

Análisis del caso ideal para el almacenamiento de electricidad en bancos de baterías en el mercado eléctrico mayorista de Colombia usando dinámica de sistemas

Analysis of the ideal case for storing electricity in battery banks in the wholesale electricity market in Colombia using system dynamics

John Fernando López V., Ing., Carlos Jaime Franco Cardona., PhD.

Estudiante, Maestría en Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, jflopez0@unal.edu.co
Profesor Asociado, Escuela de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, cjfranco@bt.unal.edu.co

-- Recibido para revisión 20 de Agosto de 2012, aceptado fecha 17 de Septiembre de 2012, versión final 2012--

Resumen— El gran porcentaje de generación hidroeléctrica del país muestra la posibilidad que tiene Colombia para ser un gran almacenador de energía eléctrica particularmente por hidroeléctrica de bombeo. Pero ni este porcentaje, ni el avance en las tecnologías de almacenamiento, ni la necesidad de almacenamiento debido a la diferencia de demanda entre valle y la punta han sido suficientes para que en Colombia tenga capacidad de almacenamiento de energía. Se analizó la viabilidad en el caso ideal para almacenamiento de electricidad por un banco de baterías en el mercado eléctrico mayorista de Colombia y su posterior comercialización en el mismo; Finalmente se llega a que el almacenamiento de energía por medio del banco de baterías de plomo-ácido tiene poca utilidad a comparación de la inversión inicial, este análisis se logra por medio de un modelo usando dinámica de sistemas.

Palabras Clave— Almacenamiento eléctrico, Dinámica de sistemas, energía eléctrica, mercado eléctrico Colombiano, tecnologías de almacenamiento, banco de baterías.

Abstract— The large percentage of the country's hydroelectric generation shows the possibility that Colombia has to be a great storage of electrical energy especially hydro pump. But neither the percentage nor the advance in storage technologies, and the need for storage due to the difference in demand between peak and valley have been enough to that in Colombia have energy storage capability. Viability was analyzed in the ideal case for electricity

storage battery bank in the wholesale electricity market in Colombia and trading on it; Finally reach the energy storage bank by lead-acid batteries have little use compared to the initial investment, this analysis is achieved by using a system dynamics model.

Keywords— Electrical storage, systems dynamics, power, Colombian electricity market, storage technologies, battery bank.

1. INTRODUCCIÓN

Hay ciertos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica disponibles y otras en desarrollo que ayudan a las necesidades del almacenamiento de energía. Cada una de ellas tiene sus propias características idóneas para satisfacer unas u otras necesidades. Podemos mencionar algunos sistemas como: Volantes de inercia, Súper condensadores, Bombeo hidráulico, Aire comprimido CAES, Baterías, UPS entre otras [1] [2] [3]. Se prevé que en los próximos 50 años el consumo de energía mundial será el doble que el actual y la mayor parte deberían provenir de fuentes de energía con bajos o nulas emisiones de gases contaminantes. Esto ha generado gran interés por sistemas de generación de energía limpia a partir de fuentes renovables que sean eficientes tales como los sistemas eólicos o solares a gran escala [4]. Estos sistemas ofrecen un gran

potencial pero debido a su naturaleza intermitente requieren de sistemas de almacenamiento de energía eficientes. Las demandas domésticas y comerciales requieren de un suministro continuo de energía por lo que el desarrollo de estos sistemas de almacenamiento será un factor crítico para el desarrollo futuro [5]. A pesar que los sistemas de almacenamiento están disponibles desde varios años, y que en Colombia el porcentaje de energía por hidroeléctricas hasta el año 2009 fue del 81.2% [6], este país podría aprovechar lo anterior para el almacenamiento por bombeo, pero los sistemas de almacenamiento están poco explotados en Colombia, por lo cual es necesario hacer estudios de almacenamiento de electricidad. Por consiguiente este estudio se hizo para el caso ideal del almacenamiento en un banco de baterías en el mercado eléctrico mayorista de Colombia; entiéndase como caso ideal, cuando el precio de energía comprada para almacenar en las baterías es menor que el de venta, con una diferencia significativa; Finalmente con el análisis hecho se llega a que el almacenamiento de energía por medio del banco de baterías de plomo-ácido tiene poca utilidad en comparación de la inversión inicial, este análisis se logra por medio de un modelo usando dinámica de sistemas.

2. NECESIDAD DE ALMACENAMIENTO DE ELECTRICIDAD EN EL MERCADO ELÉCTRICO MAYORISTA DE COLOMBIA

El almacenamiento de energía eléctrica puede satisfacer cuatro necesidades que se presentan en todos los sistemas de energía: gestión valle-punta, alisamiento de carga, control de frecuencia e integración de renovables.

2.1 GESTIÓN VALLE-PUNTA

Es lógico que una red eléctrica grande moderna haya considerables excesos de producción en ciertas horas y defectos en otras. Por otra parte, existen momentos del día puntuales en los que la demanda es realmente alta, teniendo que estar diseñado el sistema eléctrico para poder dar respuesta a esta situación. El almacenamiento de energía ayuda a la solución del problema de gestión valle-punta [3].

2.2 ALISAMIENTO DE CARGA

La demanda eléctrica no solo tiene un comportamiento fluctuante entre puntas y valles, también en el alcance de una hora se producen variaciones que deben ser seguidas por la

generación. Dependiendo de la estructura de costos de la generación, una solución basada en almacenamiento de energía puede ser más eficiente [3].

2.3 CONTROL DE FRECUENCIA

Cuando un sistema eléctrico de potencia produce perturbaciones consistentes en una pérdida súbita de generación o una pérdida súbita de carga se produce inevitablemente una alteración de la frecuencia de la red. Esta alteración de la frecuencia de red debe ser urgentemente solucionada porque de lo contrario el sistema de energía colapsaría. Un sistema de almacenamiento de energía se hace necesario para las escalas de tiempo en las que hay que corregir la frecuencia [3].

2.4 INTEGRACIÓN DE RENOVABLES

Debido a que las renovables no producen cuando se les pide o se necesitan, sino cuando disponen del recurso natural del que se nutren, surge la necesidad de almacenar la energía que estas dan cuando la red no la necesita, para así poder usarla cuando el consumo lo exija [3].

Las principales necesidades para almacenar energía en Colombia son: gestión valle-punta y alisamiento de carga, debido a la forma de la curva de carga del país como se observa en la **Figura 1** [7],

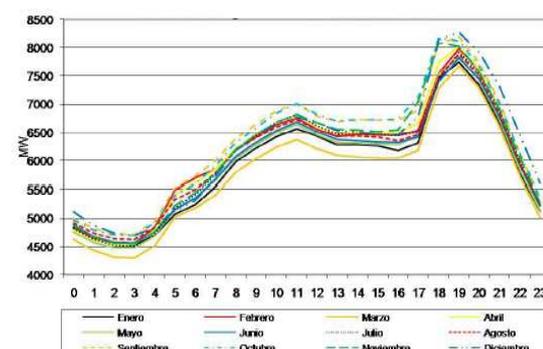


Figura 1. Curva de carga - promedio anual de energía eléctrica en Colombia 2008 Fuente: (Sánchez, 2009)

Por tanto el almacenamiento de energía se hace fundamental para alisar dicha curva, esto se logra como se puede observar en la **Figura 2**.

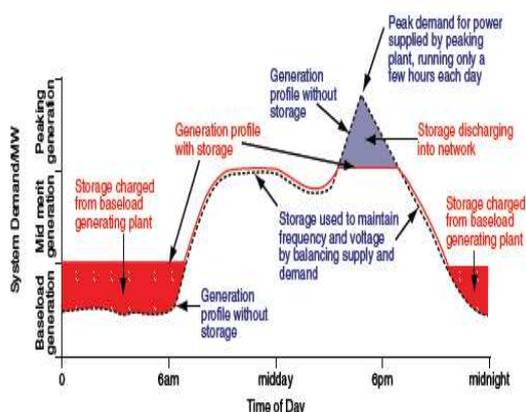


Figura 2. Almacenamiento de energía en valles para producción en punta. Fuente: (Whittingham, 2008)

En la **Figura 2** se ilustra un perfil típico de la curva de carga de energía eléctrica, que muestra las grandes variaciones durante un período de 24-h. En un escenario de nivelación de carga, un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica que se cargará durante los períodos de baja demanda de potencia y producirían durante los períodos de alta demanda de potencia, con lo que se llenan en los valles y cortan los picos [9].

3. TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ELECTRICIDAD Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

En cuanto a los sistemas principales para el almacenamiento de energía, hay ciertas tecnologías disponibles y otras en desarrollo que ayudarían con las necesidades del almacenamiento de energía. Cada una de ellas tiene sus propias características y estas son las que las convierten en idóneas para satisfacer unas u otras necesidades. A continuación se mencionarán las tecnologías de almacenamiento de electricidad: Volantes de inercia, SMES almacenan energía electromagnética con pérdidas insignificantes, súper condensadores, Bombeo hidráulico, aire comprimido CAES, baterías, en baterías hay diferentes tipos tales como: las baterías de plomo-acido, las baterías de Níquel-Cadmio, las baterías de ion-Litio, las baterías NaS, Baterías de flujo Redox [23] [11], Hidrogeno, UPS. En la **Figura 3**, se puede ver un resumen de estas tecnologías [8] [10]. Y en la **Figura 4** se presentan los principios desde el mecánico hasta el térmico que usan las tecnologías para su funcionamiento.

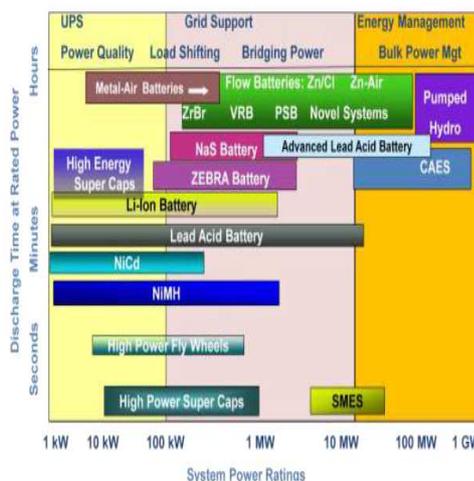


Figura 3. Tecnologías de almacenamiento de electricidad Fuente: (EIA, 2011)

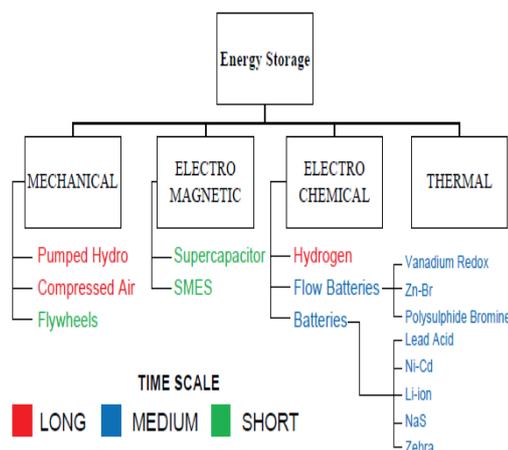


Figura 4. Principios de funcionamiento Fuente: (Teodorescu, Rasmussen, Rodriguez & Vikelgaard, 2010)

4. OTROS MODELOS

El almacenamiento de electricidad ha recibido recientemente una atención creciente a nivel mundial. Una gran cantidad de modelos han sido estudiados y se han aplicado al almacenamiento eléctrico de acuerdo a la necesidad de cada nación. En algunos casos también se tiene presente posibles penetraciones de tecnologías de almacenamiento en el sector energético para determinados países. A continuación se presenta una revisión de los principales estudios sobre el almacenamiento de electricidad. Estos estudios se pueden ver en más detalle en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Estudios de almacenamiento de energía.

Estudio	Apoyados	País	Tecnología	Analiza	Aporte
[14] Bueno, Carta (2006)	Algoritmo matemático	Islas Canarias	Eólica y Hidro bombeo	Penetración de energías renovables, la selección de un sistema renovable óptimo y económico.	Integración de generación eólica con un sistema hidráulico de almacenamiento por bombeo.
[24] Nair, Garimella, (2010)	En el software Simulink y Homero	New Zelanda	Baterías	Cuantificar los beneficios asociados a la integración de recursos renovables con el almacenamiento de energía por baterías a pequeña escala, en base a su mérito técnico y de viabilidad económica.	Las baterías de NiMH tienen el mayor potencial para el desarrollo en aplicaciones a pequeña escala de integración de energía renovable, los costos iniciales de capital para esta tecnología se reducen. El potencial de baterías Li-ion también.
[27] Sang Yong Park, Jong Wook Kim, Duk Hee Lee (2011)	Modelo en dinámica de sistemas y difusión de Bass	Corea	hidrogeno	La penetración de los vehículos con celdas de combustible de hidrogeno.	Los vehículos con celdas de combustible de hidrogeno tiene una penetración poco alentadora, debido al costo de los vehículos.
[7] Rocío Sánchez Zapata (2009)	Dinámica de sistemas y modelo logit	Colombia	Baterías	Impacto en la demanda de energía eléctrica en Colombia debido a la penetración de vehículos eléctricos.	La demanda de energía eléctrica en Colombia debido a los vehículos eléctricos incluso en 2025 puede ser satisfecha si los vehículos se conectan en horarios no pico, o se hacen diversas combinaciones de conexión, donde algunos vehículos pueden conectarse en horarios laborales cuando los vehículos están parqueados y otros en horarios nocturnos.
[12] Schilla, Kemfert, (2010)	Teoría de juegos Y Cournot	Alemania	Hidro bombeo	El almacenamiento de electricidad de manera estratégica.	La introducción de almacenamiento en general, suaviza los patrones convencionales de generación y los precios de mercado.
[13] Drury, Denholm, Siohansi, (2009)	Programación lineal	Estados Unidos	CAES	CAES para el arbitraje de la energía.	Los ingresos de arbitraje son poco probable que soporten una inversión de CAES en la mayoría de las localidades para el mercado.
[15] Vieira, Ramos, Covas & Almeida, (2008)	La programación lineal y Matlab	Portugal	Hidro bombeo	Optimización que determina la mejor operación por hora en un día, de acuerdo a la tarifa eléctrica, de un sistema de acumulación por bombeo	Los resultados mostraron que hay un ahorro que se puede lograr de casi 100 € por kw, esto se da cuando se compara con el funcionamiento de modo normal. Cuando un parque de viento se aña hay un beneficio más alto.
[16] Lund, Salg, Elmegard, Andersen, (2009)	Programación dinámica	Dinamarca	CAES	Estrategia de operación óptima para una planta CAES, de manera rentable.	Se logra que la planta CAES pueda aumentar de manera optima en un 10% mas.
[17] Sensfub, Genese (2007)	En agentes y en la plataforma PowerACE	Alemania	Hidro bombeo	La evolución de los precios en el mercado spot de Alemania.	Indica que el mercado sigue siendo impulsado a medida por los datos fundamentales como el costo marginal de generación, y en ocasiones el costo de generación por almacenamiento de energía por bombeo contribuye brevemente a la disminución del precio.
[18] Zhang & Li, (1999)	Algoritmos simulación estocástica	China	Hidro bombeo	Los efectos del descuento de capacidad de almacenamiento por bombeo de su capacidad total.	El descuento de capacidad de almacenamiento por bombeo está relacionado con su capacidad depósito de almacenamiento total y de carga. El principal efecto escuanto mayor sea la capacidad del depósito, es menos probable el descuento que produce energía insuficiente en periodos de punta.
[25] Anagnostopoulos, Papantonis (2012)	Algoritmo	Grecia	Hidro bombeo	Rendimiento de una unidad de almacenamiento por hidro bombeo.	Una cantidad considerable de producción se puede almacenar de la hidroeléctrica, ya que el rendimiento es bueno. Pero la viabilidad económica de la inversión depende de alguna manera de la situación de Grecia, más adelante se puede integrar con eólica y ser mejor.
[26] Marano, Rizzo, Tiano (2012)	Algoritmo de programación	Estados Unidos	CAES	Manejo de la planta CAES con eólica.	La integración de la tecnología CAES y eólica puede ayudar a aumentar la viabilidad económica de las fuentes de energías renovables y reducir fuertemente las emisiones de CO2. Además, el coste puede reducirse en promedio de un 80% con respecto al escenario convencional.

5. SUPUESTOS DEL MODELO

Para la elaboración del modelo propuesto se parten de varios supuestos algunos son:

-Los datos tomados son de referencias Colombianas como UPME, Ministerio de Minas y Energía, EIA (Energy International Agency), entre otros.

-El modelo se plantea para un tiempo de 15 años.

-La tecnología de almacenamiento es un banco de baterías de plomo-ácido con capacidad de 259.2 [Kw].

-Valor de un banco de baterías es de 88.600.000 pesos Colombianos [Col\$].

-Precio de compra de energía es de 47[\$/Kwh].

-Precio de venta de energía es de 70[\$/Kwh].

6. MODELO

El objetivo de este modelo es estudiar la viabilidad del almacenamiento de energía en bancos de baterías en el mercado eléctrico mayorista de Colombia para la posterior comercialización en el mismo, teniendo presente el caso ideal, que es cuando el precio de energía comprada para almacenar en el banco de baterías es menor que el de venta con una diferencia significativa, este principio se conserva durante toda la simulación.

Por otro lado este problema tiene múltiples particularidades como: relaciones no lineales entre sí y retardos que no sería posible analizar en modelos tradicionales de evaluación de proyectos.

Como se observa en la **Figura 6** al modelo lo componen 5 ciclos, 3 de balance y 2 de refuerzo que ayudan a la descripción de los 3 ciclos fundamentales que se explicaran de manera general a continuación: **Ciclo 1:** Compra de banco de baterías. En este ciclo se adquiere la tecnología de almacenamiento por banco de baterías teniendo presente su vida útil, entre otras. **Ciclo 2:** Compra de energía. En este ciclo se hace la compra de energía, teniendo claro la capacidad disponible de almacenamiento, además como este es el caso ideal entonces siempre se compra a un precio de 47[\$/Kwh] la energía para almacenar en el banco

de baterías, para su posterior venta en el mismo mercado, a un precio de 70[\$/Kwh] estos valores se mantienen constantes durante toda la simulación, y el **Ciclo 3:** Utilidad. En este ciclo se tiene los gastos y las ganancias desde la compra de los bancos de baterías hasta la venta de energía.

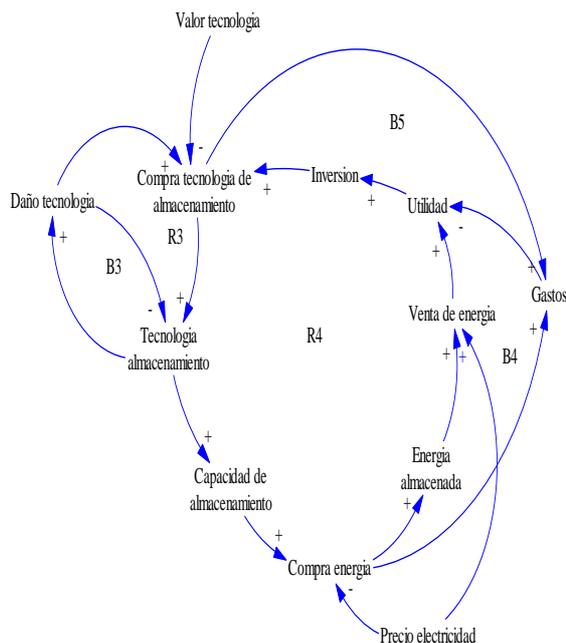


Figura 6. Diagrama causal del Modelo propuesto

6. 1 RESULTADOS DEL MODELO

Algunos de los resultados más relevantes son:

- **Utilidad:** Como se observa en la **Figura 7**, el valor es creciente. Esto beneficiara la expansión del mercado, de forma que al aumentar la utilidad, aumentará la reinversión en nuevos bancos de baterías, y por consiguiente se generarán mayores ventas de energía.

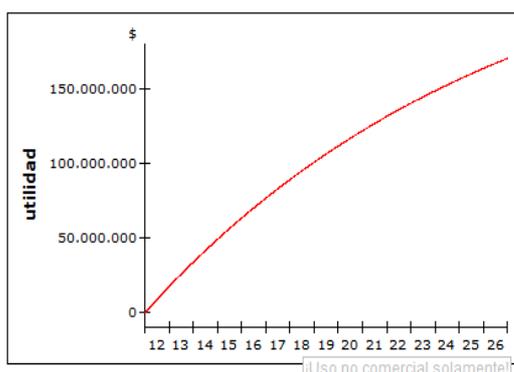


Figura 7. Utilidad

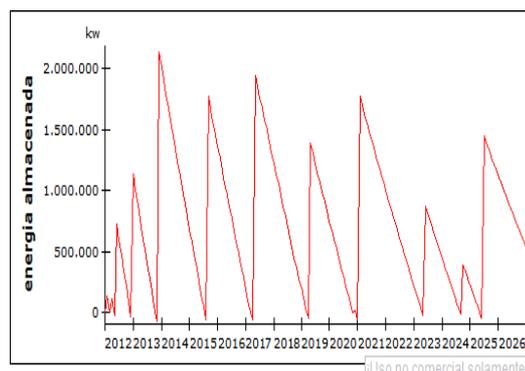


Figura 9. Energía Almacenada

- Valor Presente Neto: Apoyando la viabilidad generada por el modelo se calcula el valor presente neto de la inversión inicial, para el tiempo de 15 años. Como resultado se obtiene que el VPN de este proyecto sea de \$140.934.061. Lo que hace viable el proyecto.

- Banco batería: este comportamiento refleja la adquisición de los bancos de baterías iniciando con la compra de 33 bancos de baterías en el año 2012, además el comportamiento es decreciente por que a medida que va pasando el tiempo la vida de las baterías se va acercando a su final por esta razón en el último año es cercano a cero ya que la vida útil de las baterías acierta con el tiempo de simulación del modelo que es de 15 años, esto se puede ver en la Figura 8.

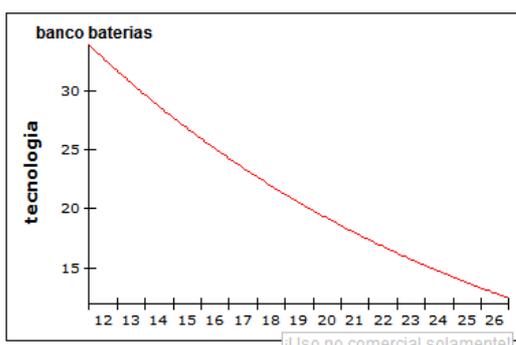


Figura 8. Banco batería

- Energía Almacenada: Como se observa en la Figura 9 la energía almacenada tiene un comportamiento creciente cuando se compra la energía y pasa a estar almacena luego decrece cuando se vende la energía.

7. ESCENARIOS

7.1 MAXIMIZACIÓN DEL PRECIO DE VENTA DE ENERGÍA ALMACENADA

En el primer escenario se desea estudiar qué pasaría si el precio de venta de energía almacenada se maximizara, ya que el precio de energía en Colombia ha llegado hasta 170\$/KW. Pero para asegurar la venta se hace hasta 124\$/KW. Como se observa en la Figura 10 la utilidad que se genera es creciente y más alta que en el resultado inicial.

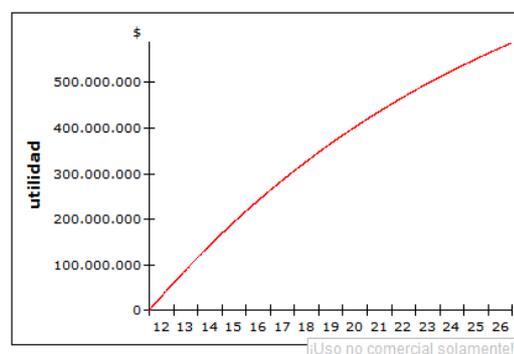


Figura 10. Utilidad

7.2 MAXIMIZACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

En el segundo escenario se desea estudiar qué pasaría si la inversión inicial se maximizara, debido a que las inversiones en energía son inversiones muy altas. Como se observa en la Figura 11 la utilidad que se genera es creciente y más alta que en el resultado inicial, sin embargo no es mejor que el anterior escenario.

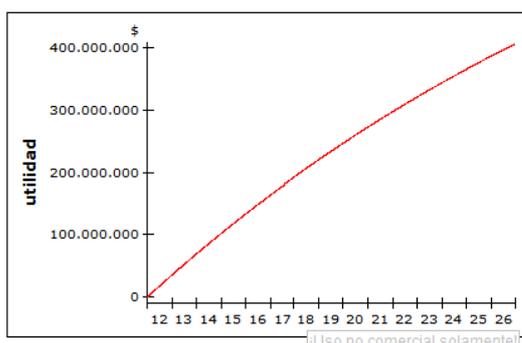


Figura 11. Utilidad

7.3 MAXIMIZACIÓN DE LA VIDA ÚTIL

En el tercer escenario se desea estudiar qué pasaría si la vida útil se maximizara, ya que hay baterías que tienen la vida útil hasta 20 años. Como se observa en la **Figura 12** la utilidad que se genera sigue siendo creciente y más alta que en el resultado inicial.

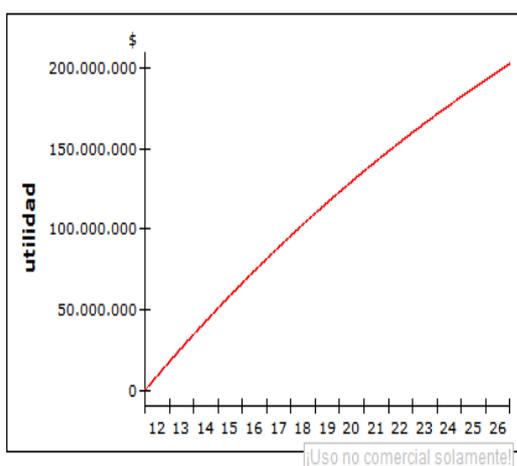


Figura 12. Utilidad

8. CONCLUSIONES

Unas de las conclusiones más relevantes son:

- El almacenamiento de energía en bancos de baterías de plomo-ácido es viable en el futuro para almacenar energía y comercializarla en el mercado mayorista de Colombia ya que da utilidad aunque es poca, pero con el tiempo las baterías podrán ser mejoradas para obtener más beneficio a la hora del almacenamiento. Sin embargo hay que tener presente que este es el caso ideal del almacenamiento de energía eléctrica por bancos de baterías en el mercado mayorista de Colombia, entiéndase ideal debido a que en este modelo siempre se compra a un precio de 47[\$/Kwh], la

energía para almacenar en el banco de baterías, para su posterior venta en el mismo mercado, a un precio de 70[\$/Kwh], con una diferencia positiva de 23[\$/Kwh]. Sin embargo en el mercado real no siempre se da esta diferencia.

- Aparte de la viabilidad arrojada por el modelo se calcula el valor presente neto del proyecto para el tiempo de 15 años. Como resultado se obtiene que el VPN de este proyecto es de Col\$ 140.934.061 pesos Colombianos. Lo que hace viable el proyecto. Sin embargo es de anotar que este es un valor relativamente bajo para un proyecto de energía y teniendo en cuenta que el valor de la inversión inicial es alto.

- Este estudio ayuda a debilitar las barreras que impiden el fomento desde el punto de vista del almacenamiento de energía eléctrica en Colombia.

- De los escenarios que se estudiaron el que más contribuye a la utilidad es el escenario de maximización del precio de venta, seguido de la maximización de la inversión inicial. Sin embargo la maximización de la vida útil da un aumento significativo también a la utilidad lo cual muestra lo fundamental de la vida útil en las baterías.

9. REFERENCIAS

[1] Ter-Gazarian A. 1994. Energy Storage For Power Systems. sixth edition, Peregrinus Ltd. Great Britain, 142-156

[2] Baxter R, 2006. Energy Storage a Nontechnical Guide. PennWell Corporation. USA.

[3] Rey M, Garde R & Martínez R. 2011. Guía del almacenamiento de energía. Dirección General de Industria Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Madrid, 25 - 61.

[4] Prias O, 2010. Programa De Uso Racional Y Eficiente De Energía Y Fuentes No Convencionales Proure. Informe Final Plan De Acción 2010-2015. Bogotá Colombia, 11-19

[5] IEA 2009. Key World Energy Statistics. Recuperado el 3 de Marzo de 2012, de http://hopi.iea.org:10000/search/search/C.view=de_fault/results?q=ELECTRICITY+GENERATION+BY+SOURCE+WORLD&s=&sa=0&hf=10

[6] Díaz F. Optimización De La Operación Y Evaluación De La Eficiencia Técnica De Una Empresa De Generación Hidroeléctrica En Mercados De Corto Plazo. Tesis de Doctoral.

Facultad de minas, universidad nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2011.

[7] Sánchez R, 2009. Impacto En La Demanda De Energía Eléctrica En Colombia Debido A La Penetración De Vehículos Híbridos-eléctricos Y Eléctricos. Tesis de grado Facultad de minas, universidad nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 48-49.

[8] EIA 2011. Electricity storage technologies can be used for energy management and power quality. Recuperado el 3 de Marzo de 2012, de <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=4310>

[9] Whittingham M. 2008. Materials Challenges Facing Electrical Energy Storage. Binghamton University, USA, 14-17

[10] IEA 2008. energy technology perspectives Scenarios & Strategies to 2008. Recuperado el 10 de noviembre de 2011, de <http://search.atomz.com/search/?spq=energy+technology+perspectives++2008&sp-a=sp10029401&sp-p=all&sp-f=ISO-8859-1>

[11] Huggins R. 2009. Advanced Batteries materials science aspects. Stanford University. Springer.

[12] Schilla P, & Kemferta C. 2010. The Effect of Market Power on Electricity Storage Utilization: The Case of Pumped Hydro Storage in Germany. Berlin, Department of Energy. Germany, 2-22.

[13] Drury E, Denholm P, Sioshansi R. 2009. The Value of Compressed Air Energy Storage in Energy and Reserve Markets. National Renewable Energy Laboratory, 2-14.

[14] Bueno C & Carta J. 2006. Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 312-340.

[15] Vieira F, Ramos H, Covas D & Almeida A, 2008. Pump-Storage Optimization with Renewable Energy Production in Water Supply Systems. Department of Civil Engineering, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon. Portugal, 2-16.

[16] Lund H, Salgi G, Elmegaard B, & Andersen A, 2009. Optimal operation strategies of compressed air energy storage (CAES) on

electricity spot markets with fluctuating prices. Applied Thermal Engineering, 799-806.

[17] Sensfub F & Genoese M, 2007. Agent-based simulation of the German electricity markets-An analysis of the German spot market prices in the year 2001. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. Alemania, 2-10.

[18] Zhang SH & Li YZ. 1999. Pumped-storage capacity discount and its effect on capacity planning, Electric Power Systems, 43-49.

[19] Franco C. C. Un Modelo Nacional Desagregado para la Formulación de Políticas para el uso Racional de Energía. Tesis de Postgrado. Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1996.

[20] Teodorescu R, Rasmussen C, Rodriguez P & Vikelgaard H. 2010. Overview of the Energy Storage Systems for Wind Power Integration Enhancement. IEEE, 32-51

[21] XM 2011. Informe De Administración Y Operación Del Mercado 2011. Recuperado el 9 de Mayo del 2011, de <http://www.xm.com.co/Search/Results.aspx?k=INFORME%20DE%20ADMINISTRACION%20Y%20OPERACION%20DEL%20MERCADO&s=All%20Sites&start=1>

[22] Rojas J. 2011. Red eléctrica inteligente taller regional Redes Inteligentes en América Latina y el Caribe Experiencias locales y globales. Ice.

[23] Waegel A. 2010. The storage of renewable energy: A comparative examination of deep-cycle batteries and hydrogen fuel cell systems. University of Delaware, 2-16.

[24] Nair N, Garimella N, 2010. Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration. Energy and Buildings 42. 2124-2130.

[25] Anagnostopoulos J & Papantonis D. 2012. Study of pumped storage schemes to support high RES penetration in the electric power system of Greece. Energy. 1-8.

[26] Marano V, Rizzo G & Tiano F, 2012. Application of dynamic programming to the optimal management of a hybrid power plant with wind turbines, photovoltaic panels and

compressed air energy storage. Applied Energy 97. 849–859.

[27] Park S. Y., Kim, J.W. & Lee, D.H. 2011 Development of a market penetration forecasting model for hydrogen fuel cell vehicles considering infrastructure and cost reduction effects. Energy Policy 39 3307-3315.

10. ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

SMES: (Superconducting Magnetic Energy Storage) Almacenamiento de energía magnética por superconducción.

CAES: Almacenamiento de energía por aire comprimido.

UPS: (Uninterruptible Power Supply) Sistema de alimentación ininterrumpida.

EIA: Energy International Agency.

UPME: Ministerio de Minas y Energía.

11. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al grupo de investigación de sistemas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín por el acompañamiento en el trabajo, a los profesores asociados a la materia de dinámica de sistemas que ayudaron a la corrección y validación del modelo. A las personas que de alguna u otra forma estuvieron involucrados en la elaboración del modelo y al estudiante de la especialización de sistemas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín Andrés Lopera por la obtención de algunos datos para el modelo.



www.dinamica-de-sistemas.com

Libros

Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



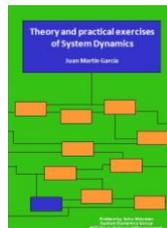
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)