



GENERADOR DE PULSOS DE ALTO VOLTAJE PARA PURIFICACIÓN DE AGUA

DOCENTE:

FREDDY A. IX ANDRADE

EQUIPO:

CARDOS ALVAREZ DANNA C.

CHUC CHUC DENZEL G.

ESTRELLA CANCINO HUGO A.

KANTUN CHIM ANA C.

MEZA EULLOQUI MARCO A.

MATERIA:

PROYECTOS IV

FECHA:

02/06/2025

Introducción

El presente proyecto se enfoca en el diseño, construcción y validación de un Generador de Pulsos de Alto Voltaje para la purificación del agua, basado en la topología **Quadratic Boost Converter Ringing Circuit** (QBCRC), con el propósito de evaluar su desempeño en la generación de pulsos eléctricos de alta intensidad. Aunque se ha seleccionado la purificación de agua como caso de estudio, el enfoque del proyecto es principalmente experimental y académico, sin la intención de resolver un problema específico de purificación de agua, sino más bien de validar la eficiencia eléctrica del sistema y su capacidad para producir pulsos de alto voltaje de manera precisa y controlada.

El sistema propuesto utiliza pulsos eléctricos de alta intensidad para eliminar microorganismos, aprovechando el efecto de campo eléctrico pulsado (PEF) que desestabiliza las membranas celulares, logrando así una desinfección efectiva sin el uso de productos químicos. La topología QBCRC permite generar pulsos de voltaje de hasta 85 V, multiplicando 17 veces el voltaje de entrada, sin necesidad de transformadores ni celdas de multiplicación de voltaje. Esta arquitectura compacta y eficiente reduce los costos de implementación y mantenimiento, haciendo viable su uso en aplicaciones industriales y domésticas.

A través del diseño, implementación y prueba de un prototipo funcional, el proyecto busca comprobar la eficiencia eléctrica del generador y analizar su capacidad para operar en modos de conducción continua (CCM) y discontinua (DCM), evaluando su rendimiento en diferentes condiciones de laboratorio. Este documento detalla las especificaciones técnicas del generador, las alternativas de diseño consideradas y las características deseadas para la solución final. Asimismo, se definen los objetivos y alcances del proyecto, enmarcados dentro de un contexto académico orientado al aprendizaje y validación experimental, asegurando un desarrollo estructurado y eficiente que permita validar la eficacia del sistema y su potencial escalabilidad en futuras aplicaciones comerciales.

PC2 – Especificaciones

1. Especificaciones y características de la solución

El **Generador de Pulsos de Alto Voltaje** se diseñará para cumplir con las siguientes especificaciones:

- **Voltaje de salida:** Hasta 85 V, logrando 17 veces el voltaje de entrada.
- **Modos de operación:**
 - **Conducción Continua (CCM):** Salida de voltaje estable.
 - **Conducción Discontinua (DCM):** Pulsos de alto voltaje para desinfección efectiva.
- **Componentes clave:**
 - Inductores, capacitores, interruptores MOSFET, diodos ideales y resistencias de carga.
- **Eficiencia:** Alto rendimiento con mínima pérdida de energía.
- **Costo:** Diseño rentable al no requerir transformadores ni celdas de multiplicación de voltaje.

2. Definición de opciones de solución

1. **Opción 1: Quadratic Boost Converter Ringing Circuit (QBCRC)**
 - Descripción: Utiliza un diseño sin transformadores, generando pulsos precisos con alta eficiencia.
 - Ventajas: Compacto, económico y eficiente.
 - Desventajas: Requiere un control preciso de MOSFETs y componentes de alta calidad.
2. **Opción 2: Convertidor Boost Convencional** ◦ Descripción: Utiliza un transformador para aumentar el voltaje de salida.
 - Ventajas: Diseño conocido y ampliamente utilizado.
 - Desventajas: Mayor costo y tamaño debido al uso de transformadores.
3. **Opción 3: Multiplicador de Voltaje con Celdas de Cockcroft-Walton**
 - Descripción: Utiliza diodos y capacitores en cascada para generar alto voltaje.

- Ventajas: Alta capacidad de voltaje.
- Desventajas: Complejidad en el diseño y baja eficiencia energética.

3. Análisis cualitativo de las alternativas

Criterio	Opción 1: QBCRC	Opción 2: Boost Convencional	Opción 3: Multiplicador de Voltaje
Costo	Bajo	Alto	Medio
	Alta	Media	Baja
Eficiencia	Media	Baja	Alta
	Compacto	Grande	Medio
Complejidad	Media	Baja	Alta
	Compacto	Grande	Medio
Tamaño	Media	Alta	Baja
	Compacto	Grande	Medio
Facilidad de Control	Media	Alta	Baja
	Compacto	Grande	Medio
Aplicabilidad	Tratamiento de agua, alimentos	General	Aplicaciones de muy alto voltaje
	General	General	Aplicaciones de muy alto voltaje

Conclusión:

Se selecciona la **Opción 1: Quadratic Boost Converter Ringing Circuit (QBCRC)** por ser la solución más compacta, eficiente y económica, adecuada para generar pulsos precisos sin necesidad de transformadores.

4. Características deseadas de la solución final

- **Compacto y Modular:** Para facilitar la integración en sistemas industriales o domésticos.
- **Alta eficiencia energética:** Para minimizar las pérdidas de energía durante la generación de pulsos.
- **Operación en CCM y DCM:** Garantizando tanto voltaje estable como pulsos de alta intensidad para diferentes aplicaciones.

- **Versatilidad de uso:** En purificación de agua, procesamiento de alimentos y sistemas de recirculación de agua.
- **Rentable:** Utilizando componentes de bajo costo sin sacrificar eficiencia.

5. Objetivos y alcances del proyecto

- **Objetivo General:**
Validar el diseño, construcción e implementación de un **Generador de Pulsos de Alto Voltaje** para la purificación de agua, operando en modos de **Conducción Continua (CCM)** y **Conducción Discontinua (DCM)**, optimizando la eliminación de microorganismos y contaminantes.
- **Objetivos Específicos:**
 1. **Diseñar** un circuito generador de pulsos de alto voltaje basado en la topología **Quadratic Boost Converter Ringing Circuit (QBCRC)**.
 2. **Implementar** un prototipo funcional y evaluar su desempeño eléctrico.
 3. **Realizar pruebas experimentales** con muestras de agua para validar la eficiencia en la eliminación de microorganismos.
 4. **Analizar la viabilidad** de escalabilidad del sistema para aplicaciones industriales o domésticas.
- **Alcances:**
 - Construcción de un prototipo funcional operando en CCM y DCM. ○ Pruebas en laboratorio con diferentes muestras de agua para comprobar la eficiencia en la eliminación de contaminantes. ○ Evaluación del rendimiento energético y la estabilidad de los pulsos generados.
 - Análisis de costos y escalabilidad para futuras aplicaciones comerciales.
- **Limitaciones:**

- Pruebas limitadas a muestras de laboratorio, sin implementación en plantas de tratamiento a gran escala.
- Dependencia de componentes electrónicos de alta calidad para garantizar precisión en la generación de pulsos.

PC3 – Circuitos Propuestos

Círcuito 1:

En el siguiente circuito se propone un elevador de voltaje (boost converter) basado en un inductor y un MOSFET para generar los pulsos eléctricos necesarios para la electroporación. Su función principal es tomar una fuente de 12V y elevar el voltaje a niveles adecuados (85V - 100V) para aplicar impulsos de alto voltaje a los electrodos sumergidos en el agua, permitiendo la desestabilización de las membranas celulares de microorganismos para su eliminación.

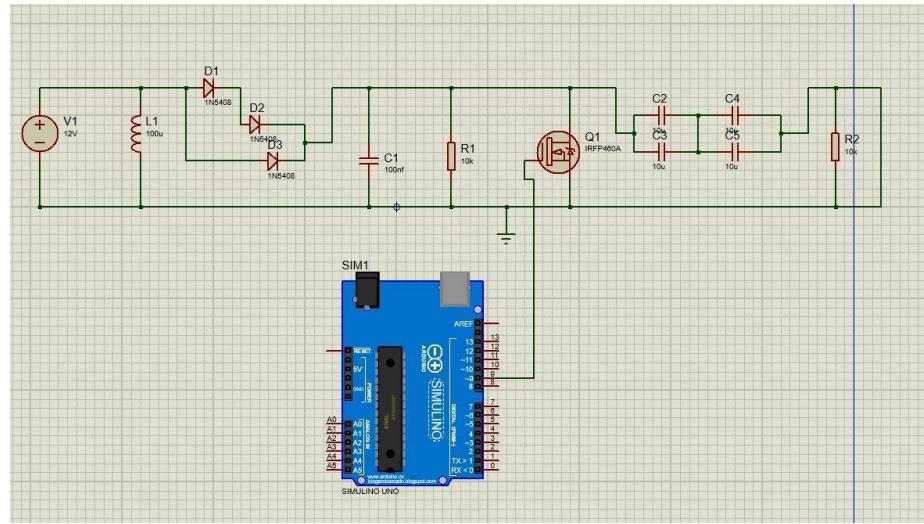


Imagen 1. Circuito 1 Propuesto

El funcionamiento del circuito consta de 4 etapas las cuales son:

1. Etapa de Almacenamiento de Energía (Inductor) Componentes

clave:

- Inductor (L1, 100 μ H)
- MOSFET (Q1, IRFP460A)
- Fuente de 12V (V1) Proceso:
 - Cuando el MOSFET Q1 se activa (conduce corriente), la corriente de la fuente de 12V circula por el inductor L1, almacenando energía en forma de campo magnético.
 - El inductor evita cambios bruscos de corriente, acumulando energía progresivamente.
 - Durante este periodo, el voltaje en el nodo de salida disminuye, ya que el inductor no libera energía.

2. Etapa de Elevación de Voltaje (Diodos y Conmutación)

Componentes clave:

- Diodos de alta corriente (D1, D2, D3 - 1N5408)
- MOSFET (Q1, IRFP460A)
- PWM desde Arduino

Proceso:

- Cuando el MOSFET se apaga, el inductor trata de mantener la corriente, generando un voltaje mayor al de la fuente de alimentación.
- Esta diferencia de potencial impulsa la corriente a través de los diodos, cargando los capacitores de almacenamiento y elevando la tensión en la salida.
- Dependiendo del ciclo de trabajo del PWM (Duty Cycle) aplicado al MOSFET, el voltaje de salida se ajusta entre 85V y 100V.

3. Etapa de Filtrado y Almacenamiento (Capacitores)

Componentes clave:

- Capacitores de filtrado (C2, C3, C4 - 10 μ F cada uno) Proceso:
 - La tensión elevada es almacenada en los capacitores C2, C3 y C4, los cuales eliminan los transitorios y estabilizan el voltaje.
 - La carga acumulada en los capacitores es liberada cuando se requiere un pulso eléctrico en los electrodos.

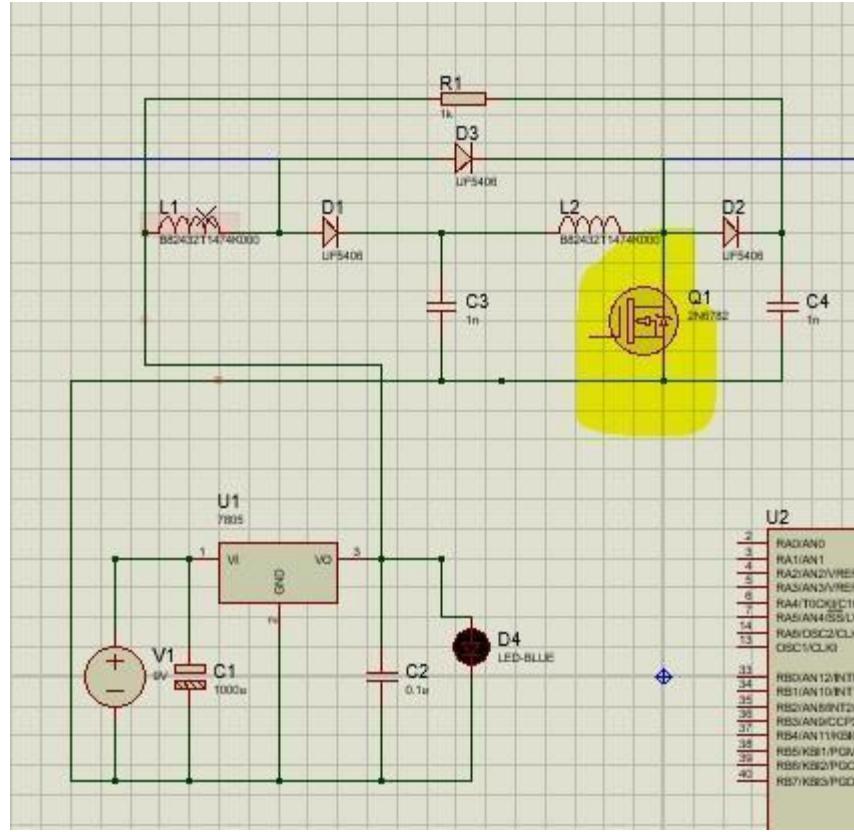
4. Etapa de Aplicación del Pulso a los Electrodos Componentes

clave:

- Resistencia de carga (R_2 , 10 k Ω)
- Electrodos sumergidos en el agua Proceso:
 - El voltaje almacenado en los capacitores se descarga sobre la resistencia R_2 , simulando los electrodos en el agua.
 - Si los electrodos están conectados, los pulsos eléctricos se aplican al agua, creando campos eléctricos que perforan las membranas celulares de microorganismos.

Círcito 2:

Para el siguiente circuito, se decidió replicar parcialmente el diseño propuesto en el libro con el objetivo de analizar y validar su funcionamiento. Este diseño sugiere un voltaje de entrada de 5V y una salida aproximada de 85V, empleando el sistema QBCRC para mejorar la eficiencia en la conversión de energía. A través de esta implementación, se busca evaluar su estabilidad, desempeño y posibles optimizaciones para su futura integración en el proceso de electroporación dentro del proyecto de purificación de agua.



Su funcionamiento se divide de la siguiente manera:

1. Regulación de voltaje inicial (U1 - 7805)

- La fuente de alimentación (V1) proporciona energía al circuito.
- El regulador 7805 (U1) se encarga de estabilizar la tensión en 5V para alimentar la etapa de control del circuito.
- Los condensadores C1 (1000 μ F) y C2 (0.1 μ F) ayudan a reducir el ruido y estabilizar la tensión de salida del regulador.

2. Etapa de conversión boost (QBCRC)

- Inductores (L1, L2) y diodos (D1, D2, D3) forman parte del sistema de almacenamiento y transferencia de energía.
- El transistor MOSFET Q1 (2N652), resaltado en amarillo, actúa como un interruptor de alta frecuencia, controlando la energía almacenada en los inductores.
- R1 (1k Ω) limita la corriente en el circuito de control.
- C3 y C4 (1nF) son condensadores de desacoplo que ayudan a estabilizar la conmutación.

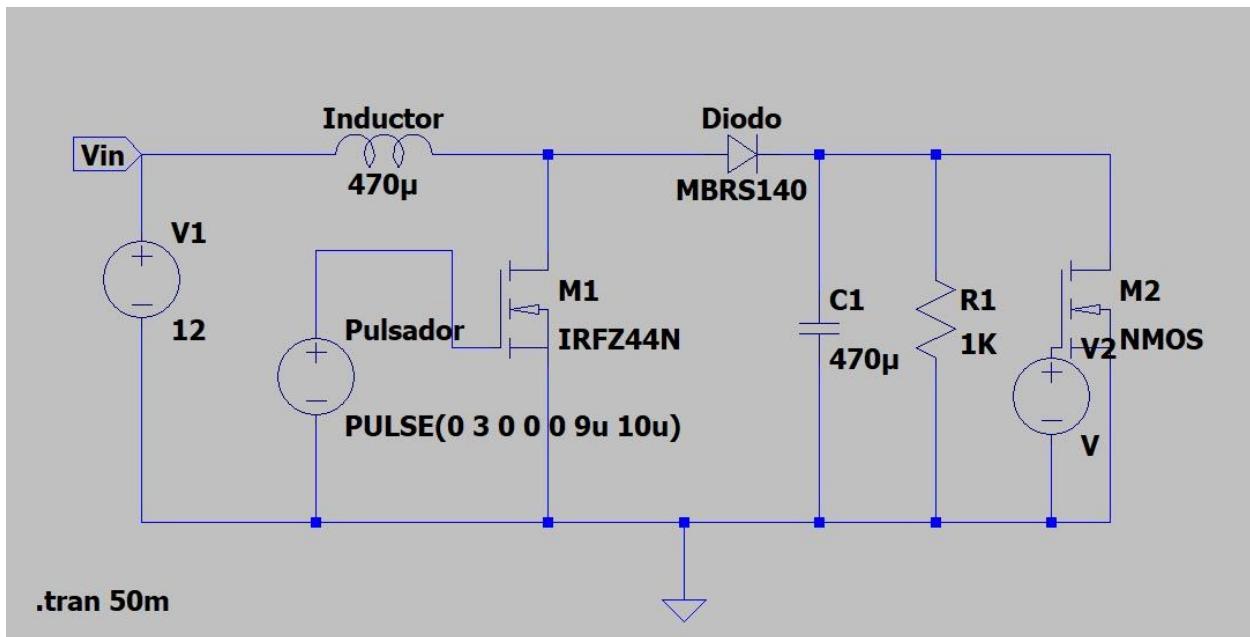
3. Funcionamiento general

- Cuando Q1 conduce, la corriente fluye a través de L1, almacenando energía en el campo magnético.
- Cuando Q1 se apaga, la energía acumulada en L1 se transfiere a L2 y a la salida a través de los diodos.
- Este proceso repetitivo eleva el voltaje de salida de manera eficiente, alcanzando los 85V esperados.
- La conmutación controlada del MOSFET permite ajustar la eficiencia y estabilidad del convertidor.

Este diseño es fundamental para generar los pulsos de alto voltaje necesarios en el proceso de electroporación para purificación de agua. Al validar su funcionamiento, se podrá determinar su eficiencia y adaptabilidad dentro del sistema de tratamiento.

Circuito 3:

El circuito en la imagen representa un **convertidor reductor (buck)**, un tipo de regulador de conmutación que convierte un voltaje de entrada más alto a un voltaje de salida más bajo con alta eficiencia. A continuación, te explico cómo funciona este circuito:



Componentes principales y sus funciones:

V1 (Fuente de voltaje de entrada):

Proporciona un voltaje constante de 12 V.

Inductor (470 μ H):

Almacena energía en forma de campo magnético durante el ciclo de encendido del interruptor y la entrega durante el ciclo de apagado.

M1 (IRFZ44N, MOSFET de canal N):

Actúa como un interruptor controlado para alternar entre los estados de carga y descarga del inductor.

Diodo (MBRS140):

Permite el flujo de corriente cuando el MOSFET está apagado, asegurando una trayectoria continua para la corriente del inductor.

C1 (Capacitor de 470 μ F):

Filtra las oscilaciones en la salida y mantiene un voltaje constante.

R1 (1 k Ω):

Carga resistiva que representa la carga del sistema.

M2 (NMOS) y FV2:

Parte adicional del circuito. Posiblemente monitorea o controla el comportamiento del sistema (necesita contexto adicional para especificar su propósito).

Funcionamiento básico:

Ciclo de encendido (MOSFET M1 en ON):

Cuando el MOSFET M1 está encendido (controlado por la señal de "PULSE"), el inductor se conecta directamente a la fuente de entrada (V1).

La corriente fluye a través del inductor y la energía se almacena en su campo magnético.

Durante este periodo, el diodo está polarizado inversamente y no conduce.

Ciclo de apagado (MOSFET M1 en OFF):

Cuando el MOSFET M1 se apaga, el inductor intenta mantener el flujo de corriente debido a la energía almacenada.

El diodo MBRS140 proporciona un camino para la corriente, y la energía almacenada en el inductor se transfiere al capacitor y a la carga (R1).

Regulación del voltaje:

La señal de "PULSE" controla la razón cíclica (DD, "duty cycle") del MOSFET M1.

Ajustando DD, el circuito regula el voltaje de salida Vout según la fórmula:

$$V_{\text{out}} = D \cdot V_{\text{in}}$$

donde DD es el porcentaje del tiempo que el MOSFET está encendido durante un ciclo completo.

Capacitor (C1):

Suaviza las fluctuaciones del voltaje de salida para proporcionar un voltaje más estable a la carga.

Principios conceptuales:

Almacenamiento de energía en el inductor:

El inductor acumula energía cuando el MOSFET está encendido y la libera cuando el MOSFET está apagado, asegurando un flujo continuo de corriente.

Commutación:

El MOSFET opera a alta frecuencia (determinada por la señal de "PULSE") para minimizar pérdidas y mantener alta eficiencia.

Filtrado:

El capacitor elimina el rizado (ripple) de la señal de salida, proporcionando un voltaje estable.

Prototipo De Armado Y Emsamblado

Para el sistema que alojará el circuito de potencia, se ha optado por una caja de MDF. Este material no solo sirve como aislante para proteger a los individuos de la exposición al alto voltaje con el que se trabaja, sino que también permite una adecuada ventilación gracias a las rejillas que facilitan la transpiración del aire, evitando el sobrecalentamiento del sistema.

Además, el MDF actúa como un eficaz aislante para prevenir posibles cortos circuitos desde el exterior.

Los cables conectados a los electrodos estarán revestidos con tubos aislantes para garantizar la seguridad en todo momento. Se ha propuesto que los electrodos sean fabricados en acero inoxidable o en carbono, ya que ofrecen una combinación óptima de eficiencia y costo accesible.

Para el recipiente que contendrá el agua durante el tratamiento, se ha seleccionado un envase de vidrio borosilicato, ya que este material posee excelentes propiedades aislantes frente al voltaje aplicado, así como una alta resistencia térmica y dieléctrica. Esto garantiza la seguridad del proceso y permite realizar investigaciones precisas sobre los cambios en las propiedades del agua durante la electroporación.

El proyecto se llevará a cabo en un laboratorio especializado, lo que proporcionará un ambiente controlado para el análisis detallado de los datos obtenidos durante los ensayos.

Prototipo de Armado y Ensamblado

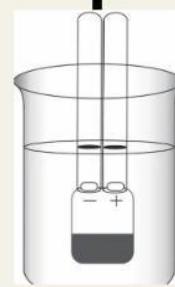
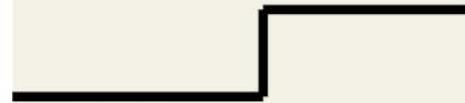
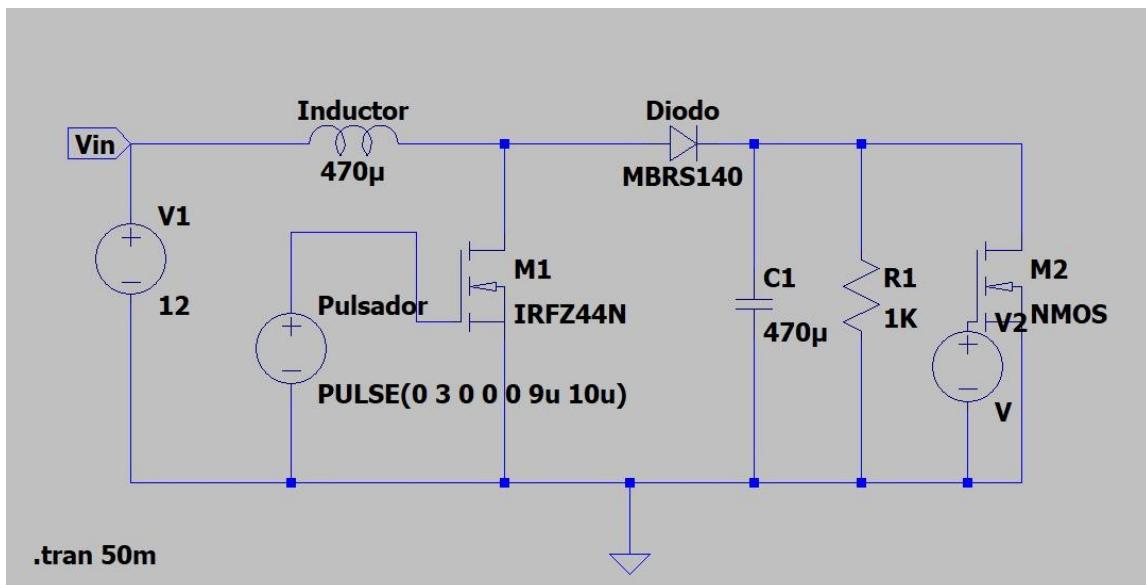


Imagen 3. Prototipo Propuesto

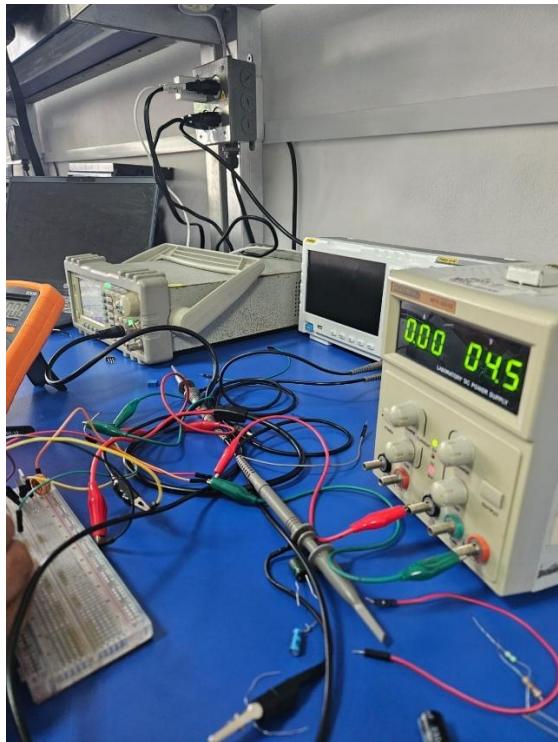
PC5 – Circuito Seleccionado y Simulación

Se opto por usar el circuito 3 propuesto anteriormente dado que al realizar pruebas físicas se logro un voltaje máximo de 48.3v con un voltaje de entrada de 4.5v, estas limitaciones con respecto al voltaje fueron ocasionado por el capacitor el cual tenia un rango máximo de 50v, por ello se opto por usar uno con un voltaje máximo de 130v esperando obtener un voltaje mayor a 100v.

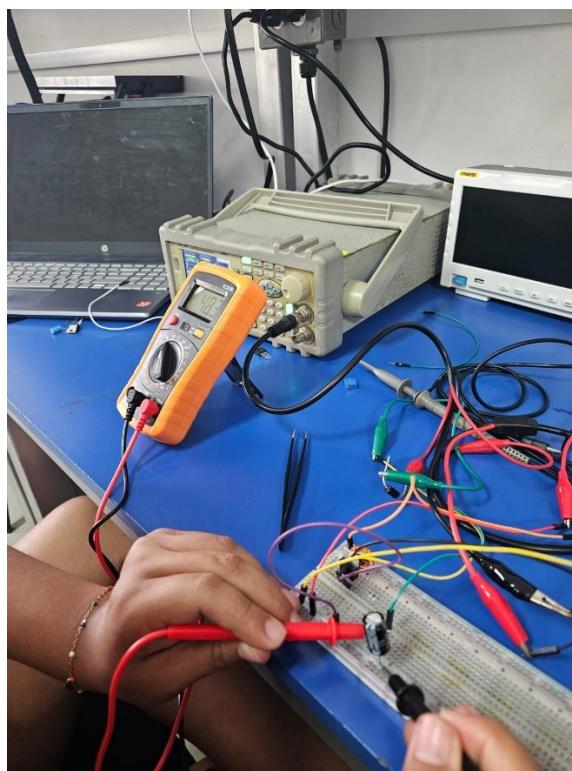


Circuito 3

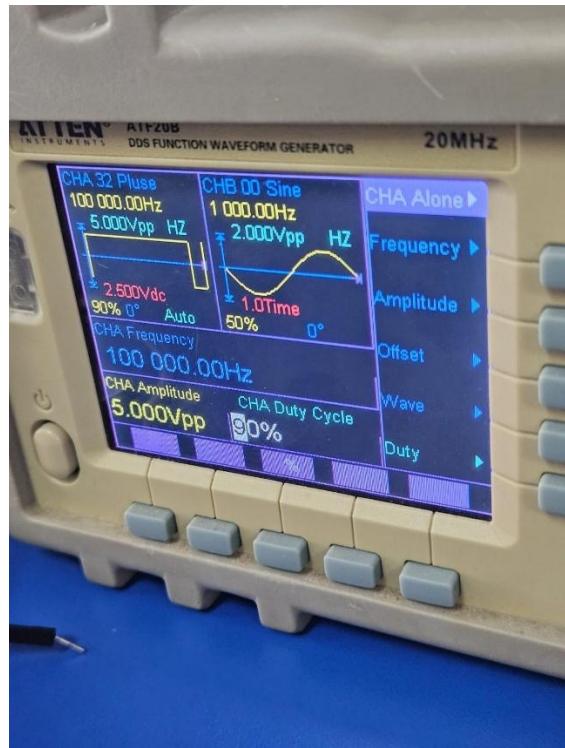
Al realizar el circuito con el capacitor de 50v encontramos estos resultados en el multímetro midiendo el voltaje de salida con una frecuencia de 100 000 Hz



Voltaje de Entrada: 4.5v

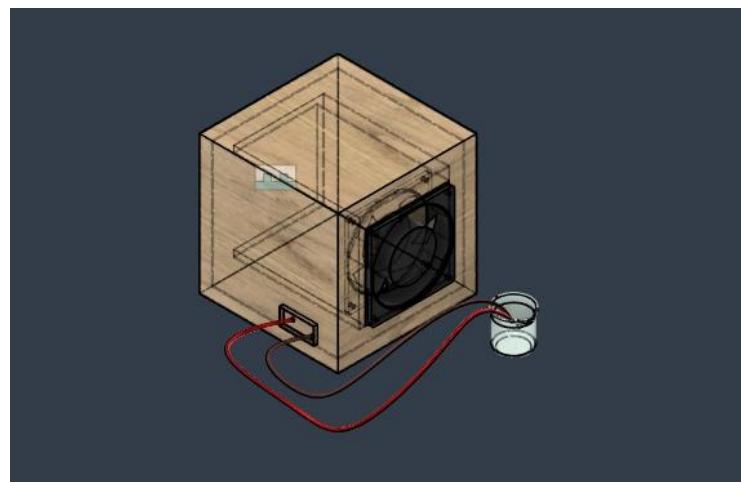


Voltaje de Salida: 48.3v

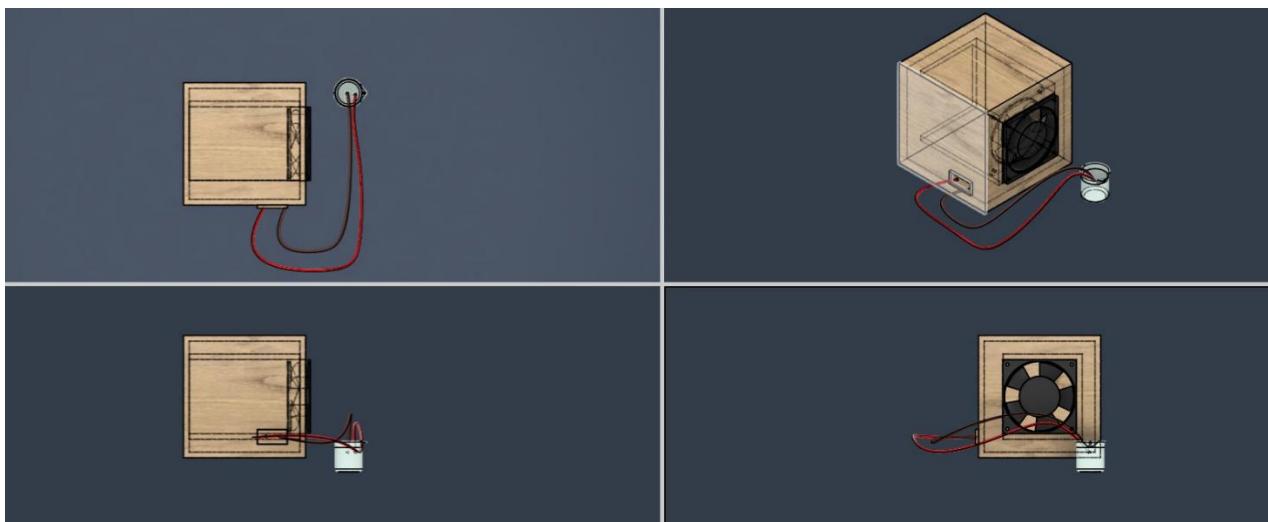


Frecuencia de Pulso: 100 000 Hz

Como parte del diseño donde estará el circuito encontramos lo siguiente:



Diseño CAD 1



Diseño CAD 2

Donde tenemos un sistema de disipación de calor para el no sobrecalentamiento del circuito y las conexiones externas que actuaran como electrodos para el agua.

Conclusión General

El presente proyecto de diseño y validación de un generador de pulsos de alto voltaje para la purificación de agua implicó la superación de diversos retos técnicos e imprevistos, los cuales pusieron a prueba las capacidades de innovación y adaptación del equipo de trabajo. Desde las etapas iniciales, se optó por la implementación de una topología denominada **Quadratic Boost Converter Ringing Circuit (QBCRC)**, elección fundamentada en un análisis exhaustivo de diversas alternativas, considerando criterios como el costo, la eficiencia, la complejidad y la viabilidad práctica del sistema. Esta opción permitió desarrollar un dispositivo compacto, eficiente y rentable, evitando el uso de transformadores voluminosos o multiplicadores de voltaje que suelen incrementar la complejidad de los diseños convencionales.

Durante el desarrollo, surgieron dificultades, principalmente relacionadas con las limitaciones de algunos componentes electrónicos seleccionados. En particular, los capacitores inicialmente utilizados no soportaban los niveles de voltaje requeridos, limitando la salida a 48.3 V, cuando el objetivo era superar los 85 V. Esta situación obligó a replantear parte del diseño, sustituyendo los capacitores por otros de mayor tolerancia (130 V) y realizando las modificaciones necesarias en el ensamblaje del circuito.

Una etapa crucial del proyecto fue la validación experimental en condiciones de laboratorio, la cual permitió evaluar tanto el comportamiento eléctrico del generador como su capacidad efectiva para la desinfección mediante la aplicación de pulsos eléctricos.

Pese a las dificultades técnicas enfrentadas a lo largo del proceso, se logró cumplir con el objetivo académico de diseñar y validar un generador de pulsos de alto voltaje que, además de ser eficiente y seguro, establece una base sólida para su posible escalabilidad y aplicación en entornos industriales y domésticos.