



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Mejora de la eficiencia en grupos electrógenos
mediante control a velocidad variable

English title:

*Efficiency improvement in genset through variable
speed control*

Autor

Sébastien Cidoncha Laguarda

Directores

Juan Luis Villa Gazulla
Pablo Javier Bescós Gazcón

Titulación del autor

Grado en ingeniería eléctrica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2022/2023

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio sobre la reducción de consumo de combustible en grupos electrógenos gracias al diseño de un control a velocidad variable. El objetivo es cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030.

Para dar el máximo crédito posible al modelo estudiado, se analiza el funcionamiento de un grupo electrógeno convencional, a velocidad fija, realizando una prueba experimental. A partir de los resultados obtenidos, se ajusta un modelo teórico mediante un programa de simulación.

Gracias al modelo teórico convencional, se propone una mejora con un control a velocidad variable con el fin de observar si, en igualdad de condiciones de uso, el consumo podría ser menor reduciendo la velocidad sin interferir en el rendimiento del grupo electrógeno.

A la vista de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas y por la colaboración de la empresa Atlas Copco con este estudio, se contemplará la posibilidad de implementar la mejora a algunos de sus futuros grupos electrógenos en producción.

ABSTRACT

This dissertation deals with the reduction of fuel consumption in genset through variable speed control. The objective is to meet the Sustainable Development Goals (SDGs) by 2030.

To give as much credit as possible to the studied model, it is analyzed the operation of a conventional genset, at fixed speed, carrying out an experimental test. Based on the results obtained, a theoretical model is adjusted using a simulation program.

Thanks to the conventional theoretical model, it is proposed an improvement with a variable speed control to see if, in equal conditions, the consumption could be lower by reducing the working speed without interfering on the genset efficiency.

In view of the results obtained from the different tests and the collaboration of the company Atlas Copco with this study, the possibility of implementing the improvements to some of its future gensets in production will be considered.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Grupo electrógeno en estudio.....	2
1.3. Grupos electrógenos.....	3
2. CONTROL CONVENCIONAL DE UN GRUPO ELECTRÓGENO.....	4
2.1. Realización de las pruebas experimentales	5
2.1.1. Explicación del proceso	5
2.1.2. Resultados obtenidos.....	8
2.2. Modelo teórico del grupo electrógeno mediante <i>Simulink</i>	10
2.2.1. Elementos usados para la simulación	10
2.2.2. Motor Diesel.....	10
2.2.3. Regulación de velocidad del motor.....	13
2.2.4. Regulación de la tensión.....	14
2.2.5. Alternador.....	15
2.2.6. Bloque de carga	16
2.2.7. Resultados obtenidos.....	18
2.3. Comparación valores experimentales-modelo <i>Simulink</i>	18
3. MODELO CON CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE	25
3.1. Introducción de la prueba.....	25
3.2. Descripción del modelo <i>Simulink</i>	27
3.3. Elementos usados para la simulación.....	28
3.3.1. Motor Diesel.....	28
3.3.2. Alternador y convertidor de potencia	28
3.3.3. Regulación del bus de continua.....	29
3.4. Resultados obtenidos.....	30
4. CONCLUSIONES	36
5. Bibliografía.....	37
6. ANEXOS.....	38
6.1. Anexo 1.....	38
6.2. Anexo 2.....	53
6.3. Anexo 3.....	59

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. E. Fränckel, D. Otto Franke y A.O.Wallenberg, fundadores de Atlas Copco [1]	2
Figura 2. Grupo electrógeno con motor Diesel de la gama QAS+ de Atlas Copco [1]	2
Figura 3. Esquema del funcionamiento de un grupo electrógeno [2]	3
Figura 4 - Grupo electrógeno modelo QAS 175 que ha sido empleado para realizar el trabajo.....	6
Figura 5 - Conexión del banco de carga al grupo para la prueba	6
Figura 6 - Ejemplo de comprobación del cumplimiento de la norma tras la prueba experimental	8
Figura 7 - Elementos de la simulación del grupo electrógeno sin control de velocidad.....	10
Figura 8 – Bloque Generic Engine del programa Simulink	10
Figura 9 - Parámetros del bloque Generic Engine	11
Figura 10 - Curva del bloque motor de Simulink con los puntos de trabajo con y sin reductora	11
Figura 11 - Desglose del bloque motor.....	12
Figura 12 - Parámetros usado para la regulación de velocidad.....	13
Figura 13 - Diagrama de bloques de la regulación de velocidad del motor	14
Figura 14 - Parámetros usado para la regulación de tensión	14
Figura 15 - Modelo realizado para la regulación de tensión	15
Figura 16 - Ficha técnica del alternador con el alternador usado en la simulación [11].....	15
Figura 17 - Bloque Synchronous Machine del catálogo de Simulink	15
Figura 18 - Desglose del alternador	16
Figura 19 - Desglose del bloque de carga.....	16
Figura 20 - Ejemplo de configuración del switch.....	17
Figura 21 - Golpes de carga en función del tiempo en la prueba experimental.....	19
Figura 22 - Golpes de carga en función del tiempo en la simulación	20
Figura 23 - Variación de la tensión en la prueba experimental.....	20
Figura 24 - Variación de la tensión durante la simulación	21
Figura 25 - Variación de la frecuencia de giro durante la prueba experimental.....	22
Figura 26 - Variación de la frecuencia de giro durante la simulación	22
Figura 27 - Consumo de Diesel durante la prueba experimental	23
Figura 28 - Consumo de Diesel durante la simulación.....	23
Figura 29 - Diferencia entre el consumo experimental y la simulación	24
Figura 30 - Ejemplo del esquema usado en el estudio.....	25
Figura 31 - Señal obtenida a la salida del inversor antes y después del filtro	26
Figura 32 - Valores de las bobinas y de los condensadores del filtro	27
Figura 33 - Elementos de la simulación del grupo electrógeno con control de velocidad.....	27
Figura 34 - Bloque motor para la variación de velocidad.....	28
Figura 35 – Anterior bloque de lectura RMS y su nueva versión para el control de velocidad.....	28
Figura 36 - Bloque alternador para control de velocidad.....	29
Figura 37 - Bloque de control del bus de tensión	29
Figura 38 - Parámetros del control PI del bus de continua	30
Figura 39 - Diferencia de potencia entre ambas pruebas	31
Figura 40 - Comparación de la regulación de tensión en ambos modelos.....	32
Figura 41 - Diferencia de frecuencia entre ambas pruebas.....	32
Figura 42 - Comparación del consumo de combustible.....	33
Figura 43 - Diferencia de consumo entre modelo convencional y con control a velocidad variable.....	34

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Tipos de rendimientos en función del grupo electrógeno usado [8].....</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2 - Proceso de prueba sobre un grupo electrógeno</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3 - Resumen de datos de la prueba</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 4 - Promedios en régimen permanente del consumo durante la prueba experimental.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 5 - Tiempo de accionamiento de los golpes de carga.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6 - Valores medios resultante de la simulación.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 7 - Comparación de resultados entre prueba experimental y simulación</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 8 - Valores medios de la prueba con control de velocidad.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 9 - Porcentaje de ahorro de Diesel gracias a la mejora aportada</i>	<i>35</i>

LISTADO DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1 – Expresión de la velocidad del generador síncrono [4] [6] [7]</i>	<i>4</i>
<i>Ecuación 2 – Expresión de la velocidad del generador síncrono [10].....</i>	<i>12</i>
<i>Ecuación 3 – Densidad del Diesel y conversión de unidad para el consumo [9]</i>	<i>12</i>
<i>Ecuación 4 – Cálculo de dimensionamiento del filtro [12].....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 5 – Expresión de V_d en función del valor eficaz del armónico de tensión de línea.....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 6 – Expresión del cálculo del ahorro de combustible con la mejora propuesta</i>	<i>34</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es reducir el consumo de combustible en los grupos electrógenos puesto que es de suma importancia de cara al acuerdo de 2030 de reducción de emisiones debido a varios factores clave.

En primer lugar, este tipo de generadores son fuentes significativas de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos, lo que contribuye al cambio climático y a la degradación de la calidad del aire. Al reducir su consumo, podemos disminuir la huella de carbono y mejorar la salud medioambiental.

Además, estos sistemas suelen funcionar con combustibles fósiles, que son finitos y pueden volverse costosos y difíciles de obtener.

Otro aspecto relevante es la eficiencia energética. Los grupos electrógenos tienden a tener un rendimiento inferior en comparación con las redes eléctricas convencionales. Al mejorar su funcionamiento, se pueden fomentar prácticas de eficiencia energética y optimizar el consumo de energía, lo que a su vez puede conducir a ahorros significativos a largo plazo.

En resumen, la reducción del consumo de los grupos electrógenos es fundamental para abordar los desafíos medioambientales, fortalecer la seguridad energética y promover la eficiencia energética. Este enfoque contribuirá a cumplir los objetivos establecidos en la Agenda 2030, como el cambio climático y la transición hacia una economía más sostenible y resiliente.

Para ello, se va a proponer el uso de la tecnología de generación a velocidad variable que actualmente es usada en los aerogeneradores y que permite un desacoplo de la tensión generada por el generador síncrono de la red.

El mayor problema de los grupos electrógenos convencionales es la necesidad del mantener la frecuencia de 50 Hz a cualquier régimen de carga y eso hace que el motor térmico tenga que girar siempre a la misma velocidad y por tanto consumir más combustible del necesario a bajas cargas.

Para demostrar este nuevo concepto, se va a comparar el consumo de combustible de los grupos electrógenos con el control convencional y el control propuesto. Para realizar dicha comparación, se usarán grupos electrógenos con motores Diesel comerciales conectados a un alternador comercial.

Se va a diseñar un estudio teórico del control convencional realizado con modelos *Simulink*, y ajustado al modelo real mediante pruebas experimentales para poder comparar los resultados obtenidos, tanto teóricos como prácticos. Una vez ajustado el modelo, se planteará el nuevo control a dicho modelo teórico y se compararán consumos aplicando el mismo ciclo de carga.

Gracias a ello, se podrán saber, aproximadamente, las emisiones de gases tóxicos para el medio ambiente y cuál de las dos propuestas sería la más apropiada.

1.2. Grupo electrógeno en estudio

El origen de este estudio se debe a una colaboración con la empresa Atlas Copco en la cual he tenido la oportunidad de realizar unas prácticas extracurriculares.

Atlas Copco es una empresa industrial internacional, creada en 1873 por Edvard Fränckel, David Otto Franke y André Oscar Wallenberg (Véase Figura 1). Desde entonces, ha predominado en ella un espíritu de innovación. Son pioneros en tecnología e ingeniería y, gracias a esa gran experiencia, empresas de todo el mundo confían en sus servicios.



Figura 1. E. Fränckel, D. Otto Franke y A.O. Wallenberg, fundadores de Atlas Copco [1]

Esta empresa no solo trabaja para producir sobre pedidos realizado por clientes, sino que, siempre se está reinventando con la búsqueda de nuevos productos. Para ello, realiza una serie de prototipos (grupos electrógenos, compresores, torres de iluminación, bombas...) para intentar mejorar siempre la tecnología y la calidad de su producto.

Actualmente, Atlas Copco utiliza motores de combustión acoplados a alternadores para poder generar electricidad. Según la utilidad del mercado, se puede encontrar una amplia gama de generadores que van desde los 9 kVA hasta los 1500 kVA con motores de Diesel (Véase Figura 2).



Figura 2. Grupo electrógeno con motor Diesel de la gama QAS+ de Atlas Copco [1]

Dado que siempre busca la manera de reinventarse y de mejorar sus productos, la empresa se ha planteado la idea de investigar sobre nuevas formas de generar energía con los grupos electrógenos. Esta opción es muy importante para Atlas Copco tanto por el ahorro energético, que es uno de sus lemas, como por el fomento del cuidado del medio ambiente para las generaciones futuras. [1]

1.3. Grupos electrógenos

Los grupos electrógenos son unas máquinas que permiten generar energía para poder alimentar una gran variedad de elementos.

Gracias a un motor de combustión Diesel, se hace girar un eje que va directamente conectado a un alternador.

El alternador es la herramienta que se usa para poder generar electricidad y a su salida se obtiene corriente alterna, que permitirá alimentar distintos tipos de carga (Véase Figura 3).

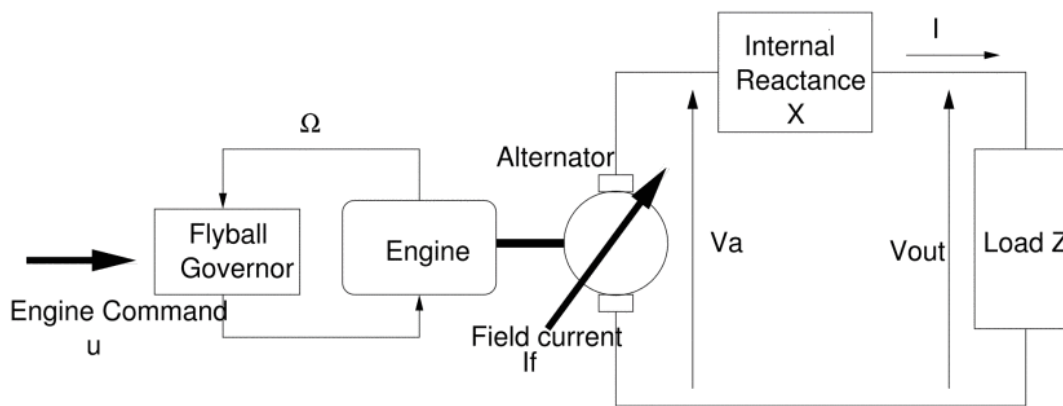


Figura 3. Esquema del funcionamiento de un grupo electrógeno [2]

El motor de combustión genera gases de escape comúnmente conocidos como óxidos de nitrógeno o NO_x .

Dado que estos gases son muy nocivos, se puede implementar un depósito de urea en el grupo electrógeno para limitar el impacto medio ambiental. [3].

Las principales funciones de los grupos electrógenos son:

- Proporcionar suministro eléctrico a una zona o edificio donde no puede llegar la energía de otra forma.
- Para la realización de obras grandes en zonas donde el suministro eléctrico no está disponible.
- Para aportar un suministro eléctrico en caso de emergencia, en hospitales, empresas o entidades. Como ejemplo, En el campus Río Ebro de la Universidad de Zaragoza, concretamente, en el edificio Torres Quevedo, hay un grupo de este tipo que entra en funcionamiento en caso de fallo del suministro eléctrico. [4]

Por otra parte, otra de las ventajas de los grupos electrógenos es que, según la necesidad que tenga el usuario, tienen la posibilidad de conectar varios grupos en paralelo para obtener más potencia.

2. CONTROL CONVENCIONAL DE UN GRUPO ELECTRÓGENO.

El uso del motor Diesel se debe, sobre todo, a que, a diferencia del motor de gasolina, está diseñado para ser más eficiente a la hora de mover cargas grandes. Esto es así porque cuando se usa a bajo régimen, el motor es capaz de generar mucho par para poder enfrentarse a todo tipo de cargas elevadas. Además, los motores Diesel son muy fiables ya que suelen aguantar mucho en el tiempo, lo que los convierte en una solución muy económica. En un grupo electrógeno, el motor diésel mueve al alternador.

Los alternadores son máquinas eléctricas síncronas que, al ser usadas como generadores, se emplean de manera frecuente para producir energía eléctrica a partir de una fuente primaria de energía (hidráulica, térmica, ...). Dichas máquinas, giran a una velocidad que está vinculada directamente con la frecuencia de la red de acuerdo con la expresión de la *Ecuación 1*: [5]

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

Ecuación 1 – Expresión de la velocidad del generador síncrono [4] [6] [7]

En Europa, las máquinas deben funcionar a una frecuencia de 50 Hz. De manera general, la correcta elección de la máquina motriz viene dada por su velocidad de giro. Claro está, que dicha velocidad viene impuesta por la velocidad de la máquina principal que permite el giro del alternador. [4]

Para poder realizar este estudio se procede a la elaboración de un modelo teórico de un grupo electrógeno con una regulación convencional a velocidad fija. En este caso, dado que el generador es de 4 polos, la velocidad del motor deberá ser de 1500 rpm para generar a una frecuencia de 50 Hz. En este grupo, obtendremos una tensión de salida de 230 V entre fase-neutro o de 400 V entre fase-fase.

Para que la simulación sea lo más real posible, se emplearán las mismas condiciones de pruebas que se realizan en los grupos electrógenos de Atlas Copco. Para ello, se empleará la normativa *ISO8528* índice 6 que indica los métodos de prueba sobre grupos electrógenos inducidos por motores térmicos.

Esta normativa, establece cuatro rangos de especificaciones diferentes a respetar en función del uso de la máquina, G1, G2, G3 y G4. No obstante, en el estudio solo interesan los tres primeros dado que el G4 se usa únicamente entre proveedor y comprador (*Véase Tabla 1*).

Tabla 1 - Tipos de rendimientos en función del grupo electrógeno usado [8]

Tipo de rendimiento	G1	G2	G3
Banda de frecuencia en estado estacionario	2,5%	1,5%	0,5%
Máxima disminución de frecuencia	-15%	-10%	-7%
Máximo aumento de frecuencia	18%	12%	10%
Tiempo de recuperación de frecuencia	10 s	5 s	3 s
Desviación de voltaje en estado estacionario	5%	2,50%	1%
Máxima disminución de voltaje	-25%	-20%	-15%
Máximo aumento de voltaje	35%	25%	20%
Tiempo de recuperación de voltaje	10 s	6 s	4 s

En el presente trabajo debido al tipo de uso que se va a dar al grupo electrógeno, se empleará el criterio G2 en cada una de las pruebas que se realizará en este estudio, tanto teóricas como prácticas.

La manera en la que se definen las características del grupo, acorde con la normativa, viene dada por el proveedor del motor. Este determina que, según la programación de su producto y de la potencia que puede entregar, hay que respetar una u otra condición de la norma. En el caso del criterio G2, las características de tensión del grupo electrógeno tienen que ser muy similar a las de la red eléctrica de uso público.

La utilidad de este modelo o simulación es poder comprobar la fiabilidad del mismo a la hora de hacer un grupo electrógeno con regulación de velocidad en función de la carga.

Para realizar la validación del modelo teórico, se han realizado unas pruebas experimentales con un grupo electrógeno de la misma potencia para poder comparar ambos resultados.

2.1. Realización de las pruebas experimentales

2.1.1. Explicación del proceso

Con el fin de asegurar el buen funcionamiento de las máquinas a sus clientes, en Atlas Copco se realizan una serie de pruebas sobre los grupos electrógenos. En concreto, este estudio se realiza la prueba sobre un modelo QAS 175 (Véase Figura 4).

Una de las pruebas llevada a cabo en este grupo electrógeno consiste en aplicar diferentes cargas para someter el motor a condiciones que se podrá encontrar una vez que el motor esté en funcionamiento en campo.



Figura 4 - Grupo electrógeno modelo QAS 175 que ha sido empleado para realizar el trabajo

Para ser acordes a la simulación que se está realizando en este estudio y comparar de manera fiable ambos resultados, se han realizado las pruebas de carga sobre una máquina con un alternador y un motor con las mismas características que tendrá la simulación.

El grupo electrógeno que se ha utilizado para la prueba experimental entrega una potencia nominal a 50Hz de 133 kW manteniendo una tensión de línea de 400 V. Tiene que cumplir el tipo de rendimiento G2 indicado por la norma ISO8528. La realización de la prueba se ha realizado en condición normales con una temperatura exterior de 23°C y una tasa de humedad del 33%. Estos datos son importantes datos que según las condiciones de funcionamiento del grupo electrógeno, los datos de consumo pueden variar si se usa en un entorno con condiciones más desfavorables. Por la política que tiene la empresa, estos son los únicos datos técnicos sobre el grupo electrógeno que se pueden facilitar.

Una vez que el grupo ha sido montado y está listo, comienza la prueba conectándolo con un banco de carga (Véase Figura 5).



Figura 5 - Conexión del banco de carga al grupo para la prueba

Durante la prueba, la máquina se verá sometida a diferentes valores de cargas, todas ellas resistivas, para analizar diferentes aspectos.

En primer lugar, hay que comprobar que el grupo aguanta las cargas y que no se desconecta en mitad de la prueba. También es importante anotar si el motor regula de forma correcta tanto la tensión como la frecuencia, respetando siempre los criterios impuestos por la normativa *ISO8528*. Para ello, durante la prueba se aplican distintos porcentajes de carga con intervalos de tiempo diferentes (*Véase Tabla 2*).

Como se puede observar en la *Tabla 2*, para diferentes valores de carga, se deja un tiempo antes de aplicar la siguiente carga. Eso permite comprobar que las regulaciones se hacen de manera correcta.

Tabla 2 - Proceso de prueba sobre un grupo electrógeno

	Tiempos [min]	Porcentaje de carga [%]
1	2 min	25%
2	2 min	50%
3	2 min	75%
4	10 min	100%
5	1 min	106%
6	1 min	100%
7	1 min	0%

Una vez que se llega al 100% del valor de carga, se deja la carga con el 100% del valor de la potencia nominal más tiempo del estipulado para el resto de las cargas porque lo que es importante es saber si el grupo aguanta dicho valor de potencia. En este punto, se comprueba también como afecta este nivel de funcionamiento a las vibraciones del grupo, si no sobrecalienta el motor y otras más comprobaciones. Es importante, durante la prueba experimental, comprobar estos parámetros dado que estos grupos electrógenos están diseñados para trabajar principalmente a cargas elevadas.

A pesar de que los grupos electrógenos no estén pensados para soportar valores superiores al 100% de su potencia nominal, se realiza una pequeña sobrecarga. Esta operación tiene como objetivo que, en el caso de que un cliente aplique más carga en un uso real, se pueda asegurar que el grupo electrógeno es capaz de aguantar dicho valor durante un tiempo limitado.

Para poder recopilar los datos de la prueba, con un programa informático específico para estas situaciones, se pueden sacar las diferentes curvas de funcionamiento y el estado de la máquina en cualquier momento y con cualquier valor de carga. De esta manera, y de forma automática, el programa indica al final de la prueba si se han cumplido los requisitos impuestos por la normativa según el tipo de rendimiento indicado a su inicio (*Véase Tabla 1*).

Como en este estudio lo que interesa es el valor de consumo de combustible, se ha podido obtener el consumo del motor durante la prueba y su valor con las diferentes cargas a la que se ha visto expuesto el grupo electrógeno. Este valor de consumo es el que se usará más adelante para comparar con los valores de consumo que se han obtenido en el modelo *Simulink*. Los demás valores se usarán de igual modo puesto que al ser similares a la simulación, permitirán confirmar de manera más firme que la simulación realizada está en consonancia con la realidad.

2.1.2. Resultados obtenidos

Una vez acaba la prueba, el programa empleado para la lectura de datos (*Sigma Load Bank Control*) genera un informe donde aparecen todos los datos que se ha leído durante el ensayo (Véase *Figura 6*) (Véase *Anexo 1*).

75,0% 1,00cosØ to 100,0% 1,00cosØ

	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	0,4%	PASS	0,3%	PASS
Maximum -ve Deviation	-4,8%	PASS	-2,0%	PASS
Recovery Time	0,4s	PASS	0,4s	PASS
Steady State Readings				
	Voltage		Frequency	
Steady State Value	400,3V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,2%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,4%	PASS	-0,2%	PASS
Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:10:08	125,6kVA	L1: 400,3V	231,5V	181,1A
	125,6kW	L2: 399,6V	231,8V	181,2A
	1,00cosØ	L3: 401,5V	231,2V	180,3A

Figura 6 - Ejemplo de comprobación del cumplimiento de la norma tras la prueba experimental

Como se ha explicado anteriormente, estos resultados permiten saber si la programación de las regulaciones de tensión y de frecuencia se ha hecho de manera correcta.

El documento generado indica al principio, un resumen (Véase *Tabla 3*). Este contiene el valor medio de cada magnitud durante la prueba. Además, también quedan reflejadas las condiciones en las que se han realizado el estudio como, por ejemplo, la temperatura ambiente y la humedad, la temperatura cuando la potencia es máxima o, también, la presión del local de pruebas. Todos estos datos son importantes, porque según sus valores, estos pueden influir en el funcionamiento del motor.

Tabla 3 - Resumen de datos de la prueba

Etapas de la prueba	Tiempos [min]	Porcentaje de carga [%]	Factor de potencia [$\cos \phi$]	Potencia [kVA]	Tensión de línea [V]
1	2 min	25%	1	31,8	400,3
2	2 min	50%	1	62,6	399,7
3	2 min	75%	1	94,2	399,9
4	10 min	100%	1	125,6	399,4
5	1 min	106%	1	132,6	399,5
6	1 min	100%	1	126,3	398,5
7	1 min	0%	1	0	400,2

Seguidamente, en dicho documento, se encuentran datos muestreados cada 5 segundos. También se muestra, para cada porcentaje de carga, los tiempos de recuperación de la frecuencia y de la tensión y sus valores máximos frente al golpe de carga para demostrar que cumple la norma. [8]

Con los datos recopilados de consumo, se observa en régimen permanente qué valores se obtienen para poder visualizar mejor dicho valor en cada momento de la prueba tras los diferentes golpes de carga (Véase Tabla 4).

Tabla 4 - Promedios en régimen permanente del consumo durante la prueba experimental

Etapas de la prueba	Porcentaje de carga [%]	Consumo [l/h]
1	25%	2,41
2	50%	4,50
3	75%	6,32
4	100%	8,11
5	106%	8,98
6	100%	8,17
7	0%	0,97

2.2. Modelo teórico del grupo electrógeno mediante *Simulink*

2.2.1. Elementos usados para la simulación

Para recrear un grupo electrógeno mediante *Simulink*, se ha realizado la siguiente estructura (Véase *Figura 7*).

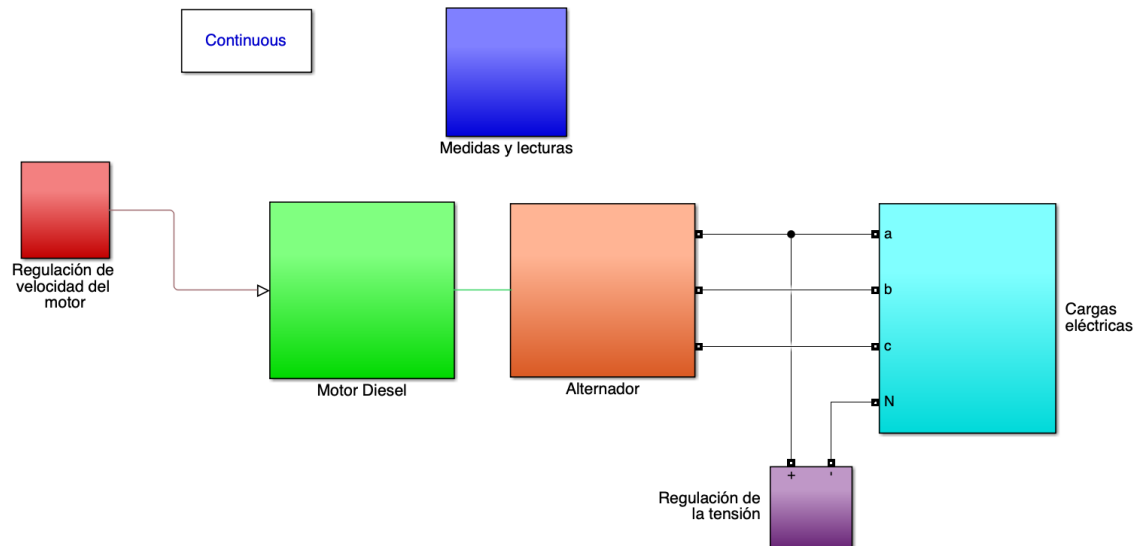


Figura 7 - Elementos de la simulación del grupo electrógeno sin control de velocidad

2.2.2. Motor Diesel

El motor Diesel en el programa de *Simulink* se ha empleado el bloque del catálogo *Generic Engine* (Véase *Figura 8*).



Figura 8 – Bloque Generic Engine del programa Simulink

Para rellenar los diferentes parámetros del bloque, se ha utilizado la ficha técnica de los motores que se usan en Atlas. El motor usado es un modelo N67. Dichos parámetros dados por la ficha técnica se han añadido directamente al bloque de *Generic Engine* (Véase *Figura 9*). [9]

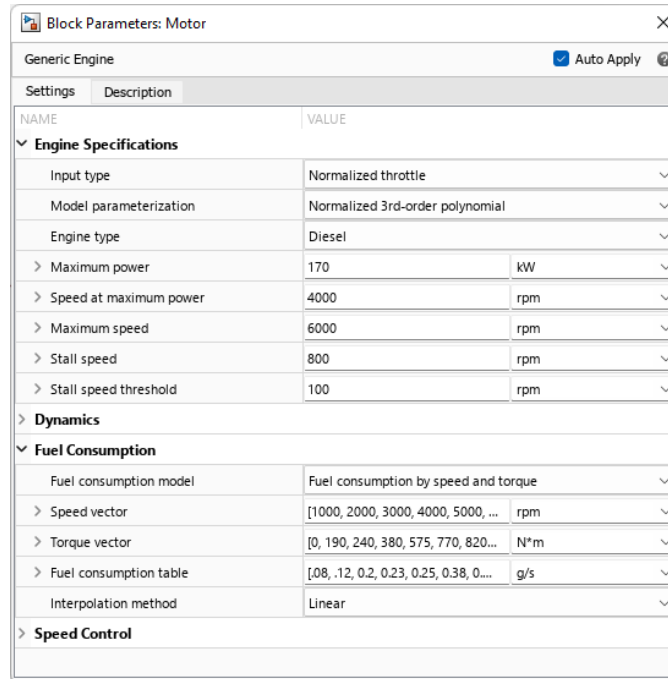


Figura 9 - Parámetros del bloque Generic Engine

Además de usar los parámetros de la ficha técnica del motor se debe tener en cuenta la curva de funcionamiento del bloque.

Tal y como se puede observar en la curva del motor del modelo de *Simulink*, de la *Figura 10*, para una velocidad de 1500 rpm, la potencia alcanzada es inferior a la de nuestro motor. Para poder obtener la potencia esperada y que el motor gire a una frecuencia de 50 Hz, se ha decidido utilizar una relación de reducción con el bloque *Simple Gear* (Véase *Figura 11*). Utilizando una relación de 2:1, el motor gira a 3000 rpm, pero con la reducción, se obtienen los 1500 rpm deseados y la potencia esperada.

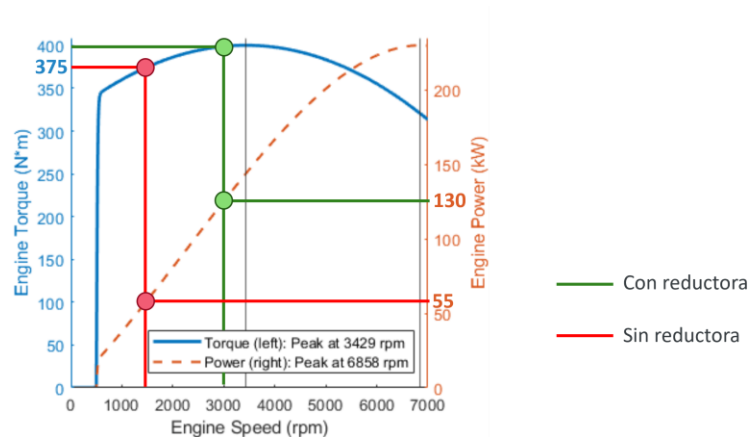


Figura 10 - Curva del bloque motor de Simulink con los puntos de trabajo con y sin reductora

Tal y como se puede apreciar *Figura 11*, se han adicionado distintos puntos de lectura de datos. Al añadir una reductora en la salida de nuestro motor, se ha decidido hacer una lectura de la velocidad antes y después de la reducción para asegurar que esta se hace correctamente.

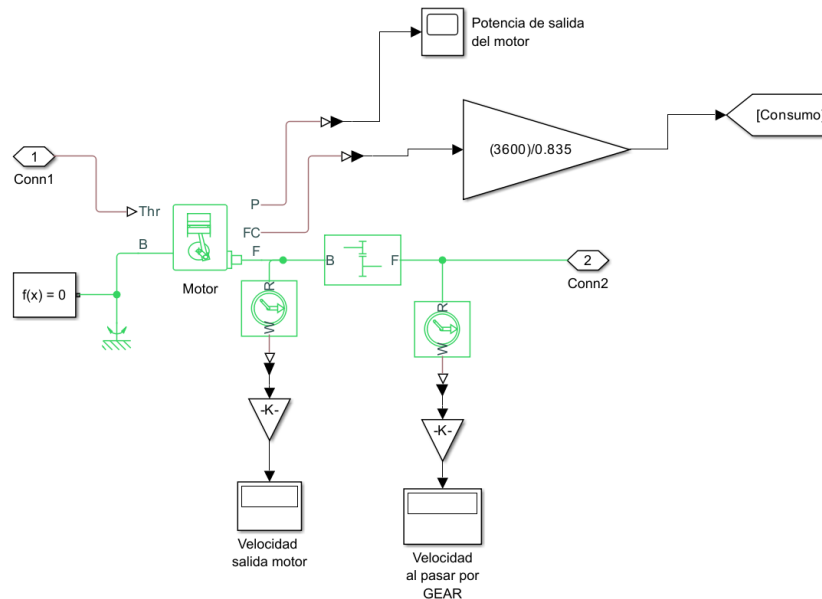


Figura 11 - Desglose del bloque motor

Dado que el bloque de *Simulink* devuelve un valor de velocidad en rad/s también se ha llevado a cabo la conversión para poder leer el dato en revoluciones por minuto (rpm) (Véase Ecuación 2).

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

Ecuación 2 – Expresión de la velocidad del generador síncrono [10]

Por otra parte, para poder regular la velocidad del motor y mantener los 50 Hz, se añade una regulación que permitirá mantener la velocidad constante al añadir distintas cargas. Este valor se conecta a la entrada del bloque motor *Thr*. Según las especificaciones del bloque, este parámetro permite gestionar la demanda de par del motor a partir de su par máximo indicado por la ficha técnica. Esta señal tiene un rango de valores comprendido entre 0 y 1, siendo uno el valor máximo permitido.

En la *Figura 11* también se pueden ver dos puntos de lectura a la salida del bloque *Generic Engine*, en concreto, *P* y *FC*, que se corresponden, respectivamente, a la potencia del motor y a su consumo. Este último va a ser el parámetro que va a ser utilizado a lo largo del estudio a diferentes cargas eléctricas.

En la salida *FC* del bloque *Simulink* obtiene el caudal másico de combustible, que tiene por unidad kg/s. Como lo que interesa para el estudio es leer este valor en l/h, se utilizará una conversión, dado que se conoce la densidad del combustible que proporciona el fabricante del motor (Véase Ecuación 3). [9]

$$\rho_{Diesel} = 0,835 \frac{kg}{l}$$

$$Consumo_{Diesel} = \frac{\dot{m}}{\rho_{Diesel}} \times 3600$$

Ecuación 3 – Densidad del Diesel y conversión de unidad para el consumo [9]

2.2.3. Regulación de velocidad del motor

La técnica de control convencional de los grupos electrógenos es a velocidad fija, es decir, mantener la velocidad constante independientemente de la carga a alimentar, mediante un regulador proporcional-integral (PI). El control PI utiliza la información de la velocidad actual del motor, la velocidad deseada y el error de velocidad para ajustar la entrada del motor y regular su velocidad.

Primero, se define las constantes del controlador PI: ganancia proporcional (P) y ganancia integral (I). Estas constantes se ajustan según las características del motor y el comportamiento deseado (*Véase Figura 12*).

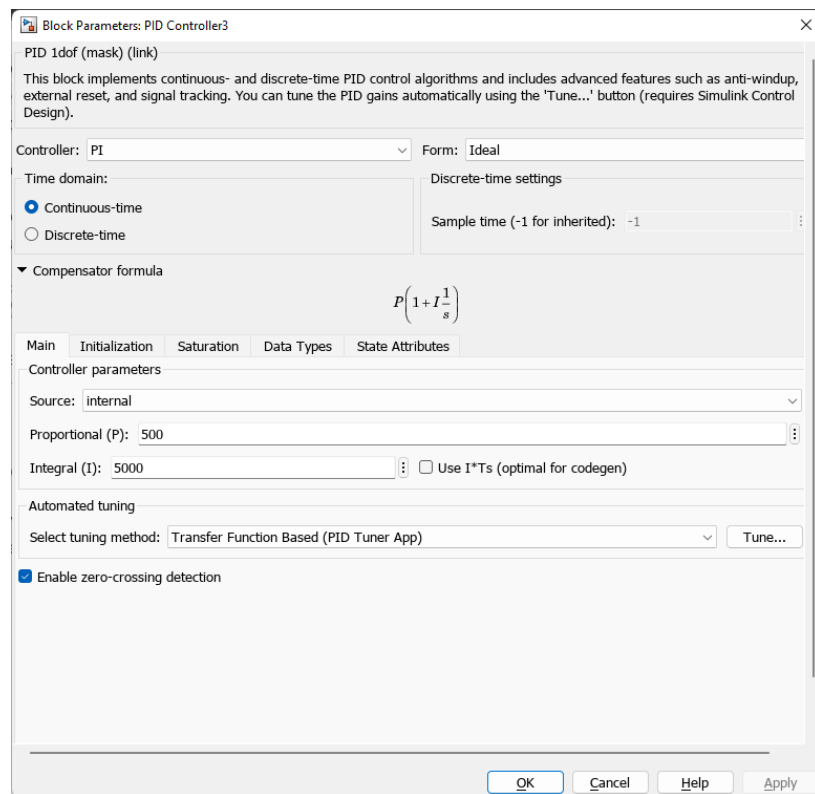


Figura 12 - Parámetros usado para la regulación de velocidad

Luego, se configura la entrada del motor y la medición de la velocidad instantánea del motor.

En cada iteración del controlador, se calcula el error de velocidad como la diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad actual.

Este diagrama de regulación (*Véase Figura 13*) funciona de tal manera que en función de la velocidad del alternador medida en revoluciones por minuto (rpm), obtiene la frecuencia en Hertzios (Hz), usando la fórmula de la *Ecuación 1*.

Mediante una comparación con el valor de consigna, 50 Hz, el sistema PI actúa para corregir los errores detectados. Una vez corregido, el valor se convierte en pu para poder introducirlo en la señal *Thr* del bloque motor.

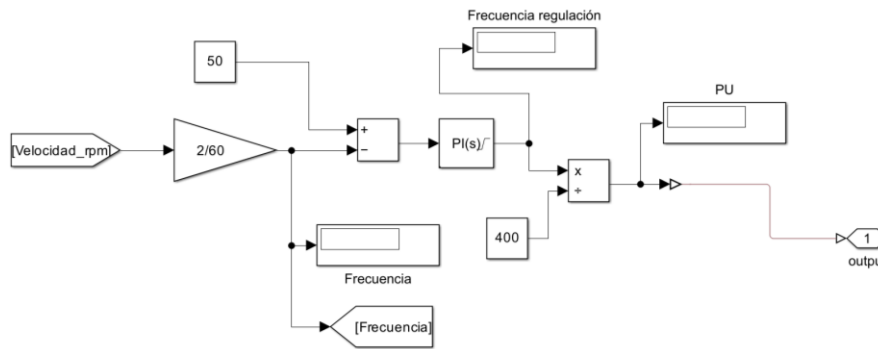


Figura 13 - Diagrama de bloques de la regulación de velocidad del motor

2.2.4. Regulación de la tensión

De la misma manera que para el control de velocidad, se implementa un control para regular la tensión a la salida del alternador mediante control de la tensión de excitación. Para ello, se vuelve a usar un sistema de control proporcional-integral (PI). Al ser magnitudes diferentes, los parámetros deben de ser actualizados para la tensión (Véase Figura 14).

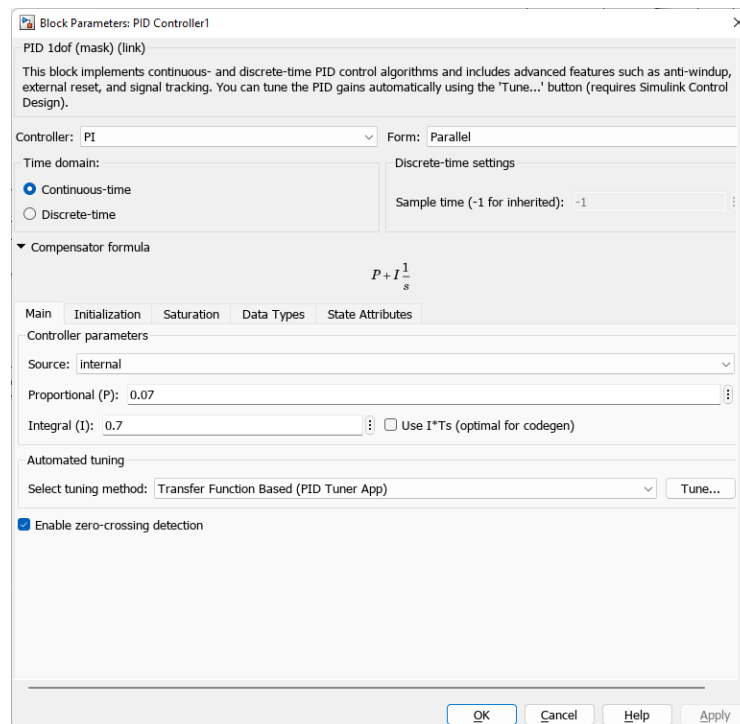


Figura 14 - Parámetros usado para la regulación de tensión

Una vez que se definen los parámetros del control PI, la manera de funcionar es leer el valor de la tensión de fase a la salida del alternador y comparar dicho valor con la consigna de 230 V.

Para poder mantener la tensión deseada, el control envía la tensión de excitación (V_f) al alternador en la entrada V_f . Esto permite que la excitación aplicada al rotor genere el flujo de magnético necesario para mantener la tensión constante a lo largo de la prueba (Véase Figura 15).

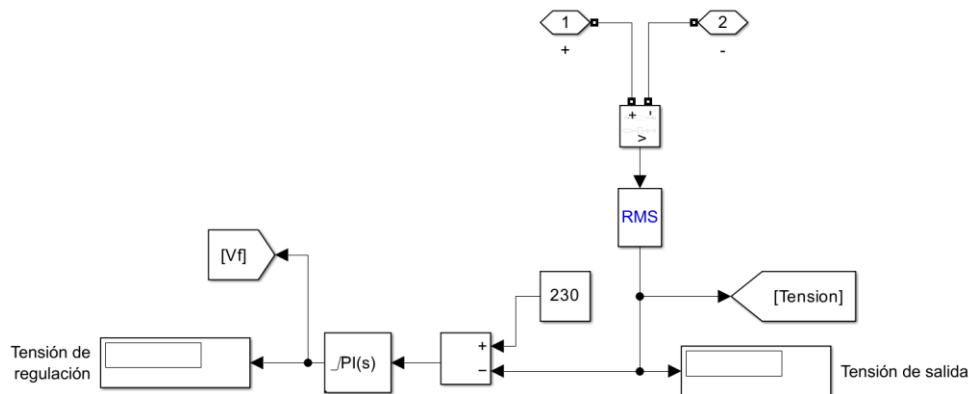


Figura 15 - Modelo realizado para la regulación de tensión

2.2.5. Alternador

El control de la tensión de salida del generador se realiza mediante el control de la corriente de excitación. Para obtener el regulador adecuado, es necesario conocer los datos reales suministrados por el fabricante (Véase Figura 16). [11]

Ratings 50 Hz - 1500 R.P.M.

kVA / kW - P.F. = 0.8		Continuous / 40 °C				Continuous / 40 °C				Stand-by / 40 °C				Stand-by / 27 °C							
Class / T° K		H / 125° K				F / 105° K				H / 150° K				H / 163° K							
Phase		3 ph.		1 ph.		3 ph.		1 ph.		3 ph.		1 ph.		3 ph.		1 ph.					
Y	380V	400V	415V	440V	380V	400V	415V	440V	380V	400V	415V	440V	380V	400V	415V	440V					
Δ	220V	230V	240V	230V	220V	230V	240V	230V	220V	230V	240V	230V	220V	230V	240V	230V					
YY (*)		200V		220V		200V		220V		200V		220V		200V		220V					
ΔΔ (*)				230V				230V				230V				230V					
TAL 044 A	kVA	70	70	70	63	42	64	64	64	57	38	74	74	74	67	45	77	77	77	69	46
	kW	56	56	56	50	33.5	51	51	51	46	30.5	59	59	59	54	36	62	62	62	55	37
TAL 044 B	kVA	80	80	80	72	48	73	73	73	66	44	85	85	85	76	51	88	88	88	79	53
	kW	64	64	64	58	38.5	58	58	58	53	35	68	68	68	61	41	70	70	70	63	42
TAL 044 C	kVA	90	90	90	81	54	82	82	82	74	49	95	95	95	86	57	100	100	100	89	59
	kW	72	72	72	65	43	66	66	66	59	39	76	76	76	69	46	80	80	80	71	47
TAL 044 D	kVA	100	100	100	90	60	91	91	91	82	55	106	106	106	95	64	110	110	110	99	66
	kW	80	80	80	72	48	73	73	73	66	44	85	85	85	76	51	88	88	88	79	53
TAL 044 E	kVA	125	125	125	113	67	114	114	114	103	61	133	133	133	120	71	138	138	138	124	74
	kW	100	100	100	90	54	91	91	91	82	49	106	106	106	96	57	110	110	110	99	59
TAL 044 H	kVA	135	135	135	122	73	123	123	123	111	66	143	143	143	129	77	150	150	150	134	80
	kW	108	108	108	98	58	98	98	98	89	53	114	114	114	103	62	120	120	120	107	64
TAL 044 J	kVA	150	150	150	135	80	137	137	137	123	73	159	159	159	143	85	165	165	165	149	88
	kW	120	120	120	108	64	110	110	110	98	58	127	127	127	114	68	132	132	132	119	70
TAL 044 K	kVA	165	165	165	138	88	150	150	150	126	80	175	175	175	150	93	182	182	182	157	97
	kW	132	132	132	110	70	120	120	120	101	64	140	140	140	120	74	146	146	146	126	78
TAL 044 L	kVA	180	180	180	171	90	164	164	164	156	82	191	191	191	181	95	200	200	200	188	99
	kW	144	144	144	137	72	131	131	131	125	66	153	153	153	145	76	160	160	160	150	79
TAL 044 M	kVA	192	200	200	192	100	175	182	182	175	91	204	212	212	204	106	211	220	220	211	110
	kW	154	160	160	154	80	140	146	146	140	73	163	170	170	163	85	169	176	176	169	88

Figura 16 - Ficha técnica del alternador con el alternador usado en la simulación [11]

En esta simulación, se ha podido implementar el alternador usando el bloque *Synchronous Machine* (Véase Figura 17), en el cual se han podido añadir las diferentes características del alternador que proporciona la ficha técnica.

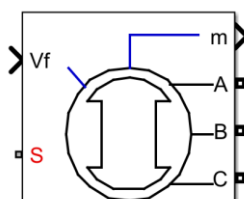


Figura 17 - Bloque Synchronous Machine del catálogo de Simulink

En el bloque “Alternador” en la *Figura 17* se puede observar que se conecta, directamente la salida del motor térmico “S”. Es lo que representa la conexión real entre el volante del motor y del alternador, lo que inicia el giro de este. Para controlar la excitación del alternador, conectamos en la entrada V_f , el control de la regulación de tensión tal y como se ha comentado anteriormente.

Si se observa la *Figura 18*, se puede ver que a la salida del motor síncrono se obtiene una lectura de las diferentes medidas que se usan para las regulaciones o para obtener datos de potencia y de par (“Salida m” del alternador). También, se puede observar que, a la salida del alternador, en concreto, de la fase A, se puede medir la corriente de línea.

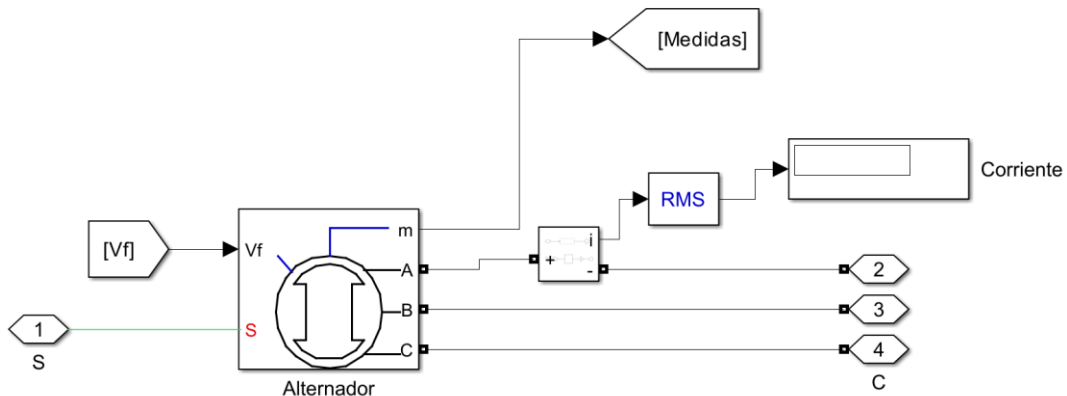


Figura 18 - Desglose del alternador

2.2.6. Bloque de carga

La salida trifásica (fase A, fase B y fase C) del alternador (Véase *Figura 18*) está directamente conectada al bloque de carga para realizar la simulación de la prueba.

Dicho bloque (Véase *Figura 19*) permite realizar la prueba del grupo electrógeno. Esta consiste en comprobar el buen funcionamiento de los diferentes controles. Para ello, la prueba se enfoca en cómo actúa el sistema frente a una perturbación. En este caso, la perturbación será debida a los diferentes golpes de carga a los que se someterá el motor a lo largo de la prueba.

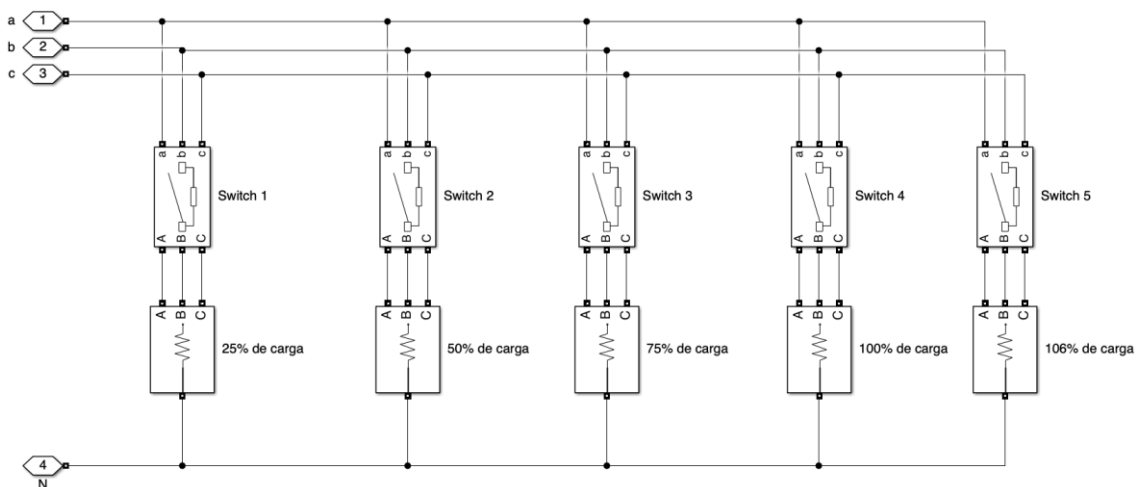


Figura 19 - Desglose del bloque de carga

Tal y como se puede ver en la *Figura 19* las cargas trifásicas son de tipo resistiva. Se hacen de esta forma dado que, en Atlas Copco, no se usan cargas de otro tipo para realizar las pruebas sobre los grupos electrógenos.

Cada carga tiene un valor resistivo correspondiente a la potencia nominal del alternador con un factor asociado del 25% para las cuatro primeras y del 6% para la última (para poder llegar al 106% igual que en la prueba experimental).

Para cada carga se asocia un *switch* que permite controlar el momento en que se conectan las cargas (*Véase Figura 20*).

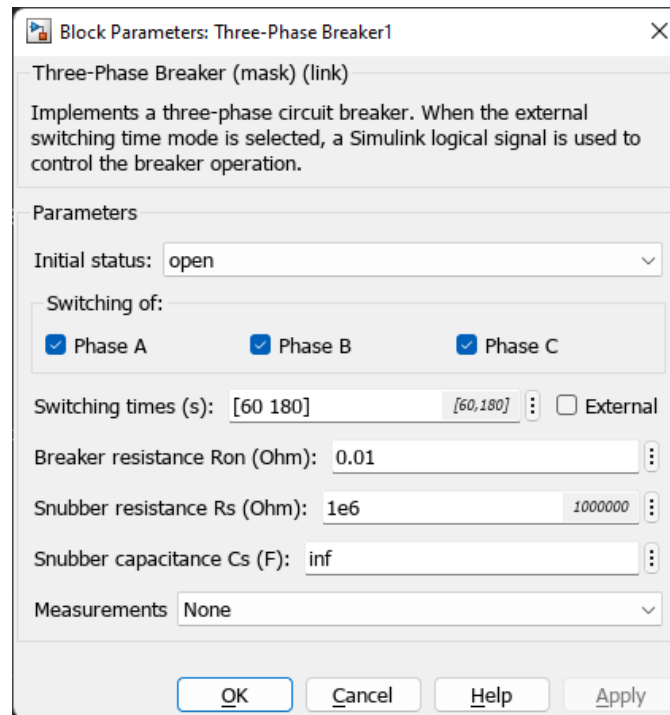


Figura 20 - Ejemplo de configuración del switch

Lo que interesa en esta prueba es comprobar la recuperación de los valores de frecuencia y tensión tras cada conexión de la carga. Como la normativa indica los límites que se deben que cumplir, se ha configurado un golpe de carga cada 30 segundos.

No se utilizan en la simulación los mismos tiempos que para la prueba experimental. La razón es que en la simulación, solo se comprueba si las diferentes regulaciones cumplen con la normativa y con los valores de consigna indicados. En la prueba real, los tiempos son más largo con el fin de comprobar si funciona correctamente la programación de la placa, las bombas y otros parámetros que permiten el buen uso del grupo electrógeno. Estos parámetros no se contemplan en la simulación de ahí que se use un tiempo más restringido. Otra razón es que, en Simulink, el tiempo de simulación sería muy largo al usar los tiempos de la prueba experimental. Por ese otro motivo se ha realizado la prueba con tiempos más cortos para los diferentes golpes de carga.

Pasado el tiempo indicado por los parámetros introducidos en Simulink, se cierra un *switch* para accionar la carga resistiva correspondiente (*Véase Tabla 5*).

Al pasar 180 segundos, todos los *switches* se desconectarán al mismo tiempo para ver como recupera la señal pasando de 100% de carga a 0%.

Tabla 5 - Tiempo de accionamiento de los golpes de carga

	Tiempos [s]	Porcentaje de carga [%]
1	30 s	25%
2	30 s	50%
3	30 s	75%
4	30 s	100%
5	30 s	106%
6	30 s	100%
7	30 s	0%

2.2.7. Resultados obtenidos

Gracias a las diferentes funcionalidades del programa *MatLab* se pueden exportar en una tabla Excel todos los resultados obtenidos en la simulación. Esto da la oportunidad de crear una tabla con los valores promedios de las diferentes magnitudes que se han medido en la prueba. (Véase Tabla 6) (Véase Anexo 2).

Tabla 6 - Valores medios resultante de la simulación

Etapas de la prueba	Tiempos [s]	Porcentaje de carga [%]	Factor de potencia [$\cos \phi$]	Potencia [kW]	Tensión (Fase/neutro) [V]	Frecuencia [Hz]	Consumo [l/h]
1	30 s	25%	1	29,77	229,8	50,0	2,39
2	30 s	50%	1	59,87	229,7	50,0	4,29
3	30 s	75%	1	89,95	229,4	50,0	6,34
4	30 s	100%	1	120,43	229,1	50,0	8,05
5	30 s	106%	1	128,41	229,7	50,0	8,80
6	30 s	100%	1	121,57	230,3	50,0	8,11
7	30 s	0%	1	0,00	230,41	50,0	0,927

Como se puede observar, los datos reflejados en la Tabla 6 son valores tomados en régimen permanente. Para poder analizar el comportamiento del grupo electrógeno se han tomado todos los valores resultantes de la simulación.

2.3. Comparación valores experimentales-modelo *Simulink*

Como se ha explicado anteriormente, el objetivo de realizar una prueba experimental junto con una simulación es poder dar fiabilidad al modelo de *Simulink* para la parte de regulación de velocidad, que es el tema principal de este estudio. Y así poder plantar un nuevo método de regulación a velocidad variable.

Gracias a los valores recopilados en ambas pruebas, la idea es enfrentar cada una de las magnitudes para observar las diferencias y las similitudes (Véase Tabla 7).

Tabla 7 - Comparación de resultados entre prueba experimental y simulación

Carga [%]	Frecuencia [Hz]		Tensión (Fase/neutro) [V]		Potencia [kW]		Consumo [l/h]	
	Simulación	Experimental	Simulación	Experimental	Simulación	Experimental	Simulación	Experimental
25%	50	50,02	229,8	231,11	29,77	31,8	2,39	2,41
50%	50	50,02	229,7	230,77	59,87	62,6	4,29	4,5
75%	50	50,05	229,4	230,88	89,95	94,2	6,34	6,32
100%	50	50,03	229,1	230,59	120,43	125,6	8,05	8,11
106%	50	50,07	229,7	230,65	128,41	132,6	8,80	8,98
100%	50	50,05	230,3	230,07	121,57	126,3	8,11	8,17
0%	50	50,00	230,41	231,06	0	0	0,93	0,97

Tal y como demuestra la *Tabla 7*, se puede observar que los porcentajes promedios de error entre los valores de la simulación y la realidad son muy bajos.

Como en la simulación estudiada se obtienen valores tomados en tiempo real, no es importante el resumen, sino el desglose que proporciona el informe de prueba. Gracias a estos datos, se han podido generar curvas de potencia de carga, de tensión, de frecuencia, y de consumo.

Primero de todo, se va a comentar la curva de potencia (*Véase Figura 21 y Figura 22*). Estos datos corresponden a la cantidad de carga conectada a la salida del grupo electrógeno.

Gracias a esta curva se pueden ubicar más fácilmente los puntos en los cuales se aumenta la carga y compararlos en las siguientes gráficas de tensión, consumo y frecuencia.

Como se ha explicado anteriormente, los tiempos usados para la prueba experimental y la simulación entre un golpe de carga y otro son diferentes. Al no comprobar otros parámetros del funcionamiento del motor que no sea propio a la regulación, los tiempos de la simulación se han acertado.

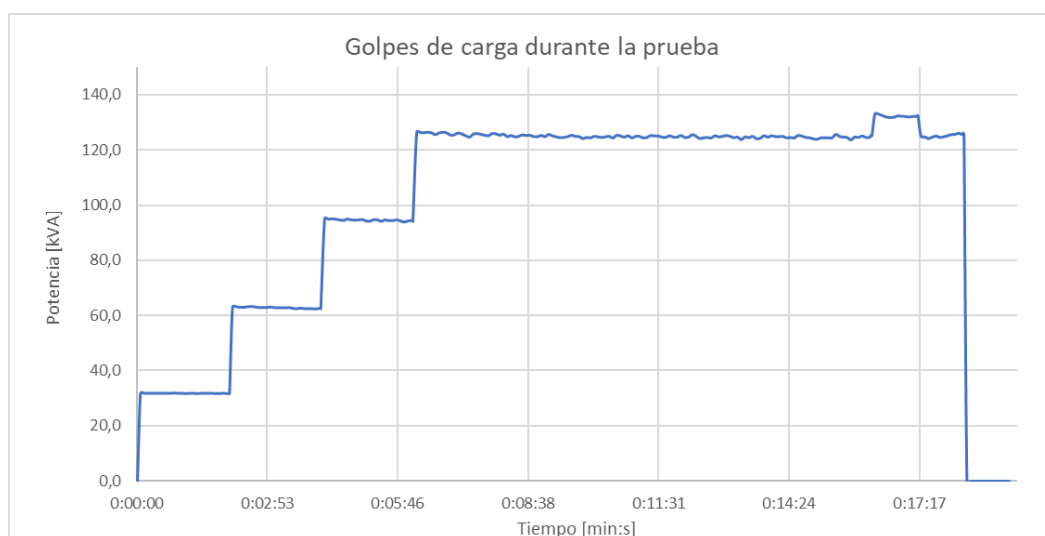


Figura 21 - Golpes de carga en función del tiempo en la prueba experimental

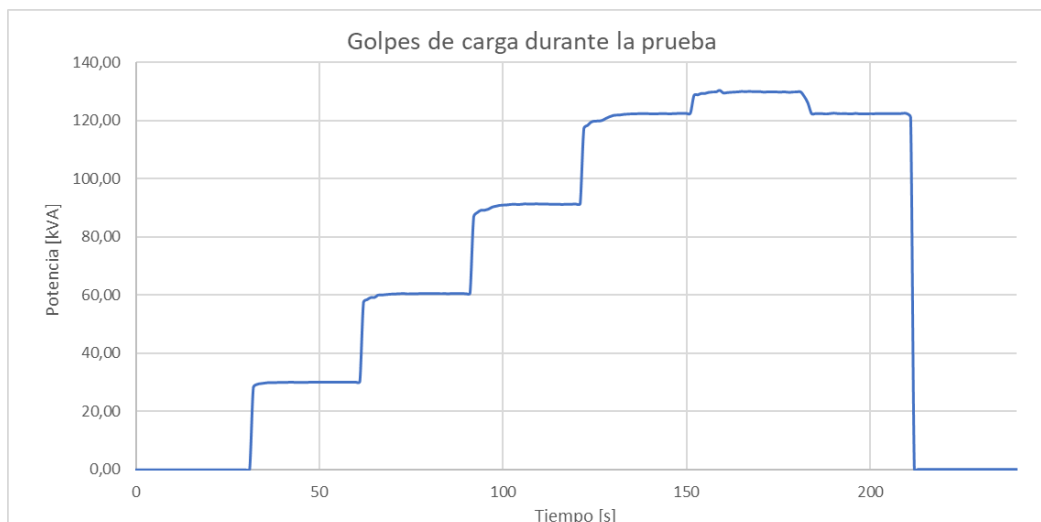


Figura 22 - Golpes de carga en función del tiempo en la simulación

A la vista de las *Figura 21* y *Figura 22*, cabe destacar que, a la vista de las potencias aplicadas durante las pruebas, se puede llegar a la conclusión que se han realizado en igualdad de condiciones de carga eléctrica.

Por otro lado, la curva de tensión (Véase *Figura 23* y *Figura 24*) permite saber si durante la prueba (y frente a los golpes de carga) la regulación se hace de manera correcta y, lo más importante, que cumpla la normativa indicada anteriormente.

Como se puede ver en las citadas figuras, la tensión nunca es inferior al 20% ni superior al 25% del valor de tensión indicado durante el aumento de las cargas. También se observa que el valor de la tensión en régimen permanente no varía más de un 2,5%. Estos datos muestran que las pruebas de tensión han sido un éxito.

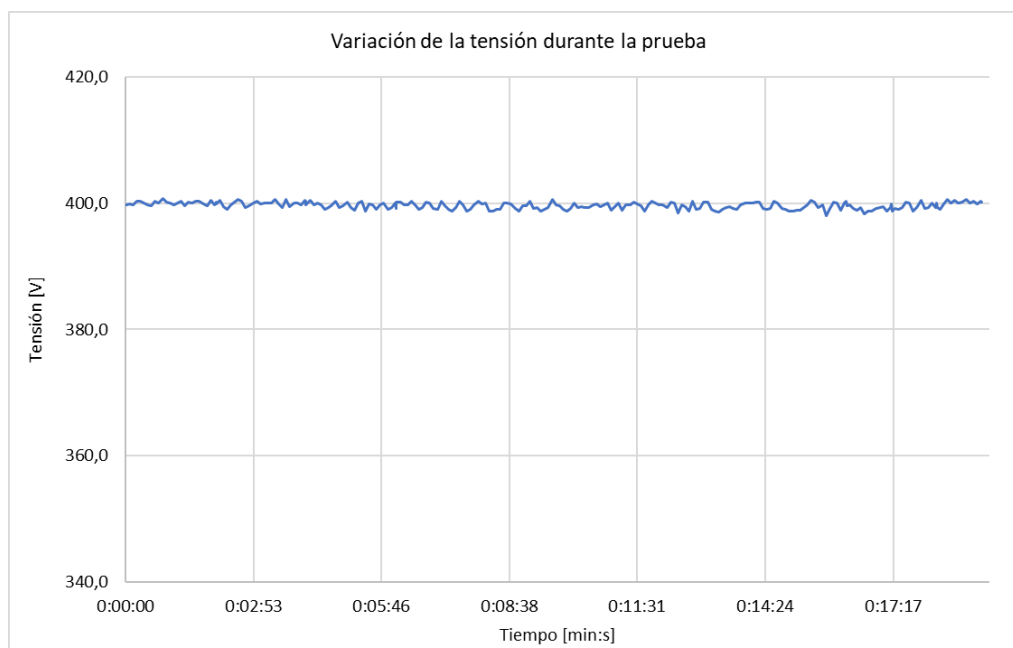


Figura 23 - Variación de la tensión en la prueba experimental



Figura 24 - Variación de la tensión durante la simulación

En la *Figura 24* se puede observar que, a diferencia de la prueba experimental (Véase *Figura 23*), al aplicar una carga, la tensión decae por debajo del valor fijado antes de recuperarse y mantenerse constante de nuevo. Dicha variación de tensión se debe a que la programación del regulador entre la prueba experimental y la simulación no es la misma. No obstante, no significa que la programación del regulador este incorrecto en la simulación puesto que al referirse a la tabla de la norma, los valores obtenidos en la simulación cumplen con la *ISO8528* en todo momento.

De la misma forma que para la tensión, se debe que observar cómo se comporta la frecuencia de giro durante las pruebas para ver si la regulación se hace de manera correcta.

La curva de regulación de la frecuencia (Véase *Figura 25* y *Figura 26*) permite averiguar si durante la prueba y frente a los golpes de carga la regulación se hace de manera correcta y lo más importante, que cumpla la normativa indicada anteriormente.

Como se puede observar en la *Figura 25* y la *Figura 26*, el valor de la frecuencia nunca disminuye más de un 10% y no aumenta más de un 12% del valor de tensión indicado durante el aumento de las cargas. También se observa que el valor de la frecuencia en régimen permanente no varía más de un 1,5%. Estos datos indican que tanto la prueba experimental tanto la simulación ha sido un éxito.

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

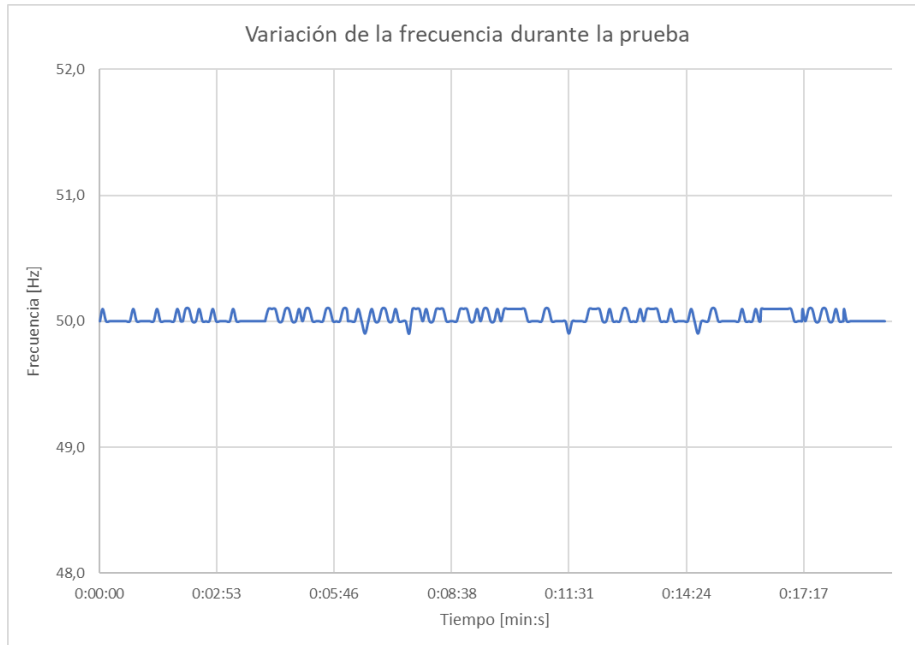


Figura 25 - Variación de la frecuencia de giro durante la prueba experimental

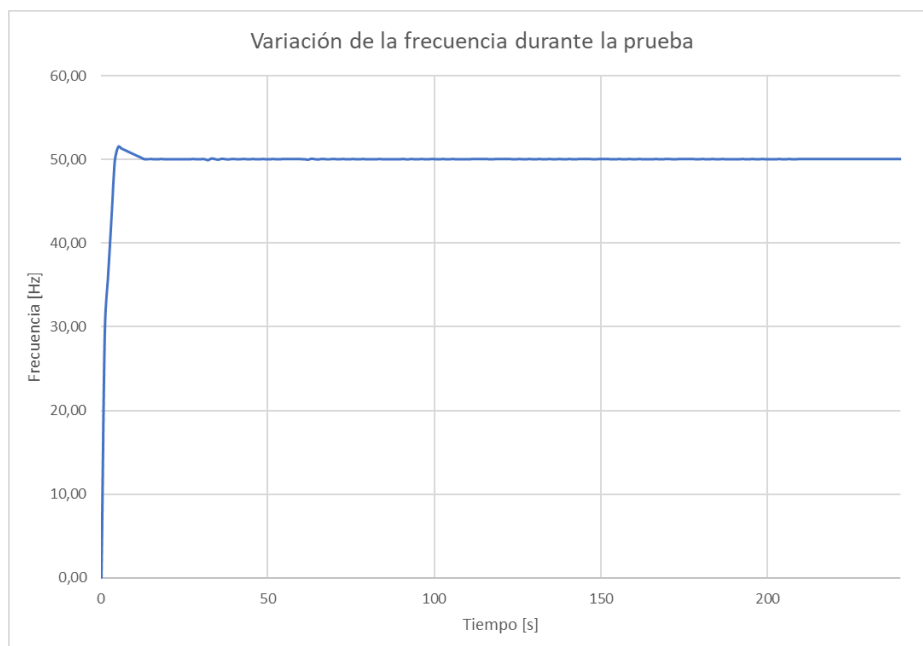


Figura 26 - Variación de la frecuencia de giro durante la simulación

También se puede destacar que los valores de tensión y de frecuencia son muy similares a lo largo de la prueba. Esto es debido a que en la simulación se les ha dado importancia a las diferentes regulaciones (bien sea de frecuencia como de tensión). El hecho de que las regulaciones estén bien diseñadas permitirá asegurar el buen funcionamiento de las mismas en el siguiente punto del estudio.

Gracias a que las curvas de tensión y de frecuencia ha indicado que las prueba se han realizado con éxito, se pueden observar los datos de consumo de Diesel con la certeza de que van a ser correctos (Véase Figura 27).

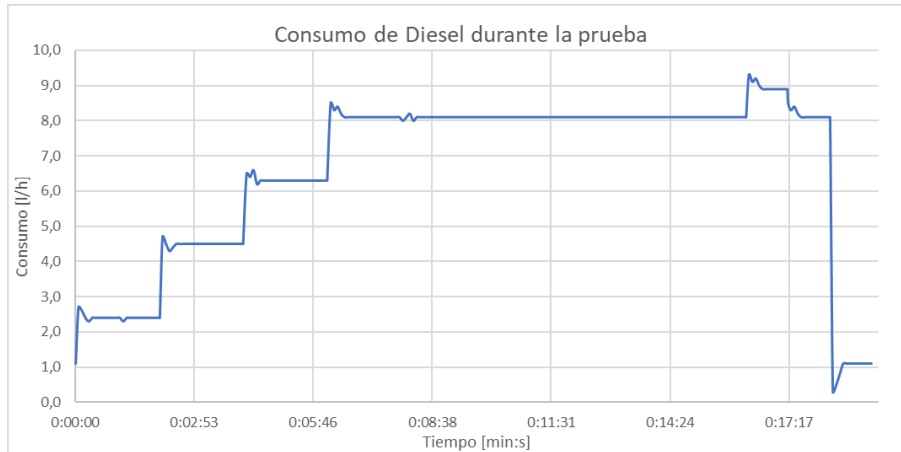


Figura 27 - Consumo de Diesel durante la prueba experimental

A la vista de los resultados de la *Figura 27* se puede determinar que, a medida que se aumenta el valor de la carga eléctrica, aumenta la cantidad de combustible que se consume por hora de funcionamiento.

De la misma manera, se puede observar el consumo obtenido tras la realización de la prueba (Véase *Figura 28*). De la misma manera que para la prueba experimental, la cantidad de Diesel que se consume aumenta a medida que se aumenta la carga eléctrica aplicada.

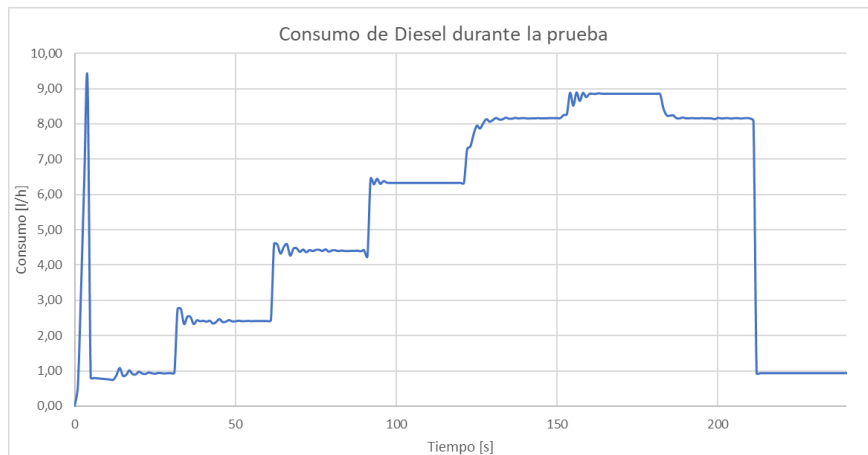


Figura 28 - Consumo de Diesel durante la simulación

Cabe destacar que, a diferencia de la simulación, en la prueba experimental no se ve el consumo al arranque.

Las pruebas experimentales se realizan inicialmente con el motor en vacío, pero ya ha arrancado unos minutos antes. Esto es debido a que antes de conectar las cargas eléctricas al grupo electrógeno se comprueban varios puntos (como posibles fugas de combustible o de otros líquidos, buena comunicación del motor con el *Engine Control Unit* (ECU), buen funcionamiento de los elementos de protección eléctricos, etc.).

Por último, dada la relevancia del tema tratado, hay que comentar los valores obtenidos de consumo. Se observa que los valores son muy parecidos entre la simulación y la realidad (Véase *Tabla 7*), a pesar de tener en ciertos momentos de la simulación (sobre todo, cuando la carga aplicada es elevada) un pequeño porcentaje de error.

En la prueba experimental entran en juego varios aspectos que no se han tratado en la simulación, que podrían hacer que se incremente el consumo. La causa de un mayor consumo puede ser debida, por ejemplo, a la presencia de diferentes bombas (de gasolina, del circuito de urea, del circuito, etc.). También, entran en juego aspectos que no se pueden añadir a la simulación, tales como la humedad y la temperatura del local donde se han realizado las pruebas. Estos parámetros influyen en el comportamiento del motor (Véase *Figura 29*).

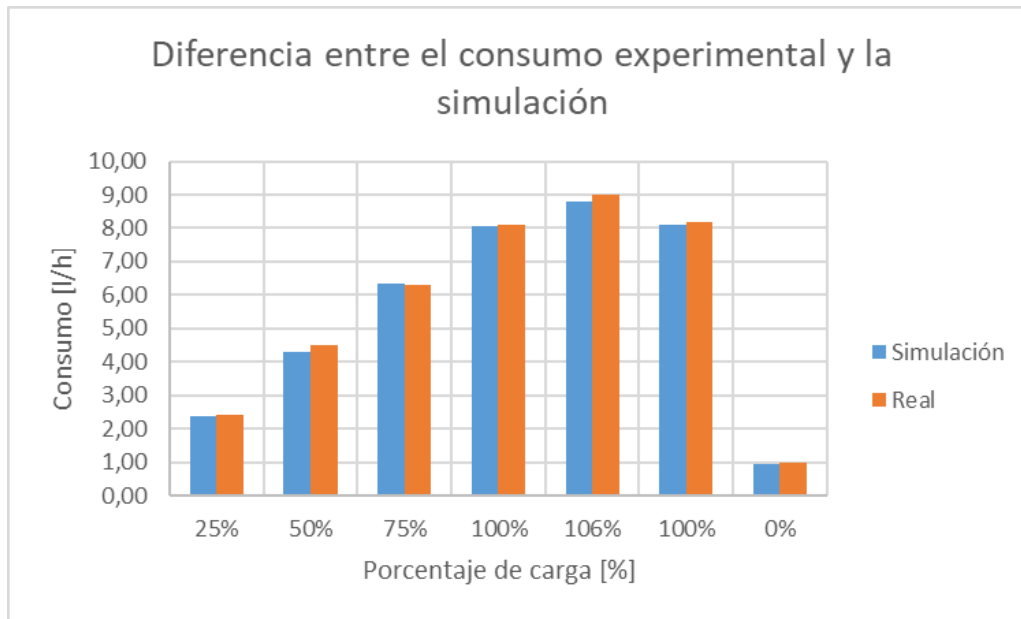


Figura 29 - Diferencia entre el consumo experimental y la simulación

En conclusión, para esta parte, se puede afirmar que la simulación ha funcionado. A partir de este punto, se conservarán los parámetros de los elementos principales (motor, alternador, cargas aplicadas, etc.) para implementar las modificaciones de la mejora del grupo electrógenos con regulación de velocidad.

3. MODELO CON CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

3.1. Introducción de la prueba

Como se ha explicado en los apartados anterior, se va a plantear una mejora sobre el funcionamiento del grupo electrógeno que se estudia aquí. Dicha mejora permitirá aumentar la eficiencia de la máquina cuando las cargas eléctricas sean pequeñas y además, se espera reducir tanto el consumo de combustible como las emisiones contaminantes.

El funcionamiento principal del modelo de *Simulink* que se va a proponer, consiste en adaptar la velocidad de giro del motor térmico en función de la carga eléctrica conectada. Es decir, independizar la velocidad de giro del motor de la frecuencia de salida del generador. Para ello, será necesario usar etapas de electrónica de potencia para poder mantener a la salida del alternador una tensión de 400V y 50 Hz.

La electrónica de potencia que se va a usar en este caso es un convertidor AC/DC/AC con un rectificador y un inversor (Véase Figura 30). [10]

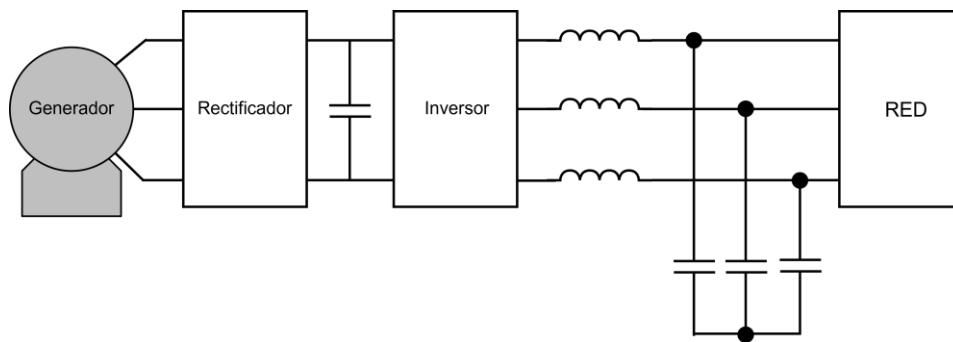


Figura 30 - Ejemplo del esquema usado en el estudio

A diferencia del control convencional, donde la regulación se hacía sobre la frecuencia de giro y la excitación del alternador, en el método propuesto, se va a realizar un control sobre la tensión en el condensador situado entre el inversor y el rectificador (filtro).

En esta mejora la frecuencia de salida del alternador no va a ser constante durante toda la prueba. Como es necesario tener 50Hz constantes a la salida del inversor para alimentar las cargas, se implementa un control SPWM al inversor DC/AC, que permite modular el ancho del pulso para generar la forma de onda de frecuencia y la amplitud deseada (a frecuencia constante e índice de modulación de amplitud constante).

La técnica de PWM ajusta el ancho y el tiempo de encendido de los pulsos. De esta forma, se obtiene a la salida del inversor una señal modulada a frecuencia constante de 50Hz para este caso y una tensión de salida también constante.

Para poder obtener una señal sinusoidal pura a la salida del inversor, se implementa un filtro LC compuesto por unas bobinas en casa fase y de una batería de condensadores conectado en estrella (Véase Figura 30 y Figura 31).

Además, la tensión de salida también ha de ser constante con un valor de 400V. Para poder mantener este valor, será necesario mantener constante la tensión del bus de continua (la tensión del condensador).

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

El control de la tensión del bus DC asegura una tensión de 400V a cualquier régimen de carga del generador; para ello, si el consumo eléctrico aumenta, la tensión del condensador disminuirá, para mantenerla constante, el motor diésel deberá suministrar más potencia aumentando su velocidad. En caso contrario, si el consumo eléctrico disminuye, la tensión del condensador aumentará y, para mantenerla constante, el motor diésel deberá entregar menos potencia disminuyendo su velocidad.

Al implementar la electrónica de potencia de esta manera permite tener unos resultados similares a los realizados en el control convencional pero sin tener en cuenta la velocidad de giro del motor.

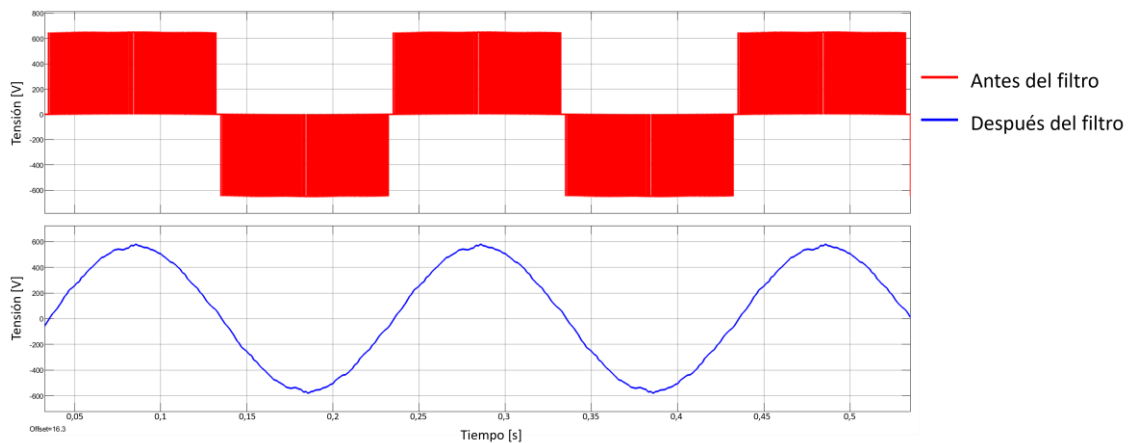


Figura 31 - Señal obtenida a la salida del inversor antes y después del filtro

Para poder obtener un filtrado efectivo como lo muestra la *Figura 31*, es necesario dimensionar el filtro de manera adecuada. Para ello, se ha calculado los valores de los condensadores y de las bobinas (Véase Ecuación 4). [12]

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{P}{\cos \phi} \\
 I_0 &= \frac{S}{V} \text{ con } I_c \leq 0,05 \cdot I_0 \\
 Z_c &= \frac{V}{I_c} = \frac{V}{0,05 \cdot I_0} \\
 C &= \frac{1}{\omega \cdot Z_c} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot Z_c} \\
 Z_L &= \frac{V^2}{P} \text{ con } Z_L \leq 0,05 \cdot Z_{LOAD} \\
 L &= \frac{Z_L}{\omega} = \frac{0,05 \cdot Z_{LOAD}}{2\pi \cdot f}
 \end{aligned}$$

Ecuación 4 – Cálculo de dimensionamiento del filtro [12]

Una vez los valores de las bobinas y de los condensadores calculados, se han introducido en el modelo de *Simulink*. Los valores de las bobinas y de los condensadores son iguales para las tres fases (Véase *Figura 32*).

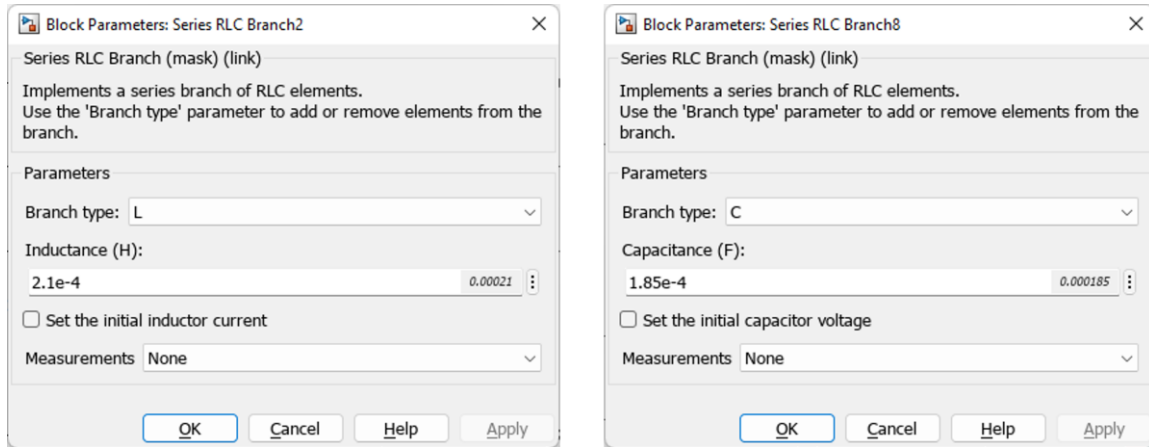


Figura 32 - Valores de las bobinas y de los condensadores del filtro

3.2. Descripción del modelo *Simulink*

Para realizar el modelo del grupo electrógeno con una regulación de velocidad, se ha reutilizado algunos elementos del modelo anterior con velocidad fija. Esto permitirá poder comparar los valores de manera más correcta.

Los elementos que se han vuelto a usar son:

- El motor Diesel (modelo N67 de FPT)
- El alternador (modelo TAL 044J de Leroy-Somer)
- El bloque de carga para la prueba

La reutilización de los componentes del modelo anterior implica que los parámetros de estos en el modelo de mejora serán los mismos que en el modelo anterior.

Una vez dejado claro estos aspectos, se puede presentar la nueva disposición de los elementos que componen este grupo electrógeno mejorado (Véase Figura 33).

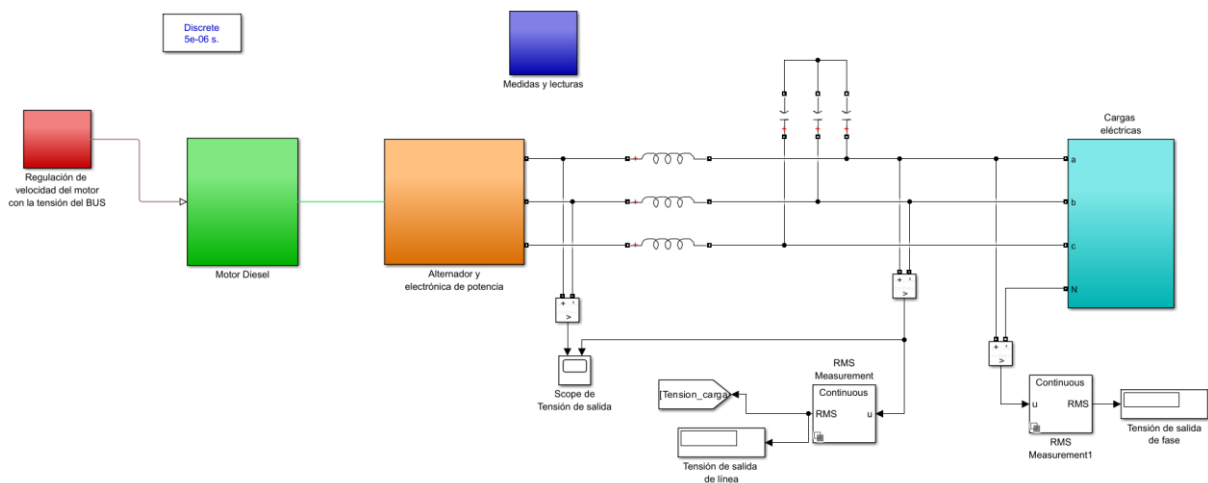


Figura 33 - Elementos de la simulación del grupo electrógeno con control de velocidad

3.3. Elementos usados para la simulación

3.3.1. Motor Diesel

El bloque que corresponde al motor Diesel no ha sufrido muchos cambios comparando con el modelo de velocidad fija. En este modelo, la realimentación que permite ajustar la velocidad del motor (la conexión de *Conn1* al *Thr* del bloque Generic Engine) ya no es la frecuencia de salida. Ahora se hace esta realimentación mediante la tensión del bus DC (Véase *Figura 34*).

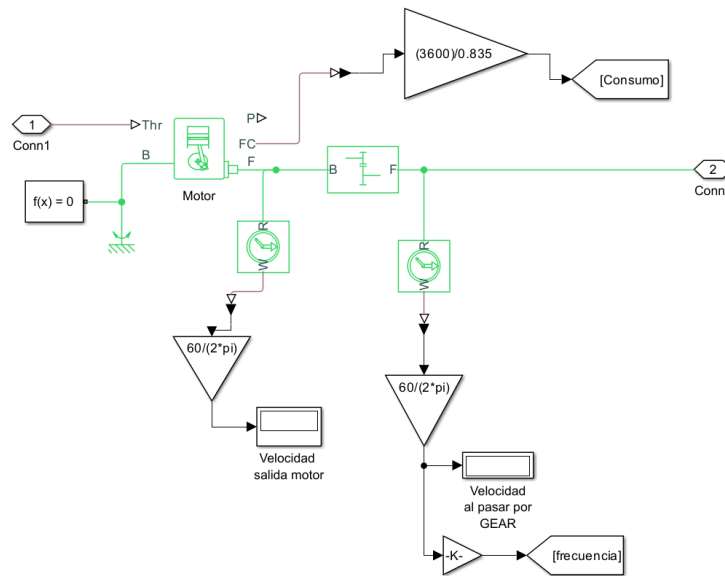


Figura 34 - Bloque motor para la variación de velocidad

Se puede ver también, que en la *Figura 34* en comparación con la *Figura 11* está la aparición de una salida de datos de lectura de frecuencia. Ese cambio es debido a la variación la frecuencia a lo largo del ensayo. Esto afecta, sobre todo, a los bloques de lectura que se usan para obtener valores RMS (Véase *Figura 35*).

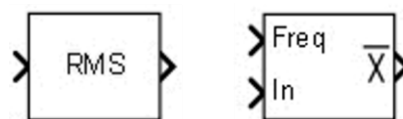


Figura 35 – Anterior bloque de lectura RMS y su nueva versión para el control de velocidad

En la *Figura 35* se observa que la frecuencia a la que gira el motor influye en el valor de salida, correspondiente a la lectura de datos. En caso de mantener los bloques RMS usados anteriormente (Véase *Figura 18*) los valores estarían falseados puesto que el bloque solo funciona con una frecuencia establecida (en la situación del modelo sin control de velocidad, la frecuencia era de 50Hz).

3.3.2. Alternador y convertidor de potencia

De la misma forma que para el motor Diesel, el bloque correspondiente al alternador no ha cambiado. La principal diferencia es que el alternador va a trabajar a velocidad variable y la regulación de la tensión de salida ahora se realizará manteniendo constante la tensión del bus DC (Véase *Figura 36*).

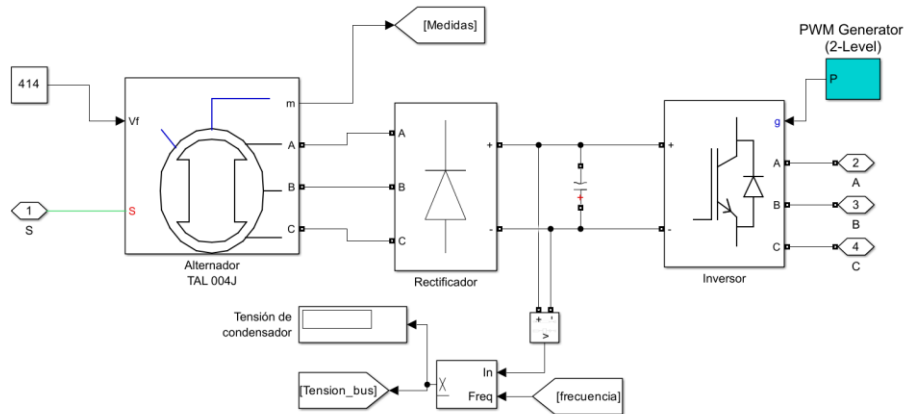


Figura 36 - Bloque alternador para control de velocidad

A diferencia del modelo sin regulación de velocidad, aquí, el objetivo es mantener la tensión de excitación fija dado que la tensión de salida del alternador no tiene por qué ser constante. Para poder mantener la tensión de salida de 400V, se usa el condensador situado entre el puente inversor y el puente rectificador, tal y como se puede apreciar en la *Figura 36*.

En este caso, el condensador se carga y se descarga para poder mantener los 400V a la salida del grupo. Las fases de descargas y de cargas del condensador están gestionadas por la velocidad del motor.

El motor tiene que girar lo suficientemente rápido para poder mantener el condensador a una tensión de consigna de 650V. Esta es la tensión necesaria para que el armónico fundamental de tensión de línea sea de 400V con un índice $m_a = 1$ (índice de modulación de amplitud), V_d la tensión de línea eficaz a la salida del inversor (también llamado tensión del bus de continua) y V_L el valor eficaz del armónico de tensión de línea (Véase Ecuación 5). [10]

$$V_d = \frac{V_L}{0,612 \cdot m_a} = \frac{400}{0,612 \cdot 1} = 653,6V$$

Ecuación 5 – Expresión de V_d en función del valor eficaz del armónico de tensión de línea

3.3.3. Regulación del bus de continua

De la misma manera que para el modelo convencional, se implementa un control para regular la tensión del bus. Para ello, se vuelve a usar un sistema de control proporcional-integral (Véase *Figura 37*).

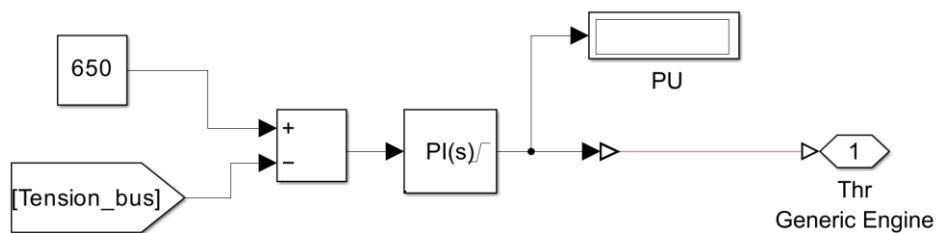


Figura 37 - Bloque de control del bus de tensión

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

El objetivo de este control es de mantener la tensión del condensador constante en todo momento. Para ello, se necesita rapidez y precisión en el control de tal modo que los parámetros del control PI deben ajustarse con estas condiciones.

Al ser magnitudes diferentes, los parámetros deben de ser actualizados para la tensión (Véase Figura 38).

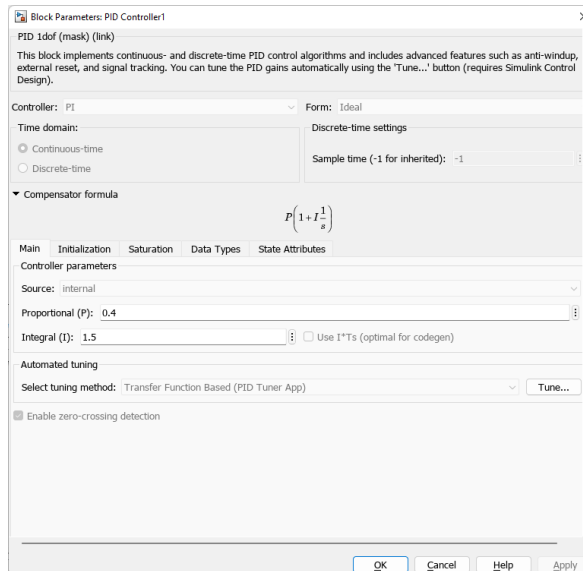


Figura 38 - Parámetros del control PI del bus de continua

El control se realiza de forma que la lectura de la tensión del condensador (Véase Figura 36) se compare con el valor de tensión del armónico fundamental. En función del valor de este, la regulación ajusta la velocidad del motor gracias a la entrada *Thr* del bloque del motor tal y como lo muestra la Figura 34.

3.4. Resultados obtenidos

De la misma manera que para el modelo convencional, se han generado unos resultados medios para poder apreciar más fácilmente todas las magnitudes medidas durante la simulación con control de velocidad (Véase Tabla 8) (Véase Anexo 3).

Tabla 8 - Valores medios de la prueba con control de velocidad

Etapas de la prueba	Tiempos [s]	Porcentaje de carga [%]	Factor de potencia [cos Ø]	Potencia [kW]	Tensión (Fase/neutro) [V]	Frecuencia [Hz]	Consumo [l/h]
1	30 s	25%	1	29,6	231,1	34,2	1,057
2	30 s	50%	1	60,3	230,9	37,1	2,751
3	30 s	75%	1	90,9	230,4	41,6	4,723
4	30 s	100%	1	121,2	228,6	49,8	8,103
5	30 s	106%	1	129,9	230,4	52,7	9,586
6	30 s	100%	1	123,3	230,8	50,1	8,163
7	30 s	0%	1	0,8	231,5	31,0	0,695

Los valores que se observan en la *Tabla 8* son valores en régimen permanente. Para poder observar mejor las variaciones de las diferentes magnitudes medidas en función de los golpes de carga, es necesario ver las diferentes gráficas representando la prueba entera. También se debe tener en cuenta que respete el reglamento en vigor, al igual que el modelo convencional.

Como el propósito de este estudio es observar la diferencia entre el consumo de un grupo electrógeno convencional con uno con control de velocidad, en las gráficas de los resultados se añaden ambos resultados.

En primer lugar, se tiene que comprobar que las condiciones de potencia hayan sido las mismas. Para poder asegurar que la prueba haya sido la misma en ambos casos, los golpes de carga deben de tener valores próximos (*Véase Figura 39*).

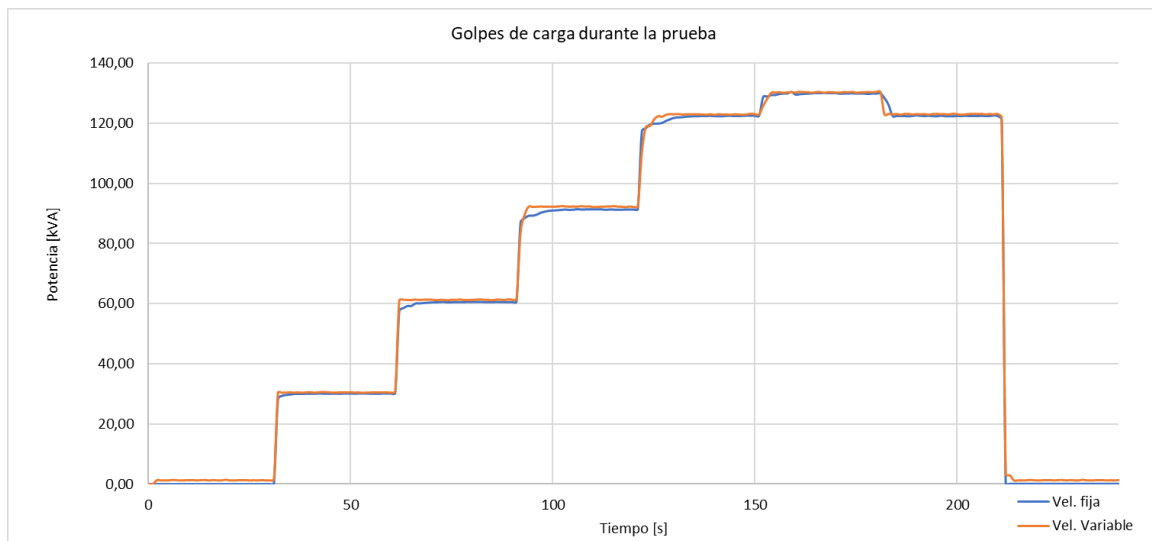


Figura 39 - Diferencia de potencia entre ambas pruebas

Como se puede observar en la *Figura 39* las potencias aplicadas a lo largo de la prueba son las mismas en ambos casos. Eso demuestra que las condiciones de funcionamiento han sido las mismas para ambas simulaciones.

Para las siguientes curvas, cabe de destacar que a pesar de utilizar un control de velocidad, las condiciones de la norma *ISO8528*, expuestas en apartados anteriores, se deben de seguir respetando.

Por otro lado, necesitamos saber si en esta mejora, la tensión de salida sea la misma en los dos casos estudiados. Además, es importante asegurar que la regulación de tensión del control de velocidad, asegurada por el bus de tensión, actúa de la misma forma que regulando la tensión de excitación del alternador (*Véase Figura 40*).

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

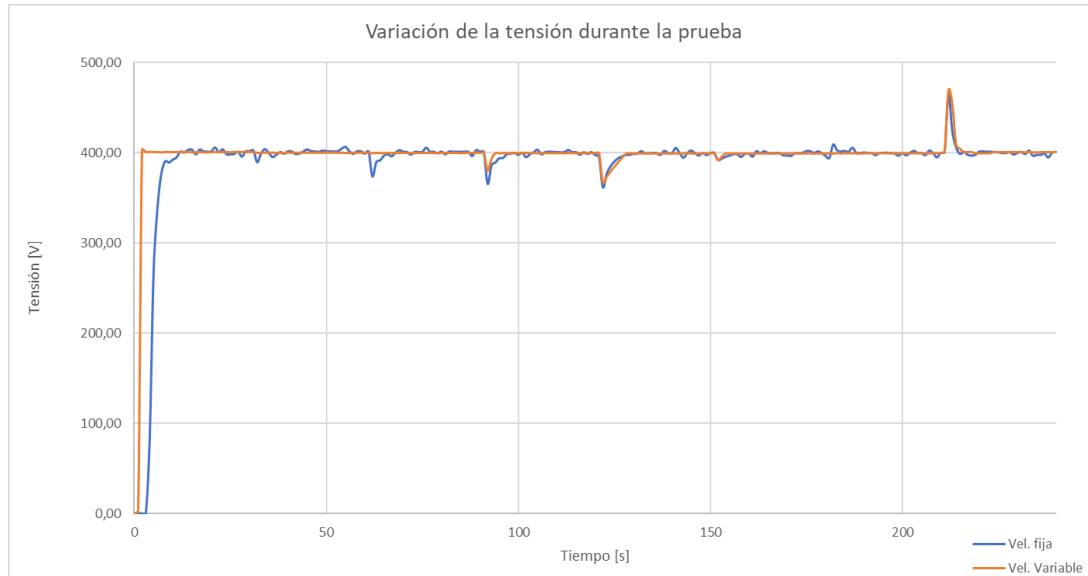


Figura 40 - Comparación de la regulación de tensión en ambos modelos

Como se puede observar en la *Figura 40*, la regulación del modelo con control de velocidad cumple con las mismas expectativas que el modelo convencional. Se puede llegar a ver incluso que en el arranque del grupo electrógeno alcanza el valor de consigna con más rapidez que sin regulación de tensión.

Tal y como se demostró en apartados anteriores, el modelo sin control de velocidad cumplía con la normativa *ISO8528*. Al ser ambas curvas tan similares, se puede afirmar que la mejora aportada también cumple con la norma.

De la misma forma que para la tensión, se debe comprobar la frecuencia de giro del motor. En este caso, no se tiene una velocidad fija al igual que en el modelo convencional. Aquí, la velocidad se ajusta en función de la carga eléctrica aplicada. Para comprobar que la norma se aplica, se observa sobre todo el tiempo de recuperación hasta llegar al régimen permanente (*Véase Figura 41*).

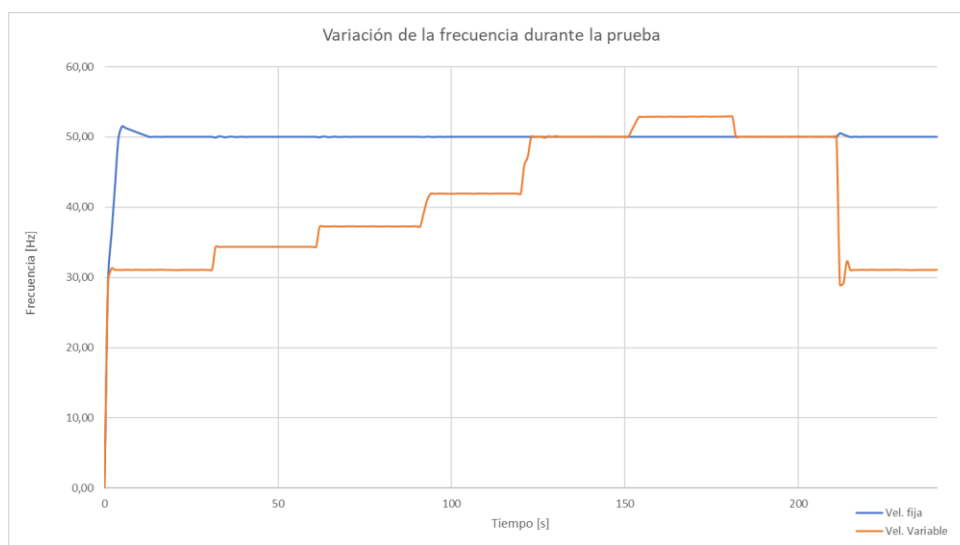


Figura 41 - Diferencia de frecuencia entre ambas pruebas

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tal y como lo demuestra la gráfica anterior, se observa una clara diferencia de frecuencia de giro entre el modelo convencional y el control de velocidad.

Además, tal y como se ha explicado anteriormente, los tiempos de recuperación entre los golpes de carga hasta llegar al régimen permanente son inferiores a los 5 segundos que impone la normativa.

En este diseño mejorado se quería que al llegar al 100% de la carga la velocidad de giro sea de 1500 rpm, aspecto que se cumple puesto que llegado a este punto, la velocidad de giro es la mismo en ambas simulaciones.

Así pues, se puede entonces afirmar que, en las condiciones en las que se interpreta la norma, el modelo de regulación de velocidad cumple con la ISO8528.

Una vez comprobado que todas las condiciones fundamentales de la prueba han sido realizadas en las mismas condiciones que en la prueba anterior y que cumple con la normativa, se ha de comparar la magnitud principal de este estudio, el consumo de combustible (Véase Figura 42).

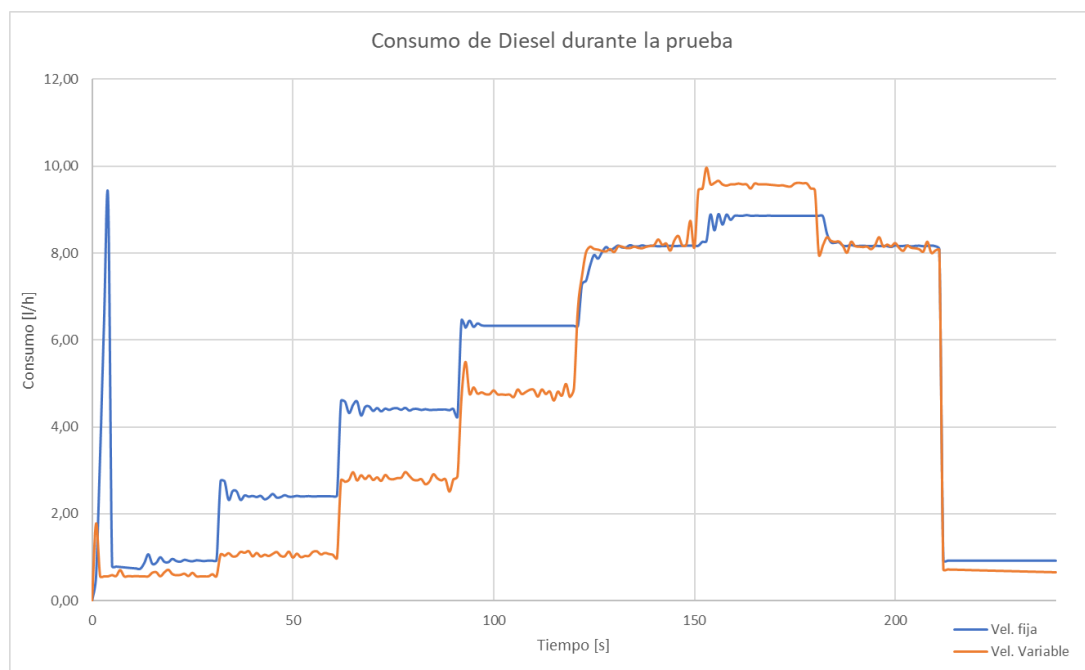


Figura 42 - Comparación del consumo de combustible

En la gráfica de la Figura 42, se puede observar a simple vista que existe una gran diferencia en el consumo de combustible, sobre todo cuando la carga aplicada, es inferior al 100% de la potencia nominal del grupo electrógeno.

En primer lugar, se analiza que en el arranque, el pico de consumo es mucho menor en el modelo con control de velocidad. Esto es debido a que, la aceleración inicial para que la tensión de salida sea la deseada es menor que para el modelo convencional. En este último modelo, el motor tiene que acelerar desde el reposo hasta alcanzar los 50Hz. Con el control de velocidad, el motor acelera hasta que la tensión de bus alcance su valor asignado de 650V. La velocidad que tiene que alcanzar después del arranque es de aproximadamente 31Hz, que es mucho menor a los 50Hz del modelo convencional y justifica el hecho que la aceleración inicial sea menos significativa para el control de velocidad.

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

En segundo lugar, se puede ver que a medida que aumenta el valor de la carga eléctrica aplicada al grupo electrógeno, el consumo del modelo con control de velocidad tiene un valor de consumo se reduce de manera significativa con respecto al modelo convencional (*Véase Figura 43*).

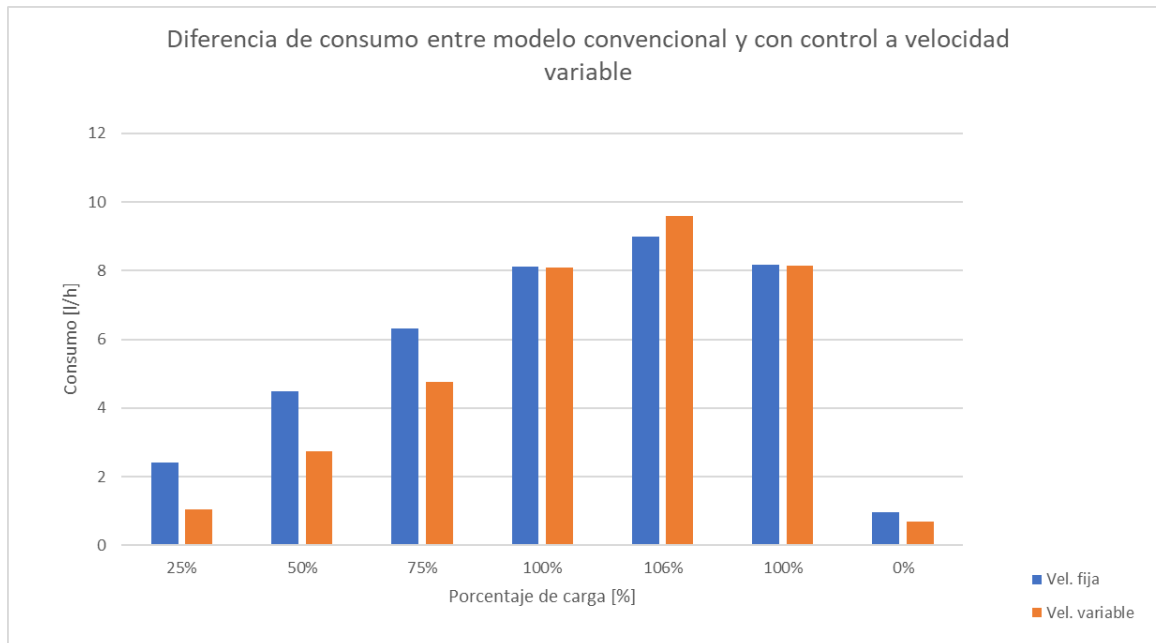


Figura 43 - Diferencia de consumo entre modelo convencional y con control a velocidad variable

Asimismo, cabe de destacar que esta mejora se ha diseñado de manera que cuando el valor de la carga sea del 100% de la potencia nominal, la frecuencia de giro sea la misma que en el modelo convencional, es decir de 50Hz. De ser así, con esas condiciones, el consumo debe de ser igual para ambos modelos.

En la gráfica, se observa que es el caso explicado y además, se puede apreciar que cuando se aplica una ligera sobrecarga (del 106% de la potencia nominal al igual que para las pruebas anteriores), la frecuencia de giro del modelo con control de velocidad aumenta ligeramente y se pone por encima de los 50 Hz. Esto tiene como consecuencia un aumento del consumo en este caso con respecto al modelo convencional. Dicho aumento no resulta ser muy importante dado que para porcentajes de carga menores, el ahorro de combustible compensa con creces este valor que, además, no es común alcanzar en funcionamientos de condiciones reales.

Por último, es importante resaltar el ahorro total que se ha producido a lo largo de la prueba. Para ello, se cogen los consumos medios de ambas pruebas para los diferentes golpes de carga. A continuación, se calcula el error entre ambos valores (*Véase Ecuación 6*).

$$Ahorro_{Diesel} = \frac{Consumo_{sin\ control} - Consumo_{con\ control}}{Consumo_{con\ control}} \times 100$$

Ecuación 6 - Expresión del cálculo del ahorro de combustible con la mejora propuesta

Dicho valor determina el porcentaje de ahorro que es capaz de garantizar la mejora para las diferentes cargas eléctricas aplicadas. Gracias a estos porcentajes de ahorro obtenido, se puede obtener el promedio de ahorro que puede garantizar la mejora estudiada (*Véase Tabla 9*).

Tabla 9 - Porcentaje de ahorro de Diesel gracias a la mejora aportada

Porcentaje de carga [%]	Consumo sin control de velocidad [l/h]	Consumo con control de velocidad [l/h]	Porcentaje de ahorro [%]
25%	2,41	1,06	-56%
50%	4,50	2,75	-38,8%
75%	6,32	4,75	-24,8%
100%	8,11	8,10	0%
106%	8,98	9,59	+6,8%
100%	8,17	8,16	0%
0%	0,97	0,69	-28,9%

Tal y como se puede observar en la *Tabla 9* el grupo electrógeno con variación de velocidad puede llegar a alcanzar un ahorro de combustible del 56% comparando con el modelo convencional.

A la vista de estos resultados, se puede afirmar que la mejora aportada está destinada principalmente para aplicaciones en la que la carga eléctrica aplicada sea menor del 100%. En estos casos, sí que se podrá apreciar claramente el ahorro de combustible, dado que si el grupo funciona con una carga equivalente al 100% de su potencia nominal, las características de funcionamiento son equivalentes entre el modelo convencional y el modelo con control a velocidad variable.

4. CONCLUSIONES

Se ha podido observar que, al poder realizar una prueba experimental sobre un grupo electrógeno real, ha sido posible ajustar un modelo de grupo electrógeno teórico mediante el programa *Simulink*, con un comportamiento muy similar con un control convencional a velocidad fija.

A partir de dicho modelo, se ha estudiado la posibilidad de aplicar a los mismos elementos que componen el grupo electrógeno un control diferente para hacer que varíe la velocidad en función de la carga eléctrica aplicada.

A lo largo del estudio, se ha demostrado que todas las pruebas realizadas han sido hechas con las mismas características para aportar la máxima fiabilidad a la mejora que se propone en este estudio.

Dados los objetivos planteados al inicio de este estudio, se puede afirmar, gracias a los resultados aportados, que el ahorro de combustible y en consecuencia el ahorro energético de un grupo electrógeno con control a velocidad variable es notable.

Cabe destacar que a la vista de las gráficas que comparan los valores de consumo de ambas simulaciones (*Véase Figura 42*), el ahorro de combustible es más consecuente cuando el porcentaje de carga eléctrica esta comprendida entre el 0% y el 75% de la potencia nominal del grupo electrógeno.

A partir de estos datos, se puede afirmar que el uso óptimo de un control a velocidad variable sería para escenario en el cual la potencia suministrada por el generador es muy variable en el tiempo y donde no sería necesario usar una máquina al 100% de sus capacidades durante largos periodos de tiempo.

Además, a la vistas de los resultados, la empresa con la cual se ha colaborado para la realización de esté estudio, Atlas Copco, ha visto muy interesante la mejora aportada al grupo electrógeno.

Hace unos años, Atlas Copco contemplo la idea de implementar un control a velocidad variable en algunos de sus grupos electrógneos. Dicho proyecto no salio a la luz por fallos en la electrónica de potencia. Con las evolución de la electrónica de potencia, que cada vez es más eficiente y por los resultados obtenidos, Atlas Copco contempla adaptar el control de velocidad propuesto en futuros productos.

Para reducir aún más el impacto medioambiental podría sustituirse el motor de combustión por pilas de hidrógeno. Esto último aportaría un gran avance a nivel industrial y podría aplicarse al funcionamiento de un grupo electrógeno.

5. Bibliografía

- [1] Atlas Copco, «Atlas Copco España,» Grupos Electrogenos Europa S.A, 2022. [En línea]. Available: <https://www.atlascopco.com>.
- [2] C. Kai Loon, L. Perry Y. y X. Jicheng, «Control oriented modeling and system identification of a diesel generator set (genset),» de *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, Baltimore, MD, USA, 2010.
- [3] M. Ghazanfar, Z. Song, Z. Yuanqing, H. Shafquat y H. Arif, «A CFD analysis of static mixer to study its impacts on SCR performance in marine diesel engine,» Sukkur, Pakistan, 2019.
- [4] J. Fraile Mora, MAQUINAS ELECTRICAS. QUINTA EDICIÓN, MADRID: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA, 2003.
- [5] J. R. Gracias, Máquinas síncronas, Departamento de ingeniería eléctrica, Universidad de Zaragoza.
- [6] D. O'Kelly y S. Simmons, Introduction to generalized electrical machine theory, London: McGraw-Hill Publishing, 1936.
- [7] M. Á. Rodíques Pozueta, «Máquinas síncronas,» de *Maquinas eléctricas II*, Cantabria, Universidad de Cantabria, p. Tema 3.
- [8] A. P. Technologies, «ASCO Power Technologies,» Schneider Electric, [En línea]. Available: <https://www.ascopower.com/mx/es/resources/articles/testing-diesel-gen-sets-to-iso8528.jsp>.
- [9] FPT, «FPT - Powertrain technologies,» FPT Industrial S.P.A, [En línea]. Available: <https://www.fptindustrial.com/>.
- [10] D. J. L. V. Gazulla, *Accionamientos industriales de máquinas eléctricas*, Zaragoza: Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Zaragoza, 3º grado eléctrico.
- [11] Leroy-Somer, «Leroy-Somer,» Nidec, [En línea]. Available: <https://acim.nidec.com/es-es/motors/leroy-somer/about-us/leroy-somer>.
- [12] J. Ferrero Delgado, «Filtro para la frecuencia de conmutación de un inversor fotovoltaico,» ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES, Grado en Ingeniería Eléctrica, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, Marzo 2018.
- [13] Ministerio de Ciencia y Tecnología, «Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.,» *Boletín Oficial del Estado*, nº 224, pp. 212-214, 2002.
- [14] L. A. Paredes Paredes, *Modelación y simulación de un sistema de generación diesel de velocidad variable*, Punta Arenas - Chile: Universidad de Magallanes, 2009.
- [15] J. Pérez Nepta, «Portal electromecánico,» 3 Mayo 2018. [En línea]. Available: https://portalelectromecanico.com/CURSOS/MaquinasMecanicas/partes_del_motor.html. [Último acceso: 11 Octubre 2022].

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tiempo [min:s]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kVA]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Consumo [l/h]
0%						
0:00:01	399,8	50,0	0,0	0,0	0,0	0,8
25%						
0:00:05	399,9	50,1	31,9	46,1	31,9	2,7
0:00:10	399,7	50,0	31,9	46,1	31,9	2,6
0:00:15	400,3	50,0	31,9	46,1	31,9	2,4
0:00:20	400,4	50,0	31,9	46,1	31,9	2,3
0:00:25	400,1	50,0	31,9	46,1	31,9	2,4
0:00:30	399,7	50,0	31,9	46,1	31,9	2,4
0:00:35	399,6	50,0	31,9	46,0	31,9	2,4
0:00:40	400,3	50,0	31,9	46,1	31,9	2,4
0:00:45	400,0	50,0	31,9	46,1	31,9	2,4
0:00:50	400,7	50,1	32,0	46,1	32,0	2,4
0:00:55	400,2	50,0	31,9	46,1	31,9	2,4
0:01:00	400,1	50,0	31,9	46,0	31,9	2,4
0:01:05	399,7	50,0	31,8	46,0	31,8	2,4
0:01:10	400,0	50,0	31,9	46,0	31,9	2,3
0:01:15	400,3	50,0	31,9	46,0	31,9	2,4
0:01:20	399,6	50,0	31,8	45,9	31,8	2,4
0:01:25	400,2	50,1	31,9	46,0	31,9	2,4
0:01:30	400,1	50,0	31,9	46,0	31,9	2,4
0:01:35	400,3	50,0	31,9	46,0	31,9	2,4
0:01:40	400,3	50,0	31,9	46,0	31,9	2,4
0:01:45	399,9	50,0	31,8	45,9	31,8	2,4
0:01:50	399,6	50,0	31,8	45,9	31,8	2,4
0:01:55	400,5	50,1	31,9	46,0	31,9	2,4
0:02:00	399,7	50,0	31,8	45,9	31,8	2,4
0:02:02	400,2	50,0	31,8	45,9	31,8	2,4
0:02:03	399,9	50,0	31,8	45,9	31,8	2,4
50%						
0:02:07	400,5	50,1	63,2	91,2	63,2	4,7
0:02:12	399,5	50,1	63,3	91,3	63,3	4,5
0:02:17	399,1	50,0	63,1	91,1	63,1	4,3
0:02:22	399,8	50,0	63,1	91,2	63,1	4,4
0:02:27	400,2	50,1	63,3	91,3	63,3	4,5
0:02:32	400,6	50,0	63,4	91,4	63,4	4,5
0:02:37	400,3	50,0	63,2	91,2	63,2	4,5
0:02:42	399,4	50,0	63,0	91,0	63,0	4,5
0:02:47	399,6	50,1	63,0	91,0	63,0	4,5

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tiempo [min:s]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kVA]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Consumo [l/h]
0:02:52	400,0	50,0	63,0	91,0	63,0	4,5
0:02:57	400,4	50,0	63,2	91,1	63,2	4,5
0:03:02	399,9	50,0	63,0	91,0	63,0	4,5
0:03:07	400,0	50,0	62,9	90,8	62,9	4,5
0:03:12	400,0	50,0	62,9	90,8	62,9	4,5
0:03:17	400,0	50,1	62,9	90,8	62,9	4,5
0:03:22	400,6	50,0	63,0	90,8	63,0	4,5
0:03:27	399,9	50,0	62,7	90,6	62,7	4,5
0:03:32	399,4	50,0	62,6	90,5	62,6	4,5
0:03:37	400,6	50,0	62,8	90,6	62,8	4,5
0:03:42	399,5	50,0	62,6	90,4	62,6	4,5
0:03:47	400,1	50,0	62,6	90,4	62,6	4,5
0:03:52	400,0	50,0	62,6	90,4	62,6	4,5
0:03:57	399,8	50,0	62,5	90,2	62,5	4,5
0:04:02	400,5	50,0	62,7	90,4	62,7	4,5
0:04:04	400,3	50,0	62,6	90,3	62,6	4,5
0:04:04	399,8	50,0	62,8	90,4	62,8	4,5
75%						
0:04:09	400,5	50,1	95,3	137,4	95,3	6,5
0:04:14	399,8	50,1	95,0	137,1	95,0	6,4
0:04:19	400,0	50,1	95,2	137,2	95,2	6,6
0:04:24	399,8	50,0	95,0	137,1	95,0	6,2
0:04:29	399,0	50,0	94,8	137,0	94,8	6,3
0:04:34	399,3	50,1	94,6	136,8	94,6	6,3
0:04:39	399,8	50,1	95,1	137,1	95,1	6,3
0:04:44	400,4	50,0	94,8	136,9	94,8	6,3
0:04:49	399,4	50,0	94,7	136,8	94,7	6,3
0:04:54	399,6	50,1	94,8	136,8	94,8	6,3
0:04:59	400,2	50,0	94,9	136,9	94,9	6,3
0:05:04	399,3	50,1	94,4	136,5	94,4	6,3
0:05:09	398,9	50,1	94,3	136,5	94,3	6,3
0:05:14	400,0	50,0	94,9	136,9	94,9	6,3
0:05:19	400,4	50,0	94,8	136,7	94,8	6,3
0:05:24	398,8	50,0	94,3	136,4	94,3	6,3
0:05:29	399,9	50,0	94,8	136,8	94,8	6,3
0:05:34	399,8	50,1	94,5	136,5	94,5	6,3
0:05:39	399,1	50,1	94,5	136,5	94,5	6,3
0:05:44	399,8	50,0	94,8	136,7	94,8	6,3
0:05:49	400,0	50,0	94,5	136,5	94,5	6,3
0:05:54	399,0	50,0	94,0	136,1	94,0	6,3

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tiempo [min:s]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kVA]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Consumo [l/h]
0:05:59	399,3	50,1	94,4	136,4	94,4	6,3
0:06:04	400,1	50,1	94,5	136,5	94,5	6,3
0:06:06	399,2	50,0	94,2	136,2	94,2	6,3
0:06:06	400,2	50,0	94,6	136,5	94,6	6,3
100%						
0:06:11	400,2	50,0	126,7	183,0	126,7	8,5
0:06:16	399,7	50,0	126,4	182,4	126,4	8,3
0:06:21	399,7	50,1	126,4	182,4	126,4	8,4
0:06:26	400,3	50,0	126,6	182,5	126,6	8,2
0:06:31	399,8	49,9	126,3	182,3	126,3	8,1
0:06:36	399,0	50,0	125,7	181,9	125,7	8,1
0:06:41	399,4	50,1	126,4	182,3	126,4	8,1
0:06:46	400,2	50,0	126,6	182,4	126,6	8,1
0:06:51	400,1	50,0	126,3	182,2	126,3	8,1
0:06:56	399,2	50,1	125,5	181,6	125,5	8,1
0:07:01	399,0	50,1	125,7	181,7	125,7	8,1
0:07:06	400,3	50,0	126,3	182,1	126,3	8,1
0:07:11	399,6	50,0	125,9	181,8	125,9	8,1
0:07:16	399,1	50,1	125,3	181,3	125,3	8,1
0:07:21	398,7	50,0	124,8	181,0	124,8	8,1
0:07:26	399,4	50,0	125,9	181,7	125,9	8,1
0:07:31	400,4	50,0	126,1	181,8	126,1	8,1
0:07:36	399,8	49,9	125,8	181,6	125,8	8,1
0:07:41	398,7	50,1	125,5	181,3	125,5	8,1
0:07:46	399,1	50,1	125,3	181,1	125,3	8,1
0:07:51	399,7	50,1	126,1	181,7	126,1	8,1
0:07:56	400,3	50,0	126,0	181,6	126,0	8,0
0:08:01	399,9	50,1	125,5	181,2	125,5	8,1
0:08:06	400,0	50,0	125,9	181,5	125,9	8,2
0:08:11	398,8	50,0	125,0	180,8	125,0	8,0
0:08:16	398,7	50,1	125,4	181,0	125,4	8,1
0:08:21	399,1	50,1	124,9	180,7	124,9	8,1
0:08:26	399,1	50,1	125,1	180,8	125,1	8,1
0:08:31	400,1	50,0	125,6	181,2	125,6	8,1
0:08:36	400,0	50,0	125,4	181,0	125,4	8,1
0:08:41	399,9	50,0	125,5	181,1	125,5	8,1
0:08:46	399,2	50,0	125,0	180,7	125,0	8,1
0:08:51	398,8	50,1	125,0	180,6	125,0	8,1
0:08:56	399,6	50,1	125,4	180,9	125,4	8,1
0:09:01	399,6	50,1	125,0	180,7	125,0	8,1

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tiempo [min:s]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kVA]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Consumo [l/h]
0:09:06	400,4	50,0	125,8	181,2	125,8	8,1
0:09:11	399,2	50,0	125,2	180,8	125,2	8,1
0:09:16	399,3	50,1	124,9	180,5	124,9	8,1
0:09:21	398,7	50,0	124,6	180,3	124,6	8,1
0:09:26	399,0	50,1	124,7	180,3	124,7	8,1
0:09:31	399,4	50,1	125,0	180,5	125,0	8,1
0:09:36	400,6	50,0	125,5	180,9	125,5	8,1
0:09:41	399,8	50,0	125,1	180,6	125,1	8,1
0:09:46	399,6	50,1	125,0	180,5	125,0	8,1
0:09:51	399,0	50,0	124,3	180,1	124,3	8,1
0:09:56	398,8	50,1	124,7	180,3	124,7	8,1
0:10:01	399,2	50,1	124,5	180,2	124,5	8,1
0:10:06	400,0	50,1	125,1	180,6	125,1	8,1
0:10:11	399,4	50,1	124,9	180,4	124,9	8,1
0:10:16	399,5	50,1	124,7	180,2	124,7	8,1
0:10:21	399,3	50,1	124,9	180,4	124,9	8,1
0:10:26	399,3	50,1	125,1	180,6	125,1	8,1
0:10:31	399,8	50,0	124,5	180,1	124,5	8,1
0:10:36	399,9	50,0	125,5	180,8	125,5	8,1
0:10:41	399,5	50,0	125,2	180,6	125,2	8,1
0:10:46	399,7	50,0	124,8	180,4	124,8	8,1
0:10:51	400,0	50,0	125,3	180,6	125,3	8,1
0:10:56	398,9	50,1	124,5	180,1	124,5	8,1
0:11:01	399,5	50,1	125,1	180,5	125,1	8,1
0:11:06	400,1	50,0	125,1	180,5	125,1	8,1
0:11:11	398,9	50,0	124,5	180,1	124,5	8,1
0:11:16	399,7	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1
0:11:21	399,8	50,0	125,4	180,7	125,4	8,1
0:11:26	400,2	50,0	125,2	180,6	125,2	8,1
0:11:31	399,9	49,9	125,2	180,6	125,2	8,1
0:11:36	399,6	50,0	124,8	180,3	124,8	8,1
0:11:41	398,7	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1
0:11:46	399,7	50,0	125,3	180,6	125,3	8,1
0:11:51	400,4	50,0	124,8	180,3	124,8	8,1
0:11:56	400,0	50,0	124,8	180,3	124,8	8,1
0:12:01	399,8	50,1	125,4	180,7	125,4	8,1
0:12:06	399,7	50,1	124,7	180,2	124,7	8,1
0:12:11	399,4	50,1	124,8	180,3	124,8	8,1
0:12:16	400,2	50,1	125,7	180,9	125,7	8,1
0:12:21	400,0	50,0	125,1	180,5	125,1	8,1

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tiempo [min:s]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kVA]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Consumo [l/h]
0:12:26	398,5	50,0	124,3	179,9	124,3	8,1
0:12:31	399,8	50,1	124,6	180,1	124,6	8,1
0:12:36	399,5	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1
0:12:41	398,8	50,0	124,5	180,0	124,5	8,1
0:12:46	400,4	50,0	125,3	180,7	125,3	8,1
0:12:51	399,0	50,1	124,9	180,3	124,9	8,1
0:12:56	399,2	50,1	125,1	180,5	125,1	8,1
0:13:01	400,2	50,0	125,4	180,7	125,4	8,1
0:13:06	400,2	50,0	125,1	180,5	125,1	8,1
0:13:11	399,0	50,0	124,6	180,1	124,6	8,1
0:13:16	398,8	50,1	124,8	180,3	124,8	8,1
0:13:21	398,6	50,0	123,9	179,6	123,9	8,1
0:13:26	399,0	50,1	124,9	180,3	124,9	8,1
0:13:31	399,4	50,1	124,6	180,1	124,6	8,1
0:13:36	399,5	50,1	125,1	180,4	125,1	8,1
0:13:41	399,2	50,1	124,2	179,8	124,2	8,1
0:13:46	399,0	50,0	124,4	179,9	124,4	8,1
0:13:51	399,8	50,0	125,3	180,6	125,3	8,1
0:13:56	400,1	50,0	124,8	180,3	124,8	8,1
0:14:01	400,0	50,1	125,3	180,6	125,3	8,1
0:14:06	400,1	50,0	125,0	180,4	125,0	8,1
0:14:11	400,2	50,0	125,0	180,4	125,0	8,1
0:14:16	400,2	50,0	125,1	180,5	125,1	8,1
0:14:21	399,2	50,0	124,5	180,1	124,5	8,1
0:14:26	399,0	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1
0:14:31	399,2	50,1	124,5	180,0	124,5	8,1
0:14:36	400,4	50,0	125,4	180,7	125,4	8,1
0:14:41	400,1	49,9	125,2	180,5	125,2	8,1
0:14:46	399,2	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1
0:14:51	399,0	50,0	124,6	180,1	124,6	8,1
0:14:56	398,8	50,0	124,2	179,8	124,2	8,1
0:15:01	398,7	50,1	124,0	179,7	124,0	8,1
0:15:06	398,9	50,1	124,5	180,1	124,5	8,1
0:15:11	398,9	50,0	124,5	180,0	124,5	8,1
0:15:16	399,3	50,0	124,6	180,1	124,6	8,1
0:15:21	399,8	50,0	124,5	180,0	124,5	8,1
0:15:26	400,5	50,0	125,8	180,9	125,8	8,1
0:15:31	400,2	50,0	125,1	180,5	125,1	8,1
0:15:36	399,4	50,0	124,8	180,3	124,8	8,1
0:15:41	399,7	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tiempo [min:s]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kVA]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Consumo [l/h]
0:15:46	398,1	50,1	123,8	179,5	123,8	8,1
0:15:51	399,2	50,0	124,8	180,2	124,8	8,1
0:15:56	400,2	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1
0:16:01	400,1	50,0	125,2	180,5	125,2	8,1
0:16:06	398,9	50,1	124,7	180,2	124,7	8,1
0:16:11	400,0	50,0	124,7	180,2	124,7	8,1
0:16:13	400,3	50,0	125,6	180,9	125,6	8,1
0:16:14	399,6	50,1	125,3	180,6	125,3	8,1
106%						
0:16:18	399,7	50,1	133,2	191,9	133,2	9,3
0:16:23	399,2	50,1	133,1	191,8	133,1	9,1
0:16:28	398,9	50,1	132,6	191,5	132,6	9,2
0:16:33	399,4	50,1	132,1	191,1	132,1	9,0
0:16:38	398,3	50,1	131,9	191,0	131,9	8,9
0:16:43	398,7	50,1	132,0	191,0	132,0	8,9
0:16:48	398,8	50,1	132,5	191,4	132,5	8,9
0:16:53	399,2	50,1	132,4	191,3	132,4	8,9
0:16:58	399,4	50,1	132,3	191,3	132,3	8,9
0:17:03	399,5	50,0	132,1	191,1	132,1	8,9
0:17:08	398,8	50,0	132,3	191,3	132,3	8,9
0:17:13	399,3	50,0	132,3	191,2	132,3	8,9
0:17:14	399,9	50,0	132,6	191,5	132,6	8,9
100%						
0:17:15	398,8	50,1	132,6	191,5	132,6	8,5
0:17:19	399,2	50,0	125,2	180,5	125,2	8,3
0:17:24	399,0	50,1	124,9	180,3	124,9	8,4
0:17:29	399,3	50,1	124,3	179,9	124,3	8,2
0:17:34	400,2	50,0	124,8	180,2	124,8	8,1
0:17:39	400,0	50,0	125,2	180,5	125,2	8,1
0:17:44	398,7	50,1	124,7	180,2	124,7	8,1
0:17:49	399,4	50,1	124,9	180,3	124,9	8,1
0:17:54	400,5	50,0	125,3	180,6	125,3	8,1
0:17:59	399,2	50,0	125,7	181,6	125,7	8,1
0:18:04	399,3	50,1	125,8	181,7	125,8	8,1
0:18:09	400,1	50,0	126,2	182,0	126,2	8,1
0:18:14	399,4	50,0	125,7	181,6	125,7	8,1
0:18:15	400,1	50,0	126,3	182,0	126,3	8,1
0:18:16	399,3	50,1	125,7	181,5	125,7	8,1

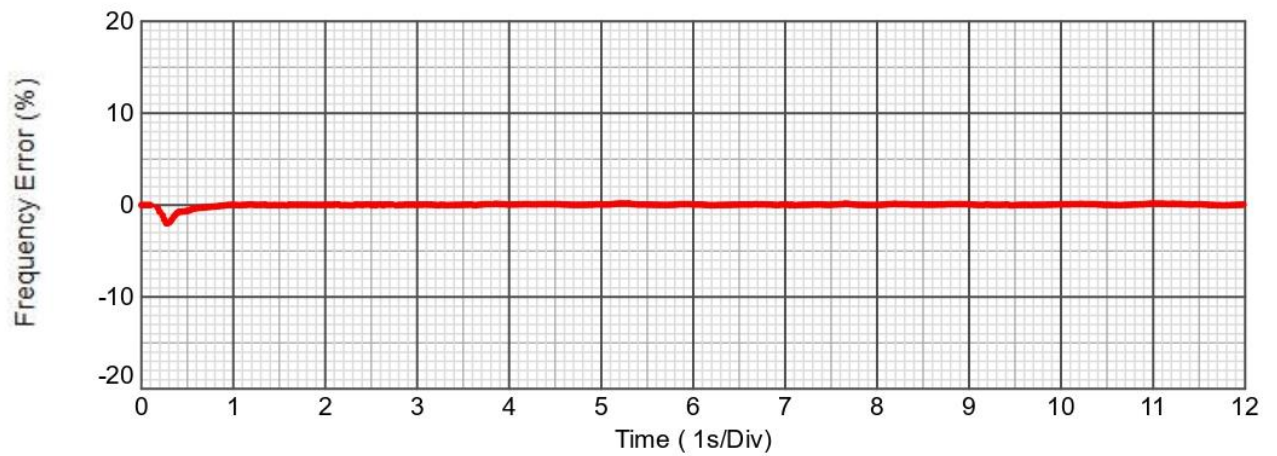
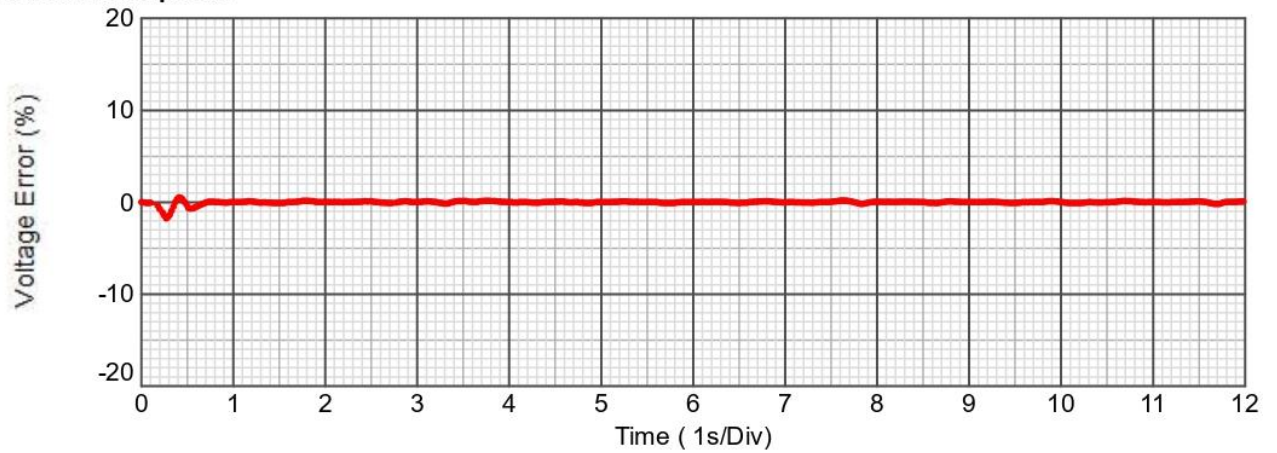
MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Tiempo [min:s]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kVA]	Corriente [A]	Potencia activa [kW]	Consumo [l/h]
0%						
0:18:20	399,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,3
0:18:25	399,9	50,0	0,0	0,0	0,0	0,5
0:18:30	400,6	50,0	0,0	0,0	0,0	0,8
0:18:35	400,1	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:18:40	400,5	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:18:45	400,0	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:18:50	400,2	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:18:55	400,6	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:19:00	400,0	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:19:05	400,3	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:19:10	399,9	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:19:15	400,3	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1
0:19:16	400,2	50,0	0,0	0,0	0,0	1,1

Load Rejected at 00:19:16

0,0% 1,00cosØ to 25,0% 1,00cosØ

Transient Response



	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	0,5%	PASS	0,1%	PASS
Maximum -ve Deviation	-1,7%	PASS	-2,0%	PASS
Recovery Time	0,0s	PASS	0,2s	PASS

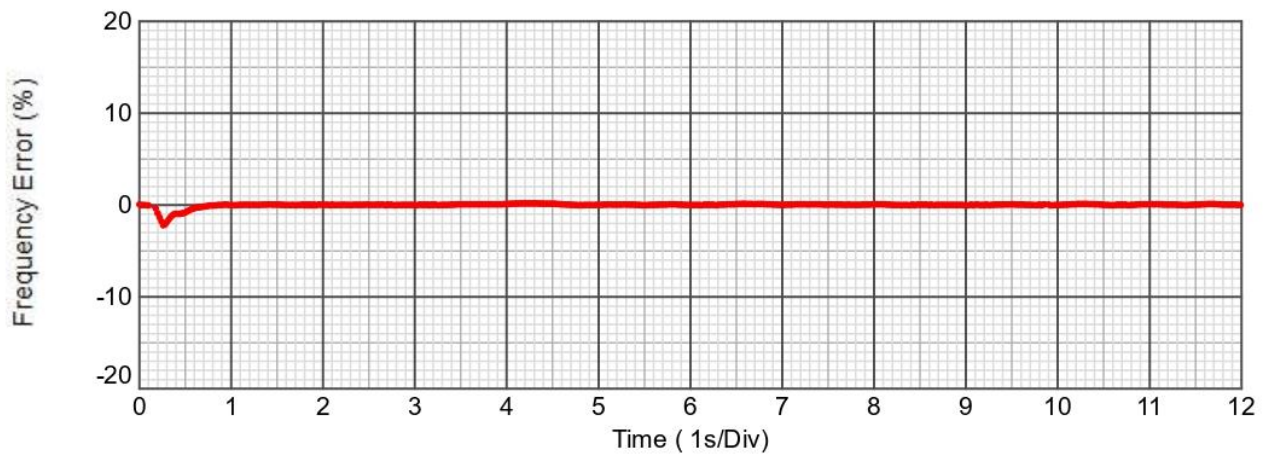
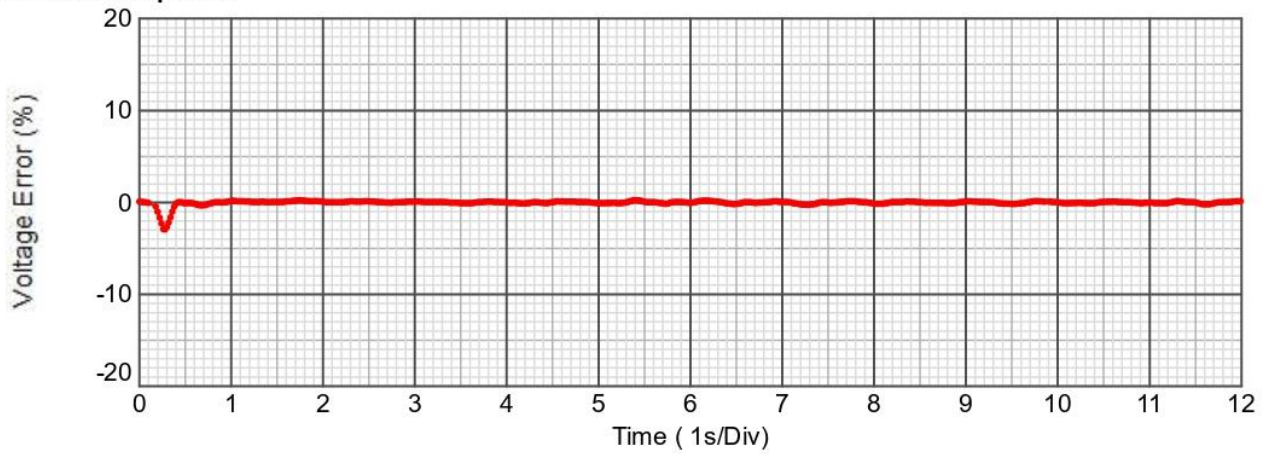
Steady State Readings

	Voltage		Frequency	
Steady State Value	400,2V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,1%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,2%	PASS	-0,1%	PASS

Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:02:02	31,8kVA	L1: 400,2V	231,1V	46,0A
	31,8kW	L2: 400,3V	231,2V	45,7A
	1,00cosØ	L3: 399,8V	231,0V	46,0A

25,0% 1,00cosØ to 50,0% 1,00cosØ

Transient Response



	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	0,3%	PASS	0,2%	PASS
Maximum -ve Deviation	-2,9%	PASS	-2,2%	PASS
Recovery Time	0,3s	PASS	0,3s	PASS

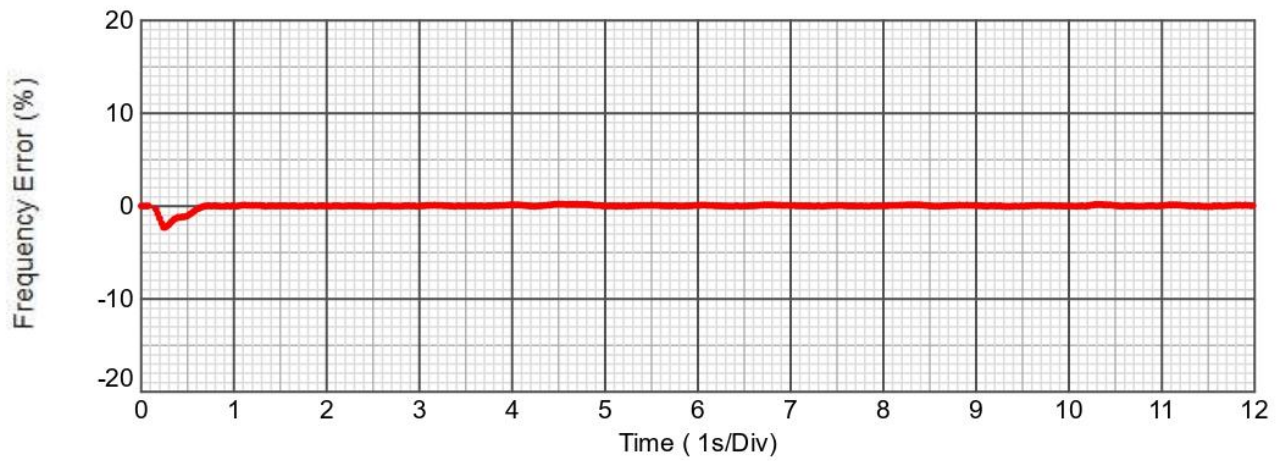
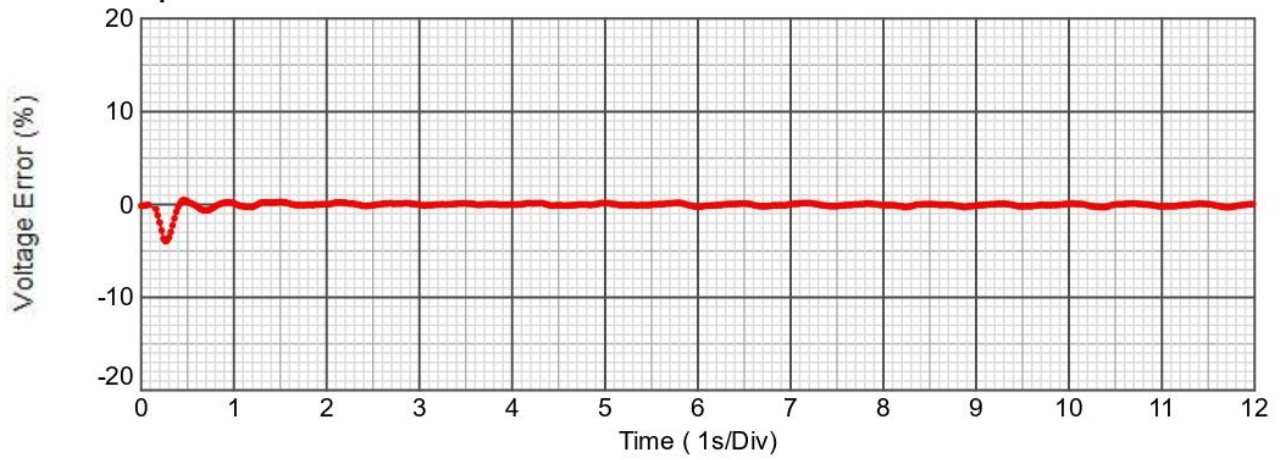
Steady State Readings

	Voltage		Frequency	
Steady State Value	400,3V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,2%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,2%	PASS	-0,1%	PASS

Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:02:02	62,6kVA	L1: 400,3V	231,0V	90,5A
	62,6kW	L2: 400,3V	231,2V	90,3A
	1,00cosØ	L3: 400,0V	231,1V	90,2A

50,0% 1,00cosØ to 75,0% 1,00cosØ

Transient Response



	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	0,5%	PASS	0,3%	PASS
Maximum -ve Deviation	-4,0%	PASS	-2,3%	PASS
Recovery Time	0,3s	PASS	0,3s	PASS

Steady State Readings

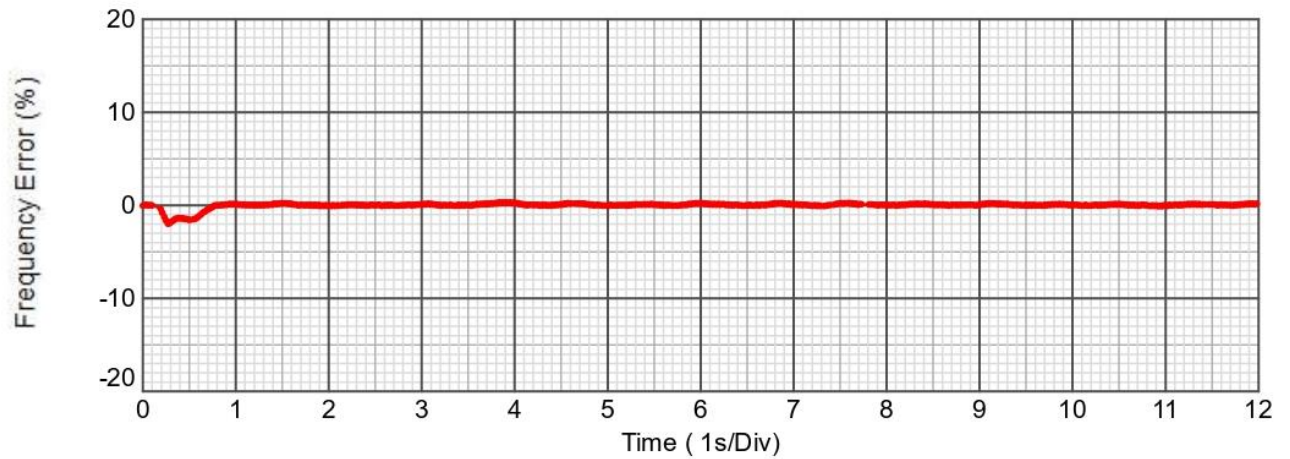
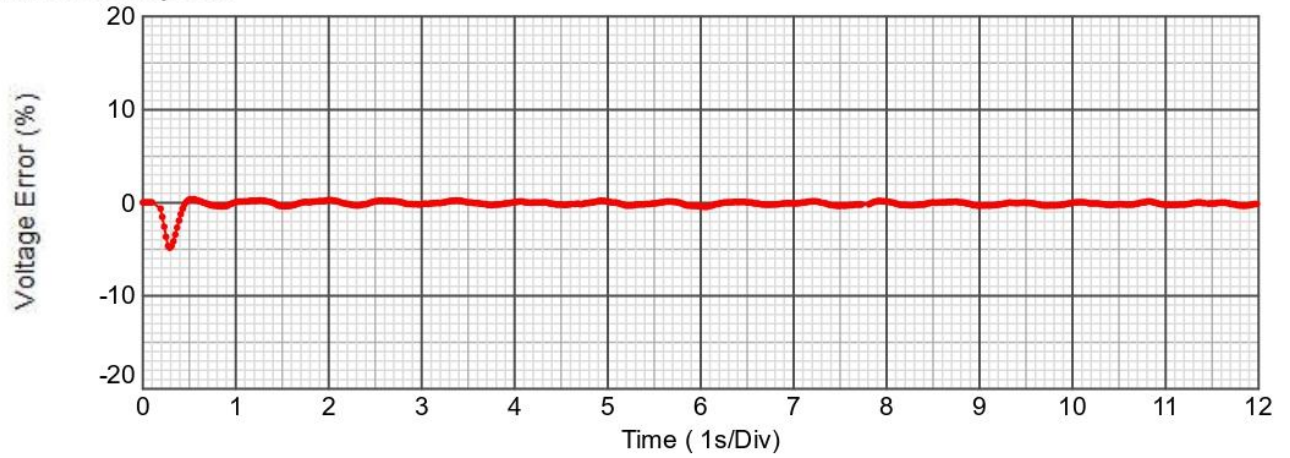
	Voltage		Frequency	
Steady State Value	399,2V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,2%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,3%	PASS	-0,2%	PASS

Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:02:02	94,2kVA	L1: 399,2V	230,4V	136,4A
	94,2kW	L2: 399,6V	230,6V	136,0A
	1,00cosØ	L3: 398,9V	230,6V	136,3A

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

75,0% 1,00cosØ to 100,0% 1,00cosØ

Transient Response



	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	0,4%	PASS	0,3%	PASS
Maximum -ve Deviation	-4,8%	PASS	-2,0%	PASS
Recovery Time	0,4s	PASS	0,4s	PASS

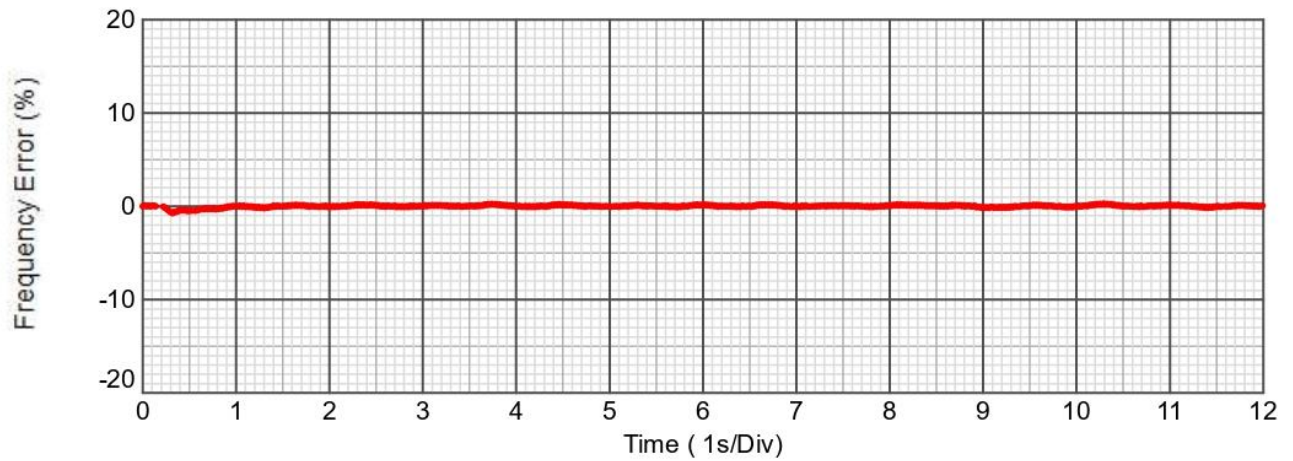
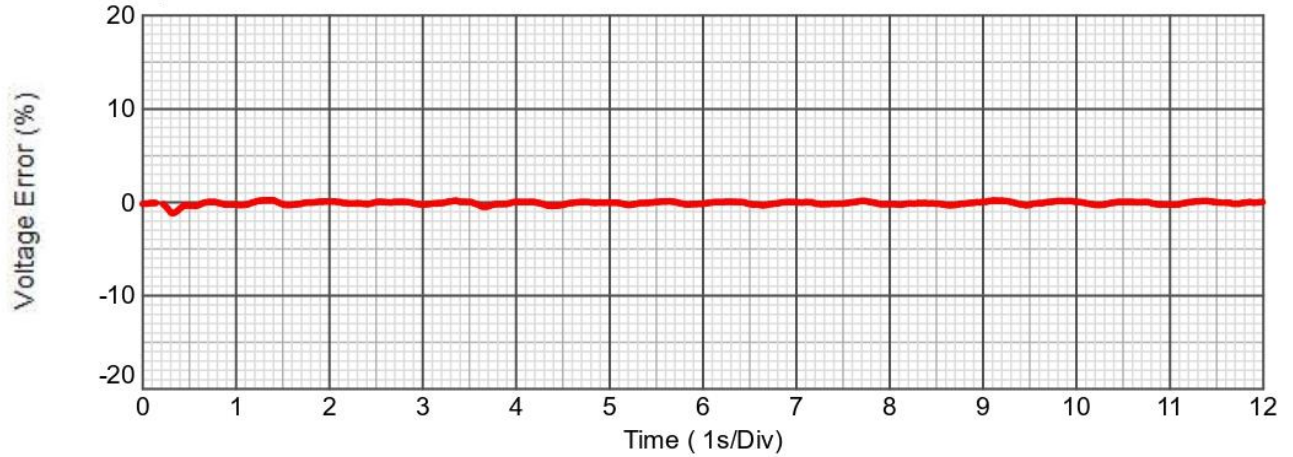
Steady State Readings

	Voltage		Frequency	
Steady State Value	400,3V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,2%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,4%	PASS	-0,2%	PASS

Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:10:08	125,6kVA	L1: 400,3V	231,5V	181,1A
	125,6kW	L2: 399,6V	231,8V	181,2A
	1,00cosØ	L3: 401,5V	231,2V	180,3A

100,0% 1,00cosØ to 106,0% 1,00cosØ

Transient Response



	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,3%	PASS
Maximum -ve Deviation	-1,2%	PASS	-0,7%	PASS
Recovery Time	0,0s	PASS	0,0s	PASS

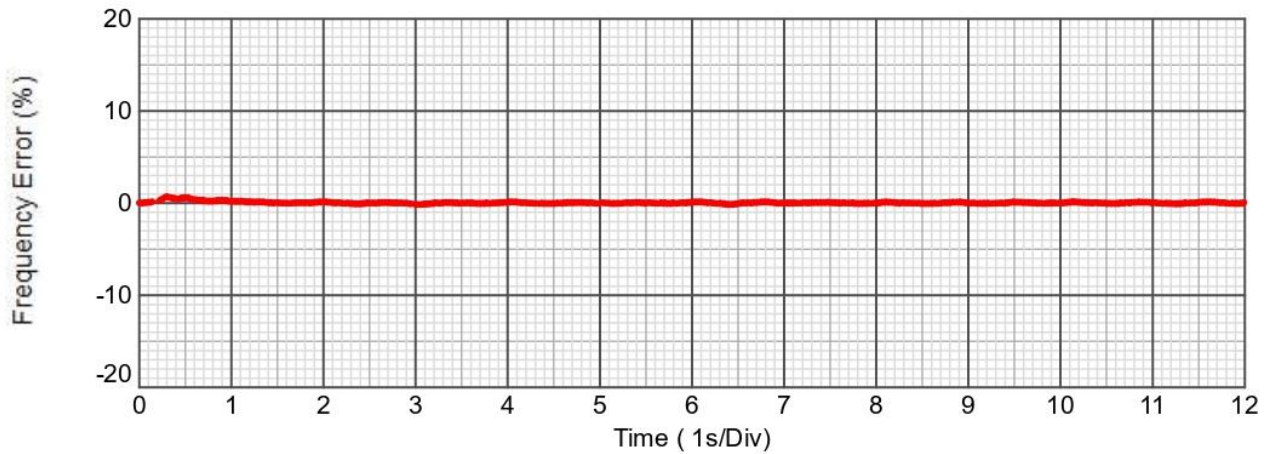
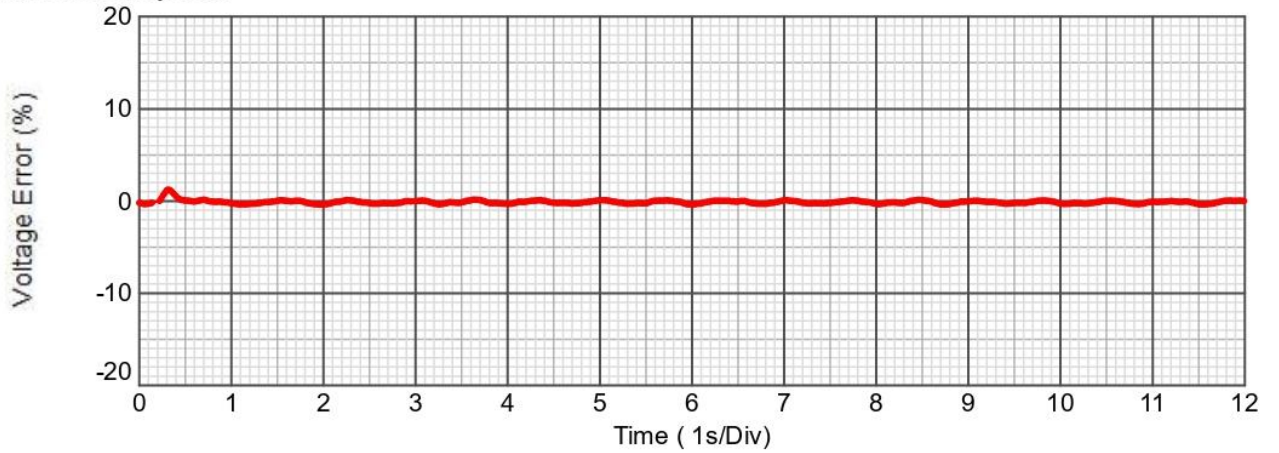
Steady State Readings

	Voltage		Frequency	
Steady State Value	399,9V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,3%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,5%	PASS	-0,2%	PASS

Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:01:01	132,6kVA	L1: 399,9V	230,6V	191,6A
	132,6kW	L2: 400,8V	230,9V	191,4A
	1,00cosØ	L3: 399,2V	231,0V	191,6A

106,0% 1,00cosØ to 100,0% 1,00cosØ

Transient Response



	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	1,2%	PASS	0,7%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,4%	PASS	-0,2%	PASS
Recovery Time	0,0s	PASS	0,0s	PASS

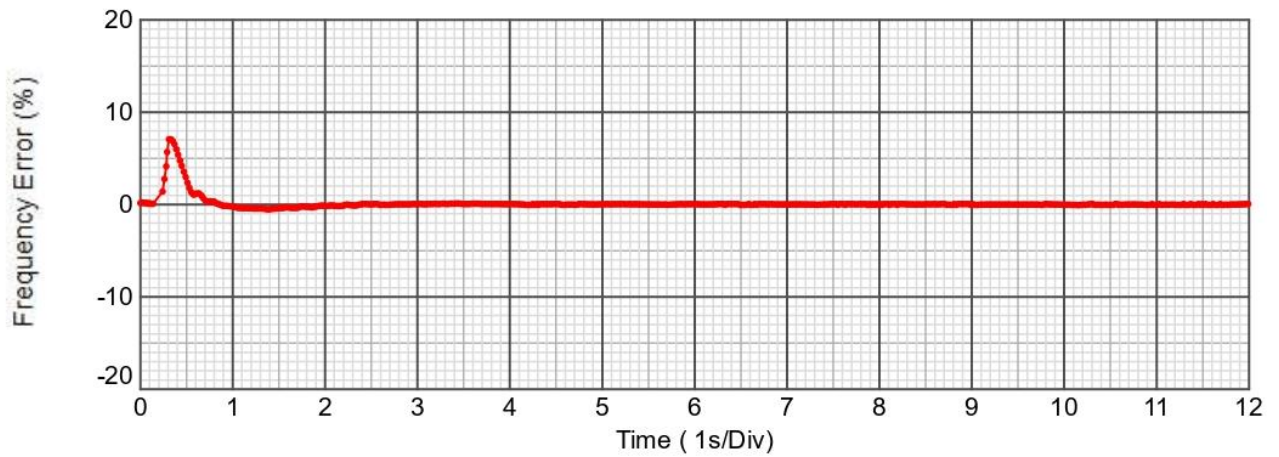
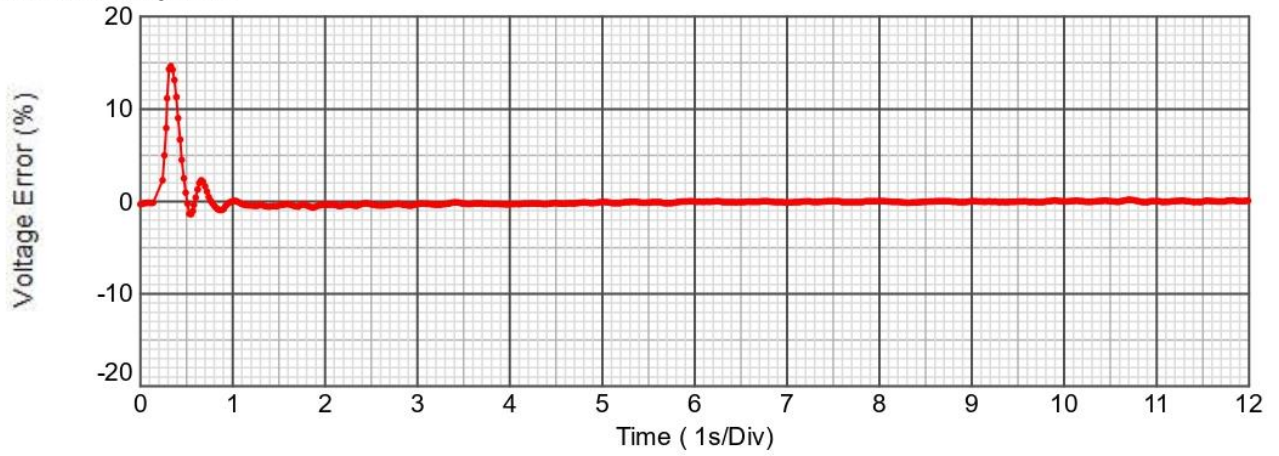
Steady State Readings

	Voltage		Frequency	
Steady State Value	400,1V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,3%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,4%	PASS	-0,2%	PASS

Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:01:01	126,3kVA	L1: 400,1V	231,2V	182,1A
	126,3kW	L2: 400,1V	231,5V	182,2A
	1,00cosØ	L3: 400,4V	231,2V	181,7A

100,0% 1,00cosØ to 0,0% 1,00cosØ

Transient Response



	Voltage		Frequency	
Maximum +ve Deviation	14,7%	PASS	7,1%	PASS
Maximum -ve Deviation	-1,4%	PASS	-0,5%	PASS
Recovery Time	0,5s	PASS	0,4s	PASS

Steady State Readings

	Voltage		Frequency	
Steady State Value	400,2V		50,0Hz	
Maximum +ve Deviation	0,2%	PASS	0,1%	PASS
Maximum -ve Deviation	-0,1%	PASS	0,0%	PASS

Step Duration	Power	Voltage LL	Voltage LN	Current
00:01:01	0,0kVA	L1: 400,2V	231,3V	0,0A
	0,0kW	L2: 399,8V	231,2V	0,0A
	1,00cosØ	L3: 400,2V	231,0V	0,0A

6.2. Anexo 2

Resultados de la simulación del modelo convencional

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
0%				
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	29,40	0,00	0,57
2	0,00	36,15	0,00	3,32
3	0,81	43,02	0,00	6,43
4	82,89	49,79	0,00	9,25
5	265,73	51,46	0,00	0,80
6	338,00	51,27	0,00	0,79
7	376,56	51,08	0,00	0,78
8	390,67	50,90	0,00	0,77
9	389,27	50,71	0,00	0,77
10	392,54	50,52	0,00	0,76
11	395,05	50,34	0,00	0,75
12	401,56	50,15	0,00	0,74
13	400,37	49,98	0,00	0,87
14	403,42	50,00	0,00	1,08
15	403,59	50,01	0,00	0,86
16	398,43	49,99	0,00	0,88
17	403,73	50,00	0,00	1,01
18	401,80	50,01	0,00	0,90
19	401,49	50,00	0,00	0,89
20	401,66	50,00	0,00	0,97
21	406,06	50,00	0,00	0,92
22	400,88	50,00	0,00	0,91
23	403,93	50,00	0,00	0,95
24	398,53	50,00	0,00	0,93
25	398,40	50,00	0,00	0,91
26	398,84	50,00	0,00	0,94
27	401,42	50,00	0,00	0,93
28	395,88	50,00	0,00	0,92
29	401,63	50,00	0,00	0,93
30	401,77	50,00	0,00	0,93
31	402,74	50,00	0,28	0,94
25%				
32	389,59	49,89	28,35	2,76
33	399,41	50,08	29,42	2,76
34	404,17	50,01	29,69	2,32
35	399,96	49,94	29,87	2,53
36	395,46	50,03	30,03	2,52
37	398,02	50,01	30,06	2,32
38	401,03	49,97	30,03	2,43
39	399,11	50,01	30,13	2,40
40	401,82	50,01	30,15	2,42
41	401,63	49,98	30,12	2,39

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
42	398,72	50,00	30,16	2,42
43	399,33	50,01	30,15	2,34
44	401,57	49,99	30,11	2,38
45	403,86	50,00	30,11	2,46
46	402,03	50,00	30,13	2,38
47	401,73	50,00	30,14	2,39
48	401,20	50,00	30,15	2,43
49	402,62	50,00	30,17	2,40
50	401,95	50,00	30,17	2,40
51	401,74	50,00	30,14	2,42
52	401,59	50,00	30,16	2,40
53	401,98	50,00	30,17	2,41
54	404,78	50,00	30,16	2,41
55	406,72	50,00	30,14	2,40
56	401,78	50,00	30,15	2,41
57	398,94	50,00	30,14	2,41
58	401,91	50,00	30,16	2,41
59	401,86	50,00	30,16	2,41
60	399,14	50,00	30,17	2,41
61	401,53	50,00	30,37	2,43
50%				
62	373,91	49,93	57,68	4,60
63	389,81	50,06	58,58	4,59
64	391,80	50,00	59,30	4,32
65	396,91	49,96	59,32	4,51
66	398,55	50,03	60,15	4,59
67	396,27	50,01	60,17	4,27
68	400,26	49,98	60,29	4,46
69	403,10	50,01	60,41	4,47
70	401,39	50,01	60,51	4,37
71	401,01	49,99	60,53	4,44
72	398,14	50,00	60,61	4,36
73	401,26	50,00	60,67	4,43
74	401,05	49,99	60,52	4,39
75	401,21	50,00	60,57	4,43
76	405,81	50,00	60,57	4,43
77	401,37	50,00	60,62	4,40
78	401,29	50,00	60,61	4,44
79	399,59	50,00	60,68	4,38
80	401,52	50,00	60,68	4,42
81	398,36	50,00	60,66	4,42
82	401,63	50,00	60,69	4,39
83	401,31	50,00	60,60	4,41
84	401,39	50,00	60,62	4,39
85	401,25	50,00	60,58	4,40

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
86	401,42	50,00	60,64	4,40
87	401,28	50,00	60,61	4,40
88	396,57	50,00	60,63	4,40
89	403,16	50,00	60,62	4,39
90	401,30	50,00	60,60	4,42
91	400,95	50,00	60,76	4,24
75%				
92	365,63	49,97	87,06	6,45
93	386,33	50,03	88,51	6,29
94	389,32	49,99	89,32	6,45
95	394,06	49,98	89,33	6,30
96	394,41	50,01	89,69	6,38
97	398,59	50,00	90,36	6,34
98	399,35	49,99	90,69	6,33
99	400,00	50,01	90,98	6,33
100	397,79	50,00	91,08	6,33
101	400,31	49,99	91,14	6,33
102	395,34	50,00	91,29	6,33
103	398,46	50,00	91,39	6,33
104	400,73	50,00	91,29	6,33
105	403,57	50,00	91,33	6,33
106	398,39	50,00	91,51	6,33
107	400,97	50,00	91,41	6,33
108	401,34	50,00	91,43	6,33
109	401,18	50,00	91,50	6,33
110	401,07	50,00	91,45	6,33
111	400,74	50,00	91,44	6,33
112	401,11	50,00	91,45	6,33
113	403,27	50,00	91,33	6,33
114	400,94	50,00	91,39	6,33
115	400,86	50,00	91,37	6,33
116	397,90	50,00	91,30	6,33
117	400,82	50,00	91,35	6,33
118	398,77	50,00	91,39	6,33
119	400,92	50,00	91,40	6,33
120	397,69	50,00	91,39	6,33
121	395,42	50,00	91,58	6,33
100%				
122	361,92	50,01	117,43	7,29
123	376,75	50,00	118,46	7,36
124	385,14	49,98	119,65	7,70
125	390,43	50,01	119,96	7,95
126	394,18	50,00	120,00	7,87
127	396,10	49,99	120,22	8,02
128	397,69	50,00	120,90	8,14

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
129	397,89	50,00	121,46	8,07
130	398,88	50,00	121,91	8,12
131	399,14	50,00	122,05	8,17
132	402,04	50,00	122,11	8,13
133	399,53	50,00	122,30	8,13
134	399,67	50,00	122,39	8,18
135	400,12	50,00	122,46	8,15
136	399,77	50,00	122,46	8,15
137	397,74	50,00	122,53	8,18
138	402,37	50,00	122,52	8,16
139	399,95	50,00	122,56	8,17
140	399,86	50,00	122,47	8,17
141	405,46	50,00	122,46	8,16
142	399,72	50,00	122,45	8,16
143	394,63	50,00	122,57	8,16
144	399,96	50,00	122,55	8,17
145	402,62	50,00	122,48	8,16
146	399,82	50,00	122,50	8,16
147	397,14	50,00	122,57	8,17
148	400,02	50,00	122,62	8,17
149	397,60	50,00	122,66	8,17
150	399,71	50,00	122,60	8,17
151	399,96	50,00	122,63	8,17
106%				
152	392,16	50,01	128,82	8,26
153	393,77	50,00	128,99	8,28
154	395,71	49,99	129,48	8,89
155	397,15	50,00	129,49	8,52
156	398,51	50,00	129,84	8,90
157	398,51	50,00	129,99	8,66
158	395,71	50,00	130,01	8,89
159	398,92	50,00	130,54	8,77
160	399,04	50,00	129,64	8,86
161	395,95	50,00	129,76	8,86
162	401,94	50,00	129,88	8,86
163	399,58	50,00	129,96	8,88
164	401,82	50,00	130,02	8,86
165	399,88	50,00	130,17	8,86
166	399,63	50,00	130,09	8,86
167	399,93	50,00	130,20	8,86
168	399,77	50,00	130,11	8,86
169	397,26	50,00	130,10	8,86
170	397,28	50,00	130,12	8,86

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
171	396,68	50,00	129,93	8,86
172	399,62	50,00	129,99	8,86
173	399,63	50,00	130,00	8,86
174	400,08	50,00	130,06	8,86
175	402,10	50,00	129,97	8,86
176	402,09	50,00	129,98	8,86
177	399,94	50,00	129,97	8,86
178	401,88	50,00	129,86	8,86
179	399,57	50,00	129,99	8,86
180	396,72	50,00	129,99	8,86
181	394,45	50,00	130,04	8,86
182	409,40	49,99	128,49	8,85
100%				
183	402,96	50,00	126,23	8,45
184	401,66	50,00	122,58	8,25
185	402,29	50,00	122,51	8,24
186	401,28	50,00	122,52	8,25
187	405,81	50,00	122,52	8,17
188	400,18	50,00	122,41	8,16
189	399,94	50,00	122,56	8,19
190	400,52	50,00	122,70	8,16
191	399,96	50,00	122,57	8,16
192	399,83	50,00	122,50	8,17
193	397,48	50,00	122,57	8,16
194	399,82	50,00	122,48	8,16
195	400,09	50,00	122,45	8,17
196	400,37	50,00	122,61	8,16
197	399,77	50,00	122,45	8,17
198	399,34	50,00	122,41	8,16
199	396,92	50,00	122,42	8,14
200	399,86	50,00	122,52	8,18
201	397,33	50,00	122,48	8,16
202	400,01	50,00	122,58	8,17
203	402,35	50,00	122,51	8,17
204	399,90	50,00	122,52	8,16
205	399,85	50,00	122,52	8,17
206	397,48	50,00	122,57	8,17
207	402,68	50,00	122,50	8,16
208	399,81	50,00	122,51	8,17
209	395,10	50,00	122,66	8,17
210	400,20	50,00	122,51	8,16
211	400,98	50,00	121,20	8,09
0%				
212	464,19	50,00	0,21	0,93
213	424,17	50,00	0,17	0,93
214	406,00	50,00	0,16	0,93
215	399,01	50,00	0,16	0,93

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
216	401,22	50,00	0,16	0,93
217	397,93	50,00	0,16	0,93
218	397,01	50,00	0,16	0,93
219	397,94	50,00	0,16	0,93
220	401,41	50,00	0,16	0,93
221	401,69	50,00	0,16	0,93
222	401,36	50,00	0,16	0,93
223	401,42	50,00	0,16	0,93
224	400,77	50,00	0,16	0,93
225	400,75	50,00	0,16	0,93
226	399,75	50,00	0,16	0,93
227	399,95	50,00	0,16	0,93
228	400,69	50,00	0,16	0,93
229	398,26	50,00	0,16	0,93
230	400,08	50,00	0,16	0,93
231	401,06	50,00	0,16	0,93
232	398,76	50,00	0,16	0,93
233	402,74	50,00	0,16	0,93
234	396,87	50,00	0,16	0,93
235	397,83	50,00	0,16	0,93
236	397,79	50,00	0,16	0,93
237	399,34	50,00	0,16	0,93
238	395,03	50,00	0,16	0,93
239	400,37	50,00	0,16	0,93
240	401,15	50,00	0,16	0,93

6.3. Anexo 3

Resultados de la simulación del modelo con control a velocidad variable

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
0%				
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	4,04	29,35	0,01	1,78
2	403,57	31,26	1,31	0,57
3	400,98	31,05	1,30	0,57
4	401,29	31,07	1,30	0,57
5	400,93	31,06	1,32	0,60
6	400,98	31,07	1,45	0,57
7	400,60	31,07	1,33	0,71
8	401,19	31,06	1,28	0,57
9	401,01	31,07	1,32	0,57
10	400,96	31,07	1,35	0,57
11	400,87	31,05	1,37	0,57
12	400,98	31,06	1,30	0,57
13	401,08	31,07	1,38	0,57
14	400,92	31,06	1,41	0,57
15	400,72	31,07	1,29	0,65
16	400,74	31,08	1,40	0,66
17	401,04	31,08	1,31	0,57
18	400,77	31,04	1,27	0,66
19	400,56	31,07	1,50	0,72
20	400,88	31,04	1,30	0,62
21	400,90	31,04	1,31	0,59
22	400,89	31,04	1,32	0,60
23	400,80	31,06	1,33	0,63
24	400,98	31,06	1,38	0,58
25	400,79	31,06	1,29	0,65
26	401,22	31,05	1,34	0,57
27	401,03	31,05	1,29	0,57
28	401,03	31,08	1,39	0,57
29	401,21	31,05	1,29	0,57
30	400,86	31,07	1,31	0,62
31	401,00	31,09	1,68	0,57
25%				
32	400,01	34,32	30,44	1,07
33	400,23	34,32	30,44	1,04
34	400,17	34,34	30,50	1,10
35	400,26	34,34	30,58	1,03
36	400,29	34,33	30,50	1,04
37	400,09	34,34	30,55	1,13
38	400,09	34,35	30,46	1,11
39	400,03	34,35	30,57	1,15
40	400,35	34,35	30,65	1,03
41	400,17	34,34	30,46	1,11
42	400,35	34,34	30,59	1,03

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
43	400,23	34,35	30,69	1,07
44	400,33	34,35	30,64	1,04
45	400,23	34,34	30,54	1,09
46	400,18	34,33	30,48	1,13
47	400,39	34,34	30,54	1,04
48	400,35	34,33	30,52	1,03
49	400,22	34,34	30,53	1,14
50	400,44	34,34	30,63	1,00
51	400,21	34,34	30,51	1,09
52	400,40	34,35	30,55	1,01
53	400,34	34,34	30,43	1,04
54	400,37	34,34	30,52	1,04
55	400,10	34,34	30,53	1,13
56	400,14	34,34	30,53	1,14
57	400,21	34,34	30,60	1,07
58	400,20	34,34	30,57	1,11
59	400,20	34,34	30,58	1,08
60	400,22	34,34	30,51	1,06
61	400,42	34,38	30,87	0,99
50%				
62	399,67	37,21	61,12	2,78
63	400,13	37,24	61,38	2,74
64	399,93	37,24	61,31	2,79
65	399,84	37,23	61,26	2,97
66	400,07	37,26	61,46	2,78
67	399,94	37,25	61,28	2,89
68	400,02	37,24	61,39	2,81
69	399,92	37,24	61,41	2,89
70	400,11	37,25	61,40	2,79
71	399,90	37,25	61,28	2,85
72	400,16	37,25	61,31	2,77
73	399,82	37,24	61,33	2,90
74	400,10	37,25	61,24	2,82
75	399,92	37,25	61,39	2,80
76	400,05	37,24	61,31	2,83
77	399,95	37,25	61,48	2,84
78	399,90	37,25	61,27	2,97
79	399,87	37,24	61,27	2,88
80	400,07	37,24	61,32	2,79
81	400,01	37,25	61,38	2,78
82	400,00	37,25	61,48	2,81
83	400,19	37,24	61,38	2,69
84	400,03	37,24	61,35	2,75
85	399,90	37,23	61,21	2,92

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
86	399,92	37,25	61,41	2,82
87	400,15	37,24	61,39	2,78
88	399,95	37,24	61,27	2,80
89	400,31	37,26	61,54	2,52
90	400,02	37,25	61,36	2,80
91	399,82	37,25	61,55	2,87
75%				
92	380,59	39,16	83,88	4,68
93	393,40	40,99	89,63	5,50
94	399,70	41,88	92,31	4,77
95	399,72	41,88	92,23	4,92
96	399,82	41,91	92,30	4,77
97	399,80	41,91	92,37	4,80
98	399,90	41,90	92,32	4,76
99	399,90	41,90	92,29	4,76
100	399,76	41,89	92,28	4,85
101	400,00	41,90	92,34	4,76
102	400,00	41,92	92,49	4,76
103	399,90	41,91	92,42	4,75
104	399,93	41,91	92,31	4,75
105	399,70	41,91	92,37	4,69
106	399,75	41,89	92,31	4,87
107	400,00	41,90	92,50	4,76
108	399,76	41,90	92,35	4,81
109	399,92	41,90	92,41	4,86
110	399,78	41,91	92,21	4,86
111	399,89	41,90	92,25	4,70
112	399,70	41,90	92,31	4,87
113	399,87	41,91	92,35	4,76
114	399,79	41,91	92,36	4,82
115	399,94	41,91	92,50	4,61
116	399,77	41,91	92,36	4,82
117	399,87	41,90	92,28	4,73
118	399,75	41,91	92,16	5,00
119	399,90	41,91	92,39	4,70
120	399,80	41,91	92,23	4,89
121	399,53	45,92	92,43	6,75
100%				
122	367,43	47,13	110,37	7,48
123	373,46	49,98	118,85	8,02
124	379,34	49,99	119,11	8,15
125	384,77	49,98	121,31	8,10
126	389,86	50,00	122,43	8,09
127	394,64	49,85	122,24	8,06

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
128	399,01	50,09	122,91	8,05
129	399,63	49,97	123,09	8,10
130	399,48	50,10	123,06	8,03
131	399,65	50,00	123,14	8,16
132	399,45	49,99	122,97	8,16
133	399,49	50,00	123,05	8,13
134	399,52	49,99	123,00	8,12
135	399,42	49,99	123,07	8,16
136	399,32	49,99	123,02	8,13
137	399,52	49,99	122,99	8,12
138	399,44	49,98	122,92	8,15
139	399,64	49,98	123,07	8,17
140	399,38	50,00	122,86	8,19
141	399,44	50,00	123,11	8,32
142	399,31	50,00	122,97	8,20
143	399,55	50,00	123,00	8,23
144	399,55	49,99	122,91	8,07
145	399,54	50,00	123,07	8,30
146	399,38	50,00	122,98	8,40
147	399,37	49,99	122,92	8,18
148	399,57	49,98	123,00	8,20
149	399,57	49,98	123,24	8,75
150	399,52	49,99	123,11	8,14
151	399,43	50,00	123,03	9,46
106%				
152	392,17	50,96	125,86	9,49
153	395,97	51,89	128,20	9,97
154	399,29	52,78	130,18	9,60
155	399,33	52,81	130,29	9,62
156	399,38	52,83	130,39	9,67
157	399,42	52,83	130,19	9,59
158	399,50	52,83	130,35	9,56
159	399,50	52,85	130,36	9,59
160	399,42	52,84	130,27	9,59
161	399,50	52,84	130,55	9,61
162	399,35	52,84	130,38	9,59
163	399,40	52,87	130,42	9,59
164	399,49	52,83	130,22	9,50
165	399,44	52,86	130,40	9,61
166	399,37	52,83	130,51	9,59
167	399,48	52,83	130,21	9,59
168	399,41	52,85	130,41	9,59
169	399,51	52,85	130,36	9,58
170	399,32	52,85	130,29	9,57

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
171	399,48	52,84	130,25	9,56
172	399,37	52,87	130,46	9,57
173	399,37	52,85	130,36	9,55
174	399,35	52,86	130,49	9,54
175	399,33	52,85	130,24	9,61
176	399,52	52,85	130,32	9,63
177	399,29	52,85	130,37	9,61
178	399,45	52,85	130,46	9,61
179	399,51	52,88	130,38	9,49
180	399,41	52,87	130,49	9,46
181	399,46	52,82	130,43	7,97
100%				
182	399,37	49,99	122,99	8,18
183	399,72	50,00	123,19	8,37
184	399,50	50,02	123,04	8,29
185	399,61	49,99	123,16	8,27
186	399,53	49,99	122,90	8,27
187	399,59	49,99	123,18	8,17
188	399,67	50,00	123,15	8,02
189	399,39	49,99	123,00	8,27
190	399,64	50,01	123,13	8,17
191	399,63	49,99	123,05	8,16
192	399,60	49,99	123,11	8,15
193	399,53	49,98	122,90	8,16
194	399,75	49,99	123,17	8,10
195	399,77	49,99	123,16	8,19
196	399,67	50,01	123,10	8,37
197	399,73	50,00	123,07	8,16
198	399,77	49,99	122,97	8,20
199	399,82	50,01	123,27	8,16
200	399,69	50,00	123,08	8,24
201	399,67	49,99	122,92	8,13
202	399,75	50,00	123,02	8,06
203	399,54	50,02	123,16	8,18
204	399,67	50,01	123,18	8,13
205	399,71	49,99	123,15	8,12
206	399,73	50,00	123,19	8,10
207	399,68	49,99	123,00	8,04
208	399,69	50,01	123,16	8,27
209	399,78	49,99	123,05	8,01
210	399,86	50,00	123,13	8,07
211	402,20	49,99	121,85	8,08

MEJORA DE LA EFICIENCIA EN GRUPOS ELECTRÓGENOS MEDIANTE CONTROL A VELOCIDAD VARIABLE

Time [s]	Tension [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Consumo [l/h]
0%				
212	469,17	28,92	3,36	0,73
213	454,34	29,12	3,02	0,73
214	409,07	32,26	1,31	0,72
215	404,65	31,05	1,30	0,72
216	400,98	31,07	1,30	0,72
217	401,08	31,06	1,32	0,72
218	400,92	31,07	1,45	0,71
219	399,71	31,07	1,33	0,71
220	399,73	31,06	1,28	0,71
221	399,68	31,07	1,32	0,71
222	399,69	31,07	1,35	0,70
223	399,78	31,05	1,37	0,70
224	401,19	31,06	1,30	0,70
225	401,01	31,07	1,38	0,70
226	400,96	31,06	1,41	0,69
227	400,87	31,07	1,29	0,69
228	400,98	31,08	1,40	0,69
229	401,08	31,08	1,31	0,69
230	400,92	31,04	1,27	0,68
231	400,72	31,07	1,50	0,68
232	400,74	31,04	1,30	0,68
233	401,04	31,04	1,31	0,68
234	400,77	31,04	1,32	0,68
235	400,56	31,06	1,33	0,67
236	400,88	31,06	1,38	0,67
237	400,90	31,06	1,29	0,67
238	400,89	31,05	1,34	0,67
239	400,80	31,05	1,29	0,66
240	400,98	31,08	1,39	0,66