UNIVERSIDAD DON BOSCO
VICERRECTORIA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



TRABAJO DE GRADUACION

Diseño y construcción de un circuito acondicionador de señales para el control de flujo de potencia en un sistema eólico basado en generador síncrono de imanes permanentes

PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRO EN GESTIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

LECTOR
Ingeniero Herbert Israel Cardona Flores

PRESENTADO POR
Federico José Machado Olivares

Antiguo Cuscatlán, La libertad, El Salvador, Centro América
Marzo de 2013

Diseño y construcción de un circuito acondicionador de señales para el control de flujo de potencia en un sistema eólico basado en generador síncrono de imanes permanentes[1]

F Machado, Universidad Don Bosco[2]. A Moallem, Queen's University[3]

Resumen—La energía eólica es parte fundamental de los prometedores proyectos alrededor del mundo para integrarse al esfuerzo de suministrar energía verde a las ciudades. Con objeto de proveer la cantidad necesaria de energía a la red de distribución desde el sistema generador eólico, se ha diseñado y construido un acondicionador de señales que permite medir tensiones y corrientes trifásicas, así como la tensión DC en la etapa de rectificación, para el Convertidor Electrónico de Potencia (PEC, de sus siglas en inglés). Los parámetros eléctricos que recibirá el acondicionador de señales, serán aislados eléctricamente y ajustados a valores proporcionales para entregarlos a un Procesador Digital de Señales, quien establece el control de todo el sistema.

***Índice de términos*— acondicionamiento de señales, Aislamiento, energía eólica, generador síncrono de imanes permanentes.**

I. INTRODUCCION

Los Sistemas Convertidores de Energía Eólica (WECS) se han convertido en una de las más viables, que utilizan recursos renovables, a partir de los incrementos en los combustibles fósiles o donde no existen grandes ríos que posibiliten obtener energía limpia mediante hidro generadores; sin embargo, las condiciones de viento son confiables durante la mayor parte del año y ofrecen un escenario promisorio para desarrollar proyectos eólicos. [1].

A través de los años, la tecnología usada en generadores eólicos ha sido mejorada. En la década pasada, los Generadores de Inducción con Alimentación Doble (DFIG) y los Generadores de Inducción tipo Jaula de Ardilla (SCIG) fueron ampliamente utilizados [2]; sin embargo, debido a los altos costos de mantenimiento y la baja eficiencia, los Generadores síncronos de Imanes Permanentes (PMSG) empezaron a incrementar su demanda porque presentaban mejoras notables en la reducción de costos de mantenimiento y aumento en su eficiencia [3].

Dada la popularidad que están teniendo los PMSG, se propone el diseño y construcción del Circuito Acondicionador de Señales (CSC) para sensar diversos señales eléctricas presentes en WECS para retroalimentar con valiosa información al Sistema de Control Digital (DCS) y éste pueda accionar los componentes de potencia de PEC integrados a la red de distribución, entregando las tensiones y corrientes necesarias que se fijan en el contrato de compra venta de energía con la distribuidora.

El CSC recibe los siguientes tipos de señales: Los voltajes línea a línea de una red trifásica con niveles comerciales de distribución a $208V_{RMS}$, las corrientes trifásicas que recibe una carga conectada a los voltajes antes mencionados de hasta $15A_{RMS}$ y la tensión DC proveniente de un rectificador trifásico de onda completa, conectado al generador eólico, totalizando 7 señales. Todas las señales anteriores, se traducen a valores instantáneos entre 0 y 3V que recibirá el DSP para continuar con el proceso de control digital del PEC.

En el desarrollo del presente documento se describe la forma en que los PMSG se integran a la red así como las variables eléctricas que el CSC tendrá la posibilidad de medir. Se explican las consideraciones, tanto del proceso de diseño en el circuito esquemático como la elaboración de la placa impresa y, finalmente, se describen las características eléctricas presentes en el diseño final.

II. EL GENERADOR SINCRONO DE IMANES PERMANENTES

Los WECS han ido evolucionando continuamente alcanzando mejores niveles de eficiencia, reducción en sus costos de mantenimiento y fabricación, así como el cumplimiento de los requerimientos exigidos por las distribuidoras para conectarse a la red. El tamaño y la potencia de los WECS dependen de diversos factores que usualmente están relacionados a los mismos componentes en el sistema que reducen su eficiencia; por ejemplo, la caja de engranajes, el generador en sus propiedades intrínsecas y el PEC.

Sin embargo, debido a múltiples ventajas de los PMSG, que incluyen menos labor de mantenimiento y mayor eficiencia,

[1] Este proyecto fue patrocinado por Electrical and Computer Engineering Department en Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

[2] F.Machado es Director Académico del Laboratorio de Eléctrica en la Universidad Don Bosco en El Salvador, América Central (Federico.machado@udb.edu.sv).

[3] A. Moallem es estudiante de doctorado en Queen's University, Kingston, Ontario, Canada (ali.moallem@queensu.ca).

han motivado a los fabricantes como Vestas, General Electric, Siemens and Gamesa a utilizarlos con mayor frecuencia [1].

Las razones que motivaron a los fabricantes a utilizar generadores de imanes permanentes pueden deducirse de la siguiente tabla, la cual describe ventajas y desventajas en el uso de este tipo de generadores [4].

TABLA I
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PMSG

Tipo de generador	Ventajas	Desventajas
PMSG (VSWT-FSPC)	• Mayor aprovechamiento de la energía • Mayor controlabilidad e potencia activa y reactiva. • Ausencia de escobillas o anillos deslizantes • Menor esfuerzo mecánico • No tiene pérdidas de cobre en el rotor	• Alto costo de los imanes. • Demagnetización. • Proceso de construcción complejo. • Alto costo del PEC • Mayores pérdidas PEC • Grandes dimensiones.

Dónde:
FSPC Convertidor de potencia a plena escala
VSWT Turbina eólica de velocidad variable

A pesar de los altos costos del material para obtener los imanes y del valor inicial de la inversión, PMSG es la opción preferida por su mayor eficiencia, la cual es más preciada por las compañías generadoras de electricidad.

El generador puede ser modelado como se describe en la Fig 1 [5]. El sistema consiste del PMSG, la turbina, los convertidores electrónicos de potencia PEC y un sistema de control.

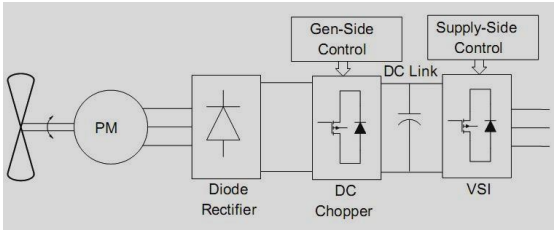

Fig 1. Diagrama esquemático de un sistema generador eólico.

III. VARIABLES ELECTRICAS A CONSIDERAR

En este capítulo se abordan todas las consideraciones previas al diseño del prototipo que se construirá inicialmente y que serán aplicadas para el diseño final del CSC. Debido a la nueva experiencia en el uso del AMC1100 en sus propiedades de aislamiento, disipación de calor en las resistencias de entrada y, en general el funcionamiento del circuito, se ha decidido diseñar y construir un primer prototipo de una sola etapa y, una vez se tengan los primeros resultados, se procederá a construir la versión final de CSC que incluirá 7 etapas de acondicionamiento.

A. Variables eléctricas del PMSG.

El generador eólico que se utilizará para el proyecto es del fabricante Alxion, modelo 300STM2M @ 350RPM, del cual se describen las características eléctricas en la tabla II:

TABLA II
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE ALXION 300STM2M

Característica	Unidades	Valor
Velocidad nominal	RPM	350
Potencia nominal	W	3141
Corriente a potencia nominal	Amps	7.3
Tensión a potencia nominal	V	255
Inductancia por fase	mH	17.3

Toda la energía producida por el generador trifásico es rectificada a manera de obtener una tensión DC que es filtrada, eliminando componentes de frecuencia distintos a la red de distribución, transientes e interferencias electromagnéticas para, finalmente, ser convertida en una señal trifásica de potencia que cumple con los requerimientos de la red local.

La meta del circuito es obtener valores proporcionales instantáneos a los parámetros eléctricos de voltaje y corriente entregados por el PEC en la salida mostrada en el diagrama de la Fig 1, así como la tensión DC presente en el punto DC Link. Se espera además que, con mínimas modificaciones al presente diseño, el circuito pueda acondicionar señales en otras secciones del WECS.

B. Variables eléctricas en PEC.

Los voltajes del sistema trifásico provenientes del generador serán rectificados y se obtendrán una tensión DC. Los valores esperados son:

Voltaje DC.

Considerando un rectificador trifásico y chopper de onda completa desde el generador descrito en la tabla II, con una tensión máxima entre líneas

$$V_{max} = V_{LL}\sqrt{3} = 208\sqrt{3} = 360.27\,V \quad (1)$$

$$V_{DC} = 3\,\frac{V_{max}}{\pi} = 344.03\,V \quad (2)$$

Este circuito será conectado a la red de distribución en Canadá, que de acuerdo al estándar de ANSI C84.1 especificaciones canadienses CAN3-C235 la tensión nominal de salida debería ser 120 V y se permite un rango entre 114 y 126 V [6].

Con objeto de medir las señales trifásicas de voltaje, el CSC debe tener la posibilidad de recibir:

Tensiones trifásicas Vab, Vbc, Vcd.

Tensión línea a línea RMS,

$$V_{LL\,RMS} = 120\sqrt{3} = 207.85\,V \quad (3)$$

Tensión línea a línea máxima es

$$V_{LL\,max} = 207.85\sqrt{2} = 293.94\,V \quad (4)$$

Tensión línea a neutro máxima es

$$\mathbf{V_{LN\,max} = 120\sqrt{2} = 169.71\ V} \quad \textbf{(5)}$$

Sin embargo, debido a las perturbaciones de la red, se establecerá un margen de tolerancia del 50% en el presente diseño.

La tensión VLN será:

$$\boldsymbol{V_{LN\,max} = 120\sqrt{2}\,(150\%) = 254.56\ V} \quad \textbf{(6)}$$

Corrientes trifásicas Vab, Vbc, Vcd.

A partir de las características técnicas del PMSG, descritas en la tabla II, ya que toda la potencia y, por ende, la corriente, provendrán del generador. No se esperan, bajo condiciones previstas, corrientes mayores a las entregadas por el generador en la salida del PEC.

$$I_{max} = 7.3\sqrt{2} = 10.32\ A$$

En este punto, las variables eléctricas con valores instantáneos a considerar, son:

- Tensión DC en PEC,
  0 a 344.03V **(7)**
- Voltaje trifásico en PEC / red de distribución,
  -254.56V a +254.56V **(8)**
- Corriente trifásica en PEC / a red de distribución,
  -10.32A a +10.32V **(9)**

IV. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO ESQUEMATICO

A. Etapa de aislamiento.

El CSC debe cumplir las siguientes características para proteger las secciones digitales del circuito de control ante posibles variaciones de tensión en el generador eólico, de la red e incluso interferencia electromagnética en el ambiente:

- Aislar las secciones de adquisición de altos voltajes y altas corrientes de aquellas las que procesan el acondicionamiento de las señales eléctricas.
- Convertir las corrientes a valores proporcionales de voltajes.
- Rechazar las interferencias electromagnéticas (EMI) provenientes de fuentes externas.
- Ser confiable mediante la presentación de un diseño sencillo.

Para lograr el aislamiento entre las secciones de altos voltajes y corrientes, se ha seleccionado el componente AMC1100, un amplificador de aislamiento totalmente diferencial para medición de energía.

La Fig 2 muestra las conexiones típicas que el fabricante recomienda para medir corrientes, la misma que, con pequeñas modificaciones, puede ser utilizada para el acoplamiento de voltajes. La alta relación de rechazo de modo común (CMRR) intrínseca del componente y los capacitores en su etapa de entrada, representan el filtro para EMI.

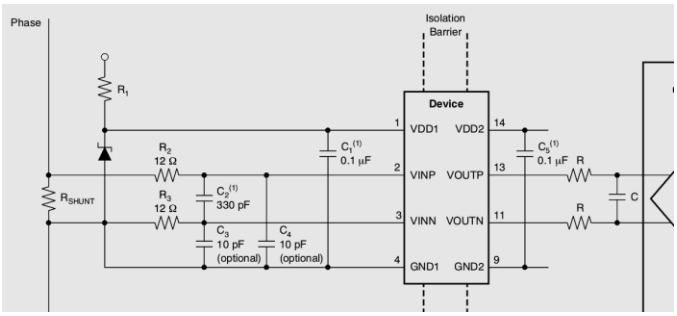

Fig 2. Conexiones típicas del AMC1100

Como puede apreciarse, la aplicación es sencilla y, además, la distribución de los terminales en el encapsulado descrita en la Fig 3, asegura el aislamiento físico apropiado desde el lado de alta potencia (HPS) y el de baja potencia (LPS).

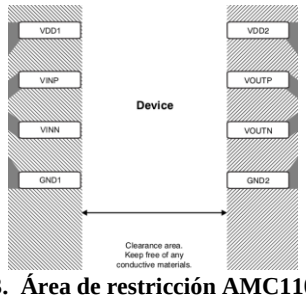

Fig 3. Área de restricción AMC1100

Habiendo definido el componente clave para lograr el aislamiento, se propone el circuito en la presente etapa de aislamiento en la Fig 4.

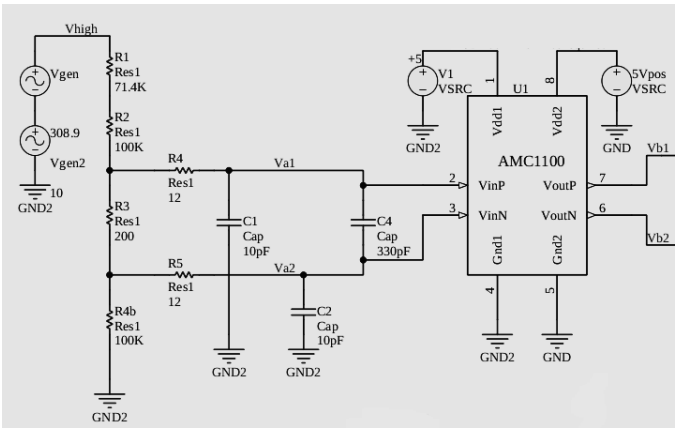

Fig 4. Etapa de alta tensión para el prototipo

Cálculo de los parámetros eléctricos en la etapa de aislamiento.

- Voltaje DC.

A partir de los componentes seleccionados con valores comerciales, se definen las ganancias parciales,

$$\mathbf{AV1_{DC} = \frac{R3}{R1+R2+R3+R4} = 736.38\times10^{-6}\ [adim]} \quad \textbf{(10)}$$

At AMC1100 input,

$$\mathbf{V_{AMCmax} = (344.03)\,(736.38\times10^{-6}) = 253.34mV} \quad \textbf{(11)}$$

El cual no excede considerablemente el máximo valor especificado por el fabricante de 250mV; además, de acuerdo a la hoja técnica del fabricante, el AMC1100 inicia su pérdida de linealidad a los 320mV

La ganancia nominal intrínseca del AMC1100 será identificada como AV2

$$\mathbf{AV2} = \mathbf{8}\ [\mathbf{adim}] \quad (12)$$

La ganancia total de la etapa de aislamiento es

$$\mathbf{AV1.AV2} = \mathbf{736.38 \times 10^{-6}}\ (\mathbf{8}) = \mathbf{5.891 \times 10^{-3}}\ [\mathbf{adim}] \quad (13)$$

Por ende, los rangos de valores posibles en la salida del AMC1100 son:

$$+(\mathbf{Vb1 - Vb2}) = +\mathbf{344.03}\ (\mathbf{AV1.AV2}) = +\mathbf{2.027\ V} \quad (14)$$

Y,

$$-(\mathbf{Vb1 - Vb2}) = -\mathbf{344.03}\ (\mathbf{AV1.AV2}) = -\mathbf{2.027\ V} \quad (15)$$

- Voltajes AC.

Para este caso, se toma en la presente etapa R1=0.

$$\mathbf{AV1_{AC}} = \frac{\mathbf{R3}}{\mathbf{R2+R3+R4}} = \frac{\mathbf{200}}{\mathbf{100K+200+100K}} = \mathbf{999 \times 10^{-6}}\ [\mathbf{adim}] \quad (16)$$

$$\mathbf{AV1_{AC}\ es\ aproximado\ a\ 1{\times}10^{-3}\ [adim]} \quad (17)$$

En la entrada del AMC1100 se tiene,

$$\mathbf{VAMC_max} = (\mathbf{254.56})\ (\mathbf{1 \times 10^{-3}}) = \mathbf{254.56mV} \quad (18)$$

Este valor no excede el máximo fijado de 250mV.

La ganancia nominal del AMC1100 es

$$\mathbf{AV2} = \mathbf{8}\ [\mathbf{adim}] \quad (19)$$

La ganancia total de esta etapa y para el presente voltaje AC, es

$$\mathbf{AV1.AV2} = (\mathbf{1 \times 10^{-3}})\ (\mathbf{8}) = \mathbf{8 \times 10^{-3}}\ [\mathbf{adim}] \quad (20)$$

Los rangos para los valores de tensión diferencial en la salida del AMC1100 son

$$+(\mathbf{Vb1 - Vb2}) = +\mathbf{254.56}\ (\mathbf{AV1.AV2}) = +\mathbf{2.037\ V} \quad (21)$$

Y,

$$-(\mathbf{Vb1 - Vb2}) = -\mathbf{254.56}\ (\mathbf{AV1.AV2}) = -\mathbf{2.037\ V} \quad (22)$$

Bajo condiciones eventuales en este tipo de tensiones, se procede a calcular valores extremos, considerando 320mV a la entrada del AMC1100.

$$\mathbf{Vhigh\ extreme = 320mV / AV1 = 320V} \quad (23)$$

Por tanto, de ambos análisis de tensión, la presente etapa puede soportar 126% respecto de los valores máximos esperados, tanto de tensión AC como de tensión DC.

- Cálculo de componentes para corrientes.

Para efectos de utilizar el principio utilizado en la etapa de aislamiento, R1, R2 y R4b se reemplazan por conductores y R3 se reemplaza por una resistencia especial que soporta altas corrientes; su valor de 0.01 ohmios, permitirá obtener 250mV cuando circulan por ella 25 amperios. Este valor de corriente excede ampliamente el valor máximo del generador y de los esperados a la salida del PEC para permitir en futuras modificaciones, aceptar mayores valores de corriente. La tensión en los terminales VinP-inN, en referencia a la Fig 2 se calcula:

$$\mathbf{V_{inP-inN}} = (\mathbf{25A})(\mathbf{0.01\ Ohm}) = \mathbf{0.250V} \quad (24)$$

El rango de tensión diferencial a la salida del AMC1100 a partir de las corrientes de entrada, son:

$$+(\mathbf{Vb1 - Vb2}) = +\mathbf{8}\ (\mathbf{Va1 - Va2}) = +\mathbf{8}\ (\mathbf{0.250}) = +\mathbf{2\ V} \quad (25)$$

Y,

$$-(\mathbf{Vb1 - Vb2}) = -\mathbf{8}\ (\mathbf{Va1 - Va2}) = +\mathbf{8}\ (\mathbf{0.250}) = -\mathbf{2\ V} \quad (26)$$

Tal como puede observarse, en las salidas del AMC1100 y tanto para las etapas de acondicionamiento de tensiones AC, DC, como de corrientes, el rango de tensiones obtenido presenta valores cercanos entre -2.0V y +2.0V. Esta condición facilita el diseño de la etapa propiamente de acondicionamiento.

El amplificador de aislamiento necesita una fuente de alimentación, tanto en el lado de alto voltaje HPS, como en bajo voltaje LPS. Para suministrar la potencia en los terminales VDD1 y GND1 se utiliza un convertidor DC-DC que, recibiendo la misma tensión de las etapas de bajo voltaje, suministrará la energía necesaria para el AMC1100. Se utiliza un convertidor de la serie VBT1.

Las funciones más relevantes del VBT1-S5-S5-SMT son:

- Potencia de salida 1 W aislada.
- 1,000 V de aislamiento.
- Protección ante corto circuito
- Temperatura de funcionamiento (-40~85°C)

Con objeto de lograr simplicidad en el diseño final, que provea condiciones de confiabilidad y utilice menos espacio en la placa electrónica, el componente VBT1-S5-S5-SMT posee las siguientes conexiones básicas.

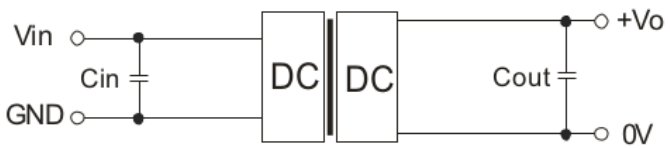

Fig 5. Conexiones típicas para el VBT1-S5-S5-SMT

Además, este componente ofrece una distribución de terminales 1 y 2 como entradas, así como 5 y 8 como salidas, la cual apoya con el AMC1100, la condición física de aislamiento entre HPS y LPS tal como se observa en la Fig 6.

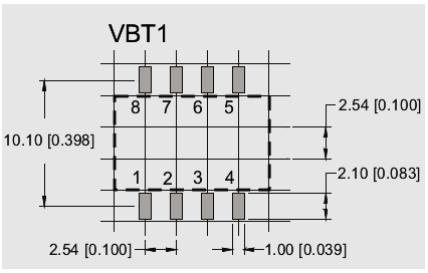

Fig 6. Distribución de terminales para el VBT1-S5-S5-SMT

B. Etapa de referencia.

Esta provee la tensión offset de 1.5V y asegura valores positivos en la salida de cada etapa. Debido a que no existen con variedad componentes con tensión de referencia que tengan ese valor, se utiliza un regulador de 1.2V. Para efectos de calibración, se acopla a un amplificador no inversor, obteniéndose en esta etapa la tensión de referencia esperada.

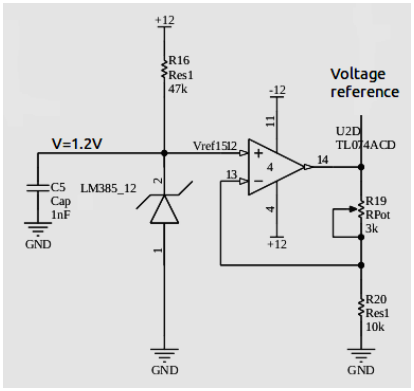

Fig 7. Etapa de tensión de referencia para el prototipo

C. Etapa de acondicionamiento.

Esta etapa asegura que los puntos del circuito (Va1-Va2) que poseen valores de tensión entre -250mV y 250mV, alcancen los valores entre 0V y +3V en la salida de cada etapa respectivamente.

Se incorpora un divisor de voltaje R6, R7 y R8 para efectos de calibración, la cual provee una ganancia desde 0 a un valor ajustable AV3, donde su valor máximo es:

$$AV3 = 100K/(10K + 100K + 10K) = 0.833[adim]$$

Por tanto,

AV3 Valor ajustable entre 0 y 0.833 [adim] **(27)**

AV4 brinda una ganancia unitaria a la tensión Vc1-Vc2 en la sección conformada en su conjunto por todos los amplificadores operacionales mostrados en la Fig 8.

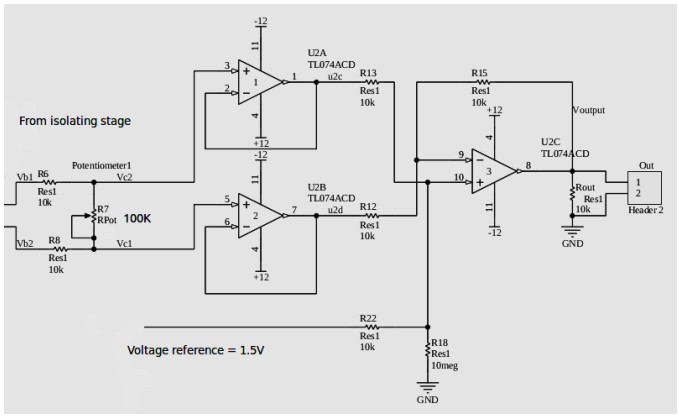

Fig 8. Etapa de acondicionamiento de señal para el prototipo.

El amplificador operacional seleccionado para el acondicionamiento de tensiones es el TL074 por su alta estabilidad en su ganancia, tal como se muestra en la Fig 9

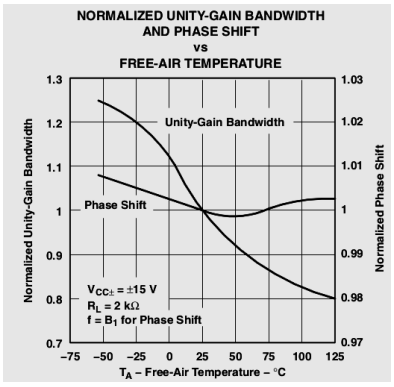

Fig 9. Ganancia unitaria y desfase de tensión para el TL074 en función de su temperatura.

Para la presente etapa, la tensión de salida Voutput se calcula:

$$\mathbf{Voutput} = (\mathbf{AV3})(\mathbf{AV4})(\mathbf{Vb1} - \mathbf{Vb2}) + \mathbf{1.5} = (\mathbf{AV3})(\mathbf{1})(\mathbf{Vb1} - \mathbf{Vb2}) + \mathbf{1.5} = \mathbf{AV3}(\mathbf{Vb1} - \mathbf{Vb2}) + \mathbf{1.5}\ [\mathbf{V}] \quad \mathbf{(28)}$$

Considerando cada uno de los casos descritos en la etapa de aislamiento, las tensiones a obtener debidas a sus respectivas tensiones de entrada y en referencia a la Fig 8 son:

- Por voltaje DC

Considerando $V_{b1-b2} = [0,2.027]V$

$$\mathbf{Voutput} = \mathbf{2.027}(\mathbf{AV3})(\mathbf{1}) + \mathbf{1.5}\ [\mathbf{V}] = \mathbf{3\ V} \quad \mathbf{(29)}$$

Lo cual implica que debe ajustarse R7 para lograr

$$\mathbf{AV3} = \mathbf{740.01x10^{-3}} \quad \mathbf{(30)}$$

Y, finalmente, para valores instantáneos,

$$\mathbf{Voutput} = [\mathbf{0,3}]\mathbf{V} \mid \mathbf{V_{DC}} = [\mathbf{0,344.03}]\ \mathbf{V} \quad \mathbf{(31)}$$

- Por tensiones AC

Considerando

$$\mathbf{V_{b1-b2}} = [-2.037, 2.037]\mathbf{V} \quad (32)$$

$$\mathbf{Voutput} = \mathbf{2.037}\,(\mathbf{AV3})\,(\mathbf{1}) + \mathbf{1.5}\,[\mathbf{V}] = \mathbf{3\ V} \quad (33)$$

Lo cual implica que debe ajustarse R7 para lograr

$$\mathbf{AV3} = \mathbf{736.38x10^{-3}} \quad (34)$$

Y, finalmente, para valores instantáneos,

$$\mathbf{Voutput} = [\mathbf{0,3}]\mathbf{V} \mid \mathbf{V_{AC}} = [-\mathbf{254.56, 254.56}]\ \mathbf{V} \quad (35)$$

- Corrientes AC

Considerando

$$\mathbf{V_{b1-b2}} = [-\mathbf{2.0, 2.0}]\mathbf{V} \quad (36)$$

$$\mathbf{Voutput} = \mathbf{2.0}\,(\mathbf{AV3})\,(\mathbf{1}) + \mathbf{1.5}\,[\mathbf{V}] = \mathbf{3\ V} \quad (37)$$

Lo cual implica que debe ajustarse R7 para lograr

$$\mathbf{AV3} = \mathbf{750x10^{-3}} \quad (38)$$

Y, finalmente, para valores instantáneos,

$$\mathbf{Voutput} = [\mathbf{0,3}]\mathbf{V} \mid \mathbf{I_{AC}} = [-\mathbf{25, 25}]\ \mathbf{V} \quad (39)$$

Las simulaciones realizadas en Altium se presentan en la **Fig 10** y se describen los parámetros eléctricos obtenidos a partir de la señal superior,

- La tensión de salida, con valores de 0V a 3V.
- La tensión en la entrada de alto voltaje, con valores de 300V negativos a 300V positivos.
- La tensión entre los terminales Va1 y Va2 en referencia a la **Fig 4.**

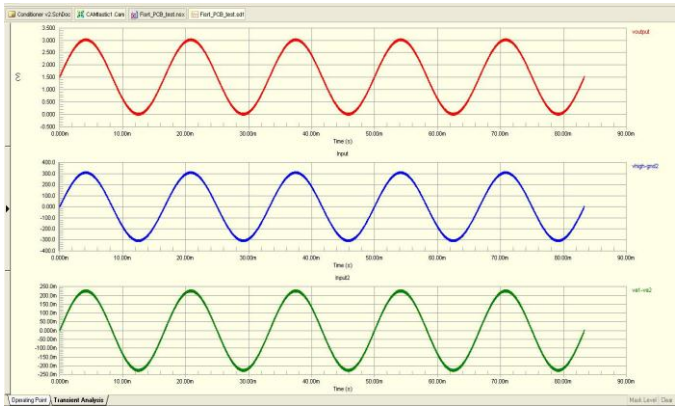

Fig 10. Simulaciones previas a la implementación del prototipo

Como puede observarse, se ha guardado la proporcionalidad de la señal de entrada en todas sus etapas.
En la Fig 11 se muestra la señal obtenida en los terminales de salida del AMC1100. Aparecen pequeños impulsos del orden de 5 a 10 mV, producto de las conmutaciones internas que realiza en componente como parte de su técnica de aislamiento. Para efectos de minimizar la complejidad global del circuito, se aplicarán filtros digitales y por ello, se considera un resultado exitoso en el funcionamiento del prototipo, procediendo al diseño del circuito final.

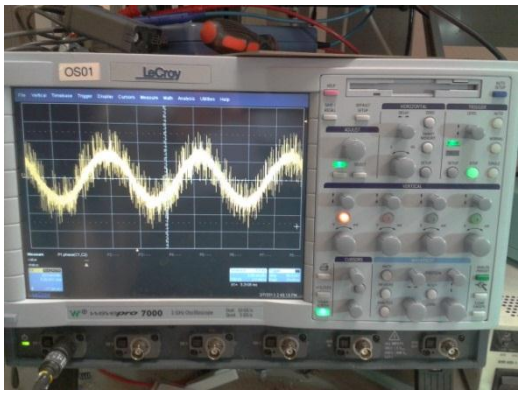

Fig 11. Tensión de salida en AMC1100 en prototipo con pequeña señal.

V. Consideraciones para la reducción de interferencias en el diseño final.

Se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para minimizar las interferencias electromagnéticas en el circuito, conservando la sencillez y bajo costo.

A. Crosstalk.

Entre las más importantes consideraciones previas para el diseño de la placa de circuito impreso (PCB), se encuentra el crosstalk, que causa voltajes inducidos y el flujo de corriente al final de una línea, debidos principalmente a corrientes existentes en líneas paralelas a la primera.
La Fig 12 muestra un panorama general del fenómeno de la existencia del crosstalk en un PCB [7]

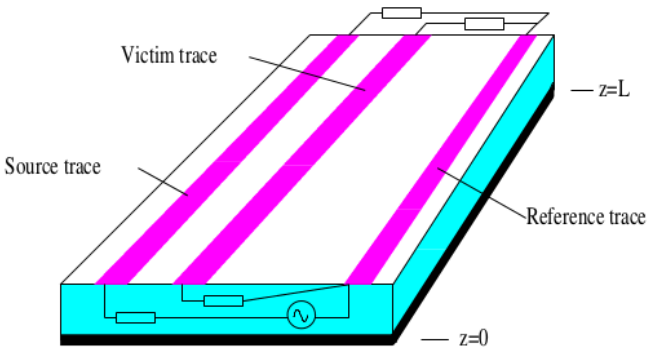

Fig 12. Crosstalk entre las pistas de un PCB

El circuito que permite modelar el crosstalk en un PCB es mostrado en la Fig 14. [8]

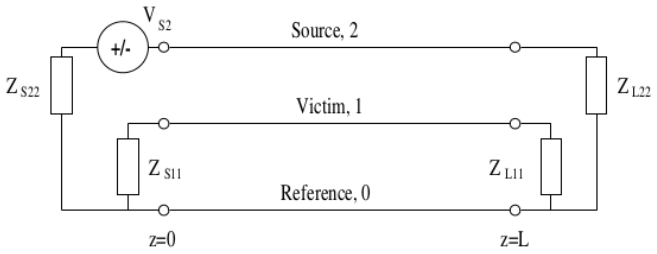

Fig 13. Circuito equivalente para crosstalk en PCB

Existen dos tipos de radiación, la de modo diferencial (DM) y la de modo común (CM).
La radiación de modo común CM o de tipo antena monopolo es causada por caídas de voltaje no intencionales que elevan la tensión en las conexiones de la tensión de referencia (GND) en las conexiones de componentes individuales, arriba el potencial GND asumido para todo el circuito.
El campo eléctrico para modo común es definido:

$$\boldsymbol{E = 4\pi\ 10^{-7}\ \frac{f\ L\ I_f}{d}\ \left[\frac{V}{m}\right]} \qquad \textbf{(40)}$$

Dónde:
f = Frecuencia en Hz
L = Largo del cable o pista en m
d = Distancia del cable en m
I_f = Corriente CM en el cable a la frecuencia f

En este caso, no se espera que el CSC tenga muchos casos de crosstalk en el modo CM porque las corrientes son menores a los 10 mA, las pistas en PCB no superan el largo de 10 cms y la cantidad de casos potencialmente esperados, son mínimos.
Los pequeños picos mostrados en Fig 12, son el peor caso debido a su alto valor de frecuencia comparado con los 60 Hz de la frecuencia fundamental que se medirá. Aún, realizando las siguientes consideraciones:

- Escenario en el circuito de f= 1 MHz, L=0.1m, d=0.001m, I_f =1.134mA
- El largo del PCB no se espera mayor a 10 cms.
- El mínimo espacio entre pistas es de 1 mm.

$$\boldsymbol{E = 4\pi\ 10^{-7}\ \frac{(1x10^{6})(0.1)(1.134x10^{-3})}{0.001} = 142.5x10^{-3}\left[\frac{V}{m}\right]} \qquad \textbf{(41)}$$

En el peor escenario de tener una pista víctima con 10 cms de largo, la tensión inducida es

$$\boldsymbol{V = E\ I = \left(142.5x10^{-3}\right)(0.01) = \ 1.425x10^{-3}\ [V]} \qquad \textbf{(42)}$$

De acuerdo a [7], la ubicación de una línea de pantalla (shield) entre las pistas de emisión y la víctima en el PCB, reduce drásticamente el crosstalk.

B. Lazos.

La radiación en modo diferencial (DM) ocurre cuando una corriente alterna pasa a través de un pequeño lazo. La magnitud del campo eléctrico generado cambia en proporción a la corriente.

El campo eléctrico para DM se calcula [8]:

El campo eléctrico en modo DM es:

$$\boldsymbol{E = 265\ \left(10^{-16}\right)\frac{A\ I_f\ f^2}{d}\ \left[\frac{V}{m}\right]} \qquad \textbf{(43)}$$

Dónde:
A = Área del lazo en m^2
d = Distancia del centro del lazo en m
If = Corriente en la frecuencia A en Hz
f = Frecuencia (o armónica) en Hz

Debido a la magnitud del campo eléctrico, la radiación CM es mucho mayor que la del tipo DM. Para minimizar la radiación de tipo CM, las corrientes de modo común deben minimizarse con un buen sistema de puesta a tierra o referencia; para el caso DM, se pueden evitar reduciendo las áreas que forman el lazo o, como alternativa, que no existan corrientes significativas a través de dicho lazo. [8]
La Fig 14 muestra las áreas minimizadas en PCB con objeto de reducir la radiación tipo CM.

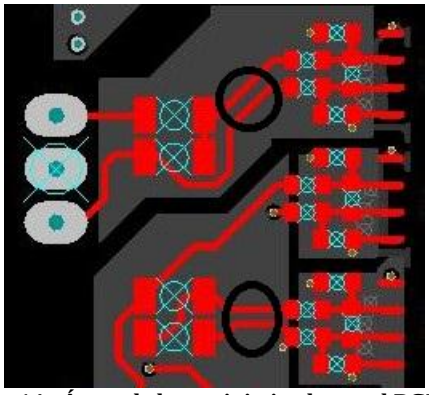

Fig 14. Áreas de lazo minimizadas en el PCB.

Se han realizado consideraciones adicionales a la tensión inducida por crosstalk en las pistas víctimas del PCB [9]:

- El tiempo de aumento de tensión desde la pista agresora es proporcional al crosstalk.
- La tensión de cambio en el agresor. Cuanto más cambie, aumentará el crosstalk.
- En la implementación física, se favorece el crosstalk cuando: Más lejos esté la víctima del plano de referencia, menor sea la distancia entre las pistas y mayor la constante dieléctrica del material PCB.

C. Plano o punto de referencia.

En un sistema cuya distribución de la red de alimentación está basada en puntos únicos, cada componente activo tiene su propia alimentación y tierra (GND) [10], estas líneas deberían mantenerse separadas hasta que encuentren un punto de referencia único.
En sistemas multipunto, las conexiones son hechas en la forma múltiple; por tanto, existen muchos puntos de referencia a 0 voltios. Se tiene como objetivo en estos sistemas que exista un potencial de acoplamiento con impedancia común.
El mejor esquema posible es que un único punto tenga impedancia cercana a cero con el tierra (GND) del regulador

de tensión de alimentación, la referencia del procesador, el negativo de la batería y el chasis [10].

Para el caso particular del CSC, se utiliza un PCB de 4 capas, donde la capa superior (TOP layer) y capa inferior (BOTTOM layer) realizan las conexiones funcionales entre los componentes, de acuerdo a las consideraciones descritas para el diseño esquemático. La capa media 1 (Mid Layer 1) se destina para crear un potencial de tierra (GND), la cual minimiza las radiaciones que ocasionan el crosstalk. En la Fig 15 se muestran los planos de referencia.
Como puede apreciarse, existen varios pequeños planos. Esto es debido a la existencia de varias señales de tensión y corriente independientes entre sí, aisladas eléctricamente; para estos casos, se toma una referencia intrínseca entre ellos.

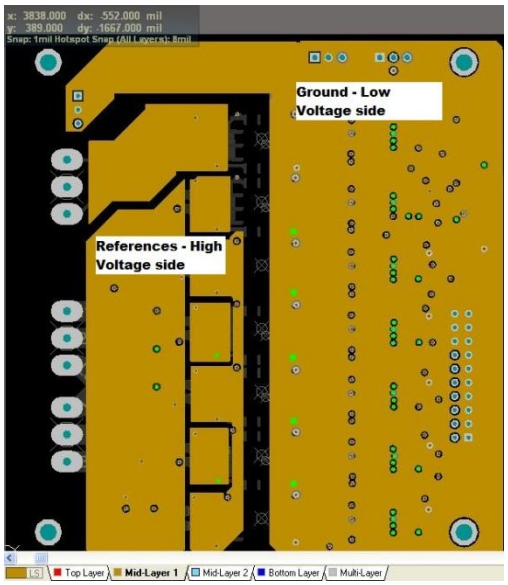

Fig 15. Mid layer 1 en PCB

De forma similar, para distribuir corrientes en las pistas de alimentación y minimizar la intensidad de corriente que existe en la línea agresora ocasionalmente, para el caso de las líneas de alimentación, las líneas de +5V y -5V han sido ubicadas en la capa media 2 (Mid Layer 2) como se muestran en la Fig 16.

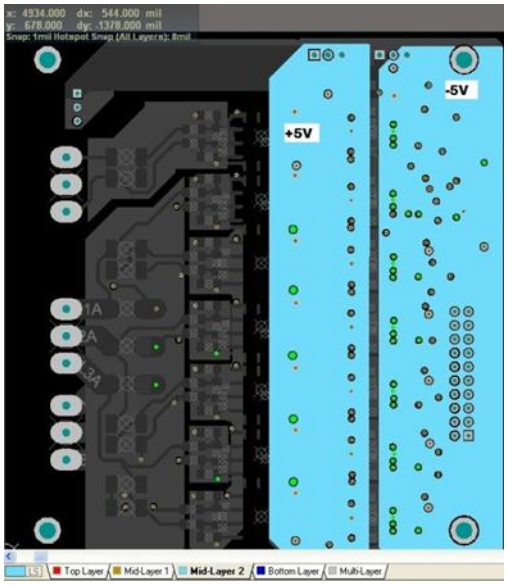

Fig 16. Mid layer 2 en PCB

D. Capacitores de acoplamiento

Para minimizar los transientes producidos por EMI que a su vez son ocasionados por cambios rápidos en los flujos de corriente para las líneas de alimentación de los componentes, se han ubicado capacitores de varios valores lo más cerca posible de los terminales de alimentación para estos últimos.
Los capacitores proveerán las cargas necesarias a los componentes cuando los rápidos cambios de corriente sean producidos en sus terminales de señales, evitando la circulación de rápidas corrientes a lo largo de toda la pista de alimentación.
En la mayoría de casos para circuitos similares, se conectan capacitores en paralelo con valores de 1uF, 0.1uF y 10nF. La Fig 17 muestra la disposición física de C39, C40 y C41, para los terminales de alimentación en el lado de baja potencia del AMC1100, así como los capacitores C54, C55 y C56 para el lado de alta potencia.
Mientras que los capacitores están ubicados en el lado BOTTOM del PCB, el AMC1100 se encuentra en el ladoTOP justo entre C39 y C54.

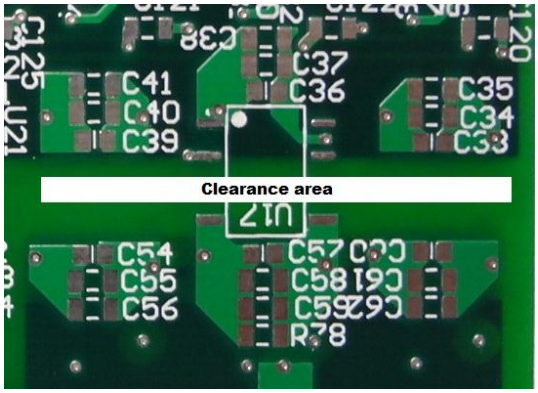

Fig 17. Ubicación de los capacitores de desacoplo.

E. Apantallamiento.

El apantallamiento tiene como objeto proveer una superficie conductora ante eventuales descargas electrostáticas (ESD), campos electromagnéticos en el ambiente o generados por el mismo circuito, así como ruido generado por los cables que se conectan al chasis.

Para lograr un buen apantallamiento, debe distribuirse físicamente como un plano conductor de radiofrecuencia, con el menor número posible de aperturas – hoyos y, de igual manera, presentar la menor impedancia posible en todos sus puntos.

El punto de conexión del apantallamiento hacia la referencia del circuito debería ser del tipo conexión única hacia el GND del regulador de tensión, con la referencia del procesador digital y, a su vez, con el negativo de la batería. [10]

Para este diseño en particular, el apantallamiento es provisto por un gabinete metálico que envuelve toda la circuitería y se conecta con el punto GND mostrado en la Fig 15.

F. Consideraciones térmicas.

Para este diseño en particular, no se espera que los componentes requieran de un disipador de calor o sean aplicadas técnicas para reducir su temperatura en condiciones de funcionamiento normales. Sin embargo, dadas las temperaturas extremas que pueden presentarse en el ambiente en latitudes del norte, se hacen consideraciones a las características de los componentes para que puedan funcionar sin perder notablemente sus características eléctricas ante eventuales fallas en el acondicionamiento interno de la temperatura de la góndola donde se ubica el control electrónico del sistema eólico.

En tal sentido, lo que se ha considerado son las temperaturas de operación para los componentes, seleccionando aquellos que tienen amplio rango de operación. La tabla siguiente muestra dichas características.

TABLA III
ESPECIFICACIONES TÉRMICAS DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS

Ítem	Componente	Temperatura de operación
1	Capacitores cerámicos – todos los valores (1)	-55°C ~ 125°C
2	Resistores de película – todos los valores (1)	-55°C ~ 125°C
3	AMC1100 – Amplificador de aislamiento	-40°C ~ 105°C
4	L7805ACV – VDC regulador positivo	-40°C ~ 125°C
5	LM2990T – VDC regulador negativo	-40°C ~ 125°C
6	LM385 1.2 – Voltaje de referencia 1.2V	0°C ~ 70°C
7	MC1458CD – Amplificador operacional	-40°C ~ 105°C
8	TL074 – Amplificador operacional	-40°C ~ 105°C
9	VBT1-S5-S5-SMT Convertidor DC -DC	-40°C ~ 85°C

(1) Coeficiente de temperatura ±100ppm/°C

Luego de haber tomado todas las consideraciones para el diseño del PCB y de proceder a su elaboración en una fábrica, se soldaron todos sus componentes y se procedió a realizar las pruebas.

Para probar el circuito, se aplicó un voltaje trifásico de $125V_{LN}$ a tres resistencias conectadas en configuración estrella, cuyos valores óhmicos permitieron medir 12.5 amperios; de igual manera, se aplicó $150V_{DC}$ en la entrada correspondiente. Como resultado, se pudo apreciar, por cada una de las 7 etapas, la señal de 0 a 3 V.

Con el resultado de esta prueba, el objetivo propuesto al inicio de este proyecto, se considera cumplido.

VI. Especificaciones técnicas del Circuito Acondicionador de Señales

Aunque el diseño final permite modificaciones que logran aumentar las magnitudes de las variables eléctricas a medir, se describen a continuación los valores recomendados para su uso, en referencia a la Fig 18.

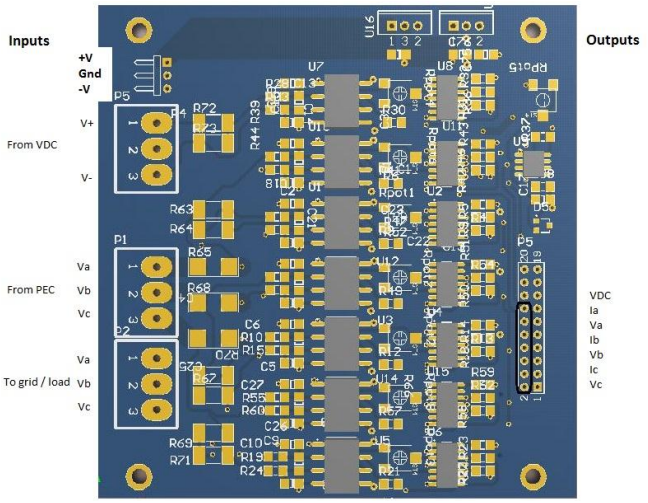

Fig 18. Vista de planta PCB diseño final

TABLA IV
VALORES SUGERIDOS DE VARIABLES ELÉCTRICAS A ACONDICIONAR

Ítem	Parámetros	Descripción	Valor	Unidades
1	Vab, Vbc, Vca en PEC	Tensiones máximas provenientes de PEC	180	V_{RMS} (1)
2	Iab, Ibc, Ica, presentes en Vab, Vbc, Vca desde PEC	Corrientes máximas provenientes de PEC	17.67	A_{RMS} (1)
3	Vab, Vbc, Vca a red de distribución / carga	Estos terminales obtienen su energía desde PEC: Vab, Vbc, Vca	180	V_{RMS} (1)
4	VDC, Ia, Va, Ib, Vb, Ic, Vc.	Salidas hacia el DSP / Control digital	0 – 3	Volts
5	+V, -V	Valores aceptados de las fuentes de alimentación, con sus respectivos signos	6 – 25	Volts

(1) Aunque se asumen estos valores con señales senoidales, el CSC es capaz de acondicionar cualquier forma de onda que no exceda sus máximos equivalentes.

VII. Conclusiones

Luego de presentar el circuito completo funcionando, se concluye:

- Es necesario contar con un acondicionador de señales que permita traducir los valores de tensiones y corrientes en el PEC, a valores que puede aceptar el DSP en sus entradas para su respectiva conversión analógica digital.
- El acondicionador de señales debe tener aisladas entre sí, cada una de las etapas que procesa los parámetros eléctricos a sensar del PEC.
- Los componentes utilizados para la construcción del CSC han permitido cumplir con el aislamiento eléctrico y sensibilidad, requeridos para acondicionar las señales eléctricas recibidas en tensiones mayores a 250V y corrientes mayores a 20A, instantáneos.
- La temperatura es un factor importante a considerar en países de Norteamérica para el funcionamiento normal de los componentes; por tanto, deben seleccionarse aquellos modelos que permitan operar en un amplio rango.
- Las tensiones eléctricas inducidas entre pistas del circuito impreso, deben reducirse mediante las técnicas conocidas en el diseño de PCB.

El circuito completo fue puesto a funcionar, aplicándose $120V_{LN\ RMS}$, ocasionando un flujo 10 A_{RMS} trifásico y, además, $350V_{DC}$, haciendo un total de 7 señales. Como resultado, se obtuvieron 7 tensiones eléctricas con valores de 0 a 3 V instantáneos, presentando de esta manera, los resultados esperados durante el proceso de diseño.

Referencias

[1] Eclareon. (2012, Nov.) Leonardo Energy. [Online]. http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/Cu0180_WP_Wind%20Generator%20Technology_v1_0.pdf

[2] A Madariaga, I Martínez de Alegría, J.L. Martín, P Eguía, and S Ceballos, "Analysis of the Technology currently used in Offshore Wind Energy Systems," in *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, Australia, 2011, pp. 831-836, http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6119418.

[3] H Polinder, "Overview of and trends in wind turbine generator systems," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, California, 2011, pp. 1-8, http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6039342.

[4] Hyong Sik Kim and D.D.-C. Lu, "Review on wind turbine generators and power electronic converters with the grid-connection issues," in *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010 20th Australasian*, Australia, 2010, p. 2.

[5] M Abbasian, A H Isfahani, S Shahghasemi, and F Sheikholeslam, "Effects of Permanent Magnet Synchronous Generator and Wind Turbine Parameters on the Performance of a Small-Scale Wind Power Generation System," 1Islamic Azad University, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, ISSN 0033-2097, R. 87 NR 10/2011, 2011.

[6] International Electrical Supplies. (2013, February) Electric Power. [Online]. http://international-electrical-supplies.com/electric-power.html

[7] J Carlsson, "Crosstalk on Printed Circuit Boards," Swedish National Testing and Research Institute, Boras, sweden, Research ISBN 91-7848-721-8, 1998.

[8] I Kobeissi, "Noise Reduction Techniques for Microcontroller-Based Systems," Motorola Semiconductor, Schaumburg, Illinois, USA, Application note AN1705/D, 1999.

[9] S Scearce et al., "PCB Crosstalk Fundamentals and Strategy," in *PCB Carolina 2008 - Technical Presentations*, Raleigh, North Carolina, USA, 2008, p. 10.

[10] Texas Instruments, "PCB Design Guidelines For Reduced EMI," Texas Instruments Incorporated, Austin, Texas, USA, Application note SZZA009, 1999.



F. Machado (M'13) Recibió el título de Ingeniero Electricista en la Universidad Politécnica de El Salvador en 1997. Actualmente, desarrollando su trabajo de graduación para optar al título de Máster en Gestión de Energías Renovables en la Universidad Don Bosco en El Salvador. Desde 2008 a la fecha se ha desempeñado como Director Académico del Laboratorio de Eléctrica y apoya proyectos en Energías Renovables para la Universidad Don Bosco.