

# **Diseño y construcción de un generador ultrasónico para la evaluación de la erosión y corrosión por cavitación en recubrimientos duros**

**Design and construction of an ultrasonic generator to be  
used on erosion and corrosion testing in hard coatings**

Recibido: Diciembre 4 de 2012  
Aprobado: Diciembre 7 de 2012

Hugo Alejandro Macías\*\*, Mauricio Mauledoux\*\*, Willian Aperador\*\*\*

## **Resumen**

Los generadores ultrasónicos son dispositivos de potencia que proporcionan la tensión y frecuencia adecuadas para el buen funcionamiento de los transductores piezoeléctricos. Los nuevos desarrollos en la electrónica de potencia contribuyen al logro de un mejor desempeño de los generadores permitiéndoles alcanzar las frecuencias y tensiones necesarias, al tiempo que reducen los armónicos del sistema alargando la vida útil de los transductores. En este artículo se presenta el proceso de diseño de un generador ultrasónico para un transductor Langevin de 1Kw de potencia que será utilizado para la evaluación de la corrosión y erosión por el fenómeno de cavitación en recubrimientos duros.

---

\* Ingeniero Mecatrónico, Universidad de San Buenaventura, Bogotá. Maestría en Mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada. Docente de tiempo completo, Universidad de San Buenaventura. E-mail: hmacias@usbbog.edu.co

\*\* Ingeniero Mecatrónico, Universidad Militar Nueva Granada. Maestría en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada. Docente de tiempo completo, Universidad Militar Nueva Granada. E-mail: uledoux@gmail.com

\*\*\* Físico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales (UPTC). Doctor en Ingeniería - Área de Materiales, Universidad Del Valle. Vicedecano de Ingenierías y Director de postgrados, Universidad Militar Nueva Granada. E-mail: william.aperador@unimilitar.edu.co

## Palabras clave

Inversor, spwm, transductor piezoeléctrico, ultrasonido.

## Abstract

Ultrasonic generators are power equipments that supply the voltage and frequency to drive piezoelectric transducers. The development of power electronics in recent years helps to improve the control in piezoelectric transducers reducing harmonic losses and increasing transducers lifetime. In this paper is presented an electronic design to drive a 1Kw Langevin transducer which is going to be used to evaluate the corrosion and erosion on hard coatings.

## Keywords

Inverter, spwm, piezoelectric transducer, ultrasound.

## I. Introducción

El ultrasonido se refiere a ondas sonoras de frecuencias superiores a los 18 kHz que no son percibidas por el oído humano. Al tener una frecuencia muy alta su longitud de onda se acorta lo que les permite a las ondas ultrasónicas atravesar objetos sin dificultad. Esta propiedad es aprovechada para diseñar aplicaciones en distintos sectores de la industria y la medicina, por ejemplo, es común encontrar equipos de ultrasonido para el diagnóstico médico, tratamientos estéticos, limpieza de productos, soldadura de componentes, análisis y predicción de fallas, ensayo de materiales entre otros.

La manera en que se obtienen las ondas de alta frecuencia es a través de un sistema de ultrasonido (ver figura 1) el cual está compuesto por una sección mecánica y una sección eléctrica. La sección mecánica está dividida a su vez por un transductor y una guía de onda. El transductor aprovecha el comportamiento de ciertos cristales no conductores bajo cargas eléctricas [1] conocido como efecto piezoeléctrico. El efecto piezoeléctrico consiste en el cambio de dimensión del cristal cuando se le aplica una carga eléctrica o la generación de una carga eléctrica cuando se le aplica una fuerza [2].

Este efecto permite generar un movimiento mecánico en función de una señal eléctrica. Un ejemplo es el transductor Langevin que acopla una serie de anillos piezoeléctricos para lograr un movimiento longitudinal. Seguido del transductor se halla la guía de onda ultrasónica encargada de orientar y amplificar mecánicamente las débiles vibraciones provenientes del transductor.



Figura.1. Esquema básico de un sistema de ultrasonido. Fuente: elaborado por el autor.

La segunda sección (eléctrica) corresponde al generador ultrasónico que cumple la función de producir una señal eléctrica con la frecuencia y potencia requerida para el funcionamiento adecuado del transductor piezoeléctrico. El oscilador entrega una señal entre los 20 kHz y los 40 kHz de acuerdo con la frecuencia de resonancia del transductor. Por su parte, el amplificador de potencia eleva la señal al nivel adecuado para que se alcance la amplitud mecánica requerida en el transductor.

Debido a la importancia del generador ultrasónico se ha venido trabajado en el desarrollo de circuitos que puedan controlar efectivamente el funcionamiento de los transductores para prolongar la vida útil de las cerámicas que lo integran, puesto que estas últimas se ven afectadas con el incremento de la temperatura producido principalmente por los armónicos presentes en la señal eléctrica que reciben. Existen dos categorías de generadores ultrasónicos [3], la primera utiliza transistores como elementos principales de control de potencia y la segunda se vale de dispositivos de conmutación rápidos como tiristores o IGBT. La ventaja de esta última frente a la primera es que las pérdidas de potencia son pequeñas y pueden trabajar a altas frecuencias.

El presente artículo se centra en el diseño de un generador ultrasónico para un transductor piezoeléctrico de 1Kw de potencia con una frecuencia de resonancia de 20 kHz. El documento inicia explorando las topologías de circuitos de potencia como rectificadores e inversores. Posteriormente, se presenta la solución adoptada para su construcción, por último, se ilustra la simulación en un *software* de análisis electrónico.

## II. Convertidor AC-AC

Los convertidores de voltaje AC-AC se encargan de recibir la energía de una fuente de corriente alterna y transformarla en frecuencia y/o amplitud para aplicaciones específicas. Pueden ser de una fase (monofásico) o de tres fases (trifásico).

Se puede decir que dentro de los convertidores AC-AC hay dos variantes: los directos y los indirectos. Los directos que se encargan de transformar la frecuencia de la fuente directamente; se subdividen a su vez en cicloconvertidores y convertidores de matriz. Los indirectos por otra parte, primero cumplen la función de rectificar el voltaje AC, es decir, pasarlo DC y luego construyen un voltaje AC con una frecuencia y amplitud diferente de la original. La frecuencia y la amplitud del voltaje obtenido dependen del método de excitación del sistema de control.

El generador ultrasónico que se presenta en este trabajo está compuesto por un inversor indirecto. Esto quiere decir que se manejarán dos etapas: una de rectificación y la otra de inversión (ver Figura 2). En la primera etapa se tomará el voltaje de la red de 120 Vac 60 Hz para rectificarlo y generar un voltaje DC de aproximadamente 170 V. En la segunda etapa se hará la inversión para obtener una señal alterna de 20 kHz.

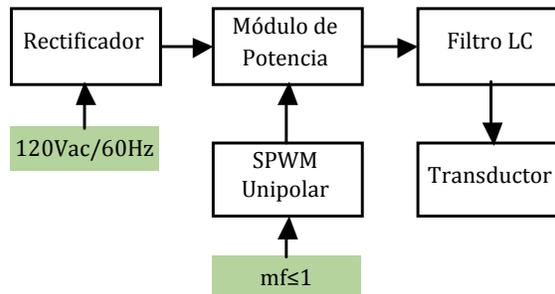


Figura. 2. Diagrama de bloques de generador ultrasónico. Fuente: elaborado por el autor.

### III. Etapa de Rectificación

Esta etapa inicia con un arreglo de cuatro diodos (puente rectificador) encargados de invertir el semiciclo negativo de la señal de corriente alterna obteniéndose una señal del doble de la frecuencia de la señal de la fuente (Hart).

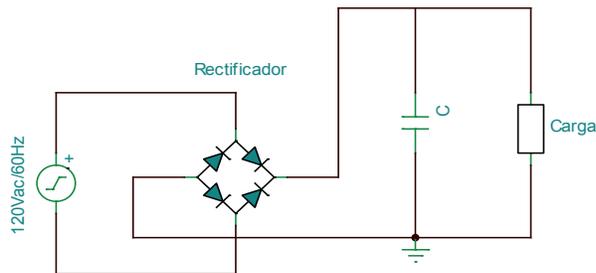


Figura.3. Esquema rectificador de onda completa. Fuente: elaborado por el autor.

Debido a las pérdidas de voltaje generadas por las características de los diodos, el voltaje de salida de la rectificación es:

$$V_{out} = V_{in} - 2V_d$$

De acuerdo con el nivel de voltaje que se va a manejar se seleccionó el puente rectificador monofásico KBPC3506 que soporta un voltaje de entrada de 420 V y una corriente de 35 A. El condensador para el filtro tiene un valor de 2200 $\mu$ f a 450 V.

### IV. Etapa de inversión

Los inversores tienen múltiples aplicaciones que van desde el control de velocidad de motores de inducción hasta sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS por sus siglas en inglés). De acuerdo con las características de la salida, los inversores se pueden clasificar en [5]:

- Medio puente
- Puente completo monofásico
- Puente completo trifásico

Según el método de excitación pueden presentarse las siguientes topologías [4]:

### A. Inversor de onda cuadrada

Se basa en la aproximación digital de una onda seno pasando de un estado alto a un estado bajo cuando la onda seno pasa del semiciclo positivo al semiciclo negativo. Para generar la misma potencia de una onda seno la amplitud de la onda cuadrada debe tener el mismo valor RMS de la onda seno original. Esta configuración genera grandes amplitudes en el tercer y quinto armónico, lo cual reduce considerablemente la eficiencia del sistema.

### B. Inversor de onda seno modificada

En lugar de manejar dos niveles de voltaje como sucede en el inversor de onda cuadrada, la topología de onda seno modificada maneja tres niveles: alto, bajo y nulo o cero. El estado nulo se presenta entre la transición del estado bajo al estado alto o viceversa, lo cual se conoce como «zona muerta». Esta topología se asemeja más a una onda seno, pero aún conserva suficientes armónicos para generar pérdidas en el sistema.

### C. Modulación por anchura de pulso (PWM)

Es una técnica que consiste en generar pulsos a una frecuencia determinada variando el ciclo de trabajo de la señal.

Cuando en la técnica de PWM la señal de control se obtiene a partir de la comparación de una señal seno y una señal triangular se denomina SPWM por sus siglas en inglés (*sine pulse width modulation*). Bajo estas circunstancias, la señal de referencia seno, que es de baja frecuencia, se denomina moduladora; la señal triangular, que es de alta frecuencia, recibe el nombre de portadora; y la señal obtenida de la comparación se llama modulada.

SPWM es una técnica que se caracteriza porque se obtiene una señal modulada con bajo contenido en armónicos [5] tiene dos variantes: unipolar y bipolar.

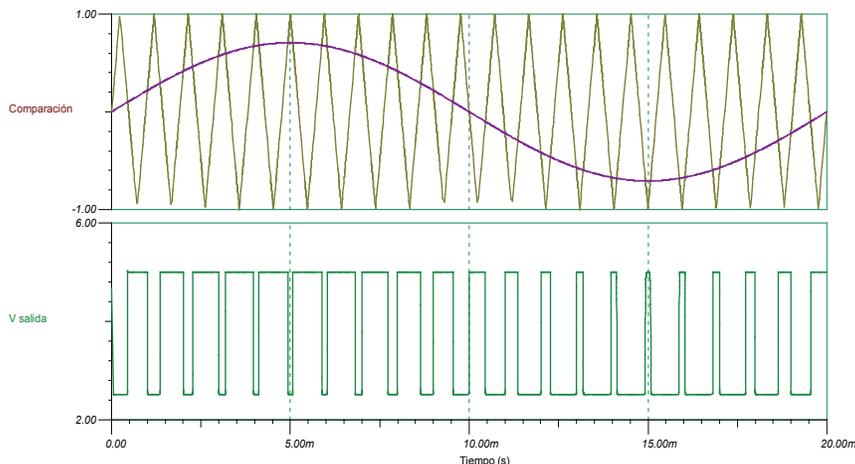


Figura 4. SPWM BIPOLAR. Fuente: elaborado por el autor.

La técnica SPWM bipolar utiliza una única señal de referencia senoidal y una señal triangular. En la Figura 4 se observa el resultado de la comparación de estas dos señales. Generalmente se selecciona un valor  $m_f$  que sea entero e impar.

Por otro lado, la técnica SPWM unipolar utiliza dos señales senoidales pero desfasadas  $180^\circ$  entre sí y una onda triangular. En la Figura 5 se observan las dos señales digitales que resultan de la comparación. Estas señales posteriormente se llevan al módulo de potencia y la carga va a recibir una serie de pulsos de distinto ancho y un voltaje que cambia en función de la señal modulada.

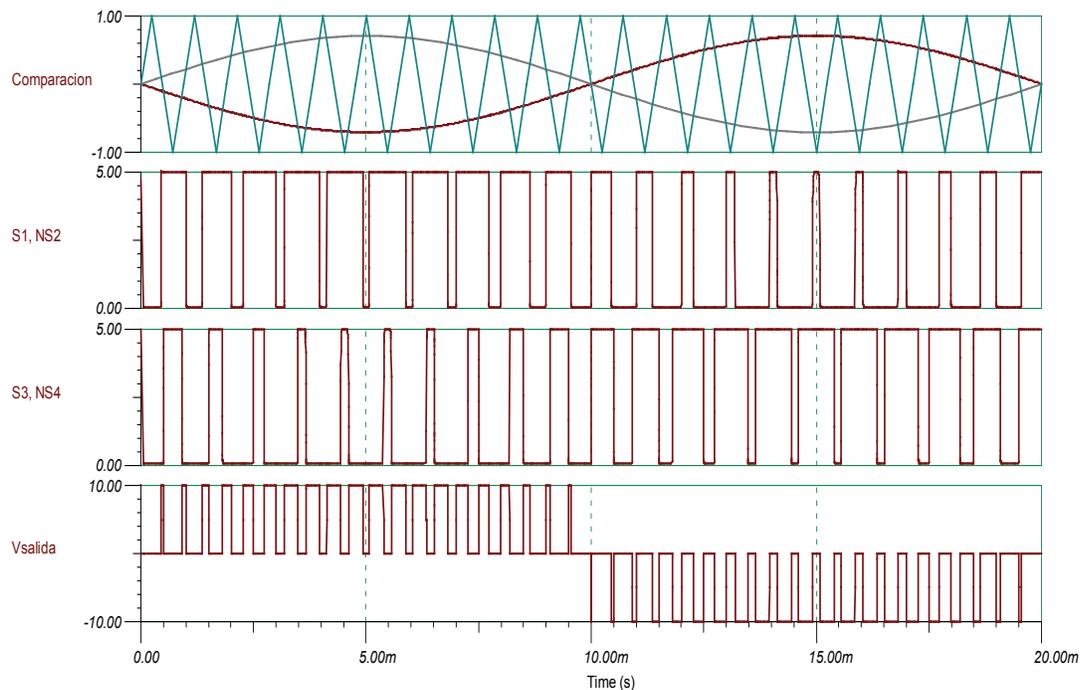


Figura 5. SPWM UNIPOLAR Fuente: elaborado por el autor.

El control de SPWM unipolar es más complejo que el bipolar porque se requiere de dos señales moduladoras, lo que conlleva al diseño y montaje de un circuito más complejo. No obstante, la mayor ventaja que presenta el SPWM unipolar frente al bipolar es que el primero reduce el número de armónicos [6], de hecho, los armónicos de menor frecuencia están localizados sobre el doble de la frecuencia de conmutación. Esto mejora la eficiencia del generador y alarga la vida útil del transductor. Por esta razón, se ha escogido el inversor SPWM unipolar como parte del generador ultrasónico.

Otro elemento que hace parte importante del inversor es el módulo de potencia. Existen distintas configuraciones pero se ha escogido una de puente completo (*full bridge*). El puente se encarga de recibir las señales del SPWM para conmutar sincrónicamente cuatro mosfet de potencia que proporcionarán la amplitud de voltaje y la frecuencia necesarios para la carga (ver Figura 6).

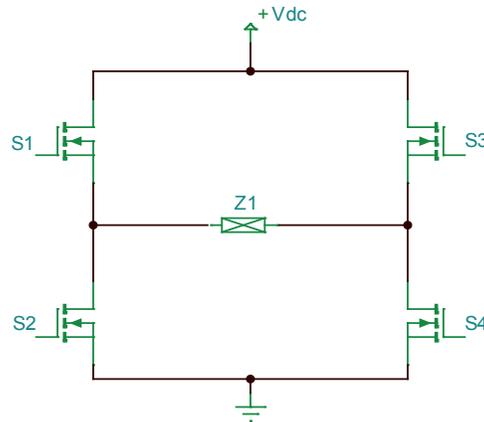


Figura 6. Configuración de mosfets en puente completo. Fuente: elaborado por el autor.

El valor de voltaje que llega a la carga depende de la secuencia en que los mosfet conmuten (ver Tabla 1). Se puede apreciar que la carga va a tener tres momentos, voltaje positivo, cero, y voltaje negativo, que irán variando según lo haga la señal de referencia.

S1	S2	S3	S4	Vo
ON	OFF	OFF	ON	+V
OFF	ON	ON	OFF	-V
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

Tabla 1. Voltaje de salida en función del estado de los interruptores

## V. Consideraciones importantes del SPWM

*Índice de modulación de frecuencia (mf)*: es la razón entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia de la moduladora

$$m_f = \frac{f_p}{f_m}$$

Para valores de  $m_f$  pequeños, es decir, menores o iguales a 21, se recomienda que corresponda a un número entero y que las señales de voltaje fundamental y la portadora se encuentren en sincronismo, pues de lo contrario se pueden generar armónicos indeseables [7]. Por otra parte, cuando se tienen valores altos de  $m_f$  (mayores a 21) el asincronismo produce una caída en la amplitud de los subarmónicos generados, lo cual no tiene mayor efecto, salvo que se esté trabajando con motores AC.

*Índice de modulación de amplitud (ma)*: es la razón entre la amplitud de la moduladora y la amplitud de la portadora

$$m_a = \frac{V_m}{V_p}$$

Se pueden presentar dos situaciones [6]:

$ma \leq 1$  la amplitud de la frecuencia fundamental del voltaje de salida es proporcional a  $ma$ . En esta condición los armónicos se sitúan a alta frecuencia, que significa que:

$$V_o = m_a V_{cc}$$

$ma > 1$  la amplitud de la frecuencia fundamental es mayor que la portadora y no varía proporcionalmente a  $ma$ . Igualmente se genera el aumento en el contenido armónico del voltaje de salida.

De las dos situaciones anteriores se desprenden tres zonas del funcionamiento del inversor (Estrella Álvaro, 2009): lineal, sobremodulación y onda cuadrada.

- Zona lineal: la amplitud de la componente fundamental es proporcional a  $ma$ , los armónicos están alrededor de  $mf$ ,  $2mf$ ,  $3m$ , etc.
- Zona de sobremodulación: el índice de modulación de amplitud es mayor que uno, por lo que la amplitud de la componente fundamental no solo depende de  $ma$ , sino también de  $mf$ . Se producen muchos armónicos.
- Onda cuadrada: la amplitud de la componente fundamental toma el valor máximo durante todo el periodo y el número de armónicos es máximo.

## VI. Procedimiento

Las señales modulante (seno) y portadora (triangular) presentan frecuencias superiores a los 20 kHz, esto requiere que el circuito generador de las señales sea lo suficientemente robusto y flexible para garantizar una señal de comparación precisa. Para la generación de estas señales se escogió el circuito integrado XR2206 gracias a su robustez, facilidad de montaje y configuración.

Para la señal fundamental (seno) se configuró el circuito generador a una frecuencia de 20KHz con amplitud de 2 Vpp. Para la señal triangular, la frecuencia se estableció diez veces mayor que la fundamental ( $mf=10$ ), es decir 200 kHz. En la Figura 7 se aprecian las señales obtenidas:

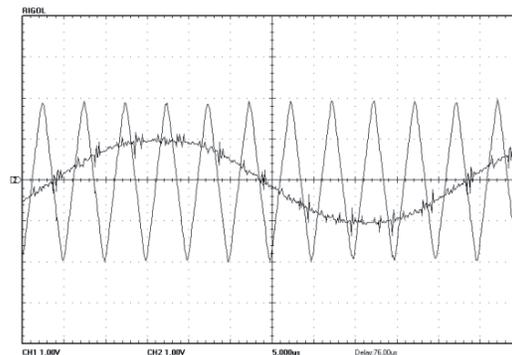


Figura 7. Comparación onda seno y triangular.

La señal seno se lleva a un amplificador inversor para obtener la segunda señal desfasada  $180^\circ$ . Ambas señales senoidales son comparadas independientemente con la señal triangular en el circuito LM339 (ver Figura 8).

Las señales que resultan de la comparación son acondicionadas para conseguir señales digitales compatibles con dispositivos TTL. Una vez se tienen las señales de los generadores XR2206 (*Corporation*) se llevan a un comparador. En la Figura. 9 y en la Figura 10 se observa la señal seno y las señales TTL que manejarán los interruptores S1 y S3 se distingue claramente como varía el ancho de los pulsos según la variación de la amplitud de la onda seno.

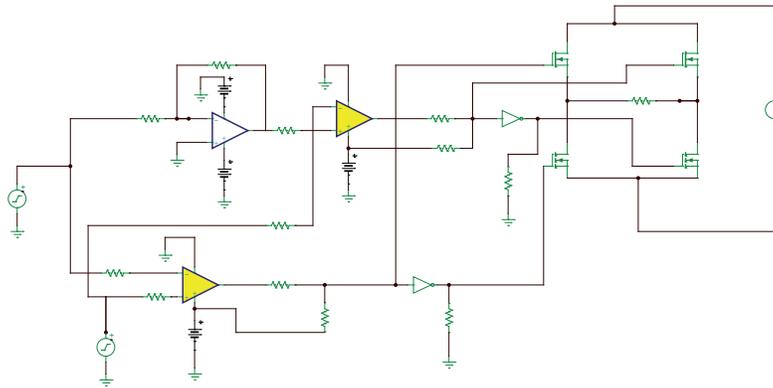


Figura 8. Esquema eléctrico básico del inversor.

El circuito que lleva la señal seno original y el circuito que lleva la señal desfasada  $180^\circ$  son iguales.

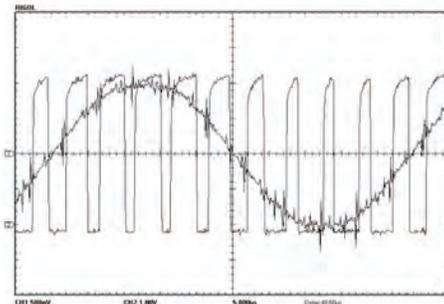


Figura 9. Señal de salida s1 ttl y onda seno.

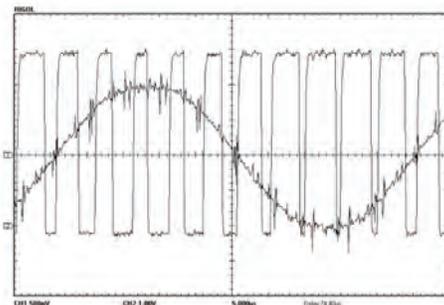


Figura10. Señal de salida s3 ttl y onda seno.

Durante el análisis de los circuitos se visualizó que las señales de salida del comparador y las señales digitales presentaron retrasos tanto para el flanco de ascenso como para el flanco de descenso y a pesar de que ambos circuitos son iguales no se presentan los mismos retrasos (ver Tabla 2). En la Figura 11 se presentan los retrasos de la señal seno original y también los correspondientes a la señal seno desfasada 180° con sus respectivas salidas desfasadas.

	Ascenso	Descenso
Señal onda 1	490 ns	520 ns
Señal onda 2	475 ns	401 ns

Tabla 2. Retrasos en los flancos de ascenso y descenso de las señales

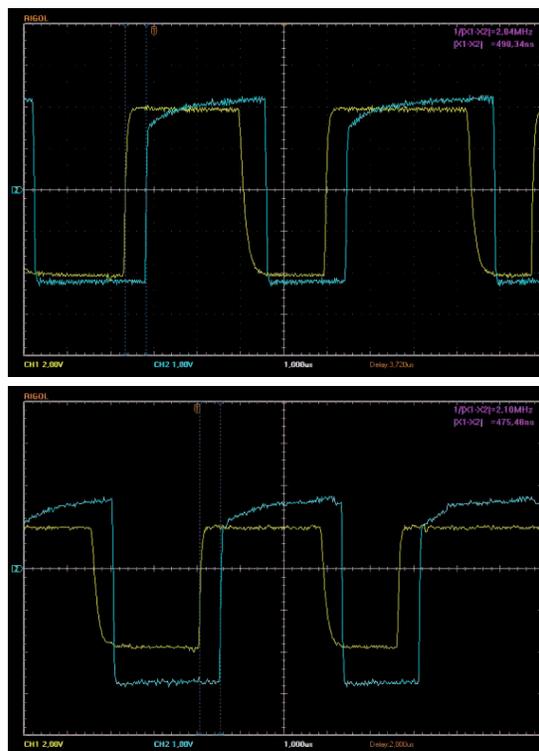
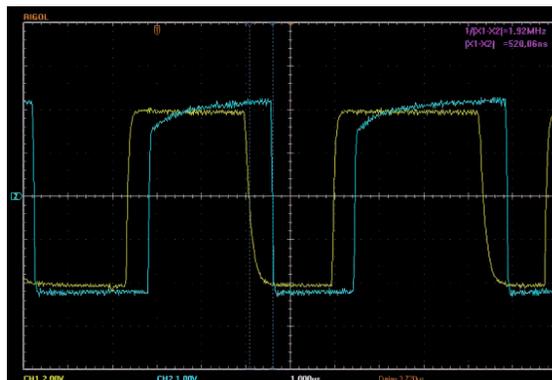


Figura 11. Desfase entre la salida del comparador y señal s1 ttl. (a) en ascenso, (b) en descenso.



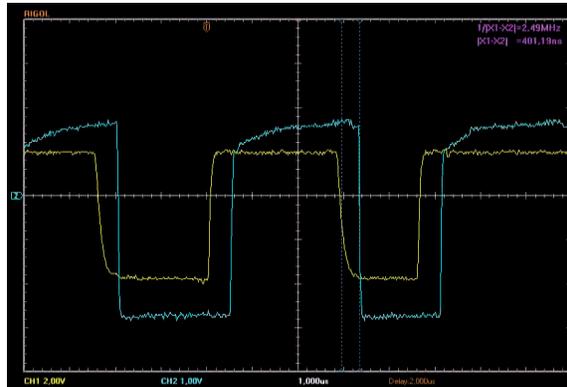


Figura 12. Desfase entre salida del comparador y señal s3 ttl. (a) en ascenso, (b) en descenso.

Estos retrasos pueden significar pérdidas de energía en el generador ultrasónico y se deben tener en cuenta durante el control del mismo.

En la Figura 13 se observan las salidas de las señales TTL para S1 y para S3.

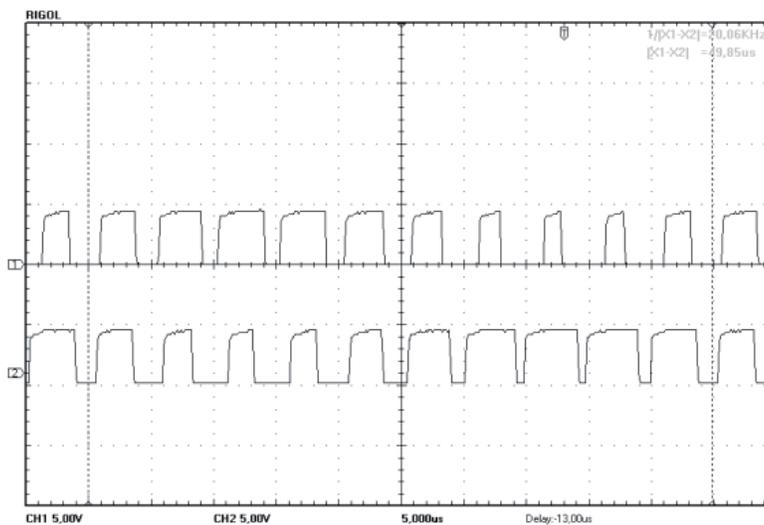


Figura 13. Señales TTL S1 y S3.

## VII. Conclusiones

En la primera parte del proyecto se planteó un inversor de voltaje para un generador ultrasónico integrado por dos etapas. La primera etapa denominada de rectificación consistió en la selección de un puente de diodos de onda completa. En la segunda etapa, denominada de inversión, se escogieron como elementos de conmutación cuatro mosfets ordenados en la topología de puente completo (*full bridge*). Como método de excitación de los mosfets se optó por la topología SPWM unipolar, que a pesar de su complejidad en la implementación, produce un número menor de armónicos en comparación con la topología SPWM bipolar. Para su realización y montaje se escogió el generador de señal integrado XR2206.

Se observó que una vez realizadas las etapas de comparación para la generación de las señales digitales que regularán la conmutación de los mosfets existen pérdidas ocasionadas por el comportamiento de los amplificadores en alta frecuencia. Los desfases generados por los retrasos en la conmutación podrían llegar a afectar el ancho del pulso, lo que traería como consecuencia pérdidas de energía y/o desbalance en el voltaje entregado en el semiciclo positivo y en el semiciclo negativo.

La siguiente etapa del proyecto consistirá en el acople del circuito SPWM unipolar con el circuito de potencia y se tratarán de cuantificar las pérdidas o los efectos de los desfases debido a las características de los elementos electrónicos en altas frecuencias.

## Referencias

- [1] P. Kwasniak, *Construction and testing of ultrasonic transducer for biofilm removal*. España: Universidad de Toledo, 2011.
- [2] I. Piezo System, *Piezo ceramic application data*. p 59.
- [3] Q. Peng, A. Wang, X. Su, X. Lu, *A New Design of the High-Power Ultrasonic Generator*, 2008.
- [4] D. Hart, *Electrónica de Potencia*, Editorial Prentice Hall, 2001.
- [5] J. Díaz González, *Inversores PWM*. España: Universidad de Oviedo, 1999.
- [6] I. Crowley, H. F. Leung, *PWM Techniques: a pure sine wave inverter* (p.p. 16-32) . Worcester Polytechnic Institute, 2011.
- [7] S. Islam, F. Nuzhat, N. Hoque Nadim, *AC sine wave generation by using SPWM inverter*. BRAC University, 2012.
- [8] A. D. Estrella, *Diseño de un inversor monofásico autónomo de baja frecuencia ajustable mediante bus DC*. (p.p. 30-40) . Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, 2009.
- [9] T. L. Skavarenina, *Power Electronics Handbook*. West Lafayette, Indiana: CRC Press, 2002.
- [10] E. Corporation (n.d.). XR2206 Monolithic function generator, 1997.



**UNIVERSIDAD DE  
SAN BUENAVENTURA  
SEDE BOGOTÁ**

## Calidad humana y profesional

Ingeniería  
Aeronáutica



**CÓDIGO SNIES** 4498  
**TÍTULO QUE OTORGA** Ingeniero(a) Aeronáutico(a)  
**METODOLOGÍA** Presencial  
**DURACIÓN** 10 semestres

**NATURALEZA DEL PROGRAMA**

El diseño de aeronaves, de sus plantas motrices y de sus sistemas, son unas de las disciplinas más desafiantes de la ingeniería. El programa de Ingeniería Aeronáutica de la Universidad de San Buenaventura ha sido pionero en ofrecer los fundamentos para una carrera en la industria aeroespacial colombiana, la cual demanda ingenieros integrales, con una amplia capacidad para crear, investigar, diseñar, evaluar, mantener y administrar soluciones a problemas propios de esta industria.

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, SEDE BOGOTÁ • Carrera 8 H n.º 172-20 • PBX 667 1090 • Línea gratuita nacional: 01 8000 125 151  
Correo electrónico: [informacio@usbog.edu.co](mailto:informacio@usbog.edu.co) • [www.usbbog.edu.co](http://www.usbbog.edu.co)  
FACULTAD DE INGENIERIA • Edificio Fray Diego Barroso, oficina 201 • PBX: 667 1090 extensiones 275 - 258