

NOVA MIRON

Sistemas de almacenamiento de energía Tecnología BESS.

Parte 2

1) Propiedades y capacidades de los sistemas de almacenamiento

Para diseñar un SAE adecuado y elegir, de tal modo, la solución idónea para una aplicación específica, será fundamental realizar las evaluaciones comparativas de las capacidades y rendimientos potenciales, de cada propuesta en el plan de inversión de capital.

A estos fines, veremos las características principales de los SAE, que permiten sus evaluaciones en las etapas iniciales de los proyectos de inversión.

a) Parámetros nominales de los SAE

Como un primer paso en la evaluación de la propuesta, se deberá establecer el rango de potencia adecuado para la aplicación específica

Luego, en un segundo paso, se establecerá la autonomía operativa necesaria, a los fines de la aplicación. En tal caso se deberá recurrir a la Capacidad Energética del SAE.

En la siguiente tabla se muestran distintas clases de SAE (ver Parte 1), junto a sus rangos de Potencia y las Autonomías específicas a cada uno.

Clase de SAE	Rango de potencia	Autonomía
Central de bombeo	200 MW a 1 GW	5 a 20 h
CAES	100 MW a 1 GW	2 a 4 h
Flywheels	20 a 500 kW	5 a 15 min
SMES	5 a 80 MW	5 a 10 min
BESS (Litio-ion)	1 a 500 kW	30 min a 4 h
BESS (Pb-ácido)	1 kW a 2 MW	50 min a 6 h
Baterías de flujo	50 kW a 8 MW	4 a 6 h

NOVA MIRON

Celda combustible (H ₂)	1 kW a 1 MW	2 a 800 h
-------------------------------------	-------------	-----------

Se destaca que el producto de la potencia por la autonomía nos permite obtener, como resultado, la Capacidad Energética del SAE.

Se observa que la celda de H₂ posee la mayor Capacidad Energética, con un período de almacenamiento prolongado, lo cual determina el denominado “Almacenamiento Estacional”, a tener en cuenta en los análisis de las propuestas de inversión.

A los fines prácticos, se consideran SAE que permitan una autonomía posible de hasta decenas de horas.

b) Densidad de energía

Otro parámetro clave, relacionado con una tecnología SAE determinada, es la Densidad de Energía.

En la siguiente tabla se indican valores de las Densidades de Energía de distintas clases de SAE electroquímicos, junto al correspondiente mecánico Flywheel, a fines comparativos.

A los efectos prácticos se representa la Densidad de Energía Volumétrica, con las unidades de [Wh/dm³] o [kWh/m³].

Además, se indica la Densidad de Energía ponderada [Wh/kg] o [kWh/tn].

Clase de SAE	Densidad de energía volumétrica [kWh/m ³]	Densidad de energía ponderada [kWh/tn]
BESS (Litio-ion)	150 a 400	80 a 150
BESS (Pb-ácido)	20 a 80	20 a 35
Baterías de flujo	18 a 30	15 a 28
Flywheels	10 a 20	10 a 12

Ambos parámetros de Densidad de Energía son valores clave para proceder a la selección del SAE con la tecnología más adecuada, para la aplicación requerida.

NOVA MIRON

Se deberá tener muy en cuenta que los valores de ambos parámetros, indicados por los fabricantes, por lo general no consideran la Eficiencia de la Energía, ni las pérdidas durante la carga, la descarga o la autodescarga (ver Parte 1).

Por lo tanto, en la realidad y a la hora de adquirir un SAE específico, tener en cuenta que la energía almacenada especificada por el fabricante, no será igual a la que se puede obtener.

Para las fases de evaluación y especificación de la tecnología de almacenamiento a adquirir, además de considerar las pérdidas, se deberá incorporar la especificación del nivel de potencia durante el intercambio de energía real.

c) Densidad de Potencia. Potencia Específica

Otro enfoque para comparar los SAE, se basa en la cuantificación y especificación de la Capacidad de Potencia.

Por lo general, este parámetro se representa a través de la Densidad de Potencia (o Potencia Específica).

Se la define como la cantidad de potencia (velocidad de transferencia de la energía por unidad de tiempo) por unidad de volumen.

Por tal motivo, a veces se la denomina como Densidad de Potencia Volumétrica.

Las unidades usuales son, $[W/dm^3]$ o $[kW/m^3]$ o $[W/m^3]$.

La relación potencia-peso (o potencia específica) vendrá dada por el valor de la potencia generada por un SAE dividida por su masa.

Este parámetro se expresa, por lo general, en $[W/kg]$ o en $[kW/ton]$.

Para tecnologías SAE de altos niveles de potencia (por ejemplo, supercapacitores), la potencia específica se suele expresar en $[kW/kg]$.

Como ya comentamos en el ítem previo, los parámetros descriptos son sólo una indicación aproximada, otorgada por el fabricante.

Por lo tanto, los valores indicados por el fabricante, no deben interpretarse en términos de eficiencia energética, sino como una orientación que permita establecer lo que es posible o admisible, para la aplicación práctica del SAE.

2) Diagrama de Ragone

NOVA MIRÓN

El Diagrama de Ragone se utiliza como una herramienta para poder comparar el rendimiento de diversos SAE, así como asistir en la selección más adecuada para una aplicación específica.

Es decir, asiste, en forma eficaz, en la toma de decisiones en la fase de adquisición de la tecnología de almacenamiento, adecuada a los fines de la organización.

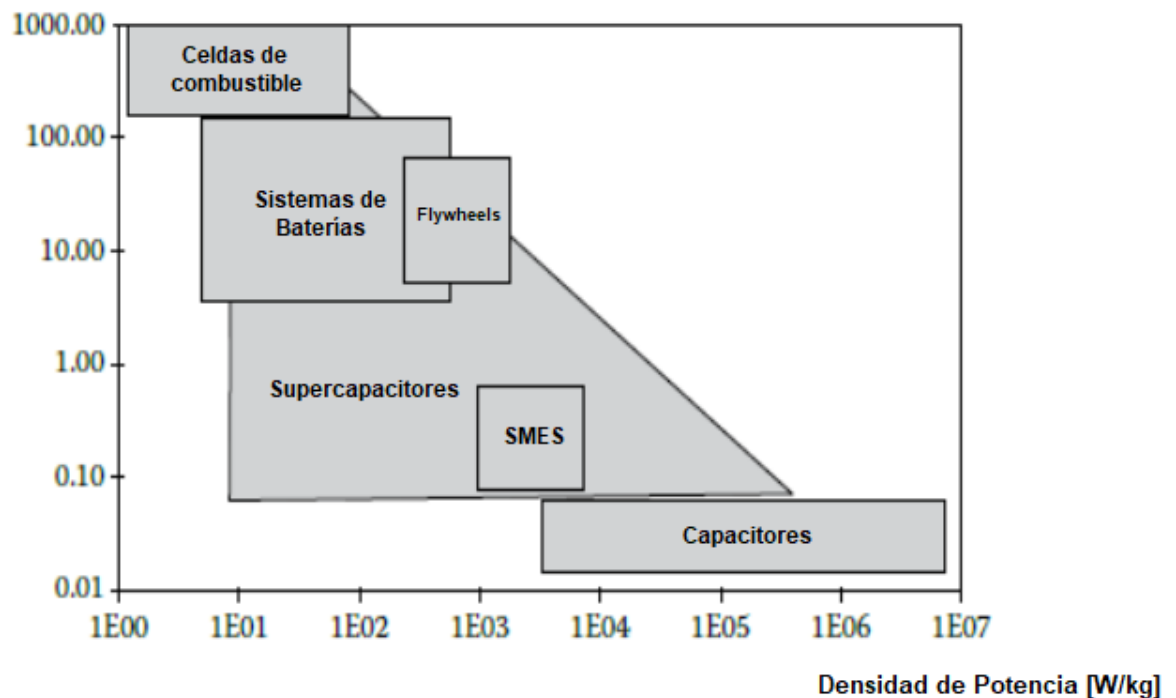
Este diagrama hace uso de dos parámetros, cuyos valores se representan en ejes cartesianos. Tendremos:

- Energía específica o densidad de energía ponderada (en Wh/kg) “em”. Se representa en el eje Y.
- Potencia específica o relación potencia-peso (en W/kg) “pm”. Se representa en el eje X.

Con el fin de poder comparar las capacidades de diferentes clases de SAE (ver Parte 1), este diagrama hace uso de la representación logarítmica, abarcando así, un amplio rango de potencias nominales, con valores altos y bajos, permitiendo de tal modo representar y comparar, en un mismo diagrama, distintas clases de SAE.

En la siguiente figura se observa un Diagrama de Ragone.

Densidad de Energía [Wh/kg]



NOVA MIRON

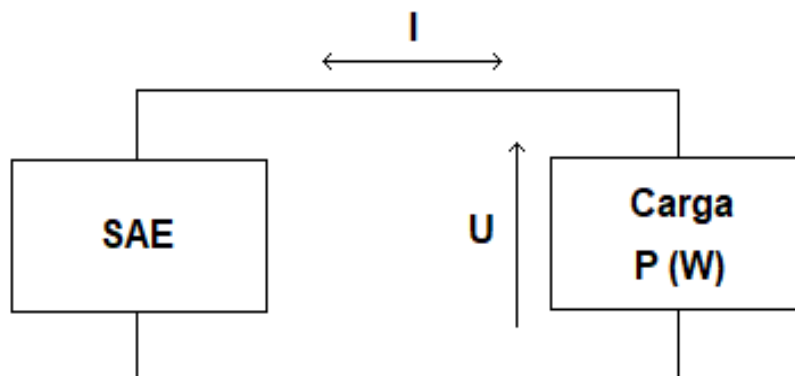
En el eje Y (densidad de energía ponderada), se representa la cantidad de energía disponible en el SAE y en el eje X (potencia específica), la velocidad en que se transfiere la energía (potencia).

Una propiedad, la cual se desprende de este diagrama, resulta de la relación entre la Densidad de Energía y la Densidad de Potencia, de cada SAE, ya que permite obtener el tiempo de carga o descarga requerido para operar.

A continuación, haremos una descripción un poco más detallada, de esta herramienta de análisis de los SAE.

a) Fundamentos

Podemos establecer el siguiente esquema de operación de un SAE, para asociarlo al Diagrama de Ragone.



Se observa que el SAE suministra energía a una carga, que a los fines de nuestro desarrollo, se asume de potencia constante (P).

El módulo indicado como SAE contiene los dispositivos (convertidor de potencia controlado) para establecer el almacenamiento de energía, los cuales pueden representarse por una fuente de tensión controlada por la carga almacenada en el sistema (fuente de tensión no independiente con expresión funcional $V(q)$).

También se incorpora, para un modelo más realista, una resistencia interna R (pérdidas), una resistencia de fuga R_f y una inductancia interna L (acumulación de energía del campo magnético).

Por lo tanto, queda establecido, por el modelo, que la energía disponible para la carga (E), será una función de la potencia (P), conformando de tal forma el Diagrama de Ragone.

NOVA MIRON

El proceso de carga y descarga del sistema, se representa por la corriente I (ambos sentidos de circulación).

b) Formulaciones

Sabemos, de la Parte 1, que la eficiencia de energía de un SAE, dependerá de las distintas pérdidas que se establezcan en el sistema. En tal sentido, comentamos (Parte 1) las pérdidas por carga y descarga, así como las pérdidas por autodescarga, todas impactando en la eficiencia de conversión.

En consecuencia, la cantidad de energía que realmente se puede recuperar de un SAE, completamente cargado, deberá definirse en relación a la potencia instantánea en el proceso de transferencia de energía.

Lo anterior establece la existencia de un principio de interdependencia, entre la densidad de energía y la densidad de potencia, la cual se representa en el Diagrama de Ragone.

Podemos entonces, delinear las bases de las formulaciones del modelo del SAE, en donde la tensión sobre la carga (U) y la corriente (I) se expresarán por:

$$U(q) = \frac{P}{I} = \frac{P}{\dot{q}}$$

En donde $P = \text{ctte.}$

Por lo tanto, la formulación de la dinámica del sistema será:

$$U(q) = -\frac{P}{\dot{q}} = L \ddot{q} + R \dot{q} + V(q)$$

Asumiendo las condiciones iniciales: $q(0) = q_0$ y $\dot{q}(0) = \dot{q}_0$

Al realizar un planteo general de la dinámica, la resolución se refiere a todos los SAE (electroquímicos, mecánicos, etc.).

El Diagrama de Ragone, derivado de la resolución de la dinámica del SAE, se establecerá en base a la relación $E(P)$ y P , siendo $E(P)$ la energía disponible por el sistema.

Por ejemplo, para un SAE del tipo BESS, podemos establecer un modelo que derive en el Diagrama de Ragone.

NOVA MIRON

A los fines, vamos a adoptar un sistema de batería ideal, asumiendo que no hay acumulación de energía interna en el campo magnético ($L_i = 0$) y la existencia de una corriente de dispersión o de fuga (representada por la resistencia R_f).

La capacidad de carga inicial de la batería tendrá el valor q_0 . U_0 es la tensión de la celda de la batería y $E_0 = U_0 q_0$, la energía inicial de la batería.

Bajo estas condiciones, se puede plantear la resolución dinámica del sistema, obteniendo:

$$E(P) = \frac{2 R q_0 P}{U_0 - \sqrt{U_0^2 - 4 R P} + 2 U_0 \frac{R}{R_f}}$$

$E(P)$ será la energía de la batería, la cual estará disponible para la carga P .

Con el fin de obtener el diagrama y facilitar el análisis y comparación del SAE, se adoptan magnitudes adimensionales, con factores de normalización asociados, a saber:

$$\text{Densidad de Energía normalizada} = e = \frac{E(P)}{U_0 q_0} = \frac{E(P)}{E_0}$$

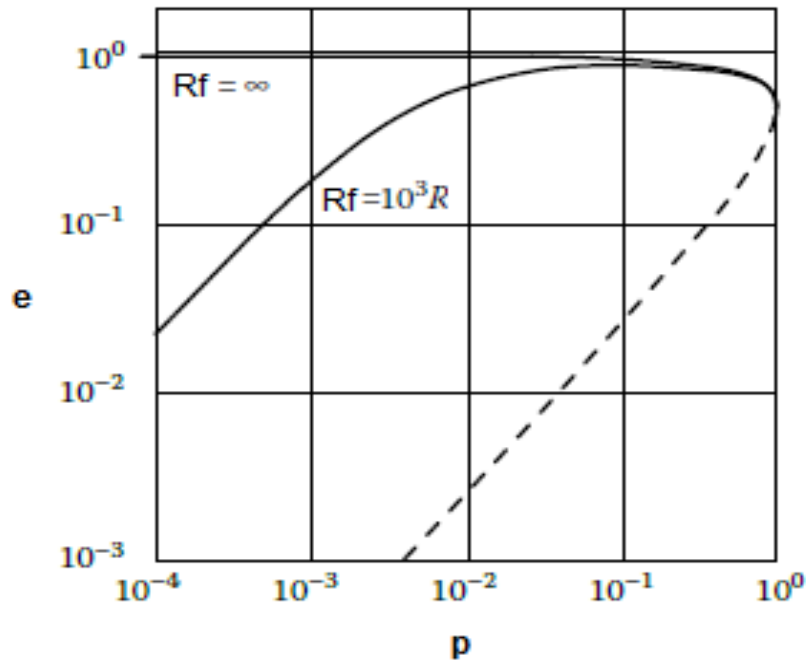
$$\text{Densidad de Potencia normalizada} = p = \frac{P}{\frac{U_0^2}{4R}} = \frac{4RP}{U_0^2}$$

Reemplazando las magnitudes normalizadas en la expresión de $E(P)$, se obtiene la representación del Diagrama de Ragone normalizado de la batería.

$$e(p) = \frac{p}{2 \left(1 - \sqrt{1 - p} + 2 \frac{R}{R_f}\right)}$$

Representando gráficamente $e(p)$:

NOVA MIRON



Se grafica para una corriente de fuga despreciable ($R_f \rightarrow \infty$) y para una R_f con un valor de 1000 veces la resistencia interna de la batería.

De la expresión analítica de $E(P)$, o bien del Diagrama de Ragone, se pueden extraer, además de comparar la performance con otros SAE, conclusiones fundamentales en la operación del sistema de almacenamiento con baterías.

Por ejemplo, si se considera la circulación de una corriente de fuga a través de R_f , se obtiene que, para el límite $P \rightarrow 0$, la energía de la batería será nula ($E(0) = 0$).

Bajo estas condiciones se demuestra que se obtiene un máximo de energía entregada por la batería en la carga, con un valor de:

$$P = \frac{U_0^2}{\sqrt{2 R R_f}}$$

Por el contrario, si se desprecia la corriente de fuga ($R_f \rightarrow \infty$), entonces, en el límite $P \rightarrow 0$, salvando la indeterminación en el numerador y denominador, en el paso al límite de $E(P)$, se obtiene: $E(0) = q_0 U_0 = E_0$.

NOVA MIRÓN

Por lo tanto, la Densidad de Energía normalizada “ $e(0)$ ”, tendrá el valor unidad, tal cual se observa del Diagrama de Ragone.

En este caso, se obtiene un máximo de energía entregada por la batería a la carga, en un punto característico.

El valor de la carga para la transferencia máxima de energía será:

$$P = \frac{U_0^2}{4R}$$

En la Parte 3 comenzaremos a describir las tecnologías disponibles de almacenamiento electroquímico (BESS), detallando las distintas clases de baterías, en función del tipo de electrolito que las conforman.

Además, vamos a referirnos al concepto de Eficiencia de los sistemas de almacenamiento y su relación con el ciclo de vida de los mismos, desde un enfoque de la Gestión de Activos y los planes de proyectos de inversión de capital.

Departamento de Ingeniería.

Nova Mirón S.A