

# Implementación de un modelo de un grupo electrógeno para estudios de prevención del bloqueo

José Boher<sup>a</sup>, Manuel A. Mazzoletti<sup>b</sup>, Roberto E. Carballo<sup>a</sup>, Fernando Botterón<sup>a</sup> y Guillermo R. Bossio<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional de Misiones – CONICET. Facultad de Ingeniería. Instituto de Materiales de Misiones (IMAM). Grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Electrónica (GIDE). Misiones, Argentina.

<sup>b</sup>Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica (LIDEE). Misiones, Argentina.

<sup>c</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto – CONICET. Facultad de Ingeniería. Instituto de Investigaciones en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados (IITEMA). Grupo de Electrónica Aplicada (GEA). Córdoba, Argentina.  
joseboher77@gmail.com



**Abstract**—This paper presents the procedure carried out for building a model of a synchronous generator moved by an internal combustion engine, usually referred as genset. The objective was to analyse the stalling behaviour of the genset, when they are suddenly loaded by loads that are between their nominal capacity. The model was done in MATLAB/Simulink platform and tested for several load cases, which involved different power factors. The results showed the stalling phenomena for loads that are between the nominal capacity of the genset, and a triggering feature of the reactive load for causing stalling was observed. This last aspect is part of the main contributions of the work done.

**Keywords**—genset, stalling, modelling, microgrid.

## I. INTRODUCCIÓN

La red pública y los grandes consumidores de energía eléctrica consideran a las microrredes una solución atractiva para atender al crecimiento de la demanda y la necesidad de mejora de la confiabilidad. En este contexto, un sistema de potencia industrial que tiene recursos energéticos distribuidos (RED) puede considerarse como una microrred industrial [1] [2]. Integrados como RED en sistemas industriales, los grupos electrógenos (GE) impulsados por motores de combustión interna (MCI) alternativos son los más utilizados en un amplio rango de potencias [3].

Los GE sufren transitorios considerables frente a cambios bruscos de su carga, y en situaciones límites, cuando se hallan entregando una potencia mayor al 80% de la capacidad nominal del MCI, pueden llegar a bloquearse [1] [3] [4]. Por lo general, el bloqueo ocurre por la sobrecarga cuando el MCI alcanza el límite de su curva característica [3] [5]. Sin embargo, en investigaciones recientes se ha determinado que el bloqueo puede ocurrir también frente a un incremento repentino de carga, aún en potencias menores a la nominal de los GE [3] [6]. Por el momento, se entiende que las causas principales de un bloqueo por cambios repentinos de carga son la acumulación de retrasos mecánicos en la respuesta de los controladores de velocidad de los GE y la inherente lentitud en la producción de par de los MCI. Esto deriva en un desbalance sostenido entre la generación y la demanda en un sistema que generalmente tiene baja inercia; causando grandes caídas en la velocidad de los MCI [6] y propiciando así el bloqueo de los GE.

El bloqueo de los GE tiene diferentes efectos indeseables. Por un lado, los GE con generadores síncronos pueden causar un colapso de frecuencia en las microrredes, debido a su relación directa con la velocidad de rotación del MCI. El GE bloqueado debe iniciar nuevamente su marcha y, además, sincronizarse para la reconexión con el sistema eléctrico. En una microrred industrial, esto tiene consecuencias económicas

considerables debido a la disminución de la potencia disponible para la producción, sumado a las consecuencias que pudieren derivarse de un colapso catastrófico de todo el sistema eléctrico.

Varios enfoques han sido propuestos en la literatura para evitar el bloqueo en GE. Un sistema de ingreso vacilante de cargas se ha planteado en [7] y [8] para evitar sobrecargas. Esto no se considera factible en sistemas industriales, donde plantear ingresos selectivos de cargas podría repercutir sobre la previsión del proceso productivo. En [9] se observa que el bloqueo puede evitarse mediante el ajuste de los parámetros del controlador de velocidad. En particular, ha sido registrado que el incremento de la ganancia produce mejor respuesta, pero se ve limitado por las oscilaciones que se presentan alrededor del valor de referencia, conocido en la literatura como "hunting" [10].

La desconexión inteligente de cargas frente a escenarios de sobrecarga ha sido propuesta para evitar el colapso de las microrredes por bloqueo de las máquinas primarias [11] [12] [13]. El traspaso de cargas entre los RED se propone en [14], que solo es aplicable cuando se dispone de más de un RED y no todos están sobrecargados. Alternativamente, en [1] se plantea la desconexión momentánea de cargas de los servicios auxiliares ante incrementos repentinos de carga para GE funcionando de forma aislada en una microrred industrial, sin requerirse el escenario de sobrecarga. En instalaciones donde los servicios auxiliares que pueden desconectarse son reducidos, la efectividad de estas técnicas se ve limitada.

En este trabajo, se presenta el modelado y la implementación de un GE en funcionamiento aislado, para llevar a cabo un análisis del comportamiento del GE frente a diferentes incrementos repentinos de carga. Se presentan diferentes casos de estudio, diferenciados fundamentalmente en las características de las cargas eléctricas involucradas, como ser diferentes escalonamientos y distintos factores de potencia. Los resultados de simulación obtenidos permiten evaluar el comportamiento del GE ante escalonamientos críticos de carga, con diferentes factores de potencia, para evitar el fenómeno de bloqueo en estos sistemas.

## II. MODELO DE GRUPO ELECTRÓGENO UTILIZADO

El modelo utilizado para la realización de las simulaciones se basa en propuestas anteriores tales como en [15] y [16]. En la Fig. 1 puede observarse la representación en diagramas de bloques del modelo utilizado, diseñado en el software MATLAB/Simulink.

El modelo construido puede dividirse en 3 submodelos: 1) el modelo del generador síncrono en marco de referencia  $qd0$  [17], cuyos parámetros adoptados de [18], se muestran en

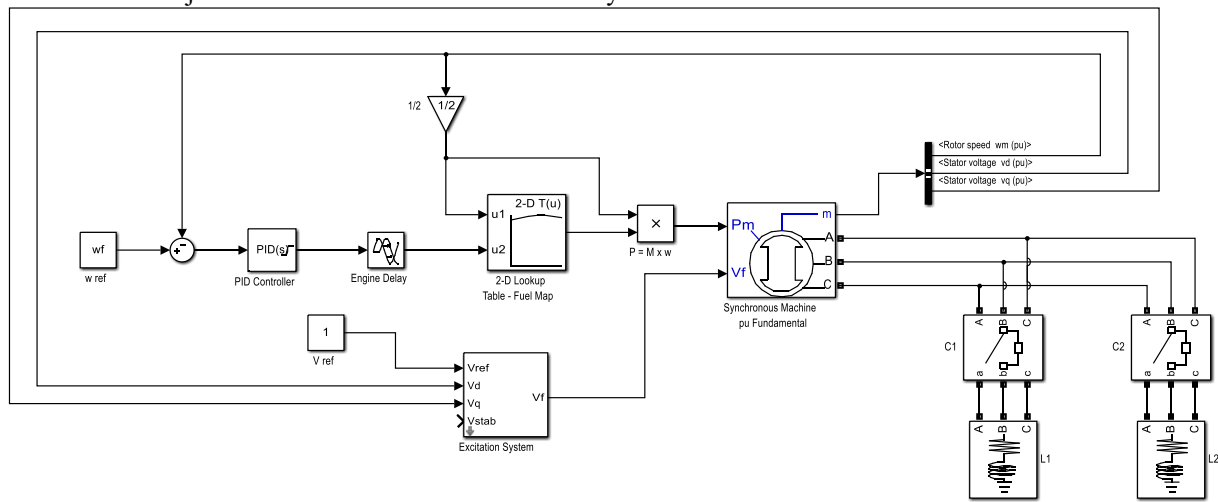


Fig. 1.- Modelo de un GE con control de excitación y de velocidad para sistemas de generación distribuida aislado.

TABLA 1; 2) el modelo del MCI, que se ha realizado por medio de una tabla de dos dimensiones con su curva característica tomada de [19], y cuyos retrasos acumulados de tiempo para la producción de torque se incluyeron en un bloque de retraso con la ecuación desarrollada en [20]; 3) el modelo de las cargas eléctricas, incluidas mediante bloques compactos y configurables que están conectados en bornes del generador a través de interruptores configurables.

Por otra parte, el modelo posee los sistemas de control que permiten el adecuado funcionamiento en conjunto de los submodelos descritos. Primero, el control de tensión del generador síncrono ha sido incorporado mediante un modelo compacto, que implementa un sistema de excitación IEEE tipo 1, consistente en un regulador de tensión combinado a un excitador [21]. Segundo, el control de velocidad del MCI se ha introducido en el modelo mediante un control PID, que es alimentado por la diferencia entre la velocidad rotacional de referencia y la velocidad real, constituyendo el caso de control isócrono [10]. La acción de control del PID luego pasa por el bloque de retraso antes de ingresar a la curva característica del MCI, donde se define la capacidad de par máximo para cada velocidad rotacional. La salida de este bloque y la velocidad rotacional permiten calcular la potencia mecánica suministrada al bloque del generador síncrono.

TABLA I. PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL SUBMODELO DEL GENERADOR SÍNCRONO

Nombre del parámetro	Unidad	Valor
Reactancia síncrona directa	p.u.	2,877
Reactancia de secuencia negativa	p.u.	0,42
Reactancia de secuencia cero	p.u.	0,025
Reactancia síncrona en cuadratura	p.u.	1,415
Reactancia transitoria	p.u.	0,184
Reactancia subtransitoria	p.u.	0,166
Reactancia subtransitoria en cuadratura <sup>a</sup>	p.u.	0,166
Constante de tiempo en cortocircuito transitorio	s	0,062
Constante de tiempo en cortocircuito	s	0,013
Constante de tiempo en cortocircuito subtransitorio en cuadratura <sup>a</sup>	s	0,013
Constante de tiempo con circuito abierto transitorio	s	1,46

<sup>a</sup>Valores adoptados en base a ejemplos de la literatura

Finalmente, las simulaciones han sido realizadas para una tensión nominal de 400 V entre líneas, y 50 Hz de frecuencia en la red. Esto, a su vez, corresponde a una velocidad de 1500 rpm en el MCI, ya que el generador posee dos pares de polos.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los siguientes apartados se presentan los resultados obtenidos en diferentes casos de estudio. Para ello, han sido planteadas distintas condiciones en las que el GE puede enfrentar un incremento repentino de la carga: Por un lado, se ha ensayado el modelo para un incremento repentino de carga desde un estado de carga del 0%. Por otro, se ha planteado el incremento de carga en dos pasos, con cargas de un  $\cos(\phi)$  unitario y cargas de un  $\cos(\phi)$  de 0,8 inductivo.

En todos los casos simulados, se analiza la evolución en el tiempo de las potencias eléctrica y mecánica del GE. Además, se presenta la gráfica de velocidad rotacional versus potencia, ya que permite analizar cualitativamente las trayectorias de las potencias ante los casos estudiados.

#### A. Bloqueo por incremento repentino de la carga

El bloqueo de los GE por cambio brusco de carga se produce exclusivamente ante el incremento de la carga, y no frente a la reducción de la misma. Ante esta condición, el sistema de control de velocidad del MCI debe incrementar la potencia generada para equilibrarse con la mayor potencia eléctrica demandada a raíz del incremento en la carga. Esta potencia eléctrica se compone por la potencia consumida efectivamente por la carga más las pérdidas adicionales de todo el proceso de generación y distribución de la energía eléctrica, ya que ésta debe ser cubierta enteramente por la potencia mecánica producida por el MCI.

Estos incrementos repentinos de carga pueden darse por diferentes razones. En una microrred industrial, las entradas y salidas cíclicas de grandes cargas pueden ser parte del proceso productivo, por lo tanto, los GE que participan de la generación de estos sistemas enfrentan constantemente variaciones de carga. Por otra parte, desde un punto de vista más general, cualquier sistema compuesto por más de un RED, que sufre la salida intempestiva de uno o más generadores, obliga a los generadores restantes a repartirse súbitamente la carga. En este reparto transitorio, uno o más de los GE recibe un incremento repentino de su carga, que, de darse las condiciones adecuadas, puede derivar en su bloqueo.

En la Fig. 2 se muestran los resultados de simulación obtenidos para un incremento repentino de carga, donde el GE debe afrontar un salto de 0 a 90% de su capacidad nominal. Según puede observarse, ha ocurrido el bloqueo GE a pesar de que la carga se encuentra dentro del rango definido por su capacidad nominal.

En este caso se grafican la potencia eléctrica activa, vinculada con el generador síncrono, y la potencia mecánica, vinculada con el MCI. En estado estable estas dos potencias son iguales y el conjunto GE-carga se encuentra en equilibrio tal como ocurre en el intervalo de 1 a 2 segundos de la Fig. 2. Sin embargo, durante un transitorio, como el presentado en este caso, la potencia eléctrica se incrementa rápidamente y el sistema de control de velocidad del MCI debe incrementar la potencia mecánica producida para llevar el conjunto a un nuevo punto de equilibrio. Mientras dura la diferencia entre ambas potencias, el MCI pierde velocidad rotacional, que, a su vez, lo hace perder capacidad de potencia máxima. En la Fig. 2 a), esta capacidad de potencia máxima se grafica en línea de trazos roja y puede observarse como se reduce rápidamente desde el ingreso de la carga. Su reducción coincide con la caída de velocidad rotacional que se muestra en Fig. 2 b), ya que tanto el par como la potencia máxima del MCI dependen de su velocidad, según se indica en la curva de potencia del MCI.

En la Fig. 2 se puede notar que el motivo del bloqueo se debe a la caída de la potencia máxima del GE por debajo de la potencia eléctrica lo que desencadena la evolución del sistema en dirección al bloqueo, ya que una vez ocurrido ello, el MCI no vuelve a lograr una potencia mecánica mayor a la potencia eléctrica. Por lo tanto, en todo momento posterior al incremento repentino de la carga, la diferencia de potencia es tomada de la energía cinética rotacional del GE, que se reduce hasta bloquearlo.

Por otra parte, en la Fig. 3 se presentan las trayectorias obtenidas a partir de la definición de las potencias y las velocidades en los ejes horizontal y vertical, respectivamente. Dichas gráficas han sido estudiadas en [3], y permiten analizar el estado transitorio a partir de trayectorias en el plano. En el caso observado aquí, los puntos negros representan los puntos de carga, es decir, donde el sistema debería encontrarse durante el equilibrio GE-carga. De igual manera que en las figuras anteriores, en la Fig. 3 se grafican la potencia mecánica, la potencia eléctrica y la potencia máxima del MCI. Aquí también puede observarse que la evolución del sistema en dirección al bloqueo se produce luego de que la potencia máxima del MCI cae por debajo de la potencia eléctrica, lo cual ocurre a partir de que la velocidad del MCI pasa ligeramente por debajo de 1400 rpm.

Resulta interesante analizar en etapas la trayectoria de la potencia mecánica. La primera etapa corresponde al tramo inicial, donde la potencia eléctrica ha crecido rápidamente hasta un valor cercano a la carga demandada (punto de carga derecho), pero la potencia mecánica aún no se incrementa y por ello la velocidad rotacional se reduce velozmente, describiendo la trayectoria de caída vertical; En la segunda etapa, el MCI comienza a incrementar la potencia mecánica, pero la velocidad sigue disminuyendo, lo que reduce la potencia máxima que el MCI podrá efectivamente alcanzar posteriormente. Esto lo describe la trayectoria de pendiente negativa que se dirige a la derecha. Finalmente, la última etapa se inicia luego de que la potencia mecánica alcanza la potencia máxima del MCI (trayectoria de color rojo), ya que, a partir

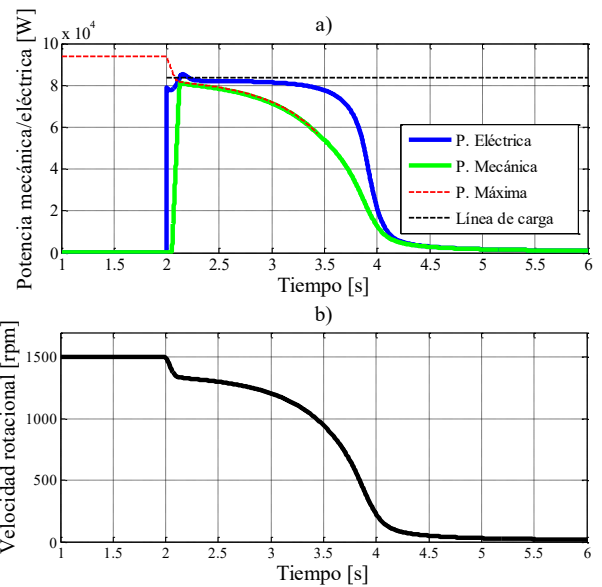


Fig. 2.- a) Potencias eléctrica y mecánica del GE durante el bloqueo por incremento repentino de carga. b) Velocidad rotacional del MCI.

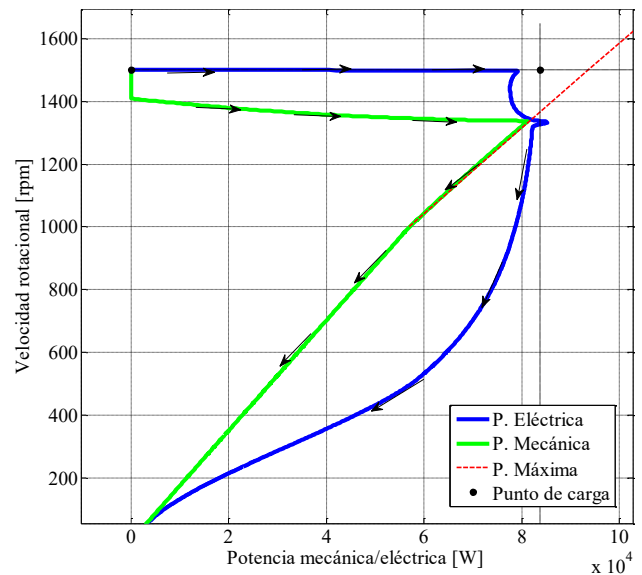


Fig. 3.- Trayectoria de potencia y velocidad del GE durante el bloqueo por incremento repentino de carga.

de allí en adelante, ambas potencias son coincidentes, y el MCI continúa perdiendo velocidad. Llegado a un punto tal que la potencia máxima se interrumpe debido a que no se disponen de datos a menor velocidad. Por lo tanto, la potencia mecánica continúa disminuyendo idealmente, y la trayectoria resultante es extrapolada de los datos originales de la potencia máxima.

El bloqueo del GE es, estrictamente, el bloqueo del MCI, y suele existir una velocidad mínima en la que estas máquinas se bloquean repentinamente, que puede situarse alrededor de las 700 y 800 rpm. En la Fig. 2 y la Fig. 3 el modelo del MCI operó hasta velocidades muy bajas, llegando a velocidades cercanas a cero, lo que suavizó el proceso de bloqueo descrito por el modelo. Por ello, las mismas condiciones de simulación se analizaron incluyendo el efecto del bloqueo repentino del MCI a partir de una velocidad mínima preestablecida, la cual fue seleccionada de los datos de la curva de potencia del MCI considerado en el modelo. Los resultados bajo esta consideración se presentan en la Fig. 4 y la Fig. 5.

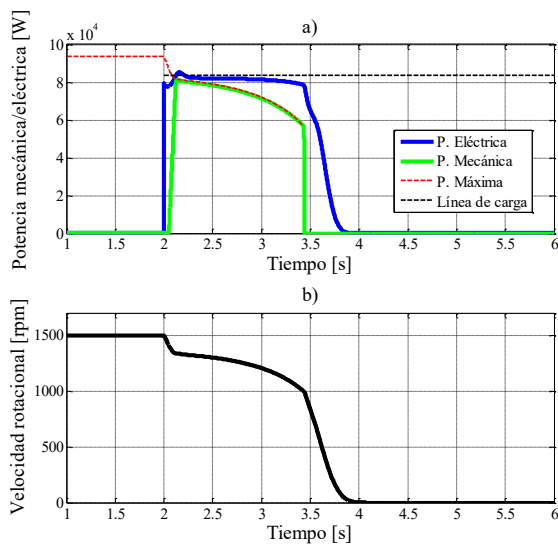


Fig. 4.- a) Potencias eléctrica y mecánica del GE durante el bloqueo brusco por incremento repentino de carga. b) Velocidad rotacional del MCI.

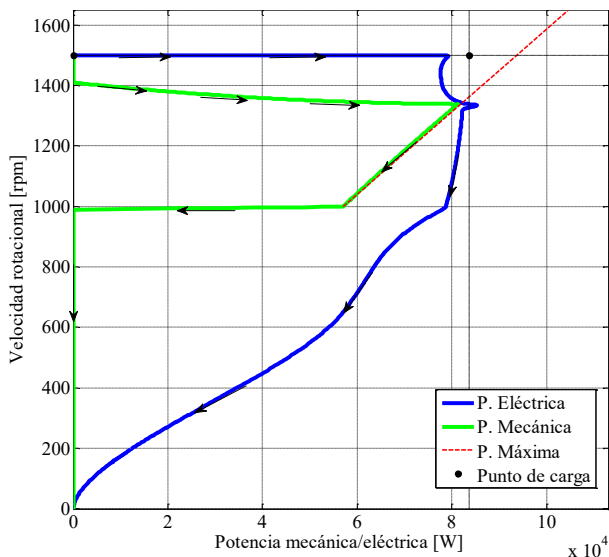


Fig. 5.- Trayectoria de potencia y velocidad del GE durante el bloqueo brusco por incremento repentino de carga.

El cambio significativo de los resultados con respecto a las Fig. 2 y Fig. 3 se presenta sobre el final de las trayectorias, luego de que la potencia mecánica del MCI cae repentinamente a cero. En Fig. 4 b) la velocidad rotacional se reduce más rápidamente a partir de que ello ocurre, induciendo un comportamiento diferente sobre la potencia eléctrica, que podría deberse a la variación más brusca que experimenta la frecuencia del sistema. Dependiendo de la condición y del tipo de carga, este efecto puede ser más o menos significativo sobre el sistema.

Un aspecto importante de la consideración del bloqueo brusco del MCI es el poder tener en cuenta un límite inferior de velocidad a partir del cual las estrategias de prevención del bloqueo no permitan que la velocidad rotacional del GE disminuya. Por lo tanto, resulta de interés el conocer este límite inferior de velocidad antes del planteamiento de las estrategias de prevención del bloqueo.

### B. Incremento escalonado de carga resistiva

En esta sección se presenta el comportamiento dinámico del GE con incremento sucesivo de cargas con  $\cos(\phi)$  unitario. En primer lugar, en la Fig. 6 y la Fig. 7 se presentan los resultados de simulación de un incremento escalonado de dos etapas, que se introducen repentinamente, hasta alcanzar el 90% de la potencia nominal del GE. El primer escalón representa el 30% y el segundo incrementa el 60% para lograr el 90% de la capacidad nominal del GE.

Los resultados obtenidos evidencian que el GE es capaz de alimentar el 90% de su capacidad nominal, y que el bloqueo observado en la sección III-A se debe a otra variable, como puede ser la magnitud del escalón de carga repentino y no debido a la magnitud absoluta de la carga que alimenta el GE. En este caso, puede observarse tanto en la Fig. 6 a) y la Fig. 7 que, tras el segundo escalón de carga, en ningún momento la potencia máxima del GE cae por debajo de la potencia eléctrica, inclusive tras haberse reducido la velocidad del MCI por debajo de las 1400 rpm. Por ello, la potencia mecánica

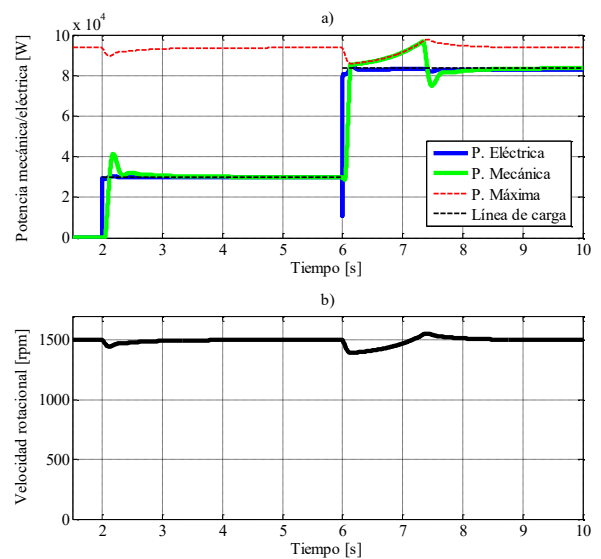


Fig. 6.- a) Potencias eléctrica y mecánica del GE durante las entradas de carga. b) Velocidad rotacional de MCI.

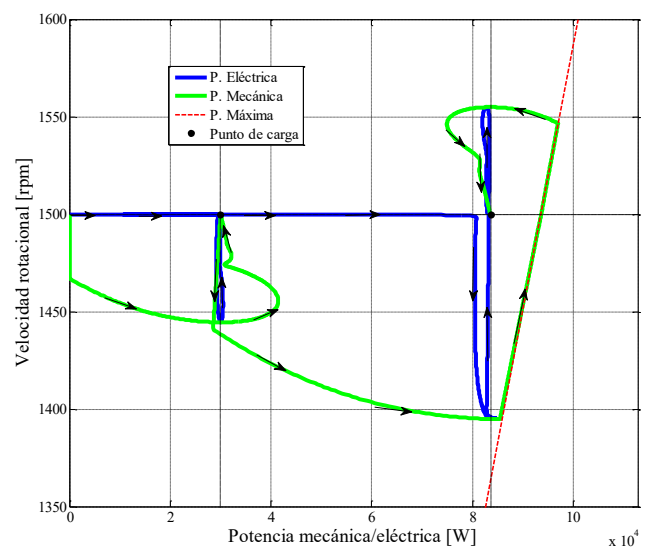


Fig. 7.- Trayectoria de potencia y velocidad del GE ante las variaciones escalonadas de la carga.

logra superar a la potencia eléctrica, iniciando un proceso de incremento de la velocidad rotacional del GE. Es decir, la ocurrencia de estos eventos dinámicos es lo que evita el desencadenamiento y la condición del bloqueo.

La trayectoria de la potencia mecánica en la Fig. 7 también puede dividirse en etapas para su análisis: la primera coincide con lo descrito para el caso presentado en la Fig. 3, donde la trayectoria describe una línea vertical en caída, ya que la velocidad rotacional se reduce, dado que la potencia eléctrica se ha incrementado súbitamente y el MCI aún no ha comenzado a incrementar su potencia; en la segunda etapa, la potencia mecánica comienza a incrementarse, describiendo una trayectoria hacia la derecha del plano, que luego sobrepasa en magnitud a la carga ingresada, y, por lo tanto, la velocidad rotacional comienza a incrementarse. Tras estos eventos, la potencia mecánica se reduce hasta alcanzar el punto de equilibrio dado por el punto de carga izquierdo, donde permanece en coincidencia con la potencia eléctrica; Una tercera y cuarta etapa pueden reproducirse a partir de la primera y segunda para el análisis del segundo escalón de carga. En la tercera etapa la diferencia respecto con la primera es que la trayectoria no es totalmente vertical, sino que tiene una pequeña inclinación hacia la izquierda, debido a que la potencia mecánica se reduce ligeramente a causa de la reducción en la velocidad. En la cuarta y última etapa, una diferencia respecto de la segunda es que la potencia mecánica alcanza la potencia máxima del GE y sigue en coincidencia con esta última trayectoria mientras el GE recupera velocidad. Además, en esta última etapa la potencia mecánica describe una trayectoria que sobrepasa la velocidad nominal, hasta que la potencia comienza a reducirse y realiza un giro antes de bajar de velocidad hasta alcanzar el punto de equilibrio dado por el punto de carga de la derecha.

Es importante resaltar que, si bien el GE no se ha bloqueado, la maniobra completa ha tenido grandes variaciones de frecuencia sobre la carga debido a la relación directa entre ésta y la velocidad rotacional del MCI. Como puede observarse en la trayectoria de la potencia eléctrica, esta última acompaña en todo momento la posición vertical de la potencia mecánica, es decir, comparten la misma ordenada.

C. Incremento escalonado de carga con  $\cos(\phi) = 0,8$

En esta sección se presenta el comportamiento dinámico del GE con incremento sucesivo de cargas con  $\cos(\phi)$  de 0,8. En la Fig. 8 y la Fig. 9 se muestran los resultados obtenidos por el ingreso escalonado de dos cargas inductivas, hasta alcanzar el 90% de la potencia nominal del GE.

Bajo esta condición puede observarse que ha ocurrido el bloqueo del GE a causa del incremento repentino de la carga. A pesar de tratarse de un estado de carga que se encuentra dentro de su capacidad nominal y con la única diferencia con respecto al caso estudiado en la sección III-B, de que las cargas involucradas consumen potencia con un  $\cos(\phi) = 0,8$ . Por lo tanto, es importante considerar este comportamiento, dado que la mayor parte de las cargas industriales presentan este tipo de características. Esto resalta un aporte importante de la potencia reactiva en la dinámica de estos sistemas, ya que su adición en la carga ha repercutido en el conjunto, causando un bloqueo del GE.

Por un lado, en Fig. 8 a) puede notarse que la potencia máxima del MCI cae por debajo de la potencia eléctrica luego del ingreso del segundo escalón de carga, desencadenando la evolución del sistema en dirección al bloqueo. Sin embargo,

al contrario del caso de bloqueo presentado en la Fig. 4, la potencia eléctrica se incrementa de manera notable a medida que la velocidad rotacional del MCI disminuye. No obstante, la potencia mecánica resultó similar al caso presentado en la Fig. 7 hasta luego del ingreso de la primera carga, lo que indicaría que el bloqueo aquí analizado se produciría exclusivamente debido a las diferencias presentes en la potencia eléctrica.

Por otro lado, si la trayectoria de la potencia mecánica mostrada en la Fig. 9 se divide en etapas, se puede observar que la primera, segunda y tercera etapas son coincidentes con las de Fig. 7. La particularidad de este caso se encuentra en la cuarta etapa, donde la potencia mecánica comienza a incrementarse para igualar a la potencia eléctrica que se ha incrementado súbitamente hasta cerca del valor de la carga demandada. Esto describe la trayectoria con pendiente negativa en dirección derecha en el plano, que luego alcanza a la trayectoria de la potencia máxima del GE y, de allí en

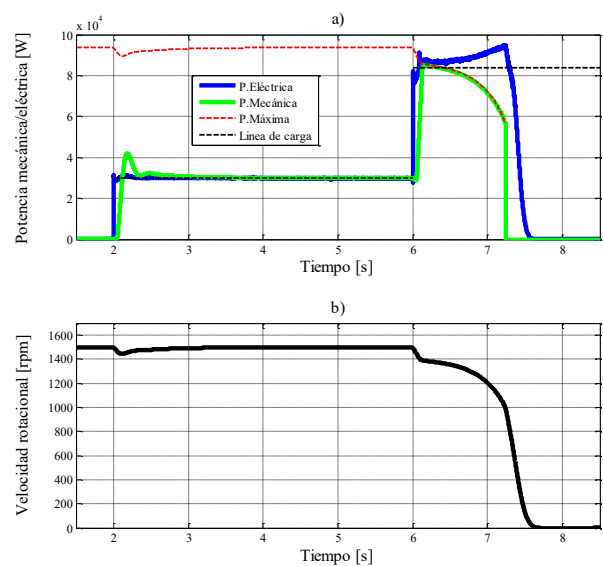


Fig. 8.- a) Potencias eléctrica y mecánica del GE durante el bloqueo por el ingreso de carga inductiva ( $\cos(\phi) = 0,8$ ). b) Velocidad rotacional de MCI.

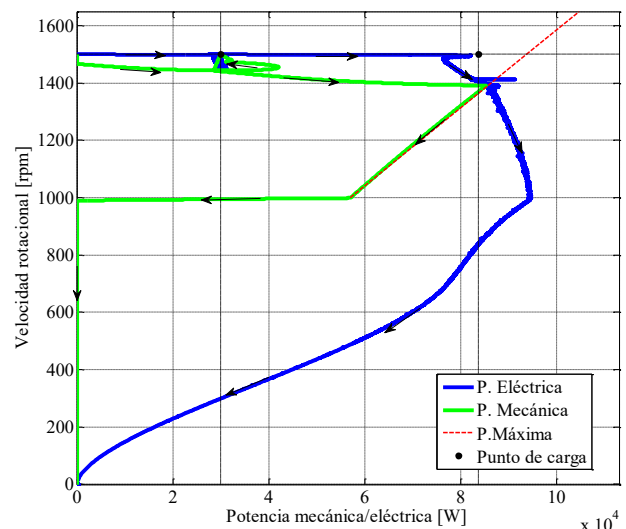


Fig. 9.- Trayectoria de potencia y velocidad del GE durante el bloqueo por el ingreso de carga inductiva ( $\cos(\phi) = 0,8$ ).

adelante, evoluciona coincidente con ésta última hasta que ocurre el bloqueo.

El incremento de la potencia eléctrica durante los eventos de reducción de la velocidad del MCI plantea una nueva dificultad para las estrategias de prevención del bloqueo, ya que, por un lado, esto acelera aún más la disminución de velocidad del MCI, y, por otro lado, restringe las cargas que deberían desconectarse en un esquema de desconexiones temporales ya que si las cargas remanentes presentan características con  $\cos(\phi)$  menor a 1, la carga total seguirá incrementándose con la disminución de la velocidad, limitando las posibilidades de las estrategias para prevenir el bloqueo.

Finalmente, el incremento observado de la potencia eléctrica podría deberse a las variaciones de la reactancia inductiva con la frecuencia. Ante un escenario de reducción de la frecuencia, e inductancias constantes, la reactancia se reduce, permitiendo la circulación de mayor corriente en la carga.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un modelo implementado en diagramas de bloques con el fin de analizar el fenómeno de bloqueo de un GE en funcionamiento aislado, frente a incrementos repentinos de la carga. De los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo evaluado ha reproducido adecuadamente el fenómeno de bloqueo por cambio brusco de carga. Por un lado, ha sido posible reproducir resultados ya observados en investigaciones anteriores, y por otro, evaluar nuevas condiciones de funcionamiento que no han sido estudiadas hasta el momento, como ser el bloqueo brusco del MCI y el caso de cargas con factor de potencia diferente de la unidad. En relación a esto último, se ha observado que el GE puede bloquearse, si la carga ingresante se caracteriza por adicionar al sistema suficiente potencia reactiva. Este fenómeno detectado vuelve interesante el estudio de la dinámica de la potencia reactiva durante el ingreso de este tipo de cargas, y por ello corresponde a una propuesta para los próximos estudios de investigación.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET y al Instituto de Materiales de Misiones (IMAM) por el financiamiento otorgado, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC).

#### REFERENCIAS

- [1] A. Mondal, M. S. Illindala, A. S. Khalsa, D. A. Klapp, and J. H. Eto, "Design and Operation of Smart Loads to Prevent Stalling in a Microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1184-1192, 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2483579.
- [2] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, 20-25 June 2004 2004, vol. 6, pp. 4285-4290 Vol.6, doi: 10.1109/PESC.2004.1354758. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1354758/>
- [3] A. A. Renjit, M. S. Illindala, and D. A. Klapp, "Graphical and Analytical Methods for Stalling Analysis of Engine Generator Sets," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 2967-2975, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2305803.
- [4] H. S. Hlaing, J. Liu, Y. Miura, H. Bevrani, and T. Ise, "Enhanced Performance of a Stand-Alone Gas-Engine Generator Using Virtual Synchronous Generator and Energy Storage System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 176960-176970, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957890.
- [5] J. Choi, A. Khalsa, D. A. Klapp, S. Baktiono, and M. S. Illindala, "Survivability of Prime-Mover Powered Inverter-Based Distributed Energy Resources During Microgrid Islanding," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 1214-1224, 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2885047.
- [6] M. C. Pulcherio *et al.*, "Evaluation of Control Methods to Prevent Collapse of a Mixed-Source Microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 4566-4576, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2599139.
- [7] S. A. Pourmousavi and M. H. Nehrir, "Demand response for smart microgrid: Initial results," in *ISGT 2011*, 17-19 Jan. 2011 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT.2011.5759181. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5759181/>
- [8] S. A. Pourmousavi, M. H. Nehrir, and C. Sastry, "Providing ancillary services through demand response with minimum load manipulation," in *2011 North American Power Symposium*, 4-6 Aug. 2011 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS.2011.6024876. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6024876/>
- [9] A. Mondai, M. S. Illindala, A. A. Renjit, and A. S. Khalsa, "Analysis of limiting bounds for stalling of natural gas genset in the CERTS microgrid test bed," in *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 16-19 Dec. 2014 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/pedes.2014.7041998.
- [10] L. L. J. Mahon, *Diesel Generator Handbook*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- [11] F. Shokooch *et al.*, "Intelligent Load Shedding," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, no. 2, pp. 44-53, 2011, doi: 10.1109/MIAS.2010.939814.
- [12] F. Shokooch *et al.*, "An intelligent load shedding (ILS) system application in a large industrial facility," in *Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, 2-6 Oct. 2005 2005, vol. 1, pp. 417-425 Vol. 1, doi: 10.1109/IAS.2005.1518342. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1518342/>
- [13] I. N. Perumal and Y. Chan Chee, "A proposed strategy of implementation for load shedding and load recovery with dynamic simulations," in *PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference, 2004.*, 29-30 Nov. 2004 2004, pp. 185-189, doi: 10.1109/PECON.2004.1461640. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1461640/>
- [14] W. Du, R. H. Lasseter, and A. S. Khalsa, "Survivability of Autonomous Microgrid During Overload Events," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 3515-3524, 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2829438.
- [15] A. A. Renjit, M. S. Illindala, R. H. Lasseter, M. J. Erickson, and D. Klapp, "Modeling and control of a natural gas generator set in the CERTS microgrid," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 15-19 Sept. 2013 2013, pp. 1640-1646, doi: 10.1109/ECCE.2013.6646903.
- [16] A. A. Renjit, A. Mondal, M. S. Illindala, and A. S. Khalsa, "Analytical Methods for Characterizing Frequency Dynamics in Islanded Microgrids With Gensets and Energy Storage," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 1815-1823, 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2657481.
- [17] C. K. Paul, W. Oleg, and D. S. Scott, "Synchronous Machines," in *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*: IEEE, 2002, pp. 191-259.
- [18] Datasheet of Synchronous AC Generator, Marathon Electric, July 2021. [Online]. Available: <https://www.marathongenerators.com/generators/docs/perf/431CSL6204T60.pdf>
- [19] Datasheet of Vortec 8.1L - 8 Cylinder - 496 Cubic Inches Engine, General Motors, July 2021. [Online]. Available: <https://www.rotatingright.com/pdf/8.1%20Litre%20Brochure.pdf>
- [20] A. Gangopadhyay and P. Meckl, "Modeling, validation and system identification of a natural gas engine," in *Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No.97CH36041)*, 6-6 June 1997 1997, vol. 1, pp. 294-298 vol.1, doi: 10.1109/ACC.1997.611804.
- [21] "Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," IEEE® Standard 421.5-1992, August, 1992.