

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO DE
BAJA POTENCIA

NATALY ANDREA AVENDAÑO ORTIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2021

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO DE
BAJA POTENCIA

NATALY ANDREA AVENDAÑO ORTIZ

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Electricista

Director

Ricardo Alzate Castaño, Ph.D.

Co-Director

Fabián Leonardo Forero Ordóñez, M.Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2021

AGRADECIMIENTOS

Al culminar esta etapa de mi vida, quiero agradecer enormemente a todas las personas que me acompañaron y apoyaron en este feliz trayecto.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por el amor, dedicación y apoyo brindado a lo largo de mi vida. A mis padres, mi hermana , mis padrinos gracias por creer en mi y por estar incondicionalmente en mi vida.

Quiero dar un agradecimiento a mis directores, Ricardo Alzate Castaño, por su apoyo y tiempo brindado, a Fabián Forero Ordóñez agradezco su amistad, sus enseñanzas y la confianza que depositó en mi.

Quiero agradecer a mi novio Jhoan Felipe que con mucho amor ha creído en mi, me ha alentado a alcanzar mis metas y a creer en mis fortalezas. Gracias por estar a mi lado.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y amigos por su colaboración y amistad brindada en estos años. A todos los llevo en mi corazón.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	15
2. SINCRONIZACIÓN DE GENERADORES	16
2.1. ENGANCHE DE FASE	16
2.1.1. Aplicación de PLL a sincronización de fuentes senoidales	19
2.1.2. PLL mejorado (EPLL)	20
2.1.3. Verificación de sincronización mediante EPLL	22
2.2. SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN	23
2.2.1. Componentes armónicas en grupos electrógenos	24
2.2.2. Estrategia de sincronización para sistema híbrido	26
2.3. ANÁLISIS DE SIMULACIÓN	29
3. SISTEMA HÍBRIDO EXPERIMENTAL	36
3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	36
3.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	44
3.3. VERIFICACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	49
4. RECOMENDACIONES	52
5. TRABAJO FUTURO	53
6. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	57

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Grupo electrógeno monofásico a gasolina	10
Figura 2. Sistema híbrido de generación	11
Figura 3. Estructura general para PLL	17
Figura 4. Aproximación lineal para PLL	18
Figura 5. Implementación en MATLAB <i>Simulink</i> para PLL	19
Figura 6. Verificación numérica para sincronización de señales senoidales	20
Figura 7. Estructura general para EPLL	21
Figura 8. Implementación en MATLAB <i>Simulink</i> para EPLL	23
Figura 9. Simulación numérica para EPLL ante variaciones de fase y amplitud	24
Figura 10. Topología para sistema híbrido de generación	25
Figura 11. Salida de tensión para grupo electrógeno comercial	26
Figura 12. Estrategia de sincronización propuesta	27
Figura 13. Implementación <i>SimScape</i> para estrategia de sincronización propuesta	30
Figura 14. Descomposición espectral para señal experimental	31
Figura 15. Formas de onda para señales de voltaje	32
Figura 16. Variables calculadas por el EPLL e índice de correlación	33
Figura 17. Reparto de potencias entre generadores	35
Figura 18. Diagrama de bloques para montaje del sistema híbrido de generación	37
Figura 19. Grupo electrógeno de base para pruebas de laboratorio	37
Figura 20. Inversor de potencia <i>SEMIKRON Semiteach IGBT</i>	38
Figura 21. Inductor empleado para filtrado y acople de generadores	39

Figura 22.	Esquema de potencia y banco de cargas	40
Figura 23.	Diagrama esquemático de la tarjeta de aislamiento	41
Figura 24.	Sensor utilizado para captura de magnitudes eléctricas del sistema	42
Figura 25.	Sistema de adquisición de datos dSPACE <i>DS1104</i>	43
Figura 26.	Esquema de prototipado rápido en dSPACE ControlDesk	45
Figura 27.	Prototipo experimental implementado en laboratorio	46
Figura 28.	Diagrama GRAFCET de operación del sistema híbrido experimental	48
Figura 29.	Verificación experimental para reparto de potencias	50
Figura 30.	Señales experimentales de voltaje y cálculo para índice de correlación	51

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO DE BAJA POTENCIA¹

AUTOR: NATALY ANDREA AVENDAÑO ORTÍZ²

PALABRAS CLAVE: ANÁLISIS DE COMPONENTES ARMÓNICAS, ENGANCHE DE FASE MEJORADO, MICRORREDES ELÉCTRICAS, SINCRONIZACIÓN DE GENERADORES.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado aborda el problema de sincronización entre generadores para realizar su conexión en red aislada monofásica. Inicialmente, se explora un método de enganche de fase mejorado (EPLL) para determinar los valores de amplitud y fase de una señal senoidal de referencia. Posteriormente, el algoritmo EPLL es empleado para efectuar la sincronización entre un grupo electrógeno (actuando como fuente de referencia) y un circuito inversor de potencia emulando el recurso renovable para un esquema de generación híbrido y aislado de la red de distribución. Uno de los aspectos importantes del método propuesto está en la necesidad de asegurar una sincronización a pesar de la presencia permanente de componentes armónicas en la señal del voltaje de referencia. Para verificar el desempeño del esquema híbrido se realizaron simulaciones en *SimScape* de MATLAB y posteriores análisis experimentales a partir de la implementación de un prototipo de laboratorio en el Edificio de *Investigaciones del Parque Tecnológico UIS Guatiguará*. Dentro de los resultados importantes obtenidos tras la realización del presente trabajo de grado se destaca una apropiada operación de sincronización de las fuentes del esquema híbrido ante variaciones de demanda. Trabajo complementario incluye la vinculación de más unidades de generación y su gobierno a través de estrategias de control jerárquico.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática. Codirector: Fabián Leonardo Forero Ordoñez, Maestría en Ingeniería Eléctrica

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A LOW-POWER HYBRID GENERATION UNIT³

AUTHOR: NATALY ANDREA AVENDAÑO ORTÍZ⁴

KEYWORDS: ELECTRICAL MICROGRID, ENHANCED PHASE LOCKED-LOOP, HARMONIC COMPONENT ANALYSIS, SYNCHRONIZATION OF SOURCES.

DESCRIPTION:

In this work the synchronization of sources on isolated single-phase electrical grids is addressed. First of all, an enhanced phase locked-loop method (EPLL) is explored for picking-up the phase and amplitude of a sinusoidal waveform acting as reference signal. Then the EPLL algorithm is employed to perform synchronization between a generation-set (as reference source) and a power inverter providing the renewable resource on a hybrid generation scheme of isolated microgrid. A key aspect of the proposed scheme is the necessity to avoid the permanent harmonic content contained in the voltage reference signal provided by the generation-set and the corresponding effects it has on synchronization of sources. In order to verify the performance of the EPLL algorithm numerical simulations were performed employing electrical models of the *SimScape* toolbox available in MATLAB *Simulink*. Also, experimental verification was further performed by setting-up a test-bed built in laboratory (actually, it was assembled at the *Research Building of Guatiguara's Science Park of the Universidad Industrial de Santander*) for the analysis of practical aspects regarding power management of microgeneration systems. In accordance, it was possible to verify the appropriate performance of the synchronization scheme under load variations. Ongoing work includes integration of more generation units to the microgrid and the exploration of power management (dispatch) techniques.

³ Bachelor Thesis

⁴ Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Ricardo Alzate Castaño, PhD in Computer Science and Automation Engineering. Co-director: Fabián Leonardo Forero Ordoñez, Master in Electrical Engineering

INTRODUCCIÓN

Se conocen como zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia a las regiones en las que no se cuenta con suministro de energía eléctrica o se presta sólo por algunas horas del día. Se estima que dichas ZNI están constituidas por 1.9 millones de habitantes, representando el 51 % del territorio nacional ⁵.

En estas regiones se ha implementado de forma extensiva el uso de motores de combustión interna para la generación de energía eléctrica, convirtiendo el combustible fósil en energía mecánica que, a su vez, es transformada en potencia eléctrica a través de generadores eléctricos. La combinación entre un motor de combustión y un generador eléctrico es conocida como *grupo electrógeno* ⁶ (ver Fig. 1).

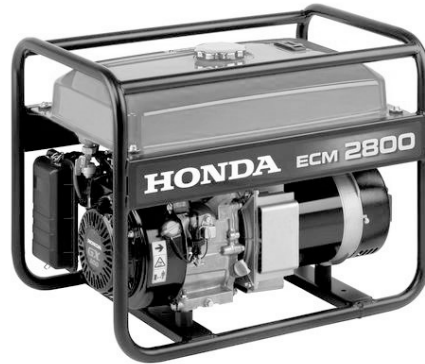
Desde un punto de vista ambiental, los grupos electrógenos no son soluciones recomendables debido a los productos contaminantes generados en el proceso de combustión, afectando la calidad del aire e incidiendo negativamente sobre problemas como el calentamiento global y el cambio climático ⁷. Debido a ello, en aras de reducir la dependencia de la sociedad moderna en recursos fósiles, el sector energético debe propender por una descarbonización de la economía a través de

⁵ dirección técnica de gestión de energía SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ENERGÍA Y GAS. *Zonas no interconectadas ZNI diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2018*. Bogotá, D.C., 2018.

⁶ Willard W. PULKRABEK. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Pearson Prentice-Hall, 2003.

⁷ Hermes Enrique CASTELLANOS IBARRA. *Empleo del biodiesel como sustituto de los combustibles líquidos fósiles (diésel) y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a su uso*. Monografía (Especialista en Ingeniería Ambiental). Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2009.

Figura 1. Grupo electrógeno monofásico a gasolina (tomado de www.honda.com)



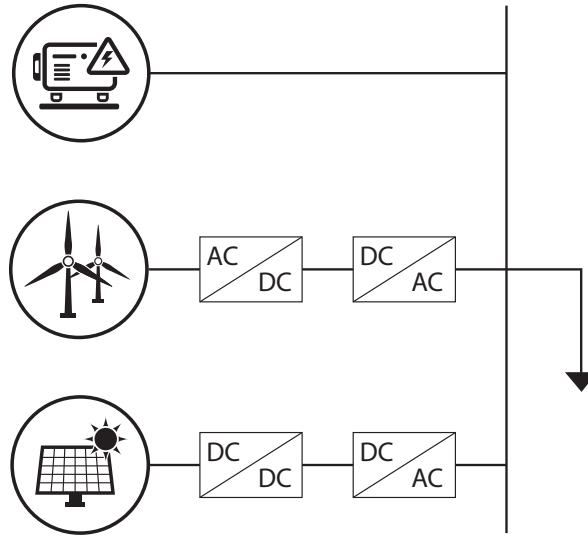
la masificación de alternativas energéticas basadas en fuentes renovables como recursos del tipo: solar, eólico, mini-hidráulico y transformaciones de biomasa, entre otros.

A partir de ello, se constituyen opciones como los sistemas de generación híbrida en los cuales se combinan diferentes tipos de fuentes energéticas para abastecer la demanda mediante el uso eficiente de recursos ⁸. En la Fig. 2 se ilustra un ejemplo a través del cual el recurso fósil (generador Diesel) se combina con fuentes renovables, a través de dispositivos de electrónica de potencia (convertidores DC/DC e inversores) que ajustan mediante estrategias de control la inyección de potencia en el nodo de carga por parte de cada generador, adaptándose a la volatilidad del recurso.

En la Universidad Industrial de Santander se destacan trabajos relacionados con es-

⁸ TOSHIRO HIROSE e Hirofumi MATSUO. "Standalone Hybrid Wind-Solar Power Generation System Applying Dump Power Control Without Dump Load". En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59.2 (2012), págs. 988-997.

Figura 2. Sistema híbrido de generación



ta temática como: ⁹ que propone encontrar una configuración óptima para diferentes fuentes de generación renovable, analizando simulaciones numéricas en HOMER y PVsyst; en ¹⁰ se realiza análisis en factores de dimensionamiento para un sistema híbrido en viviendas ubicadas en La Mesa de Los Santos; en ¹¹ se realiza el diseño y construcción de un sistema de generación fotovoltaico conectado a la red,

⁹ Stefany AGAMEZ HERAZO y Stefanny ALFONSO PALACIO. *Dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de generación para el nuevo edificio de la E3T*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2016.

¹⁰ Andrés F. RODRÍGUEZ ORTIZ. *Diseño de un sistema híbrido mediante energías alternativas para una vivienda ubicada en una parcela en La Mesa de los Santos/Santander*. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería Mecánica, 2017.

¹¹ Evert F. PARRA SILVA y Jesús E. OSORIO SANTOS. *Diseño y construcción de un sistema híbrido GRID TIE fotovoltaico casero con un consumo instantáneo máximo de 2000 Watt*. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería Mecánica, 2014.

con transferencia automática y banco de baterías; en ¹² se desarrolla la simulación de un sistema aislado fotovoltaico con almacenamiento por baterías y supercondensadores, para alimentar un motor DC de imanes permanentes; en ¹³ se plantean algoritmos para minimizar costos de operación y mantenimiento de la una microrred a partir de localización de fuentes y almacenadores de energía; en ¹⁴ se diseña una microrred de baja tensión evaluando los recursos energéticos del Parque Tecnológico Guatiguará y en ¹⁵ se identifica una solución para abastecer una comunidad aislada mediante el software de simulación HOMER PRO.

A nivel nacional se destacan trabajos como: ¹⁶ el cual propone un módulo de regulación de voltaje y frecuencia para diferentes fuentes de energía en una microrred

¹² Cristian A. GÓMEZ MONTAÑEZ y Yollmar I. CORDOBA FRAGOZO. *Gestión y control de un sistema de almacenamiento de energía híbrido alimentado por paneles fotovoltaicos para la energización de un motor DC*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019.

¹³ Pedro F. ACEVEDO RUEDA y Cristian D. CAMACHO PARRA. *Localización de fuentes de energía y dimensionamiento del sistema de distribución en una micro-red aislada de baja tensión*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2018.

¹⁴ Juan M. REY LÓPEZ y Pedro P. VERGARA BARRIOS. *Diseño de una microrred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2012.

¹⁵ Karen J. ANGARITA SUAREZ y Marcela C. PABÓN PACHÓN. *Dimensionamiento de una solución de generación y almacenamiento de energía para abastecer la demanda eléctrica de una red aislada*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2018.

¹⁶ Jesús Alberto VIVEROS DELGADO. *Control de una microrred aislada que incluye generadores basados en biomasa*. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería Electrónica y de Computadores). Colombia: Universidad de los Andes, 2016.

y ¹⁷ que presenta un modelo matemático para describir el comportamiento de una microrred compuesta por generadores Diesel y fotovoltaicos.

Otro aspecto importante en la operación de sistemas de generación híbridos es la conexión entre las diferentes fuentes de una red, debido a restricciones de sincronización propias de circuitos en corriente alterna. A partir de ello, ¹⁸ presenta cinco algoritmos de sincronización comúnmente empleados en sistemas conectados a la red y en ¹⁹ se discuten soluciones basadas en electrónica de potencia para la integración eficiente de recursos energéticos de tipo eólico y fotovoltaico (PV), mismas que pueden ser fácilmente adaptables a soluciones rurales (predominantemente de tipo monofásico) tal y como se propone en ²⁰.

El presente trabajo de grado se orienta al estudio e implementación de un sistema de generación híbrido que utilice recursos renovables y, por tanto, a través de su desarrollo se abordarán inquietudes como las siguientes: ¿Cómo realizar la conexión de un inversor monofásico a un grupo electrógeno para operar como sistema híbrido? ¿Presenta un grupo electrógeno de baja potencia desviaciones en parámetros nominales de salida ante perturbaciones de carga? ¿Qué consideraciones deben tomarse en cuenta para combinar un inversor monofásico y un grupo electrógeno

¹⁷ Fredy Alexis DULCE MERA. *Modelamiento y control de una microrred en modo isla*. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería Electrónica y de Computadores). Colombia: Universidad de los Andes, 2015.

¹⁸ N.F. GUERRERO RODRÍGUEZ y col. "Synchronization algorithms for grid-connected renewable systems: Overview, tests and comparative analysis". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 (2017), págs. 629 -643.

¹⁹ J.M. CARRASCO y col. "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey". En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 29 (2004), págs. 1002-1016.

²⁰ Norma técnica ESSA. *Normas para cálculo y diseño de sistemas de distribución*. 2014.

de baja potencia en un nodo (o bus) de carga?

1. OBJETIVOS

Objetivo general

- Realizar la conexión en red aislada entre un grupo electrógeno de baja potencia y un inversor monofásico a manera de sistema de generación híbrido.

Objetivos específicos

- Dimensionar un sistema de generación de baja potencia basado en la combinación de un grupo electrógeno y una fuente alternativa;
- Caracterizar las variaciones nominales en un grupo electrógeno comercial sometido a cambios de carga;
- Analizar por simulación un método para conexión a la red de un inversor en un sistema monofásico aislado;
- Verificar experimentalmente el método de conexión a la red aislada empleando el grupo electrógeno comercial.

2. SINCRONIZACIÓN DE GENERADORES

Un principio fundamental de los circuitos eléctricos indica que dos fuentes de voltaje pueden conectarse en paralelo solamente si poseen la misma diferencia de potencial. En caso contrario competirían entre ellas hasta su destrucción, siendo una la carga de la otra.

Pensando entonces en circuitos de corriente alterna, la conexión paralela de generadores que se comportan como fuentes de voltaje requiere igualar los parámetros de la señal sinusoidal; es decir: amplitud, frecuencia y fase.

El presente *Capítulo* se ocupará principalmente del problema de sincronización de fase entre generadores, bajo la premisa de condiciones reguladas de amplitud y frecuencia (a través de lazos de control).

2.1. ENGANCHE DE FASE

Un lazo de enganche de fase (PLL - del inglés: *Phase-Lock Loop*), es un circuito o sistema encargado de ajustar la fase de un oscilador a determinadas condiciones requeridas de operación ^{21 22}.

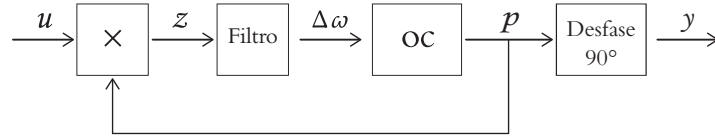
La estructura general para un PLL se muestra en la Fig. 3, a partir de la cual se

²¹ Daniel SERRANO DOMÍNGUEZ. *Análisis comparativo de técnicas de sincronización con la red eléctrica*. Tesis de maestría (Magister en Sistemas de Energía Eléctrica). España: Universidad de Sevilla, 2014.

²² F. J. ZAMUDIO SAENZ. *Modelado y diseño de un PLL con oscilador basado en filtro pasa banda*. Tesis de maestría (maestro en ciencias: especialidad electrónica). México: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2015.

observa el producto (z) entre las señales de entrada (u) y salida intermedia (p). Posteriormente se realiza un filtrado de paso bajo que produce la señal v de alimentación al oscilador controlado (OC). Finalmente, la señal intermedia p se modifica a partir de un desfase de 90° para producir la señal de salida del PLL denominada y . Los PLL son aplicados principalmente en la sincronización de moduladores en sistemas de telecomunicación. Inspirados en lo anterior, se realizará una adaptación del esquema básico de la Fig. 3 al caso de sincronización de generadores de potencia eléctrica conectados a una red de corriente alterna.

Figura 3. Estructura general para PLL



Inicialmente, considere un oscilador que asigna la fase ϕ_o a una señal cosenoidal:

$$p = \cos(\phi_o),$$

a partir de:

$$\phi_o = \int^t (\omega_n + \Delta\omega(\tau)) d\tau,$$

siendo ω_n una frecuencia de referencia y $\Delta\omega$ su desviación ²¹. De otro lado, asumiendo una señal de entrada:

$$u = U \sin(\phi_i),$$

el producto entre p y u permite obtener:

$$\begin{aligned}
 z(t) &= U \sin(\phi_i) \cos(\phi_o) \\
 &= \frac{U}{2} \sin(\phi_i - \phi_o) + \frac{U}{2} \sin(\phi_i + \phi_o) \\
 &= \frac{U}{2} \sin([\omega_i - \omega_o] t) + \frac{U}{2} \sin([\omega_i + \omega_o] t),
 \end{aligned} \tag{1}$$

señal que posterior a un filtrado de paso bajo (para eliminar $\omega_i + \omega_o$) genera:

$$v(t) = \frac{U}{2} \sin([\omega_i - \omega_o] t),$$

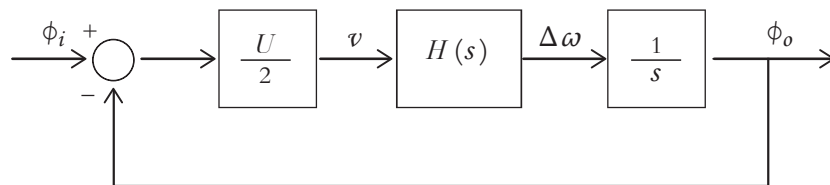
y que a su vez puede aproximarse mediante:

$$v(t) \approx \frac{U}{2} (\phi_i - \phi_o), \tag{2}$$

para valores $\omega_i \rightarrow \omega_o$.

Por tanto, considerando una relación lineal entre v y $\Delta\omega$ dada por $H(s)$, puede constituirse el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 4 para ilustrar la representación funcional equivalente del esquema de la Fig. 3, pero ahora en términos de las fases ϕ_o y ϕ_i .

Figura 4. Aproximación lineal para PLL



Observe que por tratarse de un sistema realimentado negativamente con un término integral en la trayectoria directa, el objetivo del sistema está en lograr $\phi_o \rightarrow \phi_i$ con

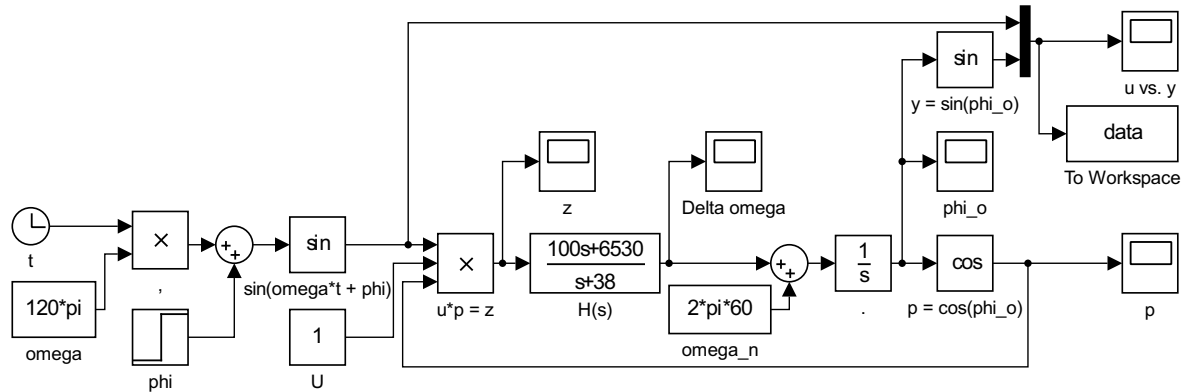
características dinámicas definidas por $H(s)$.

2.1.1. Aplicación de PLL a sincronización de fuentes senoidales Para verificar la validez del esquema de PLL presentado en la Fig. 3, se realizaron experimentos de simulación numérica en MATLAB empleando los siguientes parámetros: $\omega_n = 60 [Hz]$ y $U = 1 [V]$. Adicionalmente, para el cálculo de $H(s)$ se consideró una función de transferencia de primer orden dada por:

$$H(s) = \frac{k(s+a)}{(s+b)}.$$

Para calcular los parámetros de $H(s)$ se tomó como base la aproximación lineal de la Fig. 4, permitiendo determinar mediante métodos analíticos los valores: $a = 65.3$ y $b = 38$, tras suponer $k = 100$ para valores transitorios deseados $\zeta = 0.7$ y $t_s = 100 [ms]$.

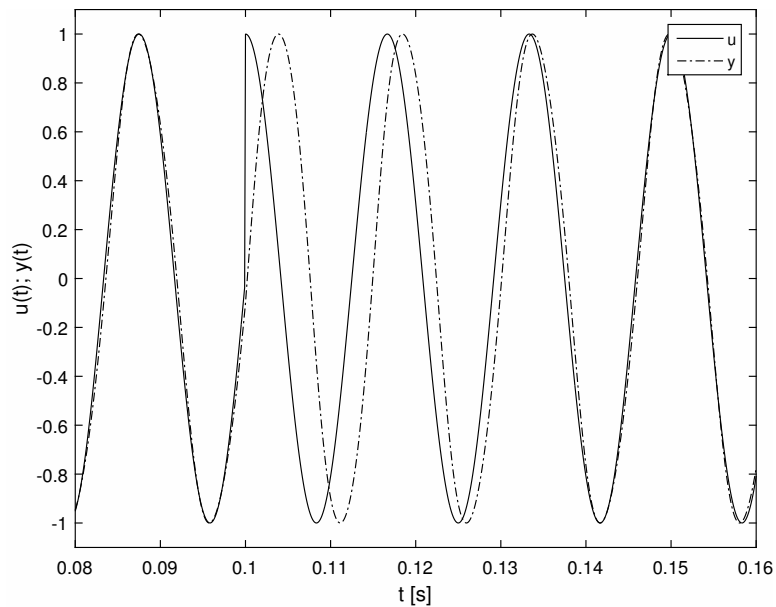
Figura 5. Implementación en MATLAB *Simulink* para PLL



La Fig. 5 muestra la implementación de los anteriores parámetros en MATLAB *Simulink*. A partir de ello, se obtienen los resultados presentados en la Fig. 6 donde se observa un desfase de 45° aplicado sobre la señal de entrada $u(t)$ en $t = 0.1 [s]$, que

a su vez permite evidenciar una rápida respuesta por parte del PLL tras recuperar el sincronismo de la señal de salida $y(t)$ en un transitorio de tiempo consistente con las características del diseño para $H(s)$, corroborando así la efectividad del esquema propuesto.

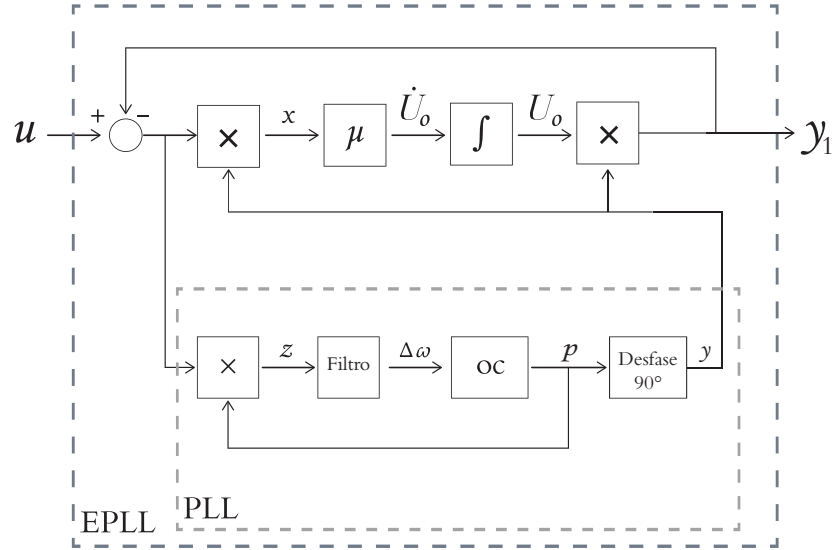
Figura 6. Verificación numérica para sincronización de señales senoidales



2.1.2. PLL mejorado (EPLL) La estructura PLL mostrada en la sección anterior, a pesar de presentar buenos resultados de sincronización, se basa en la premisa de conocer la amplitud de la señal de entrada. Sin embargo, lo anterior no está garantizado en la práctica y por tanto se debe realizar una modificación para estimar no solamente la fase de la señal sino también su amplitud. A esta nueva versión del PLL se le conoce como *PLL mejorado* o EPLL (*Enhanced Phase-Locked Loop*)²³.

²³ M. KARIMI-GHARTEMA. "Enhanced Phase-Locked Loop". En: Mississippi: IEEE Press, 2014. Cap. 2.

Figura 7. Estructura general para EPLL



La Fig. 7 ilustra el esquema general para el EPLL. Como se observa, este se construye sobre la base de la estructura genérica del PLL mostrada en la Fig. 3. A partir de ello, se realizan las siguientes modificaciones a la expresión (1):

$$\begin{aligned}
 z(t) &= [u - y_1] \times p \\
 &= [U \sin(\phi_i) - (U_o \times y)] \cos(\phi_o) \\
 &= [U \sin(\phi_i) - U_o \sin(\phi_o)] \cos(\phi_o) \\
 &= \frac{U}{2} \sin(\phi_i - \phi_o) + \frac{U}{2} \sin(\phi_i + \phi_o) - \frac{U_o}{2} \sin(2\phi_o),
 \end{aligned}$$

de lo cual ante $\phi_o \approx \phi_i$ y $U_o \approx U$ el término de doble frecuencia se elimina, permitiendo obtener:

$$z(t) \approx \frac{U}{2} (\phi_i - \phi_o) = v(t),$$

como aproximación equivalente a la planteada en (2) y que hace válidas (también para este caso) las suposiciones realizadas sobre $H(s)$.

De otro lado, en la trayectoria directa superior del diagrama se tiene:

$$\begin{aligned}
 x(t) &= [u - y_1] \times y \\
 &= [U \sin(\phi_i) - (U_o \times y)] \sin(\phi_o) \\
 &= [U \sin(\phi_i) - U_o \sin(\phi_o)] \sin(\phi_o) \\
 &= \frac{U}{2} \cos(\phi_i - \phi_o) - \frac{U_o}{2} + \frac{U_o}{2} \cos(2\phi_o) - \frac{U}{2} \cos(\phi_i + \phi_o).
 \end{aligned}$$

En esta última expresión, la condición $\phi_o \approx \phi_i$ se garantiza debido a la acción correctiva realizada por el lazo realimentado inferior (PLL general) y por tanto:

$$\begin{aligned}
 x(t) &\approx \frac{U}{2} \cos(0) - \frac{U}{2} + \frac{U}{2} \cos(2\phi_i) - \frac{U}{2} \cos(2\phi_i) \\
 &\approx 0.
 \end{aligned}$$

Adicionalmente, se sugiere a partir del análisis del bloque integrador que U_o es el valor de amplitud que hace cero a $x(t)$, asemejándose a través de $\mu = k_i$ a una *acción de control integral* que elimina el error de estado estacionario (*i.e.* el integrador hace que el lazo de control de amplitud sea *tipo I* y por tanto garantizará regulación de sus valores ante cambios de tipo escalón ²⁴). De esta manera:

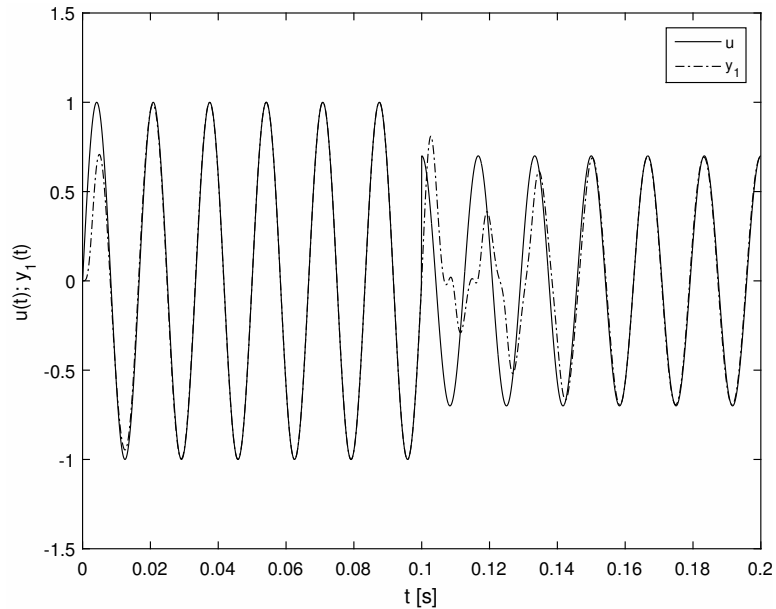
$$y_1 = U_o \times y = U_o \sin(\phi_o),$$

corresponde con la señal sincronizada a la fase $\phi_o = \phi_i$ y con amplitud $U_o = U$.

2.1.3. Verificación de sincronización mediante EPLL Tomando como base el mismo caso de ejemplo presentado en la *Subsección 2.1.1*, se realiza verificación

²⁴ K. OGATA. *Ingeniería de control Moderna*. Pearson Education, 2010.

Figura 9. Simulación numérica para EPLL ante variaciones de fase y amplitud

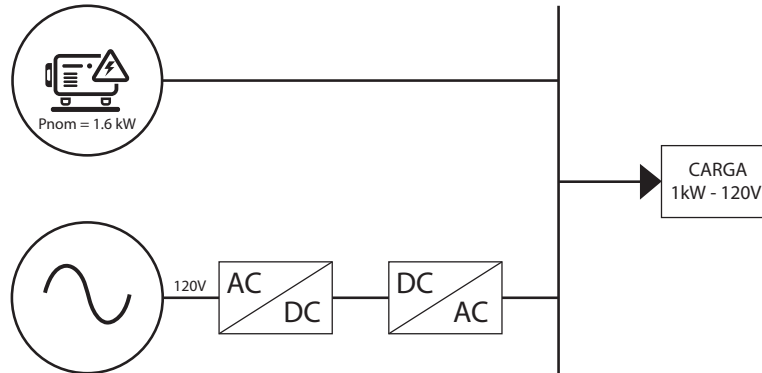


para familias en zonas rurales, según se explica en ²⁵. Precisamente, satisfacer la demanda energética de poblaciones en zonas aisladas y no interconectadas, motiva la configuración de sistemas de generación que combinen recursos renovables con generadores convencionales.

2.2.1. Componentes armónicas en grupos electrógenos Existe en el mercado una amplia oferta de grupos electrógenos de baja potencia (principalmente operados a gasolina), que constituyen soluciones de generación a bajo costo. Sin embargo, debido precisamente a su simplicidad técnica, no presentan los mejores estándares en cuanto respecta a la calidad de la potencia entregada, manifestándose principalmente en distorsiones de forma de onda y variaciones de frecuencia ante

²⁵ Diana M. HERNÁNDEZ VARGAS. *Despacho económico y su aplicación en microrredes eléctricas*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019.

Figura 10. Topología para sistema híbrido de generación considerado como caso de estudio



cambios de carga. Considere por ejemplo la forma de onda mostrada en la Fig. 11 correspondiente a la de tensión entregada por un generador monofásico comercial, evidenciando la presencia de componentes armónicas.

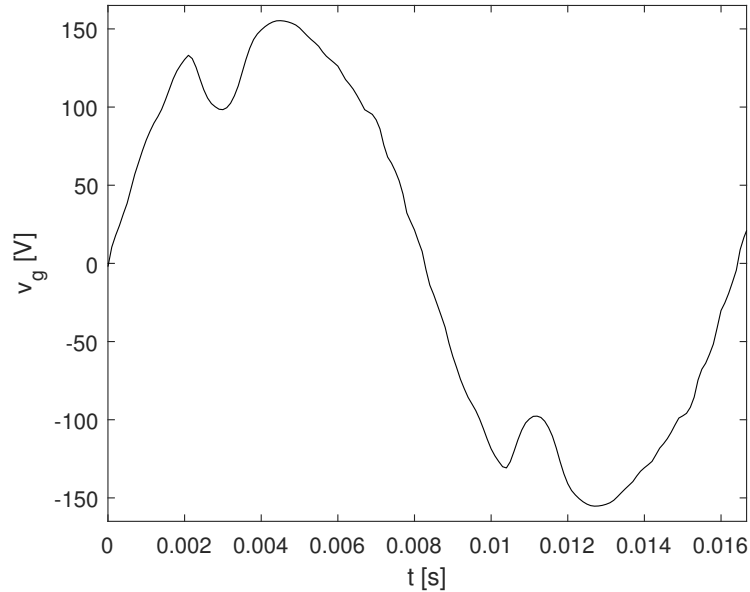
En particular, los motores de combustión que corresponden al primotor para el generador de un grupo electrógeno, vienen optimizados para trabajar a valores de carga nominales. Por tanto, la operación a valores reducidos de carga ocasiona en estos tipos de generadores la emisión de agentes contaminantes al ambiente y el deterioro progresivo de sus partes por cuenta de acumulación de combustibles no aprovechados. Detalles para esta clase de inconvenientes técnicos pueden encontrarse en 262728.

²⁶ J. TORRES VERA. *Low Load Profile How does it negatively affect a generator set?* HIMOINSA. 2018.

²⁷ B. JABECK. *The Impact of Generator Set Underloading*. Electric Power, Caterpillar Inc. 2014.

²⁸ Power Technologies ASCO. *Adverse Effects of Low Load Operation on Diesel Generating Sets*. Cleveland, OH, USA, 2018.

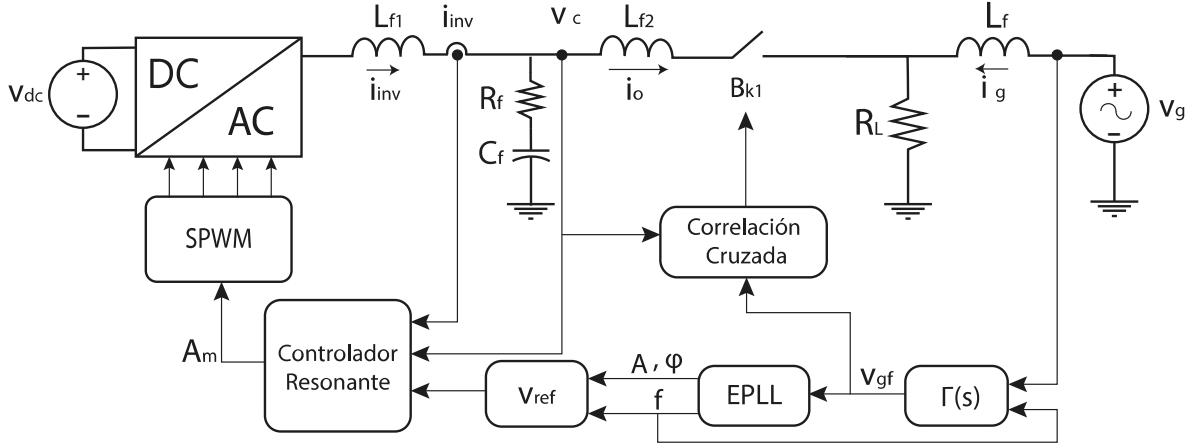
Figura 11. Salida de tensión para grupo electrógeno comercial evidenciando componentes armónicas



2.2.2. Estrategia de sincronización para sistema híbrido A partir del planteamiento anterior, es evidente que existen problemas abiertos (principalmente de tipo práctico) para la implementación de redes híbridas y aisladas como la motivada en el caso de estudio propuesto en la Fig. 10. Por tanto, se requiere un tratamiento particular de señales tan reales como la presentada en la Fig. 11 para efectuar la sincronización de fuentes en esquemas de generación eléctrica.

Retomando el método EPLL sugerido en la *Sección 2.1.2*, es claro que para realizar un cálculo apropiado de los parámetros (amplitud y fase) de la señal de entrada $u(t)$ se requiere que esta sea senoidal. Por tal razón, al momento de implementar el EPLL en un esquema de generación para el cual la señal de referencia esté constituida por la salida de un grupo electrógeno real, se requerirá necesariamente realizar un filtrado de sus componentes armónicas. Hasta ese punto parecería un problema trivial, sabiendo que la frecuencia de línea (i.e. de sincronización) en un

Figura 12. Estrategia de sincronización propuesta para fuentes con contenido armónico



generador es de valor conocido. Sin embargo, ya se advirtieron las variaciones de fase que pueden existir en generadores prácticos y por tanto, se requiere adecuar un esquema de filtrado que se adapte a estas desviaciones frecuenciales.

La Fig. 12 muestra el esquema propuesto para aplicar el PLL en un sistema de generación bajo la influencia de componentes armónicas en la fuente de referencia. Como se observa, la señal del grupo electrógeno (denotada como V_g) es filtrada a través de un bloque denominado $\Gamma(s)$, obteniendo en su salida la componente fundamental V_{gf} . Dicha señal será la entrada al bloque EPLL, de cuya salida se realimenta el valor de frecuencia a $\Gamma(s)$, para hacerlo ajustable a las perturbaciones en V_g .

Adicional a lo anterior, es también notable el control de conexión realizado por la función de correlación cruzada efectuada entre el voltaje V_c a la salida del circuito inversor (señal de la fuente renovable) y la versión filtrada de la señal de la fuente convencional V_g . Como se sabe, la función de correlación cruzada permite calcular el índice de correlación entre dos señales, siendo de valor unitario en la medida que

ambas señales sean iguales. En particular, el *coeficiente de correlación* o *coeficiente de Pearson* se define como ²⁹:

$$\rho_{V_c V_{gf}} = \frac{\sigma_{V_c V_{gf}}}{\sigma_{V_c} \sigma_{V_{gf}}},$$

siendo $\sigma_{V_c V_{gf}}$ la covarianza de (V_c, V_{gf}) , σ_{V_c} la desviación estándar de V_c y $\sigma_{V_{gf}}$ la desviación estándar de V_{gf} . De esta manera, mientras $\rho_{V_c V_{gf}} \leq 0.995$ las fuentes no se acoplarán.

Por su parte, la función de transferencia del filtro $\Gamma(s)$ se selecciona como:

$$\Gamma(s) = \frac{k\omega_n^2 s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2},$$

siendo resonante a la frecuencia $\omega_n = 2\pi f$ y con coeficiente de amortiguamiento ζ definiendo la amplitud de su pico de amplificación.

Finalmente, la salida del EPLL es la señal de referencia aplicada al control del circuito inversor de potencia. Este control está constituido por un doble lazo resonante cuyas particularidades de diseño son abordadas por Machuca en ³⁰.

²⁹ Ronald E. WALPOLE y col. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson Education, 2012.

³⁰ Jaime Andrés MACHUCA MAYORGA. *Control droop de un generador de inducción en una microrred simple*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2020.

2.3. ANÁLISIS DE SIMULACIÓN

La Fig. 13 muestra el circuito implementado en *SimScape* de MATLAB para verificar por simulación el esquema de sincronización propuesto en la Fig. 12. En particular, el algoritmo EPLL de la Fig. 8 se incluye al interior del bloque denominado Sincronizador. Para construir la función $\Gamma(s)$ se emplearon los siguientes parámetros: $k = 2.73 \times 10^{-4}$, $\zeta = 0.05$ y $\omega_n = 2\pi f$, siendo f la frecuencia calculada por el algoritmo EPLL.

La fuente de alimentación correspondiente al grupo electrógeno con componentes armónicas, fue construida empleado un bloque del tipo *Controlled Voltage Source*, permitiendo sintetizar la función:

$$V_g(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{22} \sqrt{2}V_k \cos(k\omega_0 t + \beta_k), \quad (3)$$

para la cual V_0 representa la componente fundamental de V_g con frecuencia ω_0 y V_k la magnitud del k -ésimo armónico con desfase β_k . A su vez, la información espectral fue obtenida del análisis frecuencial mostrado en la Fig. 14 para la señal experimental de la Fig. 11, evidenciando una distorsión armónica (THD) de 16.58 %.

Por tanto, las Figs. 15 y 16 muestran los resultados de simulación obtenidos para un escenario de análisis ante el cual la carga es asumida inicialmente por el generador de base y, posteriormente en $t = 0.5$ [s], ingresa un generador que usa un inversor de potencia para asumir la mitad de la demanda. En $t = 1.2$ [s] ocurre una perturbación en la tensión V_g cambiando la frecuencia de una condición inicial de 61 a 61.7 [Hz] (ver Fig. 17(a)), la amplitud de 160 a 152 [V] (ver Fig. 17(b)) y la fase de 0 a $\frac{\pi}{6}$ [rad].

Como se puede observar en la Fig. 16(b), la forma de onda de la señal filtrada $V_{g,f}$

Figura 13. Implementación *SimScape* para estrategia de sincronización propuesta

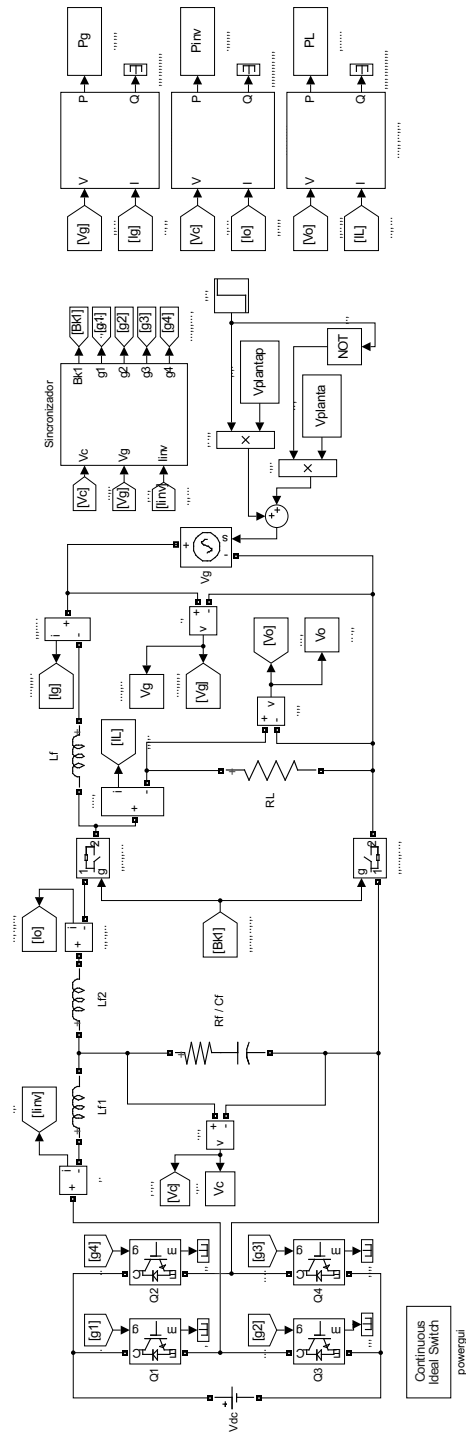
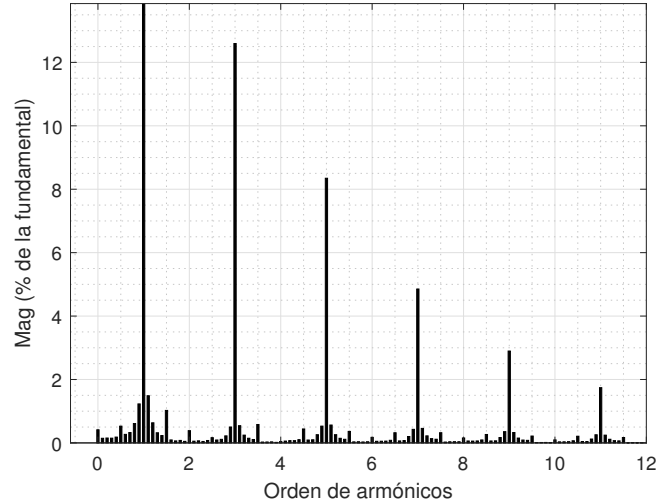


Figura 14. Descomposición espectral para señal experimental



refleja las variaciones de la señal de referencia V_g ilustrada en la Fig. 16(a). Adicionalmente, en la Fig. 16(c) se visualiza el efecto transitorio de la perturbación sobre la tensión V_c a la salida del circuito inversor de potencia, mismo que es evidenciado en menor proporción en el voltaje V_o aplicado a la carga, según mostrado en la Fig. 16(d).

Por su parte, la sincronización de los generadores se verifica a partir de la evolución temporal para el coeficiente de correlación $\rho_{V_c V_{g,f}}$ mostrado en la Fig. 17(c), permitiendo observar las variaciones detectadas al momento de aplicar las perturbaciones, causando desconexión temporal del inversor de potencia según reflejado en la condición para el interruptor Bk_1 de la Fig. 17(d). En este sentido, es interesante notar que el efecto transitorio en el algoritmo EPLL genera múltiples conmutaciones (conexiones y desconexiones) en un pequeño intervalo de tiempo. A nivel práctico, deberá corregirse este fenómeno para no afectar la vida útil de los contactores y evitar la inclusión de ruidos de alta frecuencia y componentes armónicas que degraden el desempeño del inversor de potencia.

Figura 15. Formas de onda para señales de voltaje

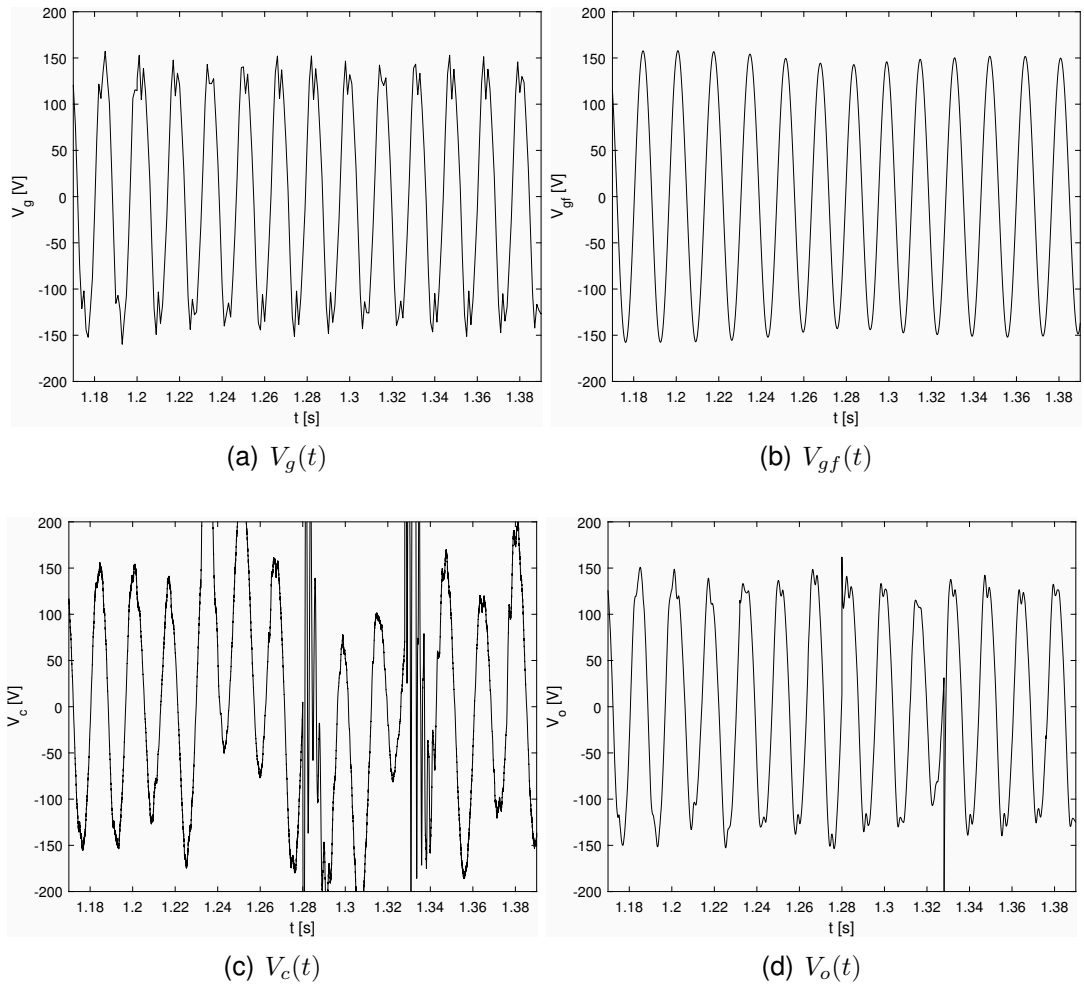
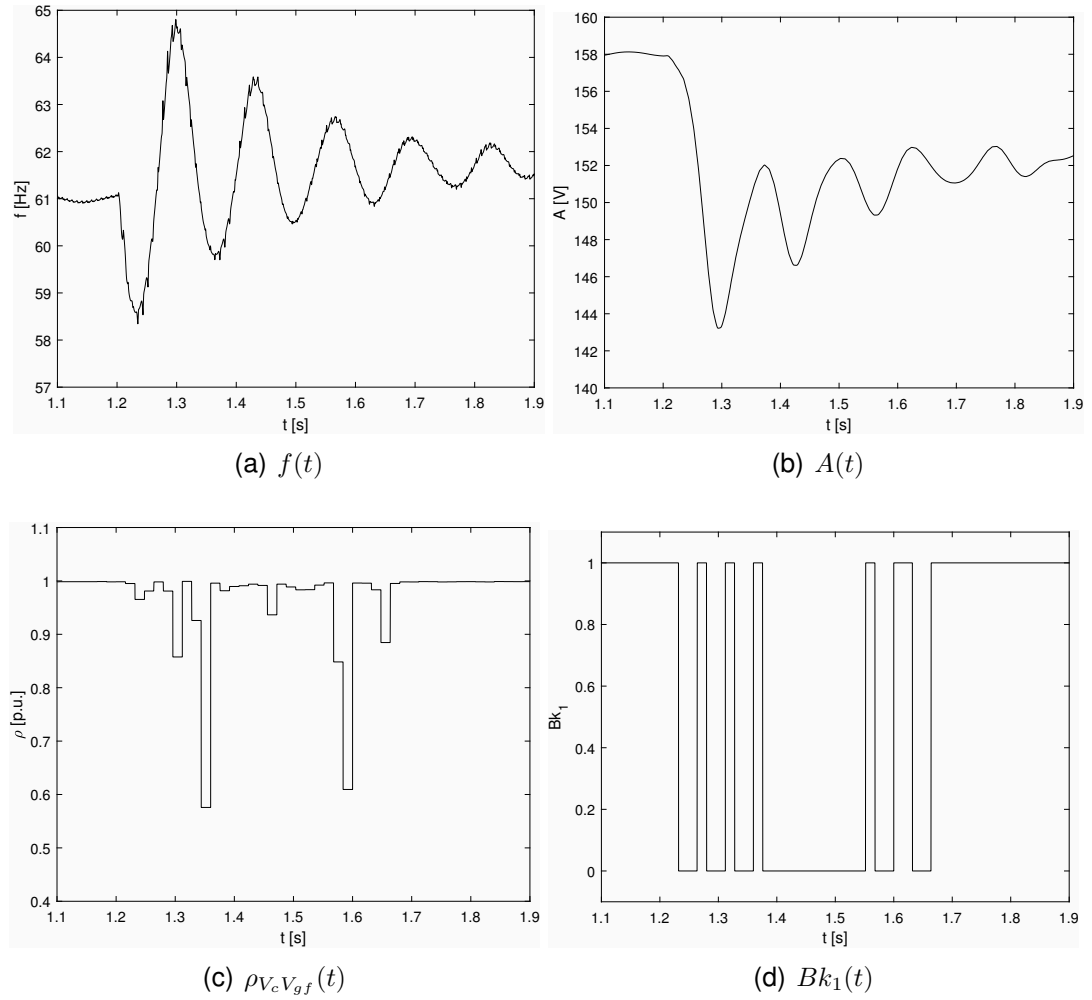


Figura 16. Variables calculadas por el EPLL e índice de correlación



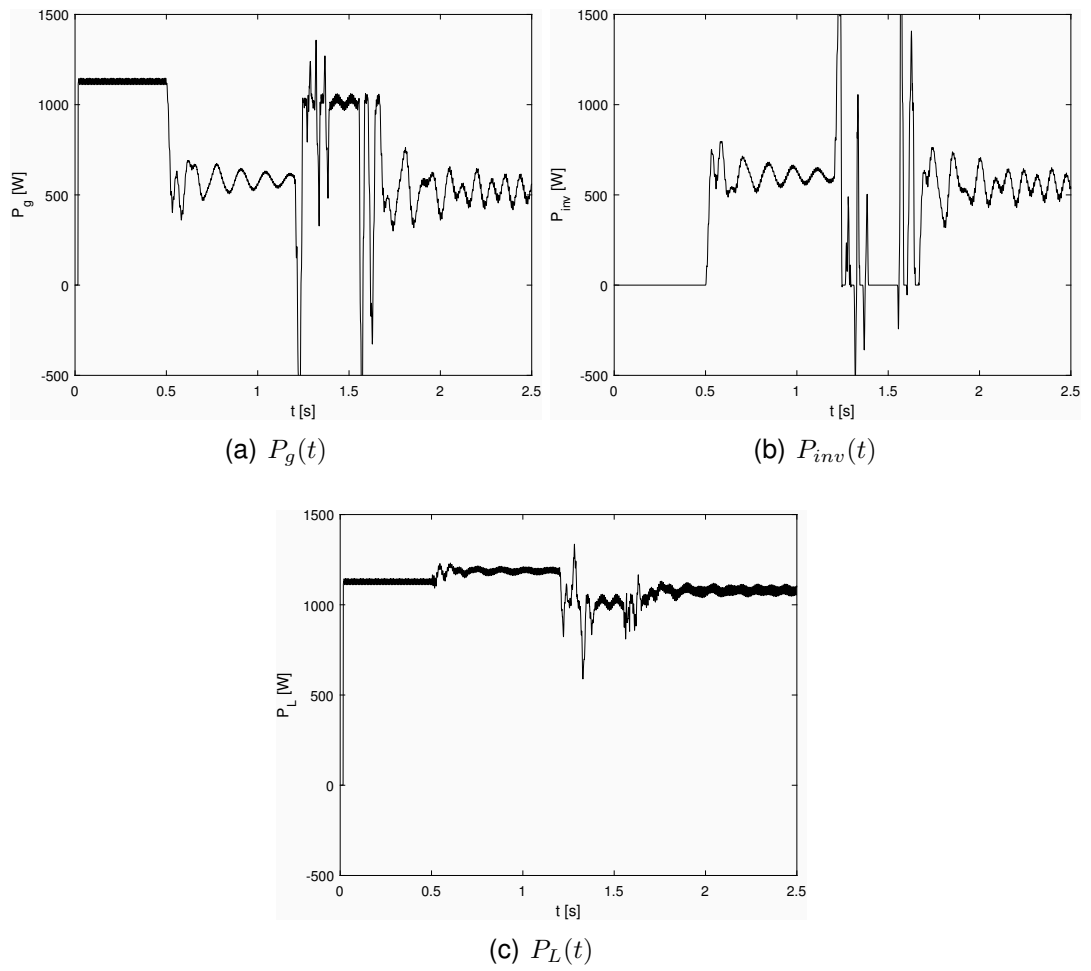
Finalmente, es posible observar la distribución de la demanda a partir de las potencias mostradas en la Fig. 17, donde se verifica a partir de la Fig. 18(a) el estado inicial de consumo asumido por el generador de referencia en términos de su potencia P_g , que posteriormente se distribuye en proporciones iguales con el generador alternativo representado por la potencia P_{inv} del circuito inversor (mostrada en la Fig. 18(b)). Al momento de aplicarse la perturbación, se observa la manera como el inversor de potencia es desconectado temporalmente debido a la pérdida de sin-

cronización, manifestándose por los valores nulos en la potencia P_{inv} que son asumidos por el generador de referencia a través de P_g . Posterior al transitorio, ambos generadores regresan a condiciones estacionarias alrededor de valores levemente inferiores a los obtenidos previo a la perturbación, correspondiendo precisamente con el cambio de carga equivalente. Dicha modificación en el valor de la demanda se observa a través de la potencia total P_L en la carga mostrada en la Fig. 18(c).

Las oscilaciones de potencia observadas no corresponden con problemas de sincronización, sino de control de flujos de carga (el control de generación supera el alcance del presente trabajo de grado).

Es interesante hacer notar que a nivel de simulación no se realizó un cambio de carga directo a través de alteración de la impedancia R_L , sino de manera indirecta a partir de modificaciones en las características de la tensión del generador de referencia V_g . En la práctica, se espera que al modificar el valor de la impedancia de carga la respuesta natural del grupo electrógeno sea alterar la forma de onda generada en modo consistente con lo presentado en las simulaciones. La validación experimental del algoritmo EPLL propuesto, será el tema central del siguiente *Capítulo*.

Figura 17. Reparto de potencias entre generador de referencia (P_g) e inversor de potencia (P_{inv}) y superposición de contribuciones en la carga (P_L)



3. SISTEMA HÍBRIDO EXPERIMENTAL

El sistema híbrido de generación dimensionado y simulado será validado en el presente *Capítulo* a partir de la construcción de un prototipo experimental en el *Laboratorio de Integración Energética* del Grupo *GISEL*, localizado en el *Edificio de Investigaciones* del *Parque Tecnológico UIS - Guatiguará*.

A partir de ello, se realizará una descripción de la estructura general del sistema y de los elementos empleados, además de su respectiva interconexión y configuración.

Posteriormente se procederá con la realización de pruebas experimentales para verificar las predicciones obtenidas a partir de los análisis realizados a nivel de simulación.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema híbrido de generación definido en la Fig. 10, se implementó a nivel de laboratorio a partir de la integración de los elementos incluidos en el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 18. En particular, las etapas que constituyen el esquema experimental corresponden con:

- Como *fuentes de referencia* se emplea el generador comercial marca *EVANS G16MG0300TH* de 1.6 [kW] para alimentación monofásica de 110 [V] RMS / 60 [Hz], constituido a su vez por un generador síncrono sin escobillas acoplado a un motor *Thunder* de 3 [HP] y 90 [cc] operando a 3600 [RPM], según se ilustra en la Fig. 19.

Figura 18. Diagrama de bloques para montaje del sistema híbrido de generación

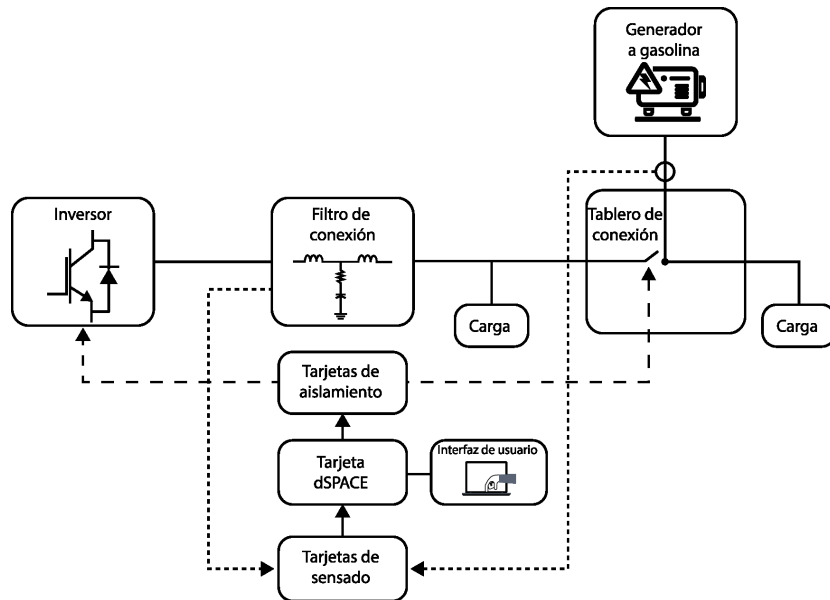
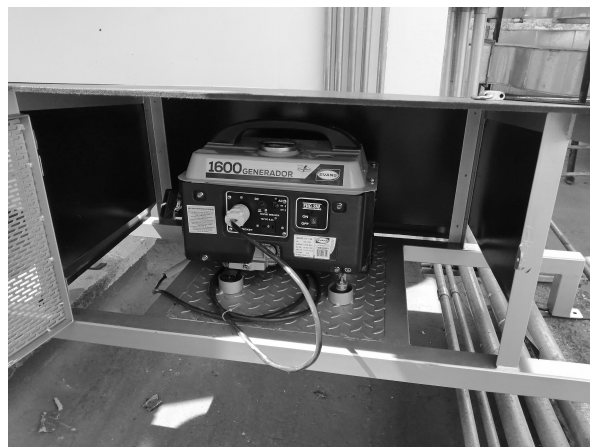
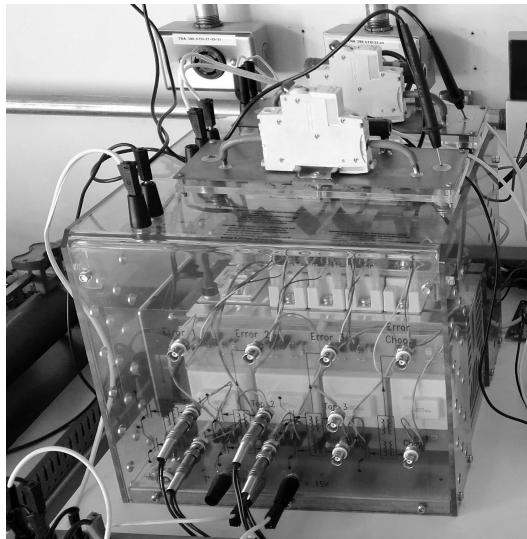


Figura 19. Grupo electrógeno de base para pruebas de laboratorio



- Por su parte, la *fuentes renovable* es emulada por un circuito inversor de potencia *SEMIKRON Semiteach IGBT* (www.semikron.com) con 6 transistores IGBT configurados en puente H (puente completo) y con entrada de corriente continua (bus DC) mediante una fuente constante. La Fig. 20 ilustra la apariencia física del dispositivo.

Figura 20. Inversor de potencia *SEMIKRON Semiteach IGBT*



- El *filtro de conexión* tipo LCL, esta compuesto por dos bobinas *Hammond Manufacturing* de 5 [mH] / 20 [A], un capacitor cerámico de 10 [uF] a 120 [V] y una resistencia de 6 Ω . Es conveniente mencionar que las bobinas empleadas en el filtro, son el mismo tipo de bobinas empleadas como impedancia de acople entre las fuentes y la carga. La Fig. 21 ilustra la apariencia física de dicho inductor.
- A partir de las características de demanda definidas en la *Sección 2.2*, se realizó el diseño y construcción para un *banco de cargas* según el esquema ilustrado en la Fig. 22, para el cual se destacan tres ramales circuitales constituidos cada uno por cinco bombillas incandescentes de diferente potencia, un

Figura 21. Inductor empleado para filtrado y acople de generadores



tomacorriente y dos protecciones termomagnéticas, con valores indicados en el diagrama.

- La *tarjeta de aislamiento* se utiliza para realizar el desacople eléctrico entre las señales de control y de potencia, como alternativa de protección ante fenómenos de sobrecarga o cortocircuito. Adicionalmente, realiza un acondicionamiento de los niveles de señal que salen de la tarjeta de control (pasando del rango 0-5 [VDC] a 0-15 [VDC]) hacia el inversor de potencia y los contactores encargados de conectar los generadores a la carga. El diagrama esquemático para dicha tarjeta se muestra en la Fig. 23 con diseño realizado por Meneses y Almeyda en ³¹.
- El sensado de las magnitudes eléctricas del sistema se realizó utilizando sensores de efecto hall de marca LEM y referencias LV 25-P (para voltaje) / LA 25-NP (para corriente). La apariencia física de los dispositivos se aprecia en la

³¹ Victor E. MENESES AGRESOTH y Jaime A. ALMEYDA RUEDA. *Sistema de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH IGBT de SEMIKRON*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2014.

Figura 22. Esquema de potencia y banco de cargas

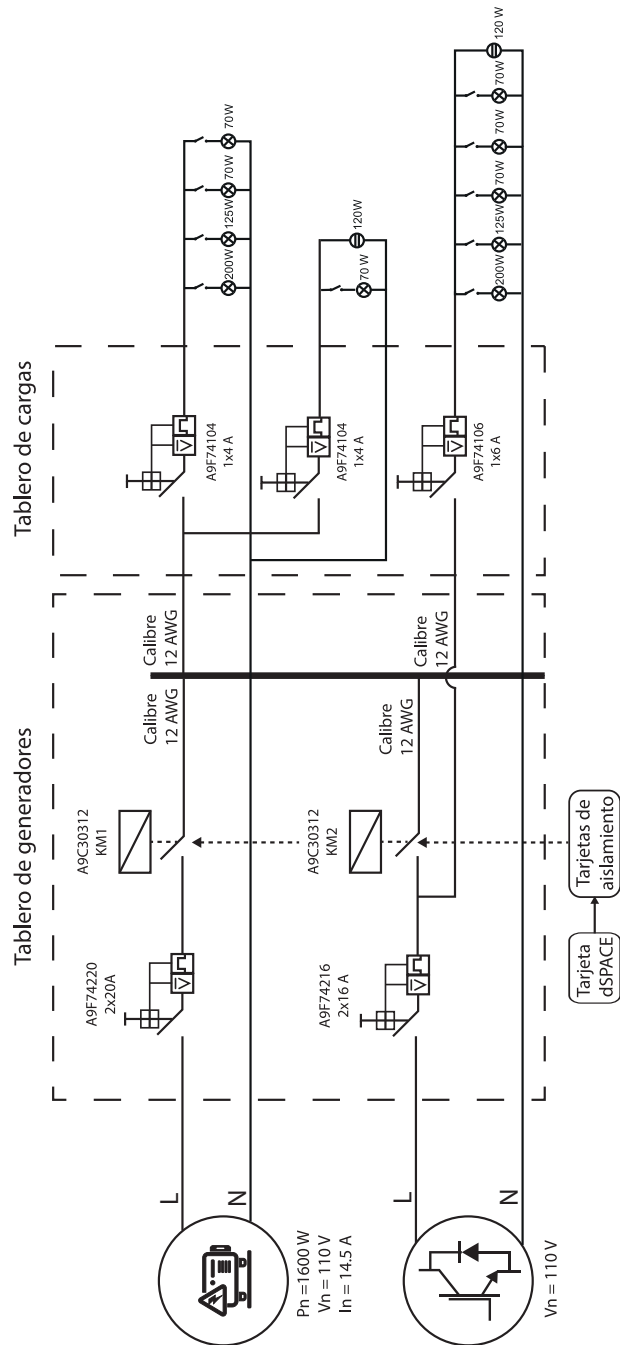


Figura 23. Diagrama esquemático de la tarjeta de aislamiento

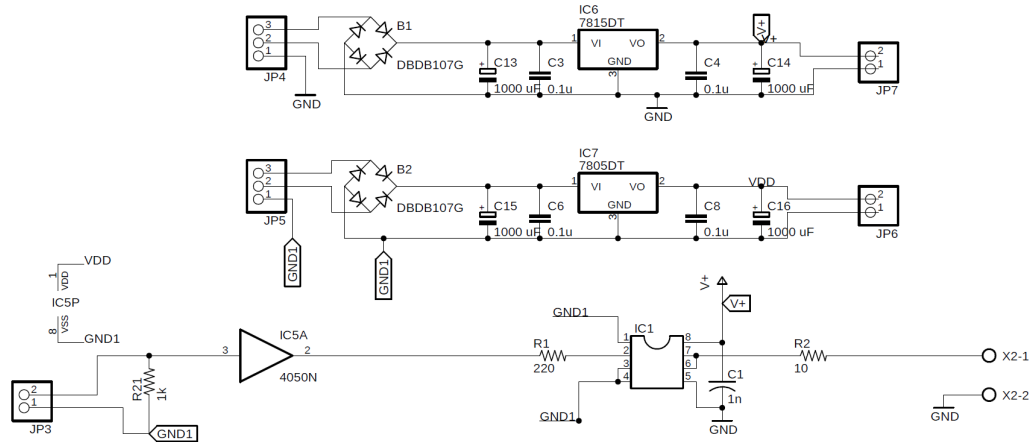


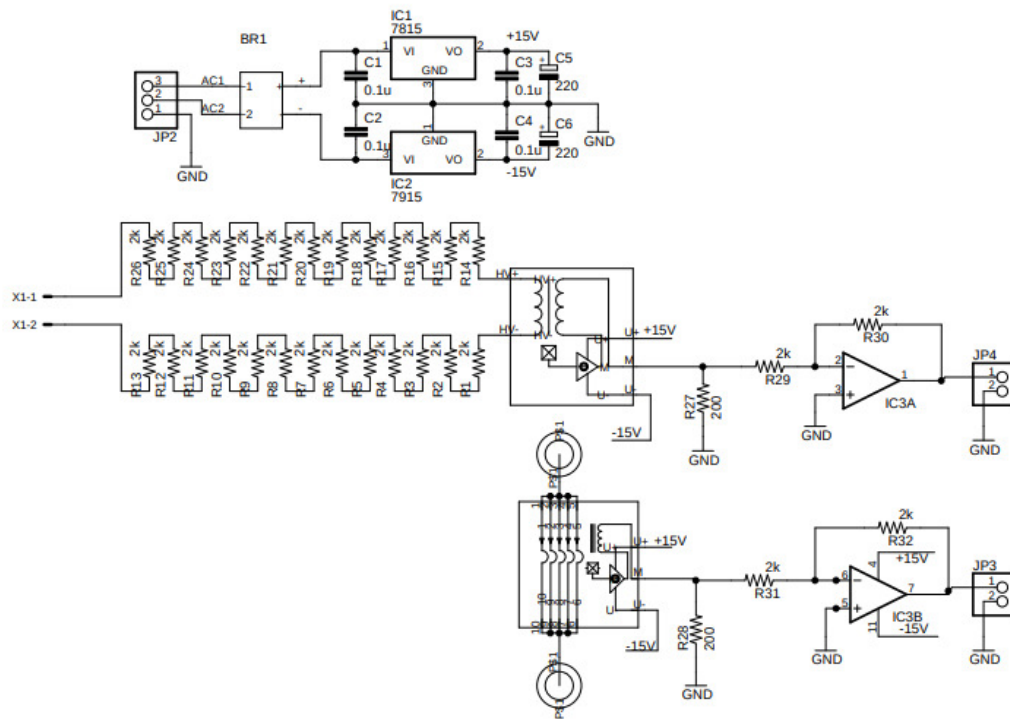
Fig. 25(a), donde además se muestra una tarjeta de circuito impreso que complementa el montaje con elementos de amplificación y acople, que a su vez se configuran según el diagrama esquemático de la Fig. 25(b). Para detalles al respecto del diseño de la tarjeta de sensado se sugiere al lector interesado consultar ³¹. De otro lado, sus especificaciones técnicas más relevantes pueden resumirse en lo siguiente: rangos de medida de 10-500 V (LV 25-P) y ± 36 A (LA 25-NP); corriente nominal de 10 mA; tensión de alimentación en corriente continua de ± 15 V y ancho de banda de 150 kHz.

- Para la correcta interacción con el prototipo experimental se realizó la captura y envío de señales a través de la *tarjeta de control* dSPACE de referencia *DS1104*, especialmente concebida para prototipado rápido de algoritmos de control a través de *MATLAB Simulink*. La apariencia física de la tarjeta se muestra en la Fig. 25, y cuenta entre otras con las siguientes características técnicas: procesador de 64 bits con soporte para operaciones de punto flotante; SDRAM de 32 MB y 8 MB de memoria flash; 4 canales multiplexados equipados con un convertor A/D de 16 bits para muestreo y retención con entrada máxima de 10 V; 4 canales paralelos con convertidores A/D independientes de 12 bits

Figura 24. Sensor utilizado para captura de magnitudes eléctricas del sistema



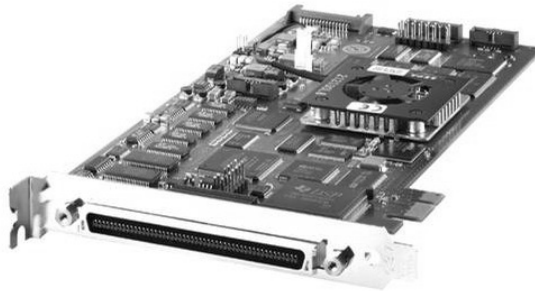
(a) Montaje en circuito impreso



(b) Diagrama esquemático

para muestreo y retención con entrada máxima de 10 V; 8 canales de conversión D/A con salida máxima a ± 10 V y ± 5 mA, además de 20 pines de entrada/salida digital con niveles del tipo TTL y corriente de hasta ± 5 mA.

Figura 25. Sistema de adquisición de datos dSPACE DS1104



- Una característica importante del prototipo experimental a ser desarrollado está en la capacidad de manipulación que posea un operario para interactuar con el sistema de generación, a partir de la asignación y ajuste de sus parámetros mediante una *interfaz de usuario*. Para este propósito se hizo uso de las características de prototipado rápido que posee el sistema de adquisición dSPACE a través de un entorno de programación de alto nivel denominado ControlDesk, enteramente compatible con el entorno Simulink de MATLAB. Más específicamente, a través de la herramienta Simulink Embedded Coder, MATLAB convierte de manera automática y casi invisible las diferentes etapas de un diagrama de bloques en código C++ optimizado para su apropiada operación en el procesador de la tarjeta dSPACE 1104. De esta manera, el ControlDesk permite acceder a los datos adquiridos por los puertos de entrada del sistema de adquisición, visualizar la información generada en los puertos de salida y recibir parámetros ingresados de manera arbitraria por el usuario,

atendiendo a la estructura ilustrada en la en la Fig. 26.

- Finalmente, las señales de potencia se concentran en un *tablero de conexión*, al cual llegan las líneas del generador a gasolina (*fuentes de referencia*), del inversor de potencia (*fuentes renovables*) y la conexión hacia el banco de cargas, al igual que las señales provenientes de la *tarjeta de control* para el accionamiento de contactores encargados de conectar o desconectar los generadores a la carga (ver Fig. 22). Es importante mencionar en este punto que el generador a gasolina fue ubicado en el techo del *Edificio de Investigaciones del Parque Tecnológico UIS - Guatiguará*, tomando en cuenta su incidencia en niveles de ruido y emisiones de agentes contaminantes. Por tanto, fue necesario realizar el respectivo cableado (empleando conductores duplex AWG #12) hasta el *Laboratorio de Integración Energética* del Grupo *GISEL*, ubicado en el tercer piso del mismo recinto.

De esta manera, fue posible constituir en laboratorio el sistema de híbrido de generación ilustrado en la Fig. 27.

3.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

La operación del sistema experimental, se resume a través del diagrama GRAFCET mostrado en la Fig. 28. A partir de ello, es posible describir los estados operativos del prototipo de generación híbrido mediante la siguiente secuencia de pasos:

- I. *Energización del sistema, sin conexión entre fuentes*. En este paso inicial se energizan los circuitos correspondientes al inversor de potencia y a los dispositivos de sensado. Adicionalmente, se inicia la marcha del generador a gasolina;
- II. *Carga de programa en tarjeta dSPACE*. La rutina previamente diseñada y compilada en el *Simulink Embedded Coder*, permitirá a partir de su ejecución la

Figura 26. Esquema de prototipado rápido en dSPACE ControlDesk

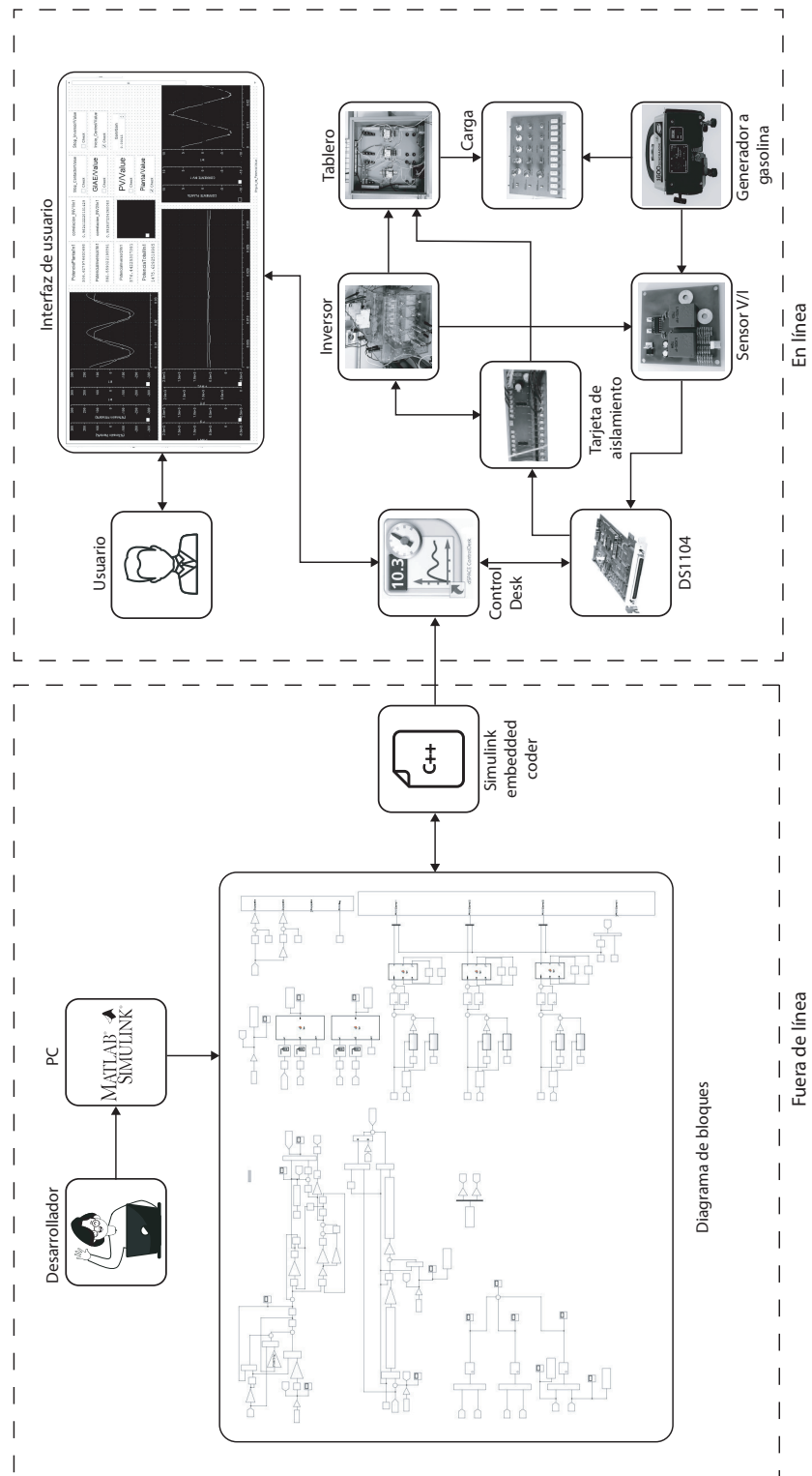
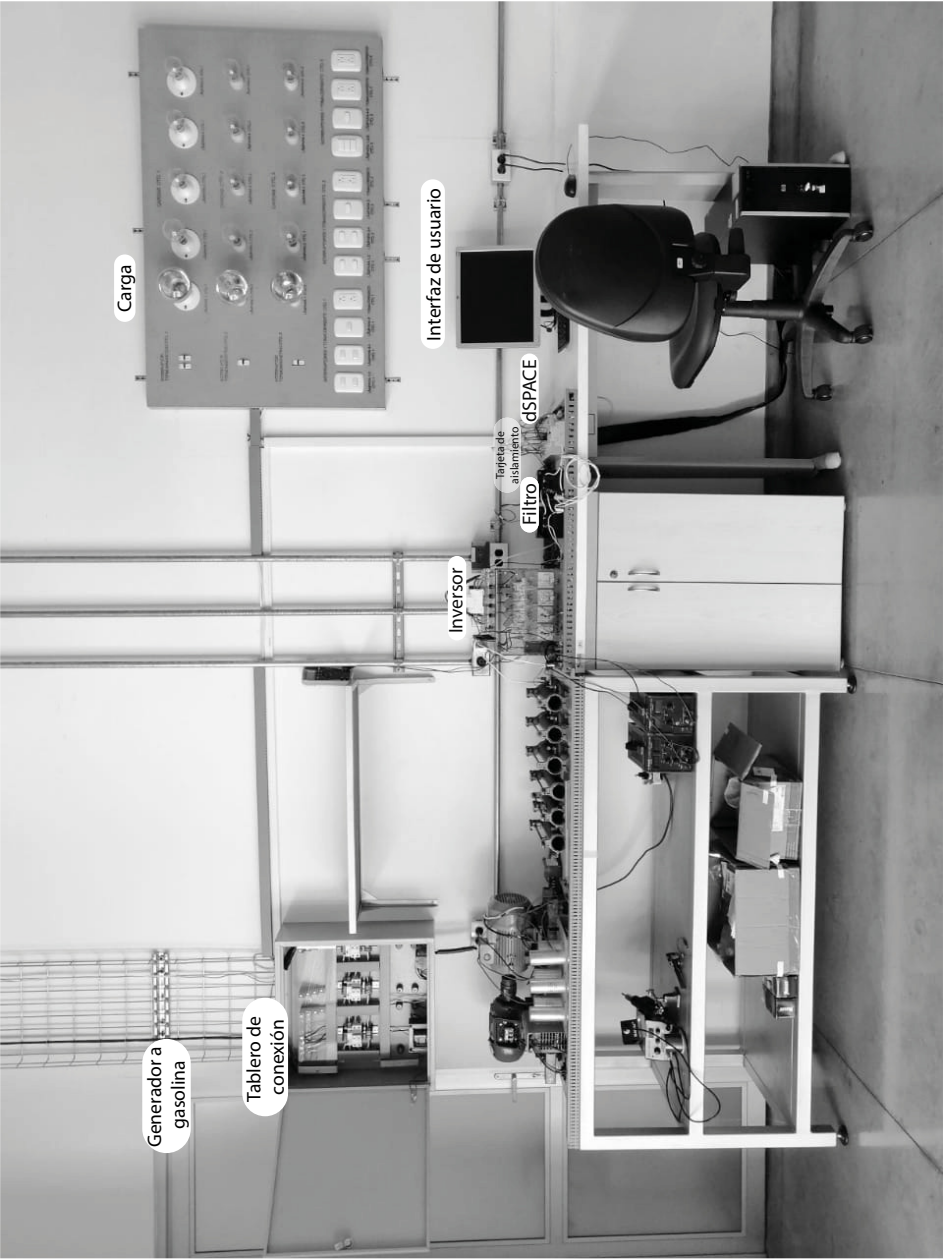


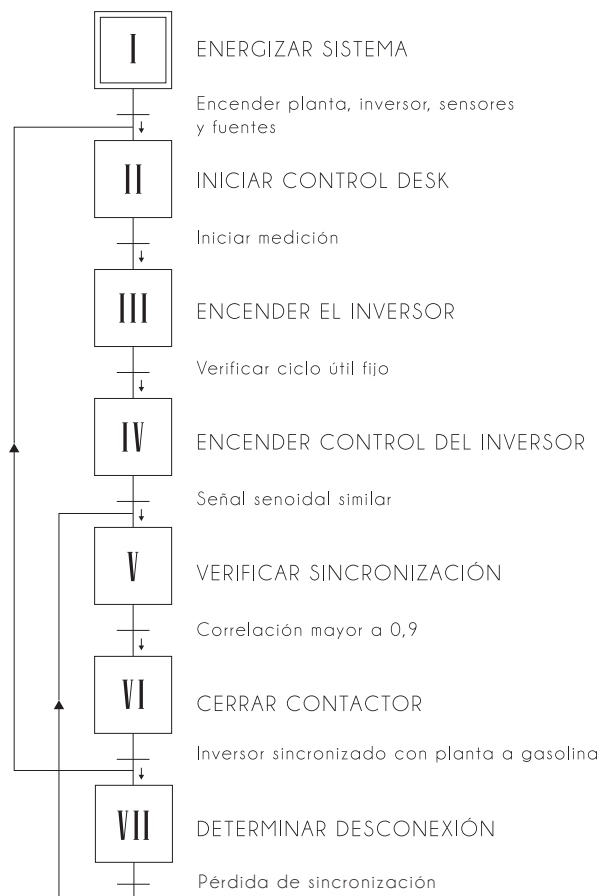
Figura 27. Prototipo experimental para sistema híbrido de generación implementado en laboratorio



medición de las variables eléctricas del sistema y el accionamiento de los contactores de conexión tanto de los generadores como del banco de cargas;

- III. *Operación no regulada del inversor de potencia.* Inicialmente se realiza la operación del inversor en lazo abierto; es decir, para un ciclo útil de valor predefinido. Lo anterior con el fin de establecer una condición apropiada para el cierre del lazo de control resonante;
- IV. *Operación regulada del inversor de potencia.* Una vez se verifica la apropiada operación en lazo abierto para el circuito inversor, se realiza la habilitación de los lazos de control resonante que aseguran la forma de onda con característica senoidal en el voltaje de salida del esquema requerida para establecer la posterior sincronización entre generadores;
- V. *Cálculo de desfase y corrección para sincronización.* Se procede con la aplicación del algoritmo EPLL y a partir de ello se determina la condición de sincronización a partir del cálculo de coeficiente de correlación ρ ;
- VI. *Conexión entre fuentes sincronizadas.* Una vez detectada la sincronización, se procede con el cierre del contactor que realiza la interconexión paralela entre el circuito inversor de potencia y el generador a gasolina. Asimismo, este contactor será automáticamente deshabilitado cuando el coeficiente de correlación se encuentre por debajo de su valor mínimo ($\rho \leq 0.995$);
- VII. *Desconexión por pérdida de sincronización.* La pérdida de sincronización generará una nueva condición operativa del autómata que obliga a desvincular temporalmente los generadores hasta retomar el enganche de fase.

Figura 28. Diagrama GRAFCET de operación del sistema híbrido experimental



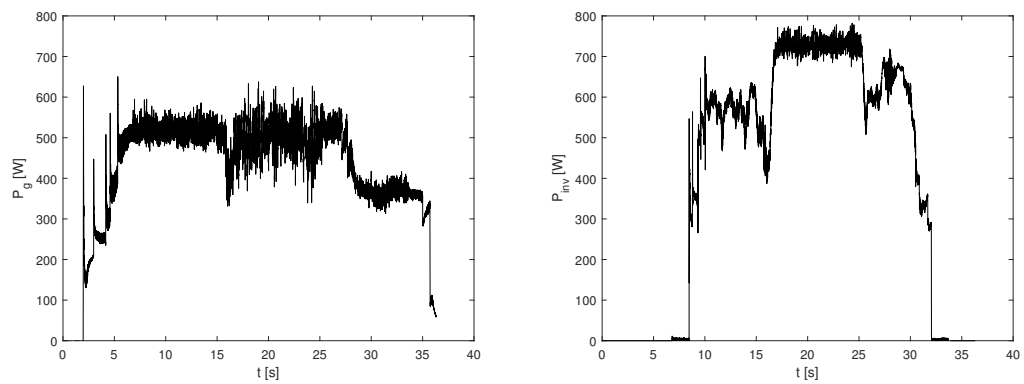
3.3. VERIFICACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Con el fin de evaluar el funcionamiento del prototipo implementado y de los algoritmos de control, se realizaron procedimientos experimentales para replicar el escenario de simulación analizado previamente en la *Sección 2.3*.

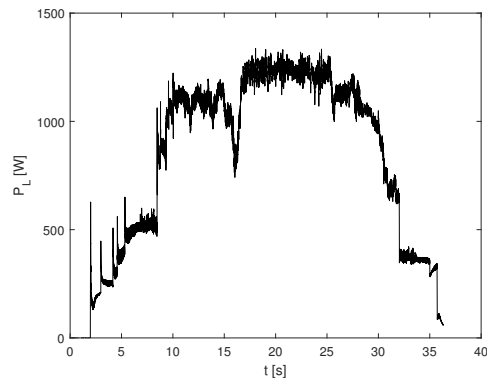
Para ello, se procedió con la ejecución del sistema a condiciones nominales de carga (i.e. 1 [kW]) siendo asumida la demanda en primera instancia por parte del grupo electrógeno. Posteriormente, alrededor de $t = 6.8$ [s] se realizó la combinación con el inversor de potencia para distribuir en proporciones iguales el consumo. Adicionalmente, en $t = 15$ [s] se aplicó un incremento de 300 [W] en la demanda para observar la respuesta del sistema ante perturbaciones. De esta manera, la Fig. 29 muestra el reparto de potencias entre el generador de referencia (P_g) y el circuito inversor (P_{inv}), adicional a la superposición de contribuciones en la carga (P_L), permitiendo evidenciar la apropiada operación del sistema en cuanto respecta a la integración de generadores como sistema híbrido.

En particular, la Fig. 30 muestra en detalle el cálculo para el índice de correlación $\rho_{V_c V_{gf}}$ junto con las respectivas formas de onda para la tensión V_g a la salida del generador convencional, su versión filtrada V_{gf} y la señal experimental V_c obtenida como salida de tensión en el inversor de potencia. De estos resultados es claro que existe una detección de sincronización por parte del algoritmo EPLL y a partir de ello una conexión controlada de los generadores en el esquema de configuración en red.

Figura 29. Verificación experimental para reparto de potencias

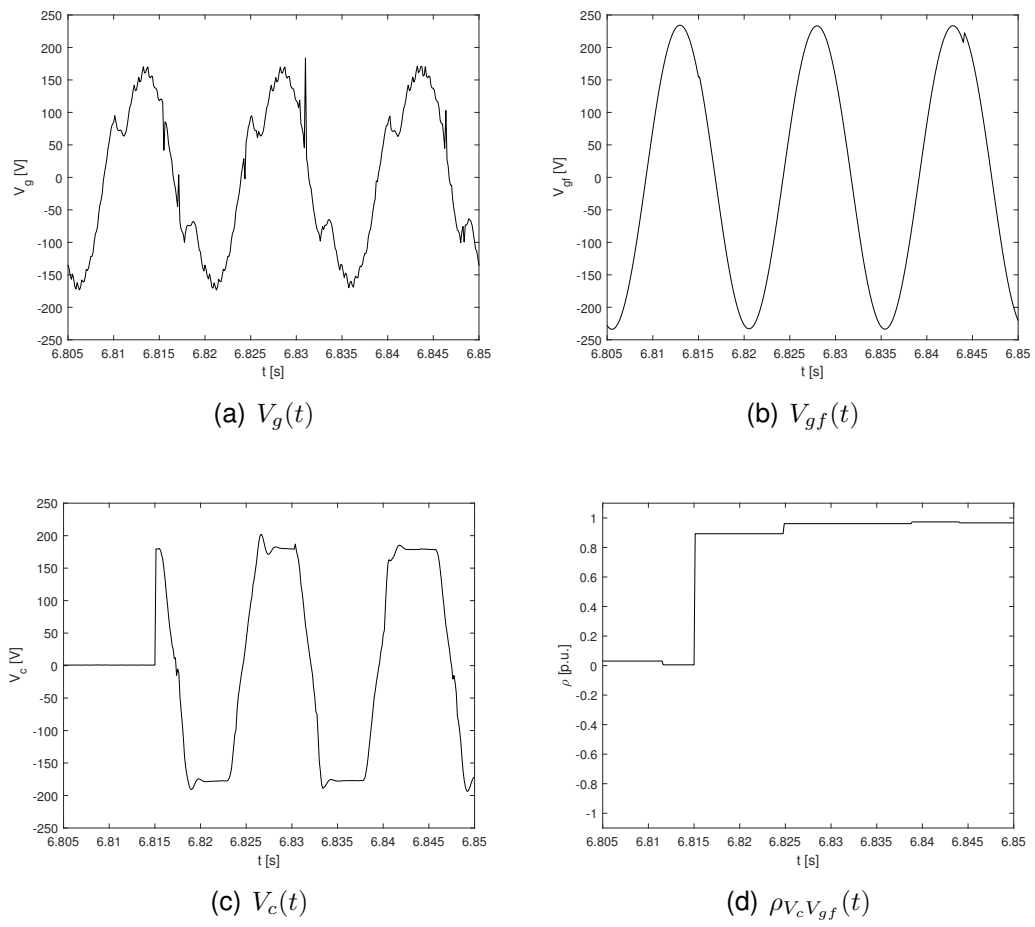


(a) Potencia $P_g(t)$ en generador de referencia (b) Potencia $P_{inv}(t)$ en circuito inversor



(c) Potencia $P_L(t)$ resultante en la carga

Figura 30. Señales experimentales de voltaje y cálculo para índice de correlación



4. RECOMENDACIONES

El algoritmo EPLL propuesto basa su criterio de conexión (i.e. detección de sincronización) en el valor calculado para el índice de correlación ρ . Por tanto, tomando en cuenta las características del ruido de medición experimentado en señales reales, conviene introducir un umbral para evitar falsas conmutaciones por efectos de cambios instantáneos en valores de señal. De esta manera, un suavizado (o filtro de paso bajo) permitirá realizar transiciones menos abruptas entre los instantes de conexión y desconexión de los generadores, evitando incorporar perturbaciones innecesarias al sistema experimental en laboratorio.

5. TRABAJO FUTURO

El presente trabajo de grado busca realizar un aporte para constituir una microrred experimental que permita realizar estudios en gestión de recursos energéticos para un sistema aislado a partir de control jerárquico.

Por tanto, un complemento directo para los resultados presentados corresponde con la integración de más unidades de generación al igual que de esquemas de control de nivel superior, para definir las referencias de los lazos de potencia (estrategias de despacho).

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo de grado, fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación denominado: “*Control centralizado para un sistema de generación de energía con potencial aplicación en zonas rurales del departamento de Santander*”, financiado por la Universidad Industrial de Santander a través del código VIE-UIS 2479.

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

- Se realizó la conexión en red aislada entre un grupo electrógeno de baja potencia y un inversor monofásico a manera de sistema de generación híbrido. En particular, empleando un algoritmo para realizar el enganche de fase mejorado (EPLL - enhanced phase locked-loop) entre la señal de referencia senoidal provista por un grupo electrógeno y un inversor de potencia actuando como fuente renovable, fue posible constituir su conexión paralela a manera de microrred híbrida aislada. Se plantearon pruebas mediante simulaciones en MATLAB empleando el paquete `SimScape` de *Simulink*. Posteriormente, se realizó la implementación en laboratorio para el sistema híbrido de generación alimentando una demanda de 1 [kW]. Los resultados (tanto de simulación como a nivel experimental) muestran una apropiada respuesta del algoritmo de sincronización propuesto, ante cambios en la demanda y ante la presencia permanente de componentes armónicas en la forma de onda de tensión para el generador de referencia.

De manera más puntual:

- Se dimensionó un sistema de generación de baja potencia basado en la combinación de un grupo electrógeno y una fuente alternativa. Tal y como fue abordado en la *Sección 2.2*, se propuso un esquema de microgeneración a partir de la combinación paralela entre un grupo electrógeno de 1.6 [kW] y un inversor de potencia alimentado por una fuente de corriente continua simulando el recurso renovable. El objetivo del sistema correspondió con satisfacer la demanda energética para una carga resistiva de 1 [kW] representando el consumo promedio de una vivienda en zona rural.
- Se caracterizaron las variaciones nominales en un grupo electrógeno comercial sometido a cambios de carga. Para ello, se analizó la forma de onda de voltaje proporcionada por un generador a gasolina *EVANS G16MG0300TH* mediante la descomposición espectral documentada en la *Sección 2.3*. A partir de lo anterior, se cuantificó la influencia de componentes armónicas para dicha señal de referencia permitiendo sintetizar un modelo matemático aproximado a través de la ecuación (3) que facilitó la verificación por simulación del algoritmo de sincronización propuesto y la inclusión de variaciones nominales de amplitud, frecuencia y fase en el esquema de generación.
- Se analizó por simulación un método para conexión a la red de un inversor en un sistema monofásico aislado. Más precisamente, las *Secciones 2.1* y *2.2* exploraron respectivamente la formulación de un método para determinar los parámetros de fase y amplitud en una señal senoidal de referencia y su correspondiente aplicación para sincronizar las señales de un arreglo de generadores configurados en red. Adicionalmente, en la *Sección 2.3* se realizó la respectiva verificación del método propuesto a partir de simulación numérica empleando modelos circuitales del paquete *SimScape* en el entorno *Simulink* de MATLAB.

- Se verificó experimentalmente el método de conexión a la red aislada empleando el grupo electrógeno comercial. A partir de los desarrollos presentados en el *Capítulo 3* se realizó el dimensionamiento e implementación para un prototipo de sistema híbrido de generación eléctrica, basado en la conexión sincronizada de un generador a gasolina y un inversor de potencia actuando como recurso renovable. El algoritmo *EPLL* propuesto fue codificado en MATLAB y ejecutado en un sistema de desarrollo dSPACE para accionar el disparo controlado de un puente inversor basado en transistores IGBT. El sistema experimental implementado en el *Laboratorio de Integración Energética* del Grupo *GISEL* (localizado en el *Edificio de Investigaciones del Parque Tecnológico UIS - Guatiguará*) se muestra en la Fig. 27.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO RUEDA, Pedro F. y Cristian D. CAMACHO PARRA. *Localización de fuentes de energía y dimensionamiento del sistema de distribución en una micro-red aislada de baja tensión*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2018 (vid. pág. 12).

AGAMEZ HERAZO, Stefany y Stefanny ALFONSO PALACIO. *Dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de generación para el nuevo edificio de la E3T*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2016 (vid. pág. 11).

ANGARITA SUAREZ, Karen J. y Marcela C. PABÓN PACHÓN. *Dimensionamiento de una solución de generación y almacenamiento de energía para abastecer la demanda eléctrica de una red aislada*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2018 (vid. pág. 12).

ASCO, Power Technologies. *Adverse Effects of Low Load Operation on Diesel Generating Sets*. Cleveland, OH, USA, 2018 (vid. pág. 25).

CARRASCO, J.M. y col. "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey". En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 29 (2004), págs. 1002-1016 (vid. pág. 13).

CASTELLANOS IBARRA, Hermes Enrique. *Empleo del biodiesel como sustituto de los combustibles líquidos fósiles (diésel) y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a su uso*. Monografía (Especialista en Ingeniería Ambiental). Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2009 (vid. pág. 9).

DULCE MERA, Fredy Alexis. *Modelamiento y control de una microrred en modo isla*. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería Electrónica y de Computadores). Colombia: Universidad de los Andes, 2015 (vid. pág. 13).

ESSA, Norma técnica. *Normas para cálculo y diseño de sistemas de distribución*. 2014 (vid. pág. 13).

GÓMEZ MONTAÑEZ, Cristian A. y Yollmar I. CORDOBA FRAGOZO. *Gestión y control de un sistema de almacenamiento de energía híbrido alimentado por paneles fotovoltaicos para la energización de un motor DC*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019 (vid. pág. 12).

HERNÁNDEZ VARGAS, Diana M. *Despacho económico y su aplicación en microrredes eléctricas*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2019 (vid. pág. 24).

HIROSE, TOSHIRO e Hirofumi MATSUO. "Standalone Hybrid Wind-Solar Power Generation System Applying Dump Power Control Without Dump Load". En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59.2 (2012), págs. 988-997 (vid. pág. 10).

JABECK, B. *The Impact of Generator Set Underloading*. Electric Power, Caterpillar Inc. 2014 (vid. pág. 25).

KARIMI-GHARTEMA, M. "Enhanced Phase-Locked Loop". En: Mississippi: IEEE Press, 2014. Cap. 2 (vid. pág. 20).

MACHUCA MAYORGA, Jaime Andrés. *Control droop de un generador de inducción en una microrred simple*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2020 (vid. pág. 28).

MENESES AGRESOTH, Victor E. y Jaime A. ALMEYDA RUEDA. *Sistema de adquisición y adecuación de señales eléctricas para el control y monitorización del módulo SEMITEACH IGBT de SEMIKRON*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2014 (vid. págs. 39, 41).

OGATA, K. *Ingeniería de control Moderna*. Pearson Education, 2010 (vid. pág. 22).

PARRA SILVA, Evert F. y Jesús E. OSORIO SANTOS. *Diseño y construcción de un sistema híbrido GRID TIE fotovoltaico casero con un consumo instantáneo máximo de 2000 Watt*. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería Mecánica, 2014 (vid. pág. 11).

PULKRABEK, Willard W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Pearson Prentice-Hall, 2003 (vid. pág. 9).

- REY LÓPEZ, Juan M. y Pedro P. VERGARA BARRIOS. *Diseño de una microred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2012 (vid. pág. 12).
- RODRÍGUEZ, N.F. GUERRERO y col. "Synchronization algorithms for grid-connected renewable systems: Overview, tests and comparative analysis". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 (2017), págs. 629 -643 (vid. pág. 13).
- RODRÍGUEZ ORTIZ, Andrés F. *Diseño de un sistema híbrido mediante energías alternativas para una vivienda ubicada en una parcela en La Mesa de los Santos/Santander*. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería Mecánica, 2017 (vid. pág. 11).
- SERRANO DOMÍNGUEZ, Daniel. *Análisis comparativo de técnicas de sincronización con la red eléctrica*. Tesis de maestría (Magister en Sistemas de Energía Eléctrica). España: Universidad de Sevilla, 2014 (vid. págs. 16, 17).
- SUPERINTENDENCIA DELEGADA PARA ENERGÍA Y GAS, dirección técnica de gestión de energía. *Zonas no interconectadas ZNI diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2018*. Bogotá, D.C., 2018 (vid. pág. 9).
- TORRES VERA, J. *Low Load Profile How does it negatively affect a generator set?* HIMOINSA. 2018 (vid. pág. 25).

VIVEROS DELGADO, Jesús Alberto. *Control de una microrred aislada que incluye generadores basados en biomasa*. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería Electrónica y de Computadores). Colombia: Universidad de los Andes, 2016 (vid. pág. 12).

WALPOLE, Ronald E. y col. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson Education, 2012 (vid. pág. 28).

ZAMUDIO SAENZ, F. J. *Modelado y diseño de un PLL con oscilador basado en filtro pasa banda*. Tesis de maestría (maestro en ciencias: especialidad electrónica). México: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2015 (vid. pág. 16).