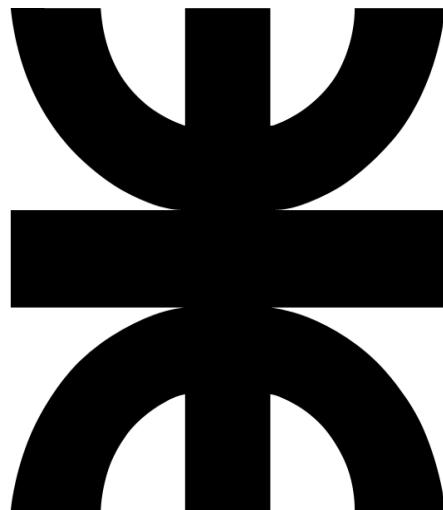


Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Paraná



Medidas electrónicas 2
Síntesis digital directa (SDD)
Informe final

Docentes: Cappelletti, Carlos
Krenz, Monica

Alumnos: Barbieri, Alejandro Maximiliano
Borches, Pedro

E-mails: alejandrobarbieri@alu.frp.utn.edu.ar
pedroborches@alu.frp.utn.edu.ar

Año: 2023

Índice

Índice	1
Introducción	4
Desarrollo	5
Marco Teórico	5
Descripción del Dispositivo	5
¿Qué es un Generador de Funciones?	5
Figura 1 - Generador de Funciones UNI-T UTG9005C	5
¿Cuáles son las aplicaciones de un generador de funciones?	6
¿En qué consiste el método de síntesis digital directa?	7
Características más importantes de un SDD	8
Proceso de generación de una señal de clock a través de SDD	9
Figura 2 - Proceso de generación de una señal de clock a través de SDD.	9
Clasificación del dispositivo	11
Tipos de Generadores de Funciones	11
Generador de funciones analógico	11
Figura 4 - Generador de Funciones Analogico BK PRECISION 4017A.	12
Generador de funciones digital	12
Figura 5 - Generador de Funciones Digital SIGLENT SDG1010.	13
Generador de funciones de barrido	13
Figura 6 - Generador de Funciones de Barrido Digital BK PRECISION 4013B.	13
Análisis de normativas	14
Internacionales	14
IEEE	14
Figura 7 - Institute of Electrical and Electronics Engineers.	14
IEEE 802	14
IEEE 1641	14
IEC	15
Figura 8 - International Electrotechnical Commission.	15
IEC 60950	15
IEC 62368-1	15
IEC 61010	16
IEC 61010-1	16
IEC 61010-2	16
IEC 61010-2-030	16
IEC 61010-2-032	16
IEC 61010-031	16
IEC 61326	17
NIST	17
Figura 9 - National Institute of Standards and Technology.	17

NIST Special Publication 250	17
NIST Technical Note 1337	18
NIST Special Publication 960-1	18
NIST Special Publication 1065	18
Nacionales	18
IRAM	18
Figura 10 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación.	18
IRAM IEC 61010	19
IRAM IEC 61326	19
IRAM IEC 62368-1	19
IRAM 2404	19
INTI	20
Figura 11 - Instituto Nacional de Tecnología Industrial.	20
RTM	20
Sellos de calidad y de cumplimiento de normativas	21
Marca de conformidad CE	21
Figura 12 - Marca de conformidad CE.	21
Certificación ISO 9001	22
Figura 13 - Sello de certificación ISO 9001.	22
Certificación ISO 14001	22
Figura 14 - Sello de certificación ISO 14001.	22
Certificación de seguridad eléctrica	23
Figura 15 - Sello de certificación de seguridad eléctrica.	23
Diseño y confección del equipo	24
Principio de funcionamiento	24
Figura 16 - Diagrama de bloques (principio de funcionamiento).	25
Elección del módulo a utilizar: Módulo AD9833	25
Figura 17 - AD9833.	26
Principales características incluyen:	26
PINOUT	27
Figura 18 - AD9833 - PINOUT.	27
Cualidades y limitaciones	28
Ventajas:	28
Desventajas:	28
Circuitos desarrollados	29
Prototipo 1	29
Figura 17 - Diagrama de bloques del circuito a desarrollar.	30
Conexionado del prototipo	30
Figura 18 - Conexionado del prototipo 1.	30
Posibles mejoras para el rendimiento o prestaciones del prototipo	31
Figura 19 - Posible etapa de amplificación.	31
Figura 20 - Posible dispositivo de control térmico.	31
Diseño del gabinete para el Prototipo 1	32

Figura 21 - Prototipo 3D del gabinete del prototipo 1.	32
Figura 22 - Prototipo 3D del gabinete del prototipo 1.	32
Código del prototipo 1 (Arduino)	33
Prototipo 2	38
Ventajas de la utilización de un equipo portátil	38
Medidas tomadas para brindarle portabilidad al equipo	39
Cambio de placa de microcontrolador Arduino	39
Figura 23 - Arduino UNO vs Arduino NANO.	39
Fuente de energía	40
Figura 24 - Alimentación Arduino Nano con batería de 9[V]	40
Figura 25 - Alimentación Arduino Nano con USB.	41
Figura 26 - Alimentación Arduino UNO con USB.	41
Mejoras aplicadas	42
Figura 27 - Etapa de control de amplitud.	42
Figura 28 - Conector BNC.	42
Rediseño del gabinete	43
Figura 29 - Gabinete parte frontal.	43
Figura 30 - Gabinete parte trasera.	43
Figura 31 - Tapa del gabinete.	44
Manual de usuario	44
Panel frontal	45
Figura 32 - Panel frontal del equipo.	45
Panel trasero	46
Figura 33 - Panel trasero del equipo.	46
Panel lateral	46
Figura 34 - Panel lateral del equipo	46
Figura 35 - Interfaz de usuario.	47
Análisis de mercado	48
Tabla comparativa	48
Análisis de costos	50
Tabla de análisis de costos.	50
Conclusión	51
Referencias	52

Introducción

Este informe final representa la culminación de un proceso secuencial de cuatro etapas dedicadas al desarrollo de un Generador de Funciones mediante el método de Síntesis Digital Directa (SDD). Desde la investigación fundacional hasta la implementación de características personalizadas. Cada fase ha contribuido a la comprensión integral y a la materialización práctica del dispositivo.

Etapa 1: Investigación fundacional

Iniciamos con una investigación detallada del Generador de Funciones SSD, explorando desde sus fundamentos hasta sus aplicaciones prácticas. El análisis de ventajas, desventajas y su relevancia en electrónica e instrumentación sentó las bases para el proyecto.

Etapa 2: Marco legal y normativo

En la segunda etapa, nos enfocamos en el marco legal y normativo. Desarrollamos un diagrama de bloques preciso y nos sumergimos en normativas locales para asegurar que nuestro dispositivo cumpla con estándares de seguridad, calidad y requisitos técnicos.

Etapa 3: Desarrollo del circuito y diseño del gabinete

La tercera etapa se centró en el estudio del circuito integrado AD9833 y en la creación de un diseño tridimensional del gabinete. Identificamos limitaciones, aplicamos estrategias de mejora y garantizamos un alojamiento eficiente para los componentes.

Etapa 4: Personalización y adaptabilidad

En la fase final, adaptamos el generador de funciones para convertirlo en un dispositivo portátil y económicamente accesible. Mantuvimos la esencia de la síntesis digital directa, implementando cambios significativos como la reducción de tamaño y la introducción de un control de amplitud.

Este informe detalla cada etapa, resaltando logros clave y decisiones estratégicas que han dado forma a un Generador de funciones innovador y versátil, listo para su implementación práctica.

Desarrollo

Marco Teórico

Descripción del Dispositivo

¿Qué es un Generador de Funciones?

Los generadores de funciones son dispositivos que, tal como sugiere su denominación, tienen la capacidad de generar señales o funciones. Esta funcionalidad los convierte en elementos fundamentales e imprescindibles en cualquier entorno de trabajo que se dedique a la electrónica.

Dada su capacidad para generar señales precisas y estables, estos equipos son muy valorados en la industria electrónica y en la investigación científica. Los generadores de funciones son capaces de producir una amplia gama de formas de onda, como ondas senoidales, cuadradas y triangulares, así como otras formas de onda más complejas. Esta versatilidad los hace ideales para una variedad de aplicaciones, desde el diseño y la prueba de circuitos electrónicos hasta la simulación de fenómenos físicos complejos.



Figura 1 - Generador de Funciones UNI-T UTG9005C

Por otra parte, si lo que se requiere es hacer una medición o una prueba de algún dispositivo electrónico, es lógico pensar en un osciloscopio para poder adquirir las señales y verificar el comportamiento del dispositivo. Sin embargo, si el dispositivo que se quiere probar o caracterizar (por ejemplo un amplificador, un multiplexor, un receptor de comunicaciones, un convertidor analógico-digital (ADC)) no es capaz de producir señales por sí mismo, el generador de funciones es un equipo capaz de replicar dichas señales convirtiéndolo en un dispositivo sumamente útil en el área de las mediciones..

En resumen, los generadores de funciones son herramientas esenciales para cualquier profesional o aficionado en el campo de la electrónica, gracias a su capacidad para producir señales precisas y estables de múltiples formas de onda.

¿Cuáles son las aplicaciones de un generador de funciones?

Las aplicaciones de un generador de funciones pueden dividirse de manera general en tres:

- **Crear señales:** Capaces de producir señales desde cero con el fin de simular, estimular y probar diversos circuitos y dispositivos electrónicos. Estas señales pueden ser ajustadas a medida según las necesidades específicas de cada proyecto, lo que permite un alto grado de flexibilidad y adaptabilidad en el diseño y la prueba de circuitos electrónicos.
- **Replicar señales:** También son capaces de replicar señales ya existentes, ya sea una anomalía, un error o una señal adquirida por un osciloscopio. Estas señales pueden ser recreadas utilizando un generador de funciones en un ambiente controlado, lo que permite variar sus parámetros y analizarlas de manera más detallada y precisa
- **Generar señales:** Por último, pueden utilizarse para producir señales ideales o funciones ya conocidas, que pueden utilizarse como referencia o como señal de entrada para pruebas. Esta funcionalidad es especialmente útil en la caracterización de dispositivos electrónicos y en la medición de su rendimiento, comparando los resultados obtenidos con los valores teóricos.

¿En qué consiste el método de síntesis digital directa?

El método de síntesis digital directa (SDD) es una técnica utilizada en la electrónica y la síntesis de señales que implican la generación de señales mediante la manipulación directa de las mismas o de formas de onda digitales. La SDD posee diversas aplicaciones, como por ejemplo: equipos automatizados de pruebas para dispositivos electrónicos, sistemas de comunicaciones inalámbricos o satelitales, sintetizadores de frecuencia para dispositivos generadores de ondas, producción de audio, etc. En esencia, el método de SDD crea señales desde cero, generando formas de onda y manipulándolas en tiempo real para crear nuevas señales.

El proceso de síntesis digital directa generalmente implica el uso de algoritmos matemáticos y procesamiento de señales digitales para generar y manipular formas de onda. Estos algoritmos pueden ser controlados a través de interfaces de usuario, como controladores MIDI o software de síntesis.

El método de síntesis digital directa de señales está constituido generalmente de cuatro etapas básicas:

1. Almacenamiento de los valores de la señal en formato binario en una memoria RAM o ROM de un sistema digital.
2. Generación de la señal mediante la lectura secuencial de las posiciones de memoria a una velocidad programada por el usuario, la cual determina la frecuencia de la señal generada.
3. Conversión de la señal binaria a formato analógico a través de un conversor digital-analógico (DAC).
4. Filtrado de la señal para suavizar la transición generada por la conversión digital-analógica.

La síntesis digital directa es muy utilizada en el ámbito de la producción de audio, desde la creación de efectos sonoros para películas y videojuegos hasta la producción de música electrónica experimental y contemporánea. La SDD brinda la posibilidad de crear sonidos únicos y originales que no pueden encontrarse en la naturaleza o en grabaciones de sonidos existentes. Además, proporciona un mayor nivel de control y flexibilidad en la manipulación de sonidos, lo que permite a los músicos y productores de sonido personalizar y afinar los sonidos para adaptarse a sus necesidades creativas. Es una técnica popular en la síntesis de sonido digital en la actualidad.

Características más importantes de un SDD

Las características más importantes para el diseño e implementación de un dispositivo que utiliza SDD son:

Resolución de frecuencia: Se trata de la cantidad de pasos discretos que puede generar el SDD dentro de un rango de frecuencia determinado. Cuanto mayor sea la resolución de frecuencia, mayor será la precisión en la generación de señales de frecuencia específicas.

Ancho de banda: Se trata de la capacidad del dispositivo para generar señales dentro de un rango específico de frecuencias. Un SDD con un ancho de banda más amplio puede generar señales de mayor frecuencia y más complejas.

Rango dinámico: Se refiere a la relación entre la señal más fuerte y la señal más débil que puede generar un SDD. Un rango dinámico más amplio puede generar señales con mayor amplitud y menor ruido.

Precisión y estabilidad de frecuencia: Se refiere a la capacidad del SDD para generar señales con una frecuencia específica precisa y estable en el tiempo.

Funcionalidad de modulación: Hace referencia a la capacidad del SDD para modular una señal de frecuencia específica con una señal modulante de otra frecuencia. Esto le brinda la capacidad de generar señales más complejas y detalladas.

Proceso de generación de una señal de clock a través de SDD

Uno de los mayores retos al utilizar SDD para generar una señal de clock es la necesidad de reducir la fluctuación temporal determinística que se produce debido a la presencia de componentes espurios discretos en la señal de salida.

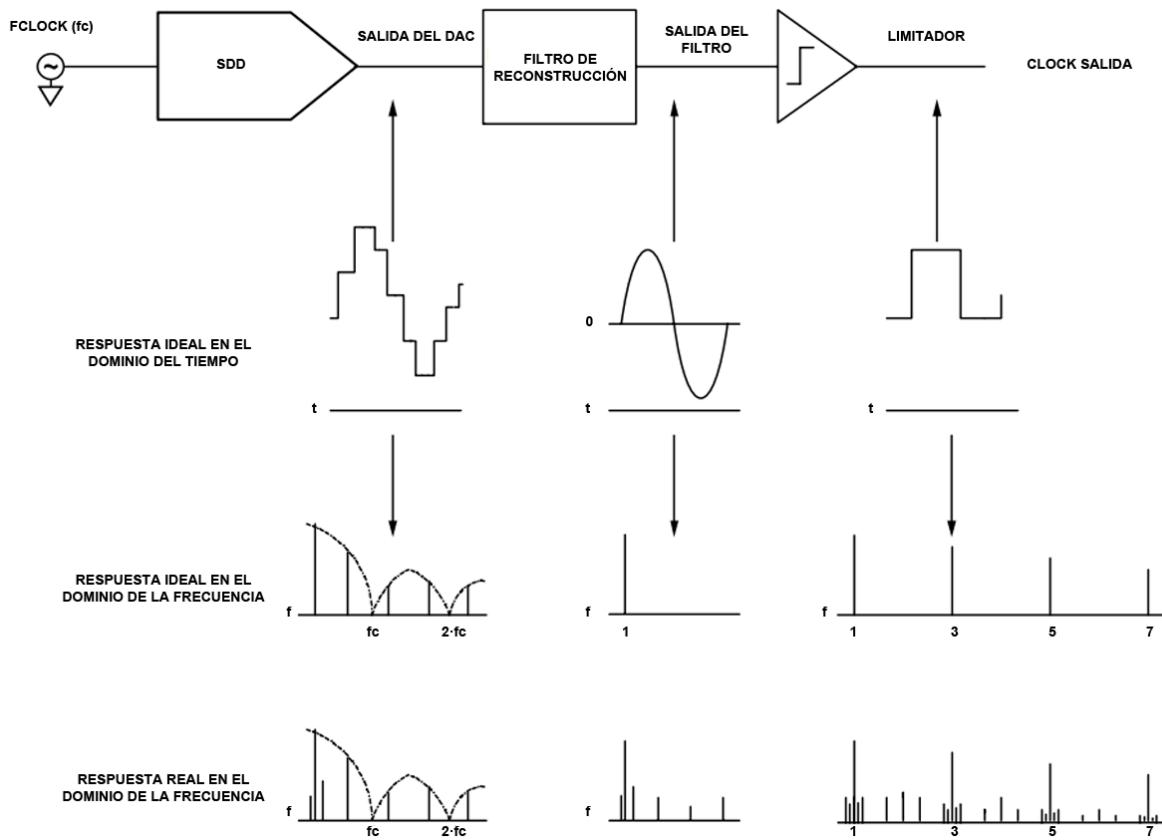


Figura 2 - Proceso de generación de una señal de clock a través de SDD.

Para profundizar en este tema, es fundamental entender cómo se genera una señal cuadrada a partir de un SDD para su sincronización. La Figura 2 muestra representaciones ideales tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia de cada etapa del proceso, mientras que en la parte inferior se muestra una representación real del dominio frecuencial.

Como se puede observar, la salida ideal en el dominio del tiempo es una onda sinusoidal muestreada. La representación ideal en el dominio de la frecuencia de una onda sinusoidal muestreada se compone de la señal fundamental y sus armónicos. Para transformar esta onda sinusoidal muestreada en una señal de clock, se deben seguir dos pasos:

1. Es necesario corregir la señal, lo cual se logra comúnmente mediante la implementación de un filtro paso bajo que elimina los armónicos producidos durante el proceso de muestreo. Aunque no se trata de un proceso perfecto, el filtro de reconstrucción convierte la señal nominalmente en una onda sinusoidal pura. La frecuencia de corte de este filtro suele establecerse alrededor del 40% al 45% de la señal de clock del sistema para aprovechar al máximo el ancho de banda de sintonización y atenuar los armónicos adecuadamente.
2. La onda sinusoidal filtrada debe convertirse en una onda cuadrada mediante un limitador, también conocido como circuito de cuadratura. La entrada del dispositivo de cuadratura funciona como un comparador que cambia su salida idealmente al estado lógico alto o bajo en el instante preciso en que la forma de onda de entrada cruza un voltaje umbral. Para minimizar el acoplamiento de ruido, se requiere una conexión balanceada de dos cables entre la salida del DAC y la entrada del limitador.

La Figura 2 muestra que la salida de un SDD no filtrada contiene una gran cantidad de componentes espurios. Estos componentes incluyen distorsión armónica relacionada con el DAC, así como los armónicos de la frecuencia fundamental, que son el resultado de las no linealidades de la función de transferencia del DAC.

Los armónicos de la frecuencia fundamental pueden aparecer dentro de la banda de paso del filtro de reconstrucción y también se reproducen en las imágenes. Estas imágenes dentro de la banda de los armónicos del DAC, así como las imágenes fuera de banda que no están suficientemente atenuadas por el filtro, pueden contribuir significativamente a la fluctuación observada en la salida del limitador.

La fluctuación en la salida del limitador se debe a la modulación ciclo a ciclo inducida por los componentes espurios presentes en la señal, y se clasifica como fluctuación determinista. Si se reduce el ancho de banda del filtro de reconstrucción, ya sea utilizando un filtro paso bajo con una frecuencia de corte reducida o un filtro paso de banda, se reduce la cantidad de componentes espurios y se minimiza la magnitud de la fluctuación temporal en la señal de salida.

La fluctuación temporal producida por un sistema de clock basado en SDD es proporcional a la magnitud de los componentes espurios en comparación con la velocidad de subida de la señal fundamental. La velocidad de subida está directamente relacionada con la frecuencia y amplitud de la señal. Además, el acoplamiento de ruido entre el DAC y el limitador también puede contribuir a aumentar la fluctuación. Para minimizar la fluctuación, es importante maximizar la velocidad de cambio de salida del DAC y aplicar un filtrado efectivo de las componentes espurias del SDD. En general, un aumento en la frecuencia o amplitud de la señal puede mejorar el rendimiento de fluctuación del sistema.

Clasificación del dispositivo

Tipos de Generadores de Funciones

Existen varios tipos de generadores de funciones, cada uno con ligeras diferencias, por lo que es importante elegir el tipo correcto para cualquier aplicación.

Incluso dentro del sector de generadores de funciones del mercado de generadores de señales, hay varios tipos diferentes.

Estos diferentes tipos de generadores de funciones ofrecen capacidades y prestaciones sutilmente diferentes, y los precios también son diferentes, por lo que es importante elegir el tipo adecuado.

En consecuencia, cada tipo de generador de funciones será más adecuado para algunas aplicaciones que para otras.

Hay varias formas de diseñar circuitos generadores de funciones. Sin embargo, hay dos enfoques principales que se pueden utilizar:

Generador de funciones analógico

Este tipo de generador de funciones fue el primero que se desarrolló. Los primeros modelos aparecieron a principios de los años 50, cuando la tecnología digital no estaba muy extendida.

A pesar de que utilizan tecnología analógica, estos generadores de funciones analógicas ofrecen una serie de ventajas.

- **Rentabilidad:** Los generadores de funciones analógicas son muy baratos, ya que se encuentran en el extremo inferior de la gama de precios de los generadores de funciones.
- **Sencillez de uso:** Los generadores de funciones analógicos proporcionan un instrumento de prueba eficaz y es capaz de satisfacer la mayoría de las necesidades de los usuarios, sin dejar de ser simple y fácil de usar.
- **Frecuencias máximas:** Los generadores de funciones analógicos no tienen las limitaciones de alta frecuencia en las formas de onda no sinusoidales, como los triángulos y las rampas, que tienen los generadores de funciones digitales.



Figura 4 - Generador de Funciones Analogico BK PRECISION 4017A.

Generador de funciones digital

Utilizan tecnología digital para generar las formas de onda.

Hay varias maneras de hacerlo, pero la técnica más versátil y más utilizada para los generadores de funciones digitales es utilizar la síntesis digital directa, SDD.

La SDD utiliza un acumulador de fase, una tabla de búsqueda que contiene una representación digital de la forma de onda y un DAC. El acumulador de fase se desplaza una posición más cada vez que recibe un impulso de reloj. Posteriormente, se accede a la siguiente posición de la tabla de consulta para obtener el valor digital de la forma de onda en ese punto. Este valor digital se convierte entonces en un valor analógico mediante un convertidor digital-analógico, DAC.

Estos generadores de funciones digitales pueden ofrecer altos niveles de precisión y estabilidad porque el reloj del sistema está controlado por un cristal.

Además, los generadores de funciones digitales ofrecen una gran pureza espectral y un bajo ruido de fase. Un generador de funciones digital basado en SDD también puede barrer una gama de frecuencias mucho más amplia que un generador de funciones analógicas. También puede realizar otras funciones, como el salto de frecuencia continuo de fase, debido a la acción del sintetizador digital directo.

La desventaja de los generadores de funciones digitales es que son más completos que sus primos analógicos, requieren un DAC de alto rendimiento y otros circuitos digitales y esto significa que son más caros y también más complicados de fabricar como resultado de su funcionalidad adicional.



Figura 5 - Generador de Funciones Digital SIGLENT SDG1010.

Generador de funciones de barrido

Un generador de Barrido es un instrumento que entrega una señal alterna de frecuencia variable en el tiempo, de acuerdo a un límite inferior y superior de frecuencia previamente seleccionada.

La función básica del generador de barrido es producir ondas senoidales, cuadradas, triangulares y además de señales TTL.

Este tipo de generador es muy parecido al generador de frecuencia estándar, con la diferencia de que la señal senoidal entregada varía de frecuencia de manera automática, y no de manera manual como en el caso del generador estándar. Esta frecuencia cambia automáticamente limitada por dos frecuencias límites, una inferior o mínima y una superior o máxima. Ambos límites los define el usuario dependiendo de las necesidades específicas.



Figura 6 - Generador de Funciones de Barrido Digital BK PRECISION 4013B.

Análisis de normativas

Internacionales

IEEE



Figura 7 - Institute of Electrical and Electronics Engineers.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, en inglés) es una organización profesional internacional con sede en Estados Unidos. Es la asociación técnica más grande del mundo y se enfoca en el avance de la tecnología en diversas áreas, como la ingeniería eléctrica, electrónica, telecomunicaciones, informática y más. El IEEE es conocido por desarrollar y mantener una amplia gama de estándares técnicos.

IEEE 802

La norma IEEE 802 es una serie de estándares que abarca diferentes tecnologías de redes, como Ethernet (IEEE 802.3), Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15) y WiMAX (IEEE 802.16), entre otros. Estos estándares establecen requisitos técnicos para la implementación de redes de área local (LAN) y redes de área amplia (WAN), tanto con cable como inalámbricas. Cada subconjunto de la norma se centra en una tecnología específica y define métodos de acceso, velocidades de transmisión y protocolos de seguridad para las redes. Estos estándares son ampliamente utilizados en todo el mundo para proporcionar conectividad de red confiable y de alto rendimiento.

IEEE 1641

Esta norma establece un estándar para el intercambio de datos y la representación de formas de onda en sistemas de medición. Puede ser relevante para el generador de señales en términos de cómo se representan y comparten los datos de las formas de onda.



Figura 8 - International Electrotechnical Commission.

Se trata de la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, en inglés). La IEC es una organización internacional de normalización compuesta por representantes de organismos nacionales de normalización de más de 170 países. Fue fundada en 1906 y tiene su sede en Ginebra, Suiza.

Estas normas se desarrollan mediante un proceso de consenso en el que los expertos de diferentes países y sectores trabajan en conjunto para establecer requisitos técnicos, especificaciones y guías que promueven la seguridad, la calidad y la interoperabilidad de los productos y sistemas eléctricos y electrónicos.

Además de desarrollar normas, la IEC también juega un papel importante en la evaluación de la conformidad. A través de sus sistemas de evaluación de la conformidad, la IEC contribuye a la certificación y acreditación de productos, servicios y sistemas eléctricos y electrónicos, asegurando su cumplimiento con los estándares internacionales.

IEC 60950

Es una norma de seguridad para equipos de tecnología de la información y equipos eléctricos. Proporciona pautas y requisitos para garantizar la seguridad de estos equipos.

Su objetivo es proteger a los usuarios de peligros como descargas eléctricas, incendios y otros riesgos.

Ha sido reemplazada por versiones más recientes, como IEC 62368-1.

IEC 62368-1

Es una norma de seguridad para equipos electrónicos y eléctricos de tecnología de la información y equipos audiovisuales.

Adopta un enfoque basado en el rendimiento y se centra en los peligros inherentes a los equipos, en lugar de limitarse a componentes individuales.

El objetivo es garantizar la seguridad de los usuarios, los instaladores y el entorno en el que se utilizan estos equipos. La norma establece requisitos para la protección contra riesgos eléctricos, térmicos y mecánicos, así como contra otros peligros como la radiación óptica, el fuego y los productos químicos.

Establece requisitos de diseño, fabricación y pruebas para asegurar que los equipos cumplan con los estándares de seguridad establecidos.

Es importante tener en cuenta que esta norma no solo se aplica a equipos nuevos, sino también a productos existentes que están siendo actualizados o modificados.

IEC 61010

Esta normativa, también conocida como IEC 61010-X, es una serie de normas internacionales desarrolladas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) que establece los requisitos de seguridad para equipos eléctricos de medición, control y laboratorio. Estas normas se aplican a una amplia gama de equipos utilizados en entornos de laboratorio, industria y otros campos.

IEC 61010-1

Esta parte establece los requisitos generales de seguridad para equipos de medición, control y laboratorio. Define los criterios de diseño y construcción para garantizar la seguridad de los operadores y los usuarios finales.

IEC 61010-2

Es parte de la serie de normas IEC 61010, que se refiere a la seguridad de los equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. La norma IEC 61010-2 se divide en varias partes, cada una de las cuales aborda requisitos específicos para un tipo particular de equipo o aplicación. Su objetivo principal es garantizar la seguridad al utilizar equipos en dichos entornos.

IEC 61010-2-030

Establece requisitos de seguridad para equipos de ensayo y medición de laboratorio utilizados en entornos de alta tensión. Asegura que los equipos cumplan con estándares eléctricos y de seguridad, incluyendo aislamiento, protección contra descargas eléctricas y manejo seguro en entornos de alta tensión.

IEC 61010-2-032

Establece requisitos de seguridad para equipos de ensayo y medición de laboratorio utilizados en entornos de baja tensión. La norma garantiza que los equipos cumplan con estándares eléctricos y de seguridad para proteger contra descargas eléctricas, sobrecargas y garantizar un funcionamiento seguro en entornos de baja tensión.

IEC 61010-031

Especifica los requisitos de seguridad para conjuntos de sondas manipuladas y sostenidas a mano, utilizados en pruebas y mediciones eléctricas, así como para sus accesorios relacionados. Estos conjuntos de sondas se utilizan para la conexión eléctrica sin contacto o directa entre una parte y el equipo de pruebas y mediciones eléctricas. Pueden estar fijados al equipo o ser accesorios desmontables para el equipo.

IEC 61326

Esta norma establece los requisitos para la inmunidad electromagnética de los equipos utilizados en aplicaciones de medidas, control y laboratorio.

Se aplica a una amplia gama de equipos, incluyendo instrumentos de medición, dispositivos de control y equipos de laboratorio utilizados en diversos campos como la electrónica, la ingeniería, la investigación científica y otros entornos similares.

Establece los niveles de inmunidad que los equipos deben cumplir para resistir las perturbaciones electromagnéticas que pueden estar presentes en su entorno. Estas perturbaciones pueden incluir campos eléctricos y magnéticos, transitorios rápidos de voltaje, ruido de radiofrecuencia y otras fuentes de interferencia electromagnética.

Además, incluye pautas para la emisión de perturbaciones electromagnéticas generadas por los equipos. Estos límites de emisión se establecen para evitar que los equipos interfieran con otros dispositivos cercanos.

NIST



Figura 9 - National Institute of Standards and Technology.

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (National Institute of Standards and Technology, NIST) es una agencia federal de los Estados Unidos. Fue fundada en 1901 y es parte del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. El NIST tiene como objetivo promover la innovación y la competitividad industrial mediante el desarrollo y la promoción de estándares y tecnologías de medición.

A través de investigaciones científicas y técnicas, el NIST desarrolla y mantiene estándares de medición precisos y confiables que se utilizan en diversas industrias y aplicaciones.

Además de su labor en la normalización y la metrología, el NIST también se dedica a la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas. El NIST también ofrece servicios y recursos, como programas de calibración, evaluación de seguridad, evaluación de interoperabilidad y acceso a bases de datos y herramientas de referencia.

NIST Special Publication 250

Este documento proporciona recomendaciones generales sobre la calibración de equipos de medición electrónica, incluidos los generadores de señales. Ofrece directrices para asegurar mediciones precisas y confiables, y aborda aspectos como la incertidumbre de medición, las técnicas de calibración y la trazabilidad de las mediciones.

NIST Technical Note 1337

Este documento aborda la precisión de los generadores de señales y osciladores en aplicaciones de medición y pruebas. Proporciona información sobre la evaluación y el rendimiento de estos dispositivos, incluidos los generadores de funciones con SDD.

NIST Special Publication 960-1

Esta publicación proporciona orientación y recomendaciones para la calibración de generadores de señales y osciladores. Puede ser útil para establecer los requisitos de calibración y verificar la precisión de los generadores de funciones con SDD.

NIST Special Publication 1065

Esta guía trata sobre la validación y verificación de software utilizado en sistemas de medición. Si el generador de funciones con SDD está controlado por software, esta norma puede ser relevante para garantizar la precisión y confiabilidad del software utilizado.

Nacionales

IRAM



**Instituto Argentino
de Normalización
y Certificación**

Figura 10 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM es el acrónimo de Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Es una organización técnica y de normalización reconocida en Argentina. El IRAM es responsable de establecer y promover normas técnicas en una amplia variedad de sectores industriales y comerciales en el país.

El objetivo principal del IRAM es fomentar la calidad, la seguridad y la eficiencia en productos, procesos y servicios a través de la normalización y la certificación. Para lograrlo, el IRAM desarrolla normas técnicas en colaboración con expertos de la industria, la academia y el gobierno, siguiendo prácticas y estándares internacionales reconocidos.

Las normas IRAM se utilizan para establecer los requisitos técnicos, las especificaciones y las guías que deben cumplir los productos, los procesos y los servicios en Argentina. Además de la normalización, el IRAM verifica y certifica que los productos, los sistemas y los procesos cumplen con los requisitos establecidos en las normas correspondientes.

Las siguientes normas IRAM tienen como base las normas IEC. IRAM adapta dichas normas a los requisitos y limitaciones de la legislación argentina

IRAM IEC 61010

Se aplica a equipos de medición, control y laboratorio. Establece requisitos de seguridad para equipos utilizados en aplicaciones de medición y control en laboratorios, así como en entornos industriales y comerciales. La norma aborda aspectos como la protección contra descargas eléctricas, la seguridad de las entradas y salidas, y otros requisitos de seguridad específicos.

IRAM IEC 61326

Se refiere a la compatibilidad electromagnética (EMC) de equipos eléctricos y electrónicos. Establece requisitos para la inmunidad y emisión de interferencias electromagnéticas generadas por equipos y sistemas eléctricos y electrónicos. La norma aborda aspectos como los límites de emisión, la inmunidad a interferencias electromagnéticas y los requisitos de marcado.

IRAM IEC 62368-1

Tiene el mismo enfoque basado en el rendimiento que su equivalente internacional, establecer requisitos para la protección contra riesgos eléctricos, térmicos, mecánicos y otros peligros potenciales. Se aplica a equipos electrónicos y eléctricos.

Los fabricantes que deseen cumplir con los requisitos de seguridad en Argentina deberán seguir los lineamientos y las pautas establecidas por esta norma durante el diseño, la fabricación y las pruebas de sus equipos. Esto incluye la evaluación de riesgos y la aplicación de medidas de seguridad adecuadas.

IRAM 2404

Esta norma establece los requisitos para la seguridad eléctrica en instalaciones eléctricas de baja tensión. Incluye aspectos como el diseño y la construcción de instalaciones eléctricas, los sistemas de puesta a tierra, la protección contra sobretensiones y otros aspectos relacionados con la seguridad eléctrica.

En general, todas estas normas además establecen los criterios de prueba y los procedimientos para evaluar la conformidad de los equipos. Los fabricantes pueden realizar pruebas en sus equipos para demostrar el cumplimiento de las normas antes de ponerlos en el mercado.

INTI



INTI

**Instituto
Nacional
de Tecnología
Industrial**

Figura 11 - Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

RTM

La Resolución Técnica Metrológica tiene como objetivo garantizar la precisión, confiabilidad y seguridad de los instrumentos de medición utilizados en diversos ámbitos, como la industria, el comercio, la salud y el medio ambiente. Estas normativas establecen los requisitos técnicos y metrológicos que deben cumplir los instrumentos de medición, así como los procedimientos de verificación y calibración necesarios para garantizar su correcto funcionamiento.

Estas normativas son aplicables en todo el territorio argentino y su cumplimiento es obligatorio para los fabricantes, importadores, comerciantes y usuarios de instrumentos de medición.

Resolución Técnica Metrológica (RTM) N° 4/91: Se especifican aspectos como la exactitud de la señal generada, la estabilidad de frecuencia, la potencia de salida y otros parámetros relevantes.

Resolución Técnica Metrológica (RTM) N° 10/91: Se establecen los procedimientos y criterios para asegurar que el generador de señales cumpla con los requisitos de precisión y exactitud.

Sellos de calidad y de cumplimiento de normativas

En el caso de un generador de señales, existen varios sellos de calidad y cumplimiento de normativas que podrían ser útiles para demostrar la conformidad del producto y transmitir confianza a los usuarios. Algunos sellos relevantes podrían ser:

Marca de conformidad CE

El marcado CE es un requisito legal en la Unión Europea y certifica que el producto cumple con las normas de seguridad, salud y medio ambiente aplicables en el mercado europeo.



Figura 12 - Marca de conformidad CE.

En actualidad a nivel mundial las normas ISO 9000 y ISO 14000 son requeridas, debido a que garantizan la calidad de un producto mediante la implementación de controles exhaustivos, asegurándose de que todos los procesos que han intervenido en su fabricación operan dentro de las características previstas.

Toda empresa debe tener en cuenta estas normas ya que son el punto de partida en la estrategia de la calidad, así como para la posterior certificación de la empresa. La calidad de un producto no nace de controles eficientes, nace de un proceso productivo y de soportes que operan adecuadamente, en este espíritu están basadas las normas ISO, por esta razón estas normas se aplican a la empresa y no a los productos de esta. ISO 14001 es la norma internacionalmente reconocida para la Gestión de Sistemas Medioambientales (EMS). Dicha norma proporciona orientación respecto a como gestionar los aspectos medioambientales de sus actividades, productos y servicios de una forma más efectiva, teniendo en consideración la protección del Medioambiente, la prevención de la contaminación y las necesidades socio-económicas.

Certificación ISO 9001

Esta certificación establece estándares para la gestión de calidad en una organización. Obtener la certificación ISO 9001 demuestra que el fabricante sigue un sistema de gestión de calidad eficaz en la producción del generador de señales.



Figura 13 - Sello de certificación ISO 9001.

Certificación ISO 14001

Se refiere a la norma internacional de sistemas de gestión ambiental. El objetivo principal es ayudar a las organizaciones a minimizar su impacto ambiental, cumplir con los requisitos legales y reglamentarios aplicables y promover la mejora continua en el desempeño ambiental. Esta norma se basa en el ciclo de mejora continua conocido como el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar) y se alinea con otros estándares de sistemas de gestión, como la norma ISO 9001.

Esta certificación puede ser otorgada por organismos de certificación independientes después de una evaluación del sistema de gestión ambiental de la organización.



Figura 14 - Sello de certificación ISO 14001.

Certificación de seguridad eléctrica

Dependiendo de la región o del mercado objetivo, podría ser útil obtener certificaciones específicas de seguridad eléctrica.



Figura 15 - Sello de certificación de seguridad eléctrica.

Los productos alcanzados por los regímenes de certificación obligatoria cuentan con un símbolo de seguridad. Dicho símbolo deberá exhibirse acompañado por el logotipo del organismo de certificación reconocido interviniente, o bien su número identificatorio, y el número del certificado correspondiente al producto de que se trate.

Diseño y confección del equipo

Para el diseño y puesta en funcionamiento del dispositivo, es necesario, como primera medida, estudiar el principio de funcionamiento de esta clase de equipos y definir un diagrama en bloques que represente cada una de las etapas que componen el dispositivo. Luego de esto, es interesante realizar simulaciones, para definir, a grandes rasgos, el alcance y limitaciones del circuito implementado como también las posibles mejoras a aplicar sobre él. Una vez que realizamos todas las pruebas pertinentes, confeccionamos un primer prototipo, para poder visualizar el comportamiento del circuito en un entorno real y no ficticio como lo es una simulación. Esto, nos ayudó a ver que las prestaciones del mismo estaban lejanas a lo que son los generadores de señales de laboratorio, por lo que debimos buscar una aplicación que se adapte a las características que obtuvimos sin perder la importancia de su uso.

Principio de funcionamiento

Un SDD es un dispositivo en el cual los puntos de una forma de onda se almacenan en formato digital y se utilizan para generar la señal de salida. La frecuencia de salida del sintetizador está determinada por la velocidad a la que el sintetizador completa una forma de onda.

El SDD basado en NCO (oscilador controlado numéricamente) utiliza una técnica de salto de puntos y la interpolación constante de la señal almacenada, la cual se ejecuta a una velocidad de actualización constante igual a la del reloj. La señal se almacena en una memoria y se accede mediante un índice que se incrementa a una velocidad igual a la frecuencia de la señal generada. El SDD es capaz de generar señales de salida de frecuencia muy alta y precisa.

A medida que aumenta la frecuencia de salida del SDD, el número de muestras por ciclo de la forma de onda disminuye. Esto significa que la precisión de la señal generada también disminuye. Para garantizar la precisión de la señal generada, es necesario tener una resolución de tiempo suficientemente alta. Esto se logra mediante el uso de una tasa de muestreo lo suficientemente alta y un procesamiento de señal adecuado.

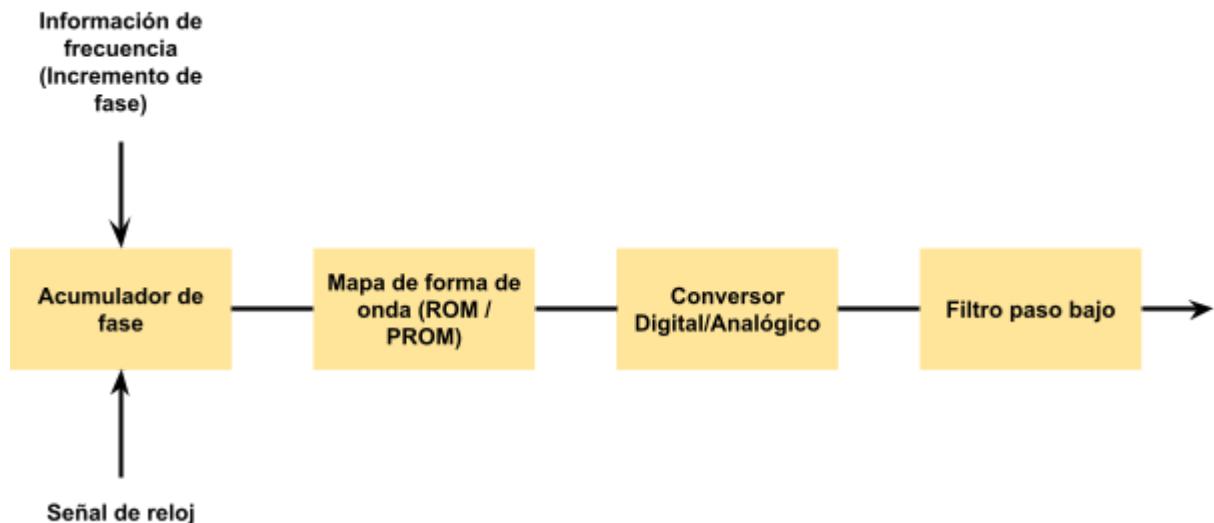


Figura 16 - Diagrama de bloques (principio de funcionamiento).

En la figura anterior, se puede apreciar la presencia de varios componentes importantes. En primer lugar, se encuentra un acumulador de fase que se utiliza para generar la señal de salida. Este acumulador de fase permite ajustar la fase y la frecuencia de la señal generada. En segundo lugar, hay una memoria que contendrá los valores que formarán la forma de onda.

Además, se observa un conversor digital analógico (DAC) que se utiliza para convertir la señal digital generada por el acumulador de fase y la memoria en una señal analógica. Por último, se puede apreciar la presencia de un filtro paso bajo cuya función es eliminar las frecuencias no deseadas de la señal generada.

Elección del módulo a utilizar: Módulo AD9833

El módulo AD9833 es un generador de funciones programable desarrollado por Analog Devices que utiliza síntesis digital directa para generar señales sinusoidales y otras formas de onda tales como señales triangulares y señales cuadradas.

El AD9833 permite generar señales precisas y estables con una alta resolución en frecuencia y fase.

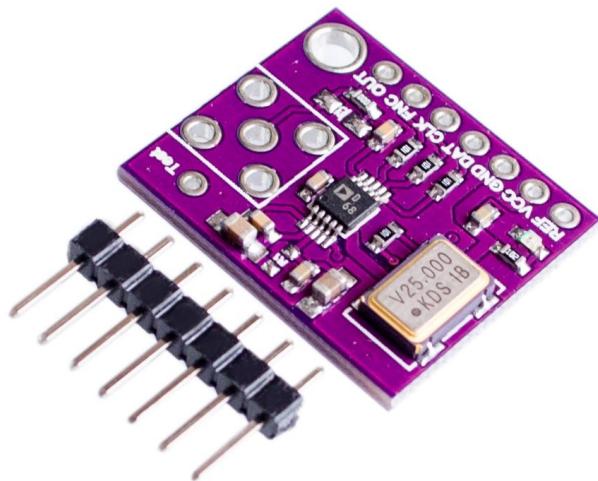


Figura 17 - AD9833.

Principales características incluyen:

Síntesis Digital Directa (SDD): Emplea técnicas digitales para generar señales de forma precisa y flexible. Permite ajustar la frecuencia y la fase de la señal de manera programable.

Resolución de Frecuencia: El AD9833 tiene una resolución de frecuencia de hasta 0.1 Hz (dependiendo de la frecuencia de reloj utilizada), lo que permite una generación muy precisa de señales en un amplio rango de frecuencias.

Salidas: Puede generar señales sinusoidales, cuadradas y triangulares. También admite la generación de señales de salida de dos frecuencias (FSK) y modulación de amplitud (ASK).

Interfaz de Control: El dispositivo se controla a través de una interfaz serie, generalmente SPI (Interfaz de Periférico en Serie), lo que permite una comunicación sencilla con microcontroladores u otros dispositivos.

Aplicaciones: El AD9833 es comúnmente utilizado en aplicaciones que requieren generación de señales precisas, como equipos de prueba y medición, instrumentación, comunicaciones y sistemas de audio.

PINOUT

Para comprender mejor cómo funciona este módulo generador de funciones, es esencial familiarizarse con su configuración de pines. Cada pin juega un papel fundamental en la operación y control del AD9833, permitiendo la comunicación con sistemas de control y la configuración precisa de la señal de salida. A continuación describimos los pines del módulo AD9833 y sus funciones clave.

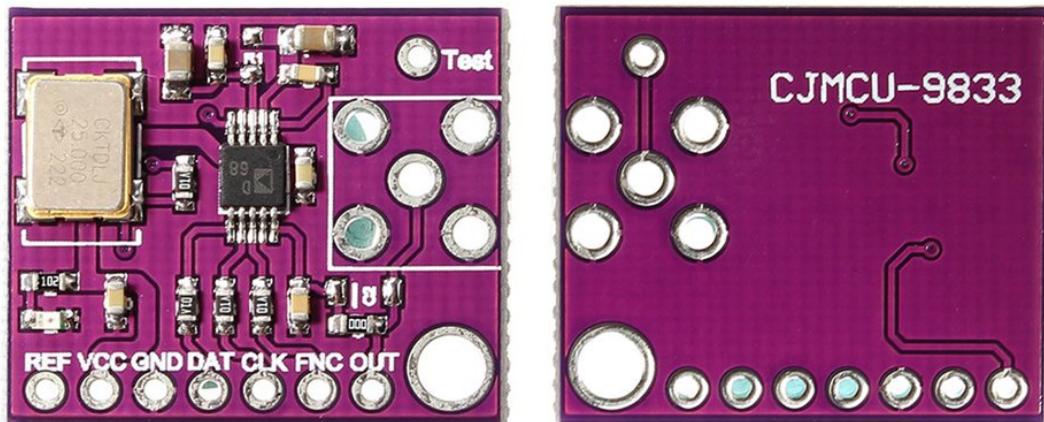


Figura 18 - AD9833 - PINOUT.

- **REF:** Este pin se utiliza para conectar una referencia de voltaje externa al módulo AD9833. La referencia de voltaje se utiliza para establecer el rango de salida de frecuencia y amplitud del generador de funciones. En algunos casos, este pin se conecta directamente a la fuente de alimentación.
- **VCC:** Este es el pin de suministro de voltaje. Se debe conectar la fuente de alimentación positiva (VCC) a este pin para proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento del módulo.
- **GND:** Este pin se conecta a la tierra (GND) y se utiliza como referencia de voltaje común para el módulo.
- **DAT (Data):** Este pin se utiliza para transmitir los datos serie desde el controlador (microcontrolador, FPGA, etc.) al módulo AD9833. Los datos transmitidos a través de este pin incluyen comandos y configuraciones para establecer la frecuencia, forma de onda y amplitud.
- **CLK (Clock):** Este pin se utiliza para proporcionar la señal de reloj para la comunicación serie entre el controlador y el módulo AD9833. Los datos en el pin DAT se sincronizan con la señal de reloj en este pin.
- **FNC (Function):** Este pin se utiliza para controlar las funciones de salida del AD9833, como la forma de onda generada (senoidal, triangular, cuadrada, etc.).

- **OUT (Output):** Este es el pin de salida del generador de funciones AD9833. Aquí es donde se obtiene la señal de forma de onda generada según las configuraciones establecidas a través de los pines DAT y CLK, y la función seleccionada mediante el pin FNC.

Cualidades y limitaciones

El módulo AD9833, diseñado para generar señales de formas de onda programables, presenta una serie de ventajas y desventajas que deben estudiarse al habernos decidido por su implementación. A continuación enumeramos algunas de las ventajas y desventajas de este módulo para comprender cómo puede influir en nuestro equipo.

Ventajas:

Precisión y Estabilidad: El AD9833 utiliza síntesis digital directa (SDD) para generar señales, lo que resulta en una alta precisión y estabilidad en las frecuencias generadas. Esto es especialmente importante en aplicaciones que requieren mediciones precisas o generación de señales de alta calidad.

Flexibilidad: Puede generar diferentes formas de onda, incluyendo señales sinusoidales, cuadradas y triangulares. Además, permite la modulación digital, lo que lo hace versátil para una variedad de aplicaciones.

Resolución en Frecuencia: Ofrece una alta resolución en frecuencia, lo que significa que puedes ajustar la frecuencia de salida con gran precisión. Esto es útil en aplicaciones donde se requiere cambiar la frecuencia de manera gradual y precisa.

Control Digital: Se controla mediante una interfaz digital, como SPI, lo que facilita su integración con microcontroladores y sistemas digitales.

Tamaño Compacto: Es un circuito integrado, por lo que ocupa relativamente poco espacio en un diseño electrónico.

Desventajas:

Necesidad de Referencia de Reloj: Para funcionar correctamente, el AD9833 requiere una referencia de reloj externa. Esto puede agregar complejidad al diseño y requerir componentes adicionales.

Distorsión en Frecuencias Altas: A medida que se aumenta la frecuencia de operación, el AD9833 puede experimentar distorsiones armónicas y no linealidades, lo que limita su rendimiento en frecuencias más altas.

Limitaciones de Potencia: La salida de señal puede tener limitaciones en términos de potencia de salida, lo que podría no ser adecuado para aplicaciones de alta potencia.

Possible Ruido Espurio: En algunas configuraciones y condiciones, el AD9833 puede presentar niveles de ruido espurio en la señal de salida, lo que podría afectar la calidad en aplicaciones sensibles al ruido.

Necesidad de una etapa de amplificación: Debido a que los niveles de tensión de la señal de salida generada son del orden de los milivoltios en las señales senoidales y triangulares, en ciertas aplicaciones será necesario contar con una etapa de amplificación a la salida del circuito integrado.

Costo: Dependiendo de las necesidades de la aplicación que se desea realizar y presupuesto con el que se cuenta, el AD9833 podría ser más costoso en comparación con otras soluciones más simples de generación de señales.

En general, las ventajas del AD9833, como su precisión y flexibilidad en la generación de señales, suelen superar sus desventajas en muchas aplicaciones donde se requiere una generación de señales controlada y precisa.

Circuitos desarrollados

Prototipo 1

Para el desarrollo del primer prototipo, hemos determinado que la mejor opción para nuestro diseño de circuito es la combinación de un microcontrolador **Arduino Uno** y el módulo elegido el SDD integrado **AD9833**.

Para el control del circuito decidimos utilizar el Arduino Uno. Este posee un microcontrolador de 8 bits **ATMega328P** que es altamente versátil y de bajo consumo energético. Además es compatible con una gran cantidad de librerías y entornos de programación que nos darán flexibilidad y facilidad para lograr el control deseado del circuito.

En cuanto al circuito en sí, además de la combinación del Arduino Uno y el módulo AD9833, se incluirá un display alfanumérico de 16 x 2 caracteres. Este display permitirá visualizar información relevante como la frecuencia generada y el tipo de señal.

Asimismo, se implementarán cuatro pulsadores que actuarán como interfaces de entrada para el usuario. Estos pulsadores estarán conectados al microcontrolador y permitirán realizar acciones como aumentar o disminuir la frecuencia de la señal generada, ajustar el multiplicador utilizado para acceder a frecuencias mayores y seleccionar el tipo de señal deseado. La interacción con los pulsadores se logrará mediante técnicas de detección de flancos y manejo de interrupciones, lo que brindará una experiencia de control intuitiva y precisa.

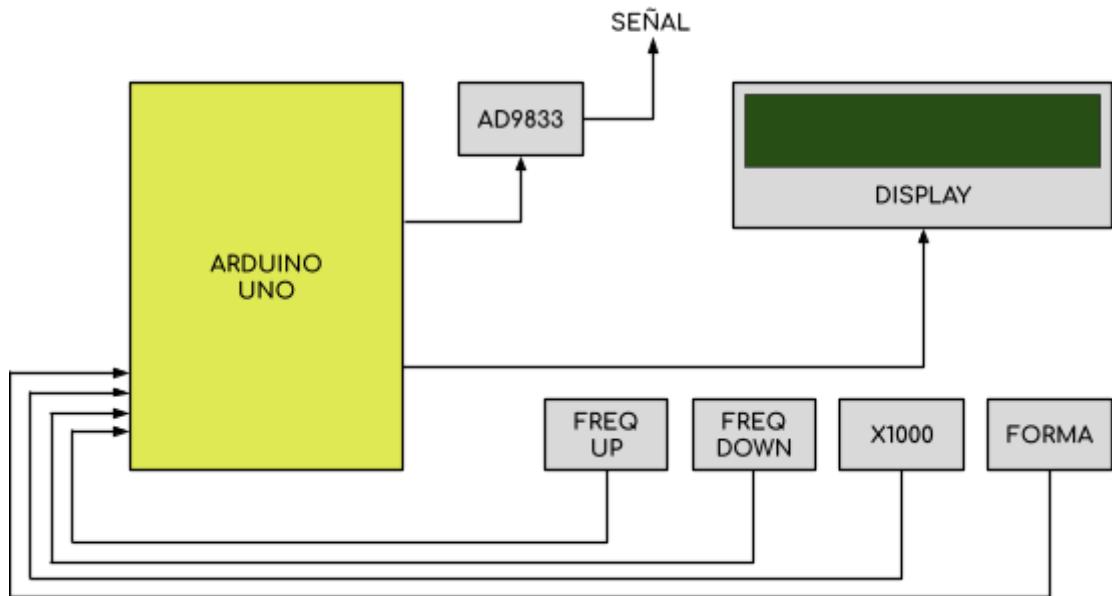


Figura 17 - Diagrama de bloques del circuito a desarrollar.

Conexionado del prototipo

Se procedió a realizar el conexionado del prototipo 1 basandonos en el diagrama de bloques desarrollado anteriormente.

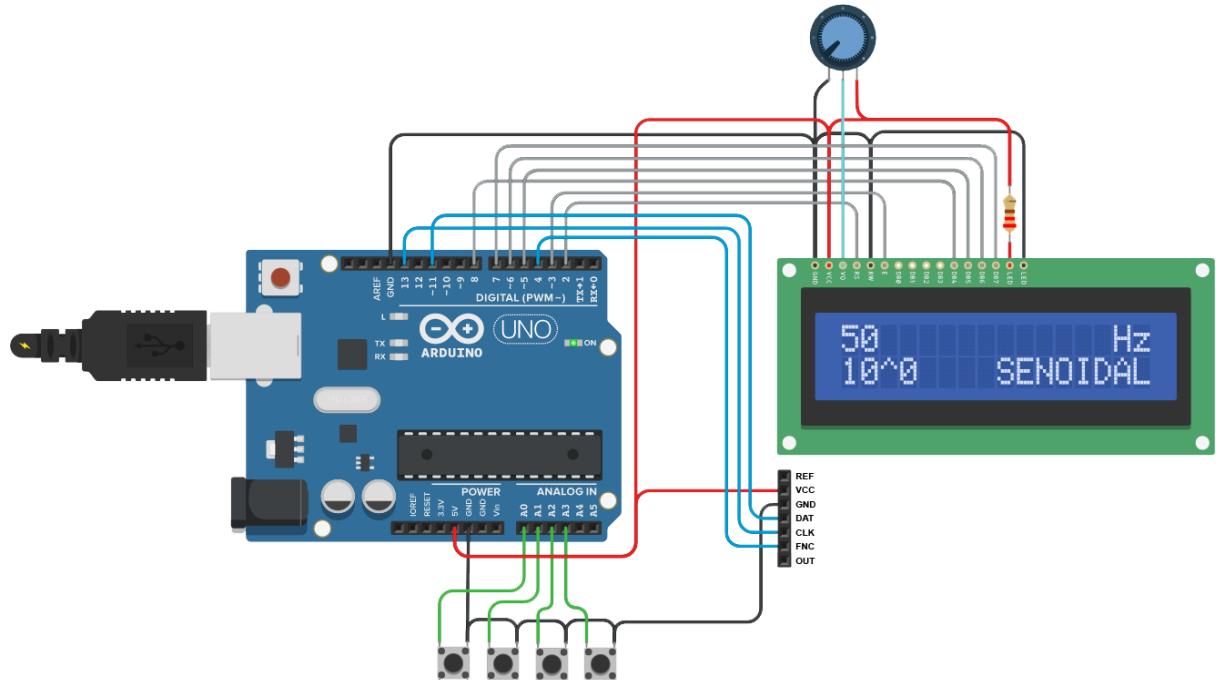


Figura 18 - Conexionado del prototipo 1.

Posibles mejoras para el rendimiento o prestaciones del prototipo

Hay varias formas de mejorar el funcionamiento o las prestaciones de un AD9833.

Filtrado de salida: Agregar un filtro pasa-bajos a la salida del AD9833 puede reducir las componentes armónicas y espurias en la señal, mejorando la calidad de la forma de onda y reduciendo el ruido.

Compensación de no linealidades: A medida que aumenta la frecuencia de operación, el AD9833 puede experimentar no linealidades. Implementar técnicas de corrección digital o ajustes de software puede ayudar a compensar estas no linealidades y mejorar la linealidad de la señal de salida.

Amplificación de la señal de salida: Debido al bajo nivel de la señal generada a la salida del integrado es recomendable la utilización de un amplificador operacional de alta frecuencia en su configuración no inversor para así aumentar la amplitud de la señal.

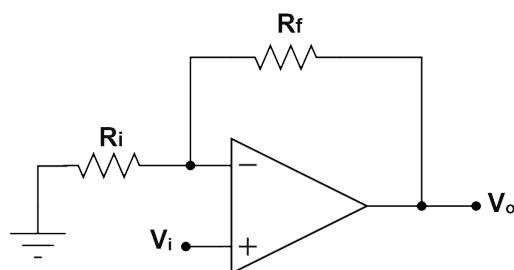


Figura 19 - Posible etapa de amplificación.

Sincronización Externa: En algunas aplicaciones, puedes sincronizar el AD9833 con otras señales o sistemas para lograr una mayor coherencia en las frecuencias generadas. Esto puede ser útil en sistemas de comunicaciones y mediciones específicas.

Control Térmico: El rendimiento del AD9833 puede ser susceptible a variaciones de temperatura. La implementación de técnicas de control térmico puede significativamente mejorar la estabilidad en diversas condiciones ambientales. Una opción para el control térmico es la integración de un sistema de ventilación forzada mediante un enfriador (cooling fan).



Figura 20 - Posible dispositivo de control térmico.

Diseño del gabinete para el Prototipo 1

Para poder contener todas las partes que componen el equipo hemos decidido diseñar un gabinete específico mediante el uso del software SolidWorks, para luego materializarlo haciendo uso de una impresora 3D.

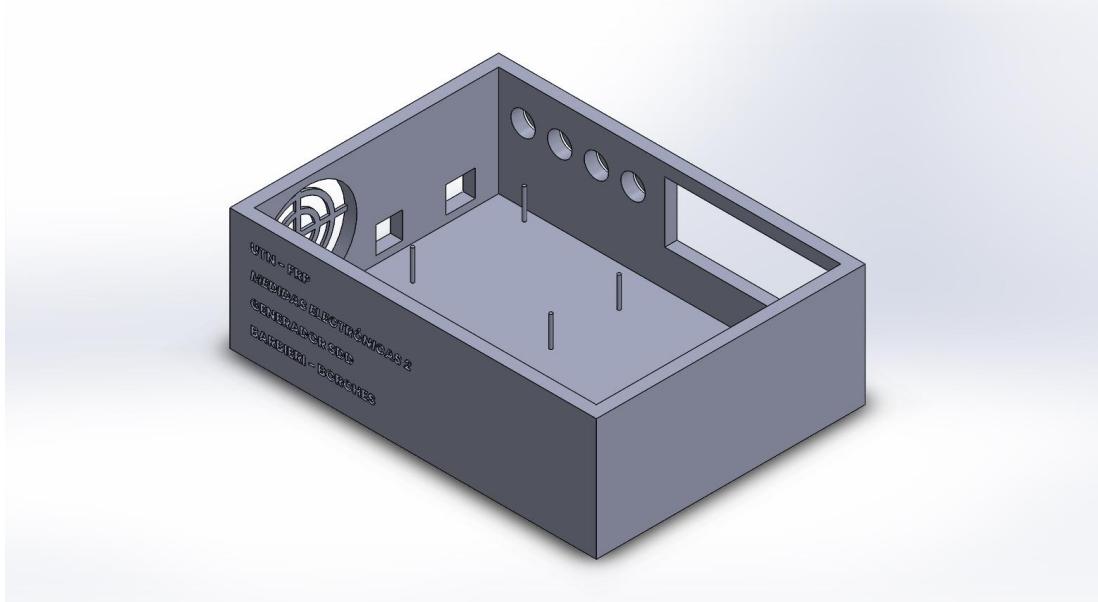


Figura 21 - Prototipo 3D del gabinete del prototipo 1.

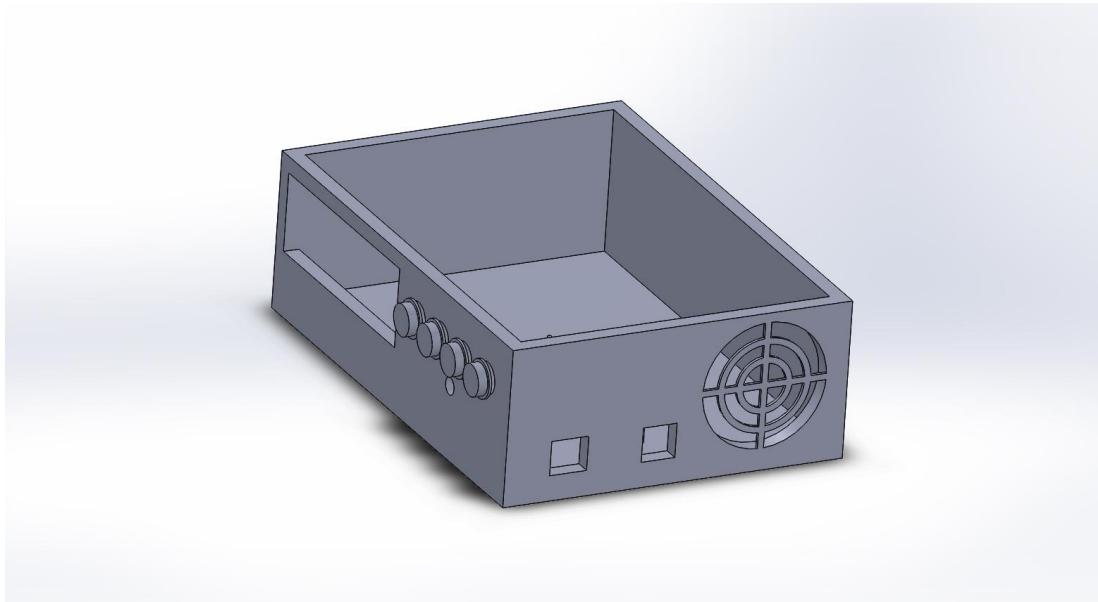


Figura 22 - Prototipo 3D del gabinete del prototipo 1.

Código del prototipo 1 (Arduino)

```
#include<SPI.h>
#include<LiquidCrystal.h>
const int rs = 2, en = 3, d4 = 8, d5 = 5, d6 = 6, d7 = 7;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

//DATA PIN:11, CLOCK PIN:13, FSYNC PIN:4
#define FSYNC 4

#define WAVE_SINE      0x2000
#define WAVE_SQUARE    0x2028
#define WAVE_TRIANGLE  0x2002

#define b_UP          A0
#define b_DOWN        A1
#define b_MULTI       A2
#define b_FUNC         A3

long int counter = 50;
long int counter_ant = 0;
long int function = 0;
long int function_ant = 0;
int multi = 0;
int func = 0;
int func_ant = 0;

void AD9833setup() {
    pinMode(FSYNC, OUTPUT);
    digitalWrite(FSYNC, HIGH);
    SPI.begin();
    delay(50);
    AD9833reset();
}

void AD9833reset() {
    WriteRegister(0x100);
    delay(10);
}

void AD9833setFrequency(long frequency, int Waveform) {
    long FreqWord = (frequency * pow(2, 28)) / 25.0E6;
    int MSB = (int)((FreqWord & 0xFFFFC000) >> 14);
    int LSB = (int)(FreqWord & 0x3FFF);
```

```

    LSB |= 0x4000;
    MSB |= 0x4000;
    WriteRegister(0x2100);
    WriteRegister(LSB);
    WriteRegister(MSB);
    WriteRegister(0xC000);
    WriteRegister(Waveform);
}
void WriteRegister(int dat) {
    SPI.setDataMode(SPI_MODE2);
    digitalWrite(FSYNC, LOW);
    delayMicroseconds(10);
    SPI.transfer(dat>>8);
    SPI.transfer(dat&0xFF);
    digitalWrite(FSYNC, HIGH);
    SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
}
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    AD9833setup();
    pinMode(b_UP, INPUT_PULLUP);
    pinMode(b_DOWN, INPUT_PULLUP);
    pinMode(b_MULTI, INPUT_PULLUP);
    pinMode(b_FUNC, INPUT_PULLUP);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.clear();
}
void actualiza_func() {
    if(!digitalRead(b_FUNC)) {
        delay(50);
        if(!digitalRead(b_FUNC)) {
            if(func_ant == 0)
                func = 1;
            if(func_ant == 1)
                func = 2;
            if(func_ant == 2)
                func = 0;
            func_ant = func;
        }
    }
    if(func == 0) {
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print(" SENOIDAL");
        function = WAVE_SINE;
    }
    if(func == 1) {
        lcd.setCursor(6, 1);

```

```

        lcd.print("TRIANGULAR");
        function = WAVE_TRIANGLE;
    }
    if(func == 2){
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print(" CUADRADA");
        function = WAVE_SQUARE;
    }
    if(counter_ant != counter || function_ant != function){
        AD9833setFrequency(counter, function);
    }
    counter_ant = counter;
    function_ant = function;
}
void limpiaDigitos(){
    if(counter < 100){
        lcd.setCursor(2, 0);
        lcd.print("      ");
    }else{
        if(counter < 1000){
            lcd.setCursor(3, 0);
            lcd.print("      ");
        }else{
            if(counter < 10000){
                lcd.setCursor(4, 0);
                lcd.print("      ");
            }else{
                if(counter < 100000){
                    lcd.setCursor(5, 0);
                    lcd.print("      ");
                }else{
                    if(counter < 1000000){
                        lcd.setCursor(6, 0);
                        lcd.print("      ");
                    }else{
                        if(counter < 10000000){
                            lcd.setCursor(7, 0);
                            lcd.print("      ");
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

void loop(){


```

```

switch(multi) {
case 0:
    if(!digitalRead(b_MULTI)) {
        delay(50);
        if(!digitalRead(b_MULTI)) {
            multi = 1;
        }
    }
    if(!digitalRead(b_UP)) {
        delay(50);
        if(!digitalRead(b_UP)) {
            counter++;
        }
    }
    if(!digitalRead(b_DOWN)) {
        delay(50);
        if(!digitalRead(b_DOWN)) {
            if(counter>0)
                counter--;
        }
    }
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("10^0");
    lcd.setCursor(14, 0);
    lcd.print("Hz");
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(counter);
    limpiaDigitos();
    actualiza_func();
    break;
case 1:
    if(!digitalRead(b_MULTI)) {
        delay(50);
        if(!digitalRead(b_MULTI)) {
            multi = 2;
        }
    }
    if(!digitalRead(b_UP)) {
        delay(50);
        if(!digitalRead(b_UP)) {
            counter = counter + 1000;
        }
    }
    if(!digitalRead(b_DOWN)) {
        delay(50);
        if(!digitalRead(b_DOWN)) {
            if(counter>1000)

```

```

        counter = counter - 1000;
    }
}
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("10^3");
lcd.setCursor(14, 0);
lcd.print("Hz");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(counter);
limpiaDigitos();
actualiza_func();
break;
case 2:
if(!digitalRead(b_MULTI)) {
    delay(50);
    if(!digitalRead(b_MULTI)) {
        multi = 0;
    }
}
if(!digitalRead(b_UP)) {
    delay(50);
    if(!digitalRead(b_UP)) {
        if(counter<12500000)
            counter = counter + 1000000;
    }
}
if(!digitalRead(b_DOWN)) {
    delay(50);
    if(!digitalRead(b_DOWN)) {
        if(counter>1000000)
            counter = counter - 1000000;
    }
}
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("10^6");
lcd.setCursor(14, 0);
lcd.print("Hz");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(counter);
limpiaDigitos();
actualiza_func();
break;
}
}

```

Prototipo 2

En el desarrollo de este segundo prototipo, hemos optado por otorgar una funcionalidad específica a nuestro dispositivo. Para esto, decidimos dotar a nuestro generador de señales, basado en el método de síntesis digital directa, de características propias de un equipo portátil y accesible económicamente.

Los cambios más significativos implementados se centran en la reducción del tamaño del dispositivo y en la eliminación de su dependencia fundamental de una fuente de alimentación externa. Asimismo, hemos integrado una etapa de control de la amplitud de la señal generada, lo que brinda al usuario otra vía para ajustar la señal de manera más adecuada a sus necesidades.

Ventajas de la utilización de un equipo portátil

A continuación nombramos algunas de las ventajas que nos da un equipo con estas características.

- **Portabilidad y movilidad:** La principal ventaja de un equipo portátil es su capacidad para ser transportado y utilizado en diversas ubicaciones. Esto es especialmente útil en entornos donde la movilidad y flexibilidad son clave, como en investigación de campo, aplicaciones industriales in situ, etc.
- **Accesibilidad y conveniencia:** Un generador de señales portátil permite a los usuarios llevar consigo la funcionalidad de generación de señales sin restricciones espaciales. Esto significa que pueden llevar a cabo pruebas, mediciones y otros procedimientos donde sea necesario, lo que brinda una mayor comodidad y accesibilidad en el trabajo.
- **Menor dependencia de fuentes de energía externas:** La capacidad de funcionar sin depender de fuentes de alimentación externas específicas aumenta la flexibilidad operativa. Esto es especialmente valioso en situaciones donde no es posible o conveniente acceder a fuentes de alimentación estables, como en situaciones al aire libre o en ubicaciones remotas.
- **Mayor versatilidad de uso:** La portabilidad amplía la gama de aplicaciones potenciales del generador de señales, lo que permite su uso en una variedad de contextos y entornos diferentes. Esto puede abarcar desde aplicaciones de investigación científica hasta pruebas de campo en diferentes ubicaciones geográficas, lo que aumenta la utilidad y el valor del dispositivo.
- **Menor espacio de almacenamiento:** Los equipos portátiles tienden a ocupar menos espacio de almacenamiento, lo que facilita su transporte y almacenamiento cuando no están en uso. Esto puede ser una ventaja significativa en entornos donde el espacio es limitado y se busca optimizar la eficiencia del almacenamiento.

Medidas tomadas para brindarle portabilidad al equipo

La decisión de adoptar un diseño portátil para el equipo en cuestión se basa en varios factores. En primer lugar, la elección se fundamenta en la evaluación de las capacidades y prestaciones del dispositivo en cuestión, lo que ha demostrado que el diseño portátil es adecuado para satisfacer las necesidades específicas de un potencial usuario que requiera desplazar el equipo de un lugar a otro.

Cambio de placa de microcontrolador Arduino

Realizando las investigaciones y comparaciones pertinentes, hemos podido determinar que el Arduino UNO, podía ser reemplazado por un Arduino NANO. El Arduino NANO no solo presenta funcionalidades comparables al UNO, sino que también destaca por su notable reducción de tamaño, lo que contribuiría significativamente a que en la generalidad, nuestro equipo se vuelva más compacto. Esta adaptación no comprometería la eficiencia ni la capacidad de control del dispositivo, al tiempo que garantizaría su portabilidad y facilidad de uso en una variedad de contextos y entornos. Además, al disminuir el espacio ocupado por el controlador, se abrirían posibilidades para incorporar otras características o componentes adicionales que podrían mejorar aún más la funcionalidad del dispositivo.

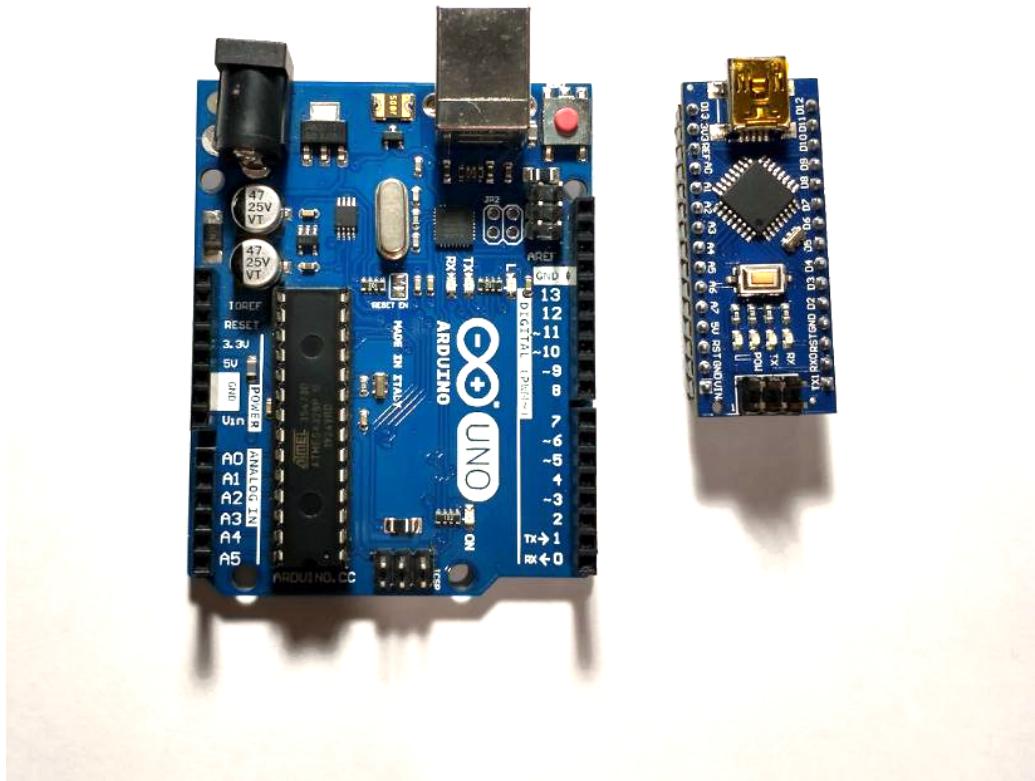


Figura 23 - Arduino UNO vs Arduino NANO.

En la imagen, se puede observar claramente que las dimensiones del Arduino NANO son aproximadamente un cuarto del tamaño del Arduino UNO. Esta notable diferencia en el tamaño indudablemente juega un papel crucial en la reducción del espacio ocupado por el equipo.

Fuente de energía

A pesar de que la alimentación puede ser mediante el cable del propio arduino conectado a una PC por ejemplo, hemos trabajado para reducir la dependencia del equipo a una fuente de alimentación externa. Como parte de esta iniciativa, hemos incorporado la posibilidad de alimentar el Arduino NANO con una batería de 9 [V] a través de su pin VIN. Esto ha sido posible gracias al regulador interno de 5 [V] que posee el Arduino, el cual nos permite obtener dicho nivel de tensión que nos servirá para alimentar los demás componentes del circuito, como el LCD y el AD9833. Con esta configuración, hemos logrado mejorar la autonomía y la portabilidad del dispositivo, brindando a los usuarios una mayor flexibilidad en términos de uso y aplicación en diferentes entornos y situaciones.

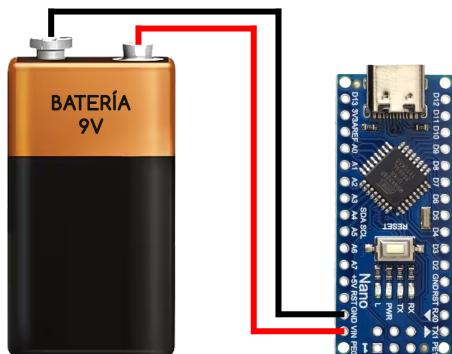


Figura 24 - Alimentación Arduino Nano con batería de 9[V]



Figura 25 - Alimentación Arduino Nano con USB.



Figura 26 - Alimentación Arduino UNO con USB.

Mejoras aplicadas

Etapa de control de amplitud:

Debido a que el diseño original no contaba con un control para la amplitud de la señal se decidió implementar uno.

Dicho circuito fue diseñado de la siguiente manera:

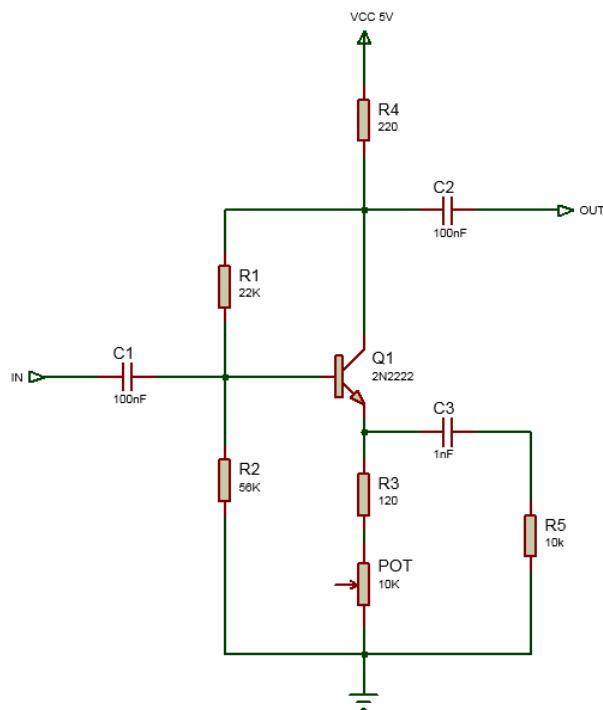


Figura 27 - Etapa de control de amplitud.

Salida de la señal:

Al igual que cualquier otro equipo presente en el mercado nos pareció conveniente incluir un conector de salida que sea adecuado para nuestra aplicación. Es por este motivo que se optó por un conector BNC hembra en formato chasis para la correcta sujeción al gabinete.



Figura 28 - Conector BNC.

Las demás mejoras mencionadas con anterioridad no fueron puestas en práctica debido al nuevo enfoque y al rediseño del dispositivo.

Rediseño del gabinete

A raíz de todos los cambios mencionados anteriormente se procedió al rediseño del gabinete para así adaptarlo a su formato portátil.

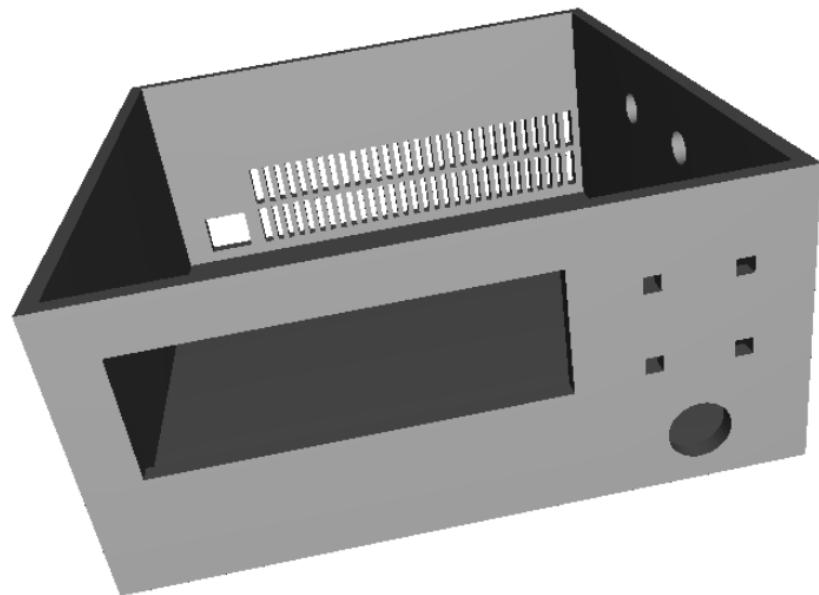


Figura 29 - Gabinete parte frontal.

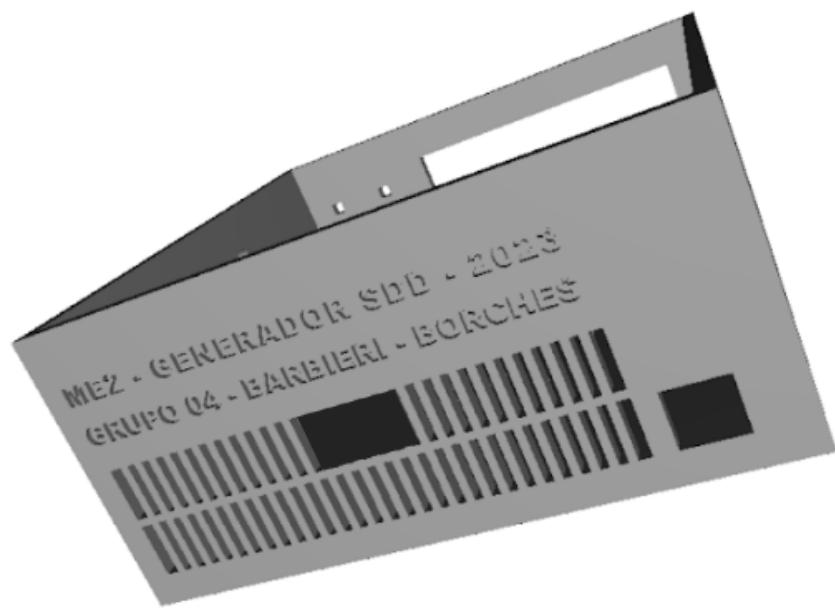


Figura 30 - Gabinete parte trasera.

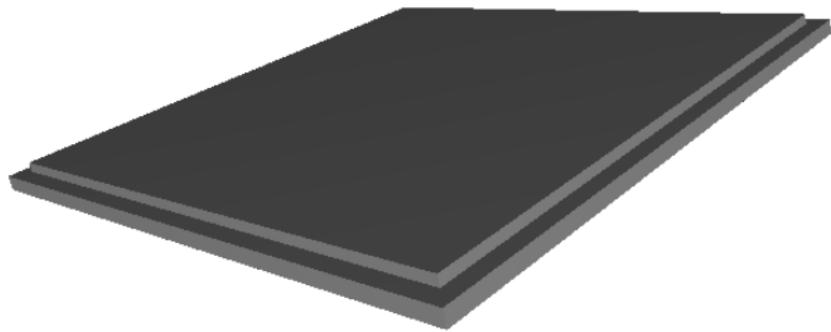


Figura 31 - Tapa del gabinete.

Manual de usuario

Panel frontal

- 1 - LCD:** Muestra la interfaz de usuario.
- 2 - Salida CH:** Señal de salida de CH.
- 3 - Tecla UP Frequency:** Aumenta la frecuencia de la señal generada.
- 4 - Tecla DOWN Frequency:** Disminuye la frecuencia de la señal generada.
- 5 - Tecla de selección de formas de onda:** Incluye las formas de onda: Sinusoidal, cuadrada, triangular.
- 6 - Tecla Multiplicador:** Cambia el multiplicador para poder aumentar o disminuir la frecuencia de forma más sencilla. Pasa de Hz a kHz, de kHz a MHz y de MHz a Hz cíclicamente.

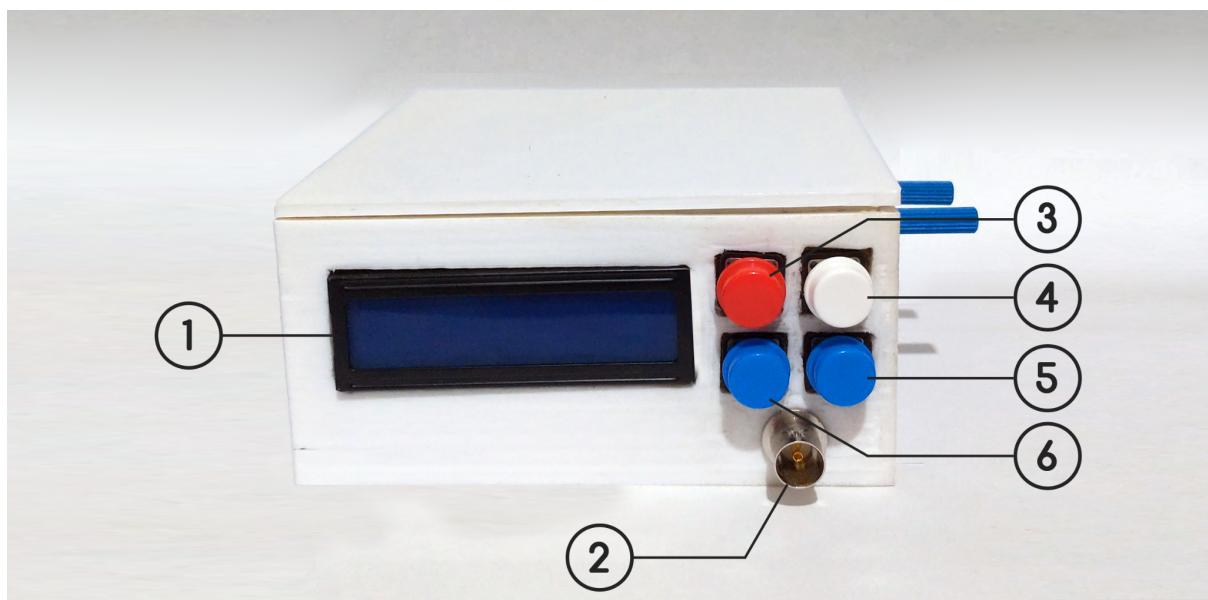


Figura 32 - Panel frontal del equipo.

Panel trasero

- 1 - Botón ON/OFF: Sirve para apagar y prender el dispositivo.
2 - Orificio USB: Sirve para introducir el USB del arduino.

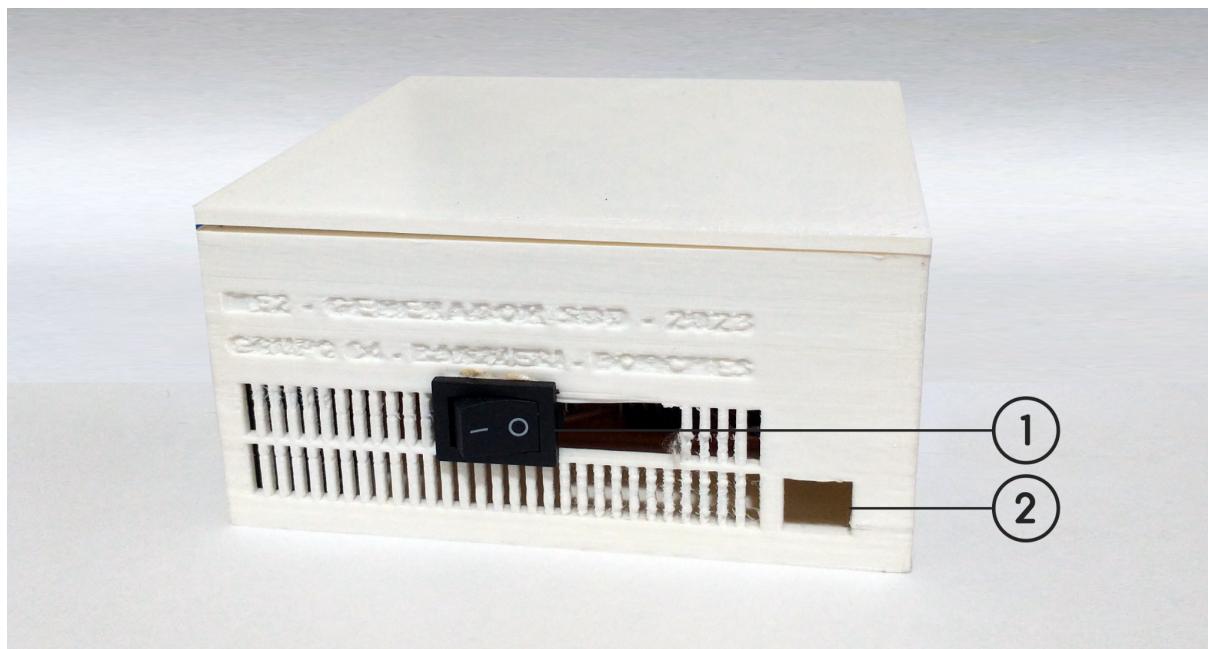


Figura 33 - Panel trasero del equipo.

Panel lateral

- 1 - Potenciómetro LCD: Sirve para regular el contraste del display.
2 - Potenciómetro Amplitud: Sirve para variar la amplitud de la señal de salida.



Figura 34 - Panel lateral del equipo

Interfaz de usuario

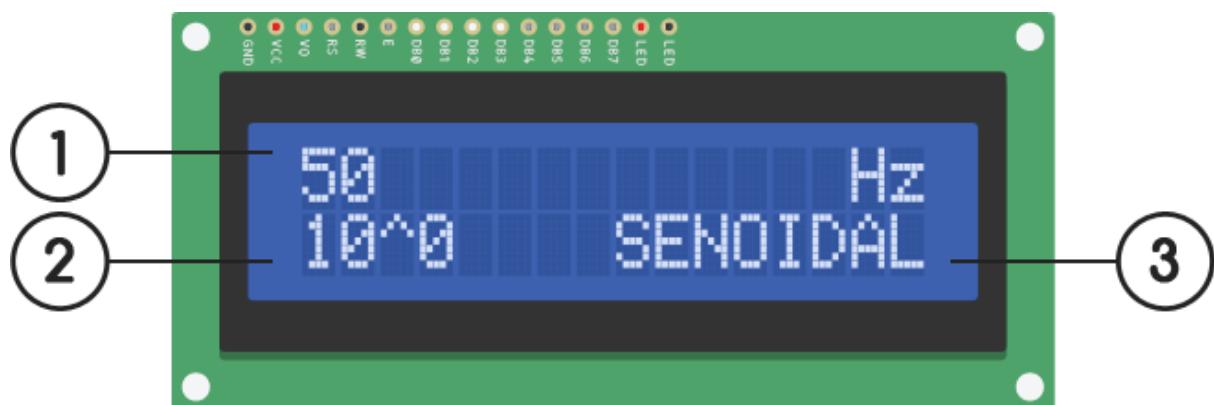


Figura 35 - Interfaz de usuario.

1 - Frecuencia de la señal de salida.

2 - Multiplicador.

3 - Forma de onda generada.

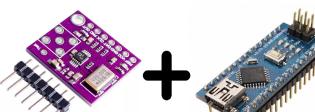
Análisis de mercado

Tabla comparativa

Se creó una tabla comparativa para analizar y contrastar los parámetros clave de los generadores de señales de frecuencia directa (SDD) disponibles en el mercado y los circuitos integrados que podrían utilizarse para la generación de señales mediante esta técnica. Es importante aclarar, que algunos de los dispositivos incluidos en la tabla comparativa son elementos de laboratorio y que los mismos tienen prestaciones muy superiores a lo que quizás podría llegar a tener un dispositivo de uso hogareño.

Se consideraron aspectos como el tipo de señal que son capaces de generar, la resolución, frecuencia máxima de muestreo, corriente de escala completa del DAC, entre otros, con el objetivo de identificar la idoneidad de estos dispositivos para diferentes aplicaciones. Esta tabla proporciona una herramienta de referencia para seleccionar el generador de señales más adecuado en función de los requisitos de diseño y características de desempeño deseadas.

Tabla comparativa de Generadores de función DDS

Característica	Dispositivo					
	DDS Arduino	AD9833 + Arduino NANO	AD9850	AD9915	Owon AG051F	Owon XDG3252
Dispositivo						
Señales generadas	Senoidal, Triangular, Cuadrada ★★★	Senoidal, Triangular, Cuadrada ★★★	Senoidal ★★	Senoidal ★★	Senoidal, cuadrada, pulso, rampa, ruido ★★★★★	Senoidal, rampa, cuadrada, pulso, armónico, ruido ★★★★★
Resolución [Hz]	1 ★★	0,1 ★★★	0,291 ★★★	1,35E-10 ★★★★★	1E-06 ★★★★★	1E-06 ★★★★★
Frecuencia máxima de muestreo [MHz]	16 ★★★	12,5 ★★★	125 ★★★★	1250 ★★★★★	5 ★★	250 ★★★★
Corriente de escala completa del DAC [mA]	- -	20 ★★★★★	20 ★★★★★	20,48 ★★★★★	- -	- -
Resolución de DAC [bits]	8 ★★★	10 ★★★★	10 ★★★★	12 ★★★★★	14 ★★★★★	14 ★★★★★
Número de canales de salida	1 ★★★	1 ★★★	1 ★★★	1 ★★★	1 ★★★	2 ★★★★★
Precio [Dólares]	2,88 ★★★★★	5,28 ★★★★★	12,87 ★★★★★	25,48 ★★	347,62 ★★	1649,23 ★

Análisis de costos

En lo que refiere a los costos para la realización del dispositivo nos pareció pertinente realizar la evaluación utilizando la moneda dólar y así poder tener un mejor panorama a la hora de evaluar proveedores en un hipotético escenario de producción donde lo que se busca es minimizar los costos de producción y elevar las ganancias.

Descripción	Precio
AD9833	US\$2,74
Arduino Nano	US\$2,54
Pulsadores	US\$0,37
Display LCD 16x2	US\$1,02
Potenciómetros	US\$0,22
Conector BNC	US\$0,78
Impresión 3D	US\$6,43
Total	US\$14,10

Tabla de análisis de costos.

Tomando una relación de **1 U\$S = \$ 720** aplicando los impuestos pertinentes podemos decir que nuestro dispositivo tiene un costo total de **\$10.152**. Teniendo en cuenta que en el mercado (tomando como referencia Mercado Libre como fuente) podemos conseguir un generador de funciones con prestaciones similares al nuestro (**XR2206**); el cual viene como kit cerrador para armar; por un precio de **\$20.690** aproximadamente, podemos decir que nuestro dispositivo podría competir fácilmente en el mercado, además pudiendo introducir mejoras o prestaciones personalizadas para cada cliente.

Conclusión

El desarrollo íntegro de todo el presente trabajo práctico nos llevó a concluir que el desarrollo de un dispositivo de las características de un generador de funciones conlleva muchas consideraciones a la hora de su desarrollo. Por otra parte, al tener la ventaja de ser quienes desarrollamos el dispositivo y potenciales usuarios del mismo nos hizo reevar y adaptar mucho mejor las prestaciones del mismo.

Asimismo, el estudio de las normativas relacionadas con este tipo de equipos resultó ser de gran utilidad para establecer requisitos técnicos, de seguridad y de calidad. Esta investigación también contribuyó a garantizar la precisión, confiabilidad y seguridad del equipo que desarrollamos.

Finalmente, el haber cambiado el enfoque hacia el camino de un dispositivo portátil nos dio la pauta de lo útil que puede llegar a ser un dispositivo de estas características y la oportunidad que podría tener el equipo para introducirse fácilmente en el mercado, ya que estas características son de gran utilidad, y muchas veces nos brindan comodidad y una solución para salir de apuros.

Referencias

- [1] - AcMax, Edgar Gastellou. *Generadores de Funciones, Todo lo que necesitas saber sobre ellos* (2020). Mexico. Consulta: 20 de Abril de 2023. Disponible en:
[<https://acmax.mx/que-es-un-generador-de-funciones>](https://acmax.mx/que-es-un-generador-de-funciones).
- [2] - Fernando Rafael Filipuzzi. *Medidas II* (2023). Paraná, Argentina. Consulta: 21 de Abril de 2023. Disponible en:
[<https://docs.google.com/document/d/1Xu5IXhVjXID7szbK7SJAaye2NicKIASR6PXoBqksiTg/edit#>](https://docs.google.com/document/d/1Xu5IXhVjXID7szbK7SJAaye2NicKIASR6PXoBqksiTg/edit#).
- [3] - AnalogDevices, David Brandon. *Direct Digital Synthesizers in Clocking Applications Time Jitter in Direct Digital Synthesizer-Based Clocking Systems* (2006). Boston, Estados Unidos. Consulta: 21 de Abril de 2023. Disponible en:
[<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/475354741144165304775709740692131461831AN823_0.pdf>](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/475354741144165304775709740692131461831AN823_0.pdf).
- [4] - Generador de señales *Generador de funciones*. Consulta: 22 de Abril de 2023. Disponible en: <<https://xn--generadordeseales-rxb.com/generator-de-funciones/>>.
- [5] - AnalogDevices. *Programmable Waveform Generator AD9833* (2018). Boston, Estados Unidos. Consulta: 22 de Abril de 2023. Disponible en:
[<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1092259/AD/AD9833.html>](https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1092259/AD/AD9833.html).
- [6] - AnalogDevices. *Preliminary Technical Data - AD9833 Datasheet* (2018). Boston, Estados Unidos. Consulta: 22 de Abril de 2023. Disponible en:
[<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48600/AD/AD9833.html>](https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48600/AD/AD9833.html).
- [7] - AnalogDevices. *Direct Digital Synthesizer - AD9915 Datasheet* (2012).. Boston, Estados Unidos. Consulta: 22 de Abril de 2023. Disponible en:
[<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/474533/AD/AD9915.html>](https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/474533/AD/AD9915.html).
- [8] - AnalogDevices. *Complete DDS Synthesizer - AD9850 Datasheet* (2006). Boston, Estados Unidos. Consulta: 21 de Abril de 2023. Disponible en:
[<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48610/AD/AD9850.html>](https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48610/AD/AD9850.html).

[9] - Owon Technology. *OWON AG051F 5MHz 1-CH Arbitrary Waveform Generator* (2020). Canadá. Consulta: 22 de Abril de 2023. Disponible en:
<https://www.owontechnology.eu/product/1318411/owon-ag051f-5mhz-1-ch-arbitrary-waveform-generator>.

[10] - Owon Technology. *OWON XDG3252 2CH 250MHz 1.25GSa/s 14 bits Waveform Generator* (2020). Canadá. Consulta: 22 de Abril de 2023. Disponible en:
<https://www.owontechnology.eu/product/1303167/owon-xdg3252-2ch-250mhz-1-25gsa-s-14-bits-waveform-generator>.

[11] - Superintendencia de Riesgos de Trabajo. *Prevención del Riesgo Eléctrico* (2019). Argentina. Consulta: 9 de Junio de 2023. Disponible en:
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/02_guia_prevencion_riesgo_electrico_ok.pdf.

[12] - Wikipedia. *Normas ISO 9000* (2023). Consulta: 10 de Junio de 2023. Disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Normas_ISO_9000.

[13] - ISO. *ISO 9001 - Sistemas de gestión de la calidad* (2008). Ginebra, Suiza. Consulta: 8 de Junio de 2023. Disponible en:
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/iso-9001-2008_es_cert.pdf.

[14] - MAGYP. *Sistema de Gestión Ambiental, ISO 14000* (2015). Argentina. Consulta: 10 de Junio de 2023. Disponible en:
https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/d_recursos_humanos/concurso/normativa/_archivos/000007_Otras%20normativas%20especificas/000000_SISTEMA%20DE%20GESTI%C3%A9N%20AMBIENTAL%20ISO%201400.pdf.

[15] - Analog Devices. *Low Power CMOS Complete DDS AD9833* (2002). USA. Consulta: 8 de Junio de 2023. Disponible en:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/48600/AD/AD9833.html>.

[16] - Commission Electrotechnique Internationale. *International Standard IEC 60950* (2005). Suiza. Consulta: 9 de Junio de 2023. Disponible en:
https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60950-1%7Bed2.0%7Den_d.pdf.

[17] - Electgpl. *Generador de Funciones DDS con AD9833 | LCD | Arduino | Sponsor PCBgogo* (2021). Argentina. Consulta: 10 de Junio de 2023. Disponible en:
<https://www.youtube.com/watch?v=LhQxDZDoeFY&t=1s>.