generada en baja escala para parcialmente alimentar las necesidades energéticas del edificio del campus universitario en los momentos en que más se requiera. La solución completa que incluye un generador, un sistema de almacenamiento y un sistema de control. En este trabajo se desarrolla la evaluación y resultados que permiten escoger el mejor sistema de almacenamiento

La bibliografía muestra las estadísticas del crecimiento de los sistemas de almacenamiento en baterías y su presencia muy destacada en países o mercados desarrollados. Sin embargo, el uso de sistemas de almacenamiento de energía no está limitado

exclusivamente a los sistemas fotovoltaicos ni a países desarrollados como presentan [1], [2], [3].

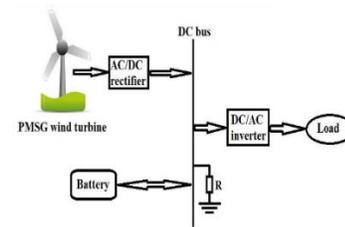


Fig. 1 Esquema de aerogenerador con almacenamiento [1]

Las tecnologías más nombradas en la literatura consultada sobre el tema destacan: baterías, ultra-capacitores, superconductores Magnéticos de Almacenamiento de Energía (*Superconducting Magnetic Energy Storage*, SMES) y aire comprimido entre muchas otras. Si bien algunas de estas tecnologías fueron originalmente diseñadas para sistemas a gran escala y para dar soporte a la generación, hoy en día están siendo aplicadas para mejorar la confiabilidad de la red eléctrica, ayudar a la transferencia de potencia, mejorar la calidad de la energía eléctrica y suplir energía en condiciones de alta demanda. [4][5][6], [7], [8], [9], [10]

Dos factores son determinantes a la hora de seleccionar un método de almacenamiento de energía, la cantidad de energía que requiere sea almacenada y la tasa a la cual dicha energía puede ser almacenada y/o liberada según sea requerida (carga/descarga del sistema de almacenamiento). Otros factores incluyen: precio, temperatura, vida útil, etc. [11].

El sistema de almacenamiento que se desea identificar acompañará en el futuro a un aerogenerador que será ubicado en el techo de un edificio del campus universitario cuyas coordenadas de la ubicación son: N 10° 29' 57" y O 66° 47' 05". Los vientos, medidos en un período de tiempo todavía relativamente corto para hacer conclusiones, no superan los 8 m/s en escasamente 12% de los registros estudiados. Es por esta razón que se espera que el diseño final de la solución eólica sea de baja capacidad por definir.

Para el desarrollo de este trabajo se llevaron a cabo búsquedas exhaustivas de investigaciones recientes en tecnologías de almacenamiento, aplicación a sistemas de energías renovables y específicamente eólicos de diferentes capacidades y aplicaciones prestando especial interés en soluciones para campus universitario.

Luego, con el apoyo del Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) de Saaty y el software Super Decisions se priorizan las opciones viables para proponer la mejor solución de almacenamiento para la UNIMET.

II. LOS MÉTODOS Y SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Uno de los principales desafíos de la integración de las energías renovables es su alta variabilidad y difícil predicción en particular para la energía solar y eólica.

Las tendencias de costo de los últimos años y sus proyecciones para el futuro hacen pensar que las tecnologías de almacenamiento tendrán en los próximos años un despliegue significativo a nivel mundial como alternativa de flexibilidad. [12][13][10]

La fig. 2 muestra la tendencia a la baja de los precios en las tecnologías de almacenamiento.

Dada la relevancia que los sistemas de almacenamiento tienen para mejorar la disponibilidad de la generación de energías limpias con fuentes renovables, científicos y estudiosos del tema del mundo trabajan en la búsqueda de esas soluciones adaptadas a las necesidades que permitan garantizar mejores capacidades de almacenamiento, mayor eficiencia y posibilidad de carga y descarga eficiente.

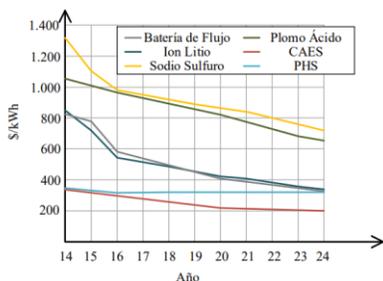


Fig. 2 Tendencia de precios de batería desde el año 2014 [10]

Dependiendo del tipo de almacenamiento (mecánico, eléctrico o químico), será el diseño de la planta de almacenamiento y sus respectivas características técnico-económicas. En general, las centrales de este tipo tienen dos componentes relevantes: el almacenamiento, que corresponde a un reservorio donde se mantiene la energía, y la interfaz que conecta este reservorio con la red eléctrica. [10]

Específicamente para un almacenamiento cualquiera se cumplirá la relación que se muestra en (1):

$$Ea_{t+1} = Ea_t * \gamma_S \pm \eta_B * (E_c(t) - E_d(t)) \quad (1)$$

que establece que la energía almacenada (E_a) en el ESS al comenzar el período $t+1$ corresponde a la energía almacenada al comenzar el período t multiplicada por el factor de pérdidas propias γ_S más la energía que efectivamente se cargó durante el período (E_c) menos la energía efectiva que descargó (E_d)

durante el mismo período multiplicada por la eficiencia de la batería. [1], [10]

En la sección que sigue se presenta una descripción de los sistemas de almacenamiento en dos bloques que corresponden a 1) Baterías y 2) Sistemas de almacenamiento no electroquímico.

En cuanto a las soluciones de almacenamiento electroquímico en baterías, la Tabla 1 muestra las características más resaltantes, similitudes y diferencias entre seis tecnologías. Las baterías son soluciones tecnológicas avanzadas que permiten el almacenamiento de energía eléctrica hasta que es requerida. [8]

Además, las baterías comprenden muchas tecnologías, algunas muy estables como las de plomo-ácido y otras todavía en desarrollo como las de ion-litio cuyos avances no detienen por el interés que ha levantado para el uso en carros eléctricos. [10]

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS [7], [8], [9][10]

Tipo de batería	Capacidad (potencia/energía)	η	Ciclos de carga y descarga en vida útil	Rata de Auto descarga	Otros comentarios
Plomo ácido	10 MW/40 MWh	75%	1000-2000	2-5% al mes	Son pesadas, tecnología muy probada
Níquel-Cadmio	27 MW/6,75 MWh	75%	3000	5-20% al mes	Alta descarga, baja energía específica
Sulfuro de sodio	9,6 MW/64 MWh	89%	2500	0	La temperatura de operación es 325 °C
Ion-Litio	En desarrollo	99%	3000	1% al mes	Alta energía específica. La sobrecarga y la sobredescarga, se evita limitando el rango de operación entre el 10% y el 90%.
Flujo Redox	Escalable	65-80%	≥ 10.000		.

Los sistemas de almacenamiento no electroquímico a analizar en este trabajo son:

- Bombeo hidráulico
- Aire comprimido
- Almacenamiento térmico
- Supercondensadores
- Volantes de inercia
- Gases/hidrógeno

A continuación, se presentan las características más resaltantes de cada una de estas tecnologías:

Bombeo hidráulico

- Utilizan la fuerza de gravedad como medio de almacenamiento de energía mecánica potencial.

- Se puede almacenar energía durante largos períodos de tiempo y trabajan bajo demanda.
- Posee eficiencia de ciclo cerrado de entre 70-80%
- A nivel mundial existen más de 300 instalaciones con una capacidad total de 127 GW aproximadamente.

Aire comprimido

- Este sistema se basa en la energía mecánica que almacena el aire al comprimirlo, que es inyectado en contenedor especial para enfriarlo.
- El aire comprimido se utiliza en una turbina de expansión que convierte la energía cinética en energía mecánica rotacional para el generador.
- Permite el almacenamiento eficiente y rentable de grandes cantidades de energía, generalmente por encima de 100 MW.
- Las centrales tienen una eficiencia entre el 42 y el 55%.

Almacenamiento térmico

- Las soluciones de almacenamiento incluyen agua o tanques de almacenamiento de hielo granizado, tierra o lecho de roca a los que se accede a través de pozos y grandes masas de agua en las profundidades del suelo.
- Estos sistemas pueden almacenar el exceso de energía térmica durante horas, días o meses.
- Se considera una opción viable para reducir el consumo de energía y reducir las emisiones de CO₂.

Supercondensadores

- Capacidades altas de suministro de potencia.
- Poseen una gran velocidad de carga y descarga
- Pueden proporcionar corrientes de carga altas que dañan los equipos de trabajo.
- Alto número de ciclos de carga/descarga, no necesitan mantenimiento
- Trabajan en condiciones de temperatura muy adversas

Volantes de inercia

- Sistema basado en inercia mecánica.
- Son capaces de proporcionar picos muy altos de potencia.
- Tienen una alta densidad de potencia
- Tienen una durabilidad “infinita” en número de ciclos de trabajo.

Almacenamiento en Gases (hidrógeno)

- La eficiencia de ciclo cerrado se encuentra entre el 34 y 44%. Sin embargo, existe factibilidad técnica para aumentarla hasta cerca del 70%. Es una tecnología todavía en desarrollo que ha generado mucho interés en el mercado.

Las ventajas que tienen los sistemas de almacenamiento electroquímico como son: localización, flexibilidad, eficiencia y escalabilidad hacen que se desarrolle un interés en el mercado para el uso masivo en distintas aplicaciones. [8]

III. SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

La selección de la mejor solución de almacenamiento de batería comienza con el tipo de almacenamiento que se adapta al proyecto, las capacidades y dimensiones requeridas y las

características de la ubicación en la que se pretende desarrollar.

En el contexto de este trabajo de investigación, se busca un sistema de almacenamiento de energía apropiado para acompañar una solución eólica de baja capacidad con vientos menores a 8 m/s que sea capaz de almacenar la energía eléctrica generada por el aerogenerador y la libere en los momentos en que la demanda del edificio la requiera. Vientos de velocidades menores a 10 m/s son considerados por los autores como de bajas velocidades. [1]

La ubicación del aerogenerador será en el techo de un edificio del campus universitario de UNIMET a una altura aproximada 15 metros desde la planta baja del edificio. Dadas estas características, los sistemas de almacenamiento a ser evaluados deben ser de relativo poco volumen y eficientes en el peso, aun cuando, no es del alcance de este trabajo el estudio de la estructura en la que deberá ser instalado.

Bajo este contexto, se pueden eliminar los sistemas de bombeo hidráulico porque la ubicación en un edificio no brinda las condiciones, además del almacenamiento térmico por las características y los requerimientos en equipos y tecnología y espacio y el sistema de aire comprimido porque son convenientes para almacenar bloques de potencia más altos que los esperados.

Entonces, una vez descartadas las tecnologías de almacenamiento no electroquímico que no adecuadas para la solución, se procede a evaluar los sistemas de almacenamiento electroquímico con el fin de identificar aquellos que no aplicase, si fuese el caso.

Por las características de la solución y el interés en la búsqueda de soluciones no contaminante, se descartan las baterías de níquel-cadmio porque tienen metales contaminantes y son pesada, desventaja importante para la ubicación seleccionada.

Aun cuando las baterías de ión-litio son costosas y requieren un sistema de complicado de supervisión de la carga, y, dado que para la comunidad de investigación es una tecnología todavía en desarrollo, no se descarta.[6]

Las baterías de sulfuro de sodio trabajan a temperaturas muy elevadas por lo que pueden representar un consumo de energía adicional innecesario para el tamaño de la solución. Se descartan. Por otra parte, por preocupación ambiental, mantenimiento y vida útil, se descartan las baterías de plomo-acido.

Entonces, llegado a este punto, se tienen como opciones válidas para el sistema eólico para el campus universitario, las siguientes tecnologías de almacenamiento:

1. Supercondensadores
2. Volantes de inercia
3. Almacenamiento como hidrógeno
4. Baterías de ión-litio
5. Baterías de flujo redox

Con estas cinco opciones se plantea usar la herramienta de decisión *Analytic Hierarchy Process* (Proceso analítico

jerárquico o AHP por sus siglas en inglés) para priorizar las tecnologías (alternativas en el modelo AHP) de acuerdo con unos criterios a establecer modelo de decisión.[14], [15]

AHP es un modelo de decisión multicriterio, multiexperto que permite priorizar alternativas cuando los criterios de decisión están en conflicto, haciendo comparaciones por pares entre elementos. El método forma parte de las MCDA (*Multicriteria Decision Analysis*) y fue desarrollado junto al *Analytic Network Process* (ANP) por Saaty.[16], [17]

De acuerdo con la metodología propuesta por Saaty, se debe establecer el modelo de decisión y luego hacer comparaciones por pares para calcular pesos a los criterios y prioridades a las alternativas y en la decisión pueden participar más de un experto.

El objetivo del modelo de decisión es calcular los pesos de los criterios de decisión y las prioridades de las tecnologías de almacenamiento de energía para el sistema de generación de energía eólico de baja capacidad que se tiene contemplado para UNIMET.

La Fig. 3 muestra el modelo de decisión planteado para la selección de la mejor tecnología de almacenamiento.

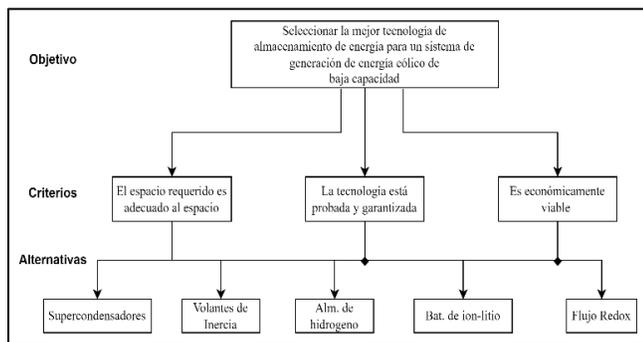


Fig. 3 Modelo de decisión basado en AHP [14], [15]

Habiendo definido el modelo de decisión, se procede a entrevistar a expertos en el área y conocedores de la locación a través de un cuestionario de comparaciones por pares tal como establece Saaty, que permiten calcular pesos de los criterios y prioridades para las alternativas.[16]

Una vez con la ayuda de *SuperDecisions* se entrevistan a los expertos, con los juicios se calculan los pesos integrados y se obtiene el resultado para los criterios que se muestra en la Fig. 4. La Fig 4 destaca la importancia relativa del criterio “Tecnología Probada” que para los expertos participantes alcanza más del 70%. Los criterios espacio requerido y “económicamente viable” que considera la inversión requerida tienen pesos similares por debajo del 20%.

Habiendo conseguido estos pesos, se presentan en la Fig. 5 los resultados de las prioridades relativas las alternativas del problema.

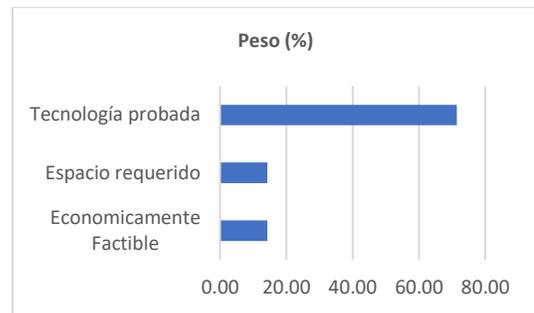


Fig. 4 Pesos relativos de los criterios para selección de sistema de almacenamiento de UNIMET

Obtenidos los pesos de los criterios, se evaluaron las alternativas y se calcularon las prioridades. Los resultados muestran que las dos alternativas con más alta prioridad relativa totalizan un 62,7% de la prioridad total. Estas son baterías de ión-litio y los superconductores, de acuerdo con los juicios de los expertos consultados.

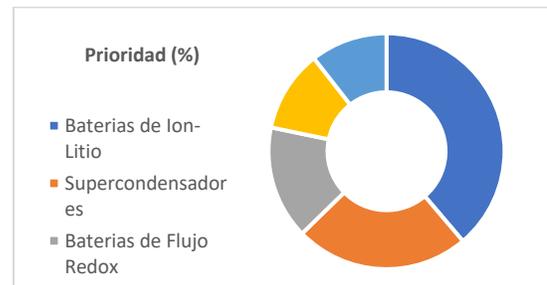


Fig. 5 Prioridades de AHP para los sistemas de almacenamiento para UNIMET

En la evaluación del comportamiento de las alternativas con respecto al criterio “Tecnología Comprobada”, las baterías de ión-litio destacan importantemente como las preferidas, con una prioridad del 47,4%, mientras que los supercondensadores solo alcanzan el 25%.

Siendo las baterías de ión-litio y los superconductores las dos tecnologías señaladas por los expertos como las más importantes, se propone realizar una segunda comparación incluyendo factores de análisis incluidos en las referencias cuyo resumen es mostrado en la Tabla II.

Aunque para algunos de los parámetros de evaluación los superconductores tienen mejores calificaciones, las baterías de ión-litio tienen características que pueden ser aprovechadas en la solución eólica propuesta. Los tiempos de carga y descargas son lentos, lo que es conveniente para el caso de estudio. Otro factor importante es la inversión que se requiere para el proyecto, en cuyo caso, los superconductores son hasta los momentos muy caros.

El rango de temperatura para las baterías es conveniente, puesto que como la UNIMET está ubicada cerca de la línea ecuatorial, no se presentan temperaturas por debajo de 0° C.

TABLA II Análisis comparativo de Supercondensadores y baterías de ión-litio[5]

Parámetro	Supercondensador	Baterías de Ión Litio
Densidad de energía	Baja: 4.6 Wh/kg	Alta: 100 Wh/kg
Densidad de potencia	Alta: 1500 W/kg	Baja: 300 W/kg
Tensión	1.2 V - 2.8 V	3.7 V - 4.2 V
Eficiencia	Rango de operación entre 70 y 80%	Rango de operación entre 10% y 90%
Corriente máxima	Hasta 500 A (celda)	Hasta 100 A (celda)
Autodescarga	Alrededor de 20% al mes	Alrededor de 10% al mes
Tiempo de carga	Alrededor de 7 minutos	Alrededor de 6 horas (Carga lenta)
Temperatura	-40 °C hasta 65°C	-5°C hasta 60 °C
Ciclos de vida	500,000	5000
Precio promedio (\$/kWh)	10,000	250 a 1,0000

IV. CONCLUSIONES

La escogencia de un método de almacenamiento de energía para las condiciones en las que se proponen en este estudio descarta algunos de los métodos por tratarse del techo de un edificio

Los resultados de AHP muestran una importancia relativa muy alta para favorecer tecnologías probadas de almacenamiento y dar la más alta prioridad a las baterías de ión-litio. Los criterios que se refieren a la inversión requerida y al espacio requerido, tienen muy poca relevancia para el grupo de expertos consultados

REFERENCIAS

- [1] R. Ben Ali, M. A. A. Baig, S. Bouadila, y A. Mami, "Energy management of a small-scale wind turbine system combined with battery storage system", *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 8, n° 3, 2018, doi: 10.24247/ijmpredjun2018121.
- [2] P. E. A. M. E. N. S. Sanchez Gamarra, "Guidelines to Implement Battery Energy Storage Systems Under Public-Private Partnership Structures", World, ene. 2023.
- [3] O. Babatunde, I. Denwigwe, O. Oyeboode, D. Ighravwe, A. Ohiaeri, y D. Babatunde, "Assessing the use of hybrid renewable energy system with battery storage for power generation in a University in Nigeria", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, n° 3, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-15151-3.
- [4] A. H. L. M. Escobar Mejia, "Sistemas de almacenamiento de energía y su aplicación en energías renovables", *Scientia et Technica*, Bogota, pp. 12–16, 2011.
- [5] P. Roy, J. He, T. Zhao, y Y. V. Singh, "Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review", *IEEE*

- [6] *Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3. 2022. doi: 10.1109/OJIES.2022.3144093.
- [6] N. K. C. Nair y N. Garimella, "Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration", *Energy Build*, vol. 42, n° 11, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.002.
- [7] P. Alotto, M. Guarnieri, y F. Moro, "Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29. 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.001.
- [8] E. T. Sayed *et al.*, "Renewable Energy and Energy Storage Systems", *Energies*, vol. 16, n° 3. 2023. doi: 10.3390/en16031415.
- [9] B. Diouf y R. Pode, "Potential of lithium-ion batteries in renewable energy", *Renewable Energy*, vol. 76. 2015. doi: 10.1016/j.renene.2014.11.058.
- [10] F. I. Celis Andrade, "Mix óptimo de sistemas de almacenamiento de energía a través de una metodología gráfica-analítica", Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2018.
- [11] R. Hemmati, "Technical and economic analysis of home energy management system incorporating small-scale wind turbine and battery energy storage system", *J Clean Prod*, vol. 159, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.174.
- [12] D. Fateh, M. Eldoromi, y A. A. Moti Birjandi, "Uncertainty modeling of renewable energy sources", en *Scheduling and Operation of Virtual Power Plants: Technical Challenges and Electricity Markets*, 2022. doi: 10.1016/B978-0-32-385267-8.00014-7.
- [13] R. Sen y S. C. Bhattacharyya, "Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER", *Renew Energy*, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.07.028.
- [14] A. Smith-Perera, "NEW METHODOLOGY TO IMPROVE MANAGER RECRUITMENT PROCESS USING AHP", 2011. doi: 10.13033/isahp.y2011.076.
- [15] A. Smith-Perera y X. Figarella, "Prioritization of Strategic Guidelines as Part of the Strategic Plan 2010-2014 for a Venezuelan University Using AHP", 2013. doi: 10.13033/isahp.y2013.065.
- [16] T. L. Saaty, "How to make a decision: The analytic hierarchy process", *Eur J Oper Res*, vol. 48, n° 1, 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- [17] M. Garcia-Melon, A. Smith-Perera, R. Poveda-Bautista, y J. P. Pastor-Fernando, "Project Prioritisation for Portfolio Selection Based on the Analytic Network Process", 2009. doi: 10.13033/isahp.y2009.073.