CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO
Revista digital universitaria
Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Modelado y diseño de sistema de almacenamiento de energía por medio de la gravedad usando un PMSM

Serrato-Ceballos, J.F.[1]; Loera-Palomo, R.[2]; Sellschopp-Sánchez, F. S.[3]; Álvarez-Macías, C.[4]

Datos de Adscripción:

[1] José Fidel Serrato Ceballos. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de la Laguna, m.jfserratoc@correo.itlalaguna.edu.mx, https://orcid.org/0009-0009-0499-7489.

[2]✉ Rodrigo Loera Palomo. SECIHTI--Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. rloerapa@secihti.mx, https://orcid.org/0000-0003-4586-3523

[3] Francisco Sergio Sellschopp Sánchez. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de la Laguna. fsellschopps@correo.itlalaguna.edu.mx, https://orcid.org/0000-0003-3516-3523.

[4] Carlos Alvares Macias. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de la Laguna, calvarezm@correo.itlalaguna.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-2263-0316

Resumen **-** El presente trabajo describe el desarrollo del modelo dinámico de un sistema mecánico-eléctrico de almacenamiento de energía por medio de la gravedad. El sistema de almacenamiento se basa en una masa suspendida, un tambor, un sistema de transmisión y una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM); en el cual, al levantar la masa se almacena energía potencial, mientras que la liberación de la masa suspendida permite la recuperación de energía, convirtiéndose en energía eléctrica por medio de una máquina eléctrica. A través del modelado y análisis del sistema mecánico, se dará una guía de diseño para determinar los parámetros de la masa suspendida, radio del tambor y la relación del sistema de transmisión; los cuales se basan en las especificaciones nominales de operación de la máquina eléctrica. La extracción controlada de la energía cuando la masa suspendida desciende requiere de la conexión de un rectificador controlado en terminales de la máquina eléctrica, así como esquemas de control apropiados; debido al enfoque del trabajo, se establecerán funciones de voltaje que sustituyen la operación del rectificador controlado, asegurando una operación adecuada del esquema de almacenamiento. Los resultados de simulación se realizan en el entorno de Matlab/Simulink®, con los cuales se demuestra que con los valores de diseño para el sistema mecánico y las funciones de voltaje hacen que la máquina eléctrica funcione en sus condiciones nominales en la condición de descarga, permitiendo entregar una potencia de 741 kW por un tiempo de 8 horas.

Palabras Clave **-** Almacenamiento de energía, Almacenamiento por gravedad, Generación renovable, PMSM.

Abstract **-** This study develops a dynamic model of a gravity-based mechanical–electrical energy storage system. The proposed configuration integrates a suspended mass, a crane drum, a transmission system, and a permanent magnet synchronous machine (PMSM). Energy is stored by lifting the mass, thereby accumulating potential energy, and recovered during descent through conversion into electrical power by the PMSM. The mechanical modeling and analysis provide a systematic design framework to determine critical parameters—namely the suspended mass, drum radius, and transmission ratio—based on the nominal operating conditions of the synchronous machine. To achieve controlled energy extraction during discharge, the system requires a rectifier connected at the machine terminals and suitable control strategies. In this work, voltage functions are proposed to replicate rectifier behavior, ensuring proper system operation. Simulation results performed in Matlab/Simulink® demonstrate that the selected mechanical parameters and voltage functions enable the PMSM to operate under nominal conditions during discharge, achieving a power delivery of 741 kW over an 8-hour period.

Keywords **-** Energy storage, Gravity storage, PMSM, Renewable generation.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica desempeñan un rol crucial en la integración de las fuentes renovables, ya que la generación de electricidad a partir de las fuentes renovables es altamente variable (Barelli, L. *et al*., 2021, p.1). En este sentido, y con el objetivo de conectar las fuentes de energía renovable a las líneas de transmisión a gran escala y, al mismo tiempo, garantizar una operación estable del sistema eléctrico, especialmente en el caso de las energías renovables como una fuente primaria de energía eléctrica del futuro de los sistemas de potencia, la tecnología del almacenamiento de la energía será una tecnología esencial en los sistemas de potencia (Li, J. *et al*., 2015, p.15).

Dentro de los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento, el sistema de almacenamiento de energía por medio de la gravedad (GESS) se basa en almacenar energía eléctrica en energía potencial, esto significa que el sistema se carga al levantar un cuerpo, el cual adquiere el potencial de realizar un trabajo, y al dejar que el cuerpo caiga, esta energía potencial se convierte en energía cinética. La energía cinética generada por el movimiento del cuerpo en caída es aprovechada mediante un sistema mecánico acoplado a una máquina eléctrica, la cual se encarga de transformar dicha energía en energía eléctrica (Tong, W. *et al*., 2022, p.928).

En el contexto del sistema GESS, y en este trabajo, se propone el uso de una PMSM como medio para la conversión de energía mecánica a eléctrica, considerando que existen estudios sobre el sistema GES, como Rufer (2020, p. 1), Mugyema et al. (2022, p. 1) y Yu et al. (2022, p. 704), que no contemplan la utilización de este tipo de máquina.

Actualmente, un sistema ampliamente usado que utiliza el mismo principio que el GESS son las hidroeléctricas, pero a diferencia de este sistema, el sistema de almacenamiento por gravedad no está limitado por la geografía para llevar a cabo su construcción (O'Neill, S., 2022, p.3). Además, este sistema presenta un rango de eficiencia de carga y descarga entre el 80% y el 90% (Tong, W. *et al*., 2022, p. 930). En la operación de los sistemas GESS, empresas comerciales como Gravitricity® indican respuestas

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID061

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

menores a 1 segundo; además de que el sistema puede trabajar con tiempos de descarga de entre 15 minutos y 8 horas. En el sistema GES se estima que la vida útil supera los 50 años (Botha, C. *et al*., 2019, p.161).

En este artículo se realiza el análisis de un esquema GESS bajo condiciones ideales, con el objetivo de simplificar los cálculos y establecer la parametrización del sistema a partir de las condiciones nominales mecánicas de una máquina eléctrica de imanes permanentes. El sistema GESS propuesto está conformado por una máquina eléctrica, un sistema de transmisión (también denominado caja multiplicadora), un tambor acoplado a la flecha de baja velocidad del sistema de transmisión y un cuerpo, este último conectado al tambor mediante un cable ideal sin masa. Por otro lado, se obtendrán funciones de voltaje que sustituyen al convertidor conectado en terminales de la máquina eléctrica, las cuales permiten generar una evolución suave del torque electromagnético y obtener un tiempo de respuesta adecuado del esquema GESS, así como un entorno de simulación adecuado para evaluar escenarios operativos del esquema GESS.

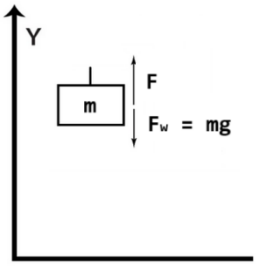
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Modelo de caída libre de un cuerpo

En el análisis del esquema GESS es necesario tomar en cuenta el movimiento de caída libre de la masa suspendida (figura 1). En este sentido, al aplicar la primera ley de Newton, la cual indica que la sumatoria de las fuerzas que se aplican a un cuerpo es igual a cero, se obtiene la siguiente expresión,

$$F - F_w - ma = 0, \tag{1}$$

Figura 1
Marco de referencia del movimiento lineal.



En donde $F_w = mg$ es la fuerza relacionada con el peso del cuerpo, m es la masa del cuerpo, g es la aceleración gravitacional de la tierra, y F es la fuerza incidente (o en oposición) al movimiento del cuerpo.

2.2 Modelo del sistema mecánico acoplando el cuerpo

Para aprovechar la energía cinética generada por la caída de un cuerpo, es necesario integrarlo con un sistema mecánico compuesto por un tambor, el cual permite su elevación o descenso, así como la conversión del movimiento lineal a rotacional. Este sistema mecánico, que se muestra en la figura 2, permite acoplar el cuerpo en movimiento a una máquina eléctrica mediante un mecanismo de transmisión. Para transformar el movimiento lineal de la caída en un movimiento rotacional útil dentro del sistema, se utilizan relaciones específicas entre el movimiento lineal y el rotacional.

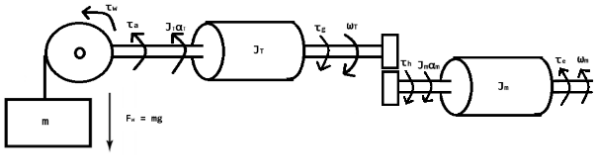
$$\tau_t = rF, \tag{2}$$

$$v_y = r\omega_t, \tag{3}$$

$$a_y = r\alpha_t, \tag{4}$$

donde τ_t es el torque en el tambor, r es el radio del tambor, v_y es la velocidad lineal, ω_t es la velocidad angular del tambor, a_y es la aceleración lineal, y α_t es la aceleración angular del tambor.

Figura 2
Marco de referencia del sistema mecánico.



Asimismo, se utilizan las siguientes definiciones de la relación de transmisión n,

$$n = \omega_m/\omega_t = \alpha_m/\alpha_t = \tau_g/\tau_H, \tag{5}$$

donde ω_m es la velocidad angular del lado de la máquina eléctrica, α_m es la aceleración angular del lado de la máquina eléctrica, τ_g y τ_H son los torques de contacto común entre los engranes (Vegte, J, 1994, p.32).

En función al diagrama de cuerpo libre (figura 2), la fuerza F_t es dada por el peso del cuerpo y la resistencia del cuerpo al ser acelerado,

$$F_t = mg + ma, \tag{6}$$

La suma de torques en el lado del tambor resulta en,

$$\tau_g - \tau_t - J_t\alpha_t = 0, \tag{7}$$

en donde J_t es el momento de inercia del tambor. De acuerdo con (2), el torque en el tambor se obtiene al multiplicar (6) por el radio del tambor, obteniéndose,

$$\tau_t = mgr + mar. \tag{8}$$

Sustituyendo (8) en (7) se obtiene (9), la cual define el movimiento angular tanto del tambor como de la flecha de baja velocidad,

$$\tau_g - mgr - mar - J_t\alpha_t = 0. \tag{9}$$

Ahora, considerando el lado del rotor de la máquina eléctrica, la sumatoria de torques resulta en,

$$\tau_e - \tau_H - J_m\alpha_m = 0, \tag{10}$$

en donde τ_e es el torque electromagnético, J_m es el momento de inercia del rotor de la máquina eléctrica, y α_m es la velocidad angular de esta misma.

Ahora, al despejar τ_g de (9) se obtiene,

$$\tau_g = mgr + mar + J_t\alpha_t. \tag{11}$$

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID061
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

A través de las expresiones (4), (5), (10) y (11) se obtiene la ecuación de movimiento para la flecha asociada al rotor de la máquina eléctrica, dada por:

$$\tau_e - J_m\alpha_m - \frac{J_t}{n^2}\alpha_m - \frac{mr^2}{n^2}\alpha_m - \frac{\tau_w}{n} = 0, \quad (12)$$

donde $\tau_w = mgr$.
Dado que la aceleración angular es la razón de cambio de la velocidad angular con respecto al tiempo, a través de (12) se obtiene la ecuación diferencial de movimiento vista en el lado del rotor,

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\tau_e - \frac{\tau_w}{n}}{J_{eq}}, \quad (13)$$

donde $J_{eq} = J_m - \frac{J_t}{n^2} - \frac{mr^2}{n^2}$.

Esta ecuación es útil para acoplar la dinámica del sistema mecánico con la máquina eléctrica.

2.3 Cálculo de los parámetros para el sistema GES

En este apartado, y en relación con el dimensionamiento del esquema GESS, se determinarán los siguientes parámetros: la velocidad de caída del cuerpo, la masa del cuerpo, el radio del tambor, y la relación de transmisión de la caja multiplicadora. Para ello se utilizan los parámetros nominales de una PMSM, dados por la potencia mecánica P_m y el torque electromagnético τ_e. Además, se proponen los parámetros de la altura h y el tiempo de descarga td.
De forma general, y en el proceso de generación, la velocidad de la masa suspendida se define por,

$$v_y = \frac{\Delta_y}{\Delta_t} = \frac{y_f - y_i}{t_f - t_i}, \quad (14)$$

donde la posición inicial del cuerpo y_i está dado por la altura disponible h, la posición final $y_f = 0$, el tiempo inicial $t_i = 0$ y el tiempo final t_f es el tiempo designado para el proceso de generación t_d; por lo tanto, la expresión de la velocidad lineal a la que el cuerpo caerá es,

$$v_y = -\frac{h}{t_d} \quad (15)$$

Una vez se obtiene una expresión para la velocidad, se determina la potencia mecánica desarrollada por la masa, dada por,

$$P_m = F_w v_y. \quad (16)$$

Dado que $F_w = mg$, además de que la potencia mecánica es conocida a partir de las especificaciones operativas de la máquina eléctrica, la masa de cuerpo suspendido es dada por la expresión,

$$m = -\frac{P_m}{gh}t_d. \quad (17)$$

Es evidente que el peso del cuerpo aporta un torque al sistema mecánico. Además, y en una operación en estado estable, este torque visto en el eje del rotor debe ser igual al par electromagnético nominal de la máquina eléctrica al no considerarse pérdidas. En consecuencia, al evaluar la ecuación (13) en estado estable, se obtiene,

$$\tau_e - \frac{mgr}{n} = 0. \quad (18)$$

Usando (18), se opta por dejar la variable n en función del radio del tambor, en donde se obtiene la expresión para la relación de transmisión, dada por,

$$n = \frac{mg}{t_e}r. \quad (19)$$

La ecuación anterior describe la relación de transmisión en función del radio del tambor, la cual permite que el torque aplicado a la máquina y la velocidad angular sean los nominales.

2.4 Modelo matemático del PMSM

Se emplea el modelo matemático del PMSM en el marco de referencia d–q, tal como se describe en (Wang, G. *et al*, 2020, p. 21, 23). A partir de este modelo, se obtienen las expresiones que caracterizan el comportamiento de las componentes d–q de la corriente en el estator, así como la ecuación que permite calcular el par electromagnético:

$$\frac{did}{dt} = \frac{1}{Ld}\left(v_d - R_s i_d + \frac{P}{2}\omega_m L_q i_q\right), \quad (20)$$

$$\frac{diq}{dt} = \frac{1}{Ld}\left(v_q - R_s i_q - \frac{P}{2}\omega_m (L_d i_d + \lambda_m)\right), \quad (21)$$

$$\tau_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left((L_d - L_q)i_d + \lambda_m\right) i_q, \quad (22)$$

donde i_d e i_q son las componentes de los ejes d y q de la corriente en el estator, v_d y v_q son los componentes de los voltajes d y q en terminales del estator, R_s es la resistencia del estator, P es el número de polos, L_d y L_q son las inductancias de los ejes d-q, ω_m es la velocidad angular del rotor, y λ_m es el enlace de flujo del imán permanente.

De acuerdo con (Krause *et al.*, 2002, p. 139) y (Wu, B. *et al.*, 2017, p. 188) las potencias activa y reactiva se pueden calcular mediante las ecuaciones (23) y (24)

$$P_e = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (23)$$

$$Q_e = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (24)$$

h t t p s : / / d o i . o r g / 1 0 . 6 2 8 0 5 / c i d 2 0 2 5 . C I D 0 6 1
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

2.5 Funciones de voltaje dq

Para obtener una respuesta suave del esquema GESS, así como de las variables eléctricas y evitar que existan sobrecorrientes que puedan ser estresantes o perjudiciales para la máquina eléctrica y/o el sistema mecánico, se propone la obtención de funciones de voltaje d-q, las cuales sustituyen al convertidor de potencia conectado en terminales de la máquina eléctrica, permitiendo una operación adecuada del esquema GESS.

Para ello, se propone que el par electromagnético cambie en función a la velocidad angular del rotor de la máquina eléctrica de la siguiente manera:

$$\tau_e = k\omega_m^2, \tag{25}$$

donde la constante k se define como,

$$k = \frac{\tau_e^{Deseado}}{\omega_m^{2\,Deseado}}. \tag{26}$$

Si se utiliza una PMSM de polos lisos, entonces $L_d = L_q$, y la expresión (22) se convierte en,

$$\tau_e = \frac{3}{4}P\lambda_m i_q. \tag{27}$$

A través de (25) y (27), además de considerar una operación en estado estable, se obtiene el comportamiento de la corriente I_q en función de la velocidad angular de rotación, dada por,

$$I_q = \frac{4k\omega_m^2}{3P\lambda_m}. \tag{28}$$

La corriente I_d se obtiene a partir de la expresión (24), resultando en,

$$I_d = \frac{1}{V_q}\left(V_d I_q - \frac{2Q_e}{3}\right). \tag{29}$$

Los voltajes en terminales de la máquina eléctrica (V_d y V_q) en estado estable se obtienen a partir de (20) y (21), las cuales se obtienen cuando las derivadas son iguales a cero, obteniéndose las siguientes expresiones,

$$V_d = R_s I_d - \frac{P}{2}\omega_m L_q I_q, \tag{30}$$

$$V_q = R_s I_q + \frac{P}{2}\omega_m (L_d I_d + \lambda_m). \tag{31}$$

Sustituyendo (29) en (30) y despejando V_d se obtiene una expresión de para esta componente de voltaje, la cual está dada por,

$$V_d = \frac{4R_s Q_e - 3P\omega_m L_d I_q V_q}{6V_q - 6R_s I_q}. \tag{32}$$

Al realizar la sustitución de (29) y (32) en (31), se obtiene la siguiente ecuación cuadrática,

$$aV_q^2 + bV_q + c = 0, \tag{33}$$

en donde,

$$a = 1,$$
$$b = -\left(2R_s I_q + \frac{1}{2}\,p\omega_m\lambda_m\right),$$
$$c = R_s^2 I_q^2 + \left(\frac{1}{2}\,p\omega_m L_d I_q\right)^2 + \frac{1}{2}p\omega_m L_d\left(\frac{R_s I_q \lambda_m}{L_d} - \frac{2Q_e}{3}\right).$$

La solución para V_q se obtiene a través de la fórmula general. La solución para V_q, indicada en (34), es dependiente de ω_m, y por tanto su valor cambia conforme el sistema GESS evoluciona. El voltaje V_d, dependiente de V_q (34) e I_q (28), también cambiará en función del valor actual de la velocidad ω_m. Estos voltajes permiten que el torque electromagnético sea igual al torque impuesto por (25), asegurando que el esquema GESS desarrolle una potencia deseada.

$$v_q = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \tag{34}$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Cálculo de la masa del cuerpo y energía potencial almacenada

En el movimiento de ascenso y descenso de la masa suspendida, y usando infraestructura disponible, se propone emplear el tiro de una mina, por lo que la altura h está limitada por la profundidad de la mina. Según datos de (Cummins®) para minas subterráneas, estas presentan profundidades que oscilan entre 300 metros y 3 km. Con base en esta información, se selecciona una altura h de 1500 metros.

De acuerdo con (Botha, C., 2019, p.161) y (Wu, X., 2020, p.3), el sistema GES es capaz de suministrar energía durante un período de 8 horas; por lo tanto, se adopta este valor como el tiempo de descarga t_d.

Considerando que la potencia mecánica nominal de la máquina eléctrica seleccionada es de 750 kW, y con los valores previamente establecidos para la altura h y el tiempo de descarga t_d, se utiliza la ecuación (17) para determinar la masa. El resultado es una masa de 1467.9 toneladas, valor que se encuentra dentro de los límites operativos, ya que, según (Gravitricity®), el sistema es capaz de elevar cargas de varios miles de toneladas.

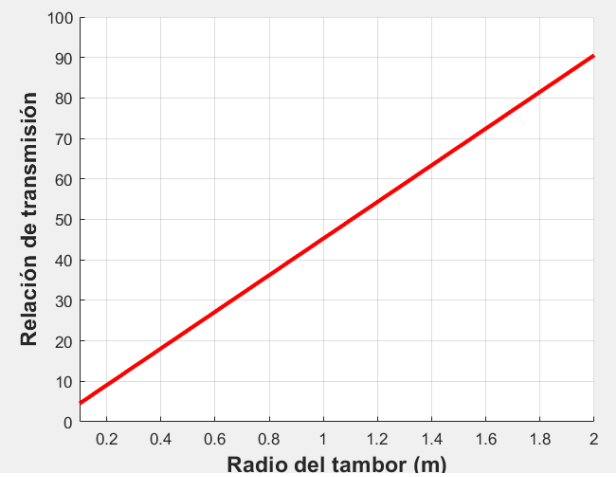
En función a la masa y la profundidad de mina seleccionada, la energía almacenada en el sistema GES se calcula mediante la expresión $U = mgh$, lo que resulta en una energía almacenada de 6MWh.

3.2 Relación entre el radio del tambor y la relación de transmisión

Dado que se conoce el valor del par nominal del PMSM, el cual es de 318 kNm, a través de la expresión (19) se obtiene el resultado de la Figura 3, el cual representa la relación entre el radio del tambor y la relación de transmisión de la caja multiplicadora. En la gráfica, cada par (r, n) asegura que se mantiene el torque y velocidad angular nominal del PMSM de acuerdo con la masa seleccionada. En este desarrollo se selecciona un radio de tambor de 0.4m, lo que implica una relación de transmisión de 18.11.

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID061
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Figura 3
Relación entre n y r para generar el torque nominal.



3.3 Evaluación de resultados de la simulación

La evaluación del esquema GESS en modo de descarga se realiza a través de simulaciones computacionales en el programa Matlab/Simulink, donde son programados los modelos del sistema mecánico (13), el modelo de la PMSM (20)-(22), y las funciones de tensión (32) y (34), estas últimas asegurando una operación adecuada del esquema GESS. Los parámetros para el sistema mecánico se listan en la tabla 1. Por otra parte, en la tabla 2, los parámetros nominales de la máquina eléctrica han sido tomados de (Wu, B. *et al*. 2017, p. 446).

Tabla 1
Datos del sistema mecánico

Masa del cuerpo m	1467.9 T
Radio del tambor r	0.4 m
Relación de transmisión n	18.11
Altura del cuerpo h	1500 m
Inercia J_{eq}	$117x10^3$
Constante k	$5.7169x10^4$

Tabla 2
Parámetros y especificaciones nominales del PMSM

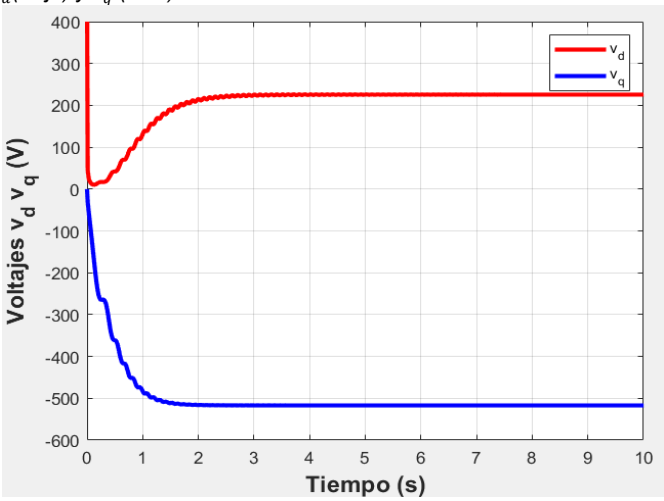
Potencia mecánica P_m	-750 kW
Torque electromagnético T_e	318 kNm
Potencia activa P_e	-741 kW
Potencia reactiva Q_e	-324 kVAR
Vel. Angular del rotor ω_m	2.36 rad/seg
Frecuencia eléctrica del estator	9.75 Hz
Número de polos P	52
Resistencia de devanados del estator Rs	6.52 mΩ
Inductancias Ld, Lq	3.85 mH
Enlace de flujo del imán permanente	8.53 wb-pk

La simulación del sistema se realiza a través de dos casos de estudio. En el primer caso, la máquina eléctrica opera bajo sus condiciones nominales de potencia activa P_e y potencia reactiva Q_e. En el segundo caso, la máquina eléctrica opera en su condición nominal de potencia activa P_e y una potencia reactiva $Q_e = 0$. En ambos casos, se presentan los resultados asociados con los voltajes impuestos en terminales de la máquina eléctrica V_d y V_q, la velocidad angular del rotor, los torques τ_e y τ_w, la potencia mecánica P_m, y la potencia activa P_e y reactiva Q_e.

3.3.1 Resultados de simulación: Primer caso de estudio

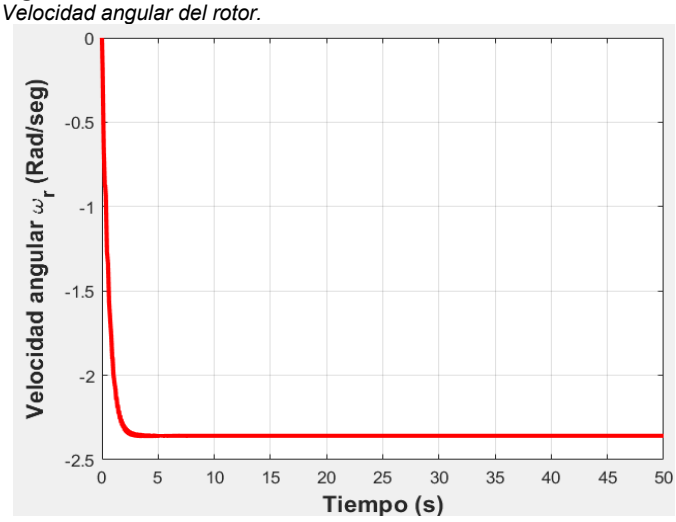
En la Figura 4 se muestran los voltajes aplicados en los terminales de la máquina eléctrica, los cuales varían en función de la velocidad angular del rotor. Se observa que ambos voltajes tienden a estabilizarse una vez que se alcanza la potencia objetivo del sistema. En estado estable $V_d = 225.68V$ y $V_q = -516.96V$, lo cual implica una magnitud de voltaje de fase de $564.07V$.

Figura 4
Voltajes de eje directo y cuadratura en terminales de la máquina eléctrica, v_d(Rojo) y v_q (Azul).



En la Figura 5 se presenta la evolución de la velocidad angular del rotor. En esta figura se aprecia un comportamiento suave y continuo de la velocidad de rotación, donde se observa un tiempo de respuesta de 2.5 segundos para alcanzar la condición de velocidad nominal.

Figura 5
Velocidad angular del rotor.



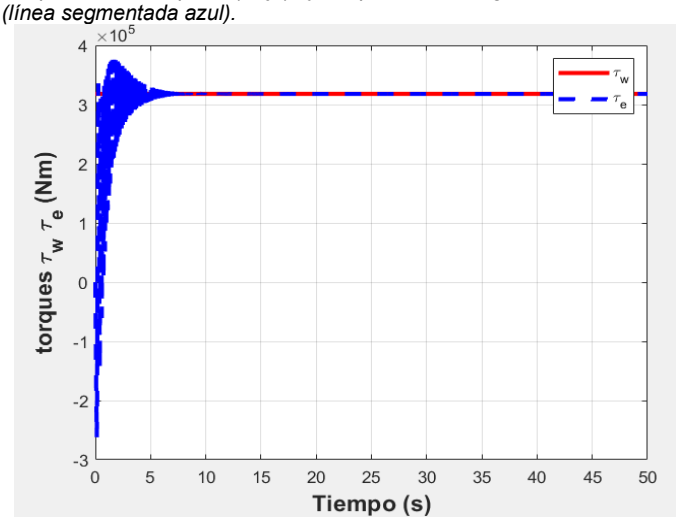
https://doi.org/10.62805/cid2025.CID061

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

La Figura 6 muestra los perfiles de los torques τ_e y τ_w. El torque asociado a la masa suspendida es constante todo el tiempo, mientras que el torque electromagnético crece acorde a la restricción impuesta por los voltajes en terminales de la máquina. El sistema se estabiliza una vez que los torques se igualan, haciendo que el sistema opere a velocidad constante.

Figura 6
Torque debido al peso (Rojo), y torque electromagnético desarrollado (línea segmentada azul).



Finalmente, en las Figuras 7 y 8 se presentan la potencia mecánica P_m, así como la potencia activa P_e y reactiva Q_e. En la figura 7 se observa que el sistema alcanza la potencia nominal mecánica de $-750kW$, mientras que en la figura 8, la potencia eléctrica activa tiene un valor de $-741kW$ y la potencia reactiva un valor nominal de $-324kVAR$.

Figura 7
Potencia mecánica.

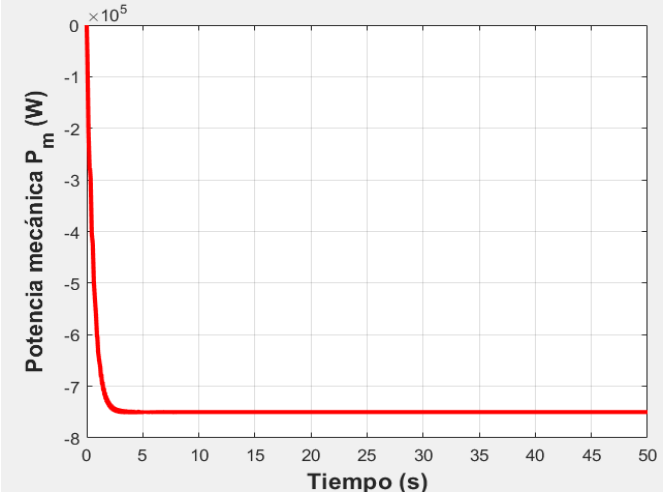
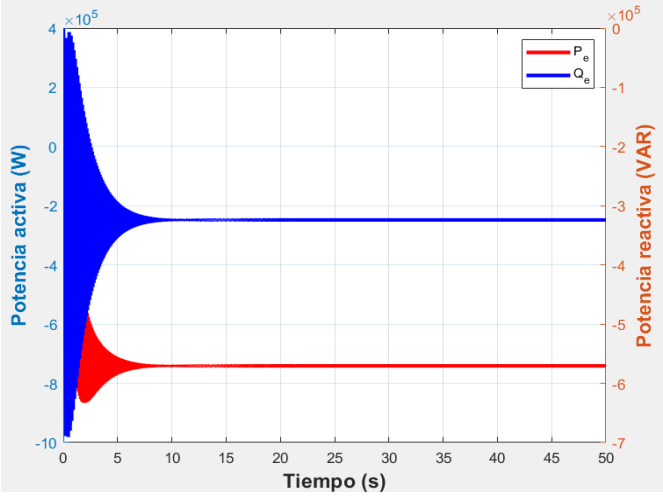


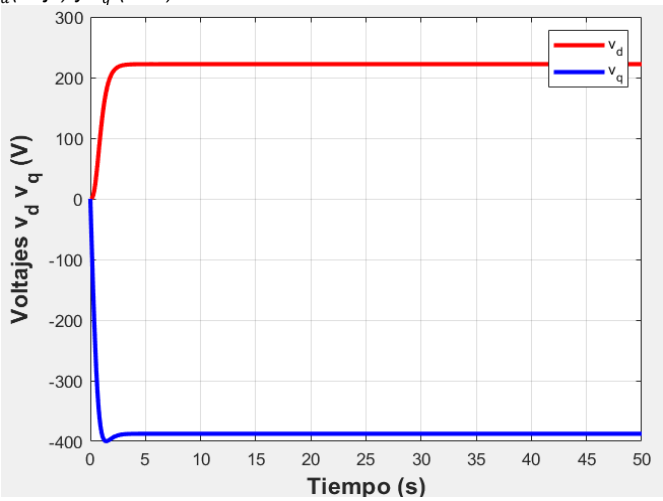
Figura 8
Potencia eléctrica activa (Rojo) y potencia reactiva (Azul).



3.3.2 Resultados de simulación: Segundo caso de estudio

En la figura 9 se observan los voltajes impuestos en terminales de la máquina eléctrica cuando se establece una condición de factor de potencia unitario. Los voltajes v_d y v_q cambian de acuerdo con la velocidad de rotación del sistema, manteniéndose constantes cuando se alcanza la potencia objetivo a desarrollar. En estado estable $V_d = 222.10V$ y $V_q = -387.48V$, lo cual implica una magnitud de voltaje de fase de $446.62V$.

Figura 9
Voltajes de eje directo y cuadratura en terminales de la máquina eléctrica, v_d(Rojo) y v_q (Azul).

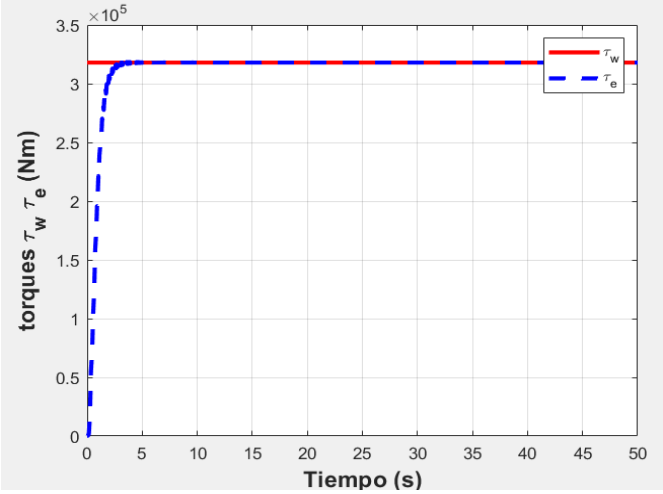


En la figura 10 se observa cómo el torque electromagnético crece conforme aumenta la velocidad de rotación de la máquina. El sistema alcanza su condición de estado estable cuando el torque electromagnético es igual al torque en oposición asociado a la masa suspendida, siendo el tiempo de respuesta del sistema de 2.5 segundos.

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID061
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

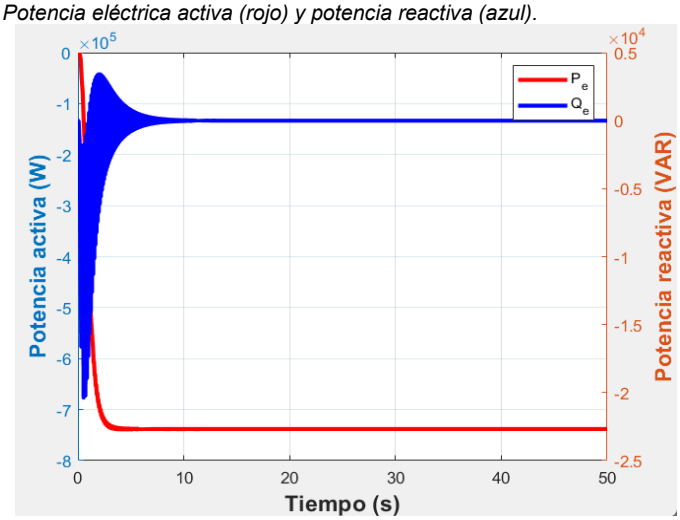
Año: 2025. Volumen: 1. Numero:11 ISSN: 2448-623X

Figura 10
Torque debido al peso (Rojo), y torque electromagnético desarrollado (línea segmentada azul)



La figura 11 muestra la potencia activa y reactiva generada por la máquina eléctrica. La potencia activa desarrollada presenta un valor de $-738kW$, mientras que la potencia reactiva se mantiene en cero, dada la restricción impuesta de operación.

Figura 11
Potencia eléctrica activa (rojo) y potencia reactiva (azul).



Finalmente, la figura 12 muestra el cambio de posición de la masa suspendida con respecto al tiempo, donde la masa recorre la distancia deseada de 1500m en el transcurso de 8 hrs (28,800 segundos). La figura 13 muestra el cambio de la energía potencial conforme la masa desciende, donde se aprecia que la energía potencial se reduce en función a la pérdida progresiva de altura, hasta alcanzar un valor nulo al final del periodo de descarga.

Figura 12
Posición del cuerpo en el proceso de descarga

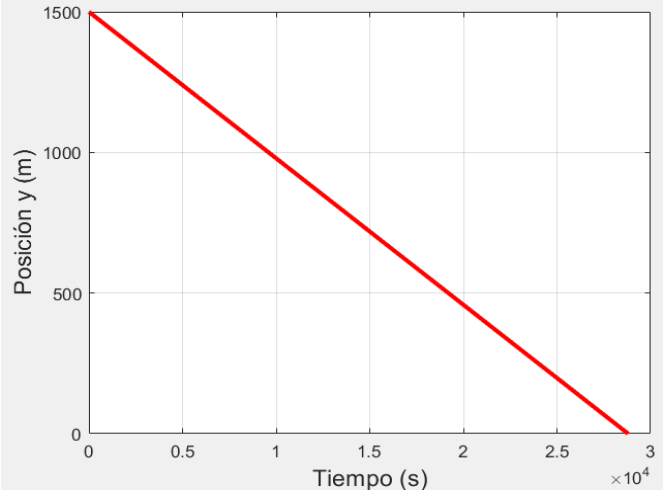
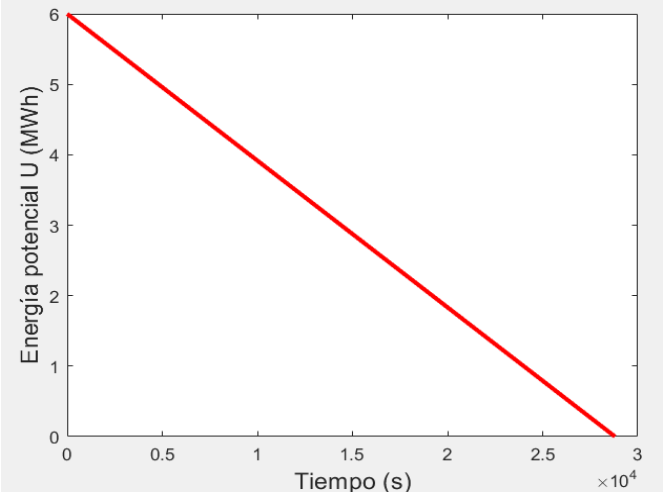


Figura 13
Variación de la energía potencial almacenada en el proceso de descarga



IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo la parametrización del sistema GESS, tomando como referencia los parámetros nominales de una PMSM con una capacidad de 750 kW mecánicos. La altura h considerada corresponde a las profundidades típicas de los tiros en minas subterráneas, mientras que el tiempo de descarga se define con base en datos reportados en la literatura.

Con los datos iniciales operativos, se realizan los cálculos necesarios para determinar la masa del cuerpo requerido, lo cual permite llevar a cabo un análisis preliminar del radio que debe tener el tambor, así como de la relación de transmisión adecuada para una caja multiplicadora.

Como parte del proceso operativo del sistema, se propusieron funciones de voltaje con el objetivo de que las corrientes de la PMSM generen un torque electromagnético con una variación suave, evitando sobre impulsos que puedan comprometer la

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID061
This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

integridad de la máquina eléctrica. Asimismo, se consideró una potencia reactiva nula con el fin de optimizar la respuesta del torque electromagnético.

Finalmente, este trabajo propone un modelo adecuado para la realización de estudios de sistemas de almacenamiento por medio de la gravedad, que puede ampliarse al incluir otros elementos como convertidores de electrónica de potencia y esquemas de control.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el PRODEP a través del cuerpo académico ITLAG-CA-10.

VI. REFERENCIAS

Botha, C. D., & Kamper, M. J. (2019). Capability study of dry gravity energy storage. *Journal of Energy Storage*, *23*, 159-174. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015

Barelli, L., Bidini, G., Ciupageanu, D. A., & Pelosi, D. (2021). Integrating Hybrid Energy Storage System on a Wind Generator to enhance grid safety and stability: A Levelized Cost of Electricity analysis. *Journal of Energy Storage*, *34*, 102050. 10.1016/j.est.2020.102050

Cummins®. (s.f). RE: Tipos y métodos de minería https://www.cummins.com/es/engines/mining/types-of-mining

Gravitricity. (s.f). RE: Tehcnology https://gravitricity.com/technology/#gravistore

Krause, P. C., Sudhoff, S. D. y Wasynczuk, O. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. IEEE PRESS.

Li, J., Tian, L., & Lai, X. (2015). Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background. *Automation of Electric Power Systems*, *39*(23), 15-25. 10.7500/AEPS20150906004

Mugyema, M., Rabadia, M. M., Botha, C. D., Kamper, M. J., & Wang, R. J. (2022, January). Design and control of a linear electric machine based gravity energy storage system. *2022 30th Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*, 1-8. 10.1109/SAUPEC55179.2022.9730745

O'Neill, S. (2022). Weights-Based Gravity Energy Storage Looks to Scale Up. *Engineering*, *14*, 3-6. 10.1016/j.eng.2022.05.007

Rufer, A. (2020). Design and Control of a KE (Kinetic Energy) - Compensated Gravitational Energy Storage System. 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), 1-11. 10.23919/EPE20ECCEEurope43536.2020.9215714

Tong, W., Lu, Z., Sun, J., Zhao, G., Han, M., & Xu, J. (2022). Solid gravity energy storage technology: Classification and comparison. *Energy Reports*, *8*, 926-934. 10.1016/j.egyr.2022.10.286

Vegte, J. (1994). Feedback Control Systems. Prentice Hall.

Wang, G., Zhang, G., Xu, D. (2020). Position Sensorless Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Machine. SPRINGER.

Wu, B. y Yaramasu, V. (2017). *Model predictive control of wind energy conversion systems.* IEEE PRESS.

Wu, X., Li, N., Wang, X., Kuang, Y., Zhao, W., Qian, T., ... & Hu, J. (2020). Day-ahead scheduling of a gravity energy storage system considering the uncertainty. *IEEE Transactions on sustainable energy*, *12*(2), 1020-1031. 10.1109/TSTE.2020.3030815

Yu, C., Wang, Z., Zhao, W., Han, B., Xu, M., & Liu, Z. (2022). Research on Double Closed-Loop Control Method of Wind Power Gravity Energy Storage System. In *2022 5th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, 704-708. 10.1109/ICPEA56363.2022.10052486

https://doi.org/10.62805/cid2025.CID061

This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/