

Modelación y simulación de un sistema electrógeno funcionado con biogás

María Gabriela Mago*, Blanca Flores, Luis Tovar

Departamento de Potencia. Escuela de Eléctrica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo Valencia, Edo. Carabobo Venezuela.

Resumen.-

Esta investigación presenta la modelación del sistema de control motor–generador desarrollado para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela a través del programa biodigestor©. Esta simulación permite evidenciar las características necesarias para suministrar energía eléctrica a partir de los desechos orgánicos del ganado vacuno procesados en digestores y convertidos luego, en biogás, lo cual apoya el desarrollo de energías alternativas. En la metodología utilizada se aplicaron las ecuaciones del motor de combustión interna en lenguaje Matlab® Simulink, acoplado a una máquina sincrónica. De este sistema se obtienen las variables de tensión, corriente, potencia de la máquina sincrónica, que verifica el comportamiento del suministro de energía eléctrica a la red de distribución. El desarrollo de estas tecnologías es la tendencia en boga para las investigaciones sobre ingeniería eléctrica aplicada, ya que permiten mejorar notablemente los indicadores de calidad de vida en zonas aisladas donde no existe suministro de energía eléctrica.

Palabras clave: Modelación, Sistema Electrónico, Biogás, Motor de Combustión Interna de la Máquina Sincrónica.

Modelation and simulation of a system electrogeno working with biogas

Abstract.-

This research presents the modeling of the control system developed motor–generator for generating electrical power in livestock areas of Venezuela through the biodigester program ©. This simulation allows checking the features needed to supply electricity from organic waste from cattle processed in digesters and converted then into biogas, which supports the development of alternative energies. The methodology is applied the equations of the internal combustion engine in Matlab ® Simulink language, coupled to a synchronous machine. This system variables are obtained voltage, current, power of the synchronous machine, which allow to verify the behavior of the power supply to the mains. The development of these technologies is the hot trend for applied research in electrical engineering, allowing greatly improved the quality of life indicators in isolated areas where there is no electricity supply.

Keywords: Modeling, System Generator, Biogas, Internal Combustion Engine Synchronous Machine.

Recibido: marzo 2012

Aceptado: octubre 2012.

1. Introducción

Un grupo electrógeno o motogenerador es una máquina que mueve un generador de electricidad (maquina sincrónica) a través de un motor de combustión interna. Son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar, o cuando son frecuentes los cortes en el suministro eléctrico [1].

* Autor para correspondencia

Correo-e: mmago@uc.edu.ve (María Gabriela Mago)

Esta investigación presenta la modelación del sistema de control motor-generador desarrollado para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela utilizando el programa Matlab® Simulink, para lo cual se desarrolla el modelo del motor de ciclo Otto y de la máquina sincrónica, luego se ajustan dichos parámetros de acuerdo a las ecuaciones de funcionamiento obteniéndose las gráficas de las variables eléctricas del modelo propuesto.

Hay aportes en cuanto al desarrollo de energías alternativas, tal y como lo establece el Plan Nacional Simón Bolívar 2007-2013 en su apartado VI 3.31 al 3.3.3 “*Propiciar el uso de fuentes de energías alternas renovables y ambientalmente sostenibles*”, como una continuación de la propuesta del diseño de una planta de biogás aplicando el programa Biodigestor©, lo cual representa una alternativa en la generación de energía eléctrica a partir de desechos orgánicos agropecuarios cuya implementación permitiría el desarrollo energético en zonas desasistidas, dado que se aprovechan condiciones propias del lugar [2].

2. Modelo matemático del motor de ciclo Otto

C_p : Capacidad calorífica a presión constante	$J/g.K$
C_v : Capacidad calorífica a volumen constante	$J/g.K$
PCI_{CH_4} : Poder Calorífico Inferior del metano	$Kcal/m^3$
ω : Velocidad del motor en RPM	
V : Volumen máximo del cilindro	L
P : Presión inicial de la mezcla aire – combustible	Atm
T : Temperatura inicial de la mezcla aire – combustible	$^{\circ}K$
ρ : Relación de compresión	
AFR: Relación aire – combustible	

Figura 1: Variables de entrada para modelamiento termodinámico de un motor de ciclo Otto.

Para la modelación y simulación de un sistema electrógeno funcionando con Biogás se requiere el modelamiento termodinámico de un motor de ciclo Otto. El ciclo Otto es el ciclo termodinámico ideal que se aplica en los motores de

combustión interna los cuales constan de cuatro fases: admisión, compresión, potencia y escape. Al considerar un generador de electricidad representa simplemente una unidad generadora de energía eléctrica acoplada a un motor de combustión interna [3]. Para realizar la simulación en la producción de energía eléctrica es necesario el modelamiento termodinámico de un motor del ciclo Otto, cuyas variables de entrada se muestran en la Figura 1.

3. Desarrollo del modelo

Aplicando el programa Matlab® Simulink se diseñan seis (6) bloques principales que identifican las fases de operación: componentes de mezcla, temperatura de pos-compresión, aporte calorífico, trabajo de compresión, trabajo de expansión y cálculo de potencia [4]. A continuación se indican las mismas:

3.1. Bloque componentes de la mezcla:

Es la cantidad de masa de aire y de combustible que va a contener un cilindro del motor de combustión interna. La Ley de los Gases Ideales, es la ecuación inicial para el modelado de este funcionamiento [5]:

$$P_1 V_{1(\omega)} = nRT_1. \quad (1)$$

De la Ecuación (1), obtenemos la ecuación que representa el número de moles del sistema

$$n = \frac{P_1 V_{1(\omega)}}{RT_1}. \quad (2)$$

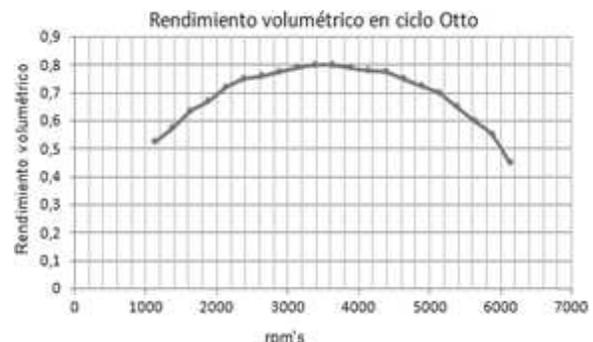


Figura 2: Rendimiento volumétrico en el ciclo Otto.

De la Ecuación (2), se tiene como incógnita; el volumen de la mezcla en el cilindro del motor de combustión, ya que este parámetro depende de la velocidad. Los valores de volumen en función de la velocidad, se sustentan en los estudios realizados por Pérez en su trabajo sobre tecnología de los motores [6]. En la Figura 2, se presenta la curva de rendimiento volumétrico en el Ciclo Otto,

Se introducen en la curva de la Figura 2 los valores nominales de rpm (revoluciones por minuto) del motor y se obtiene el rendimiento volumétrico, con este parámetro para la Ecuación (3)

$$V_{1(\omega)} = V_1 \eta_\omega \tag{3}$$

Sustituyendo la Ecuación (3) en la Ecuación (1) y se obtiene el número de moles (n)

$$n = \frac{P_1 V_1 \eta_\omega}{RT_1} \tag{4}$$

Una vez obtenido el número de moles por la Ecuación (4), se procede a determinar la masa del aire que compone la mezcla dentro del cilindro, tal como se representa en la Ecuación (5).

$$m_{\text{aire}} [g] = m_{\text{moles}} [mol] \times m_{\text{molar del aire}} \left[\frac{g}{mol} \right] \tag{5}$$

A partir de este valor de masa de aire, se determina la masa del combustible por la Ecuación (6)

$$m_{\text{comb}} [g] = \frac{m_{\text{aire}} [g]}{AFR} \tag{6}$$

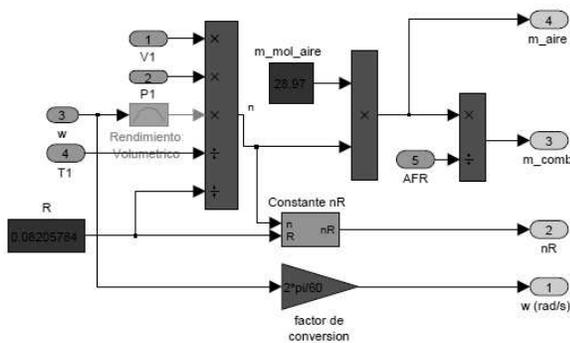


Figura 3: Bloque componentes de la mezcla aire–metano.

La Figura 3 muestra la estructura interna del bloque denominado *Componentes de la mezcla*,

que tiene como variables principales de salida, la masa de aire y la masa del combustible.

Dentro del bloque *Componentes de la Mezcla*, también se pueden encontrar sub–bloques como el denominado *Constante nR*, donde se determina el producto de los números de moles por la constante universal de los gases R.

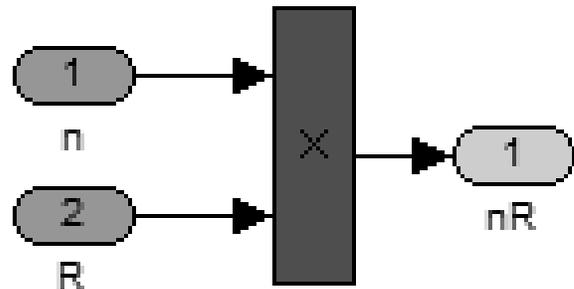


Figura 4: Bloque constante nR.

Para que el programa funcione de manera más eficiente, en la Figura 4 se muestra este valor dado en la Ecuación (7) para cálculos posteriores

$$\text{Constante}_{nR} = n \cdot R \tag{7}$$

Luego, se establece un segundo sub–bloque, en el cual se hace la conversión de la velocidad del motor de combustión interna de rpm a radianes sobre segundo (ver Ecuación (8)).

$$\omega_{(\frac{rad}{s})} = \omega \left(\frac{2\pi}{60} \right) \tag{8}$$

3.2. Bloque temperatura de post compresión

La finalidad de este bloque es la determinación de la temperatura de la mezcla, una vez finalizado el proceso de compresión del Ciclo Otto. Para el cálculo de dicha temperatura T_2 , se utiliza la Ley de Charles Gay–Lussac que corresponde a un proceso adiabático y reversible, como se muestra en la Ecuación (9)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} \tag{9}$$

donde k es una constante de evolución politrópica y se define como $k = cp/cv$ y ρ es la relación de compresión del motor de combustión interna, y se

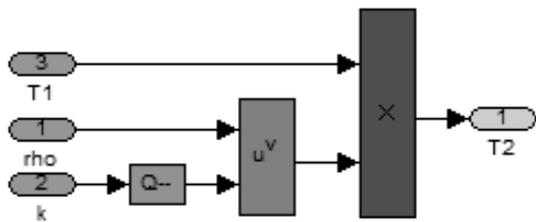


Figura 5: Bloque Temperatura Post-compresión.

define $\rho = V1/V2$, por lo que la Ecuación (9) se puede convertir en la Expresión (10)

$$T_2 = T_1 \cdot \rho^{k-1}, \tag{10}$$

La Figura5 muestra la estructura interna del bloque Temperatura Post-compresión utilizando el lenguaje Matlab® Simulink, basado en la Ecuación (10).

3.3. Bloque Aporte calorífico

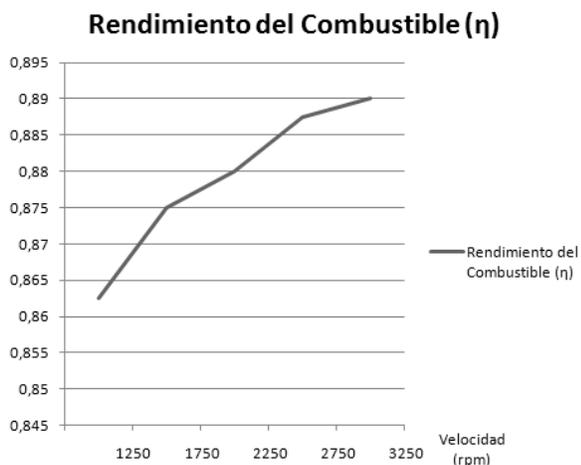


Figura 6: Grafica rendimiento del combustible Vs velocidad.

Teniendo como variables de entrada la velocidad (ω), la masa del combustible calculado con anticipación y el poder calorífico inferior del gas (este ultimo dependió del combustible, y es un valor conocido). En la Ecuación (11), solo se desconoce la variable rendimiento del combustible ($\eta_{(comb)}$) como se muestra en la Figura 6.

$$Q = m_{(comb)} PCI_{(gas)} \eta_{(comb)}. \tag{11}$$

Una vez calculado el aporte calorífico, se obtiene el valor de ΔT , por la Ecuación (12)

$$\Delta T = \frac{Q}{m_{(aire)} + m_{(comb)} C_v}. \tag{12}$$

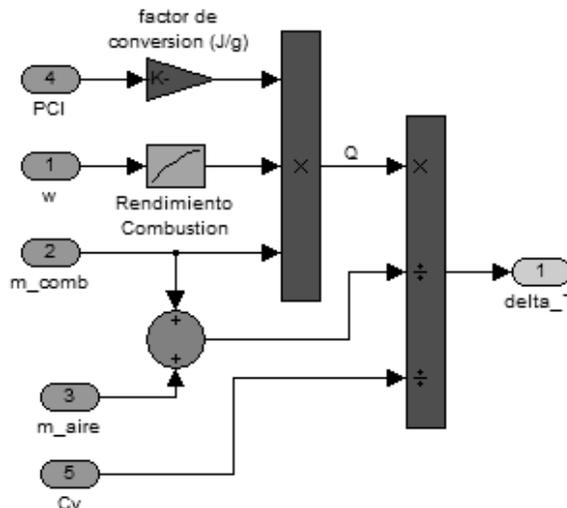


Figura 7: Bloque Aporte Calorífico.

En la Figura 7 se muestra la estructura interna del bloque *Aporte calorífico*, representado en los diagramas del programa, Matlab® Simulink; donde se obtiene como variable de salida la variación de temperatura (ΔT), que ocurre durante el proceso de combustión.

Conocida la temperatura al final de la compresión y la variación de temperatura en el proceso de combustión, se obtiene la temperatura al inicio de la expansión, por la Ecuación (13)

$$T_3 = T_2 + \Delta T. \tag{13}$$

La Figura 8 muestra el cálculo de la temperatura, en el diagrama de bloques suministrado por el programa Matlab® Simulink.

3.4. Bloque trabajo de compresión

Es el trabajo producido en el proceso de compresión del ciclo Otto del motor de combustión interna, utilizando la siguiente Ecuación (14)

$$W_c = \frac{nR}{1-k} (T_2 - T_1). \tag{14}$$

Se hicieron transformaciones sucesivas en la Ecuación (14) para hacer la representación menos

Despejando T_4 de la Ecuación (24), se obtiene

$$T_4 = \frac{P_4 V_4}{nR}. \tag{25}$$

Se introduce una nueva incógnita al sistema, ya que la presión P_4 de la Ecuación (25) es desconocida. Aplicando la Ley de Boyle durante el proceso de expansión, es decir entre los puntos tres (03) y cuatro (04), además, se consideran las características adiabáticas del proceso se obtiene la expresión

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k_e}. \tag{26}$$

Teniendo como incógnita la presión al inicio de la expansión P_3 , en la Ecuación (26), se aplica la ley de los gases ideales en el punto obteniéndose la Ecuación (27)

$$P_3 V_3 = nRT_3. \tag{27}$$

Despejando la Ecuación (27) e introduciendo la misma en la Ecuación (26), se obtiene la expresión

$$P_4 = \frac{nRT_3}{V_3} \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k_e}. \tag{28}$$

Los procesos de combustión y de escape del ciclo Otto de un motor de combustión son isocoros, es decir, ocurren a volumen constante, se reescribe la Ecuación (28)

$$P_4 = \frac{nRT_3}{V_2} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k_e}, \tag{29}$$

$$P_4 = \frac{nRT_3}{V_2} \left(\frac{1}{\rho} \right)^{k_e}. \tag{30}$$

Sustituyendo la Ecuación (30) en la Ecuación (25), se tiene como resultado la expresión para el cálculo de la temperatura

$$T_4 = T_3 \rho^{1-k_e}. \tag{31}$$

Sustituyendo la Ecuación (31) se obtiene la expresión para el cálculo del trabajo en el proceso de expansión

$$W_e = \frac{nRT_3}{1 - k_e} \left(\rho^{(1-k_e)} - 1 \right). \tag{32}$$

La Figura 10 muestra el bloque denominado trabajo de expansión, en el cual se puede verificar la representación en Matlab® Simulink, del modelo matemático expresado en la Ecuación (32).

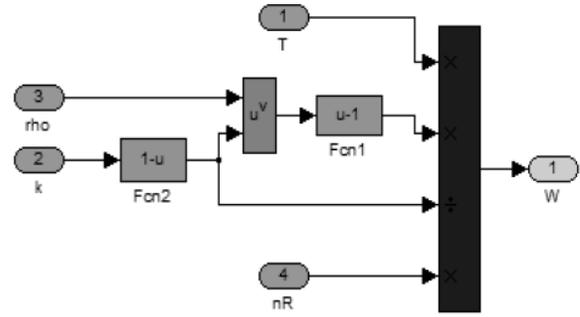


Figura 10: Bloque Trabajo Expansión.

3.6. Bloque cálculo de potencia

Una vez determinados los trabajos de compresión y expansión, se calcula el trabajo total del motor de combustión interna a partir de la Ecuación (33)

$$W_{T[atm.m]} = W_c + W_e. \tag{33}$$

Seguidamente, se transforman las unidades a la unidad del sistema internacional en Joule, tal como se muestra en la Ecuación (34)

$$W_{[J]} = W_{T[atm.m]} \times \frac{101,32J}{1 atm.l}. \tag{34}$$

Luego, se determina la potencia eléctrica como el producto entre el trabajo total, el número de cilindros del motor y la velocidad, como se indica en la Ecuación (35)

$$P \left(\frac{J}{s} \right) = W_i(J) \times \#Cilindros \times \omega \left(\frac{rad}{s} \right). \tag{35}$$

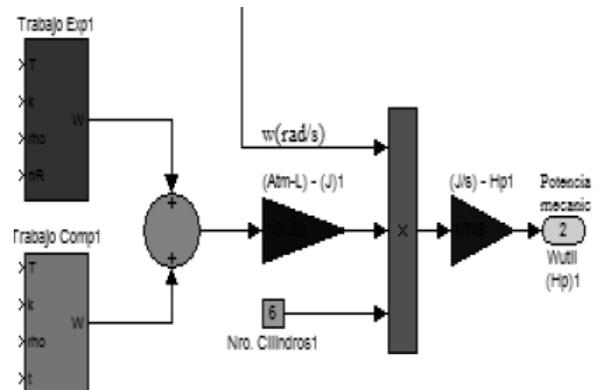


Figura 11: Cálculo de potencia mecánica.

Considerando que un caballo de fuerza (Hp) equivale 746W, se obtiene la potencia mecánica

del motor de combustión interna. La Figura 11 muestra las ecuaciones matemáticas utilizadas para calcular la potencia mecánica del motor de combustión interna, representadas en un diagrama del programa Matlab® Simulink.

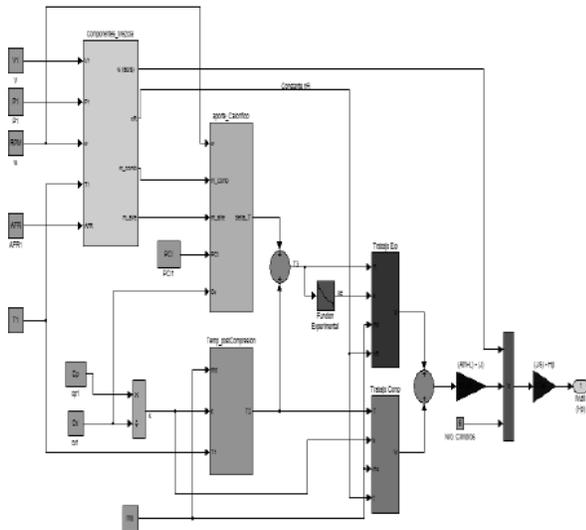


Figura 12: Modelo del Motor de combustión interna.

La Figura 12, muestra la estructura de modelación del motor de combustión interna ciclo Otto, en diagramas del programa Matlab® Simulink.

4. Resultados y discusión de resultados

4.1. Modelo de la máquina síncrona funcionando como generador en el lenguaje Matlab® Simulink

El modelo de la máquina síncrona utilizado en la presente investigación, es similar al propuesto en la librería del software de simulación Matlab® Simulink, el cual ha sido implementado en diferentes paquetes de ordenadores como la Power Systems Toolbox que funciona en el ambiente de Simulink de MATLAB, ATP/EMTP, PSCAD-EMTDC, etc. La Figura 12 muestra la máquina síncrona seleccionada de la librería de matlab.

En la librería de Matlab® Simulink se puede elegir entre tres bloques de maquina síncrona para especificar los parámetros del modelo.

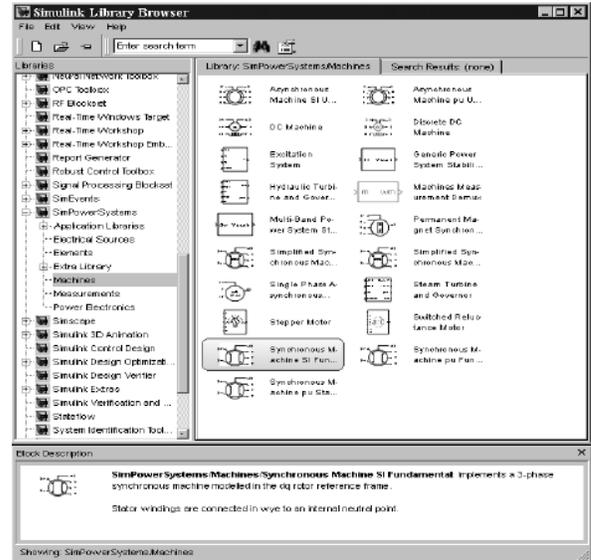


Figura 13: Librería de matlab® simulink–maquina síncronica.

4.2. Consideraciones del modelo matemático de la maquina síncronica

Para el desarrollo del modelo matemático de la máquina síncrona se recomienda evaluar los siguientes aspectos [7, 8]:

4.2.1. Los efectos entre el rotor y el estator

Los devanados del estator están sinusoidalmente distribuidos a lo largo del entrehierro. Las ranuras del rotor no causan una variación apreciable de las inductancias debidas a la posición del rotor.

4.2.2. La histéresis magnética es despreciable

4.2.3. El modelo tiene en cuenta la dinámica del estator, el campo y devanados amortiguadores

Todos los parámetros de rotor y cantidades eléctricas son vistos del estator.

4.2.4. Las corrientes fluyen en los devanados del estator

En la Figura 14, muestra la estructura interna del modelo de la maquina síncrona, compuesto por cuatro bloques: electrical model, mechanical model, powersysdomain, que se encargan de ejecutar los cálculos de los parámetros de entrada suministrados por el usuario y se conectan con el bloque measurement list, que muestra la información eléctrica o mecánica que el usuario necesite,

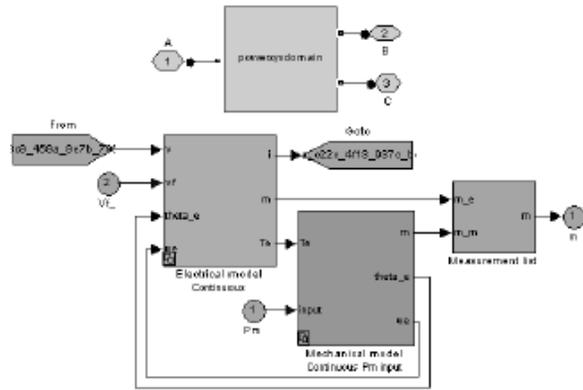


Figura 14: Estructura interna de la maquina sincrónica.

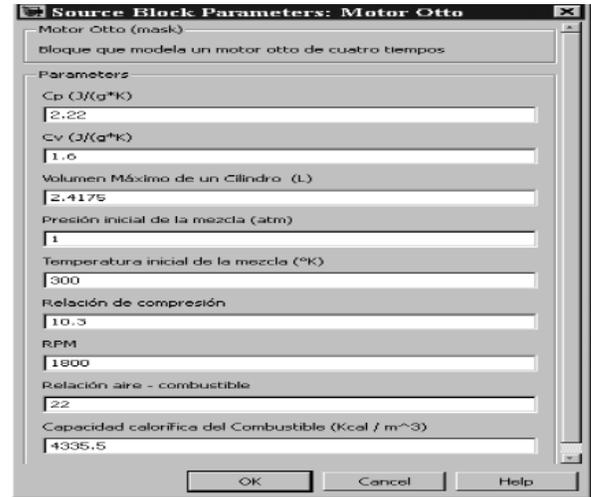


Figura 16: Parámetros del Motor.

por ejemplo: corriente de línea, tensión de línea, corriente de campo, ángulo de carga, potencia eléctrica, numero de vueltas de la maquina, etc.

Tabla 1: Ingreso de datos en el motor de combustión interna

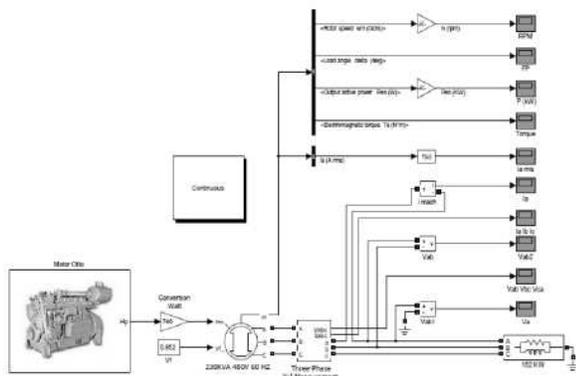


Figura 15: Modelo del Motogenerador en matlab® simulink.

La Figura 15 muestra la estructura del programa de modelación del motor de combustión interna funcionando con biogás, acoplado a la maquina sincrónica trabajando como generador de energía eléctrica y su respectiva carga.

4.3. Parámetros del motor

Para introducir los parámetros en el motor, el usuario deberá hacer doble clic en el icono del motor y se abrirá una ventana, como se indica en la Figura 16.

En esta ventana el usuario ingresa los datos teniendo en cuenta sus respectivas unidades y sin campo. Ver Tabla 1.

PARAMETRO	EXPLICACIÓN	VALOR
C_p	La capacidad calorífica a presión constante y a volumen constante, son dos elementos característicos de cada gas, en este caso para el metano a una temperatura de 300 °K.	2.22 J/g.K
C_v		1.6 J/g.K
V	El volumen máximo del cilindro es un parámetro que limita la cantidad de mezcla que entra al cilindro y es propio de cada motor.	2.4175 l.
P	Se refiere al valor de presión al cual estará sometida la mezcla antes de entrar al cilindro motor.	1 Atm
T	Se refiere a la temperatura inicial de la mezcla aire-combustible antes de entrar al cilindro del motor.	300°K
ρ	La relación de compresión permite medir la proporción en que se comprime la mezcla aire combustible dentro del cilindro del motor.	10.3
RPM	Se refiere al número de vueltas nominales en que gira el motor.	1800
AFR	La relación aire combustible permite conocer la proporción de aire y combustible que están entrando al cilindro del motor.	22
PCI_{CH_4}	El poder calorífico del metano oscila entre 4.000 y 5550 kilocalorías por metro cubico.	4335.5 Kcal/m

Fuente: Matlab® Simulink.

4.4. Parámetros de la máquina sincrónica

Para introducir los parámetros el usuario deberá hacer doble clic en el icono del generador y

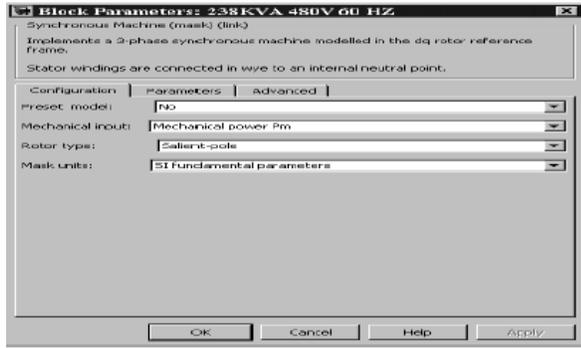


Figura 17: Menú configuración del generador.

se abrirá una ventana, como indica la Figura 17.

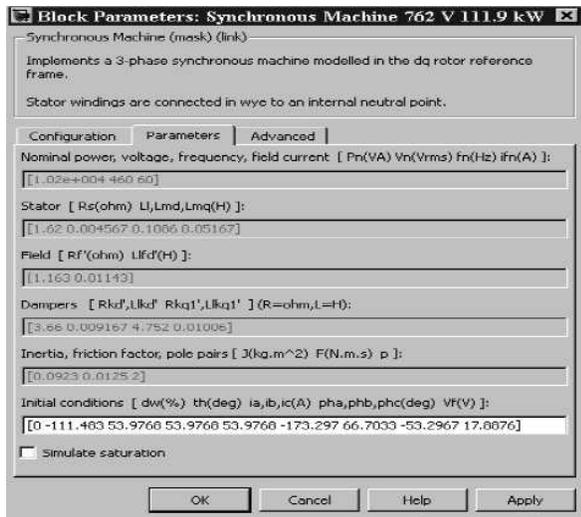


Figura 18: Menú parámetros del generador.

Una vez abierta esta ventana, el usuario revisa varios menús que ofrece la misma para colocar los parámetros correspondientes al generador. Si se selecciona la opción modelo preestablecido en el submenú preset model, se abrirá una venta como muestra la Figura 18.

En esta ventana el usuario solo puede modificar las condiciones iniciales de la máquina, ya que los demás parámetros están deshabilitados. Si se selecciona la opción no en el submenú preset model, se abrirá una ventana como muestra la Figura 19.

En esta ventana el usuario puede ajustar cualquier parámetro eléctrico o mecánico de la máquina sincrónica. La Tabla 2 muestra como se ingresan los datos en la misma.

Si el usuario no posee la tensión del campo para

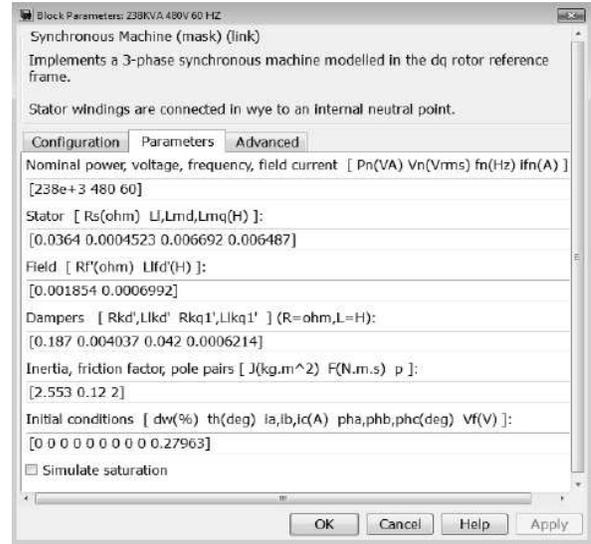


Figura 19: Menú parámetros del generador.

Tabla 2: Ingreso de datos en el menú parámetros.

REGLON	OPCIONES	SELECCIÓN
Nominal En este renglón el usuario ingresa los datos nominales de la maquina sincrónica.	Potencia Nominal (VA)	238 KVA
	Voltaje de línea Nominal (V)	480 V
	Frecuencia Nominal (Hz)	60 Hz
	Corriente de campo nominal (A)	*
Stator En este renglón se colocan los datos eléctricos referentes al estator.	Rs: Resistencia del estator (Ω)	0.0364 Ω
	Lls: Inductancia de fuga del Estator (H)	0.0004523 H
	Lmd: Inductancia de magnetización del eje d	0.006692 H
	Lmq: Inductancia de magnetización del eje q	0.006487 H
Field En este renglón se colocan los datos eléctricos referentes al campo de inducción.	Rf Resistencia de campo (Ω)	0.001854 Ω
	Lfd: Inductancia de fuga del (H)	0.0006992 H
Dampers	Rkd' (Ω): Resistencia del eje d	0.187 Ω
	Lkd (H): Inductancia de fuga del eje d	0.004037 H
	Rkq1(Ω): Resistencia del eje q	0.042 Ω
	Lkq1' (H): Inductancia de fuga del eje q	0.0006214 H
Mechanical: En este renglón se colocan los datos mecánicos referentes a la maquina sincrónica.	Inercia (kg m ²)	2.553 kg.m ²
	Factor de fricción (N.m.s)	0.12 N.m.s
	Pares de polo (P)	2
Initial conditions: En este renglón se especifican las condiciones iniciales al momento de arrancar la maquina sincrónica.	dw(%): Porcentaje desviación de la velocidad inicial.	0
	th (grados): Angulo eléctrico del rotor	0 °
	Ia, Ib, Ic (A): magnitudes de las corrientes de fase	[0, 0, 0] A
	Oa, Ob, Oc: Angulo de las corrientes de fase	[0, 0, 0] A
Vf (V): Tensión de campo inicial	**	

* Se deja en blanco o se coloca cero si no se posee
** Ver menú Advanced

el trabajo del generador, puede hacer clic en el icono del menú advanced y se abrirá una ventana como muestra la Figura 20.

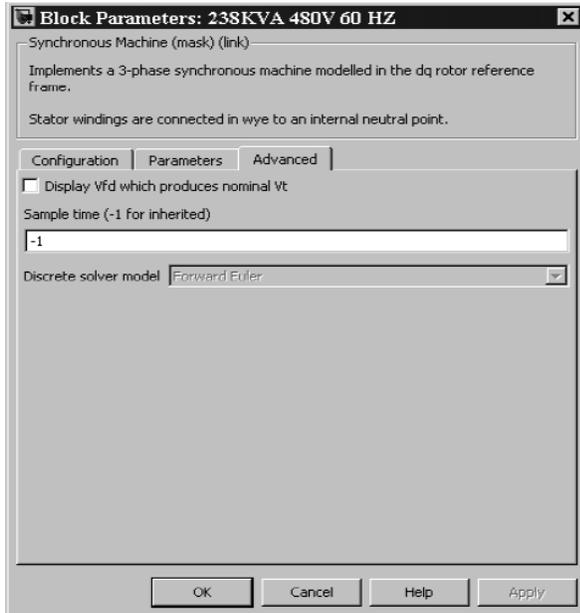


Figura 20: Menú parámetros del generador–Advanced

Haciendo clic en el cuadro superior izquierdo, el programa automáticamente proporciona un valor de campo inicial de referencia, para este caso en particular es de 0.27963 V.

5. Resultados

La simulación realizada muestra en las gráficas de las Figuras 21, 22, 23 y 24 el comportamiento de algunas variables eléctricas del sistema electrógeno seleccionado.

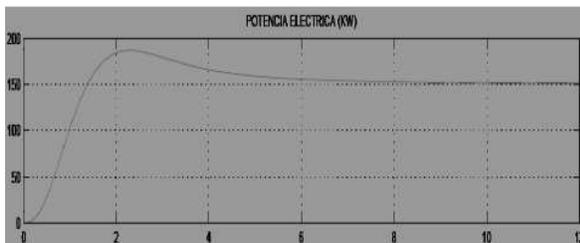


Figura 21: Corresponde a la potencia eléctrica de la máquina

6. Conclusiones

Este procedimiento permite simular las características eléctricas de diseño de un sistema motogenerador siempre y cuando, se suministren los parámetros de entrada adecuados tanto para

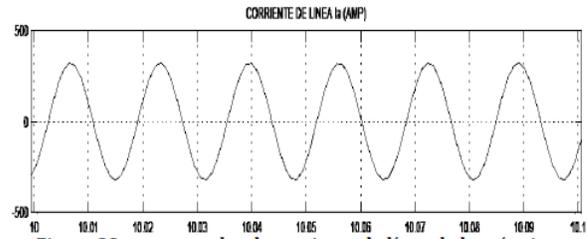


Figura 22: Corresponde a la corriente de línea de la máquina

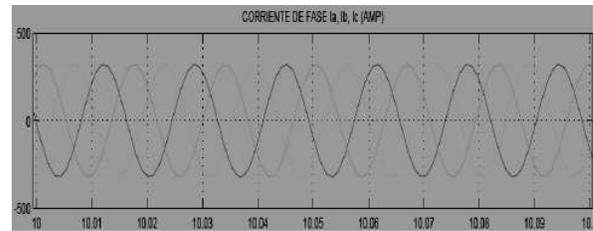


Figura 23: Corresponde a la corriente de fase de la máquina

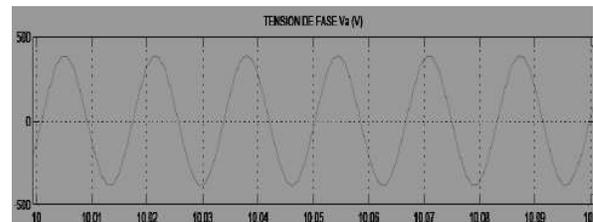


Figura 24: Corresponde a la tensión de fase de la máquina

el motor de combustión interna, como para el generador eléctrico.

La utilización de este programa permite determinar de manera gráfica los valores de tensión, corriente y potencia activa de la carga.

Se realizó la modelación de un sistema electrógeno funcionando con biogás que puede ser aplicado en la producción de energía eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela, siempre que se cumplan las condiciones del modelo.

Para futura implementación se recomienda la selección de un grupo electrógeno tipo CAT-G3406 que funciona a 60 Hz/1800 rpm, a una tensión de 480 V, proporcionando una potencia continua de 190 KW a una factor de potencia de 0.8

También es conveniente, realizar estudios posteriores sobre tribología que complementen lo aportado en la presente investigación ya que un motor real se ve afectado por pérdidas irreversibles

de energía térmica originadas por la fricción o la limitación de la relación de compresión por la temperatura en la fase de escape, etc.

Referencias

- [1] Patiño, V. Wilfrido. (2008). “Estudio de viabilidad para el aprovechamiento del biogás producido en el sitio de disposición final de Navarro”. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Santiago de Cali, Santiago de Cali, Colombia.
- [2] Flores, G y Tovar, L. (2010). “Propuesta de diseño de una planta de biogás para la generación de potencia eléctrica en zonas pecuarias de Venezuela a través del programa biodigestor©”. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Electricista. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- [3] Belli Luís A. (2006). “El motor de combustión Interna”. Trabajo de investigación en el área de postgrado, UNEFA, Puerto. Cabello, Venezuela.
- [4] Zemansky, Mark; Dittman, Richard. (1981). “Calor y termodinámica” 6ta edición, McGraw Hill, México.
- [5] Fumagalli Luigi V. (2005). “Modelación y simulación de la máGhosh S. y Mondal S. High Temperature Ageing Behaviour of a Duplex Stainless Steel, Materials Characterization, (2008). Volumen 59, Número 12, quina síncrona y su operación en sistemas de potencia”. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- [6] Pérez, M. (2004). “Tecnología de los motores”. 3ra edición. Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L, Madrid. España.
- [7] Fraile M, Jesús (2003). “Maquinas Eléctricas”. 5ta edición, McGraw Hill Interamericana, España.
- [8] Giocosa, D (1988). “Motores Endotérmicos”. Ediciones Omega, Barcelona, España.