

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

Modelamiento matemático de los parámetros piezoeléctricos de un cerámico tipo titanato de circonato de plomo basado en el modelo de Butterworth y Van Dyke para energy harvesting en la ciudad de trujillo - 2023

Línea de Investigación: Comunicación, tecnología de información e innovación

Autor: Díaz Rojas, Edson Francisco

Jurado evaluador:

Presidente : Ramos Rojas, Ovidio Hildebrando

Secretario : Linares Vertiz, Saul Noe

Vocal : De La Cruz Rodriguez, Oscar Miguel

Asesor: Alva Alarcón, Jorge Luis

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1288-933X>

Trujillo - Perú

2024

Fecha de Sustentación: 2024/05/13

MODELAMIENTO MATEMATICO DE LOS PARÁMETROS PIEZOELECTRICOS DE UN CERÁMICO TIPO TITANATO DE CIRCONATO DE PLOMO BASADO EN EL MODELO DE BUTTERWORTH Y VAN DYKE PARA ENERGY HARVESTING

Fecha de entrega: 12-jul-2024 10:24p.m. (UTC-0500) *por Edson Díaz*

Identificador de la entrega: 2127984686

Nombre del archivo: informe_Diaz_Rojas_final.pdf (4.19M)

Total de palabras: 14895

Total de caracteres: 80952



MODELAMIENTO MATEMATICO DE LOS PARÁMETROS PIEZOELECTRICOS DE UN CERÁMICO TIPO TITANATO DE CIRCONATO DE PLOMO BASADO EN EL MODELO DE BUTTERWORTH Y VAN DYKE PARA ENERGY HARVESTING

INFORME DE ORIGINALIDAD

3%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

1library.co

Fuente de Internet

3%

Excluir citas

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado

Excluir coincidencias < 3%



Jurado de sustentación Oral



Presidente

Ms. OVIDIO HILDEBRANDO RAMOS ROJAS
CIP 92622



Secretario

Ms. SAUL NOE LINARES VERTIZ
CIP 142213



Vocal

Ms. OSCAR MIGUEL DE LA CRUZ RODRIGUEZ
CIP 85598

Entregado el: 13/05/2024

Aprobado por: Unanimidad



Díaz Rojas Edson Francisco

DNI: 72047712



Asesor

Ms. JORGE LUIS ALVA ALARCÓN
CIP 214251

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESTUDIO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

Modelamiento matemático de los parámetros piezoeléctricos de un cerámico tipo titanato de circonato de plomo basado en el modelo de Butterworth y Van Dyke para energy harvesting en la ciudad de trujillo - 2023

Línea de Investigación: Comunicación, tecnología de información e innovación

Autor: Díaz Rojas, Edson Francisco

Jurado evaluador:

Presidente : Ramos Rojas, Ovidio Hildebrando

Secretario : Linares Vertiz, Saul Noe

Vocal : De La Cruz Rodriguez, Oscar Miguel

Asesor: Alva Alarcón, Jorge Luis

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1288-933X>

Trujillo - Perú

2024

Fecha de Sustentación: 2024/05/13

DECLARACION DE ORIGINALIDAD

Yo, Jorge Luis Alva Alarcon, docente del Programa de Estudio de Pregrado de la Universidad Privada Antenor Orrego, asesor de la tesis titulada “Modelamiento y cálculo de los parámetros piezoeléctricos de un PZT basado en el modelo de Butterworth y Van Dyke”, del autor Edson Francisco Díaz Rojas.

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud del 3%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el día 12 DE JULIO del 2024.
- He revisado con detalle dicho reporte de la tesis “Modelamiento y cálculo de los parámetros piezoeléctricos de un PZT basado en el modelo de Butterworth y Van Dyke” y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las normas establecidas por la Universidad.

Ciudad y fecha: Trujillo, 2 de mayo del 2024

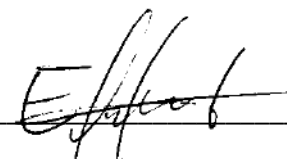


APELLIDOS Y NOMBRES DEL ASESOR:

Jorge Luis Alva Alarcon

DNI: 40294924

ORCID: 0000-0003-1288-933X



APELLIDOS Y NOMBRES DEL AUTOR:

Edson Francisco Díaz Rojas

DNI: 72047712

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, quienes lo largo de esta travesía académica, su amor incondicional ha sido mi mayor fortaleza. Gracias por inspirarme con su dedicación y por apoyarme en cada paso. Este logro no solo es mío, sino también de ustedes, quienes con paciencia y cariño infinito han sido mis guías. Dedico este logro a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por guiarme y brindarme la fuerza necesaria para alcanzar este logro.

A mis padres, ya que su apoyo constante y su sacrificio han sido mi inspiración y motivación.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi respetado asesor, por su orientación experta, paciencia y compromiso en cada etapa de este proceso académico. Sus enseñanzas perdurarán más allá de estas páginas.

Agradezco a mis amigos, compañeros de viaje en esta travesía, por compartir risas, desafíos y momentos inolvidables.

A todos aquellos que, de una manera u otra, contribuyeron a este logro, gracias. Este triunfo es el resultado de un esfuerzo colectivo que aprecio con humildad y gratitud.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación propone la búsqueda de un modelo matemático que permita obtener los parámetros piezoeléctricos de un cerámico tipo Titanato de Circonato de plomo basado en el modelo de Butterworth y Van Dyke con la finalidad de maximizar la transferencia de energía y optimizar su diseño. La metodología desarrollada comprende: la recopilación documental e investigación de las diferentes técnicas de modelamiento matemático y la caracterización de cerámicas piezoeléctricas tipo Titanato de Circonato de plomo o PZT.

Se escoge el modelo de Butterworth Van Dyke, gracias a la simplicidad de ajuste a una resonancia que genera y al comportamiento análogo a un circuito RLC. Con este método se calcula los valores de inductancia, capacitancia y resistencia de un PZT de tal forma que nos permita definir su zona de resonancia.

Para el desarrollo de la técnica basado en el modelo de de Butterworth Van Dyke, se elaboró mediciones manuales, se registró los valores de tensión y corriente de los PZT con la finalidad de encontrar su impedancia. Así mismo se implementó un circuito electrónico basado en un DSPIC y un amplificador de instrumentación. Con la técnica de mínimos cuadrados se implementó el algoritmo de medición de desfase y amplitud en uno de los núcleos del DSPIC. Con el desfase generado por la impedancia del PZT al barrido de diferentes frecuencias y cálculo de las diferentes amplitudes se obtuvieron los parámetros de Butterworth y Van Dycke del circuito equivalente y la frecuencia de resonancia.

Para la implementación del algoritmo embebido en un DSPIC se utilizó MPLAB. La visualización de los parámetros y comunicación con la PC se realizó con LabVIEW.

Los resultados mostrados entre los valores que se obtuvieron de forma manual con las mediciones, mediante la implementación del circuito electrónico y con las hojas de datos del fabricante muestran que el modelo Butterworth y Van Dyke tiene un error menor al 5% para frecuencias de resonancia menores a 5 kHz.

Palabras clave: PZT, modelo de Butterworth Van Dyke, minimos cuadrados, DSPIC.

ABSTRACT

The present research work proposes the search for a mathematical model that allows obtaining the piezoelectric parameters of a Lead Zirconate Titanate type ceramic based on the Butterworth and Van Dyke model with the purpose of maximizing energy transfer and optimizing its design. The developed methodology includes: the documentary compilation and investigation of the different mathematical modeling and characterization techniques of piezoelectric ceramics type Lead Zirconate Titanate or PZT.

The Butterworth Van-Dyke model is chosen, thanks to the simplicity of adjustment to a resonance it generates and the behavior analogous to an RLC circuit. This method allows us to calculate the inductance, capacitance and resistance values of a PZT in such a way that allows us to define its resonance zone.

For the development of the technique based on the Butterworth Van Dyke model, manual measurements were made, the voltage and current values of the PZT were recorded in order to find their impedance. Likewise, an electronic circuit based on a DSPIC and an instrumentation amplifier was implemented. Using the least squares technique, the phase shift and amplitude measurement algorithm was implemented in one of the DSPIC cores. With the phase shift generated by the impedance of the PZT when sweeping different frequencies and calculating the different amplitudes, the Butterworth and Van Dyke parameters of the equivalent circuit and the resonance frequency were obtained.

For the implementation of the algorithm embedded in a DSPIC, MPLAB was used and LabVIEW was used for the visualization of the parameters and communication with the PC.

The results shown in comparative graphs between the values that were obtained manually with the measurements, through the implementation of the electronic circuit and with the manufacturer's data sheets show that the Butterworth and Van Dyke model has an error of less than 5% for frequencies resonance less than 5 kHz.

Keywords: PZT, Butterworth Van Dyke model, Least Squares, DSPIC

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

De conformidad con lo estipulado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, pongo a su disposición el informe de tesis titulado “Modelamiento matemático de los parámetros piezoeléctricos de un cerámico tipo titanato de circonato de plomo basado en el modelo de Butterworth y Van Dyke para energy harvesting en la ciudad de trujillo - 2023” para que sea revisado y evaluado y de ser aprobado pueda ser defendido oralmente para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico.

De antemano, me excuso de los errores involuntarios en que se hubiera incurrido en el desarrollo y redacción del misma, esperando del honorable jurado un justo dictamen.

Apellidos y Nombres:

Edson Francisco Díaz Rojas

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
PRESENTACIÓN	7
TABLA DE CONTENIDOS	8
I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Problema de investigación	11
1.1.1. Realidad Problemática	11
1.1.2. Enunciado del Problema	13
1.1.3. Justificación del estudio	14
1.2. Objetivos.....	15
1.2.1. Objetivo General.....	15
1.2.2. Objetivos Específicos	15
II. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1. Antecedentes del estudio	17
2.2. Marco Teórico	21
2.3. Marco Conceptual.....	40
2.4. Sistema de Hipótesis.....	41
2.4.1. Hipótesis.....	41
2.4.2. Variables e Indicadores	41
III. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	45
3.1. Tipo de Investigación	45
3.1.1. De acuerdo a la orientación o finalidad.....	45
3.1.2. De acuerdo a la técnica de contrastación	45
3.1.3. Línea de Investigación	45
3.2. Población y muestra de estudio.....	45
3.2.1. Población.....	45
3.2.2. Muestra	45
3.3. Técnicas e instrumentos de investigación.....	45
3.3.1. Técnicas de recolección de datos	45
3.3.2. Técnicas de procesamiento de datos	46
3.3.3. Técnicas de análisis de datos.....	46
3.3.4. Procedimiento	47
3.4. Procesamiento y análisis de datos.....	70
3.4.1. Cálculos de parámetros Butterworth Van Dyke.....	71

IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	76
4.1. Resultados	76
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
VI. CONCLUSIONES.....	82
VII. RECOMENDACIONES.....	84
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	86
IX. ANEXOS	88

I. INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Realidad Problemática

En la actualidad, la tendencia en generación de electricidad es mediante la recolección y captación de energía ambiental o Energy Harvesting. El Energy Harvesting es un proceso que permite capturar la energía de fuentes eco amigables tales como energía solar, térmica, eólica y cinética, siendo utilizadas en pequeños dispositivos.

Según publicaciones de la Comisión Europea (European Commission, 2017) se pone en evidencia un crecimiento explosivo del mercado de Energy Harvesting, alcanzando un total de 1.2 billones de euros en el 2014 con una tendencia a aumentar hasta 2.63 billones en el 2020. Este crecimiento sostenido está impulsado por diversos agentes, como son: la toma de conciencia respecto al déficit de fuentes energéticas, el aumento de dispositivos electrónicos, la necesidad de prescindir de baterías, creciente demanda en domótica y el exponencial desarrollo de aplicaciones en Internet de las cosas (IoT) y Big Data.

Actualmente, en el Energy Harvesting existen 4 fuentes principales de energía: energía mecánica a través materiales piezoeléctricos, energía térmica a través de materiales termoeléctricos, energía vibracional a través de transductores electrodinámicos y energía solar a través de materiales fotovoltaicos (European Commission, 2017).

El principal campo de aplicación del Energy Harvesting es el sector comercial y residencial el cual ocupa un 56% del mercado (entre 2014-2019). Esto se debe a que permite aumentar el uso de dispositivos de IoT, brindándoles fuentes de energía autónomas y reduciendo los costos de instalación y mantenimiento (típicos de las baterías) (European Commission, 2017).

La administración de energía en sistemas de bajo consumo consiste la capacidad de apagar ciertas partes o ponerlas en un estado de bajo consumo cuando estos no se necesitan. Un sistema de recolección de energía o "Energy Harvesting" requiere de la electrónica de potencia tanto como las etapas de administración de batería y conservación de energía.

En un sistema de generación piezoeléctrica, se debe lograr una alta densidad de potencia en el recolector de energía, para ello debe existir algún tipo de coincidencia entre la fuente de energía, el transductor y el sistema eléctrico. Esto requiere el control de impedancia de entrada del circuito que interactúa con el transductor. El voltaje y la corriente de salida del recolector de energía rara vez son directamente compatibles con la electrónica de carga. por lo tanto, requiere alguna forma de regulación de voltaje.

Para garantizar la transferencia eficiente del generador a la carga, existe un requisito fundamental "la impedancia de la carga debe ser significativamente mayor que la impedancia del generador", sin embargo, aunque esta disposición logra la máxima eficiencia eléctrica no logra la máxima transferencia de energía de la fuente a la carga. La transferencia de potencia máxima ocurre en el caso que la impedancia de carga sea igual a la impedancia de la fuente. En algunas circunstancias y modos de operación del recolector, puede que no sea óptimo hacer coincidir la impedancia de la carga con la de la fuente debido a otras limitaciones; sin embargo, para los recolectores de energía estudiados en esta investigación, siempre hay una impedancia de carga del transductor claramente definida que da como resultado máxima extracción de potencia del transductor.

Una de las tecnologías utilizadas en el Energy Harvesting es la generación piezoeléctrica. Esta tecnología ha desarrollado un rápido crecimiento durante el siglo XX. Esto debido a la mejora en la manufactura de nuevos materiales cerámicos poseedores de características piezoeléctricas, tales como el titanato de bario, titanato de plomo, plomo-zirconato titanato, entre otros. Según Vatansever, durante el 2012, los dispositivos piezoeléctricos alcanzaron un valor total de 19.5 billones de dólares, creciendo un 83.96% respecto al 2007. A pesar de ser una tecnología que viene en crecimiento, aún se cuestiona su baja eficiencia ya que esta oscila entre el 0.5 al 15% (Vatansever, 2012).

Un claro ejemplo de esta baja eficiencia es el desarrollo de prototipos que pretenden poner en funcionamiento dispositivos de bajo consumo a partir de los pasos que da una persona (Zavaleta y Cunia, 2021). Cabe destacar que un sistema piezoeléctrico puede generar una potencia eléctrica intermitente en el rango de los mili-watts, a partir de los movimientos generados por una persona (Vatansever, 2012).

Por otro lado, las características del transductor piezoeléctrico, tanto físicas como químicas, determinan la eficiencia total de este. Siendo así, se han venido desarrollando materiales que maximicen esta métrica, dando como resultado la elección del Plomo-Zirconato-Titanato (PZT) como el material de mayor utilización y por tanto el más comercial. La tarea más importante es la de encontrar la relación entre los componentes electromecánicos y eléctricos y la frecuencia de resonancia a la que se logrará la máxima transferencia de energía además de los valores de los componentes eléctricos RLC que integran el material.

1.1.2. Enunciado del Problema

¿Es posible modelar un transductor piezoeléctrico (PZT) para calcular los parámetros de Butterworth y Van Dyke mediante sus ecuaciones eléctricas y electromecánicas?

1.1.3. Justificación del estudio

La búsqueda de fuentes de generación de energía que minimicen la contaminación, ha dado paso a lo que en la actualidad se conoce como energías limpias, estas permiten obtener energía eléctrica a partir de las fuerzas de la naturaleza. En la presente investigación se desarrolla el modelamiento matemático de los parámetros piezoeléctricos de un cerámico tipo titanato de circonato de plomo basado en el modelo de Butterworth y Van Dyke para Energy Harvesting. Mediante la construcción de un circuito, se analiza el comportamiento y las características de un Piezoeléctrico (PZT) en distintas frecuencias para el cálculo de sus parámetros Piezoeléctricos.

Para el desarrollo de esta investigación se cuenta con recursos bibliográficos, información descriptiva, además del conocimiento de las herramientas matemáticas, tecnológicas y técnicas necesarias. La presente investigación cuenta con un presupuesto para la adquisición de materiales y servicios, solventado por el autor propio, al tratarse de un sistema de bajo coste, el diseño y desarrollo puede solventarse sin ningún problema.

La presente investigación implica el análisis de sistemas RLC, desarrollo de circuitos eléctricos y algoritmos de análisis de impedancias en sistemas embebidos como microcontroladores de bajo coste. El buen desempeño del circuito nos permitirá maximizar la transferencia de energía del PZT en estudio.

El desarrollo de la presente investigación se puede utilizar como referencia para la fabricación de dispositivos o instrumentos de medición, de esta manera nos permite conocer los valores de los componentes RLC bajo los parámetros Butterworth y Van Dyke.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar del comportamiento y las características de un Piezoeléctrico (PZT) en distintas frecuencias para el cálculo de sus parámetros Piezoeléctricos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un circuito que nos permita medir el voltaje y el desfase al momento de hacer el barrido de frecuencia.
- Evaluar el comportamiento de los PZT al ser estimulados a distintas frecuencias.
- Calcular los parámetros de Butterworth y Van Dyke para el circuito RLC equivalente planteado.

II. MARCO DE REFERENCIA

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes del estudio

- **Primer Antecedente**

Según Peralta (2017), en su investigación “Cuantificación de incertidumbres en colectores de energía piezoeléctricos por medio de mediciones experimentales”, demuestra que una configuración experimental adecuada es fundamental para lograr altos niveles de repetitividad en las mediciones. La dispersión en las mediciones viene del hecho, de que es imposible tener el control absoluto sobre un experimento, debido, por ejemplo: a la presencia de ruido eléctrico en los sensores, las condiciones de borde no ideales, entre otras causas. Por lo tanto, las pruebas consisten en identificar el nivel de confianza de las mediciones asociadas al montaje experimental, mediante un estudio de la repetibilidad con el fin de identificar la variabilidad intrínseca de las mediciones. El aporte de esta investigación se concentra en el cálculo de la franja de probabilidad que optimiza las mediciones y a la vez, permite estimar de forma más confiable futuras respuestas.

- **Segundo Antecedente**

Arbona (2017) en su trabajo “Caracterización, simulación y optimización de cerámicas radiopuras Nb-PZT para el detector PICO500”, se plantea como objetivos: caracterizar y simular cerámicas piezoeléctricas radiopuras Nb-PZT y contrastar las simulaciones de cerámicas piezoeléctricas con los resultados de las medidas experimentales utilizando los parámetros del fabricante. Para ello usó el método de la impedancia, con la finalidad de caracterizar medidas de frecuencias de resonancias y anti resonancias. Con ellas repitió los coeficientes que definen las matrices del comportamiento piezoeléctrico, analizó mediante elementos finitos y comparó con las mediciones hechas en el laboratorio. Concluyó que los resultados a través de los métodos de simulación y los valores reales de las cerámicas piezoeléctricas presentan valores muy cercanos, sin embargo, requiere un gran

mallado y un gran tiempo de cálculo para realizar simulaciones a grandes frecuencias. Esta investigación tiene como aporte: los coeficientes obtenidos con el estudio, estos logran un mejor análisis del comportamiento de las cerámicas radiopuras.

- **Tercer Antecedente**

Vatansver (2017) en su investigación “Alternative resources for renewable energy: piezoelectric and photovoltaic smart structures” hace referencia a que los sistemas piezoeléctricos tienen una eficiencia que oscila entre 0.5 a 15%. Hasta el 2007, el 7% del total de dispositivos piezoeléctricos fue destinado a Energy Harvesting y cuestiones ecológicas. Se estima que en el 2012 los dispositivos piezoeléctricos alcanzaron un valor total de 19.5 billones de dólares creciendo un 83.96% respecto al 2007. El autor de esta investigación afirma que un sistema piezoeléctrico puede generar potencia eléctrica en el rango de los mili-watts, a partir de los movimientos generados por una persona. Este estudio tiene como aporte la comparación de materiales piezoeléctricos, el autor da a conocer que las constantes de acoplamiento electromecánico de un PZT son aproximadamente 2.5 veces mayores que la constante mecánica de un polímero piezoeléctrico o PVDF, esto significa que puede convertir 2.5 veces más tensión mecánica en energía eléctrica que un PVDF.

- **Cuarto Antecedente**

Según Marcus, et al., (2019) en su trabajo “Characterization of piezoelectric material parameters through a global” utilizaron dos funciones de costo diferentes en el algoritmo de optimización, una basada en la impedancia y una medida experimental simple y otro basado en la admitancia. Se muestra que las sensibilidades de estas funciones de costo a los parámetros que se caracterizan no son uniformes. Los resultados teóricos se comparan con los resultados obtenidos de un método de sincronización de operación local para mostrar la ventaja de usar un algoritmo de optimización

global. En esta investigación se demuestra que cuanto más ruido ambiental haya en los datos, mayor será la brecha entre los resultados encontrados por las dos funciones de costo. Aunque los resultados de las funciones de costo individuales divergen de los valores correctos con el ruido creciente, el promedio de los resultados de las dos funciones de costo permanece dentro del 5% del valor original. Esta investigación presenta como aporte los métodos de caracterización de parámetros de material mediante una función de costo basada en la impedancia y una función basada en admitancia bajo un algoritmo de optimización global y local.

- **Quinto Antecedente**

Nilimaeyee y Jeba (2021) en su investigación denominada “Energy Harvesting using piezoelectric transducers” trabajaron en la recolección de energía de fuentes renovables naturales no utilizadas mediante transductores piezoeléctricos. En efecto, día a día se reportan diferentes modelos analíticos con diferentes transductores piezoeléctricos para mejorar la eficiencia energética y la potencia de salida de los sistemas de recolección de energía. El objetivo de este artículo es revisar los sistemas PEH (Piezoelectric Energy Harvesting) desarrollados en la última década para aprovechar la energía requerida para la pequeña electrónica. El sistema funciona sobre los fenómenos del efecto piezoeléctrico directo, es decir, el transductor genera energía eléctrica cuando se expone a tensión mecánica/presión/vibración. Se han analizado los parámetros de rendimiento de diferentes sistemas piezoeléctricos de recolección de energía y se ha discutido el alcance de la mejora en los sistemas existentes en este manuscrito. Finalmente, los autores de esta investigación afirman que, la idoneidad del transductor piezoeléctrico para diferentes aplicaciones depende de los materiales piezoeléctricos, sus formas y configuraciones. Este estudio tiene como aporte la clasificación de demanda de potencia de dispositivos electrónicos de bajo consumo, así como la

eficiencia energética de los principales transductores piezoeléctricos, siendo el PZT uno de los transductores con más potencia generada. También presenta a los dispositivos PZT con más potencia generada según la frecuencia de resonancia.

- **Sexto Antecedente**

Edwin et al., (2018), en su paper "Piezoelectric transducer design for electric power generation" analizaron la necesidad de encontrar alternativas de transformación capaces de aprovechar las actividades humanas cotidianas, este estudio dirige la atención al fenómeno piezoeléctrico, que es la propiedad de algunos materiales para transformar los movimientos mecánicos en electricidad. Los autores proponen disponer el transductor piezoeléctrico en zapatos o directamente en el suelo. Trabajar en alternativas para el aprovechamiento y transformación de diferentes formas de energía de forma limpia y eficiente, como los fenómenos piezoeléctricos, permite considerar la captación de energía que comúnmente se desperdicia al caminar sobre una superficie acondicionada con transductores piezoeléctricos. El aporte de este estudio considera el método de conversión de energía eléctrica en vibraciones para diferentes aplicaciones y el propósito de este dispositivo es la transformación eficiente de energía mecánica en energía eléctrica, por esta razón, el diseño de su configuración cuenta con una frecuencia de resonancia menor a 100 kHz y debido a esto se establecieron relaciones del espesor según el material depositado y el desempeño según el impacto proyectado. Esta investigación presenta como aporte los parámetros geométricos para la obtención de diferentes características para una transformación eficiente de energía mecánica en energía eléctrica.

2.2. Marco Teórico

- Efecto piezoeléctrico

Derivada de la palabra griega: “piezein” que significa apretar u oprimir, el efecto piezoeléctrico es la generación de una carga eléctrica por medio de un material cristalino que es sujeto a un esfuerzo mecánico, es decir, al ser golpeados o deformados adquieren una polarización eléctrica en su masa, produciendo una diferencia de potencial y la aparición de cargas eléctricas en la superficie del mismo. La primera demostración experimental del efecto piezoeléctrico fue publicada en 1880 por dos físicos franceses, los hermanos por Jacques Curie y Pierre Curie, los que descubrieron este fenómeno en la medición de las cargas que aparecen en la superficie de los cristales de topacio, turmalina, caña de azúcar, cuarzo y sal de Rochelle. Siendo la sal de Rochelle y el cuarzo los materiales que exhibieron la mayor parte de piezoelectricidad, aunque se le dio muy poco uso práctico hasta 1917 cuando el profesor francés P. Langevin usó láminas de cuarzo para generar y detectar ondas en agua. (Santiago y Gonzales, 2015).

- Sensores piezoeléctricos

Un sensor piezoeléctrico es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir aceleración, presión, tensión o fuerza, mediante la transformación de lecturas en señales eléctricas. (Sensor piezoeléctrico, 2021)

El efecto piezoeléctrico es la capacidad de ciertos materiales para generar una carga eléctrica en respuesta a la tensión mecánica aplicada. Una de las características de este fenómeno es el funcionamiento reversible de sus materiales, es decir el efecto piezoeléctrico tiene la propiedad de generar electricidad cuando se le aplica una tensión mecánica o también puede generar una tensión mecánica cuando a este se le excite a través de un campo eléctrico.

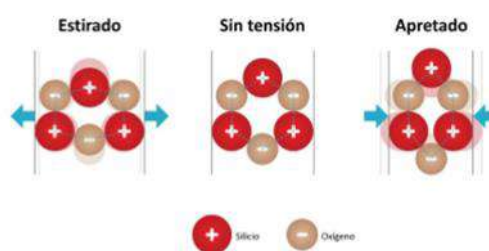
los hermanos Curie demostraron el primer efecto piezoeléctrico mediante el uso de cristales de turmalina, cuarzo, topacio, azúcar de caña y sal de Rochelle. Mediante experimentos demostraron que el cuarzo y la sal de Rochelle exhibieron la mayor capacidad de piezoelectricidad hasta ese entonces. Durante la primera guerra mundial se desarrolló la primera aplicación para dispositivos piezoeléctricos, se introdujo el dispositivo de sonar para de detección de submarinos. en el transcurso de la segunda guerra mundial se descubrió el material piezoeléctrico sintético. (Johnson Electric, s.f.).

Los materiales piezoeléctricos presentan enlaces iónicos, contienen iones positivos y negativos en forma de pares llamados celdas unitarias. Estos materiales están disponibles en la naturaleza como dieléctricos anisotrópicos con red cristalina no centro simétrico. No presentan cargas eléctricas libres y los iones carecen de un centro de simetría.

Al aplicar una tensión mecánica o fricción sobre un material piezoeléctrico (Figura 1), la geometría estructural atómica del cristal de este cambia debido al movimiento neto de iones tanto positivos como negativos. Esto polariza al cristal y convierte carga al material, la cantidad de voltaje generado es proporcional a la cantidad de estrés o tensión aplicada sobre el cristal. (Electronics-Projets-Focus, s.f.).

Figura 1

Efecto Piezoeléctrico



Nota. Adaptado de *Generación de energía utilizando el efecto piezoeléctrico*, Santiago y Gonzales (p.13), 2015.

Según Li et al., (2014) los materiales piezoeléctricos se dividen en cuatro categorías (cerámicas, monocristales, polímeros y compuestos) en función de sus características estructurales.

- **Cerámicas piezoeléctricas**

Las cerámicas piezoeléctricas cuentan con una gran estabilidad térmica, magnética y física, su principal desventaja es la sensibilidad térmica de sus parámetros en ambientes donde la temperatura está cerca de la Curie.

La fabricación de dispositivos cerámicos piezoeléctricos implica dos pasos: preparación de los polvos cerámicos y sinterización de las estructuras moldeadas. Se utilizan métodos de preparación química húmeda para producir los polvos cerámicos a fin de garantizar la reproducibilidad de las características avanzadas de los dispositivos. Los diseños de dispositivos populares incluyen multicapas, bimorfos y otros tipos de compuestos.

El proceso de fabricación de los materiales cerámicos se ilustra en la figura 2.

Figura 2

Etapas del proceso de fabricación de materiales cerámicos



Nota. Adaptado de *Generación de energía utilizando el efecto piezoeléctrico*, Santiago y Gonzales (p.14), 2015.

- **Tipos de piezoeléctricos**

Naturales:

Cuarzo: se obtiene a partir de cristales naturales, y posee excelentes características estabilidad térmica, química y eléctrica. Es resistente al desgaste, y al envejecimiento, en el modo de conversión sufre interferencias.

Azúcar: material dulce cristizable que consiste total o esencialmente en sacarosa, es incoloro o blanco cuando es puro y tiende a oscurecerse cuando está menos refinado, se obtiene comercialmente de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera.

Sal de Rochelle: tartrato mixto de potasio y sodio descubierto en 1672 por Pierre Seignette, farmacéutico de la Rochelle. Es una de las sales más nobles del ácido tartárico. Se obtiene por la acción del hidróxido sódico sobre el Crémor Tártaro bruto.

Topacio: es un mineral del grupo VIII (silicatos), Es un aluminosilicato de fórmula química $Al_2SiO_4(OH,F)_2$. Se utiliza a menudo como piedra preciosa, su densidad es de 3,5 - 3,6 g/cm³.

Minerales de Turmalina: las turmalinas son un grupo de cristales mixtos dentro de la familia de borosilicatos, compuesto por once especies, entre ellas el chorlo (negra), la elbaíta (rosa, roja, verde, azul) y la dravita (marrón). La elbaíta es la especie más valorada por sus variedades cromáticas, entre las más conocidas están la indigolita (azul), la rubelita (rosa o roja), la turmalina sandía (interior rosa y superficie verde), la verdelita (verde).

Artificiales

Sulfato de litio: el sulfato de litio es soluble en agua, los cristales de sulfato de litio, al ser piezoeléctricos, también se utilizan en pruebas no destructivas de tipo ultrasonido porque son receptores de sonido

muy eficientes. Sin embargo, sufren en esta aplicación debido a su solubilidad en agua. El sulfato de litio tiene propiedades piezoeléctricas. Cuando se calienta sulfato de litio acuoso, la conductividad eléctrica también aumenta.

Titanato de bario: el titanato de bario es uno de los materiales electrocerámicos clásicos, fue el primer material ferroeléctrico cerámico desarrollado y se fabrica en grandes producciones para diversas aplicaciones dentro del mercado de componentes electrónicos. Sus propiedades dieléctricas le han convertido en un material básico en la fabricación de condensadores cerámicos multicapa. En todas las estructuras posee propiedades ferroeléctricas, excepto en la cúbica.

Metaniobato de bario: presenta un módulo piezoeléctrico elevado.

Zirconato Titanato de plomo: material que presenta ferroelectricidad y de la piezoelectricidad en los materiales cerámicos, han dominado el campo de los materiales piezoeléctricos para el diseño de la mayoría de los dispositivos requeridos por la industria.

Formas y dimensiones:

Las formas y dimensiones más comunes de las cerámicas piezoeléctricas comerciales son:

Cerámicas piezoeléctricas de alta potencia para soldadura por ultrasonido en PZT-8 en el formato de anillos:

- 50 × 20 × 5,15 mm
- 50,8 × 19,1 × 3 mm
- 38,1 × 19,1 × 5,15 mm
- 30 × 10 × 6 mm
- 25 × 12 × 3,15 mm
- 25 × 10 × 4,15 mm

Cerámicas piezoeléctricas de potencia para limpieza por ultrasonidos en PZT-4 en el formato de anillos:

- 50 × 20 × 5,15 mm
- 38 × 13 × 6,35 mm
- 25 × 12 × 3,15 mm

Cerámicas piezoeléctricas para sensores en PZT-5A:

- Anillos de 38 × 13 × 6,35 mm
- Anillo de 25 × 12 × 3,15 mm
- Disco de 15 × 0,9 mm

Tabla 1

Materiales

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cuarzo	Presenta estabilidad térmica, química y eléctrica. Es muy duro y resistente al desgaste, así como al envejecimiento.	Es propenso a interferencia en el proceso de conversión. Presenta baja eficiencia energética Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias. Debe emplearse por debajo de los 550 °C para que este material no pierda sus características.
Sulfato de litio	Muy eficiente. Presenta una amortiguación acústica óptima. Mejor poder de resolución. Casi inmune a interferencias en el modo de conversión.	Presenta una alta fragilidad. Muy soluble al agua. Temperatura de utilización < 75°C.
Cerámicos polarizados	Se obtienen por sinterización y polarización durante la fabricación. Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación. No son afectados por la humedad Se puede emplear hasta temperaturas de 300 °C.	Resistencia mecánica relativamente baja. En casos particulares existe interferencia en el modo de conversión. Presentan tendencia al envejecimiento. Además, poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.
Titanato de bario	Presenta un elevado módulo piezoeléctrico.	Presenta problemas de acoplamiento y amortiguación. Su empleo está limitado a frecuencias menores de 15 MHz. Presenta interacción entre varios modos de vibración.

<p>Metaniobato de bario</p>	<p>Presenta un módulo piezoeléctrico elevado lo que lo califica como buen emisor. Presenta una excelente estabilidad térmica, similar al cuarzo, lo que le permite ser empleado a altas temperaturas.</p> <p>Posee un elevado coeficiente de amortiguación interna, por lo que se considera como el mejor material para generar impulsos cortos.</p>	<p>Presenta una baja frecuencia fundamental y una mala resistencia mecánica, por lo que se aplica principalmente a frecuencias altas. Presenta interacción entre varios modos de vibración.</p>
<p>Zirconato titanato de plomo</p>	<p>Presenta un elevado modulo piezoeléctrico.</p>	<p>Alto coeficiente de deformación. Se recomienda su empleo cuando existen problemas de penetración.</p>

- **Aplicaciones de los materiales piezoeléctricos**

Los materiales piezoeléctricos se pueden aplicar en los diferentes dispositivos basados en la conversión de energía mecano eléctrica, la selección de estos dependerá de los requerimientos energéticos y de la precisión y sensibilidad de los dispositivos, dentro de las aplicaciones más usuales de los ferroeléctricos cerámicos están los dispositivos como: acelerómetros, ignitores, hidrófonos, micrófonos, motores, auriculares, zumbadores, altavoces, sonares, filtros, osciladores, transformadores. Las aplicaciones de los materiales piezoeléctricos en dispositivos de ensayos no destructivos y en medicina se basa principalmente en el desarrollo de la ecografía ultrasónica. (Jiménez, 1995)

Dentro de los materiales que contienen la propiedad de piezoelectricidad están los cristales. Una aplicación muy extendida de los materiales piezoeléctricas se encuentra en los encendedores eléctricos, se usa este material de modo que, al provocar un golpe seco, este genere una carga eléctrica con capacidad de crear un arco eléctrico o chipa de tal forma que encienda al mechero.

En la industria automotriz, la marca Toyota ha desarrollado el sistema TEMS (Toyota Electronic Modulated Suspension), cuyo objetivo es la búsqueda de la mejora en el manejo y estabilidad del vehículo. En aplicaciones industriales, los materiales piezoeléctricos se utilizan para el control de estado de estructuras. La finalidad de esta aplicación es la medición de la tensión del material a lo largo de un proceso de delaminación. Por otra parte, varios investigadores han estudiado el comportamiento dinámico y

estático de un actuador piezoeléctrico mediante modelamientos matemáticos. (Murillo, 2017).

- **Zirconato Titanato de Plomo (PZT)**

El titanato de circonato de plomo es un compuesto inorgánico con la fórmula química $Pb [Zr_x Ti_{1-x}] O_3$ ($0 \leq x \leq 1$), es un material cerámico de perovskita, se desarrolló por primera vez alrededor de 1952 en el Instituto de Tecnología de Tokio .

El titanato de circonato de plomo desarrolla un voltaje (o diferencia de potencial) en dos de sus caras cuando se comprime, (útil para aplicaciones de sensores) y cambia físicamente de forma cuando se aplica un campo eléctrico externo (útil para aplicaciones de actuadores).

La permitividad relativa del titanato de circonato de plomo puede oscilar entre 300 y 20000, dependiendo de la orientación y el dopado.

Al ser piroeléctrico, este material desarrolla una diferencia de voltaje en dos de sus caras bajo condiciones cambiantes de temperatura; en consecuencia, el titanato de circonato de plomo se puede utilizar como sensor de calor. El titanato de circonato de plomo también es ferroeléctrico, lo que significa que tiene una polarización eléctrica espontánea (dipolo eléctrico) que se puede invertir en presencia de un campo eléctrico. Se puede dimensionar con precisión en tubos, anillos, discos, placas y hemisferios. El material PZT también es versátil desde el punto de vista de la formación, ya que se puede moldear en red presionando, extruyendo y fundiendo en estas mismas formas, así como en componentes complejos que incluyen bimorfos co-cocidos y actuadores multicapa. Los tamaños van desde micrones hasta centímetros. Las opciones de electrodos son extensas, incluyendo plata cocida, níquel no electrolítico, níquel-cromo, oro, estaño, aluminio y vanadio depositados al vacío o pulverizados al vacío.

En su formulación se emplea un alto contenido de óxido de plomo (aprox. 70%), dado que el plomo y sus compuestos son considerados tóxicos y peligrosos, por la polución directa en el

proceso de manufactura y por la imposibilidad de ser reciclados. Además de que la acumulación de este elemento en los organismos provoca daños en el sistema neurológico, es razón por la cual el plomo está siendo retirado de los procesos industriales según la Unión Europea. (Castro et al., 2013).

- **Fabricación**

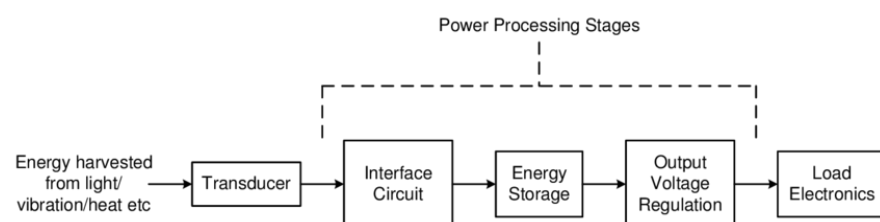
El diseño de un elemento piezoeléctrico PZT, implica determinar las características generales (esto es la frecuencia de operación, diámetro de la cerámica, forma de operación (contacto o inmersión), etc.), las cuales determinan su aplicación, luego se procede con las características de los elementos básicos que lo componen para alcanzar el funcionamiento deseado.

- **Generación de energía piezoeléctrica**

El manejo de la potencia eléctrica en sistemas de baja potencia, está definido como la capacidad de apagar ciertas partes de un sistema o ponerlas en un estado de bajo consumo cuando estas no son requeridas, y además controlar el cargado de una batería. La electrónica de potencia (Fig. 3) aparte de permitir el manejo de la potencia eléctrica de una batería, involucra la adaptación de impedancias entre la fuente y el sistema eléctrico, la regulación del voltaje en la carga y finalmente definir los elementos de almacenamiento de energía.

Figura 03

Etapas de adaptación de la energía piezoeléctrica tipo harvester



- **Componentes de un harvester**

Como puede observarse en la figura 3, un harvester consiste en varias etapas que permiten el óptimo uso de la energía recibida desde el transductor hasta la carga.

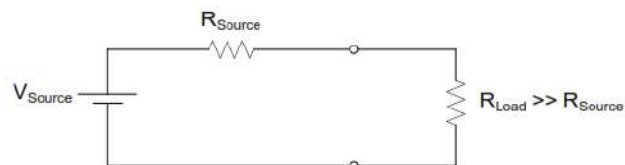
a) El transductor que es la parte principal del harvester, en el cual se da la conversión de energías, puede tener diversos principios de funcionamiento que se verán con detalle más adelante.

Existen diversos tipos de transductores, con sus respectivas eficiencias y parámetros de operación. Como ejemplo, el transductor piezoeléctrico convierte el estrés mecánico en energía eléctrica. Este estrés puede provenir de una presión concreta o de las variaciones de presión de aire (sonido). Su voltaje de operación ronda los 200mv hasta los 2V y entrega este voltaje al sistema en forma alterna. Su composición consta de un oscilador en múltiples armónicos, un material piezoeléctrico, un adaptador de impedancia y un material de envoltura (case).

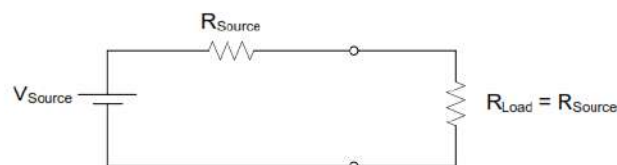
b) El circuito de interface (Fig. 4), se comporta básicamente como un adaptador de impedancia, permitiendo una eficiencia notable y a la vez una máxima transferencia de potencia a la carga o al sistema subsiguiente.

Figura 4

Circuito adaptador de impedancia



a) Maximum efficiency



b) Maximum power transfer

c) La mayoría de transductores en el ámbito del harvesting no permiten la “generación” de energía eléctrica a un ritmo constante durante un periodo largo. Para permitir un suministro continuo de energía se recurre a elementos capaces de almacenar la energía excedente, los cuales pueden ser baterías o capacitores.

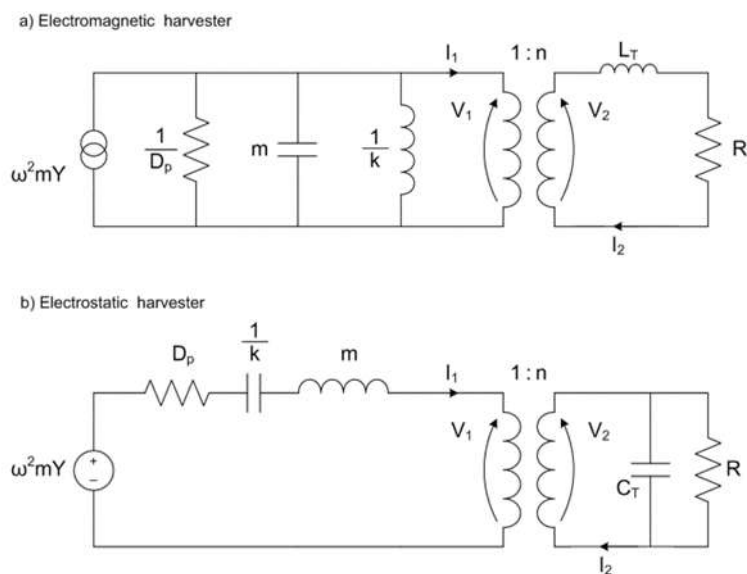
d) Debido a que los diversos sistemas de acopio de energía producen potencia a diferentes combinaciones de voltaje y corriente, el voltaje de estos sistemas debe ser procesado para finalmente alimentar a la carga.

- **Modelos de harvester**

Para determinar los parámetros de buen funcionamiento de un harvester, es necesario tener un modelo en el que se tenga en cuenta sus características mecánicas y eléctricas. Como ejemplos se tienen dos modelos de fuentes de energía eléctrica: la electromagnética y la electrostática (fig. 5).

Figura 5

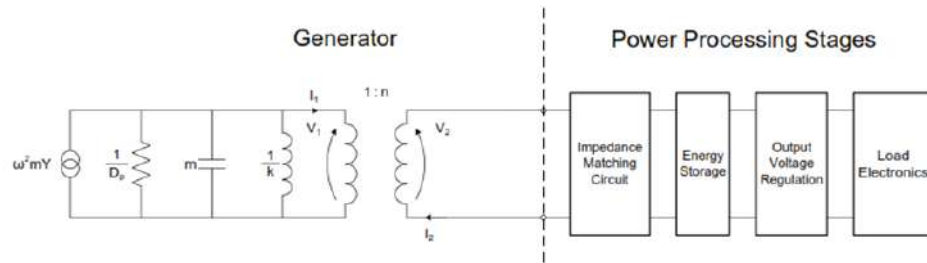
Circuitos colectores electromagnético y electrostático



Nota. Adaptado de Mitcheson y Toh. Power management Electronics (p. 2), 2010.

Figura 6

Conexión de la electrónica de potencia al modelo de generador electromagnético



Nota. Adaptado de Mitcheson y Toh. Power management Electronics (p. 6), 2010.

Por otro lado, existen diferentes topologías que van de acuerdo con la naturaleza de la fuente generadora, tomando en cuenta también la eficiencia del circuito y sus requerimientos de voltaje y corriente (fig. 6).

- Ejemplos de sistemas implementados

Sistema generador de electricidad en urinario público

Investigadores de la Universidad del Oeste de Inglaterra, desarrollaron un dispositivo capaz de convertir la orina en electricidad con la ayuda del metabolismo bacteriano. El prototipo está basado en celdas de combustible microbianas (microbial fuel cells). La bacteria coloniza el ánodo y actúa como un catalizador descomponiendo la materia orgánica de la orina. En los experimentos realizados solo se pudo obtener una potencia de unos cientos de miliwatts con los que se pudo iluminar el cubículo.

Sistema generador basado en baches de carretera

En la ciudad de Roanoke, Virginia; se puso a prueba un novedoso sistema desarrollado por New Energy Technology, capaz de capturar la energía cinética y convertirla en electricidad. Se estimó

una afluencia de 580 autos en seis horas, lo cual podría alimentar un cartel electrónico de 150 pies cuadrados.

Generación de energía mediante calor residual

Investigadores de los laboratorios nacionales de Sandia, han desarrollado un pequeño dispositivo a base de silicio capaz de aprovechar el calor residual de cualquier proceso. El dispositivo tiene 1/8 inch x 1/8 inch como dimensiones. La radiación infrarroja atrapada en el dióxido de silicio crea oscilaciones de alrededor de 50 trillones de veces por segundo. Este dispositivo fue denominado como una rectenna infrarroja. Lo interesante es que no es necesario que el dispositivo toque directamente la fuente de calor, si no que capture la radiación infrarroja.

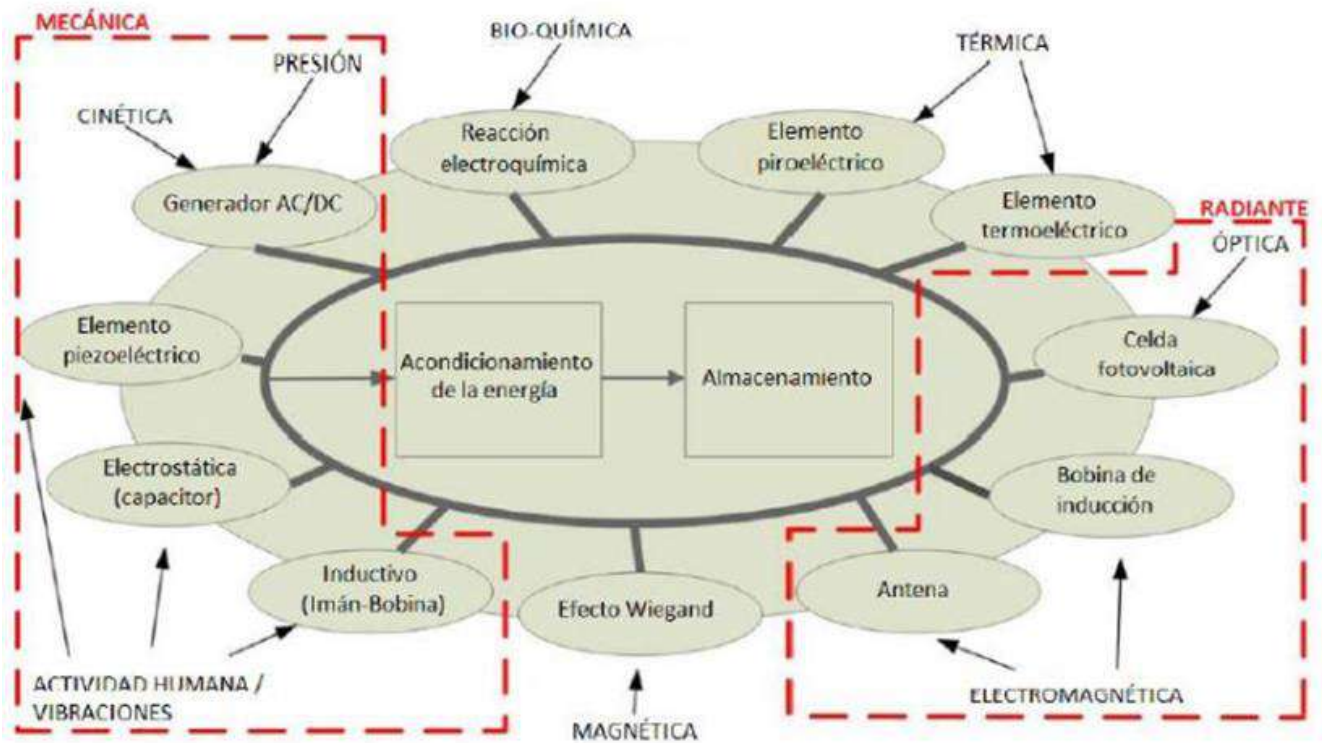
Generación de energía por fricción (efecto triboeléctrico)

Investigadores del Instituto de Tecnología de Georgia, han desarrollado un prototipo generador que usa dos láminas de materiales distintos, una donadora de electrones y la otra aceptora. Cuando los materiales se tocan uno con otro, los electrones fluyen libremente entre estos. Pero al separarlos, estos materiales mantienen cargas eléctricas, separadas por el material entre ellos.

- Fuentes de energía a convertir

Figura 7

Diferentes fuentes de energía y sus respectivos transductores para su conversión a energía eléctrica



Nota. Adaptado de *Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico (Energy Harvesting) Mediante Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar*. Sepúlveda Orozco (p. 12), 2014.

- Fuentes Clásicas o ya conocidas

Generadores solares

Aprovechando el efecto fotoeléctrico, se produce energía mediante la exposición de una juntura P-N a la luz. En términos generales una celda fotovoltaica genera pares electrón-hueco al ser expuesta a la luz con una determinada energía, estos portadores de carga son separados dentro de la misma celda en lados opuestos y finalmente se extraen a un circuito externo generando una corriente a través de este. Actualmente las celdas están hechas de silicio monocristalino, silicio policristalino, silicio amorfo, telurio de cadmio, CIGS. Sin embargo, de manera experimental y aún

en investigación se vienen utilizando materiales organometálicos que permitan energía a bajo costo y con alta eficiencia de conversión solar-eléctrica.

Generadores eólicos

Mediante la medición de la densidad de potencia de viento (WPD) se realizan cálculos que permitan aprovechar al máximo las características del viento, el cual se encarga de mover grandes palas que a su vez actúan sobre un generador electromagnético. Para dicha medición se toma en cuenta la densidad del viento y su velocidad.

Al igual que los generadores de otra naturaleza, se tiene una eficiencia máxima de la potencia que se puede generar. Por ejemplo, según la ley de Betz, solo se puede obtener un 59.3% de la energía cinética proveniente del movimiento de las palas.

Actualmente las turbinas más conocidas son las de tres palas en el eje horizontal, sin embargo, en el mercado existen generadores que se mueven en el eje horizontal o vertical (HAWT y VAWT). Su principal diferencia radica en la potencia generada o mejor dicho en la eficiencia. Las turbinas horizontales generan mayor potencia sobre las verticales, sin embargo, estas deben ser orientadas en contra de la dirección del viento para ser efectivas, lo cual no sucede con las verticales.

Para la construcción de las palas, actualmente se tiene en consideración un factor que considera tanto la rigidez como el peso de la pala. Es por esto que principalmente se están construyendo las turbinas con fibra de vidrio y de carbono, estos materiales tienen una elevada rigidez y un peso no muy elevado. Se pueden utilizar independientemente o en híbridos reforzados. Por otro lado, se están desarrollando nano polímeros que puedan reemplazar estos materiales, permitiendo un mayor radio de la turbina.

Hidroelectricidad

Actualmente el Perú tiene energía eléctrica proveniente de hidroeléctricas principalmente. Se utiliza la energía potencial del agua contenida en una represa. La potencia extraída depende del volumen y la diferencia de alturas de la fuente y la salida. Una gran tubería entrega el agua del reservorio a la turbina.

A nivel de Latinoamérica, existen 2 grandes hidroeléctricas que generan por encima de los 10 GW cada una. La de Itaipu (Brazil-Paraguay) y Gurí (Venezuela).

Las hidroeléctricas pueden ser: Grandes (10 GW), pequeñas (10 MW), micro (100 KW) y pico (5KW). Normalmente las micro y pico hidroeléctricas utilizan el caudal de un río obviando el uso de represas, haciéndolas menos costosas y más amigables con el medio ambiente.

A pesar de todas las ventajas que trae la generación hidroeléctrica, la electricidad es generada en lugares alejados de la ciudad, encareciendo el precio por KWH debido al transporte y distribución de la electricidad.

Celdas de combustible

Una celda o pila de combustible, es una celda electroquímica que genera una diferencia de potencial mediante la reacción del hidrógeno con un agente oxidante (puede ser oxígeno puro). A diferencia de las pilas comunes, las celdas de combustible requieren un continuo suministro de hidrógeno para mantener la reacción química.

Su estructura consta de un ánodo, cátodo y un electrolito (se encarga de dejar pasar iones H^+ pero no sus electrones). Los electrones se acumulan en el ánodo formando una diferencia de potencial entre los terminales. Al colocar una carga, los electrones fluyen del ánodo al cátodo generando una corriente en el circuito. Adicionalmente se forman moléculas agua en el cátodo como residuo.

De acuerdo al U.S. Department of Energy, las celdas de combustible tienen una eficiencia de 40-60%. Esto es mucho mayor que la eficiencia de un motor de combustión interna (25%).

Para la generación de hidrógeno puede utilizarse gas natural, contaminando menos de una onza de compuestos, comparado con las 25 libras de contaminantes que genera la combustión. Por otro lado, debido a que la fuente de hidrógeno es independiente de la celda se puede combinar el uso de paneles solares con un electrolizador para generar hidrógeno, actuando como baterías de almacenamiento.

En la actualidad existe una planta en California que utiliza celdas de combustible, con una potencia de generación de 2.8 MW.

Por otro lado, se han introducido 3 autos que utilizan la electricidad producida para alimentar al motor: Honda Clarity, Toyota Mirai y Hyundai ix35 FCEV. Adicionalmente existen estaciones de recarga de hidrógeno en USA, Islandia, Japón y Noruega.

- **Nuevas fuentes de investigación**

Generadores triboeléctricos

Cuando dos materiales distintos, uno arriba y otro abajo son sometidos a fricción. Uno de ellos se carga positivamente y el otro negativamente generando una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial produce que al colocar una carga externa (ej. una resistencia), se produzca un flujo de electrones y por tanto una corriente. Los TEG tienen un gran futuro en la generación de electricidad proveniente las actividades humanas, llantas, olas marítimas, vibraciones mecánicas y más.

Celdas de combustible biológicas

Estos sistemas tienen múltiples ventajas, empezando porque no generan desechos, su fabricación es barata y las bacterias catalizadoras son muy sensibles al medio, pudiendo además actuar como sensores.

Se basan en las clásicas celdas de combustible, pero esta vez el hidrógeno es generado en la misma celda mediante bacterias o enzimas. Las BFC convierten la energía de la materia orgánica directamente en energía eléctrica usando como catalizadores: enzimas o bacterias.

Entre sus aplicaciones están: el tratamiento de aguas residuales (a gran escala) y aplicaciones portátiles (pequeña escala).

Figura 8

Procedimiento para aumentar el rendimiento de las pilas de combustible microbianas

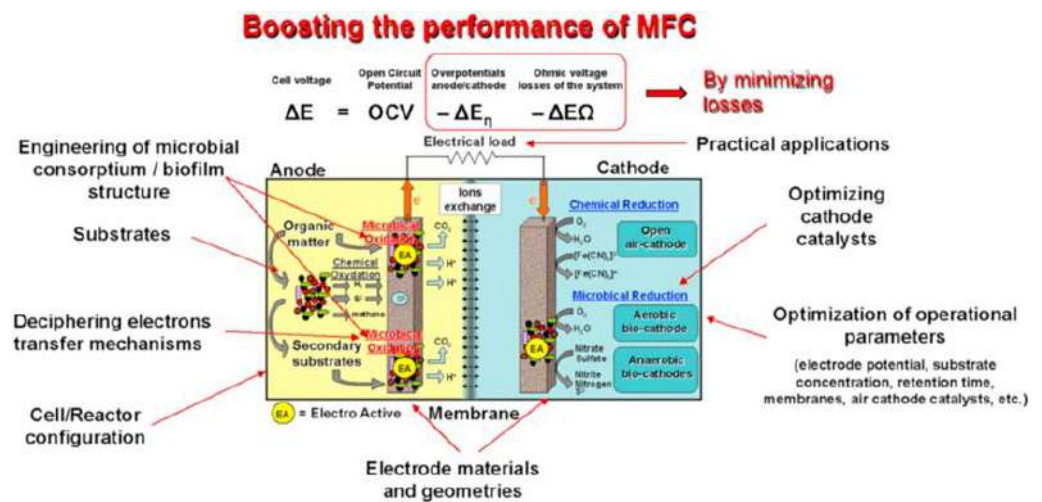


Figura 8:

Nota. Adaptado de *Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review*, Santoro, Arbizzani, Erable y Ieropoulos (p.1), 2017

Generadores piezoeléctricos

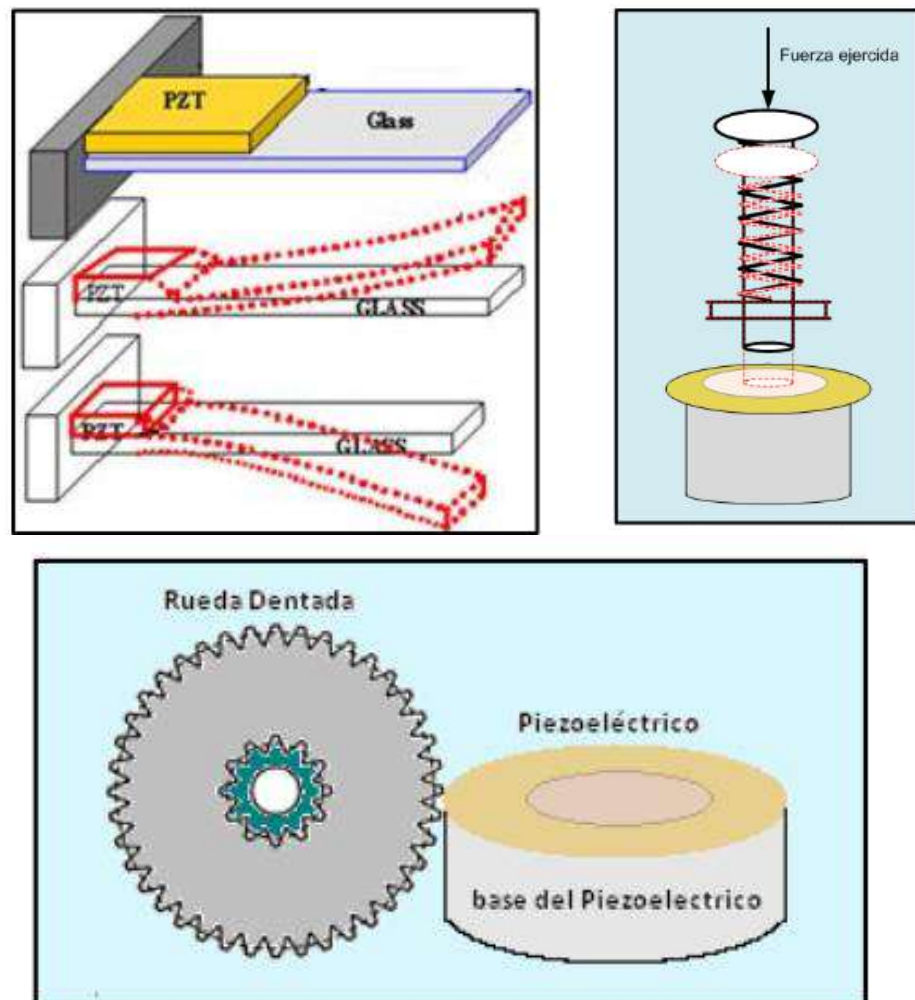
Se basan en la carga eléctrica que se acumula en ciertos materiales en respuesta al esfuerzo mecánico.

El efecto piezoeléctrico está íntimamente relacionado con el momento dipolar eléctrico en los sólidos. Principalmente cristales (cuarzo, berlinita, topacio, turmalina, titanato de plomo). Por otro lado, los piezocerámicos y piezopolímeros están teniendo un rápido crecimiento en su demanda.

A pequeña escala se utiliza el efecto piezoeléctrico para encendedores o generadores de chispa. Se han creado dispositivos que permitan obtener energía de las pisadas, vibraciones de máquinas, pisos públicos, etc (fig.11).

Figura 9

Fuentes de generación de energía piezoeléctricas



Nota. Adaptado de How does a piezoelectric-excited cantilever sensor sense?

González (p. 40), 2012.

Generadores Seebeck o termoeléctricos

Convierte el flujo calorífico entre dos materiales en electricidad. Estos materiales deben tener una elevada conductividad eléctrica y una baja conductividad térmica. Actualmente existen 3 semiconductores con esas características, el telururo de bismuto, telururo de plomo y el silicio-germanio. Con estos materiales se construyen módulos termoeléctricos, los que a su vez constituyen un sistema de generación termoeléctrica.

La eficiencia de estos generadores es de 5%-8%. Actualmente existen generadores para las tuberías de gas (Gentherm). De igual manera existen diferencias térmicas que se desperdician, por ejemplo, en los radiadores de los autos, microprocesadores, celdas solares sometidas a radiación de baja frecuencia.

El mercado Low-Power, demanda energía para sensores, IoT y otros dispositivos digitales.

2.3. Marco Conceptual

- Efecto piezoeléctrico: es normalmente reversible, al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma. Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que carecen de centro de simetría. es un fenómeno físico que presentan algunos cristales debido al cual, aparece una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre ciertas caras del cristal cuando éste se somete a una deformación mecánica y se denomina efecto piezoeléctrico.
- Cerámica piezoeléctrica: son el elemento activo en la mayoría de los dispositivos y transductores ultrasónicos más importantes, siendo los otros los cristales de cuarzo, los cristales hidrosolubles, los mono

cristales, los semiconductores piezoeléctricos, los polímeros y los compuestos piezoeléctricos.

- **Modelo BVD:** plantea un circuito equivalente compuesto de elementos pasivos en configuración de circuito resonante.
- **Resonancia:** se refiere a un conjunto de fenómenos relacionados con los movimientos periódicos o casi periódicos en que se produce reforzamiento de una oscilación al someter el sistema a oscilaciones de una frecuencia determinada.
- **Respuesta en frecuencia:** Es un parámetro que indica la variación de la salida a un estímulo de entrada con respecto a la frecuencia.
- **Desfase:** Alude a un desajuste, un desacople o una desarticulación. Un desfase es una diferencia que se registra entre dos elementos que, por lo general, son concordantes o deberían serlo.

2.4. Sistema de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis

Sí, es posible realizar un modelo matemático de un PZT y calcular los parámetros de Butterworth y Van Dyke mediante diversos ensayos de laboratorio para medir la corriente que circula por un PZT, excitado con generador externo para observar su respuesta a diferentes frecuencias midiendo de forma precisa la señal proveniente del PZT minimizando los errores de medición. Para así mediante un análisis de la información recolectada identificar los parámetros del modelo del PZT sometido a este estudio.

2.4.2. Variables e Indicadores

- **Variable Independiente**

El modelo Butterworth Van-Dyke (BVD), es un modelo común de circuito de elementos agrupados utilizado por los diseñadores de filtros de cristal para simplificar las funciones trascendentales que caracterizan completamente los resonadores utilizados como elementos filtrantes. En general, proporciona un ajuste preciso para

una sola resonancia más las otras regiones de la función de transferencia de un resonador que no está cerca de otra resonancia, modelando esas partes como una capacitancia. Cualitativamente, la rama R-L-C determina la resonancia de la "serie", donde la impedancia cae bruscamente a un valor mínimo de R a la frecuencia donde la inductancia y la capacitancia en serie se cancelan entre sí. A alguna frecuencia más alta, la reactancia del bucle llega a cero y provoca una resonancia "paralela" donde la mayoría de la corriente viajará alrededor del bucle en lugar de pasarlo.

- **Variable Dependiente**

Parámetros Piezoeléctricas, son las propiedades del material en cuestión, cuyo principal valor es indicar su comportamiento mediante parámetros que pueden ser representados por elementos pasivos como lo son la resistencia (Ω), Inductancia (H) y Capacitancia (f), los cuales se pueden obtener directa o indirectamente haciendo uso instrumentos de precisión adecuados para medir dichos parámetros, y así poder predecir el comportamiento de un piezoeléctrico al ser sometido a diversos escenarios a los que puede ser expuesto.

2.4.2.1. Operacionalización de Variables

Tabla 2*Operacionalización de variable dependiente*

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES DE MEDIDA
Parámetros Piezoeléctricos	Está compuesto por los elementos pasivos que definen el comportamiento de un piezoeléctrico ante diferentes estímulos.	Los parámetros del material determinan el funcionamiento o del mismo, aumentando o disminuyendo según la distancia a la que estemos de la frecuencia de resonancia.	Resistencia	Labview	Ohmios (Ω)
			Capacitancia	Labview	Faradios (f)
			Inductancia	Labview	Henrios (H)

Tabla 3*Operacionalización de las Variables Independientes*

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES DE MEDIDA
Modelo de Butterword y Van Dyke	Es un modelo común de circuito de elementos agrupados utilizado por los diseñadores de filtros de cristal para simplificar las funciones trascendentales que caracterizan completamente los Circuitos Resonantes	Proporciona un ajuste preciso para una sola resonancia más las otras regiones de la función de transferencia de un resonador que no está cerca de otra resonancia, modelando esas partes como una capacitancia.	Frecuencia de Resonancia	Reporte de frecuencias de resonancia	HZ
			Frecuencia de anti resonancia	Reporte de frecuencia de anti resonancia	HZ

III. METODOLOGÍA EMPLEADA

III. METODOLOGÍA EMPLEADA

3.1. Tipo de Investigación

3.1.1. De acuerdo a la orientación o finalidad

Aplicativa

3.1.2. De acuerdo a la técnica de contrastación

Explicativa

3.1.3. Línea de Investigación

Comunicación, tecnología de información e innovación

3.2. Población y muestra de estudio

3.2.1. Población

La población está conformada por transductores cerámicos piezoeléctricos para lo cual se deberá registrar en forma precisa y con mayor profundidad los datos arrojados de las diferentes pruebas.

3.2.2. Muestra

La muestra estará conformada por 10 transductores cerámicos piezoeléctricos.

3.3. Técnicas e instrumentos de investigación

3.3.1. Técnicas de recolección de datos

- La técnica principal que se utilizó para la recolección de datos fue la observación y el análisis de documentos, nos permitió registrar los valores de tensión y corriente obtenidos por los transductores expuestos a las diferentes pruebas de laboratorio y mediante las especificaciones obtenidas de las fichas técnicas podamos analizar

la respuesta de los transductores en base a las condiciones que establece el fabricante.

3.3.2. Técnicas de procesamiento de datos

- Técnica de registro: Se procedió a registrar todos los datos en papel como en un formato digital como en este caso el programa Microsoft Excel
- Técnica de Observación: Nos permitió observar el fenómeno y registrar la información.
- Técnica del Internet: Nos permitió obtener información diversa sobre el tema, por ejemplo las hojas técnicas de los transductores empleados en la investigación, utilizando como instrumento las distintas Páginas Web.
- Técnica de Fichas: Esta técnica se desarrolló mediante el fichaje de información obtenida en diferentes formatos.

3.3.3. Técnicas de análisis de datos

Para el tratamiento o análisis de los datos recogidos se utilizaron las siguientes técnicas:

- Revisión de datos: Este método durante el desarrollo de todo el proceso de la investigación, nos permitió sintetizar datos.
- Análisis y síntesis: Este método nos facilitó la observación de cada uno de los aspectos que comprende nuestra investigación, con el fin de proporcionar respuestas a las interrogantes que se presenten.

- Comparación: Este método se utilizó para conocer las variaciones características de cada uno de los procedimientos evidenciados en las tablas de datos recolectados.
- Interpretación: Nos permite determinar el significado más amplio de los resultados obtenidos en cada experiencia en las cuales se expuso los diferentes sensores.
- Discusión de resultados: Se realizó en función a las conclusiones a las que arribemos, al final de nuestra investigación. Mediante ellas procederemos a efectuar las discusiones y/o debates necesarios, que nos permita seleccionar las opciones de solución más ventajosas a la solución de la problemática que motiva esta Tesis.

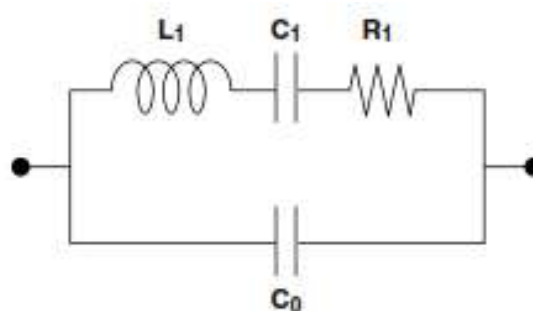
3.3.4. Procedimiento

- **Modelamiento del PZT**

El primer paso fue calcular los valores de las componentes del circuito equivalente del PZT, según el modelo de Butterworth Van Dyke. Dicho modelo establece que un piezoeléctrico se comporta de manera análoga al circuito eléctrico como el de la figura 10.

Figura 10

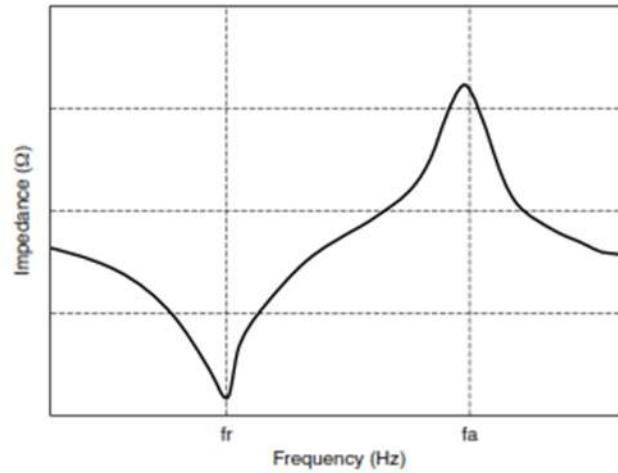
Circuito RLC equivalente de un PZT modelo Butterworth Van Dyke



El comportamiento del mismo en el dominio de la frecuencia se observa en la figura 11.

Figura 11

Dominio de la frecuencia de un PZT respecto a su impedancia



Utilizando el modelo del Butterworth Van Dyke, se propone establecer los valores de L_1 , C_1 , R_1 y C_0 que definen la zona de resonancia y anti resonancia del PZT.

A pesar que fuera de esta zona la respuesta de este modelo no se asemeja a la de un PZT, resulta útil caracterizar al PZT según estos parámetros.

Para empezar, se obtiene la función de impedancia del PZT:

$$Z(s) = \frac{s^2 L_1 C_1 + s R_1 C_1 + 1}{(s C_0) \left(s^2 L_1 C_1 + s R_1 C_1 + 1 + \frac{C_1}{C_0} \right)} \quad \dots (1)$$

Si $a = L_1 C_1$, $b = C_1 R_1$, $c = 1 + \frac{C_1}{C_0}$... (2)

$$Z(s) = \frac{as^2 + bs + 1}{(s C_0)(as^2 + bs + c)} \quad \dots (3)$$

$$Z(j\omega) = \frac{1 - a\omega^2 + j\omega b}{(j\omega C_0)(c - a\omega^2 + j\omega b)} = Real + jImg \quad \dots (4)$$

$$Z(jw) = \frac{bC_0w^2(c-1) + j[-a^2C_0w^5 + (acC_0 + aC_0 - b^2C_0)w^3 - cC_0w]}{\nabla} \quad \dots (5)$$

Teniendo la función de $Z(jw)$, se puede obtener la función que defina la tangente del ángulo de desfase de Z .

$$\tan \phi_Z = \frac{-aC_0w^5 + (acC_0 + aC_0 - b^2C_0)w^3 + (-cC_0)w}{bC_0w^2(c-1)} \quad \dots (6)$$

$$K = w \tan \phi_Z = \frac{-a^2}{b(c-1)}w^4 + \frac{ac + a - b^2}{b(c-1)}w^2 + \frac{-c}{b(c-1)} \quad \dots (7)$$

$$\text{Si } q_i = \frac{-a^2}{b(c-1)}, q_j = \frac{ac+a-b^2}{b(c-1)}, q_k = \frac{-c}{b(c-1)}$$

$$K = q_iw^4 + q_jw^2 + q_k \quad \dots (8)$$

Debido a que podemos conocer el valor de K mediante mediciones con el osciloscopio, midiendo valores para 3 K diferentes podemos hallar q_i , q_j y q_k .

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1^4 & w_1^2 & 1 \\ w_2^4 & w_2^2 & 1 \\ w_3^4 & w_3^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_i \\ q_j \\ q_k \end{bmatrix} \quad \dots (9)$$

Una vez se tengan los valores de q_i , q_j y q_k , se pueden calcular los valores de a, b, c .

Para el cálculo de a se tiene:

$$\frac{q_k^2}{q_i}a^4 + \left(\frac{q_kq_j}{q_i} - 1\right)a^3 - q_ja - q_i = 0 \quad \dots (10)$$

Debido a que hay 4 valores que puede tomar a , hay que tener en consideración los valores experimentales que se obtengan para elegir uno de ellos. Obtenidos los valores de a , b y c deberíamos ser capaces de calcular los parámetros $L1$, $C1$, $C0$ y $R1$.

- **Diseño del circuito utilizado para analizar la impedancia de un sistema LTI electrónico**

Sistema LTI electrónico:

Sea $f(t)$ una señal senoidal de amplitud (A) conocida, frecuencia (ω) conocida aplicada a un circuito LTI pasivo, como podrían ser un circuito C-R, L-R, L-C-R. O también un sensor de respuesta LTI como un piezoeléctrico.

Se espera que en cada elemento de ese sistema LTI, exista una respuesta LTI. Respuesta que contiene una reducción de amplitud o de fase respecto a la señal de entrada $f(t)$.

Mediante el teorema del muestreo, la señal $f(t)$ se puede expresar como una señal $f(kT_s)$ discreta, donde k es un número entero con valores de $0, 1, 2, 3, 4, n-1$ y T_s es el tiempo de muestreo aplicado.

El conversor analógico-digital de un microcontrolador permite obtener muestras de cualquier señal, en este caso una onda senoidal.

El problema del cruce por cero:

Una onda senoidal es periódica y como tal, siempre cruza por cero 2 veces en cada periodo, el muestreo aplicado por un microcontrolador no siempre está sincronizado con las señales de entrada, para ejemplo de esto: $f(k=0) \neq \sin(\omega t = 0)$ esta falta de sincronismo se puede corregir

vinculando el ADC a un detector de cruce por 0, pero este no es el propósito de la presente investigación, aquí utilizaremos esa falta de sincronismo para un método de análisis de impedancias.

Dada una señal en tiempo continuo:

$$f(t) = A \sin(\omega t) \quad \dots (11)$$

Cuya forma discreta obtenida desde un microcontrolador es del tipo:

$$f(\omega t_0 + \omega k T_s) = A \sin(\omega t_0 + \omega k T_s) \quad \dots (12)$$

Donde el término ωt_0 es la distancia temporal desplazada al muestrear la señal, producto de una falta de sincronismo.

Utilizando una equivalencia trigonométrica conocida:

$$f(k) = A \sin(\omega t_0) \cos(\omega k T_s) + A \cos(\omega t_0) \sin(\omega k T_s) \quad \dots (13)$$

Por la condición del muestreo, se sabe que ω , T_s y k son conocidas.

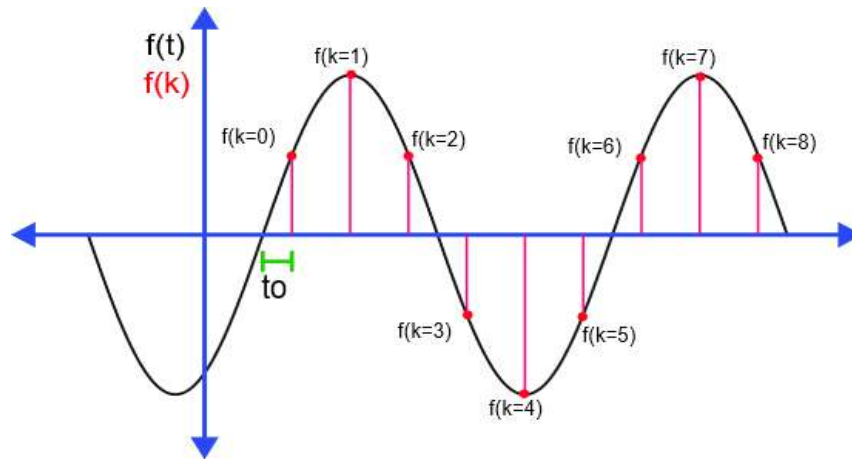
Agrupando términos tenemos:

$$Z_0 = A \sin(\omega t_0) \quad ; \quad Z_1 = A \cos(\omega t_0) \quad \text{y} \quad p_0(k) = \cos(\omega k T_s) \quad ;$$

$$p_1(k) = \sin(\omega k T_s)$$

Figura 12

Distancia temporal desplazada al muestrear la señal senoidal.



Suponiendo que se obtienen N muestras, se pueden disponer los datos conocidos y desconocidos de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ \vdots \\ f(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0(0) & p_1(0) \\ p_0(1) & p_1(1) \\ \vdots & \vdots \\ p_0(N-1) & p_1(N-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad \dots (14)$$

Si:

$$F = \begin{bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ \vdots \\ f(N-1) \end{bmatrix} \quad \dots (15)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_0(0) & p_1(0) \\ p_0(1) & p_1(1) \\ \vdots & \vdots \\ p_0(N-1) & p_0(N-1) \end{bmatrix} \quad \dots (16)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad \dots (17)$$

Se puede obtener Z por el método de mínimos cuadrados de la siguiente manera:

$$Z = (P^T P)^{-1} P^T F \quad \dots (18)$$

Al obtener W podemos calcular el ángulo inicial $(\varphi_0) = \omega t_0$ de la siguiente manera:

$$\varphi_0 = \text{Atan } 2(Z_0, Z_1) \quad \dots (19)$$

Y la amplitud se calcula de la siguiente manera:

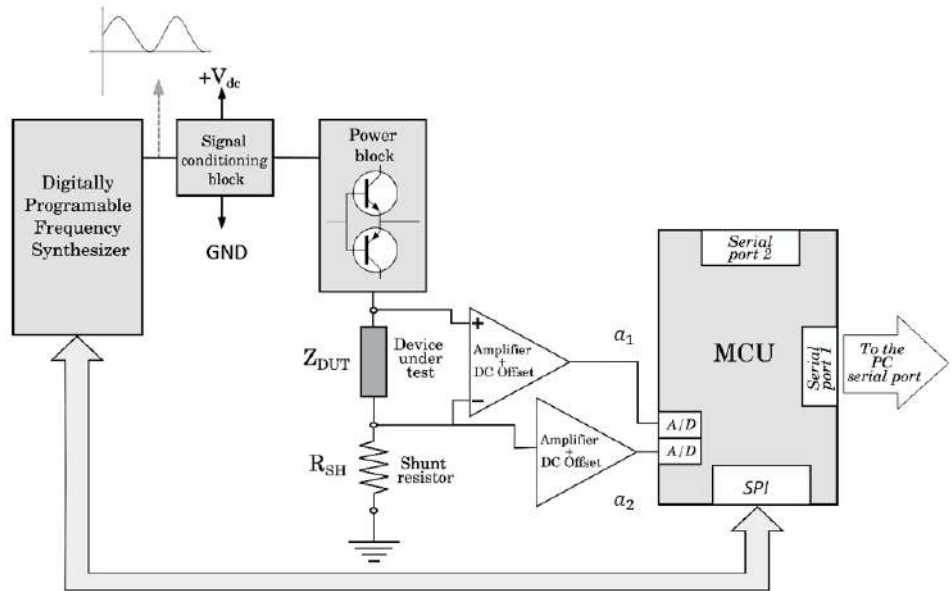
$$A = \frac{Z_0}{\sin(\varphi_0)} \quad \dots (20)$$

Usando el anterior algoritmo para detectar el desfase entre la primera muestra y el cruce por cero de una onda senoidal, se puede desarrollar un sistema que mida impedancias basándose en la medición de desfases.

Empleando el siguiente sistema:

Figura 13

Diagrama simplificado del circuito medidor de impedancias.



En la figura 13, se propone medir la impedancia Z_{DUT} (Impedancia del PZT), para ello el sistema ejerce, sobre el circuito R-L-C, una señal sinusoidal $A\sin(\omega t)$ mediante un circuito sintetizador de frecuencia conocida.

Para el experimento, R_{SH} tiene el valor de $1\ \Omega$ y corresponde a nuestra resistencia de prueba. Su valor de $1\ \Omega$ ayuda a encontrar el valor de la corriente por la ley de Ohm. Esta corriente contiene el desfase ejercido por la impedancia del PZT, recordando análisis de redes eléctricas, un circuito RLC ejerce un desfase desde -90° a 90° , dependiendo de la componente de la impedancia de mayor dimensión.

El canal a_1 en el circuito contiene a la señal aplicada al sistema, equivalente a: $A\sin(\omega t)$, al aplicar un muestreo para someterlo al algoritmo descrito, podemos determinar su

ángulo, tiempo o desfase de las muestras debido a la falta de sincronismo.

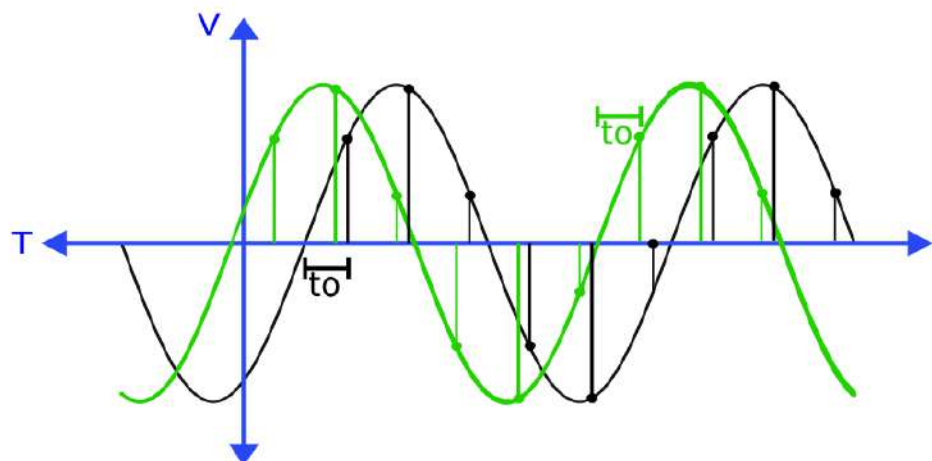
El canal a_2 contiene a la señal aplicada al sistema, pero con un ángulo de desfase propio por la red RLC, este desfase propio puede obtenerse indirectamente después de haber discretizado la señal y aplicado el algoritmo que mide el ángulo de sincronismo.

Teniendo los ángulos de sincronismo para el canal a_1 y canal a_2 la resta entre ambos obtiene como resultado el desfase de la red RLC, debido a las condiciones del sistema donde ω es conocido, T_s es conocido y las muestras son conocidas, solo hizo falta acondicionar las señales.

Obteniendo el ángulo de desfase de la red RLC, se puede calcular indirectamente el valor de la capacitancia e inductancia que ejerce tal desfase a tal frecuencia ω presente en el sistema.

Figura 14

Desfase entre canales a_1 y a_2 .



Seudocódigo algoritmo DSPIC:

El algoritmo que calcula el desfase como la impedancia se ejecuta sobre un microcontrolador (MCU según la figura 12) DSPIC 33CH128MP202. A continuación, se muestra el pseudocódigo implementado en tal dispositivo:

Start :

M0 as vector; M1 as vector // vectores de muestras para canal0 y canal 1

// N es la longitud del vector

// Ts variable según criterio de Nyquist

//función para obtener muestras

Cada sample time Ts tomar muestras :

S0 = filtro[adc(chanel0), F_s , F_m]

S1 = filtro[adc(chanel1), F_s , F_m]

M0[i] = (s0*5.0/1023.0)- nivel continua

M1[i] = (s1*5.0/1023.0)- nivel continua

I = i+1;

If(i>N):

Break;

//función de mínimos cuadrados

T0, A

// función para desfase IMPEDANCIA

T0, A = Mínimos cuadrados (M0, N, Ts, W) // calcula el t0 para canal 0

T0', A' = Mínimos cuadrados (M1, N, Ts, W) // calcula el t0' para canal 1

Desfase_radianes = T0-T0' // DESFASE DE LA RED Z-R

Algoritmo:

Entradas = ω , T_s , $N=15$; ω frecuencia angular y T_s tiempo de muestreo

$f = [0, 1, 2, 3, 4, 5, N-1]$ // vector de longitud N

For $k = 0$; $k < N$; $k++$

$f(k) = \text{ADC}(0)$ // N longitud del vector de muestras,

// ADC (0) canal del microcontrolador

$p_0 = [\cos(\omega k T_s), \cos(\omega k T_s), \cos(\omega(N-1)T_s)]$ // $K = 0, 1, 2, 3, N-1$

$p_1 = [\sin(\omega k T_s), \sin(\omega k T_s), \sin(\omega(N-1)T_s)]$

$p = [p_0; p_1]$

$Z[0,1] =$ Método de mínimos cuadrados (f, p)

$\varphi = t_0 = \text{atan2}(Z[0], Z[1])$

$A = Z[0] / \sin(\varphi)$

$C_0, C_1, L_1, R_1, F_{RES} =$ función de mínimos cuadrados K_n, w

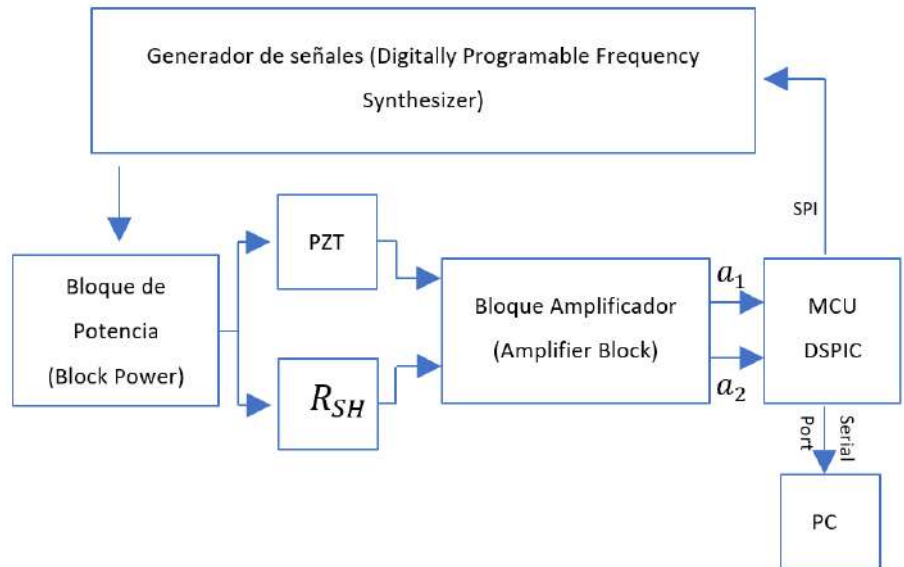
Función envío de datos seriales a LabVIEW [57600 baudios, $C_0, C_1, L_1, R_1, F_{RES}$, Flat barrido, flat de término de barrido]

Implementación del analizador de impedancia:

En la figura 15 se observa un gráfico general que sintetiza mediante un diagrama de bloques el circuito analizador de impedancias. A continuación, se detalla los elementos que conforman cada bloque, su funcionalidad y la importancia para lograr el objetivo de medir la impedancia de cada PZT.

Figura 15

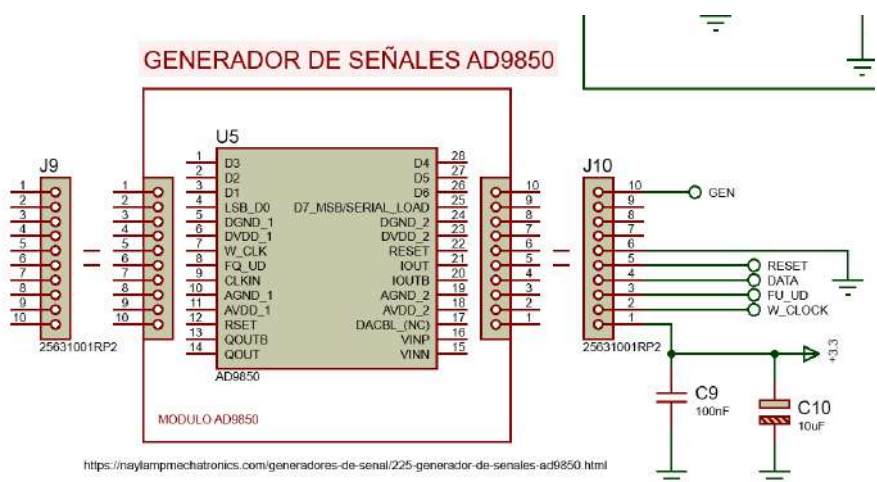
Diagrama de Bloques del analizador de impedancias



Bloque Generador de Señales: este bloque está conformado por el circuito integrado generador de señales AD9850, este dispositivo es el encargado de otorgar las señales senoidales al bloque de potencia. En esta investigación se usó el protocolo I2C para lograr enviar la frecuencia deseada $f(k)$. En la figura 16 se observa la distribución de pines de este circuito integrado.

Figura 16

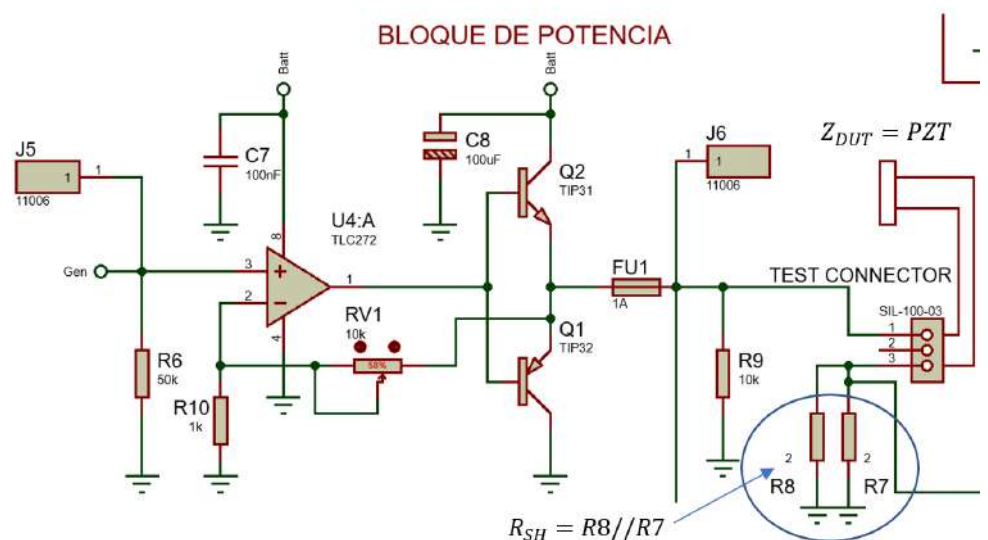
Pinout del generador de señales AD9850



Bloque de potencia: este bloque es el encargado de amplificar la señal senoidal entregada por el generador de señales AD9850. mediante U4 y la configuración de dos transistores complementarios Q1 y Q2 se consigue entregar los niveles de tensión y corrientes necesarios para excitar al PZT a medir.

Figura 17

Circuito que comprende el bloque de potencia

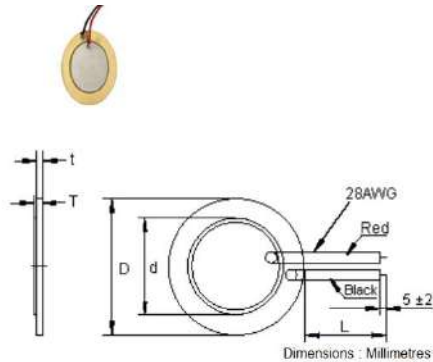


Sobre la entrada “Gen” se conecta el IC AD9850, el Circuito integrado U4:A, está configurado en modo amplificador no inversor. Con ayuda de los transistores Q1 y Q2 se logra acondicionar la señal hacia el PZT. Finalmente, la PTZ a medir se conecta al terminal SIL-100-03. La resistencia Shunt R_{SH} la conforman el paralelo de resistencias R7 y R8.

PZT: Para este experimento se ha usado las PZT de la marca multicom, en la figura 18 se detalla las características más importantes de estos dispositivos.

Figura 18

Características más importantes del PZT a estudiar



Specifications:

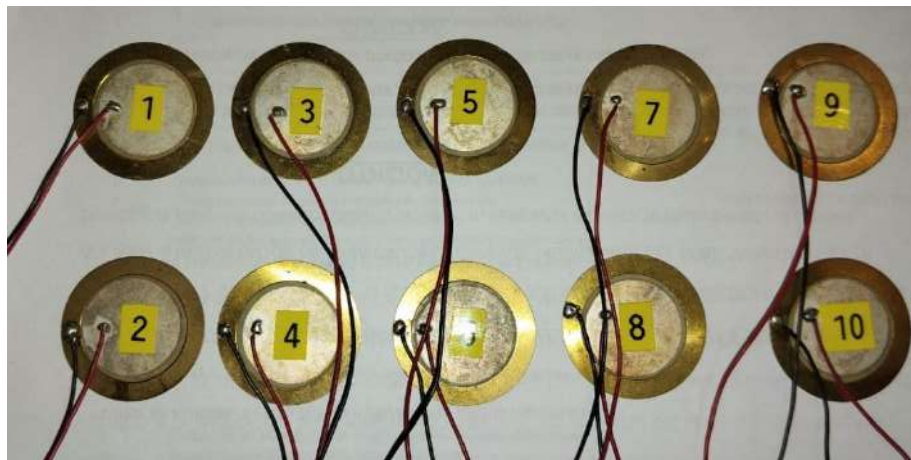
Rated maximum voltage (V_{p-p} square wave)	: 30V _{p-p} .
Capacitance	: 20,000pF \pm 30%.
Resonant frequency	: 4200 \pm 500Hz.
Resonant impedance	: \geq 300 Ω .
Operating temperature	: -20 to +60°C.
Storage temperature	: -20 to +70°C.
Dimensions D \pm 0.1	: 27mm.
d \pm 0.3	: 20mm.
t \pm 0.02	: 0.3mm.
T \pm 0.1	: 0.52mm.
Lead wire	: 28AWG.
Lead length (L)	: 200mm.

Adaptado de MULTICOMP PRO ABT-441-RC, 2024, Farnell, (https://export.farnell.com/multicomp/abt-441-rc/transducer-piezo-4200hz-30v/dp/1675548?pf_custSiteRedirect=true), Armley Road, Leeds, LS12 2QQ, England.

En la figura 19 se muestra los 10 transductores de la marca Multicomp, estas 10 muestras nos sirvieron para ejecutar el experimento y analizar el comportamiento del PZT en cuestión con el modelo de Butterworth y Van Dyke.

FIGURA 19

Muestra conformada por los 10 PZT a estudiar



R_{SH} : La resistencia Shunt o R_{SH} se utiliza para medir la corriente que atraviesa el PZT. En la figura 17 la resistencia R_{SH} esta formado por el paralelo de resistencias de precisión R7//R8. Mediante el bloque amplificador se lleva la señal del R_{SH} hasta el microcontrolador.

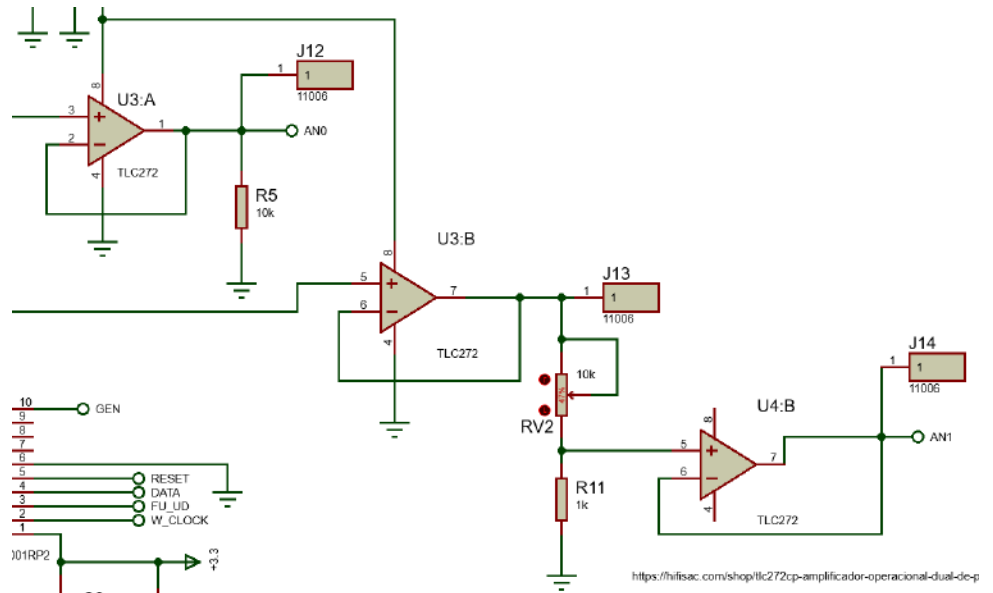
Bloque Amplificador: este circuito es el encargado de amplificar la señal originada en la resistencia R_{SH} , en la figura 20, la resistencia R_{SH} esta conectada a la entrada no inversora de U3:A. Este amplificador operacional esta configurado como seguidor de tensión. La salida se conecta a la entrada AN0 correspondiente al canal 0 del microcontrolador DSPIC33CH128MP202.

El circuito integrado U3:B mediante su entrada no inversora conecta la señal proveniente del bloque de potencia (Señal senoidal) hacia el canal 1 del microcontrolador. Conjuntamente con U3:B somete a la señal senoidal a una amplificación en modo no inversor. El amplificador operacional usado para esta aplicación corresponde al IC: TLC272. Las características como el rechazo al modo

común y el ancho de banda suplen las necesidades de este experimento.

Figura 20

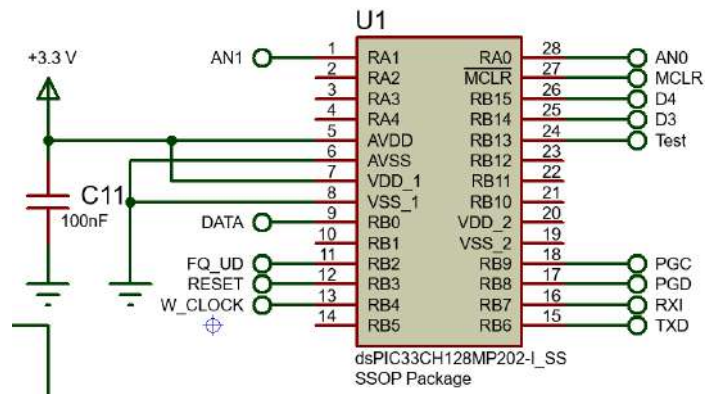
Bloque amplificador



MCU: el microcontrolador DSPIC encargado de hacer los cálculos de impedancias es el DSPIC33CH128MP202. Este dispositivo tiene dos núcleos de operación (Master/slave), 128 kbytes de memoria de programa en el núcleo master y 24 kbytes en el núcleo slave. Una de las funciones imprescindibles son las profundidades de conversión analógica, así como la velocidad para muestrear cada módulo de conversión. 12 – bit a 3.5 millones de muestras por segundo (MSPS) de ADC son más que suficientes para muestrear señales de hasta 5 kHz.

Figura 21

MCU formado por el DSPIC33CH128MP202



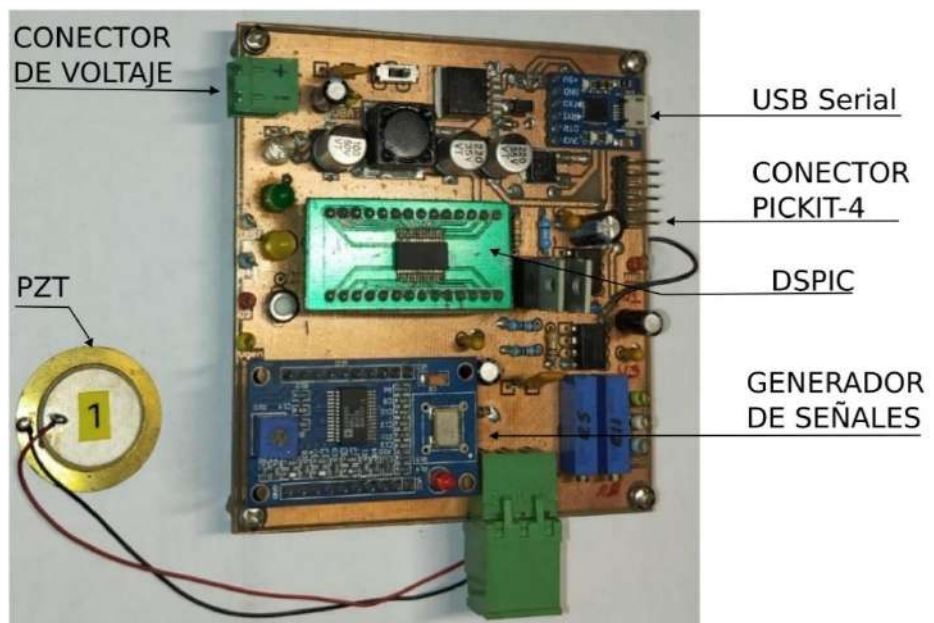
En el anexo 3 se adjunta el circuito a detalle del analizador de impedancias.

Circuito medidor de impedancia

En la figura 22 se muestra la tarjeta electrónica donde se hizo los experimentos son los distintos PZTs. Esta tarjeta tiene la cualidad de hacer los cálculos mostrados anteriormente en el pseudocódigo y entregarlos a un ordenador mediante el software LabVIEW.

Figura 22

Tarjeta electrónica para la medición de impedancia



Funcionamiento del algoritmo medidor de impedancias

El algoritmo para la medición de impedancias programado en el DSPIC se muestra en la figura 23, como primera etapa contiene a la etapa de filtrado con una F_c y F_s , frecuencia de corte y frecuencia de muestreo de 10 y 20 kHz respectivamente. Alberga un algoritmo – filtro pasa bajos, esta es necesaria para evitar que frecuencias mayores a la F_c pasen a los siguientes bloques e interfieran en el calculo de los parámetros Butterworth y Van Dyke.

En el script de LabVIEW, (Figura 27), y mediante el botón de “INICIAR BARRIDO”, el DSPIC enviará el comando para excitar con diferentes frecuencias de 1 kHz hasta 5 kHz cada 100 Hz al PTZ a evaluar.

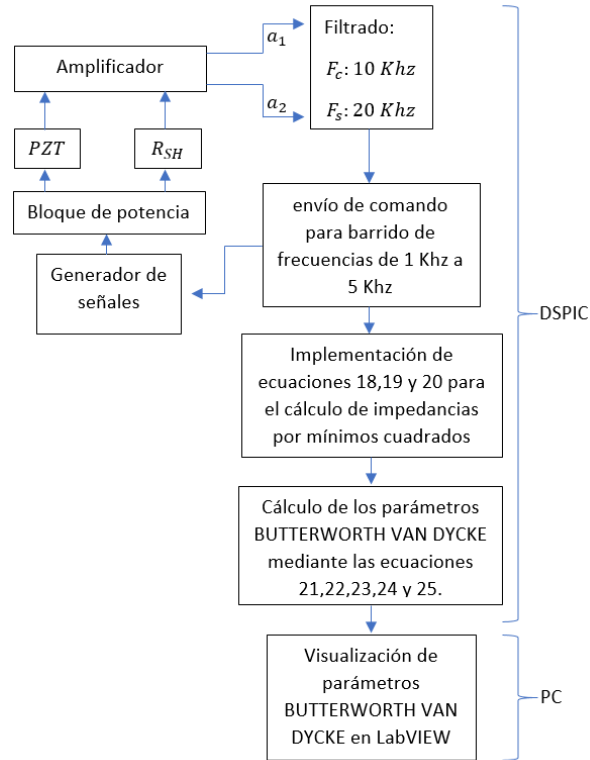
Para el cálculo de la medición de impedancias se ha desarrollado los algoritmos respectivos de la técnica de mínimos cuadrados. Con las ecuaciones 18, 19 y 20 se obtienen los vectores de amplitud y los ángulos de desfase de las señales a_1 y a_2 .

En función a los ángulos de desfase, las frecuencias muestreadas y mediante la implementación de las ecuaciones 21, 22, 23, 24 y 25 se obtienen los parámetros de Butterworth y Van Dyke.

Finalmente, los parámetros son visualizados en un script de LabVIEW.

Figura 23

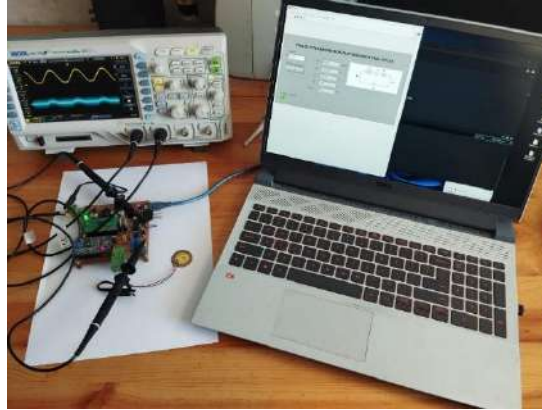
Etapas del algoritmo para la medición de parámetros Butterworth y Van Dyke.



En la figura 24, se muestra el DSPIC en funcionamiento, en este ejemplo el microcontrolador está conectado a un osciloscopio con la finalidad de visualizar las ondas generadas en ambos canales, así también, mostrar la conectividad hacia el script en LabVIEW sobre la computadora.

Figura 24

Etapas del algoritmo para la medición de parámetros Butterworth y Van Dyke

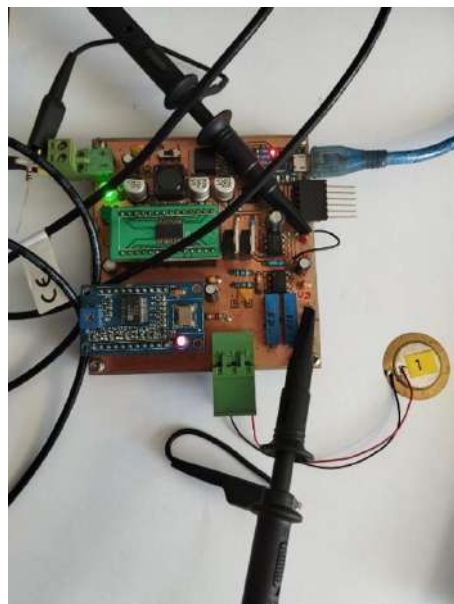


x

Para el desarrollo del experimento se ha usado la muestra o PTZ N. 1, en base a este dispositivo se realizaron las mediciones y cálculos correspondientes.

Figura 25

Experimento de medición de impedancia con la muestra número 1



Con la finalidad de comprobar las magnitudes de las ondas y desfases generadas se ha utilizado un osciloscopio, en la figura 26. Se observan dos señales, la de color amarillo es

la señal generada, la de color celeste es la medida en la resistencia Shunt R_{SH}

Figura 26

Captura de pantalla del osciloscopio a una frecuencia de 3 kHz.

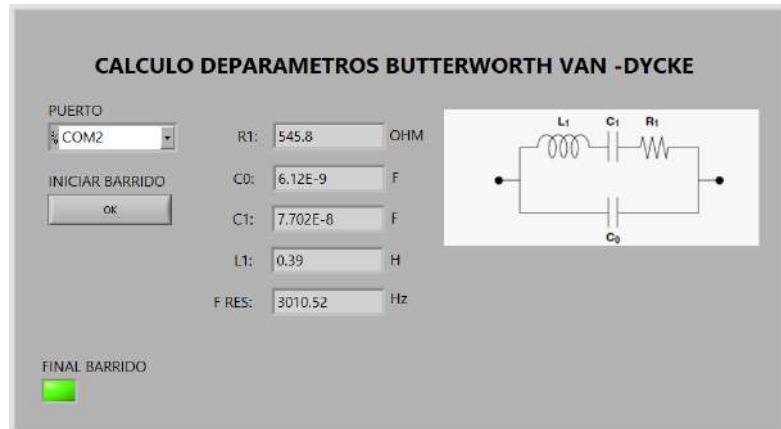


Después del barrido de frecuencias y los cálculos correspondientes en el DSPIC, se mostrarán los valores en el script de LabVIEW, en este caso se ha calculado los parámetros R_1, C_0, C_1, L_1 y la frecuencia de resonancia F_{RES} .

Para ello se hará necesario el ingreso de número de puerto de comunicación y después de presionar el botón de “INICIAR BARRIDO” y esperar la confirmación de “FINAL DE BARRIDO”, el script mostrará los valores anteriormente descritos (los valores que se muestran en la figura 27 pertenecen a la muestra o PZT N. 1).

Figura 27

Valores calculados de los parámetros Butterworth y Van Dyke mediante LabVIEW



Barrido de frecuencias para la medición de impedancia del PZT

Una vez diseñada la tarjeta electrónica para la medición de impedancia, nos dispusimos a realizar mediciones en el piezoeléctrico a diferentes frecuencias, estas son elementales para calcular los valores teóricos de sus impedancias capacitivas, inductivas y resistivas. Los parámetros para considerar son: el voltaje pico a pico que pasaba por la resistencia de carga y el desfase con respecto a la señal de entrada.

Es necesario hacer el barrido de frecuencia para encontrar la frecuencia de resonancia. Para ello se llenó un cuadro de registro en el que se indicó la amplitud y el tiempo de desfase como se muestra en la tabla 4. Con dicha tabla se hizo el barrido de frecuencia desde 1 – 5 kHz, Estos datos, a su vez nos sirvió para calcular los parámetros de Butterworth y Van Dyke ($L1$, $C1$, $R1$ y $C0$).

Tabla 4*Mediciones en muestra 1 de 1 a 5 kHz*

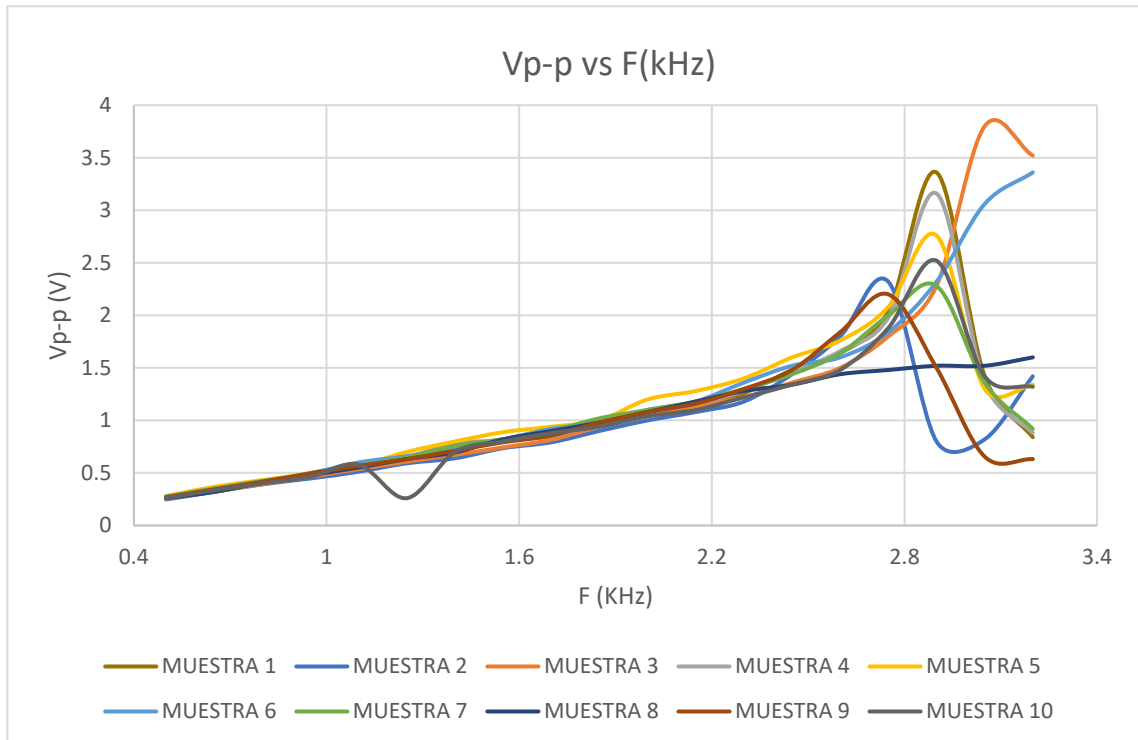
MUESTRA 1							
F(kHz)	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2
Vp-p (V)	0.536	0.624	0.7	0.824	0.98	1.12	1.22
Φ(μs)	230	190	160	140	120	108	96
Φ(grados)	82.8	82.08	80.64	80.64	77.76	77.76	76.032
F(kHz)	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6
Vp-p (V)	1.38	1.6	2.16	2.16	0.94	0.488	0.862
Φ(μs)	92	86	74	-16	-18	60	68
Φ(grados)	79.49	80.5	74.59	-17.28	-20.74	73.44	88.13
F(kHz)	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5
Vp-p (V)	1.05	1.26	1.34	1.52	1.6	1.58	1.78
Φ(μs)	66	60	60	56	50	48	46
Φ(grados)	90.29	86.4	90.72	88.7	82.8	82.94	82.8

3.4. Procesamiento y análisis de datos

La ilustración 28 contiene los datos arrojados por la investigación graficados en el dominio de la frecuencia vs el voltaje pico a pico que pasa por los piezoeléctricos.

Figura 28

Gráfica del análisis en frecuencia de las diez muestras

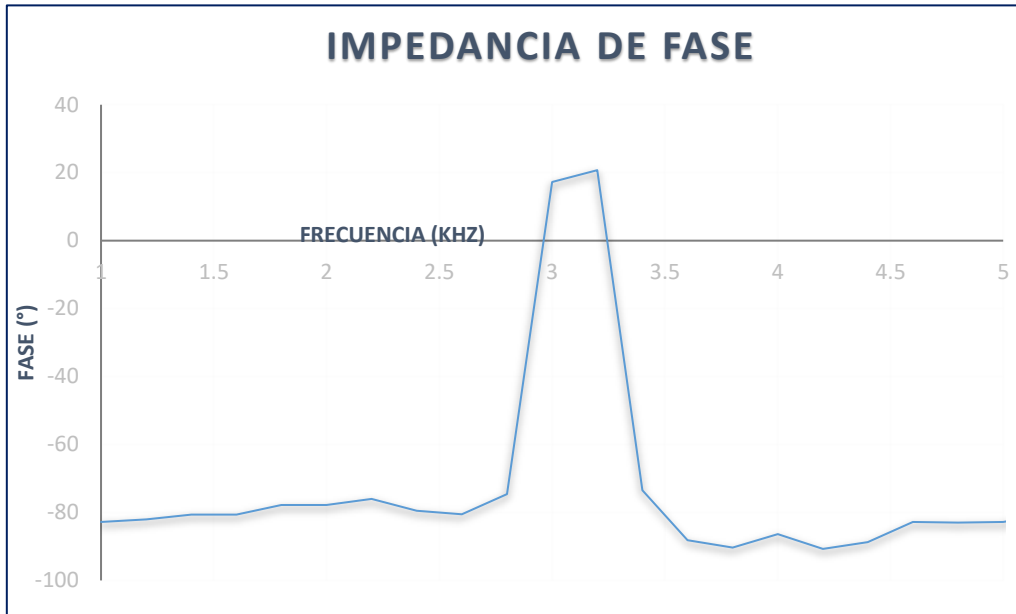


Se puede apreciar que la frecuencia de resonancia de los PZT se encuentra entre 2.5 KHz y 3KHz. Además, gracias a la forma que tiene la curva de las gráficas, podemos deducir que los piezoeléctricos tienen un comportamiento no lineal.

Así mismo se evidencia un incremento sustancial del voltaje al acercarse a la frecuencia de resonancia, generando de esta manera la máxima transferencia de potencia.

Figura 29.

Barrido de frecuencias desde 1kHz hasta 5kHz para la muestra 18



3.4.1. Cálculos de parámetros Butterworth Van Dyke

Para calcular los valores de K partimos de la siguiente fórmula

$$K = w \tan \phi_Z = 2\pi f \tan \phi_Z \quad \dots (21)$$

De todo el barrido de frecuencias, seleccionamos 3 puntos para armar la siguiente matriz con los K y los W.

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1^4 & w_1^2 & 1 \\ w_2^4 & w_2^2 & 1 \\ w_3^4 & w_3^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_i \\ q_j \\ q_k \end{bmatrix} \quad \dots (22)$$

Luego despejamos las q y obtenemos:

$$q_i = -1.87719885372936E - 12$$

$$q_j = 7.19839694160756E - 04$$

$$q_k = 26,312.9020087042$$

Con los valores de q, resolvemos la siguiente ecuación para poder despejar a.

$$\frac{q_k^2}{q_i} a^4 + \left(\frac{q_k q_j}{q_i} - 1 \right) a^3 - q_j a - q_i = 0 \quad \dots (23)$$

Mediante el siguiente script de Matlab, realizamos el cálculo de “a” para los valores de q_i , q_j y q_k anteriormente establecidos.

Figura 30

Script de Matlab par cálculo de parámetro “a”

```

1 %Calculo de "a" en la muestra N°18
2 p18=[-3.688308304387500E+20 -1.009007186255200E+13 0 -0.00071984 1.877198853729E-12]
3 a18=roots(p18)

```

Habiendo calculado las raíces, determinamos el valor de “a”

$$a = 2.98E - 08$$

Y con los valores de a, despejar b y c.

$$q_i = \frac{-a^2}{b(c-1)}, \quad q_j = \frac{ac + a - b^2}{b(c-1)}, \quad q_k = \frac{-c}{b(c-1)} \quad \dots (24)$$

Figura 31

Script de Matlab par cálculo de parámetro “b” y “c”

```

1 %Calculo de los parametros "b" y "c"
2 |
3 - a=2.975457218040212e-08
4 - qi=-1.87719885372936E-12
5 - qk=26312.9020087042
6 - syms b c
7 - equ1=qi==(-a^2)/(b*(c-1));
8 - equ3=qk==(-c)/(b*(c-1));
9 - [b,c]=solve(equ1,equ3,b,c)

```

Teniendo como resultado los valores de “b” y “c”.

$$b = -4.13E - 05$$

$$c = 1.24E + 01$$

Finalmente teniendo los valores de a, b, c podemos despejar los valores de cada uno de los parámetros BVD.

$$a = L_1 C_1, \quad b = C_1 R_1, \quad c = 1 + \frac{C_1}{C_0} \quad \dots (25)$$

Para ello, despejamos las variables y obtenemos los parámetros de Butterworth y Van Dyke para la Muestra 18.

- $R_1 = 572.397$
- $C_0 = 6.32894E-9$
- $C_1 = 72.15E-9$
- $L_1 = 413Mh$

Haciendo uso de un medidor de impedancias MOTTECH MT 4080A se realiza el cálculo de los parámetros internos del PZT, de esta manera podemos contrastar los resultados obtenidos con el barrido de frecuencias.

Dado que el analizador de impedancias posee un rango de frecuencias estandarizado (100Hz, 120Hz, 1kHz, 10kHz y 100kHz) tomamos el valor de la impedancia obtenido en la frecuencia de 1KHZ para comparar el valor obtenido del barrido realizado en la misma frecuencia.

Figura 31

Medición de impedancia "Z" a 1kHz



Tabla 5*Parámetros del PZT obtenidos del medidor de impedancias*

Parámetros	Frecuencias				
	100 Hz	120 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
Ls	-79.91 H	-55.75 H	-845.5 mH	-11.19 mH	94 uH
Lp	-80.24 H	-55.83 H	-851.4 mH	11.67 mH	95.73 uH
Cp	31.49 nf	31.50 nf	29.67 nf	21.70 nf	27.14 pf
Cs	31.61 nf	31.53 nf	29.98 nf	22.62 nf	25.43 pf
Z	50.23 k	41.99 k	5.315 k	717.8	95.54

Para hallar la impedancia en 1kHz en base a las mediciones realizadas en el laboratorio, el amplificador utilizado tiene una ganancia de 136 veces el voltaje en la resistencia. La magnitud obtenida en Voltios viene a ser la corriente que circula por el PZT y la resistencia de 1Ω, la cual nos ayuda también a visualizar y poder medir el desfase. Así se tiene:

$$Z = \frac{V}{I} \quad \dots (26)$$

$$Z = \frac{18 \angle 0^\circ \text{ V}}{3.94 \times 10^{-3} \angle 82.8^\circ \text{ A}}$$

Obteniendo Finalmente La Impedancia del PZT a la frecuencia de 1KHZ:

$$Z = 4.567 \angle -82.80^\circ \text{ K}\Omega$$

Tabla 6*Impedancias de la muestra 1 a 1kHz*

Impedancias en 1 KHZ	
LCR	5.315 \angle -85.53° KΩ
MEDICIONES	4.567 \angle -82.80° KΩ

IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

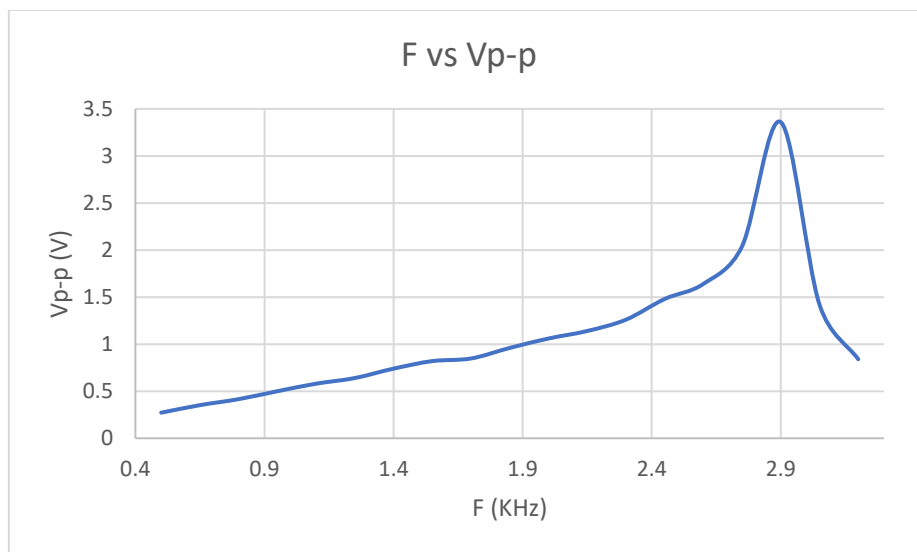
IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados

Habiendo analizado los datos obtenidos al realizar el barrido de frecuencias se puede evidenciar la similitud del comportamiento del PZT en cuestión con el comportamiento del modelo de Butterworth y Van Dyke haciendo uso del método de las impedancias. Mostrando La región en la que se encuentra su frecuencia de resonancia y antiresonancia.

Figura 32

Grafica F vs Vp-p de la muestra 1



Como se puede observar en las gráficas anteriores debido a la similitud del comportamiento de las gráficas, se puede asumir que la frecuencia de resonancia se encuentra en la región comprendida entre 3kHz y 3.5kHz aproximadamente. Así mismo hallamos los valores correspondientes a los parámetros de Butterworth Y Van Dyke

Tabla 7*Parámetros BVD de la muestra 1*

R1 = 572.397
C0 = 6.32894E-9
C1 = 72.15E-9
L1 = 413mH

Para validar los datos obtenidos se empleó un analizador de impedancias MOTECH MT 4080^a, el cual arrojó los siguientes resultados.

Tabla 8*Parámetros eléctricos del PZT a diferentes frecuencias*

Parámetros	Frecuencias				
	100 Hz	120 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
Ls	-79.91 H	-55.75 H	-845.5 mH	-11.19 mH	94 uH
Lp	-80.24 H	-55.83 H	-851.4 mH	11.67 mH	95.73 uH
Cp	31.49 nf	31.50 nf	29.67 nf	21.70 nf	27.14 pf
Cs	31.61 nf	31.53 nf	29.98 nf	22.62 nf	25.43 pf
Z	50.23 k	41.99 k	5.315 k	717.8	95.54

En la tabla 9 se observa las mediciones de frecuencia y Vp-p de todas las muestras realizadas con el analizador de impedancias MOTECH MT 4080^a, Se puede apreciar que la frecuencia de resonancia de los PZT se encuentra entre 2.5 kHz y 3kHz.

Tabla 9

Datos de voltaje capturados a distintas frecuencias

MUESTRA 1	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.27	0.42	0.58	0.74	0.85	1.06	1.26	1.64	3.36	0.84
MUESTRA 2	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.25	0.39	0.51	0.64	0.79	1.00	1.18	1.80	0.80	1.42
MUESTRA 3	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.26	0.39	0.54	0.67	0.82	1.04	1.22	1.50	2.28	3.52
MUESTRA 4	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.27	0.41	0.56	0.78	0.85	1.08	1.28	1.66	3.16	0.88
MUESTRA 5	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.28	0.43	0.57	0.80	0.94	1.20	1.40	1.76	2.76	1.34
MUESTRA 6	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.27	0.42	0.60	0.74	0.92	1.10	1.36	1.60	2.32	3.36
MUESTRA 7	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.28	0.42	0.57	0.76	0.90	1.10	1.30	1.64	2.28	0.92
MUESTRA 8	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.26	0.41	0.55	0.70	0.90	1.08	1.28	1.44	1.52	1.60
MUESTRA 9	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.27	0.42	0.57	0.71	0.86	1.08	1.30	1.84	1.50	0.63
MUESTRA 10	<i>F(kHz)</i>	0.50	0.80	1.10	1.40	1.70	2.00	2.30	2.60	2.90	3.20
	<i>Vp-p (V)</i>	0.26	0.40	0.58	0.70	0.88	1.04	1.22	1.48	2.52	1.32

De la tabla 8 extraemos la Impedancia (Z) y la comparamos con la impedancia calculada producto de los experimentos realizados.

Tabla 10

Impedancias del PZT a 1kHz

Impedancias en 1 kHz	
LCR	5.315 \angle -85.53° K Ω
MEDICIONES	4.567 \angle -82.80° K Ω

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente estudio se propuso como objetivo analizar del comportamiento y las características de un Piezoeléctrico (PZT) en distintas frecuencias para el cálculo de sus parámetros Piezoeléctricos, según los resultados obtenidos, la metodología empleada y la bibliografía consultada se puede afirmar lo siguiente:

- Se realizaron mediciones sobre 10 muestras según la figura 18 y 19, cabe resaltar que estas muestras pertenecen a un mismo lote y sin embargo los resultados plasmados (figura 28) muestran una ligera variabilidad en referencia al valor teórico de 4.5 KHz.
- Con respecto a la implementación del prototipo, es importante mencionar que los componentes electrónicos de la etapa de acondicionamiento de señales, son dispositivos de alta precisión, el DSPIC usado en este trabajo cuenta con etapas de filtrado digital para evitar la interferencia de ruido externo.
- Con respecto al modelado del PZT de acuerdo a Butterworth y Van Dyke es importante afirmar que este es valido siempre y cuando el dispositivo PZT a tratar no se comporte como dispositivo no lineal, presente geometría compleja o acoplamientos múltiples.
- Los cálculos de resonancia se han validado mediante el medidor de impedancias, experimentalmente mediante el prototipo implementado y con el osciloscopio. Por lo tanto, se puede afirmar la validez del procedimiento empleado en esta tesis y la concordancia con el marco teórico.

VI. CONCLUSIONES

VI. CONCLUSIONES

La presente tesis tuvo como objetivo principal analizar el comportamiento y las características de un Piezoeléctrico (PZT) en distintas frecuencias para el cálculo de sus parámetros Piezoeléctricos; al término de esta investigación, según los objetivos específicos planteados y los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se logró realizar un circuito capaz de medir indirectamente la corriente que circula por el PZT, y de esta manera con un generador externo se pudo observar su respuesta a diferentes frecuencias.
- Se logró implementar el algoritmo medidor de impedancias en un DSPIC y visualizar los parámetros de Butterworth y Van Dyke (BVD) en el software LabVIEW.
- Se logró realizar el modelamiento matemático del cruce por cero de 2 ondas sinusoidales mediante la falta de sincronismo, con la finalidad de calcular la impedancia respectiva de cada PZT.
- Se pudo realizar las gráficas con los datos obtenidos en el barrido de frecuencias en la que se identificó la frecuencia de resonancia de cada PZT.
- Se calculó los parámetros de Butterworth y Van Dyke (BVD) a partir de las mediciones realizadas a frecuencias de 1kHz hasta 5kHz. Siendo estas contrastadas y validadas por un analizador de impedancias.
- Se logró comparar las mediciones realizadas con el circuito planteado y el medidor de impedancias, así también, mediante la hoja de datos de los PZT planteado en el anexo 2, se verificó la frecuencia de resonancia, hallando una ligera diferencia de 700 HZ.

VI. RECOMENDACIONES

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda tener en consideración la temperatura del ambiente en el cual se está realizando las mediciones debido a los PZT tienden a reaccionar a estas variaciones térmicas y por lo tanto podrían variar las mediciones realizadas a una temperatura distinta a la inicial.
- Se recomienda desarrollar un procedimiento como complemento al circuito analizador de impedancias diseñado en esta investigación con la intención de detectar impedancias de forma específica y a su vez detectar otros modelos específicos para así detectar los parámetros eléctricos de impedancias complejas.
- Se recomienda también el uso de un analizador de impedancias con la capacidad de realizar gráficas de la respuesta en frecuencia del PZT en cuestión, con el objetivo de identificar con mayor precisión tanto la frecuencia de resonancia como de anti resonancia para así determinar de una manera más confiable los parámetros piezoeléctricos evaluados en esta investigación.
- Se recomienda diseñar un mecanismo para realizar pruebas a los piezoeléctricos bajo estrés mecánico y así obtener los parámetros mecánicos de los PZT y poder evidenciar cuanta energía se genera bajo fuerzas específicas en periodos específicos, ya que como hemos podido observar en esta investigación la máxima eficiencia de estos materiales se logra estando en la frecuencia de resonancia.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Arbona, J. (2017). "Caracterización, simulación y optimización de cerámicas radiopuras Nb-PZT para el detector PICO500" [Tesis de Master] Universidad Politécnica de Valencia.
- Butterworth, S. (2002). *On a Null Method Of Testing Vibration Galvanometers*, vol 26, pp264-273
- Castro, M., Camargo, J., Taub, J., Fernández, F., Rubio-Marcos, F. & Ramajo, L. (2013). *Cerámicos piezoeléctricos libres de plomo basados en los sistemas $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.8}\text{K}_{0.2})_{0.5}\text{TiO}_3$ y $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$* . Anales Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat., tomo 65 (2013): 50-58.
- Commission, E. (2017). Energy harvesting to power the rise of the Internet of Things. Digital Transformation Monitor, 1-5.
- Electronics-Projets-Focus, what is a Piezoelectric Material? *Working, Advantages and Limitations*. <https://www.elprocus.com/what-is-a-piezoelectric-material-working/>
- Fuentes, A. (2015). *Modelo lineal de un transductor ultrasónico de potencia utilizando circuitos equivalentes*.
- Ghazanfarian, J., Mohammadi, M. & Uchino, K. (2021). Piezoelectric Energy Harvesting: A Systematic Review of Reviews. *Actuators*, 10(12), 312. <https://doi.org/10.3390/act10120312>
- Huidong, L., Chuan T., & Daniel D. (2014). "Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials", *Applied Physics Reviews* 1, 041301 <https://doi.org/10.1063/1.4900845>
- Jiménez, B. (1995). Materiales piezoeléctricos: formas de presentación, ventajas y desventajas en las aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Volumen (34), 272-276.
- Johnson Electric, A Johnson Electric Company. (s.f.). *Piezoelectric Effect*. <https://www.nanomotion.com/nanomotion-technology/piezoelectric-effect/>
- Peralta, P. (2017). Cuantificación de incertidumbres en colectores de energía piezoeléctricos por medio de mediciones experimentales.
- Platt, S., Farritor, S., & Haider, H. (2005). *On Low-frequency electric power generation with PZT ceramics*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 10(2), 240-252.
- Murillo, S. (2017). *Análisis de vigas con materiales piezoeléctricos*. [Tesis de pre grado]. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.
- Santiago, J., & Gonzales, F. (2015). *Generación de energía utilizando el efecto piezoeléctrico*. Universidad Nacional Autónoma De México.

Sensor piezoeléctrico. (2021, 22 de diciembre). En *Wikipedia*. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sensor_piezoel%C3%A9ctrico&oldid=140492026.

Uchino, K. (2017). Manufacturing Methods for Piezoelectric Ceramic Materials. *Advanced Piezoelectric Materials*, 385–421. doi:10.1016/b978-0-08-102135-4.00010-2

Vatansever, D., Siores, E., Shah, T. (2012). *Alternative Resources for Renewable Energy: Piezoelectric and Photovoltaic Smart Structures*, Global Warming - Impacts and Future Perspective, Bharat Raj Singh, IntechOpen, DOI: 10.5772/50570.

Van Dyke, K. (2004). *The Piezo-Electric Resonator and Its Equivalent Network*, vol 16, pp 742-764.

Zavaleta, I. & Cunia, A. (2021). Sistema electromecánico formado por una baldosa y generador eléctrico tipo dínamo para la conversión de energía potencial generada al caminar en energía eléctrica.

ANEXOS

IX. ANEXOS

Anexo 1



dsPIC33CH128MP508 FAMILY

28/36/48/64/80-Pin Dual Core, 16-Bit Digital Signal Controllers with High-Resolution PWM and CAN Flexible Data (CAN FD)

Operating Conditions

- 3V to 3.6V, -40°C to +125°C:
 - Master Core: DC to 90 MIPS
 - Slave Core: DC to 100 MIPS

Core: Dual 16-Bit dsPIC33CH CPU

- Master/Slave Core Operation
- Independent Peripherals for Master Core and Slave Core
- Dual Partition for Slave PRAM LiveUpdate
- Configurable Shared Resources for Master Core and Slave Core
- Master Core with 64-128 Kbytes of Program Flash with ECC and 16K RAM
- Slave Core with 24 Kbytes of Program RAM (PRAM) with ECC and 4K Data Memory RAM
- Fast 6-Cycle Divide
- Message Boxes and FIFO to Communicate Between Master and Slave (MSI)
- Code Efficient (C and Assembly) Architecture
- 40-Bit Wide Accumulators
- Single-Cycle (MAC/MPY) with Dual Data Fetch
- Single-Cycle, Mixed-Sign MUL Plus Hardware Divide
- 32-Bit Multiply Support
- Five Sets of Interrupt Context Selected Registers and Accumulators per Core for Fast Interrupt Response
- Zero Overhead Looping

Clock Management

- Internal Oscillator
- Programmable PLLs and Oscillator Clock Sources
- Master Reference Clock Output
- Slave Reference Clock Output
- Fail-Safe Clock Monitor (FSCM)
- Fast Wake-up and Start-up
- Backup Internal Oscillator
- LPRC Oscillator

Power Management

- Low-Power Management Modes (Sleep, Idle, Doze)
- Integrated Power-on Reset and Brown-out Reset

High Resolution PWM with Fine Edge Placement

- Up to 12 PWM Channels:
 - Four channels for Master
 - Eight channels for Slave
- 250 ps PWM Resolution
- Applications Include:
 - DC/DC Converters
 - AC/DC power supplies
 - Uninterruptable Power Supply (UPS)
 - Motor Control: BLDC, PMSM, SR, ACIM

Timers/Output Compare/Input Capture

- Two General Purpose 16-Bit Timers:
 - One each for Master and Slave
- Peripheral Trigger Generator (PTG) Module:
 - One module for Master
 - Slave can interrupt on select PTG sources
 - Useful for automating complex sequences
- 12 SCCP Modules:
 - Eight modules for Master
 - Four modules for Slave
 - Timer, Capture/Compare and PWM Modes
 - 16 or 32-bit time base
 - 16 or 32-bit capture
 - 4-deep capture buffer
 - Fully Asynchronous Operation, Available in Sleep Modes

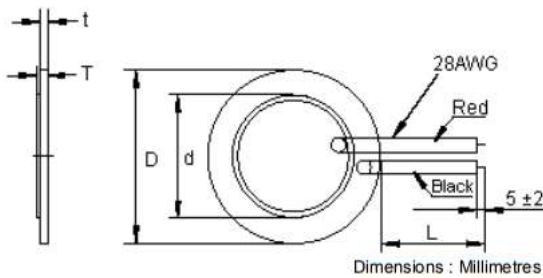
Piezo Element



Features:

All data at 25°C unless otherwise specified.

- RoHS compliant.
- Low power consumption.
- Reliable and lightweight.



Specifications:

Rated maximum voltage (V_{p-p} square wave)	: 30V _{p-p} .
Capacitance	: 20,000pF ±30%.
Resonant frequency	: 4200 ±500Hz.
Resonant impedance	: ≥300Ω.
Operating temperature	: -20 to +60°C.
Storage temperature	: -20 to +70°C.
Dimensions D ±0.1	: 27mm.
d ±0.3	: 20mm.
t ±0.02	: 0.3mm.
T ±0.1	: 052mm.
Lead wire	: 28AWG.
Lead length (L)	: 200mm.

Part Number Table

Description	Part Number
Piezo Element, 27mm, 4200Hz, Leaded	ABT-441-RC

Disclaimer This data sheet and its contents (the "Information") belong to the Premier Farnell Group (the "Group") or are licensed to it. No licence is granted for the use of it other than for information purposes in connection with the products to which it relates. No licence of any intellectual property rights is granted. The Information is subject to change without notice and replaces all data sheets previously supplied. The Information supplied is believed to be accurate but the Group assumes no responsibility for its accuracy or completeness, any error in or omission from it or for any use made of it. Users of this data sheet should check for themselves the information and the suitability of the products for their purpose and not make any assumptions based on information included or omitted. Liability for loss or damage resulting from any reliance on the information or use of it (including liability resulting from negligence or where the Group was aware of the possibility of such loss or damage arising) is excluded. This will not operate to limit or restrict the Group's liability for death or personal injury resulting from its negligence. SPC Multicomp is the registered trademark of the Group. © Premier Farnell plc 2009.

<http://www.farnell.com>
<http://www.newark.com>
<http://www.spc.co.uk>





CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer

AD9850

FEATURES

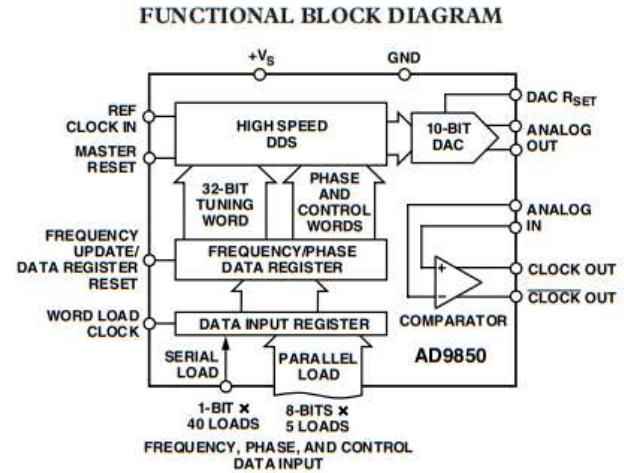
- 125 MHz Clock Rate
- On-Chip High Performance DAC and High Speed Comparator
- DAC SFDR > 50 dB @ 40 MHz A_{OUT}
- 32-Bit Frequency Tuning Word
- Simplified Control Interface: Parallel Byte or Serial Loading Format
- Phase Modulation Capability
- 3.3 V or 5 V Single-Supply Operation
- Low Power: 380 mW @ 125 MHz (5 V)
155 mW @ 110 MHz (3.3 V)
- Power-Down Function
- Ultrasmall 28-Lead SSOP Packaging

APPLICATIONS

- Frequency/Phase—Agile Sine Wave Synthesis
- Clock Recovery and Locking Circuitry for Digital Communications
- Digitally Controlled ADC Encode Generator
- Agile Local Oscillator Applications

GENERAL DESCRIPTION

The AD9850 is a highly integrated device that uses advanced DDS technology coupled with an internal high speed, high performance D/A converter and comparator to form a complete, digitally programmable frequency synthesizer and clock generator function. When referenced to an accurate clock source, the AD9850 generates a spectrally pure, frequency/phase programmable, analog output sine wave. This sine wave can be used directly as a frequency source, or it can be converted to a square wave for agile-clock generator applications. The AD9850's innovative high speed DDS core provides a 32-bit frequency tuning word, which results in an output tuning resolution of 0.0291 Hz for a 125 MHz reference clock input. The AD9850's circuit architecture allows the generation of output frequencies of up to one-half the reference clock frequency (or 62.5 MHz), and the output frequency can be digitally changed (asynchronously) at a rate of up to 23 million new frequencies per second. The device also provides five bits of digitally controlled phase modulation, which enables phase shifting of its output in increments of 180°, 90°, 45°, 22.5°,



11.25°, and any combination thereof. The AD9850 also contains a high speed comparator that can be configured to accept the (externally) filtered output of the DAC to generate a low jitter square wave output. This facilitates the device's use as an agile clock generator function.

The frequency tuning, control, and phase modulation words are loaded into the AD9850 via a parallel byte or serial loading format. The parallel load format consists of five iterative loads of an 8-bit control word (byte). The first byte controls phase modulation, power-down enable, and loading format; Bytes 2 to 5 comprise the 32-bit frequency tuning word. Serial loading is accomplished via a 40-bit serial data stream on a single pin. The AD9850 Complete DDS uses advanced CMOS technology to provide this breakthrough level of functionality and performance on just 155 mW of power dissipation (3.3 V supply).

The AD9850 is available in a space-saving 28-lead SSOP, surface-mount package. It is specified to operate over the extended industrial temperature range of -40°C to +85°C.

REV. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781/329-4700 www.analog.com
Fax: 781/326-8703 © 2004 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Anexo 5

MUESTRA 1	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.27	0.35	0.42	0.50	0.58	0.64	0.74	0.82	0.85	0.96	1.06	1.14	1.26	1.48	1.64	2.04	3.36	1.42	0.84
	Φ(uS)	470.00	360.00	290.00	240.00	210.00	170.00	160.00	140.00	136.00	124.00	108.00	100.00	92.00	88.00	80.00	72.00	24.00	24.00	0.00
	Φ(grados)	84.60	84.24	83.52	82.08	83.16	76.50	80.64	78.12	83.23	82.58	77.76	77.40	76.18	77.62	74.88	71.28	25.06	26.35	0.00
MUESTRA 2	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.25	0.32	0.39	0.45	0.51	0.59	0.64	0.74	0.79	0.90	1.00	1.08	1.18	1.44	1.80	2.32	0.80	0.82	1.42
	Φ(uS)	520.00	360.00	290.00	260.00	210.00	190.00	170.00	150.00	140.00	128.00	120.00	112.00	100.00	92.00	84.00	20.00	4.00	52.00	24.00
	Φ(grados)	93.60	84.24	83.52	88.92	83.16	85.50	85.68	83.70	85.68	85.25	86.40	86.69	82.80	81.14	78.62	19.80	4.18	57.10	27.65
MUESTRA 3	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.26	0.33	0.39	0.46	0.54	0.61	0.67	0.74	0.82	0.94	1.04	1.14	1.22	1.36	1.50	1.80	2.28	3.80	3.52
	Φ(uS)	490.00	380.00	300.00	260.00	220.00	188.00	164.00	148.00	132.00	120.00	112.00	104.00	96.00	92.00	84.00	80.00	72.00	56.00	-32.00
	Φ(grados)	88.20	88.92	86.40	88.92	87.12	84.60	82.66	82.58	80.78	79.92	80.64	80.50	79.49	81.14	78.62	79.20	75.17	61.49	-36.86
MUESTRA 4	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.27	0.35	0.41	0.49	0.56	0.65	0.78	0.81	0.85	0.98	1.08	1.16	1.28	1.46	1.66	1.98	3.16	1.36	0.88
	Φ(uS)	470.00	360.00	290.00	248.00	216.00	180.00	164.00	140.00	136.00	124.00	108.00	100.00	92.00	96.00	90.00	72.00	8.00	24.00	0.00
	Φ(grados)	84.60	84.24	83.52	84.82	85.54	81.00	82.66	78.12	83.23	82.58	77.76	77.40	76.18	84.67	84.24	71.28	8.35	26.35	0.00
MUESTRA 5	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.28	0.37	0.43	0.50	0.57	0.70	0.80	0.89	0.94	1.00	1.20	1.28	1.40	1.60	1.76	2.08	2.76	1.30	1.34
	Φ(uS)	470.00	360.00	280.00	240.00	208.00	184.00	164.00	148.00	136.00	130.00	120.00	104.00	96.00	96.00	88.00	76.00	-16.00	8.00	0.00
	Φ(grados)	84.60	84.24	80.64	82.08	82.37	82.80	82.66	82.58	83.23	86.58	86.40	80.50	79.49	84.67	82.37	75.24	-16.70	8.78	0.00
MUESTRA 6	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.27	0.34	0.42	0.50	0.60	0.66	0.74	0.82	0.92	0.98	1.10	1.18	1.36	1.52	1.60	1.84	2.32	3.06	3.36
	Φ(uS)	440.00	360.00	300.00	240.00	220.00	190.00	160.00	156.00	136.00	128.00	112.00	104.00	104.00	96.00	84.00	80.00	72.00	48.00	-32.00
	Φ(grados)	79.20	84.24	86.40	82.08	87.12	85.50	80.64	87.05	83.23	85.25	80.64	80.50	86.11	84.67	78.62	79.20	75.17	52.70	-36.86
MUESTRA 7	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.28	0.35	0.42	0.49	0.57	0.65	0.76	0.82	0.90	1.02	1.10	1.18	1.30	1.44	1.64	2.00	2.28	1.36	0.92
	Φ(uS)	440.00	360.00	280.00	260.00	220.00	180.00	170.00	150.00	120.00	110.00	100.00	108.00	100.00	92.00	88.00	76.00	52.00	-16.00	4.00
	Φ(grados)	79.20	84.24	80.64	88.92	87.12	81.00	85.68	83.70	73.44	73.26	72.00	83.59	82.80	81.14	82.37	75.24	54.29	-17.57	4.61
MUESTRA 8	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.26	0.32	0.41	0.48	0.55	0.63	0.70	0.82	0.90	0.98	1.08	1.18	1.28	1.34	1.44	1.48	1.52	1.52	1.60
	Φ(uS)	460.00	360.00	290.00	240.00	210.00	180.00	170.00	150.00	140.00	120.00	108.00	100.00	96.00	84.00	80.00	72.00	68.00	60.00	48.00
	Φ(grados)	82.80	84.24	83.52	82.08	83.16	81.00	85.68	83.70	85.68	79.92	77.76	77.40	79.49	74.09	74.88	71.28	70.99	65.88	55.30
MUESTRA 9	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.27	0.34	0.42	0.50	0.57	0.63	0.71	0.79	0.86	0.98	1.08	1.16	1.30	1.48	1.84	2.20	1.50	0.66	0.63
	Φ(uS)	470.00	340.00	280.00	248.00	216.00	180.00	164.00	148.00	136.00	128.00	116.00	104.00	92.00	88.00	72.00	52.00	60.00	32.00	40.00
	Φ(grados)	84.60	79.56	80.64	84.82	85.54	81.00	82.66	82.58	83.23	85.25	83.52	80.50	76.18	77.62	67.39	51.48	62.64	35.14	46.08
MUESTRA 10	F(Khz)	0.50	0.65	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40	1.55	1.70	1.85	2.00	2.15	2.30	2.45	2.60	2.75	2.90	3.05	3.20
	Vp-p (V)	0.26	0.34	0.40	0.46	0.58	0.26	0.70	0.80	0.88	0.94	1.04	1.10	1.22	1.34	1.48	1.88	2.52	1.42	1.32
	Φ(uS)	470.00	350.00	280.00	230.00	212.00	184.00	164.00	148.00	136.00	124.00	116.00	112.00	100.00	96.00	90.00	72.00	8.00	32.00	0.00
	Φ(grados)	84.60	81.90	80.64	78.66	83.95	82.80	82.66	82.58	83.23	82.58	83.52	86.69	82.80	84.67	84.24	71.28	8.35	35.14	0.00

Anexo 6



Anexo 7



Anexo 8



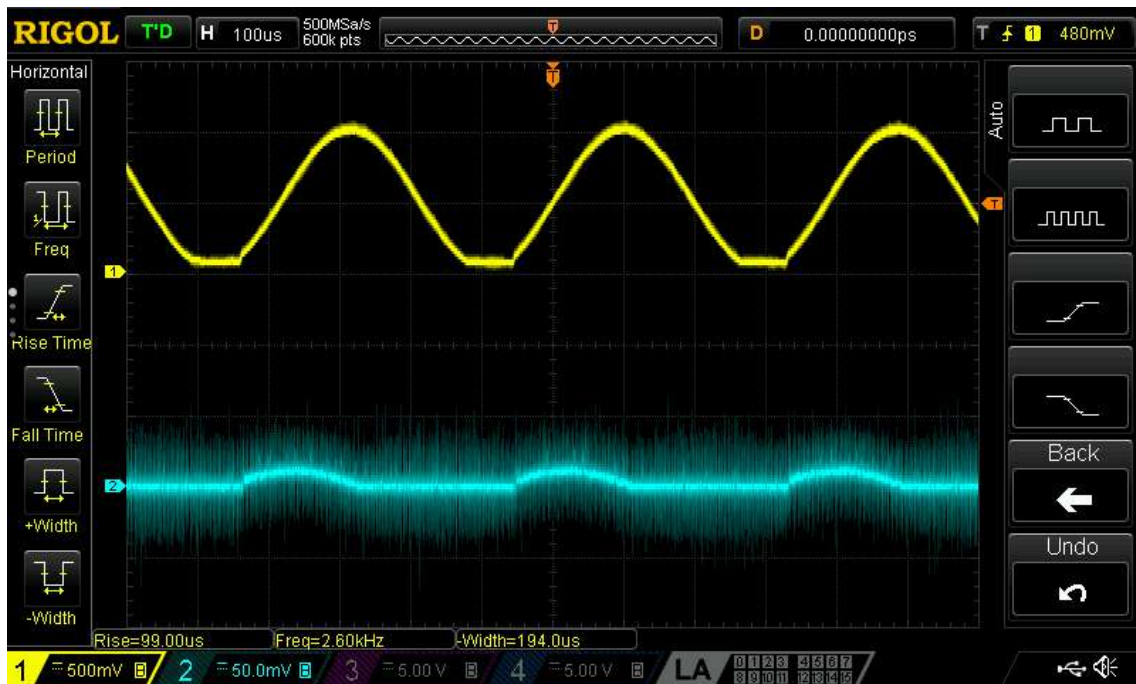
Anexo 9



Anexo 10



Anexo 11



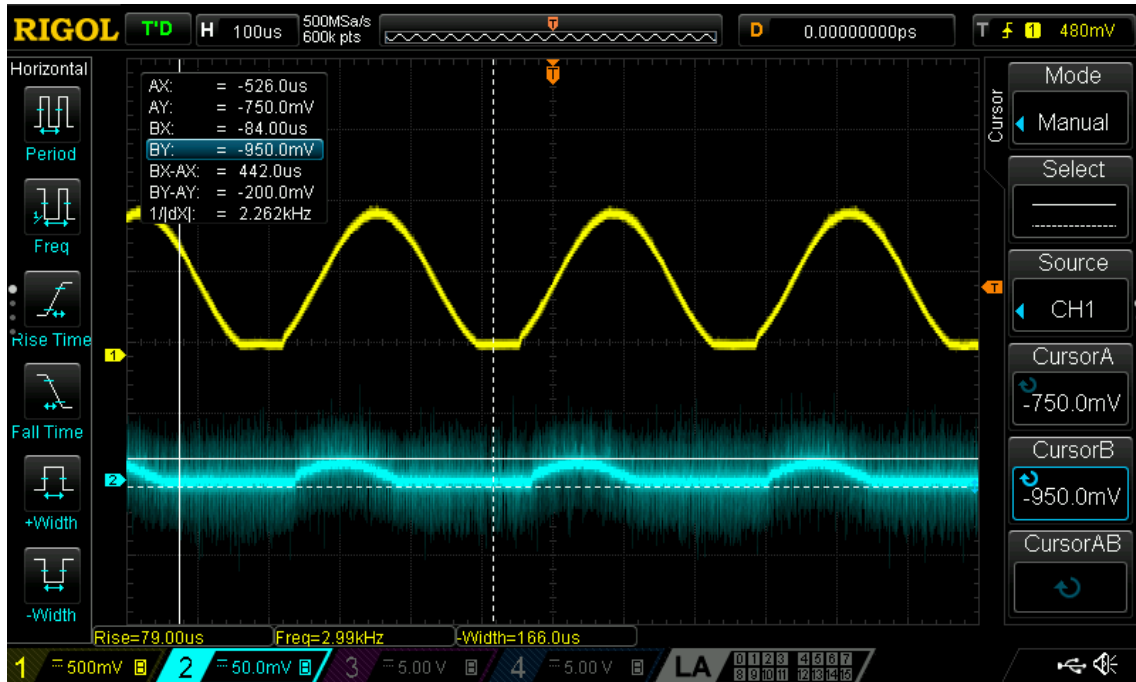
Anexo 12



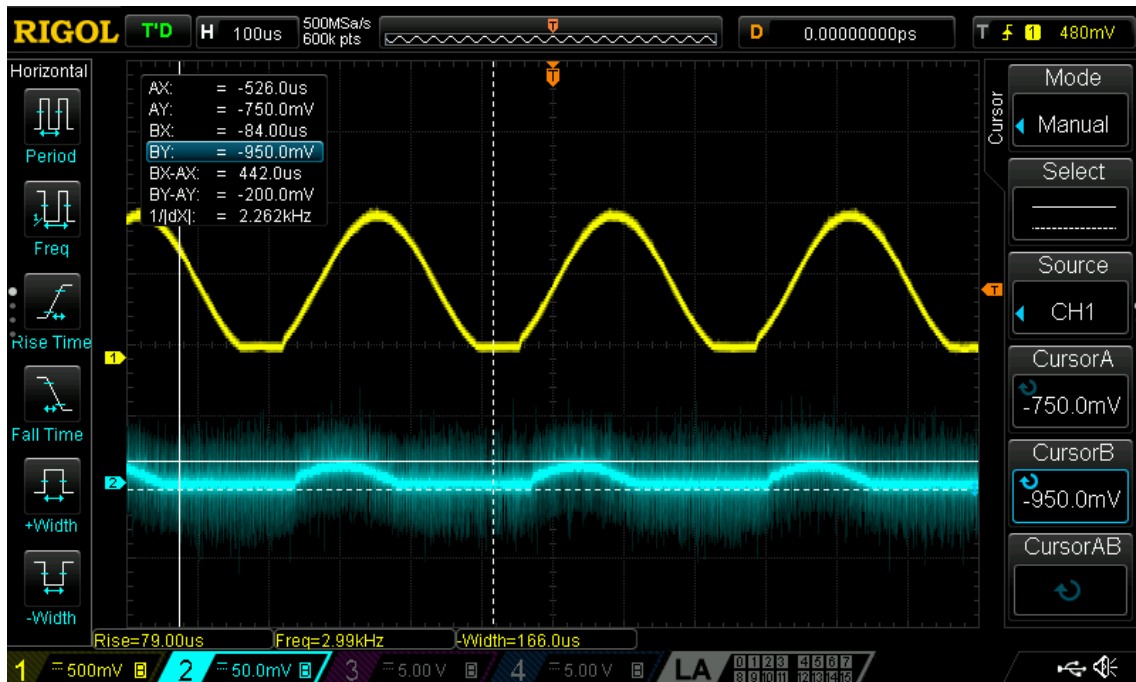
Anexo 13



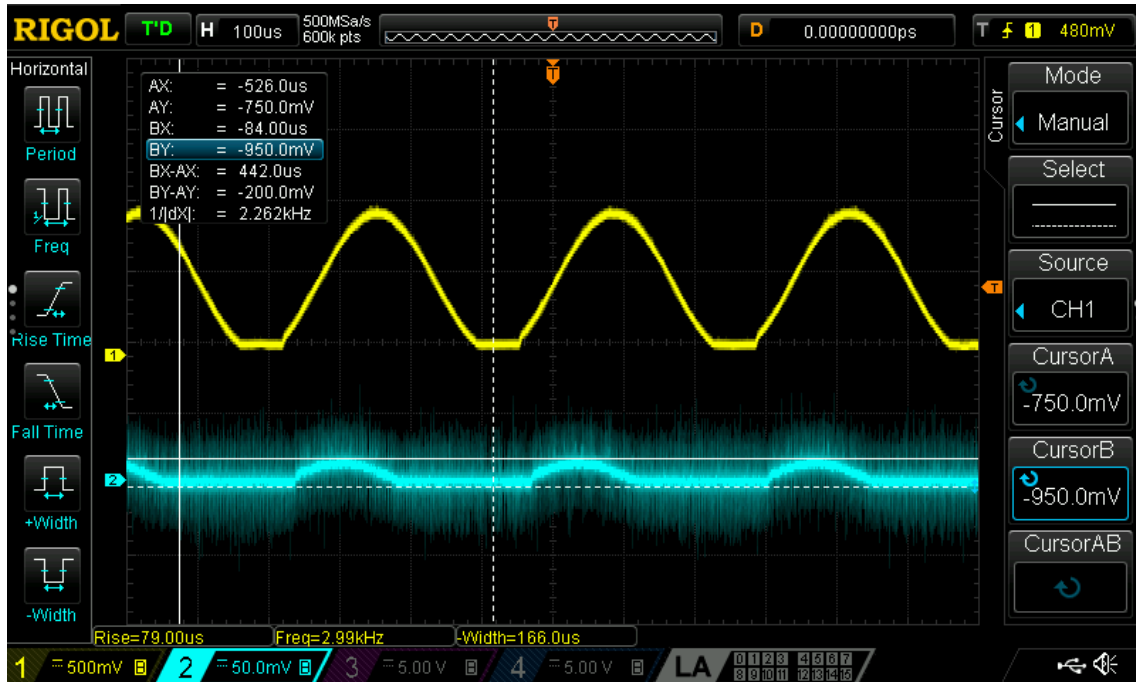
Anexo 14



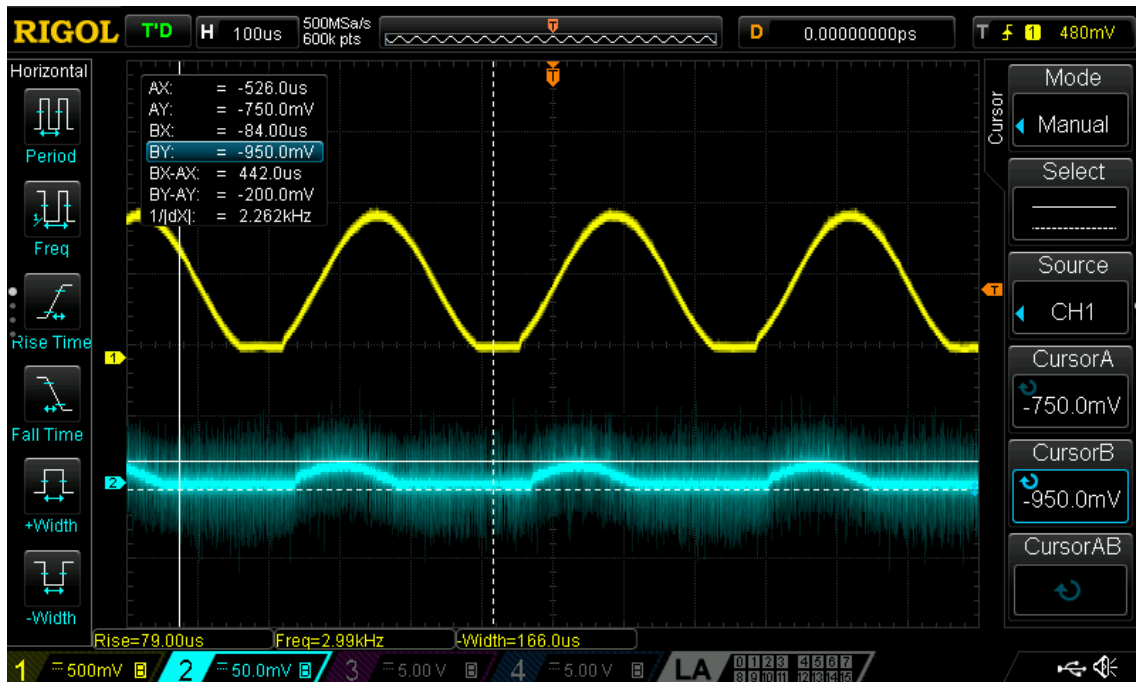
Anexo 15



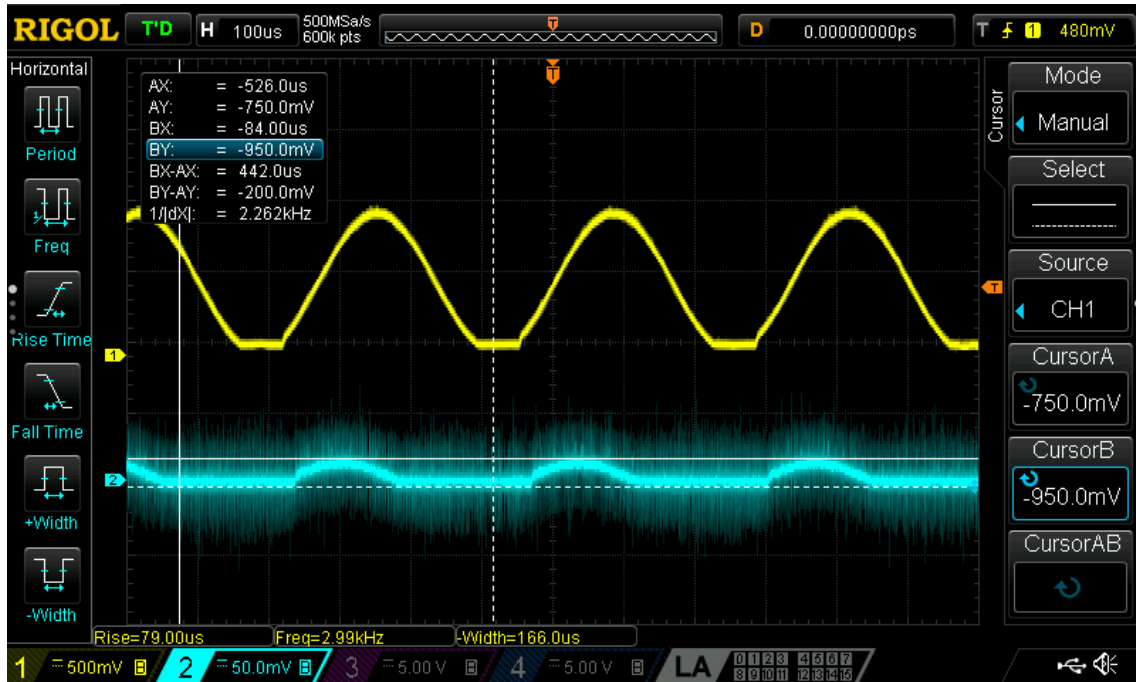
Anexo 16



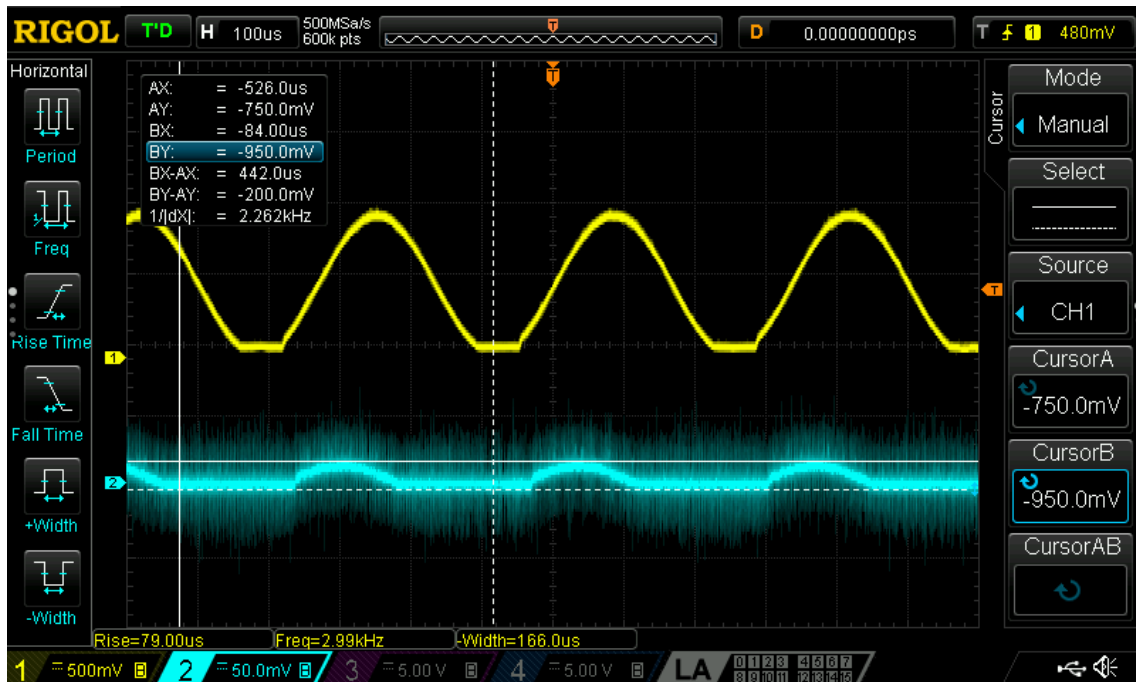
Anexo 17



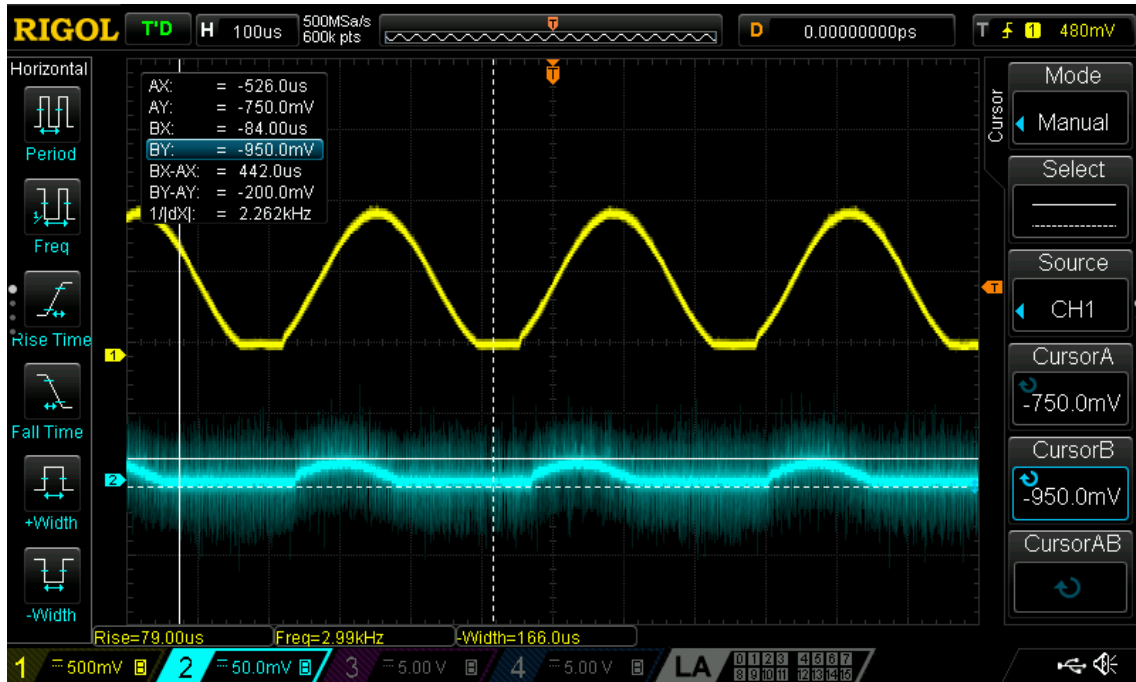
Anexo 18



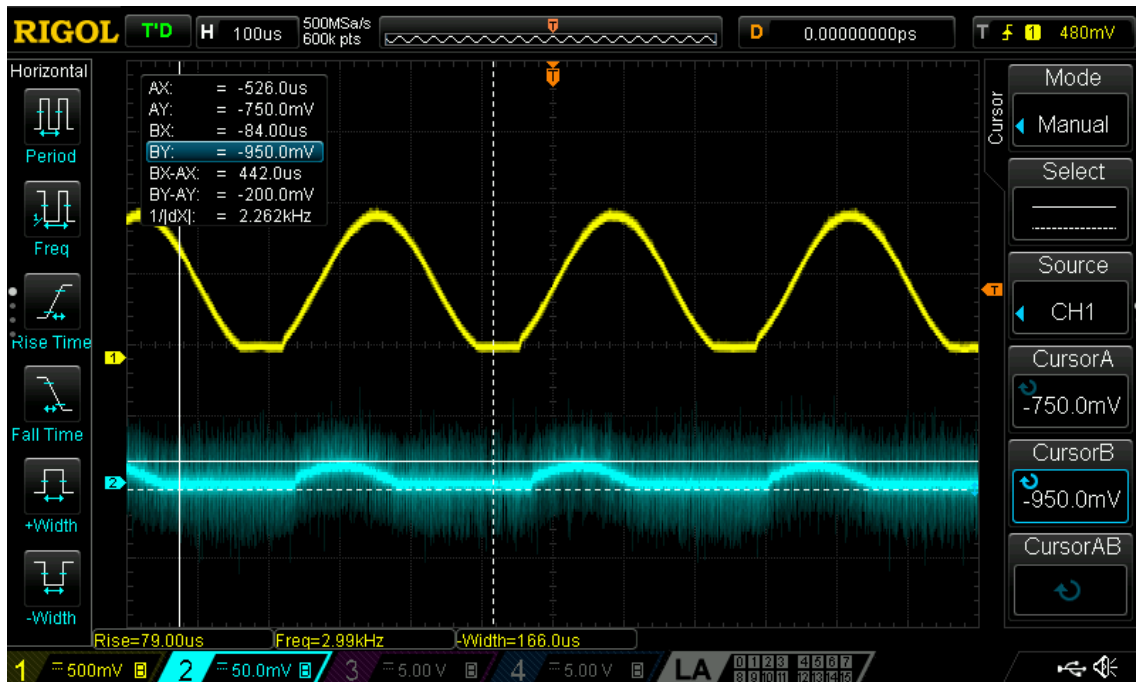
Anexo 19



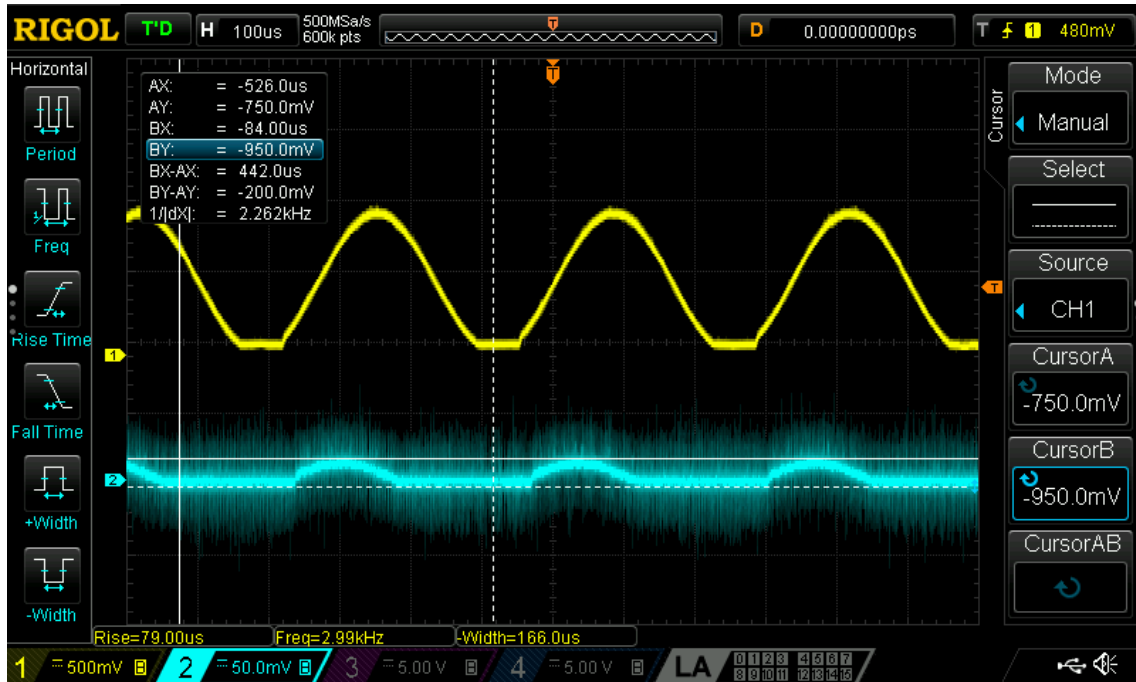
Anexo 20



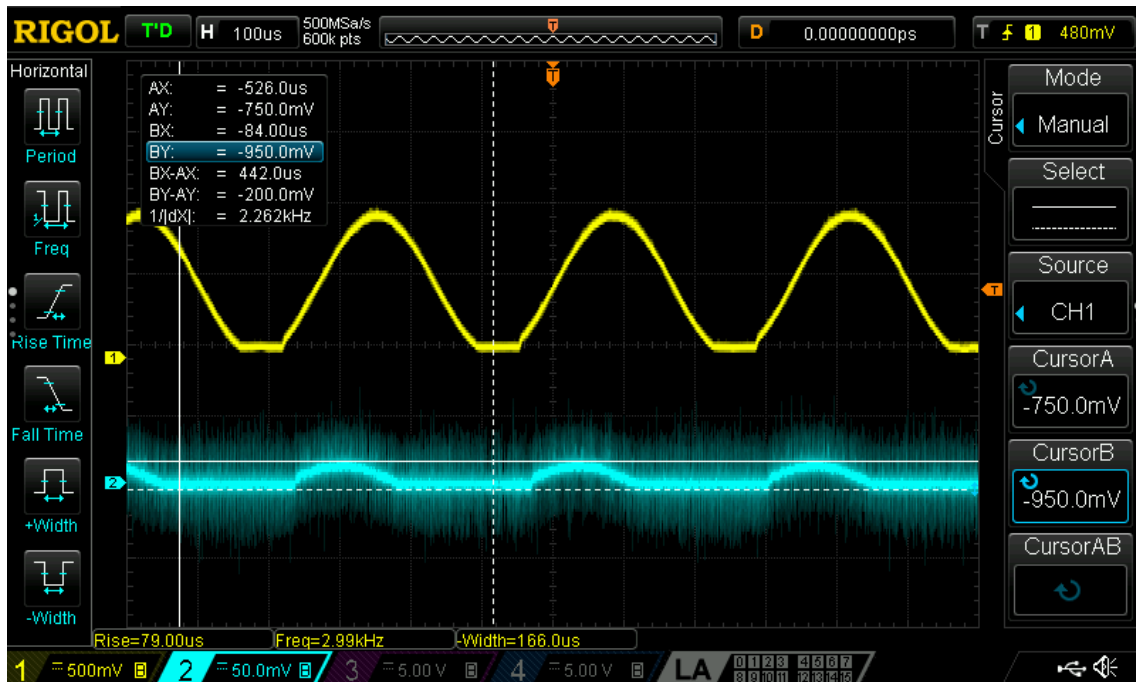
Anexo 21



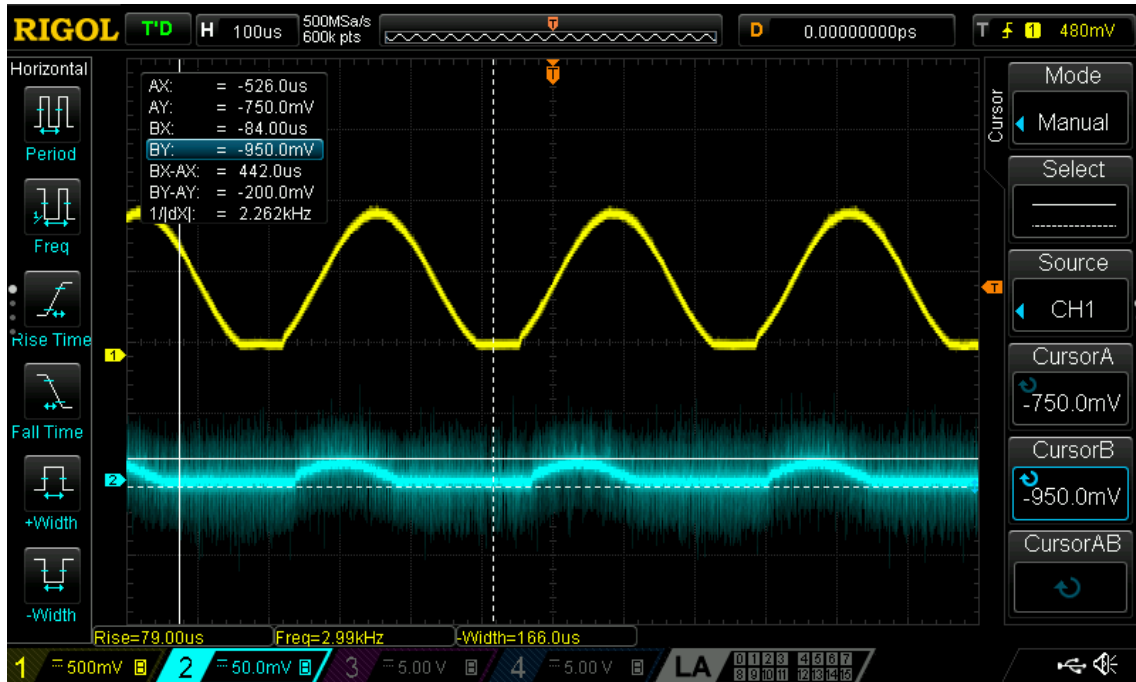
Anexo 22



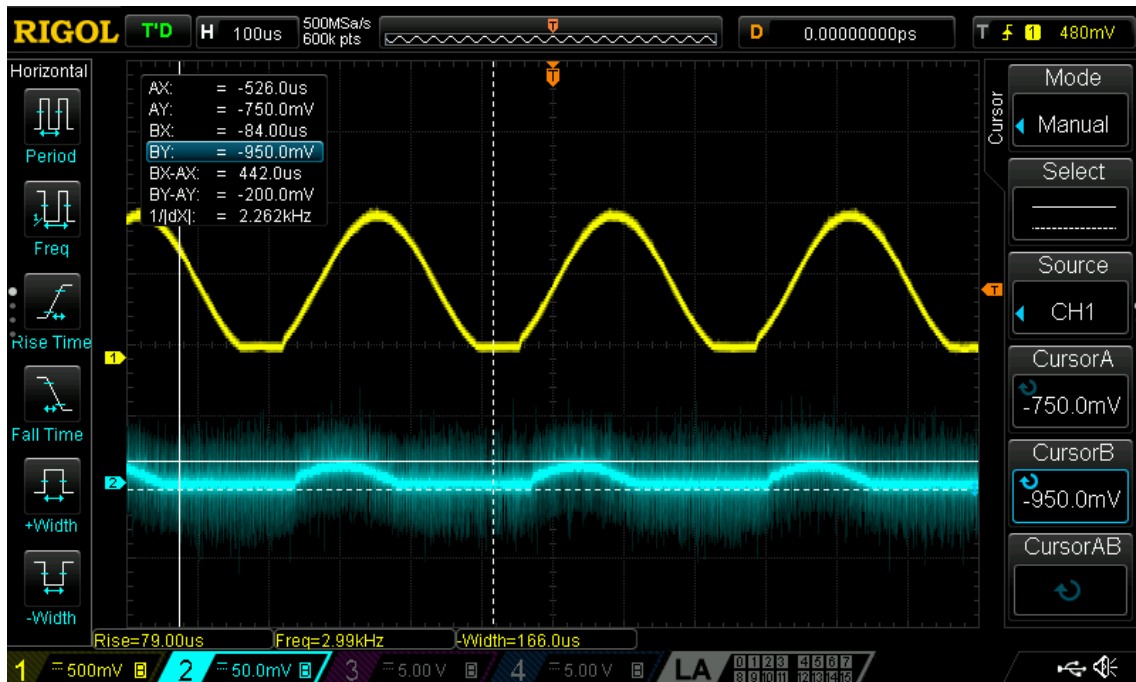
Anexo 23



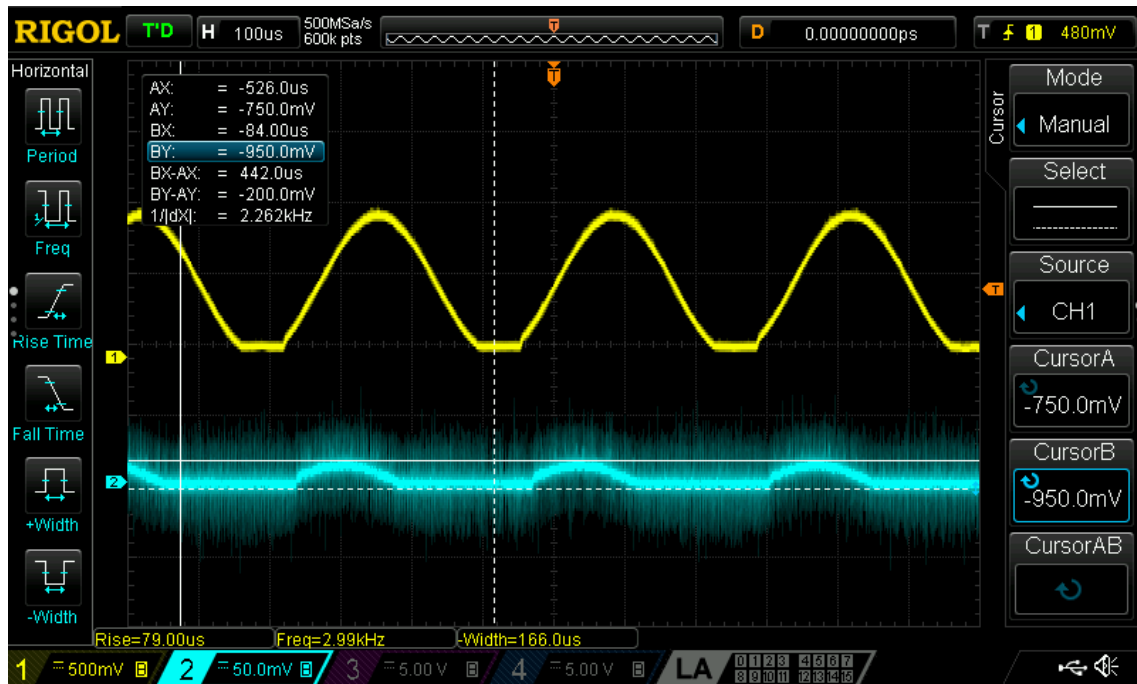
Anexo 24



Anexo 25



Anexo 26



Anexo 27



Anexo 28



Anexo 29



Anexo 30



Anexo 31



Anexo 32



Anexo 33



Anexo 34



Anexo 35



Anexo 36



Anexo 37



Anexo 38



Anexo 39



Anexo 40



Anexo 41



Anexo 42



Anexo 43



Anexo 44



Anexo 45



Anexo 46

