

Desarrollo de informe de grado: Control Electrónico de Generador Móvil Kohler de 15 KW

Adrián Dittel-Retana, Emmanuel Naranjo-Blanco, Jose Fabio Navarro-Naranjo
adriandittel19@estudiantec.cr naranjo760emm@estudiantec.cr josefabio1127@estudiantec.cr

Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Resumen—En el presente informe se abarcarán los conceptos más relevantes de un trabajo de graduación que relaciona la electrónica de potencia y sus aplicaciones. Se trata del informe del Ingeniero en Electrónica Esteban Ramírez González; cuyo título corresponde a “Control Electrónico de Generador Móvil Kohler de 15 KW”. En general, la tesis abarca la importancia de la energía eléctrica actualmente, la cual es indispensable para realizar adecuadamente muchas actividades, entre las que se encuentran actividades relacionadas con la industria médica y procesos mega-industriales. De este modo, para evitar accidentes es necesario tener suministros de energía alternativos, que funjan como un plan de emergencia ante cualquier falla de la red eléctrica principal. Para esto, entre las tantas opciones en el mercado y la constante renovación tecnológica, Ramírez González (2009) menciona el uso popular de generadores alimentados por motores de combustión interna debido a sus ventajas y configuración que se mencionarán en el desarrollo del presente. Específicamente, desarrolla un método de control electrónico para un generador de la marca Kohler.

Palabras clave—Control de potencia, Energía, Generador, Implementación electrónica.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo del proyecto, se desarrolla la solución ante un problema que involucra conceptos clave de la electrónica de potencia como el uso de tiristores y rectificadores, áreas de control automático y sistemas de energía que involucran el uso de motores y generadores.

Por un lado, Chapman menciona que conceptualmente, “Los generadores síncronos o alternadores son máquinas síncronas que se utilizan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de CA. En un generador síncrono se produce un campo magnético en el rotor ya sea mediante el diseño de éste como un imán permanente o mediante la aplicación de una corriente de CD a su devanado para crear un electroimán. En seguida, el rotor del generador gira mediante un motor primario, y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador.” [1]

Por otro lado, los motores de combustión interna según Afework *et al.*, son la forma más común de motores térmicos, ya que se utilizan en vehículos, barcos, aviones, trenes, entre otros. Además, se denominan así porque el combustible se enciende a partir de reacciones de combustión para que funcione dentro del motor, y la misma mezcla de aire y

combustible se emite como escape. Lo cual se puede hacer usando un pistón, un motor alternativo o una turbina. [2]

Asimismo, los generadores móviles consisten en generadores con la peculiaridad de proveer energía en cualquier lugar y momento. A diferencia de otros generadores, estos equipos no están instalados de forma permanente, se pueden mover fácilmente de un lugar a otro y deben iniciarse manualmente. Además, existe gran variedad de dispositivos que se clasifican por la cantidad de energía que producen en Watts [3]. En la Figura 1 se ejemplifica un generador móvil.



Figura 1. Generador móvil.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se realizó una visita a la empresa llamada Grúas NAVI, ubicada en Heredia, Costa Rica, con el fin de analizar los sistemas de suministro de energía alternativo que estaban trabajando con poca efectividad. Para esto, se realizaron monitoreos del sistema generador de energía, donde dentro de las pruebas, se estudiaron los distintos motores de combustión y los bobinados de los generadores eléctricos. Luego de pruebas, se determinó que habían fallas de funcionamiento en el generador móvil de la marca Kohler, específicamente en el control electrónico. [4]

Como parte de los hallazgos del problema, se determinó que este control electrónico no es del dispositivo original proporcionado por la marca Kohler. Sin embargo, habían dos inconvenientes. Primero, este tipo de control se encuentra obsoleto, y segundo, importar el equipo equivalente de Estados

Unidos es muy costoso para la empresa. De este modo, se propuso encontrar una solución adecuada a un menor costo sin que se limite el óptimo funcionamiento del generador. [4]

Sabiendo esto, Ramírez González planteó una serie de objetivos, entre los cuales se destaca el desarrollo de un modelo matemático del Generador Eléctrico Kohler de 15 kW que relacione la corriente de excitación en función del voltaje de salida; y desarrollar módulos de arranque, potencia, control y monitoreo que sean capaces de trabajar correctamente bajo las especificaciones de carga, tensión y potencia requeridas por el generador comercial y aplicadas en la empresa Grúas NAVI. [4]

Además, como punto de partida se basó en la información disponible de los generadores Kohler, de los cuales se tiene que el generador móvil por estudiar es de 15 kW y su diagrama se muestra en la Figura 2.

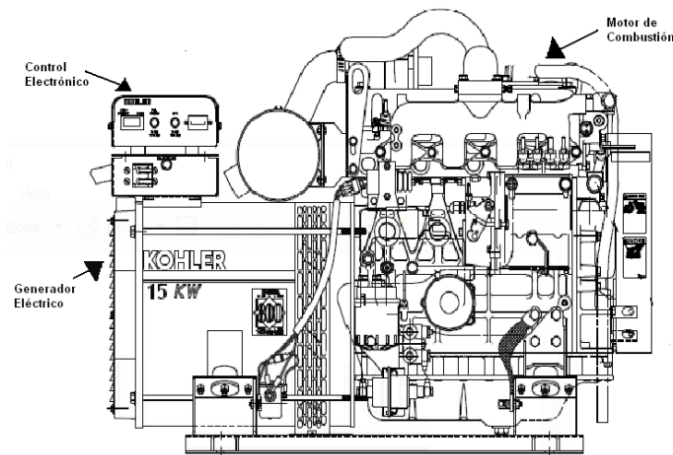


Figura 2. Esquemático del generador Kohler de 15 kW. [4]

Para esto, también se introduce, en la Figura 3, el diagrama modular propuesto para la solución, que incluye módulos de control, de fuente y detector de nivel, rectificador, de excitación y arranque, y de monitoreo principalmente.

En síntesis, para solucionar el problema, se decide aplicar teoría de Control Automático, Electrónica de Potencia y diseño modular para facilitar la visualización de todas las funciones que conforman el control electrónico [4]. A continuación, en siguientes secciones se continuará con el desarrollo de la tesis y se explicarán los conceptos fundamentales en la solución del problema mencionado.

III. DESARROLLO TEÓRICO

Ramírez González destaca la teoría fundamental en la que se basa la construcción de cada módulo que en conjunto, formará la solución. Entre ellos, destaca el uso de la electrónica de potencia al implementar tiristores, detectores de cruce por cero, rectificadores de onda controlados, efecto de la potencia sobre el voltaje del sistema, relé de estado sólido, regulador de voltaje; entre otros. Además, involucra estos conceptos en el desarrollo cada módulo del diseño propuesto, los cuales se detallan a continuación [4].

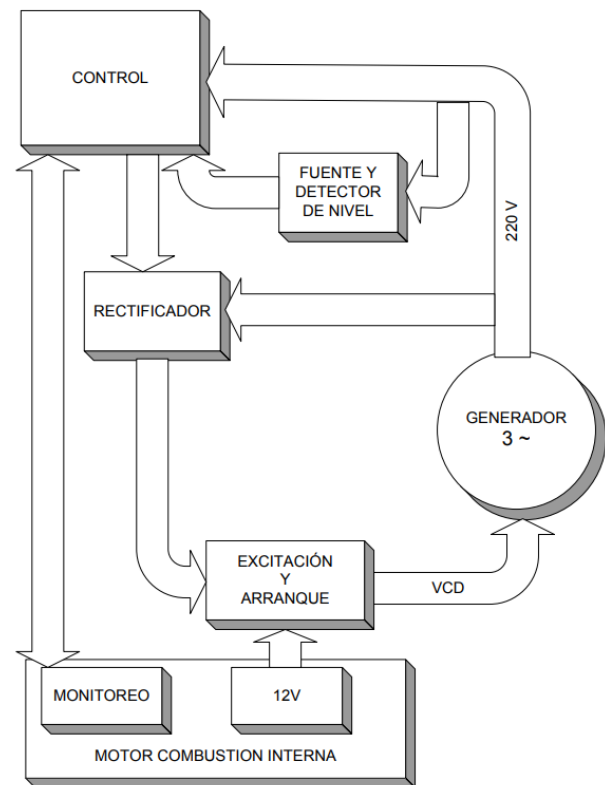


Figura 3. Diseño modular para implementar el la solución de control en el generador.

1. **Módulo de Control:** toma decisiones y realiza el análisis de los datos provenientes de los sensores del motor de combustión y del detector de nivel. También permite modificar la excitación del generador y detener el equipo en caso de mal funcionamiento.
2. **Fuente y Detector de nivel:** suplente todos los voltajes necesarios para el módulo de control. Además, obtiene un valor de voltaje estable que puede ser utilizado por el módulo de control para la toma de decisiones.
3. **Módulo Rectificador:** En este módulo se utilizan tiristores a los cuales se les controla el ángulo de disparo. El control de este ángulo lo realiza el módulo de control; recibe corriente alterna de la salida del generador y la convierte en corriente directa que puede ser utilizada para excitar el generador.
4. **Módulo de Excitación y Arranque:** Se encarga de excitar el rotor del generador con la batería de 12V DC del motor de combustión interna, y cambia la excitación por la proveniente del módulo rectificador.
5. **Módulo de Monitoreo:** Recopila datos de los sensores del motor de combustión interna, además en conjunto con el módulo de control detiene el equipo en caso de un funcionamiento erróneo. Va a indicar mediante luces el estado de los sensores.
6. **Generador móvil o Grupo electrógeno:** Es una máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna.
El generador móvil consta de las siguientes partes:

- a) **Motor Diesel:** El motor Diesel que acciona el Generador Móvil. Este motor se determina acorde a las exigencias de potencia del generador.
- b) **Sistema eléctrico del motor:** El sistema eléctrico del motor es 12V DC. El sistema incluye un motor de arranque eléctrico, una batería, sensores y dispositivos de alarma que disponga el motor como un sensor de presión de aceite, un termo contacto de temperatura y un contacto en el alternador para detectar un fallo de carga en la batería.
- c) **Sistema de refrigeración:** Encargado de enfriar el motor para evitar el sobrecalentamiento del motor y que haya un daño en sus componentes.
- d) **Generador síncrono:** Está compuesto por una armadura ubicada en el estator de la máquina, este contiene un grupo de bobinas por cada fase. El rotor tiene un bobinado que se alimenta con corriente directa, es el encargado de producir el flujo magnético que provoca la inducción en las bobinas del estator. Produce la energía eléctrica de salida.
- e) **Depósito de combustible y bancada:** El motor y el alternador están montados sobre una bancada, esta incluye un depósito de combustible con una capacidad mínima de 8 horas de funcionamiento a plena carga.
- f) **Aislamiento de la vibración:** Diseñados para reducir las vibraciones transmitidas por el Grupo Motor-Alternador. Estos aisladores están colocados entre la base del motor, del alternador, del cuadro de mando y la bancada.
- g) **Silenciador y sistema de escape:** El silenciador de escape va instalado en el generador móvil. El silenciador y el sistema de escape reducen la emisión de ruidos producidos por el motor.
- h) **Sistema de control:** Se puede instalar uno de los diferentes tipos de paneles y sistemas de control para controlar el funcionamiento y salida del grupo y para protegerlo contra posibles fallos en el funcionamiento.
- i) **Interruptor automático de salida:** Para proteger al alternador, se suministra un interruptor automático de salida adecuado para el modelo con control manual. Con control automático se protege el alternador mediante contactores adecuados para el modelo adecuado y régimen de salida.
- j) **Regulación del motor:** Dispositivo mecánico diseñado para mantener una velocidad constante con relación a los requisitos de carga. La velocidad del motor está directamente relacionada con la frecuencia de salida del alternador, por lo que cualquier variación de la velocidad del motor afectará a la frecuencia de la potencia de salida.

IV. IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Con la información obtenida de entrevistas y la encontrada en la bibliografía se planteó una solución que cumpliera

con las especificaciones. Para esto se hizo un análisis de disponibilidad en el mercado de los componentes electrónicos, un análisis de costos y calidad de los componentes. Además se propuso un diseño acorde a las especificaciones de la máquina, se verificó que los componentes fueran apropiados para los requerimientos de corriente eléctrica y potencia. Una vez seleccionados los recursos, se verificó la solución mediante pruebas controladas. Las pruebas controladas ayudaron a modificar las propuestas de solución así como a ajustar los parámetros para obtener el resultado esperado [4]. Además se usó un simulador para verificar el programa implementado en el microcontrolador, esto ayudó a depurar errores antes de implementar la solución. Para implementar la solución se siguió el siguiente procedimiento:

- Se realizaron pruebas controladas para determinar el valor de los parámetros del generador. Estos valores se utilizaron en el desarrollo del modelo matemático.
- Se probó el funcionamiento del generador al conectarle diferentes cargas con una fuente externa en la excitación.
- Se obtuvo un modelo matemático que relaciona la corriente de excitación con el voltaje en los bornes de salida.
- Se desarrolló y se probó un circuito capaz de alimentar el microcontrolador utilizado en el módulo de control y de interpretar el voltaje en los bornes del generador (provee el voltaje medido al microcontrolador, se usa para obtener el error).
- Se implementó el hardware del módulo de control del sistema.
- Se corroboró mediante pruebas de campo el buen funcionamiento del hardware del módulo de control.
- Se desarrolló un programa en PICC para el módulo de control, este programa se encarga de procesar los datos y dar los valores adecuados a las salidas.
- Se implementó y probó el circuito del módulo rectificador.
- Se conectó el módulo de control con el módulo rectificador y se realizó una prueba de funcionamiento.
- Se desarrolló el circuito del módulo de arranque. Este módulo interactúa con componentes del motor de combustión interna para generar el voltaje inicial en los bornes de salida del generador.
- Se realizó la conexión entre módulos y se probó el funcionamiento del circuito.
- Se probó y ajustó el valor del compensador digital del módulo de control.

V. SOLUCIÓN Y DISEÑO FINAL

La solución final se tomaron en cuenta los análisis y pruebas anteriormente especificadas de los criterios más importantes. Para determinar cuál solución era la más adecuada, se realizó un análisis a nivel modular.

El primer módulo es el “Fuente”, este tiene la función de proveer el voltaje de alimentación al control. El segundo módulo es “Control”, que depende del módulo Fuente, ya que estos módulos están conectados directamente. Este está formado básicamente por un PIC, que fue escogido por sus

características como poseer un conversor Analógico – Digital, tener suficientes entradas y salidas, además del tiempo de respuesta y precisión del conteo. El siguiente módulo es “Excitación y Arranque”, este módulo se considera de suma importancia por el manejo de voltajes más elevados. La selección de los componentes que lo integran se realizó con base en la corriente necesaria en el rotor del generador. De primera opción solución se planteó un rectificador controlado con tiristores, esta solución funcionó con las primeras pruebas realizadas con carga puramente resistiva, pero con una carga inductiva pura, los tiristores se activaban sin ningún control, por lo que esta solución se descartó. Posteriormente se decidió utilizar un relé de estado sólido con características especiales para el manejo de cargas inductivas. La otra consideración en el módulo de Arranque es el uso de un relé para seleccionar si la fuente de excitación es la batería del motor de combustión o el voltaje suministrado por el control. El último módulo es el de “Monitoreo” para el motor de combustión, este consiste en indicadores luminosos por lo que la consideración principal es que el voltaje sea el requerido por los bombillos [4].

V-A. ELEMENTOS POR CONSIDERAR

- Relación del transformador a utilizar. La relación de transformación es muy importante ya que con esta se define el valor de voltaje en corriente alterna.
- Para el rectificador de onda completa. Como los circuitos de control se alimentan de corriente directa fue necesario utilizar un rectificador de onda completa. La corriente y voltaje en el secundario del transformador fueron los criterios evaluados para la selección de un rectificador adecuado.
- Regulador de voltaje. El regulador de voltaje está relacionado directamente con el voltaje necesario para alimentar los dispositivos de control.
- Además el voltaje necesario en corriente directa, la corriente entregada al regulador, la corriente que debe suministrar y la relación de transformación del transformador.

V-B. PRUEBAS

Basado en lo anterior entonces se plantearon distintas pruebas para plantear como se va a comportar la corriente de excitación del sistema en función del ángulo de disparo, con dichas pruebas entonces se obtuvo el comportamiento del generador además de la forma en la que se debe corregir el sistema. Esta forma de corregir el sistema se refiere a que se controla el voltaje generado en las terminales del generador móvil con la corriente que se entrega a la excitación. El valor de la corriente de excitación puede variar dependiendo del ángulo de disparo que el controlador determine [4].

Estas pruebas se hicieron con y sin carga, para el caso en que el generador móvil no tiene carga conectada en su salida, la corriente de excitación se mide con un amperímetro digital conectado entre el borne positivo del control y el positivo del rotor, el voltaje generado se midió con un voltímetro digital conectado entre dos líneas de salida del generador móvil, con

un voltímetro digital se midió el voltaje en corriente directa entregado por el control [4].

Para las pruebas en que se aplicó carga al sistema, el generador fue sometido a pruebas con diferentes cargas, además se apaga el controlador y se mantiene una excitación fija para observar la variación del voltaje generado. El voltaje se midió con un voltímetro digital en los bornes de salida del generador y los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tipo de Carga	Voltaje con controlador (VAC)	Voltaje sin controlador (VAC)	Frecuencia (hz)
Motor 2HP	220,40	189,32	59,9
Motor 2HP+2 motores 1,5 HP	221,86	174,62	60
Lámpara 0,5 kw	220,25	215,89	60
Motor 2 HP + Lámpara	220,91	180,47	60,1

Figura 4. Valores de voltaje y frecuencia obtenidos al someter el generador a pruebas con distintas cargas.

VI. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes presentadas gracias a la realización del proyecto.

- Se logró implementar un controlador electrónico que cumple con los requerimientos del Generador móvil Kohler de 15 kW.
- Se expresó matemáticamente la relación entre la corriente de excitación del generador y el voltaje generado.
- Se obtuvo un compensador que puede programarse en el PIC por ecuaciones a partir del modelo matemático del generador.
- Se logró controlar el voltaje generado mediante la corriente de excitación del generador.
- La corriente de excitación del generador varió en función del ángulo de disparo indicado por el módulo de control.
- Con el uso de dispositivos ópticos se logró combinar circuitos de potencia con un módulo de control de bajo voltaje.
- Se logró implementar un control electrónico con un presupuesto del 15 % del valor de la máquina.

VII. RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las recomendaciones más relevantes presentadas como principio de mejora experimental.

- Si se desea mejorar el sistema se debe colocar sensores de corriente en las líneas de salida que indiquen al control de excitación que debe detener el generador en caso de sobrepasar sus capacidades.
- Como se utiliza un PIC 16F877a se podría aprovechar todas sus funciones y comunicarlo a una PC, desde donde se puede ajustar el compensador y tener reportes del funcionamiento de la máquina.
- Se recomienda el uso de un Relé de Estado Sólido en lugar de un tiristor o triac, ya que, el SSR posee un encapsulado que protege y aísla tanto el circuito óptico

como el de potencia. Por la forma del SSR, este es ideal para montajes expuestos.

- Aunque para este generador móvil la variación de la frecuencia es mínima se recomienda utilizar una protección. En caso de detectar un cambio significativo en la frecuencia apagar la excitación y detener el motor de combustión interna.
- En caso de utilizar el control de excitación en otros generadores móviles se puede implementar un circuito que permita sintonizar el control para cada generador.

REFERENCIAS

- [1] Chapman, S. (2006). *Máquinas Eléctricas*. McGraw Hill. 5ed.
- [2] Afework, B., Hanania, J., Jenden, J., Stenhouse, K., Donev, J. (2018). *Energy Education - Internal combustion engine*. University of Calgary. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Internal_combustion_engine#cite_note-Knight-1
- [3] Briggs and Stratton. (2021). *How Portable Generators Work*. https://www.briggsandstratton.com/na/en_us/buying-guides/portable-generators/why-buy.html
- [4] Ramírez González, E. (2009). Control Electrónico de Generador Móvil Kohler de 15 KW. [Informe de Proyecto de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/2654>
- [5] Rashid, H. (2004). *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.