

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN PROCESO FÍSICOQUÍMICO PARA RETARDAR
LA MADURACIÓN DEL MARACUYÁ ALMACENADO**

**JULIÁN LIBARDO GÓMEZ ROJAS
MARCELA DEL PILAR PARRA BARRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS Y FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES Y ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UN PROCESO FÍSICOQUÍMICO PARA RETARDAR
LA MADURACIÓN DEL MARACUYÁ ALMACENADO**

**JULIÁN LIBARDO GÓMEZ ROJAS
MARCELA DEL PILAR PARRA BARRERA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Química e Ingeniero Electrónico**

Director

CARLOS RODRIGO CORREA CELY, Ph.D. Polymer Science And Engineering

Codirector

IVAN MAURICIO AMAYA CONTRERAS, Doctorado En Ingeniería

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS Y FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES Y ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Rodrigo Correa por su valioso apoyo en el proceso de investigación y culminación de esta etapa.

Al Dr. Iván Mauricio Amaya por su acompañamiento y dedicación en la elaboración del proyecto.

A la universidad industrial de Santander por permitirnos ser parte de su gran familia.

A los directivos de las escuelas correspondientes, quienes siempre estuvieron pendientes que lográramos alcanzar nuestras metas.

A los profesores que durante todo nuestro proceso nos guiaron con su conocimiento.

A Dios, por llevarme siempre de su mano guiándome por el mejor camino y enseñándome a levantarme en los tropiezos de la vida.

A mi madre Nidia Barrera Benavides que estuvo para apoyarme, que siempre se aseguró que alcanzara mis objetivos, quien ha sido el pilar de mi vida.

A mi hermana Daniela Méndez Barrera por su compañía por ser la persona que siempre conforta mis preocupaciones.

A Julián Libardo Gómez Rojas quien además de ser mi compañero de proyecto y parte fundamental de este proceso, es la persona que amo por su paciencia, apoyo y entrega incondicional.

A mis abuelos Julio y Leonor de Barrera por asegurarse que fuera
INGENIERA QUÍMICA.

A todos mis amigos que fueron una ayuda y parte importante para lograr finalizar con éxito mi carrera.

A Dios, por mostrarme el camino correcto y darme el valor para superar los obstáculos con perseverancia.

A mi madre Flor María Rojas Torres, por ser el pilar y la inspiración que me dan fuerzas para seguir adelante cada día de mi vida.

A mi padre Segundo Gómez Sierra, por ser un ejemplo de valores, principios y amor incondicional.

A mis hermanos, quienes con su apoyo y paciencia, me impulsaron a lograr esta meta tan anhelada.

A Marcela Del Pilar Parra Barrera, el amor de mi vida, quien me guía y acompaña en todo momento y lugar, incluso en este proyecto.

A Cesar Augusto Salazar Centeno, colega y amigo incondicional, quien me brindó su ayuda para lograr esta meta.

A mis amigos, quienes caminaron junto a mí en esta maravillosa aventura de ser INGENIERO.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. METODOLOGÍA	20
1.1 DISEÑO CONCEPTUAL.....	21
1.1.1 Pruebas analíticas de presencia de etileno.....	21
1.1.2 Tipos de Generadores de ozono.....	21
1.1.2.1 Generador de ozono DBD	21
1.1.2.2 Generador de ozono por radiación ultravioleta (UV).....	22
1.1.2.3 Generador de ozono electroquímico (Cold plasma).....	22
1.1.3 Celda generadora de ozono	23
1.1.4 Gas de alimentación	24
1.1.5 Fuente de alimentación	25
1.1.6 Sistema de enfriamiento para la celda generadora de ozono.....	25
1.1.7 Destructor de ozono.....	26
1.1.8 Almacenamiento	26
1.1.9 Control del proceso	27
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
2.1 PRUEBAS ANALÍTICAS DE PRESENCIA DE ETILENO.....	28
2.2 CELDA GENERADORA DE OZONO.....	29
2.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AIRE.....	31
2.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN	34
2.4.1 Resultados de la simulación del amplificador clase E.....	38
2.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA LA CELDA GENERADORA DE OZONO	39
2.6 ESTRATEGIA DE CONTROL.....	41
2.6.1 Procedimiento de selección del control.	41
2.6.1.1 Definir los parámetros del sistema	41
2.6.1.2 Condiciones que requiere el proceso	42

2.6.1.3 Modelo matemático que representa el proceso	42
2.6.1.4 Calculo de los parámetros	44
2.6.1.5 Selección del controlador.....	45
2.7 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EQUIPO.....	47
3. CONCLUSIONES	49
4. RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 . Fruto del maracuyá	18
Figura 2. Diagrama de la metodología utilizada para realizar el presente trabajo	20
Figura 3. Celda generadora de ozono.....	23
Figura 4. Representación gráfica de la producción de ozono	24
Figura 5. Cromatograma obtenido de la muestra de maracuyá analizada por S- HS/GC/TCD/FID.	28
Figura 6. Curva de calibración para análisis por S-HS/GC/TCD/FID	29
Figura 7. Circuito del amplificador clase E	35
Figura 8. Tensión de salida del amplificador por celda.	38
Figura 9. Potencia de salida del amplificador por celda.	38
Figura 10. Circuito térmico de la celda generadora de ozono con sistema de enfriamiento.	39
Figura 11. Estructura entrada y salida del proceso	42
Figura 12. Respuesta de la variable controlada en lazo abierto.....	45
Figura 13. Respuesta de la variable controlada en lazo abierto en un tiempo de 24 horas.....	46
Figura 14. Voltaje de umbral a diferentes valores de presión-espacio para el aire	62
Figura 15. Configuraciones eléctricas de las descarga en barrera dieléctrica	62
Figura 16. Representación de la actividad de descarga cuando se aplica una tensión sinusoidal.	64
Figura 17. Representación circuital de la interrupción de descarga.....	65
Figura 18. Representación circuital del intervalo de descarga.	65
Figura 19. Representación circuital de la DBD no lineal.	65
Figura 20. Representación circuital de la DBD lineal.	66
Figura 21. Figura de Lissajous	66
Figura 22. Voltaje pico Vs espacios de descargas.....	72
Figura 23. Diagrama de Mollier del aire húmedo	73

Figura 24. Tensión de salida del amplificador	75
Figura 25. Potencia de salida del amplificador	75
Figura 26. Corriente de salida del amplificador	76
Figura 27. Potencia de entrada del amplificador	76
Figura 28. Corriente de entrada del amplificador	77
Figura 29. Tensión del transistor	77
Figura 30. Potencia del transistor.....	78
Figura 31. Tensión y corriente sincronizadas del mosfet	78
Figura 32. Disipador	80
Figura 33. Representación gráfica de la transferencia de calor por conducción...81	
Figura 34. Representación gráfica de la transferencia de calor por convección. ..82	
Figura 35. Transferencia de calor en una pared compuesta	83
Figura 36. Circuito térmico que relaciona la conducción de calor en una pared compuesta.	83
Figura 37. Gráfica que permite calcular el flujo de aire del ventilador	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cálculos y resultados del diseño conceptual de la celda generadora de ozono.....	30
Tabla 2. Cálculos y Resultados del diseño conceptual para el sistema de alimentación de aire.....	32
Tabla 3. Cálculos y resultados del diseño conceptual de la fuente de alimentación.....	35
Tabla 4. Calculos y resultados del diseño conceptual del sistema de enfriamiento.....	40
Tabla 5. Características generales que debe tener el equipo generador de ozono.....	47
Tabla 6. Selección De Gas De Alimentación.....	69
Tabla 7. Niveles mínimos de cuantificación (NMC=2NMD) del S-HS/GC/TCD/FID (S/N = 5); y concentraciones de gases presente en la muestra de maracuyá.....	69
Tabla 8. Materiales Resistentes A La Oxidación.....	70
Tabla 9. Selección Del Material Dieléctrico.....	70
Tabla 10. Clasificación Frutihortícola Según La Producción De Etileno.....	71
Tabla 11. Características De Voltaje Y Rigidez Del Dieléctrico.....	72
Tabla 12. Valores experimentales de algunos materiales.....	82

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Aspectos Generales Del Ozono	59
Anexo B. Ruptura En Barrera Dieléctrica DBD	60
Anexo C. Selección De Gas De Alimentación.....	68
Anexo D. Concentración de gases presentes en la muestra de maracuyá.....	69
Anexo E. Materiales Resistentes A La Oxidación	69
Anexo F. Selección Del Material Dieléctrico	70
Anexo G. Clasificación Frutihortícola Según La Producción De Etileno.....	71
Anexo H. Voltaje Pico Vs Espacios de Descargas.....	72
Anexo I. Características De Voltaje Y Rigidez Del Dieléctrico	72
Anexo J. Características De La Sílice Gel	73
Anexo K. Diagrama De Mollier Del Aire Húmedo.....	73
Anexo L. Características De Los Parámetros De La Red Resonante Del Amplificador Clase E.....	74
Anexo M. Resultados De Simulación Del Amplificador Clase E.....	75
Anexo N. Especificaciones Para Realizar Los Cálculos Del Intercambiador De Calor	79
Anexo O. Principios Básicos De La Transferencia De Calor.....	81
Anexo P. Gráfica del disipador elegido que permite calcular el flujo de aire del ventilador.	85
Anexo Q. Ficha Internacional de Seguridad Química del Ozono.	86

TÍTULO: DISEÑO CONCEPTUAL DE UN PROCESO FISICOQUÍMICO PARA RETARDAR LA MADURACIÓN DEL MARACUYÁ ALMACENADO¹.

AUTORES: Julián Libardo Gómez Rojas².

Marcela Del Pilar Parra Barrera³.

PALABRA CLAVES: Maracuyá, etileno, ozono, celda, generación de ozono, alimentación, aire, enfriamiento, sistema, fuente de alimentación, descarga en barrera dieléctrica, disipador, resonancia, control (*on-off*).

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño conceptual de un proceso fisicoquímico para retardar la maduración del maracuyá almacenado fruta exótica de exportación. El maracuyá se clasifica como climatérico, con altas producciones de etileno.

Para el desarrollo del proyecto se inicia con la determinación analítica de presencia de etileno en la fruta, obteniéndose una concentración menor a 2 ppm, en base a estos resultados se realizó la ingeniería básica de un proceso combinado de almacenamiento y generación simultánea de ozono que denominamos (*passion fruit ozone*), esto requirió el diseño conceptual de un generador de ozono compuesto por una celda de placas paralelas separadas por un material dieléctrico donde se lleva a cabo la descarga en barrera dieléctrica DBD, que produce una reacción química donde se rompe el enlace de la molécula de oxígeno obteniendo como producto la molécula triatómica de ozono, un sistema de alimentación de aire con un flujo de 2 LPM que permiten obtener la producción de ozono requerida, un sistema de refrigeración compuesto por un disipador y un ventilador para poder proteger la celda y garantizar su correcto funcionamiento. La celda se alimenta con un amplificador de clase E que proporciona alta tensión, frecuencia y eficiencia. Por otra parte para que el equipo funcione de forma segura se propuso una estrategia de control automático que permite mantener las propiedades fisiológicas y organolépticas de la fruta.

¹Tesis de Proyecto de Grado. Modalidad Investigación

³Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

³Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química

Director: PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely Codirector: PhD. Ivan Mauricio Amaya Contreras

TÍTULO: CONCEPTUAL DESIGN OF A PHYSICO-CHEMICAL PROCESS TO SLOW THE RIPENING OF STORED PASSION FRUIT¹.

AUTORS: Julián Libardo Gómez Rojas².

Marcela Del Pilar Parra Barrera³.

KEY WORDS: Passion fruit, ethylene, ozone cell, generation of ozone, power, air, cooling, system power supply, discharge in dielectric barrier, sink, resonance, on-off control

ABSTRACT

In this work was the conceptual design of a physico-chemical process to slow the ripening of stored passion fruit export exotic fruit. The passion fruit is classified as a climacteric, with high yields of ethylene.

The development of the project is starts with the analytical determination of presence of ethylene in fruit, resulting in one concentration of less than 2 ppm, based on these findings was carried out the basic engineering of a combined process of storage and simultaneous generation of ozone we call (passion fruit ozone), this required the conceptual design of an ozone generator made by a cell of parallel plates separated by a dielectric material where the discharge is carried out in DBD dielectric barrier, which produces a chemical reaction where breaks the link of the molecule of oxygen product obtaining the triatomic ozone molecule, a system of air supply with a flow of 2 LPM, allowing to obtain the required ozone production, a cooling system consisting of a fan and a heatsink in order to protect the cell and ensure its proper functioning. The cell is powered by an amplifier of class E that provides high voltage, frequency and efficiency. On the other hand to make the equipment work safely proposed a strategy of automatic control which allows to maintain the physiological and organoleptic properties of the fruit.

¹Grade project thesis. Research mode

²Faculty of Physicomechanics Engineering. Departament of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering

³Faculty of Physicochemical Engineering. Departament of Chemical Engineering
Director: PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely Codirector: PhD. Ivan Mauricio Amaya Contreras

INTRODUCCIÓN

En la industria frutihortícola es habitual el uso de tecnologías que permitan controlar la velocidad de madurez. Este factor ha impulsado estudios para establecer el ciclo de crecimiento y maduración de las frutas, mientras se encuentran unidas a la planta y en su periodo de poscosecha [1, 2, 3]. Dicho ciclo implica la producción de etileno y el proceso de respiración, y actualmente se clasifican en climatéricas y no climatéricas [4]. Las primeras son aquellas que presentan una respiración aumentada, con generación de etileno y CO₂, después de ser cosechadas [4]. Las segundas exhiben el fenómeno opuesto (es decir, descenso en la respiración y generación de etileno y CO₂), por lo que la velocidad de maduración disminuye significativamente después del corte [5,6]. Algunas frutas del entorno colombiano, como la chirimoya, el maracuyá, la gulupa, y la cholupa, pertenecen a la primera clasificación, y por tanto manifiestan altas producciones de etileno.

El fruto de interés para este trabajo es el maracuyá amarillo (*passiflora edulis sims f. flavicarpa degener*) (**Figura 1**), también conocido como fruta de la pasión. Se cultiva en diferentes países del mundo como Colombia, Ecuador, Brasil y Perú. En Colombia se cultivan especies traídas de Brasil, y actualmente se cultiva en 19 regiones, donde los departamentos del Huila, Valle del Cauca, Córdoba y Santander destacan por su producción, adelantos tecnológicos y científicos [7]. Posee un rango mayor a 100 µL de C₂H₄/kg*h a 20 °C de producción de etileno [4], razón por la cual se puede ver afectada en gran medida por la biosíntesis del etileno acelerando su maduración y afectando el tiempo de almacenaje.

Figura 1 . Fruto del maracuyá



Así, un almacenaje ineficiente, y otros problemas relacionados con el cultivo, han llevado a que la comercialización del maracuyá en Colombia presente un alto costo. Por tanto, ofrecer una opción económica y efectiva para prolongar el tiempo de maduración del maracuyá almacenado, puede mejorar las condiciones para la venta y aumentar la utilidad de quien lo vende.

Una manera de lograr esto es reduciendo el etileno producido por la fruta. Para hacerlo existen diferentes métodos [8]. Uno de ellos busca prevenir la acumulación de etileno, y propone almacenar por separado los productos verdes y los maduros, retirando periódicamente los productos en pudrición o dañados. Adicionalmente, se debe garantizar un mantenimiento periódico del almacén. Otra alternativa es mantener una ventilación con aire externo. En este caso se puede minimizar la acumulación de etileno, siempre y cuando no exista un gradiente de temperatura significativo.

Otro método es la exposición a ozono, un agente oxidante que destruye el etileno con gran facilidad alargando el periodo de almacenamiento refrigerado de 30 a 40 días aproximadamente. Sin embargo, en este método se debe tener cuidado con

las concentraciones utilizadas, pues de ser muy elevadas llegan a ser tóxicas **(Anexo A)**. Por ende, se deben tener las precauciones correspondientes. También se conoce el método de atmósferas controladas con monóxido de carbono, que generan respuestas favorables en el control de decoloraciones y en el retraso del crecimiento de las podredumbres [9, 10].

En 1997 la *U.S. Food and Drug Administration* (FDA) reconoció al ozono como seguro, GRAS (*Generally Recognized As Safe*) para su utilización en contacto con alimentos [11]. No obstante, fue en 2001 cuando este organismo dio su fallo definitivo y aprobó la normativa del uso de ozono como aditivo de alimentos durante su procesamiento o almacenamiento [12]. La literatura reporta investigaciones en la aplicación del ozono gaseoso para retardar la madurez de los alimentos en ambientes controlados.

Como línea de investigación del grupo CEMOS de la E3T, se propone realizar el diseño conceptual de un proceso fisicoquímico (Passion-Fruit-Ozone) para retardar la maduración del maracuyá. Dicho proceso está fundamentado en el almacenamiento convencional y en la generación controlada de ozono. Para alcanzar este objetivo, se realiza la determinación de presencia de etileno generado eventualmente por el proceso de maduración del maracuyá, mediante pruebas analíticas (página 19-20). Con base en los resultados, se realiza la ingeniería básica de un proceso combinado de almacenamiento convencional y generación simultánea de ozono (página 20-31). Para garantizar un adecuado y seguro funcionamiento se propone una estrategia de control automático para generar el ozono en el sitio de almacenamiento del maracuyá (página 32-37).

Para lograr lo descrito anteriormente se sigue la metodología para procesos de diseño elaborada por French [13], modelo descriptivo que se basa en la identificación de una necesidad y un problema real que permitirá la búsqueda de una solución mediante un diseño conceptual y preliminar.

1. METODOLOGÍA

La **Figura 2** muestra las etapas que se abordaron en el diseño conceptual de un generador de ozono para retardar la maduración del maracuyá.

Figura 2. Diagrama de la metodología utilizada para realizar el presente trabajo



1.1 DISEÑO CONCEPTUAL

1.1.1 Pruebas analíticas de presencia de etileno. Se tomó una muestra de maracuyá con un peso de 120 g de la central de abastos de Bucaramanga con un día de cosechada, la fruta fue almacenada en un recipiente hermético que permite tomar la muestra del gas a analizar a través de un septum. La determinación de gases en la muestra se realizó en el LABORATORIO DE CROMATOGRAFÍA Y ESPECTOMETRÍA DE MASAS DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, empleando la técnica de *headspace* estático y análisis por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica y detector de ionización en llama (S-SH/GC/TCD/FID). El análisis se realizó en un cromatógrafo de gases (GC) AT 6890A (*agilent technologies, palo alto, california, EE.UU*), dotado con un detector de conductividad térmica (TCD) y detector de ionización en llama (FID). Las columnas empleadas en el análisis fueron: Gs-carbonplot (carbón monolítico, 30 m x 0.53 mm x 3 µm) y HP-PLOT *Molesieve* [zeolita (tamiz molecular 5Å), 30 m x 0.53 mm x 50 µm]. La inyección se realizó en modo *splitless*. Como patrones de referencia se emplearon la mezcla de gases FF34402, FF34403, FF34235, OO5218, CC116522 y CC83392 de linde. Con un patrón de muestras de 1000 ppm.

Las muestras fueron analizadas por duplicado. Para la cuantificación de gases en la muestra, se empleó la técnica de estandarización externa, usando el factor de respuesta (R_f) establecido del análisis de la solución patrón.

1.1.2 Tipos de Generadores de ozono. El ozono es un gas de difícil manejo y almacenamiento, debido a su corta vida. Por esta razón es un producto que debe generarse in situ para aprovechar sus características desinfectantes [12]. A continuación se mencionan brevemente tres métodos comunes para generar el ozono: descarga eléctrica (DBD), radiación UV, y electroquímico [12, 14].

1.1.2.1 Generador de ozono DBD. La producción de ozono se da a partir de una descarga eléctrica (descarga corona), que se genera entre dos electrodos y un

dieléctrico. Esta descarga transforma el gas alimentado (oxígeno de alta pureza o aire), en O₃ [11, 15]. Este gas es previamente secado para evitar daños en el dispositivo de descarga corona [12, 14]. Posee varios diseños que se diferencian según el tipo de dieléctrico. El material más usado es vidrio y los electrodos pueden ser tubos metálicos concéntricos o de placas planas [14].

La concentración de ozono generalmente es de 1-3% si se usa aire seco y de 3-6% si el gas alimentado es oxígeno de alta pureza [12]. El equipo necesita de una energía eléctrica de alta tensión, lo que implica que la energía no aprovechada se convierta en calor. Esta etapa representa alrededor del 80% de la energía total, por lo que es necesario implementar un sistema de enfriamiento en la celda generadora de ozono, que permita disipar el calor generado. Con esto se busca no solo preservar la vida útil de los componentes, sino también que el ozono pueda manifestarse, pues el mismo se descompone luego de 35°C [12, 14].

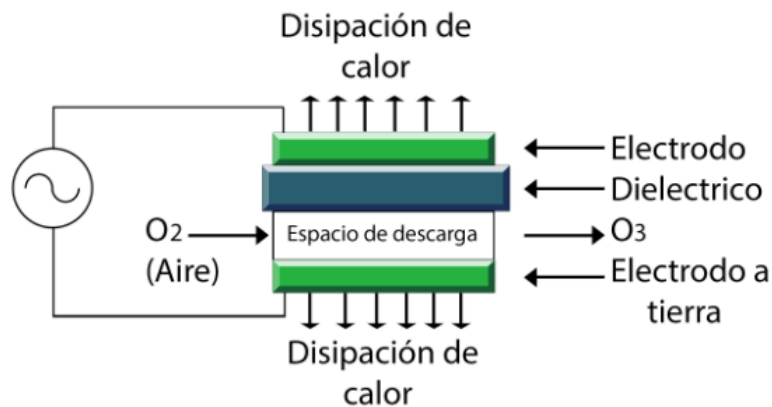
1.1.2.2 Generador de ozono por radiación ultravioleta (UV). Es un método muy poco usado por presentar bajos rendimientos, y consiste en dividir las moléculas de oxígeno mediante la radiación de UV con longitudes de onda entre 140-190 nm [11], permitiendo que un átomo de oxígeno pueda unirse con una molécula de este para producir O₃ [12].

1.1.2.3 Generador de ozono electroquímico (Cold plasma). En este método se usa una corriente continua de baja tensión, que se aplica entre un cátodo y un ánodo contenidos en una solución electrolítica, compuesta de aniones altamente electronegativos, oxígeno y agua. El ozono se produce en el ánodo [12]. Este método es menos rentable que el de descarga corona y por esta razón es poco usado en la industria.

En la industria se requiere un equipo generador de ozono de fácil operación, mantenimiento, económico y con una producción de ozono considerable. Por estas razones se decide usar el generador por descarga corona en el presente trabajo [12, 14].

1.1.3 Celda generadora de ozono. El ozono se genera en un espacio llamado celda generadora de ozono (**Figura 3**). Ésta se compone de dos electrodos separados por un material dieléctrico y una distancia del orden de los milímetros, donde se producen las descargas bien sea, la descarga corona o la descarga en barrera dieléctrica DBD. En cualquier caso se realiza una serie de choques de electrones mediante un campo eléctrico intenso, para romper el enlace de la molécula O_2 [16] y así producir ozono. Este campo eléctrico transforma en conductor al gas. Para entender este proceso se habla de la ruptura eléctrica (**Anexo B**), fenómeno que transforma un material no conductor en uno conductor cuando se supera un umbral de campo eléctrico que permite una precipitación de electrones [17].

Figura 3. Celda generadora de ozono



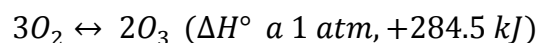
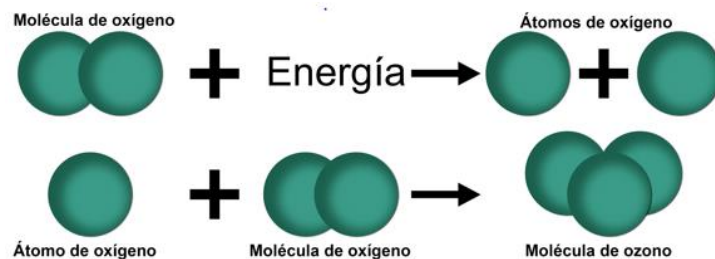
El diseño de la celda es muy importante, de esto depende su eficiencia de producción y el tipo de enfriamiento necesario. Existen dos tipos de geometrías, en forma cilíndrica y de placas paralelas. Con base en los resultados obtenidos por [12], el diseño de este trabajo se centra en la DBD, debido a que la descarga corona no permite obtener una descarga estable por el arco eléctrico que se genera (debido a que no tiene un dieléctrico entre sus electrodos) [18]. Por otro

lado la DBD tiene un dieléctrico entre sus electrodos que limita la corriente, evita la generación del arco eléctrico y obstaculiza la descarga con tensiones de DC, solo se permiten con tensiones alternas [15].

Con lo que respecta a la geometría la más conveniente a usar es la de placas paralelas ya que la cilíndrica presentó un excesivo calentamiento debido a que su electrodo interno está totalmente aislado por el dieléctrico. Por ello, el sistema de enfriamiento no es eficiente para esta geometría. Además, requirió un 22% más de voltaje para lograr las descargas necesarias para la producción de ozono [14]. Por esta razón en el presente trabajo se diseñara una celda generadora de ozono de placas paralelas con DBD.

1.1.4 Gas de alimentación. Seleccionar el gas de alimentación es importante para determinar el rendimiento del equipo [12]. Para el proceso de producción de ozono se requiere de un flujo gaseoso que contenga oxígeno, el cual será disociado por medio de descargas eléctricas para obtener radicales libres y así permitir que un átomo de oxígeno reaccione con una molécula de éste, formando como producto una molécula triatómica (**Figura 4**). Esta reacción se ve representada en la ecuación 1 [11, 12]

Figura 4. Representación gráfica de la producción de ozono



Ecuación 1

Para el gas de alimentación se puede hacer uso de oxígeno de alta pureza o aire, los cuales deben cumplir con unas especificaciones de humedad, concentración

de oxígeno y temperatura, para garantizar una adecuada producción y costo [12, 14]. El gas de alimentación seleccionado, es aire con una concentración de oxígeno de 21%, punto de rocío de +2°C y una humedad relativa correspondiente al punto de rocío de 20.62%. Estos valores fueron previamente evaluados por [14] quienes realizaron una comparación de costos y capacidad de producción de ozono, obteniendo como resultados que el uso del aire como gas de alimentación es más viable en costos por ser 57,41 veces más económico producir un gramo de ozono con respecto al oxígeno a pesar de tener una eficiencia máxima de generación de ozono 5.22 veces menor (**Anexo C**).

1.1.5 Fuente de alimentación. Se requiere una fuente de alimentación que produzca una señal alterna que debe cumplir los requerimientos de tensión y frecuencia necesarios para la generación de las micro-descargas en la celda [19]. Los dispositivos generadores de ozono se clasifican por la frecuencia de operación a la que trabajan. Entre 50 y 60 Hz baja frecuencia, entre 60 y 1000 Hz media frecuencia y mayores a 1 kHz de alta frecuencia [20].

Para el diseño de esta fuente de alimentación, se tienen parámetros de tensión y frecuencia del orden de los kVolts y kHz respectivamente, las topologías que cumplen con estas características son los inversores de medio puente, de puente completo, el amplificador clase E y el convertidor flyback [21]. El amplificador clase E es un amplificador de potencia de conmutación altamente eficiente y el número de componentes que requiere es menor respecto de las demás topologías [22], por esta razón se elige para este trabajo.

1.1.6 Sistema de enfriamiento para la celda generadora de ozono. La importancia de un sistema de enfriamiento para la celda radica en la primera ley de la termodinámica, debido a que parte de la energía eléctrica que se usa para el adecuado funcionamiento del ozonizador se transforma en calor afectando la celda generadora de ozono al aumentar su temperatura, este incremento también genera inconvenientes en la operación por la inestabilidad que posee el ozono

debido a que este se descompone fácilmente a temperatura mayores de 40 °C [12, 14]. Actualmente los sistemas de enfriamientos que se usan tienen como refrigerante agua o aire. El tipo de refrigerante varía según la cantidad de calor a retirar por lo general en ozonizadores industriales a gran escala se hace uso del agua [12].

Para evitar el daño por calor en la celda y por ende la generación de ozono se propone implementar un sistema de enfriamiento por aire con disipadores, debido a que el calor a disipar no es lo suficiente para usar un refrigerante como el agua [14]. Siendo el enfriamiento por aire la opción más económica.

1.1.7 Destructor de ozono. Es necesario destruir el ozono después de su uso, debido a que es tóxico para las personas y poco estable [11, 12, 23]. Los métodos más usados para destruir ozono son, el térmico, la irradiación con luz ultravioleta y el uso de catalizadores como el óxido de manganeso y óxido de hierro [14]. En el método térmico es necesaria una temperatura entre los 300 y 350 °C por un periodo de 5 segundos o menos, esto requiere mucha energía, haciéndolo costoso respecto a los otros métodos [24], sin embargo de estos tres el más económico es el UV, que posee un rendimiento menor pero suficiente para la aplicación de este proyecto.

1.1.8 Almacenamiento. El almacenamiento convencional para frutas climatéricas se realiza a través de la conservación controlada a bajas temperaturas con un conocimiento previo de la fisiología del producto, para así poder garantizar una adecuada humedad sin llegar a dañar el fruto por exceso de frío [4, 25], en el caso del maracuyá se establece una temperatura de 7,2 °C y humedad relativa 85-90 % [26].

Con lo que respecta a la temperatura, el maracuyá es compatible con alimentos que se pueden refrigerar en un rango de 7.2 a 12.7 °C como, la guayaba, limas, piña, papayas, naranjas, pepino entre otras, para realizar este almacenamiento se debe tener en cuenta la producción de etileno de cada fruta o hortalizas debido a

que este afecta la maduración y por ende restringe el almacenamiento con productos sensibles al etileno.

1.1.9 Control del proceso. Para garantizar un óptimo desarrollo del proceso, se propuso una estrategia de control automático, por los siguientes motivos: Inestabilidad del ozono, seguridad del personal y posibles daños en el fruto. El control que mejor se acoplo es de tipo encendido/apagado (*ON/OFF*), debido a la necesidad de una producción interrumpida de ozono.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.1 PRUEBAS ANALÍTICAS DE PRESENCIA DE ETILENO

En el cromatograma obtenido por S-HS/GC/TCD/FID de gases (**Figura 5**) se observó que en un tiempo de retención de 4.376 minutos hay un cambio en la curva con respecto a la línea base, en este punto según la curva de calibración (**Figura 6**) se encuentra el gas de etileno. El cambio no es muy significativo debido a que las concentraciones de etileno en 120 g de maracuyá son muy bajas y para tener un resultado más preciso se debe realizar una curva de calibración de concentraciones con un límite máximo de 2 ppm. En el (**Anexo D**) se encuentra la **Tabla 7** que reporta la cuantificación de gases en la muestra. Para este caso la muestra contiene una concentración menor a 2 ppm. La prueba soporta que hay presencia de etileno en la muestra de maracuyá. Para realizar el diseño conceptual del equipo se tomó como referencia las pruebas realizadas con O₃ en manzanas [27] y se definió un valor estimado de 2.14×10^{-7} g/L de ozono para tratar un kg de maracuyá teniendo en cuenta que a una concentración de 3×10^{-7} g/L de ozono se generan cambios en las manzanas [27]. La producción de etileno generado en un kilogramo de maracuyá es de 100 μ l/h el cual se toma de los análisis realizados por luz marina melgarejo [4].

Figura 5. Cromatograma obtenido de la muestra de maracuyá analizada por S-HS/GC/TCD/FID.

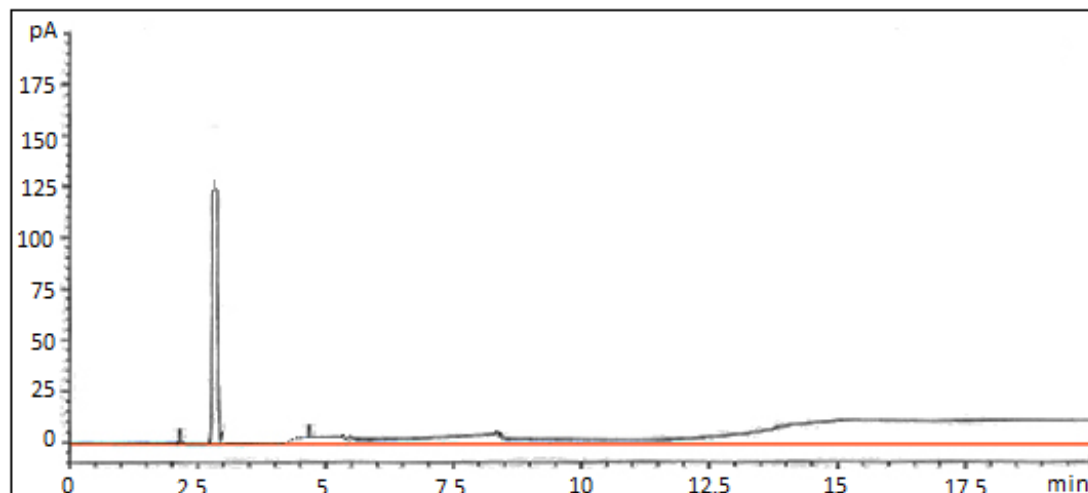
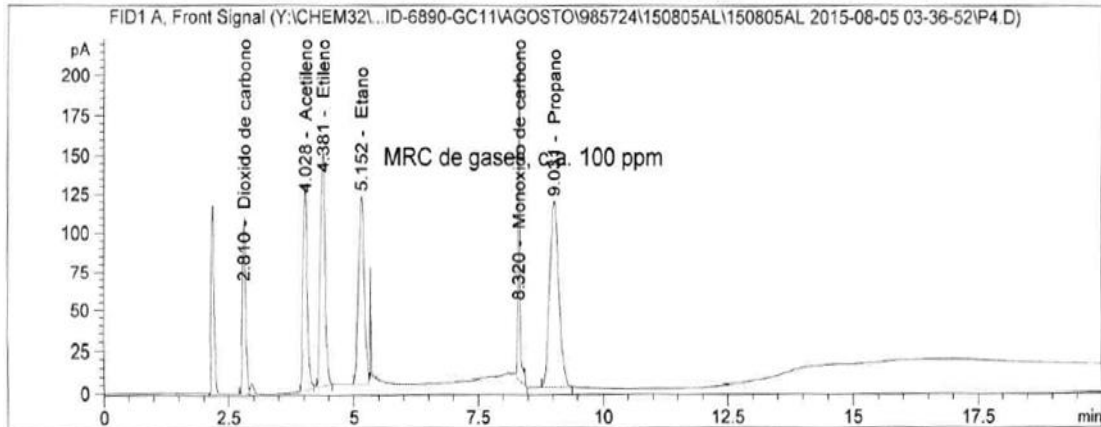


Figura 6. Curva de calibración para análisis por S-HS/GC/TCD/FID



2.2 CELDA GENERADORA DE OZONO

Para su diseño inicialmente se debe escoger materiales que soporten la oxidación producida por el ozono. Para los electrodos se puede usar el tungsteno, titanio o acero inoxidable y para el dieléctrico vidrio, mica, y alúmina entre otros (**Anexo E**). Para las conexiones externas, como mangueras y accesorios, el teflón es una buena opción debido a su alta resistencia a la oxidación con ozono [16]. El material que se usará para los electrodos es acero inoxidable 316 y para el dieléctrico, la mica fue el material que presentó mejores características (**Anexo F**).

Para diseñar el generador de ozono, se toma como base la investigación y experimentación del CENIDET [14] y la fisiología de las frutas [4] (**Anexo G**). También se toma como base de cálculo 129 Ton de maracuyá, para una producción de etileno de 12.789 g/h para ser tratados con una concentración de 0.027 g/L O₃ valores que se obtuvieron haciendo la relación con los datos encontrados en la literatura. La **Tabla 1** muestra los pasos seguidos para diseñar la celda.

Tabla 1. Cálculos y resultados del diseño conceptual de la celda generadora de ozono.

N° de pasos	Procedimiento	Parámetros	Cálculos	Resultados
1	Calcular la producción de ozono	<p>Ds= dosis de ozono requerida para disminuir la concentración de etileno.</p> <p>Cl= caudal de etileno producido por el maracuyá.</p> <p>Pd= producción de ozono.</p>	$Ds = 0,027 \text{ g/L}$ $Cl = 12,789 \text{ L/h}$ $Pd = Ds * Cl$	$Pd = 0.35 \text{ g/h}$
2	Calcular la potencia a disipar en la celda	<p>Ef= eficacia real de la celda cuando se emplea aire como gas de alimentación y un flujo de 2 LPM.</p> <p>Ps=Potencia a disipar en la celda</p>	$Ef = 1000 \frac{\text{g}}{\text{kW} * \text{h}}$ $Ps = \frac{Pd}{Ef} * 1000$	$Ps = 10.12 \text{ Watts}$
3	Debido a que la potencia consumida máxima de la celda es de 10 watts se usó un arreglo en paralelo de dos celdas, cada una con una producción de 0.175 para cumplir con la demanda requerida, esto nos da como resultado una potencia de 5.06 Watts por celda, este valor se usó en los cálculos posteriores.			
4	Calcular el área de descarga	<p>Kd= densidad de potencia máxima disipada en los electrodos.</p> <p>A= área máxima de descarga.</p>	$Ps = 5,06 \text{ W}$ $Kd = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ $A = \frac{Ps}{Kd}$	$A = 5.06 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
5	La frecuencia elegida es de 17500 Hz, debido a que en esta se presenta la mayor eficacia de la celda y un espesor de 0.3 mm como condición inicial [14].			

6	Graficar el voltaje pico vs el espacio de descarga	<p>Prs= 135,775 x 10³ Pa presión absoluta del gas de alimentación</p> <p>Er(mica)=1,45 permitividad relativa de la mica (Anexo F)</p> <p>F= 17500 Hz frecuencia donde se obtuvo el máximo valor de eficacia</p> <p>D1=0.3x10⁻³ m propuesto como dato inicial</p> <p>E_o =8.854x10⁻¹² C²/Nm² permitividad del vacío</p> <p>Kp1=29.64 constantes de paschen cuando se tiene aire como gas de alimentación.</p> <p>Kp2=1350</p>	$V_{sp} = \frac{P_s}{4f \left(\frac{\epsilon_r^2 \epsilon_0 A d_2}{\epsilon_r d_1 d_2 + d_1^2} \right) (Kp_1 d_2 Prs + Kp_2) + Kp_1 d_2 Prs + Kp_2}$ <p>En base a la Figura 22 (Anexo H) se eligió un voltaje pico de 2778 volts y un espacio de descarga de 0.3 mm (Anexo I).</p>
7	Evaluar la condición de voltaje de ruptura dieléctrica	<p>El voltaje pico máximo se aprecia en el (Anexo I) El espacio de descarga elegido es de 0.3 mm, la condición dice que Vsp ≤ Vspmáx, es decir 2778 ≤ 13500.</p> <p>Si esta condición no se cumple, el dieléctrico se sobrecalentara entonces se debe elegir una nueva frecuencia de operación y un nuevo espesor del dieléctrico.</p>	

2.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AIRE

El sistema de alimentación de aire, está compuesto por un compresor encargado de recoger el aire y alimentarlo con un flujo de 2 LPM a un filtro de sílice gel azul que deseca el aire dejándolo con una humedad relativa del 20 % para garantizar

un buen funcionamiento y protección de la celda generadora de ozono [14].
Nuevamente, la **Tabla 2** muestra los pasos del proceso.

Tabla 2. Cálculos y Resultados del diseño conceptual para el sistema de alimentación de aire.

N° de pasos	Procedimiento	Parámetros	Resultados
1	Elegir compresor que satisfaga las necesidades del sistema.	Flujo optimo 2 LPM.	se eligió un compresor tipo 10 D (DC) número de modelo 10D1125-101-1052 de la marca GAST con una capacidad de flujo de aire de entre 0,65 y 4,3 LPM
2	Elegir el tipo de sílice gel.		Para el filtro encargado de la desecación del aire se escoge sílice gel azul (Anexo J) con una adsorción hasta un 40% de su propio peso en agua. Densidad entre 650-800 g/l.
3	Calcular la humedad específica presente en el aire a condiciones normales de T y HR haciendo uso del diagrama de mollier de aire húmedo (Anexo K)	Ta= 24 °C temperatura ambiente. HR= 80% humedad relativa	Se obtiene una He de 0,015 kg/kg de aire seco, osea 0,015 kg de vapor de agua en 1 kg de aire seco.

4	Calcular cuanto vapor de agua en gramos estaria presente en un flujo de 2 LPM con una Humedad relativa del 80% y Patm = 1012,19 hpa	$He = 0.015 \frac{kg}{kg}$ Humedad especifica $\rho_a = 1.1764 \frac{kg}{m^3}$ Densidad del aire a condiciones 24 °C y HR= 80% $f_a = 2 LPM = 0.002 m^3$ Flujo de aire	$Vr_{g1} = (H_e * \rho_a * f_a) * 1000$ $Vr_{g1} = 0,03529 g \text{ de vapor de agua}$
5	Calcular la humedad especifica presente en el aire haciendo uso del diagrama de mollier de aire húmedo (Anexo K)	Ta= 24 °C HR= 20%	Se obtiene un valor de 0,0035 kg/kg de humedad especifica.
6	Calcular cuanto vapor de agua en gramos estaria presente en un flujo de 2 LPM con una Humedad relativa del 20% y Patm = 1012,19 hpa	$He = 0.0035 \frac{kg}{kg}$ Humedad especifica $\rho_a = 1.1843 \frac{kg}{m^3}$ Densidad del aire a condiciones 24 °C y HR= 20% $f_a = 2 LPM = 0.002 m^3$ Flujo de aire	$Vr_{g2} = (H_e * \rho_a * f_a) * 1000$ $Vr_{g2} = 0,0082901 g \text{ de vapor de agua}$

7	Calcular la cantidad de vapor de agua en gramos a retirar, para mantener la humedad relativa del aire de alimentación en un 20%.		$Vr_f = Vr_{g1} - Vr_{g2} = 0.027 g$
8	Calcular la cantidad necesaria de sílice gel para mantener la humedad relativa del aire de alimentación en un 20%.	Absorción sílice gel=10%	$ms = \frac{100\% * 0.027 g}{10\%} = 0.27 g$
9	Calculo del volumen del filtro	$msa = 388.8$ $\rho_s = 725 g/l$	$VF = \frac{msa}{\rho_s * 1000} = 5.36 \times 10^{-4} m^3$

2.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para diseñar la fuente de alimentación (**Tabla 3**) se usó el amplificador clase E representado en la (**Figura 7**), cuya carga son dos celdas generadoras de ozono conectadas en paralelo. Esta fuente se alimenta con una batería de uso comercial, tiene un transistor que hace la función de switch, un capacitor y una red RLC que trabaja en resonancia, debido a que su empleo genera formas de onda sinusoidales en los dispositivos de conmutación, dando como resultado conmutaciones suaves. Esto con la finalidad que los dispositivos se enciendan en presencia de voltaje cero y se apaguen en presencia de corriente cero, minimizando las pérdidas por conmutación. Para facilitar el cálculo de los parámetros del amplificador se simplifica el circuito RLC.

Es importante mencionar que el valor de las capacitancias C_c y C_{e1} , son datos iniciales y constantes, encontrados experimentalmente [14]. Se usó una batería de 12 V y un ciclo de trabajo de 50%. Con estas condiciones, según [14, 15], las constantes de sintonización K_o , K_1 y K_2 son 1.9158, 0.41 y 1.0253, respectivamente, y el factor de ajuste S es 1.37. En el **Anexo L** se encuentran las Características de los parámetros de la red resonante del amplificador clase E.

Figura 7. Circuito del amplificador clase E

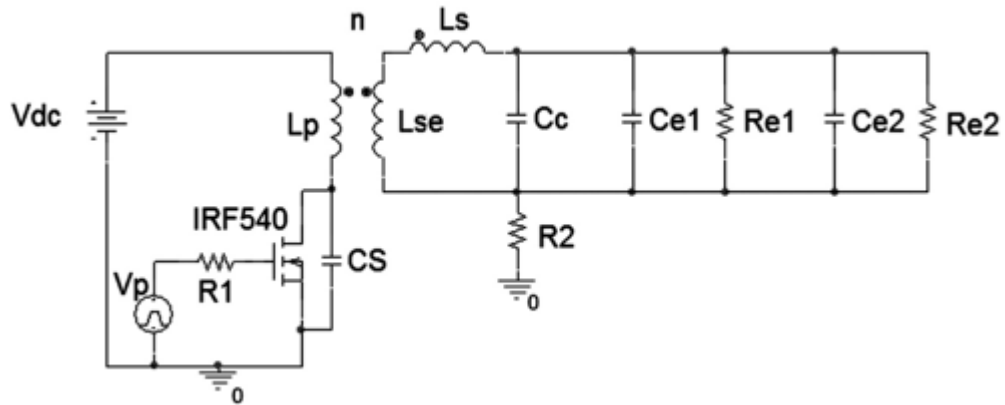


Tabla 3. Cálculos y resultados del diseño conceptual de la fuente de alimentación.

N° de pasos	Procedimiento	Parámetros	Cálculos	Resultados
1	Calcular el equivalente paralelo de las resistencias de las celdas	<p>N_c=número de celdas</p> <p>P_t=Potencia total de las celdas</p> <p>P_e=pérdidas eléctricas del resto del circuito RLC, estimadas en 2.5 W</p> <p>V_{se}=Tensión eficaz de alimentación de la celda</p> <p>R_e=Paralelo de las resistencias R_{e1} y R_{e2}</p>	$P_t = P_s * N_c$ $R_e = \frac{V_{se}^2}{P_t + P_e}$	$R_e = 611.5 [k\Omega]$
2	Realizar el paralelo de las resistencias y capacitancias equivalentes de las celdas.	<p>R_{e1}=Resistencia equivalente de la celda 1</p> <p>R_{e2}=Resistencia equivalente de la celda 2</p> <p>C_{e1}=Capacitancia equivalente de la celda 1</p> <p>C_{e2}=Capacitancia equivalente de la celda 2</p> <p>C_e= Paralelo de las capacitancias C_{e1} y C_{e2}</p>	$R_{e1} = R_{e2}$ $\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_{e1}} + \frac{1}{R_{e2}}$ $C_{e1} = C_{e2}$ $C_e = C_{e1} + C_{e2}$	$R_{e1} = 1223 [k\Omega]$ $R_{e2} = 1223 [k\Omega]$ $C_{e1} = 0.0725 [nF]$ $C_{e2} = 0.0725 [nF]$ $C_e = 0.145 [nF]$

3	Realizar el paralelo de las capacitancias C_e y C_c	<p>C_c = Capacitancia que compensa las variaciones de C_e debido a las micro-descargas</p> <p>C_t = Paralelo de las capacitancias C_e y C_c</p>	$C_t = C_e + C_c$	$C_t = 2.075 [nF]$
4	Calcular el equivalente serie de la red RLC	<p>R_s = Resistencia equivalente serie</p> <p>W = Frecuencia angular</p> <p>X_{Ct} = Reactancia capacitiva de C_t</p> <p>X_{Cs} = Reactancia capacitiva equivalente serie</p> <p>X_{Ls} = Reactancia inductiva equivalente serie</p> <p>L_s = Inductor de la red</p>	$X_{Ct} = \frac{1}{C_t * W}$ $R_s = \frac{X_{Ct}^2 R_e}{R_e^2 + X_{Ct}^2}$ $X_{Cs} = \frac{R_e^2 X_{Ct}}{R_e^2 + X_{Ct}^2}$ $X_{Cs} = X_{Ls}$	<p>$X_{Ct} = 4.3829 [k\Omega]$</p> <p>$R_s = 31.4124 [\Omega]$</p> <p>$X_{Cs} = 4.3827 [k\Omega]$</p> <p>$X_{Ls} = 4.3827 [k\Omega]$</p> <p>$L_s = 0.0399 [H]$</p> <p>Nota: X_{Cs} y X_{Ls} son iguales debido a que el circuito funciona en resonancia</p>

5	Calcular los parámetros de la etapa de sintonización	<p>Lp = Bobina del lado primario del transformador</p> <p>CS = Capacitor de sintonización</p> <p>Res = Resistencia de sintonización</p> <p>V1 = Tensión de inicio de impulsos.</p> <p>V2 = Tensión para el pulso.</p> <p>TD (<i>Time delay</i>). Tiempo que durará la tensión en V1</p> <p>TR (<i>Rise time</i>). Tiempo necesario para que V2 alcance a V1</p> <p>TF (<i>Fall time</i>).Tiempo necesario para cambiar la tensión de V2 a V1.</p> <p>PW (<i>Pulse width</i>). El tiempo que el pulso se mantiene en V2.</p> <p>PER (<i>Period of pulse</i>). Tiempo de un ciclo</p> <p>f = Frecuencia</p>	$Res = Ko \frac{Vcc^2}{Pt + Pe}$ $Lp = K1 \frac{Res}{W}$ $CS = K2 \frac{1}{wRes}$ $PW = \frac{0.5}{f}$ $PER = \frac{1}{f}$	<p>Res = 21.86 [Ω]</p> <p>Lp = 81.51 [μH]</p> <p>CS = 0.4265 [μF]</p> <p>V1 = 0 [V]</p> <p>V2 = 12 [V]</p> <p>TD = 2 [ns]</p> <p>TR = 1 [ns]</p> <p>TF = 1 [ns]</p> <p>PW = 28.57 [μs]</p> <p>PER = 57.15 [μs]</p>
6	Calcular la resistencia de ajuste del circuito RLC	<p>Rs = Resistencia equivalente serie</p> <p>Rc = Resistencia de compensación</p>	$S = \frac{Rc}{Rs}$ $Rc = Rs * S$	<p>S = 1.37</p> <p>Rc = 43.0349 [Ω]</p>
7	Calcular la relación de transformación del transformador y el valor de la bobina del lado secundario	<p>n = Relación de transformación</p> <p>Lss = Bobina del lado secundario</p>	$n = \sqrt{\frac{Rm}{Res}}$ $Lse = Lp * n^2$	<p>n = 1.4031</p> <p>Lse = 160.47 [μH]</p>

2.4.1 Resultados de la simulación del amplificador clase E. Los datos más relevantes para el diseño se pueden apreciar en las **Figura 8** y **Figura 9**, donde se observa que la tensión y la potencia de salida cumplen con los requerimientos de diseño esperados. En el **Anexo M** se muestran los resultados complementarios que evidencian el correcto funcionamiento del sistema.

Figura 8. Tensión de salida del amplificador por celda.

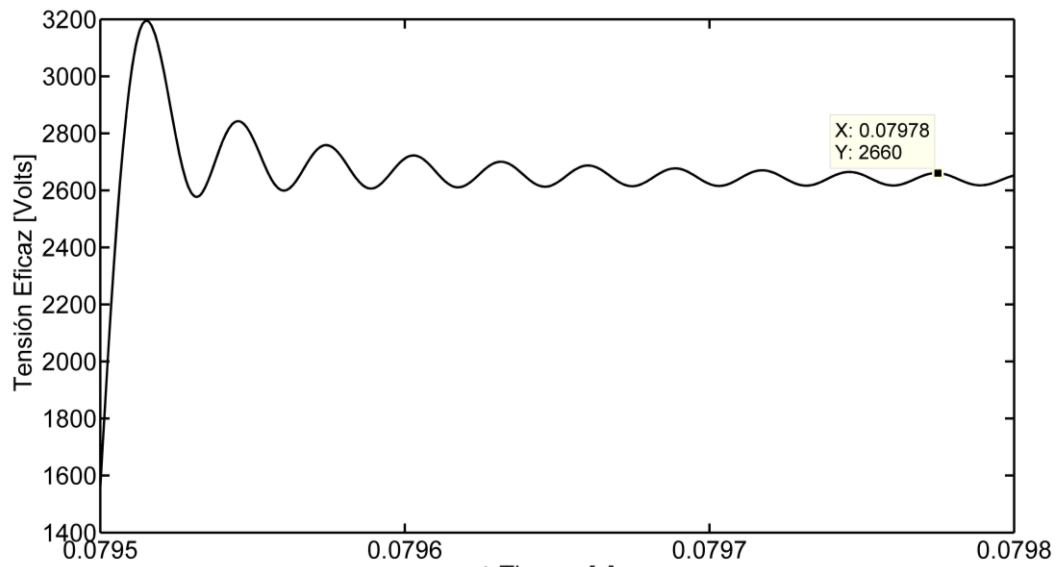
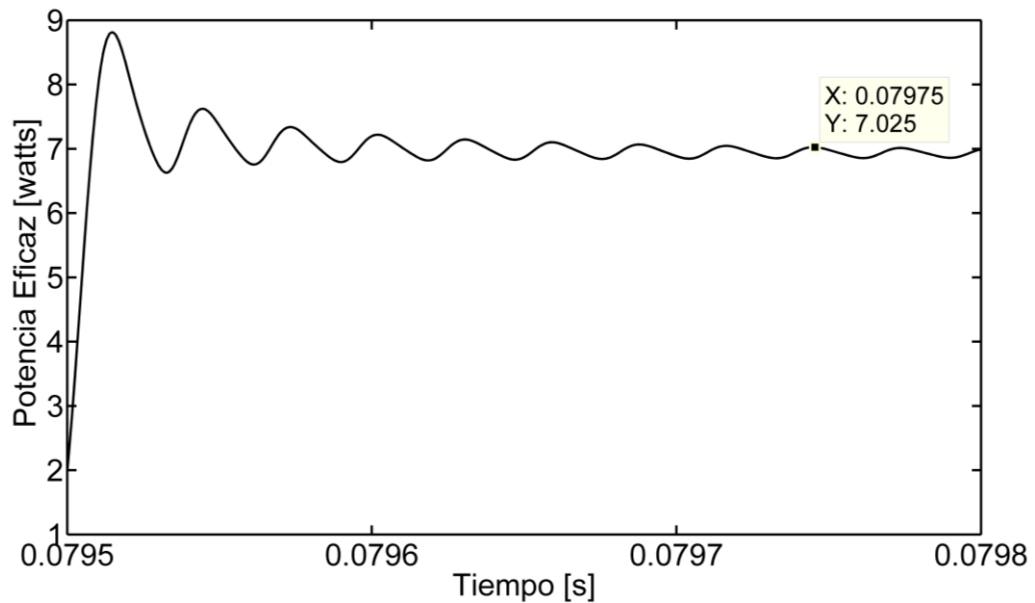


Figura 9. Potencia de salida del amplificador por celda.



2.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA LA CELDA GENERADORA DE OZONO

Las transferencias de calor presentes en la celda generadora de ozono son por conducción y convección, las cuales se usaron para realizar los respectivos cálculos del sistema de enfriamiento por aire (**Tabla 4**). El circuito que representa la transferencia de calor en la celda se puede observar en la **Figura 10**. Por otra parte La celda generadora de ozono debe funcionar a una temperatura no mayor a los 35-40 °C para garantizar una buena producción de ozono y evitar la destrucción de este por altas temperaturas. [12, 23].

Para el sistema de enfriamiento se necesitan 2 disipadores por cada celda. En total el diseño requiere de 4 disipadores con una resistencia térmica de 1 °C/W. El calor removido por el disipador debe ser aproximadamente del 80% [11,12], por esta razón los cálculos para seleccionar el disipador se realizaron con base en este valor y se espera que el disipador seleccionado mantenga la temperatura del equipo en 25. 52 °C.

Figura 10. Circuito térmico de la celda generadora de ozono con sistema de enfriamiento.

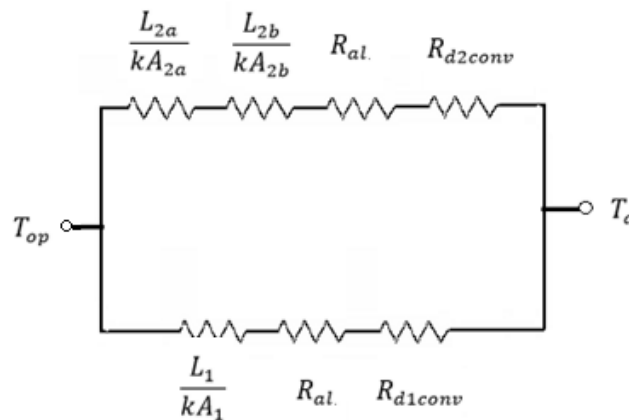


Tabla 4. Cálculos y resultados del diseño conceptual del sistema de enfriamiento.

N° de pasos	Procedimiento	Parámetros	Cálculos	Resultados
1	Elegir la temperatura de operación.	Ta= temperatura ambiente Top= temperatura de operación sin sistema de enfriamiento.	para efectos del diseño se tomó como referencia la temperatura ambiente máxima (Anexo N) Para la temperatura de operación de la celda generadora de ozono se tomó un valor por encima de la temperatura ambiente.	Ta= 30 °C Top= 40 °C
2	Calcular las resistencias del sistema. El sistema 1, sin enfriamiento se compone solo del electrodo El sistema 2, sin enfriamiento se compone de dieléctrico y electrodo Para el sistema 2, (a) corresponde al dieléctrico y (b) al electrodo	R_{sis} =Resistencia del sistema L= espesor del material ver Tabla 5. K=conductividad térmica según el material (Anexo O) A= área de contacto = 1.27 X 10 ⁻³ m ³	$R_{sis1} = \frac{L_1}{kA_1}$ $R_{sis2} = \frac{L_{2a}}{kA_{2a}} + \frac{L_{2b}}{kA_{2b}}$	$R_{sis1} = 0.05876 \frac{K}{W}$ $R_{sis2} = 0.7338 \frac{K}{W}$
3	Calcular la resistencia convectiva del disipador	Rdconv=resistencia del disipador	$R_{d1conv} = \frac{T_{op} - T_a}{ps} - (R_{sis1})$ $R_{d2conv} = \frac{T_{op} - T_a}{ps} - (R_{sis2})$	$R_{d1conv} = 1,9175 \frac{K}{W}$ $R_{d2conv} = 1.2425 \frac{K}{W}$
4	Elegir el disipador	Releg= resistencia del disipador elegido.	para garantizar el correcto funcionamiento del disipador se debe cumplir	El disipador adecuado para la celda generadora de ozono es un

			que $R_{dconv} > R_{eleg}$ se eligió un disipador con una resistencia térmica (R_{eleg}) de 1 °C/W	aavid thermalloy referencia 592201B03400G.
5	Calcular la temperatura del disipador para un %q=80 y un $R_{eleg}= 1$ °C/W	$T_a =$ temperatura ambiente (30 °C) $T_s =$ temperatura del disipador en funcionamiento $P_s = 10.12$ W $q =$ calor disipado	$q = \frac{T_a - T_s}{R_{eleg}} = \frac{\Delta T}{R_{eleg}}$ $\%q = \frac{q * 100\%}{P_s/2}$ $T_s = T_a - (q * R_{eleg})$	$q = 4.48 \frac{K}{W}$ $\%q = 80$ $T_s = 25.52$ °C
6	Calcular el flujo de aire del ventilador	Para un disipador con resistencia convectiva de 1 °C/W	La cantidad de flujo de aire que debe tener el ventilador se calculó por medio de la Figura 37 que se encuentra en el (Anexo P)	Se requiere de un flujo de aire de 500 ft/min que corresponde a 606.38 rpm. Se eligió un ventilador coolermaster modelo R4-BM8S-30PK-R0

2.6 ESTRATEGIA DE CONTROL

El control automático está enfocado en mantener una producción interrumpida de ozono, el cual es dosificado en un almacén refrigerado (cámara de contacto Ozono - Etileno).

2.6.1 Procedimiento de selección del control.

2.6.1.1 Definir los parámetros del sistema:

- Variable a controlar: concentración de etileno
- Variable a manipular: corriente del interruptor

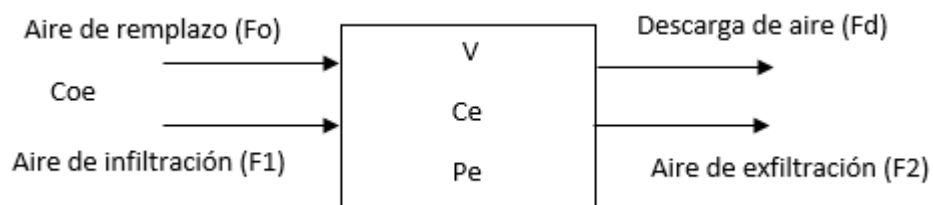
- Variable perturbadora: producción de etileno, concentración de etileno en el exterior del frigorífico.

2.6.1.2 Condiciones que requiere el proceso. El almacén debe contar con condiciones de temperatura y humedad relativa específicas, las cuales ayudan a conservar el maracuyá más tiempo. Se eligió un refrigerador de 20 m³ y 1 Ton de maracuyá, la cual genera una producción continua de etileno de 0.118 g/h. El umbral que desencadena la maduración en frutas climatéricas equivale a una concentración de 0,005 $\mu\text{l/L C}_2\text{H}_4$, por tanto cualquier reducción en la concentración de etileno prolongará la vida útil del producto poscosecha.

Las concentraciones de ozono que se manejan en el proceso no llegan a ser perjudiciales para los operarios, sin embargo se evita la producción de ozono constante para garantizar la seguridad del personal, debido a que ciertos niveles de concentración de ozono pueden ser perjudiciales para la salud. Se realiza la comparación de un control automático en lazo cerrado y lazo abierto con un controlador on-off.

2.6.1.3 Modelo matemático que representa el proceso. Para realizar el modelo matemático se plantea la estructura entrada y salida del proceso (**Figura 11**) simplificando la cantidad de parámetros que hacen parte del sistema y trabajando con aquellos que permiten encontrar un modelo aproximado.

Figura 11. Estructura entrada y salida del proceso



Donde:

C_{oe} = Concentración de etileno exterior

C_e = Concentración de etileno en el interior

P_e = Producción de etileno

V = Volumen del almacén

Condiciones iniciales:

V = Volumen constante

ρ = Densidad constante

P_{atm} = Presión atmosférica

Almacén aislado

Se asume que al estar trabajando en P_{atm} la pérdida de aire es igual a la entrada de este entonces $F_1 = F_2$

Balance de masa del aire

$$\rho F_o + \rho F_1 - \rho F_d - \rho F_2 = \frac{\partial (\rho V)}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Balance molar de C_2H_4

$$F_o C_{oe(t)} + F_1 C_{oe(t)} + P_{e(t)} - F_d C_{e(t)} - F_2 C_{e(t)} = \frac{V \partial C_e}{\partial t} \quad \text{Ecuación 3}$$

Ecuación linealizada

$$\frac{V \partial C_e}{\partial t} = a_1 C_{oe(t)} + a_2 P_{e(t)} + a_3 C_{e(t)} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$a_1 = F_o + F_1$$

$$a_2 = 1$$

$$a_3 = -F_o - F_1$$

Ecuación en el dominio del tiempo

$$\frac{V \partial C_e}{-a_3 \partial t} + C_{e(t)} = \frac{a_1 C_{oe(t)}}{-a_3} + \frac{a_2 P_{e(t)}}{-a_3} \quad \text{Ecuación 5}$$

Ecuación en el dominio de Laplace

$$C_{e(s)} = \frac{k_1}{\tau s + 1} C_{oe(s)} + \frac{k_2}{\tau s + 1} P_{e(s)} \quad \text{Ecuación 6}$$

2.6.1.4 Cálculo de los parámetros



Se realiza la estequiometría de la reacción (Ecuación 7) para una producción de etileno de 0.118 g/h y una concentración de ozono de 2.14×10^{-4} g/L donde el reactivo límite es el ozono y se obtienen los siguientes resultados:

Consumo de etileno = 62.42×10^{-6} g (C_2H_4)

Etileno restante = $0.118 - 62.42 \times 10^{-6} = 0.11793$ g (C_2H_4)

$F_0 = 536$ m³/h, $F_1 = 134$ m³/h, $P_e = 0.118$ g/h, $C_{oe} = 0.0236$ g/kg, $C_{O_3} = 2.14 \times 10^{-4}$ g/L

$\alpha_1 = 670$ m³/h, $\alpha_2 = 1$, $\alpha_3 = -670$ m³/h

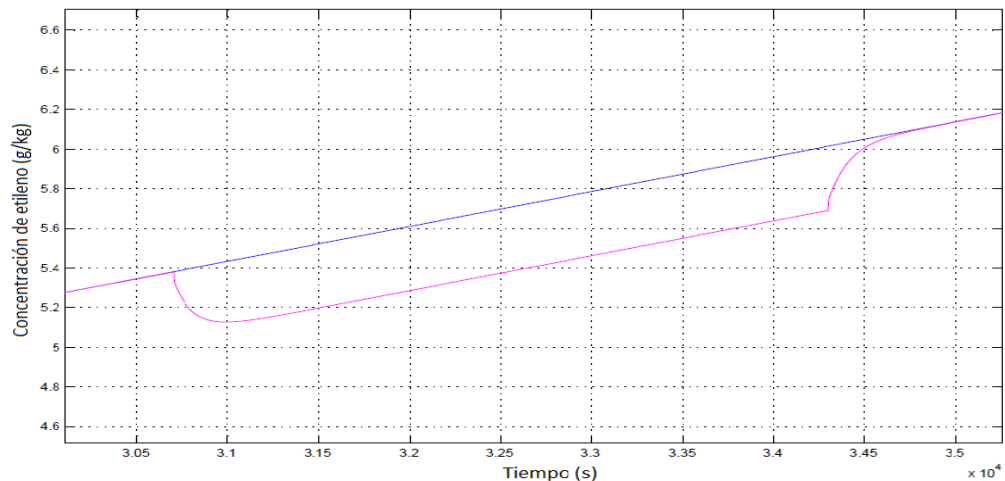
$k_1 = 1$, $K_2 = 5.3734$, $\tau = 107.46$ s.

Para el ajuste del controlador se caracteriza el proceso mediante el modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM).

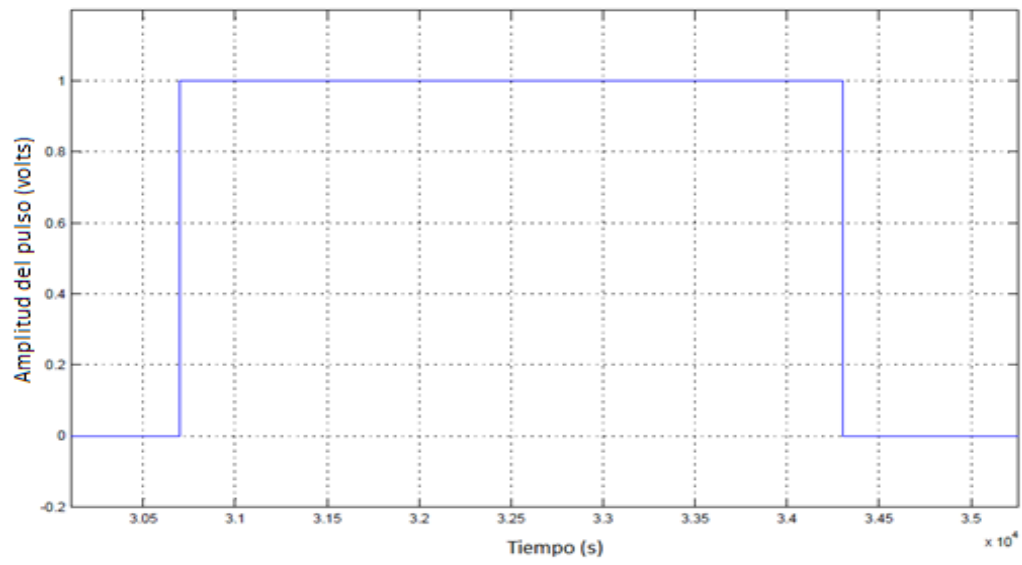
2.6.1.5 Selección del controlador. Para seleccionar el control más óptimo, se deben plantear todos los parámetros presentes en un proceso tan dinámico como éste, esto implicaría un extenso estudio del comportamiento del sistema mediante pruebas que reporten los datos necesarios para diseñar un modelo matemático real que permita simular la reacción del proceso.

A partir del modelo matemático simplificado que se planteó, una estrategia de control en lazo cerrado es la solución para controlar la concentración excesiva de etileno generado por el maracuyá, sin embargo dado que se tienen datos teóricos aproximados y que no se puede garantizar un comportamiento real del sistema a la hora de implementarlo, se decidió proponer un control en lazo abierto con controlador on-off donde se pudo establecer un tiempo de apagado de cinco horas y un tiempo de encendido de una hora para un día de trabajo **Figura 12** y **Figura 13** Además, cumple con requerimientos mínimos de control, proporciona seguridad al personal y es fácil de implementar.

Figura 12. Respuesta de la variable controlada en lazo abierto

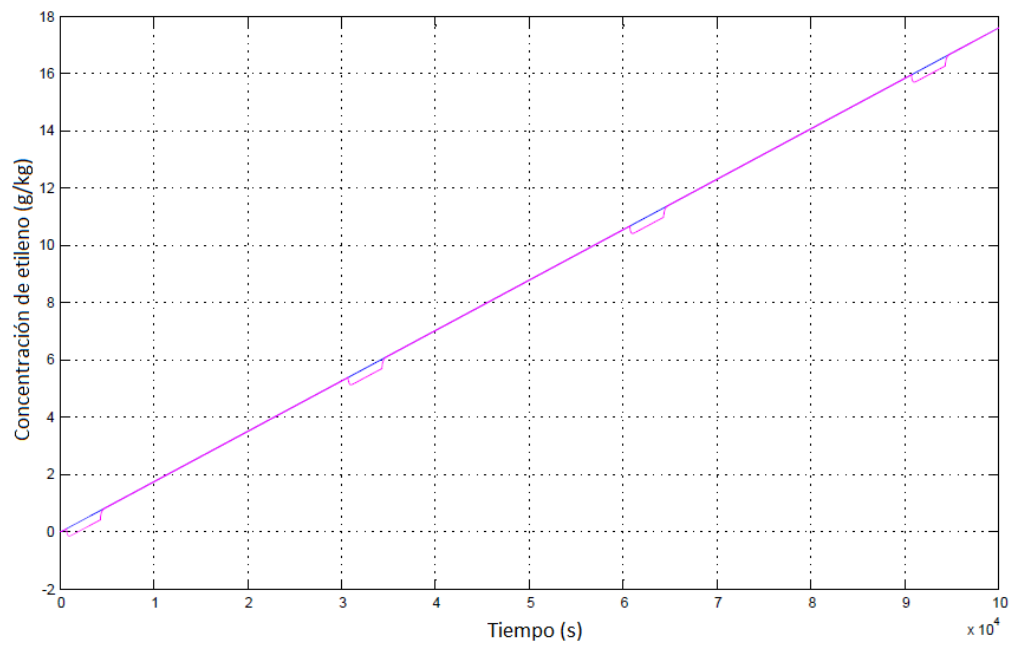


(a)

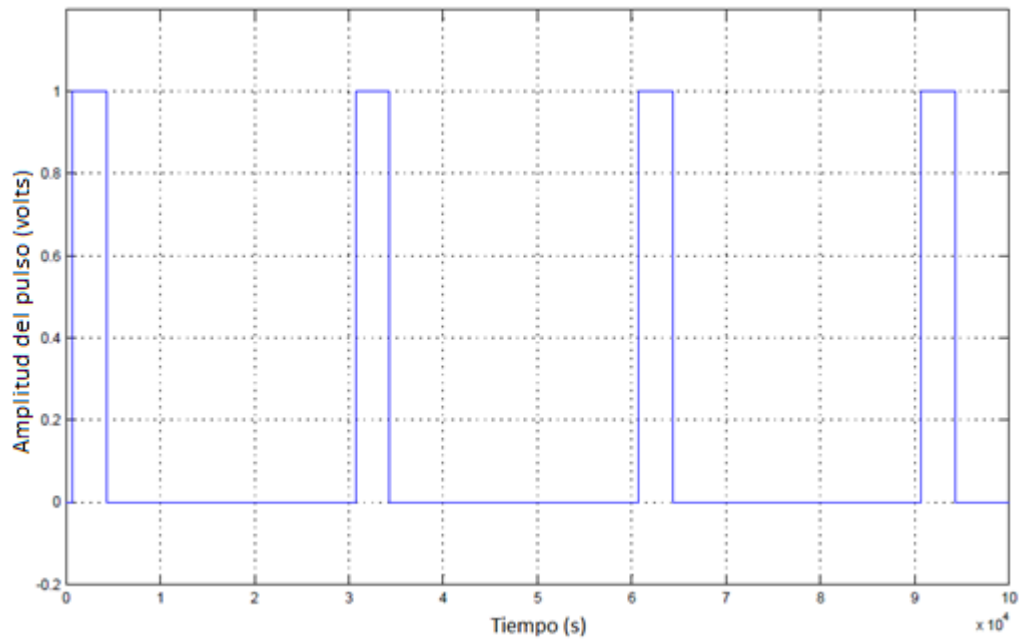


(b)

Figura 13. Respuesta de la variable controlada en lazo abierto en un tiempo de 24 horas.



(a)



(b)

Las líneas azul y magenta de las figuras 11(a), 12(a), representan la concentración de etileno sin control y con control respectivamente, la línea magenta nos muestra como disminuye la concentración de etileno mientras el equipo esta encendido y como aumenta cuando el equipo está apagado. Las figuras 11(b), 12(b), muestran el ciclo de encendido y apagado del equipo.

2.7 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EQUIPO

En la **Tabla 5** se resumen las características más relevantes que se obtuvieron durante el presente trabajo, con el fin de facilitar su implementación en futuras investigaciones.

Tabla 5. Características generales que debe tener el equipo generador de ozono

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA	
Electrodos	Acero inoxidable 316
Dieléctrico	Mica
DIMENSIONES Y GEOMETRÍA	

Geometría de la celda	Placas Paralelas
Espesor y área del dieléctrico	0.3 mm, 30000 mm ²
Espacio de descargas	0.3 mm
Área y espesor del electrodo 1	9025 mm ² , 1 mm
Área y espesor del electrodo 2	30000 mm ² , 1 mm
Área del disipador AVID THERMALLOY referencia 592201B03400G	1271.016 mm ²
Ventilador 500 ft/min	80 mm, 600 rpm
PARÁMETROS NEUMÁTICOS DE OPERACIÓN	
Gas de alimentación	Aire del ambiente
Punto de rocío del gas de alimentación	+ 2 °C (20.62% de humedad relativa)
Presión del gas de alimentación	Pm= 34.47kPa man. Ps = 135.775 kPa abs.
Flujo del gas de alimentación, ϕ_g	2 LPM
PARÁMETROS ELÉCTRICOS	
Frecuencia de operación	17500 Hz
Forma de onda	Senoidal
Eficiencia eléctrica máxima	2.88%
Eficiencia máxima	34.58 g/kWh
Capacitancia equivalente	145 pf
Resistencia equivalente	556.8 k Ω
Densidad de potencia	1000 W/m ²
PARÁMETROS TÉRMICOS	
Potencia total disipada en calor	80%
Temperatura de operación con sistema de enfriamiento	25.52 °C

3. CONCLUSIONES

Los resultados que se observan en el cromatograma de la muestra de maracuyá evidencian la presencia de etileno con una concentración menor a 2 ppm, valor que justifica llevar a cabo el diseño conceptual del equipo. Donde se pudo concluir que para tratar una tonelada de maracuyá es suficiente con 2.14×10^{-4} g/L de ozono sin que afecte las propiedades fisiológicas y organolépticas del maracuyá.

Se diseñó conceptualmente un equipo generador de ozono para controlar la concentración de etileno generado por el maracuyá refrigerado, proceso que hizo necesario diseñar dos celdas generadoras de ozono conectadas en paralelo que cumplen con la demanda de ozono requerido. Para garantizar el funcionamiento adecuado de esta celda y su vida útil, se diseñó un sistema de enfriamiento con aire que mostró ser suficiente para mantener los niveles de temperatura recomendados. Por otra parte el gas de alimentación elegido para la generación de ozono fue el aire el cual garantiza una producción suficiente para el proceso a un costo mucho menor que el oxígeno.

Luego de analizar las condiciones del proceso, se concluye que es necesario realizar un estudio complementario que permita modelar de manera precisa el sistema, esto permitirá que se realicen las simulaciones respectivas del proceso y se diseñe un control automático robusto que optimice el funcionamiento del mismo.

Poder combinar la presencia de ozono con el apagado simultáneo del sistema de refrigeración de una manera controlada y programada, permitirá un uso racional de la energía eléctrica, máxime si durante un periodo promedio de ocho horas nocturnas, no existe una continua apertura del refrigerador. Este aspecto será el objetivo de la segunda etapa de este proyecto.

4. RECOMENDACIONES

Se recomienda mantener el refrigerador cerrado mientras se encuentre funcionando el equipo. La implementación del sistema generador de ozono hace necesario tomar medidas extremas de precaución (**Anexo Q**) y evitar conexiones con fugas, en los alrededores o dentro del generador de ozono ya que esto puede ocasionar concentraciones que estén fuera de los niveles permitidos.

Realizar un estudio de las variables que pueden afectar el proceso de producción de etileno en el maracuyá refrigerado, para así realizar un modelo real del proceso y simular su comportamiento.

En futuros trabajos se recomienda realizar el montaje y sus respectivas pruebas para caracterizar el equipo y determinar parámetros que son fundamentales para variantes en el diseño.

Para futuras investigaciones se recomienda calcular la producción de etileno refrigerado con y sin ozono, para establecer las concentraciones exactas de O₃ que garanticen la seguridad del personal y tiempo más preciso de conservación.

Se recomienda realizar un estudio de factibilidad para determinar la relación costo beneficio para la implementación del equipo generador de ozono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PANTASTICO, E. Postharvest physiology handling and utilization of tropical and subtropical fruits and vegetables. Westport: Avi Publishing, 1981. 70 p.
2. HILLS, B. *Magnetic resonance imaging: Food Science*. New York: John Wiley and Sons, 1998. 98 p.
3. VILLAMIZAR, F. Manejo tecnológico postcosecha de frutas y hortalizas: Manual de prácticas. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2001. 130 p.
4. MELGAREJO, Luz Marina. Experimentos en fisiología vegetal. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2010. 6 p.
5. SALTVEIT, Mikal. *Measuring respiration*. Davis: University of California, 1999. 5 p.
6. VILLAVICENCIO, L, et al. *Ethylene and carbon dioxide concentrations in attached fruits of pepper cultivars during ripening: Scientia horticulturae*. En: Elsevier. Noviembre, 2001. Vol. 91, no. 2, p. 17-24.
7. JARAMILLO VÁSQUEZ, Juan; CÁRDENAS ROCHA, Jaime y OROZCO ÁVILA, Javier. Manual sobre el cultivo del maracuyá (*passiflora edulis*). Bogotá: Produmedios, 2008. 7 p.
8. WILLS, Ron, et al. Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. Zaragoza: Acribia, S.A. 1998. 15 p.
9. SOBERÓN, J.R. et al. Etileno. San Miguel de Tucuman: Universidad Nacional de Tucumán, 2005. 5 p.
10. CARDOZO, Carlos Julio. Caracterización fisiológica, físico-química, reológica nutraceútica, Estructural y Sensorial de la Guanábana. Medellín, 2009, 42 p. Trabajo de grado (doctor en ciencias). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agropecuarias. Departamento de ciencias agronómicas.

11. MUTHUKUMARAPPAN, Kasiviswanathan; HALAWEISH, F y NAIDU, A. Ozone
En: A.S. NAIDU. Natural food antimicrobial systems. New York: Crc press, 2000
18 p.
12. MUTHUKUMARAPPAN, Kasiviswanathan; O'DONNELL, Colm y CULLEN,
Patrick. Ozone processing. En: MOHAMMED, Farid. Mathematical modeling of
food processing. New York: Crc press, 2010, p 607-622.
13. FRENCH, Michael. Conceptual design for engineers. 3 ed. Berlin: Springer,
1999. 6 p.
14. BEUTELSPACHER, Edwin Y CALDERÓN, José. Diseño y construcción de un
generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua. Cuernavaca
Morelos, 2005, 30 p. Trabajo de grado (maestro en ciencias en ingeniería
mecatrónica). Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico cenidet.
15. AGUILAR RAMÍREZ, Jorge. Fuente de alimentación para la generación de
ozono en aplicaciones de desinfección de agua. Cuernavaca Morelos, 2005, 15
p. Trabajo de grado (maestro en ciencias en ingeniería electrónica). Centro
nacional de investigación y desarrollo tecnológico cenidet.
16. LIOU, Huei. *Dynamic and kinetic separated ozone generator*. En: *proceeding or
14 th ozone world congress Dearborn* (Vol 1, Michigan). 1999, 36 p.
17. TOWNSEND, John. *The theory of ionisation of gases by collision*. Londres:
Constable. 1910. 33 p.
18. FERNÁNDEZ ELIZALDE, Jaime. Caracterización eléctrica de una célula
generadora de ozono de tipo placas paralelas. Cuernavaca Morelos, 2005, 2 p.
Trabajo de grado (maestro en ciencias en ingeniería electrónica). Centro
nacional de investigación y desarrollo tecnológico cenidet.
19. RAMÍREZ GUERRERO, Esteban. Estudio del desempeño del amplificador
clase E conmutado a voltaje cero, utilizando diferentes dispositivos
semiconductores de potencia como interruptor. Cuernavaca Morelos, 2004, 21
p. Trabajo de grado (maestro en ciencias en ingeniería electrónica). Centro
nacional de investigación y desarrollo tecnológico cenidet.

20. RICE, Rip. Rationales for multiple stage ozonation in drinking water treatment plants. En: Taylor francis online. Vol, 9, no 1, 18 septiembre 1986, p 37-62.
21. RAMOS, Raúl. Tecnología en la generación de ozono pasado, presente y futuro. En: Asociación internacional de ozono, conferencia regional (19-20, septiembre: México D.F). 2002.
22. SOKAL, N y SOKAL, A. *Class of high efficiency tuned single ended switching power amplifiers*. En: IEEE solid state circuits. Vol; 10. Junio, 1975, p 168-178.
23. COLLENTRO, William. Ozone systems and accessories. En: Pharmaceutical water. System design, operation, and validation. 2 ed. New York: informa healthcare, 2010, p 256-279.
24. LANGLAIS, B. *ozone in water tretment application and engineering*. Washington DC: American Water Works Association, Lewis Publishers, 1991.
25. ASHRAE, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: handbookrefrigeration*. Atlanta : Knovel, 2006.
26. REINA, Carlos Emilio. Manejo poscosecha y Evaluacion de la calidad de maracuyá (*Passiflora edulissims*) que se comercializa en la ciudad de neiva. Neiva : Universidad Surcolombiana, 1999, 135 p.
27. SKONG, L y CHUN, C. *Effect of ozone on qualities of fruits and vegetables in cold storage*: Plant Science. En: *Canadian journal of plant science*. Octubre 2001. Vol 81, n° 4, p 773-778.
28. PARZANESE, Magali. Tecnologías para la Industria Alimentaria. Ozono en Alimentos, Alimentos Argentinos, Minagri. 14 p.
29. OSHA. *Ozone*. {En linea}. {12 noviembre de 2014} disponible en: (www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_259300.html).
30. KELLY, Héctor. Apuntes de descarga en gases. Buenos Aires: instituto de física del plasma INFIP. 5 p.
31. NASSES, E. *Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics*. New York: springer, 1999 13 p.

32. BECKER, K, *et al.* *Non-equilibrium air plasmas at atmospheric pressure.* London: institute of physics, 2005 2 p.
33. OLEG, kudryavtsev; KONOSHI, Wang Y NAKAOKA, M. *A novel pulse density modulate high frequency inverter for silent discharger type ozonizer.* En: *IEEE transactions on industry applications*, 2002. 11 p.
34. CHANG, Jen-Shih; KELLY Arnold y CROWLEY Joseph. *Handbook of Electrostatic processes.* New York : Copyright 1995. 12 p.
35. BULA, Antonio y JUVINAO, Javier. Comportamiento del gel de sílice como filtro deshumidificador en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. En: facultad de ingeniería universidad de Antioquia. 31, junio, 2004, p 73-83.
36. HAIYANG YINHAI ESPAÑA. Gel de sílice azul. {En línea}. {10 abril de 2015} disponible en: (www.geldesilice.com/es/productos/productos-de-gel-de-silice/gel-de-silice-azul-tso/27/10/4).
37. IDEAM. Variabilidad diaria de la temperatura. {En línea}. {28 marzo de 2015} disponible en: (www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variabilidad-diaria-temperatura).
38. CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor.* 2 ed. México: Mcgraw hill, 1998. 61 p.
39. INCROPERA, Frank y DEWITT, David. *Fundamentos de transferencia de calor.* 4 ed. México: prentice hall, 1999. 74 p.
40. AAVID THERMALLOY. *Boar level heat sinks.* Catalogo. 116 p.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR RAMÍREZ, Jorge. Fuente de alimentación para la generación de ozono en aplicaciones de desinfección de agua. Cuernavaca Morelos, 2005, 15 p. Trabajo de grado (maestro en ciencias en ingeniería electrónica). Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico cenidet.
- ASHRAE, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: handbookrefrigeration*. Atlanta : Knovel, 2006.
- BECKER, K, *et al. Non-equilibrium air plasmas at atmospheric pressure*. London: institute of physics, 2005 2 p.
- BULA, Antonio y JUVINAO, Javier. Comportamiento del gel de sílice como filtro deshumidificador en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. En: facultad de ingeniería universidad de Antioquia. 31, junio, 2004, p 73-83.
- BEUTELSPACHER, Edwin Y CALDERÓN, José. Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua. Cuernavaca Morelos, 2005, 30 p. Trabajo de grado (maestro en ciencias en ingeniería mecatrónica). Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico cenidet.
- CARDOZO, Carlos Julio. Caracterización fisiológica, físico-química, reológica nutraceútica, Estructural y Sensorial de la Guanábana. Medellín, 2009, 42 p. Trabajo de grado (doctor en ciencias). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agropecuarias. Departamento de ciencias agronómicas.
- CENGEL, Yunus. Transferencia de calor. 2 ed. México: Mcgraw hill, 1998. 61 p.
- CHANG, Jen-Shih; KELLY Arnold y CROWLEY Joseph. *Handbook of Electrostatic processes*. New York : Copyright 1995. 12 p.
- COLLENTRO, William. Ozone systems and accessories. En: Pharmaceutical water. System design, operation, and validation. 2 ed. New York: informa healthcare, 2010, p 256-279.
- FERNÁNDEZ ELIZALDE, Jaime. Caracterización eléctrica de una célula generadora de ozono de tipo placas paralelas. Cuernavaca Morelos, 2005, 2 p. Trabajo de grado (maestro en ciencias en ingeniería electrónica). Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico cenidet.

FRENCH, Michael. Conceptual design for engineers. 3 ed. Berlin: Springer, 1999. 6 p.

HAIYANG YINHAI ESPAÑA. Gel de sílice azul. {En línea}. {10 abril de 2015} disponible en: (www.geldesilice.com/es/productos/productos-de-gel-de-silice/gel-de-silice-azul-tso/27/10/4).

HILLS, B. *Magnetic resonance imaging: Food Science*. New York: John Wiley and Sons, 1998. 98 p.

IDEAM. Variabilidad diaria de la temperatura. {En línea}. {28 marzo de 2015} disponible en: (www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variabilidad-diaria-temperatura).

INCROPERA, Frank y DEWITT, David. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: prentice hall, 1999. 74 p.

JARAMILLO VÁSQUEZ, Juan; CÁRDENAS ROCHA, Jaime y OROZCO ÁVILA, Javier. Manual sobre el cultivo del maracuyá (*passiflora edulis*). Bogotá: Produmedios, 2008. 7 p.

KELLY, Hector. Apuntes de descarga en gases. Buenos Aires: instituto de física del plasma INFIP. 5 p.

LANGLAIS, B. *ozone in water tretment application and engineering*. Washington DC: American Water Works Association, Lewis Publishers, 1991.

LIOU, Huei. *Dynamic and kinetic separated ozone generator*. En: *proceeding or 14 th ozone world congress Dearborn* (Vol 1, Michigan). 1999, 36 p.

MELGAREJO, luz marina. Experimentos en fisiología vegetal. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2010. 6 p.

MUTHUKUMARAPPAN, Kasiviswanathan; O'DONNELL, Colm y CULLEN, Patrick. Ozone processing. En: MOHAMMED, Farid. *Mathematical modeling of food processing*. New York: Crc press, 2010, p 607-622.

MUTHUKUMARAPPAN, Kasiviswanathan; HALAWEISH, F y NAIDU, A. Ozone En: A.S. NAIDU. *Natural food antimicrobial systems*. New York: Crc press, 2000 18 p.

NASSES, E. *Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics*. New York: springer, 1999 13 p.

OLEG, kudryavtsev; KONOSHI, Wang Y NAKAOKA, M. *A novel pulse density modulate high frequency inverter for silent discharger type ozonizer*. En: *IEEE transactions on industry applications*, 2002. 6 p.

OSHA. Ozone. {En línea}. {12 noviembre de 2014} disponible en: (www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_259300.html)

PANTASTICO, E. *Postharvest physiology handling and utilization of tropical and subtropical fruits and vegetables*. Westport: Avi Publishing, 1981. 70 p.

PARZANESE, Magali. *Tecnologías para la Industria Alimentaria. Ozono en Alimentos*, Alimentos Argentinos, Minagri. 14 p

RAMÍREZ GUERRERO, Esteban. Estudio del desempeño del amplificador clase E conmutado a voltaje cero, utilizando diferentes dispositivos semiconductores de potencia como interruptor. Cuernavaca Morelos, 2004, 21 p. Trabajo de grado

RAMOS, Raúl. *Tecnología en la generación de ozono pasado, presente y futuro*. En: Asociación internacional de ozono, conferencia regional (19-20, septiembre: México D.F). 2002.

REINA, Carlos Emilio. *Manejo poscosecha y Evaluación de la calidad de maracuyá (Passiflora edulis Sims) que se comercializa en la ciudad de Neiva*. Neiva : Universidad Surcolombiana, 1999, 135 p.

RICE, Rip. *Rationales for multiple stage ozonation in drinking water treatment plants*. En: Taylor francis online. Vol, 9, no 1, 18 septiembre 1986, p 37-62.

SALTVEIT, Mikal. *Measuring respiration*. Davis: University of California, 1999. 5 p.

SKONG, L y CHUN, C. *Effect of ozone on qualities of fruits and vegetables in cold storage*: Plant Science. En: *Canadian journal of plant science*. Octubre 2001. Vol 81, n° 4, p 773-778.

SOKAL, N y SOKAL, A. *Class of high efficiency tuned single ended switching power amplifiers*. En: *IEEE solid state circuits*. Vol; 10. Junio, 1975, p 168-178.

SOBERÓN, J.R. *et al*. *Etileno*. San Miguel de Tucuman: Universidad Nacional de Tucumán, 2005. 5 p.

TOWNSEND, John. *The theory of ionisation of gases by collision*. Londres: Constable. 1910. 33 p.

VILLAMIZAR, F. *Manejo tecnológico poscosecha de frutas y hortalizas: Manual de prácticas*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2001. 130 p.

VILLAVICENCIO, L, *et al.* *Ethylene and carbon dioxide concentrations in attached fruits of pepper cultivars during ripening: Scientia horticulturae.* En: Elsevier. Noviembre, 2001. Vol. 91, no. 2, p. 17-24. Ciudad: editorial, 2001. 17 p.

WILLS, Ron, *et al.* *Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales.* Zaragoza: Acribia, S.A. 1998. 15 p.

ANEXOS

Anexo A. Aspectos Generales Del Ozono

El ozono es un estado alotrópico del oxígeno que es termodinámicamente inestable, formado por tres moléculas de este elemento; su energía estándar de formación (G°_f) es positiva, por lo que el proceso de descomposición en moléculas de oxígeno diatómicas (O_2) es espontáneo. Se encuentra en la atmósfera de la tierra al formarse por la radiación ultravioleta que recibe el oxígeno de los rayos solares, fragmentándolo y permitiendo la formación de ozono [11]. Tiene aplicaciones como la desinfección de quirófanos, tratamiento de agua, antimicrobiano y en la industria de los alimentos se usa como desinfectante de superficies que estén en contacto con alimentos, desodorización y conservación [28].

El ozono es un gas con una alta toxicidad para plantas y seres vivos por esta razón se mantienen unos niveles estándar establecidos por la administración de seguridad y salud ocupacional (OSHA) [29], Sociedad American National Standards Institute Americana para Pruebas y Materiales (ANSI / ASTM) [11], la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH), y el industrial estadounidense Hygiene Association (AIHA) [11]. Quienes establecen que la exposición por un periodo de 3 a 6 horas en concentraciones de 0,1 a 0,5 ppm produce irritación de nariz, garganta y podría ocasionar pérdida de visión, el ozono es tóxico en concentraciones 1 a 2 ppm, la exposición a concentraciones de 5 a 10 ppm puede causar edema pulmonar y mayor a 50 ppm es fatal.

Anexo B. Ruptura En Barrera Dieléctrica DBD

En la celda generadora se produce la descarga de barrera dieléctrica. Para entender este proceso hablaremos de la ruptura eléctrica, fenómeno que transforma un material no conductor en uno conductor cuando se supera un umbral de campo eléctrico que permite una precipitación de electrones.

Si el campo eléctrico es homogéneo, la corriente aumenta de la siguiente manera [17, 30].

$$I_{th} = I_{thi} \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde I_{thi} es la corriente inicial, α es el coeficiente de ionización, d es la distancia entre los electrodos y γ es el coeficiente de emisión secundario.

El parámetro α se define como la cantidad de ionización producida por un electrón en un recorrido de longitud unitario (coeficiente de ionización volumétrica). Townsend plantea una aproximación para este parámetro así:

$$\alpha = Ap \frac{Bp}{E} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde E representa el campo eléctrico de los electrodos, A y B son constantes de cada gas y p se refiere a la presión del gas.

El coeficiente γ es dependiente del gas y el material del cátodo e incluye los aportes de los iones positivos, átomos rápidos, moléculas y fotones.

El criterio para la ruptura en campos eléctricos homogéneos establecidos por Townsend ocurre cuando la corriente de la ecuación (10) tiende a infinito es decir si

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1. \quad \text{Ecuación 10}$$

Con la ecuación 3 y el criterio anterior descrito, se determina la tensión de umbral.

$$V_{th} = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right)} \quad \text{Ecuación 11}$$

Esta expresión es conocida como la ecuación de Paschen y se puede reescribir de la siguiente manera [31]:

$$V_{th} = \frac{Bpd}{\ln(pd) + P} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$P = \frac{A}{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)} \quad \text{Ecuación 13}$$

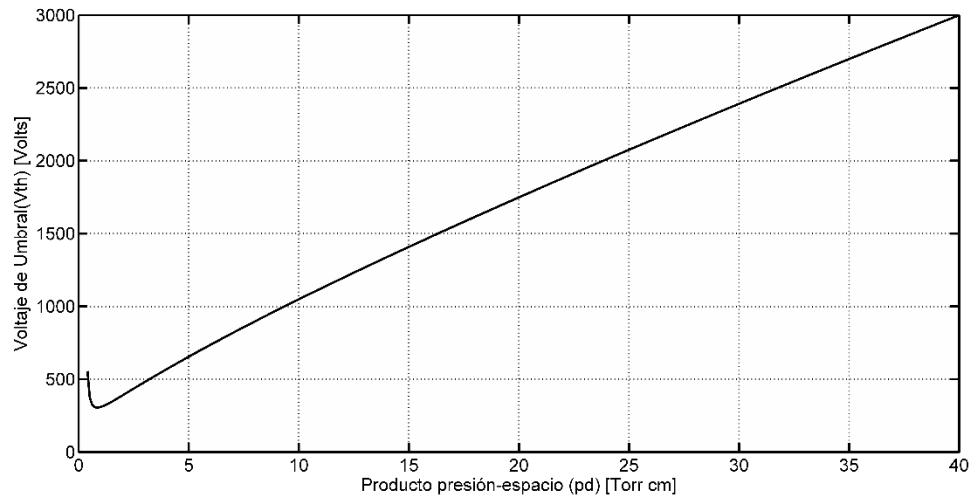
Con las constantes del gas y el valor de γ , se puede obtener la gráfica de la tensión en función del producto de la presión por la distancia entre los electrodos.

En la etapa de diseño de la celda que se describió anteriormente, se escoge el aire como gas de alimentación, cuyas constantes son $A = 15$, $B = 365$ y $\gamma = 0.01$ [18].

Mediante la ecuación de Paschen se obtiene la tensión necesaria para garantizar que el gas sea conductor a una presión y espacio determinado de la celda

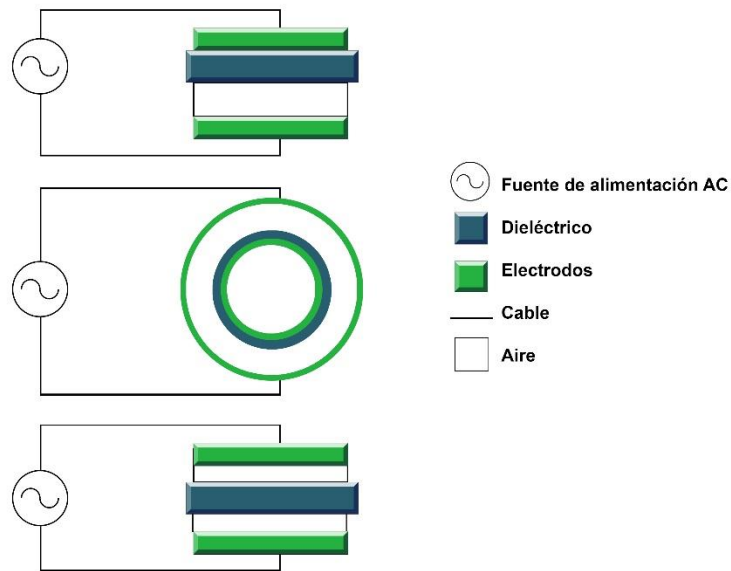
generadora de ozono. En la **Figura 14** se observa el comportamiento del producto presión espacio para determinados valores de voltaje.

Figura 14. Voltaje de umbral a diferentes valores de presión-espacio para el aire



La DBD tiene un dieléctrico entre sus electrodos que limita la corriente, evita la generación del arco eléctrico y obstaculiza la descarga con tensiones de DC. La **Figura 15** muestra diferentes tipos de configuraciones eléctricas de DBD.

Figura 15. Configuraciones eléctricas de las descarga en barrera dieléctrica



La DBD forma numerosos filamentos de corriente de poca duración. La descarga ocurre cuando el voltaje aplicado a los electrodos supere el campo eléctrico de Paschen $\frac{E}{n}$ dentro del espacio. Para obtener dicho campo utilizamos la siguiente ecuación:

$$\frac{E}{n} = \frac{V_{TH}}{nd} \quad \text{Ecuación 14}$$

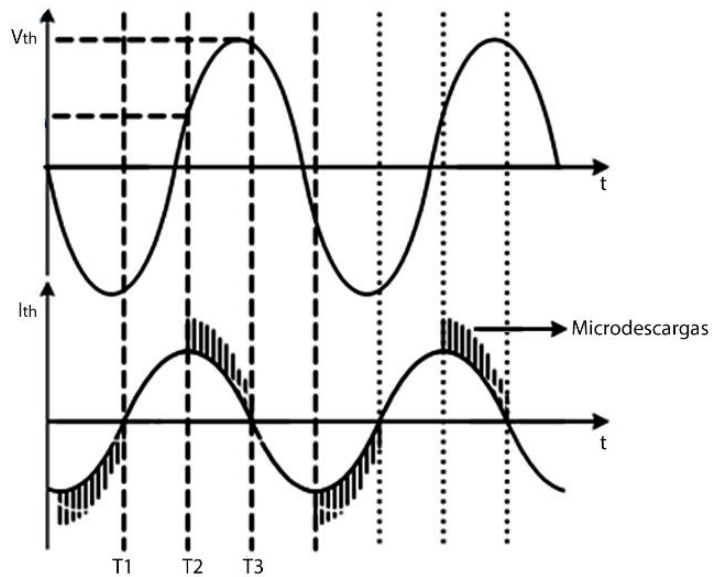
Donde n es la densidad del gas y d la distancia entre el electrodo y el dieléctrico, con presiones altas los filamentos tienen un diámetro del orden de los 0.1 mm y una duración menor o igual a 0.1 us.

Las microdescargas tienen un ciclo de vida que se divide en tres etapas [32].

1. Formación de la ruptura eléctrica.
2. Transporte de la carga debido al filamento de corriente producido.
3. Producción de las reacciones en el espacio de descarga debido a la excitación de átomos y moléculas.

La descarga no ocurre de manera constante, el proceso tiene dos intervalos de tiempo alternantes, el intervalo t_1 a t_2 donde no se produce descarga y el intervalo t_2 a t_3 donde se da la ruptura eléctrica. La ruptura se da cuando el voltaje dentro del espacio es mayor que el voltaje de umbral. La **Figura 16** muestra los intervalos.

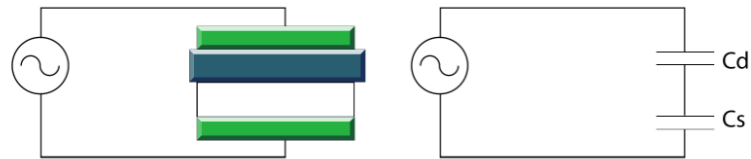
Figura 16. Representación de la actividad de descarga cuando se aplica una tensión sinusoidal.



La impedancia vista en el espacio de la descarga se puede representar mediante una resistencia en paralelo con una capacitancia, la resistencia es del orden de los mega Ohms, así que el modelo se aproxima solo a la capacitancia. El dieléctrico también se comporta como un capacitor, cuyo valor depende de la geometría y

material del que está hecho. Los capacitores quedan conectados en serie y su valor se representa como C_s para el espacio de la descarga y C_d para el dieléctrico, este circuito se llama celda.

Figura 17. Representación circuital de la interrupción de descarga.



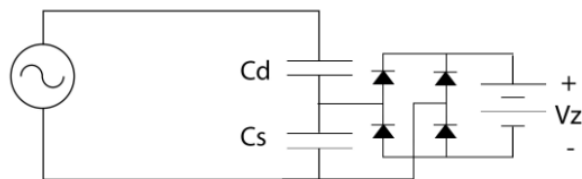
Los filamentos de corriente producidos en intervalos de descarga t_2 a t_3 disminuyen significativamente la resistencia del espacio y provocan que la tensión que allí se genera tenga un valor prácticamente constante llamado voltaje de mantenimiento de la descarga V_z .

Figura 18. Representación circuital del intervalo de descarga.



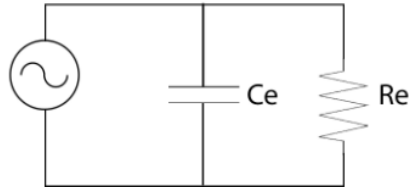
Los semiciclos positivo y negativo se pueden representar mediante el uso de diodos ideales [33].

Figura 19. Representación circuital de la DBD no lineal.



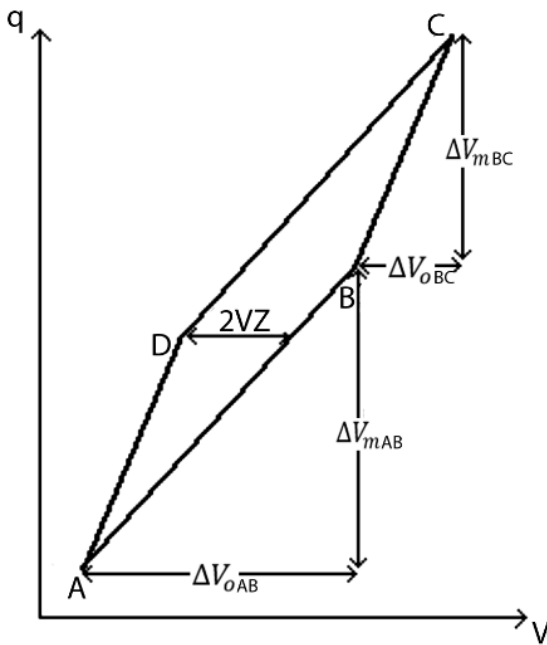
Un circuito equivalente que representa la celda generadora de ozono está compuesto por un capacitor C_e que reemplaza las capacitancias C_s y C_d conectado en paralelo a una resistencia R_e , que representa la fuente V_z y el puente de diodos como se muestra en la **Figura 20**.

Figura 20. Representación circuital de la DBD lineal.



Para establecer los parámetros de la celda se utilizan las figuras de Lissajous [33], se calculan midiendo la tensión de la celda y la cantidad de carga por medio de un capacitor auxiliar C_c conectado en serie con la celda, las dos señales se muestran en el osciloscopio en modo X-Y, el eje X se puede utilizar para V_{th} y el eje Y para V_{C_c} . La figura que se obtiene es un paralelogramo, El lado AB corresponde al intervalo t_1-t_2 donde no se produce descarga y el lado CD al intervalo t_2-t_3 donde se produce la descarga.

Figura 21. Figura de Lissajous



Para el intervalo t1-t2 con AB, la cantidad de carga que atraviesa la celda es $\Delta q = C_{sd}\Delta V_o$, la cantidad de carga que atraviesa el capacitor auxiliar es $\Delta q = C_c\Delta V_m$, con estas dos ecuaciones obtenemos el valor de C_{sd} .

$$C_{sd} = C_c \frac{\Delta V_{mAB}}{\Delta V_{oAB}} \quad \text{Ecuación 15}$$

De la misma forma se realiza el cálculo para el intervalo de descarga t2-t3 con BC.

$$C_d = C_c \frac{\Delta V_{mBC}}{\Delta V_{oBC}} \quad \text{Ecuación}$$

16

Para calcular la capacitancia del espacio C_s utilizamos la ecuación.

$$C_s = \frac{C_{sd} * C_d}{C_d - C_{sd}} \quad \text{Ecuación}$$

17

Para conocer el valor de V_z se realiza la medida como se muestra en la **Figura 21** de Lissajous.

También es importante obtener la potencia consumida por la celda, la manera más sencilla es con la fórmula de Manley [34].

$$P = 4f C_d V_z \left(V_p - \frac{C_d + C_s}{C_d} V_z \right) \quad \text{Ecuación}$$

18

Donde P es la potencia consumida por la celda en Watts, f la frecuencia fundamental y V_p la amplitud máxima de la señal de alimentación.

El voltaje pico puede ser encontrado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{P_g}{4f \left(\frac{\epsilon_r^2 \epsilon_0 A d_2}{\epsilon_r d_1 d_2 + d_1^2} \right) (K p_1 d_2 P_s + K p_2)} + K p_1 d_2 P_s + K p_2 \quad \text{Ecuación}$$

19

Anexo C. Selección De Gas De Alimentación

Tabla 6. Selección De Gas De Alimentación

Parámetros (a presión manométrica de 68, 95 KPa)	Aire ambiente con punto de rocío de +2 °C (20,62% de humedad relativa y 33 °C de temperatura)	Oxígeno con punto de rocío de -60°C y 33°C de temperatura	Diferencia
Concentración de ozono Z	5,2 g/m ³	74.5 g/m ³	14.32 Veces
Eficiencia máxima Em	34,58 g/kWh	180.7 g/kWh	5.22 Veces
Costo de gramo de ozono en pesos COP	\$1048,5679	\$60.204,4231	57.41 Veces

Fuente: [14]

Anexo D. Concentración de gases presentes en la muestra de maracuyá

Tabla 7. Niveles mínimos de cuantificación (NMC=2NMD) del S-HS/GC/TCD/FID (S/N = 5); y concentraciones de gases presente en la muestra de maracuyá

Concentración en la muestra de maracuyá, ppm		
Compuesto	NMC, ppm	Muestra de maracuyá
Dióxido de carbono	2	2265
Acetileno	3	<3
Etileno	2	<2
Etano	2	<2
Metano	2	<2
Monóxido de carbono	2	<2

Anexo E. Materiales Resistentes A La Oxidación

Tabla 8. Materiales Resistentes A La Oxidación

Material	Clasificación
Silicón	Excelente
Titanio	Excelente
A. Inoxidable 316	Excelente
Vidrio	Excelente
Teflón	Excelente
Tugsteno	Excelente
Aluminio	Bueno
PVC	Bueno
Bronce	Bueno
Cobre	Bueno

Anexo F. Selección Del Material Dieléctrico

Las características más importantes que debe presentar el material para garantizar un buen funcionamiento de la celda generadora de ozono y prolongar su vida útil son: alta permitividad relativa, resistente a la oxidación por ozono, bajo factor de pérdida dieléctrica, alta rigidez dieléctrica, bajo costo, buena maleabilidad, buena resistencia a la erosión producto de las microdescargas.

Tabla 9. Selección Del Material Dieléctrico

Parámetros	Myler	Nómex	Myler Dacrón	Mica	Rag Myler	Vidrio epóxico
------------	-------	-------	--------------	------	-----------	----------------

Factor de pérdida mínimo a 25°C	0.0075	0.015	0.01	0.015	0.025	0.034
Factor de pérdida máximo a 25°C	0.013	0.0208	0.013	0.031	0.049	0.041
Permitividad relativa mínima a 25°C	2.68	2.022	1.909	1.43	3.13	2.72
Permitividad relativa máxima a 25°C	2.72	2.09	1.95	1.45	3.31	2.90
Rigidez dieléctrica	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Resistencia al ozono	Bueno	Regular	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Resistencia a la erosión por descargas	Malo	Regular	Malo	Bueno	Malo	Malo
Maleabilidad	Malo	Malo	Malo	Bueno	Malo	Malo
Costo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: [14]

Anexo G. Clasificación Frutihortícola Según La Producción De Etileno

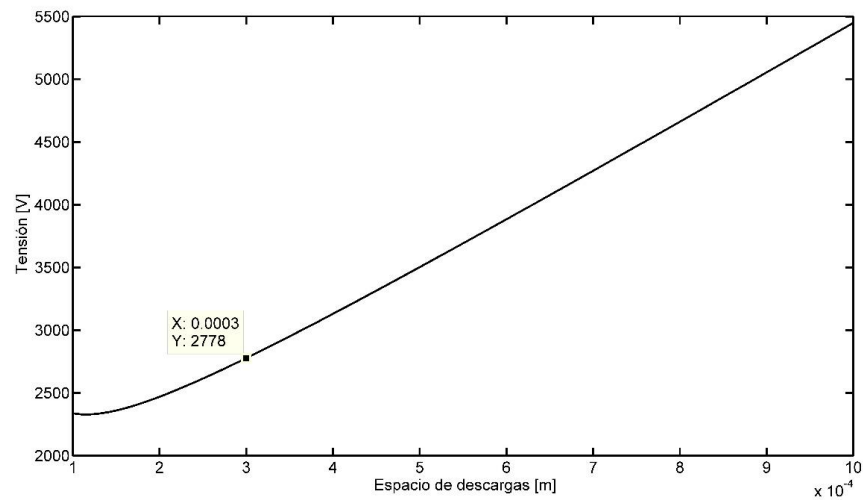
Tabla 10. Clasificación Frutihortícola Según La Producción De Etileno

Clase	Rango a 20°C ($\mu\text{L de C}_2\text{H}_4/\text{Kg}\cdot\text{hr}$)	Especie
Muy bajo	Menor a 0.1	Coliflor, papa, uva cítricos, fresa, granada, raíces, la mayoría de flores de corte, ají, esparrago, alcachofa, cereza
Bajo	0.1 – 1.0	Piña, tamarindo, melón, oliva, pepino, arándano, mora, papa criolla
Moderado	1.0 – 10.0	Plátano, tomate, copoazu, mango, banano, guayaba, higo, melón Honeydew
Alto	10.0 – 100.0	Papaya, pera, melón cantaloupe, feijoa, kiwi, manzana, albaricoque, durazno, ciruela, uchuva, nectarin
Muy alto	Mayor de 100.0	Maracuyá, zapote, chirimoya, gulupa, cholupa

Fuente: [14]

Anexo H. Voltaje Pico Vs Espacios de Descargas

Figura 22. Voltaje pico Vs espacios de descargas



Anexo I. Características De Voltaje Y Rigidez Del Dieléctrico

Tabla 11.
De Voltaje Y
Dieléctrico

Espesores comerciales de la mica en (mm)	Rigidez dieléctrica del fabricante	Voltaje pico máximo recomendado
0.2	18kV	9kV
0.3	27kV	13.5kV
0.5	45kV	22.5kV

Características
Rigidez Del

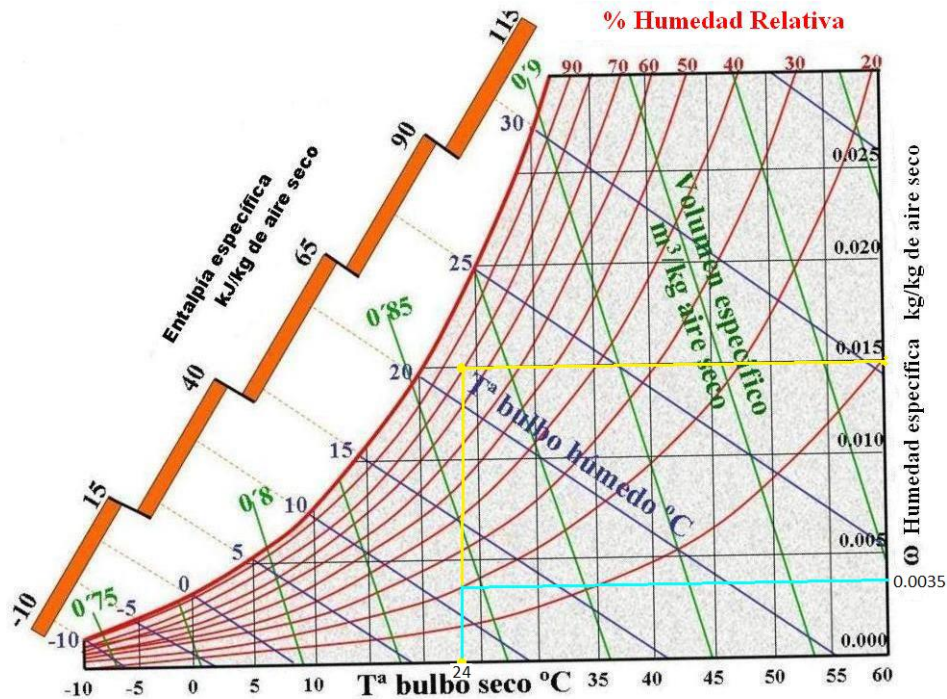
Fuente [14]

Anexo J. Características De La Sílice Gel

El filtro encargado de la desecación del aire está compuesto de la sílice gel azul capaz de adsorber hasta un 40% de su propio peso en agua [35], es un material que permite saber su saturación por medio del cambio de color, purpura para un 35% de humedad relativa y un rosa claro para un 90 %, la sílice gel tiene la propiedad de regenerarse al secarla en hornos y es de bajo costo [36]. Conociendo las características del producto se procede a calcular el volumen del filtro y la cantidad necesaria de sílice gel para mantener la humedad relativa del aire de alimentación en un 20%.

Anexo K. Diagrama De Mollier Del Aire Húmedo.

Figura 23. Diagrama de Mollier del aire húmedo



Anexo L. Características De Los Parámetros De La Red Resonante Del Amplificador Clase E

El circuito se trabaja en resonancia debido a que su empleo genera formas de onda sinusoidales en los dispositivos de conmutación, dando como resultado conmutaciones suaves, esto con la finalidad que los dispositivos se enciendan en presencia de voltaje cero y se apaguen en presencia de corriente cero, así se minimizan las pérdidas por conmutación.

La resistencia R_e , representa la potencia consumida durante la generación de ozono, así como los fenómenos que consumen potencia activa como luz y calor, C_e es el capacitor equivalente de la celda, C_c es una capacitancia que compensa las variaciones de C_e , causadas por los ciclos de las microdescargas, n es el transformador que acopla la etapa de la Red resonante y la etapa de Sintonización.

Para facilitar el procedimiento de diseño de la fuente, se realiza una simplificación del circuito resonante.

Debido a que la capacitancia equivalente C_e es muy pequeña, el valor de la inductancia que compensa los valores de capacitancias parásitas L_s es muy grande, lo que lo hace muy grande y poco práctico. Para solucionar este problema, es necesario el uso de una capacitancia C_c que reduzca el valor de las capacitancias parásitas [14, 15].

Anexo M. Resultados De Simulación Del Amplificador Clase E

Figura 24. Tensión de salida del amplificador

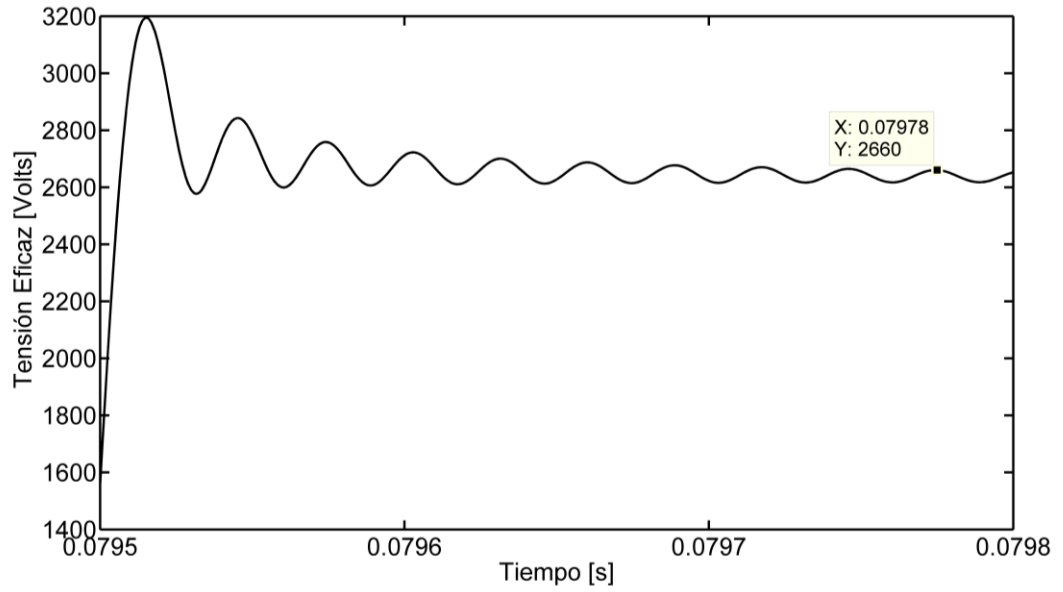


Figura 25. Potencia de salida del amplificador

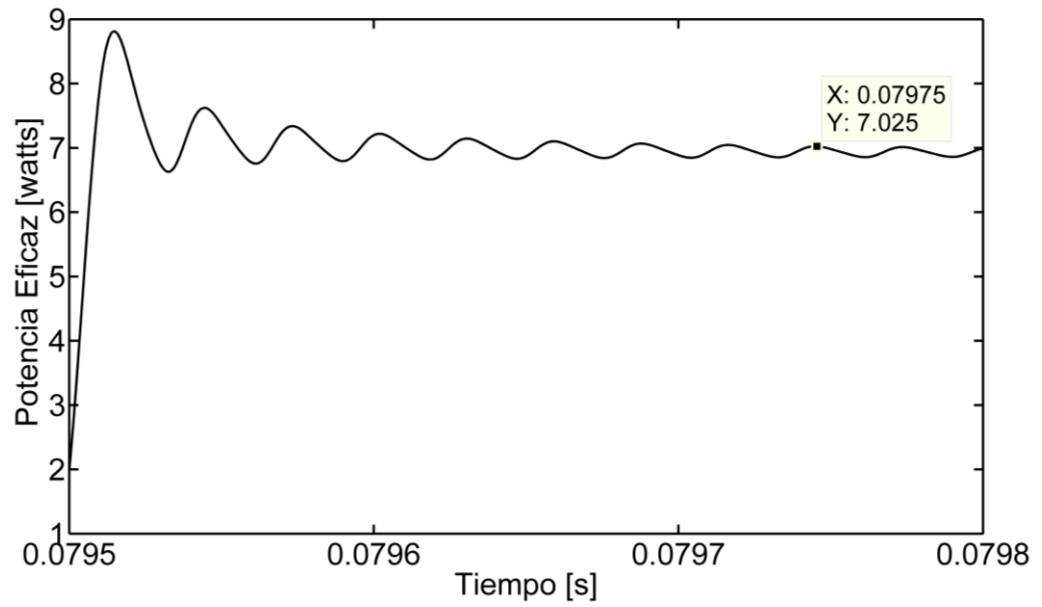


Figura 26. Corriente de salida del amplificador

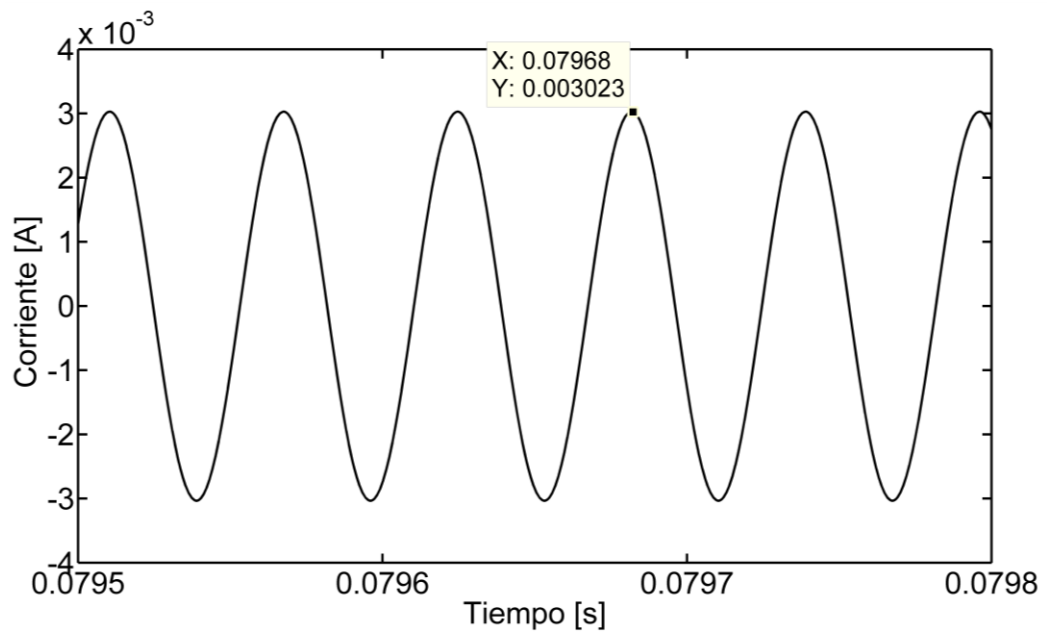


Figura 27. Potencia de entrada del amplificador

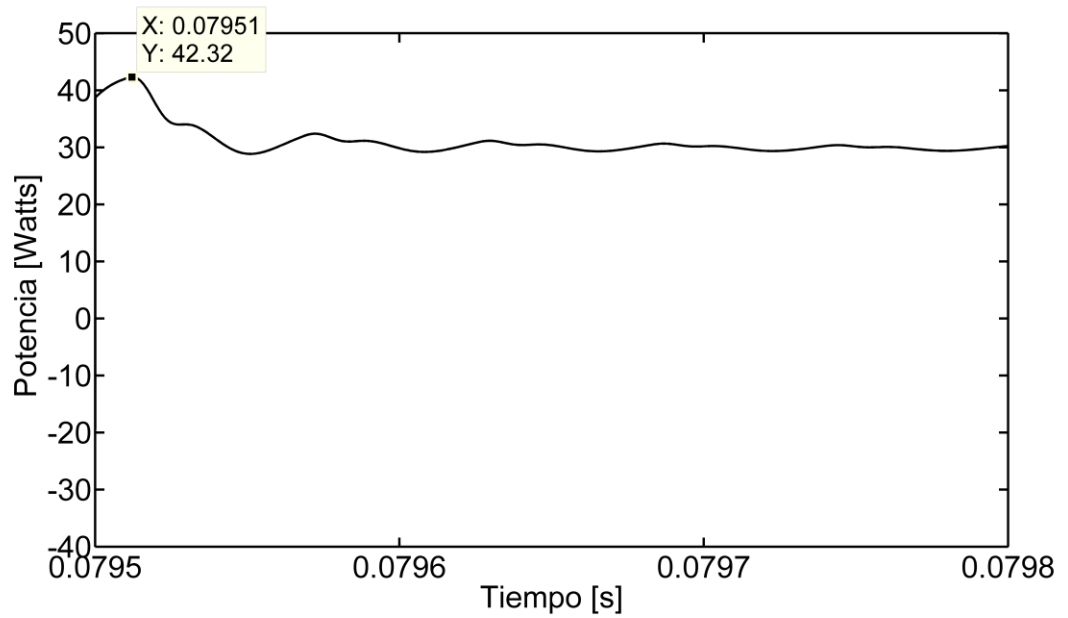


Figura 28. Corriente de entrada del amplificador

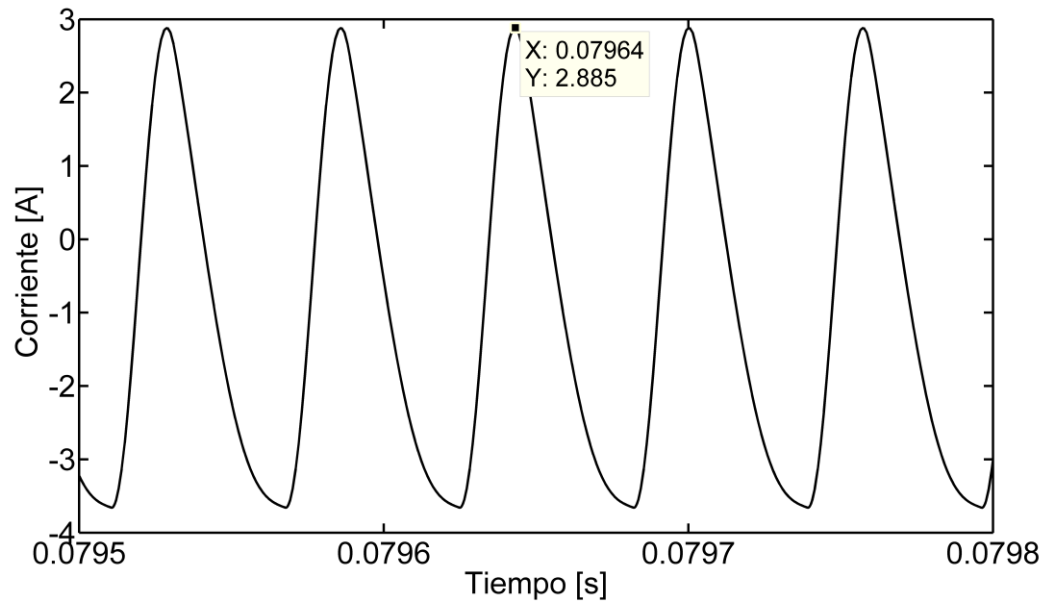


Figura 29. Tensión del transistor

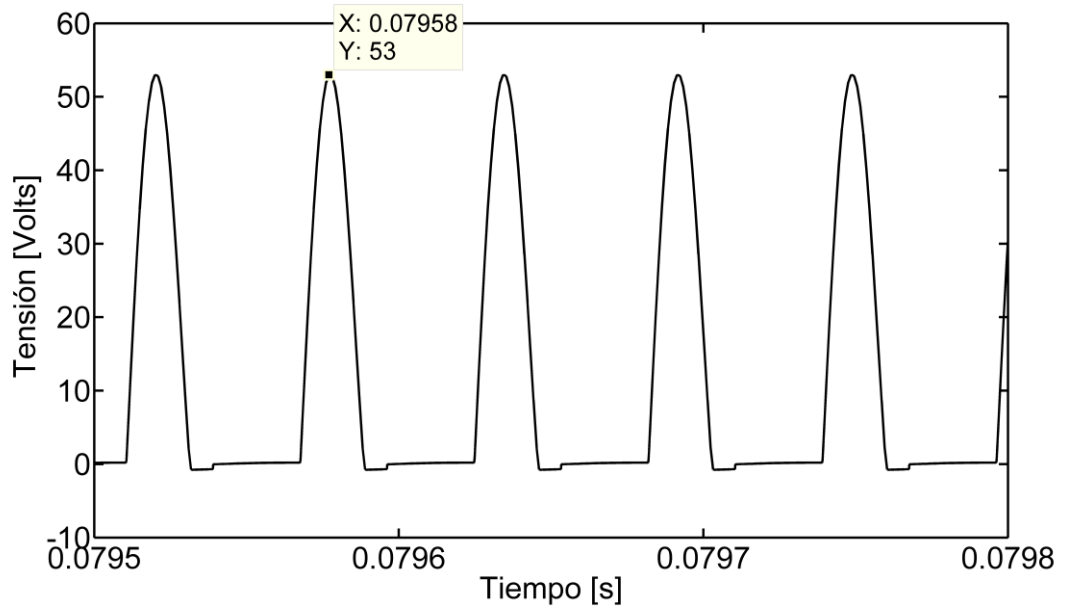


Figura 30. Potencia del transistor

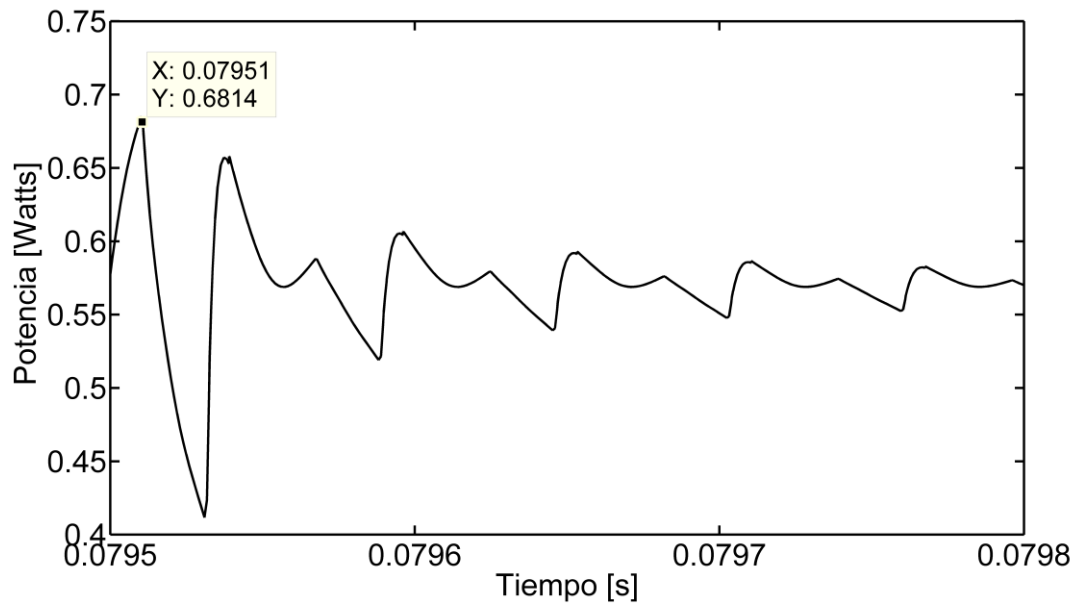
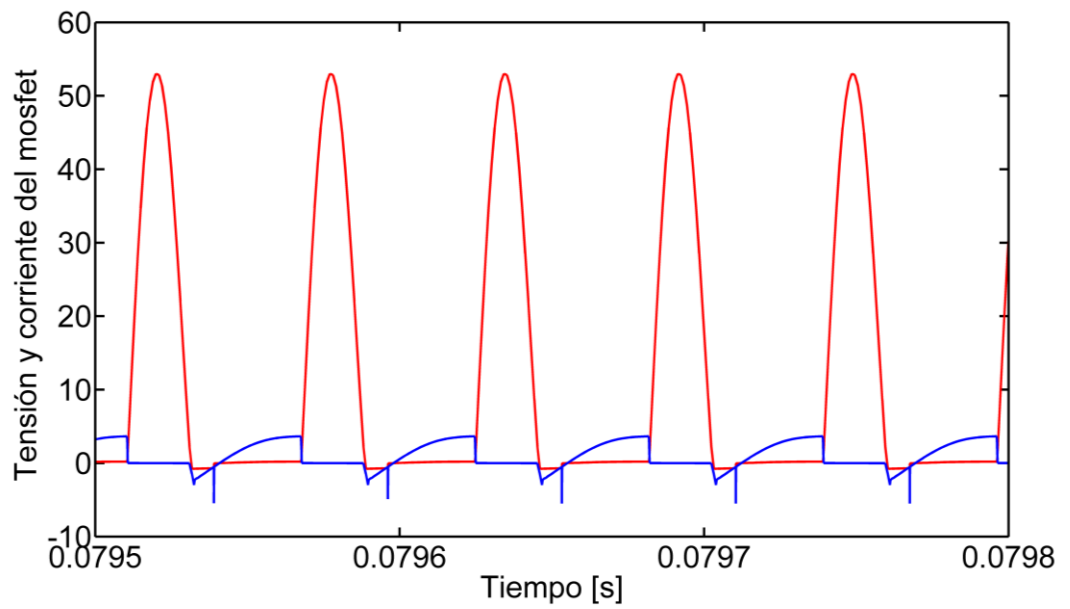


Figura 31. Tensión y corriente sincronizadas del mosfet



Anexo N. Especificaciones Para Realizar Los Cálculos Del Intercambiador De Calor

Temperatura de operación.

La temperatura ambiente máxima que se presenta actualmente en Bucaramanga esta alrededor de $30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la media está en $25,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [37] para efectos del diseño se tomara una temperatura ambiente máxima de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y Para la temperatura de operación de la celda generadora de ozono se tomara un valor de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sabiendo que el equipo en condiciones normales sin sistema de enfriamiento trabaja siempre a una temperatura mayor a la del ambiente.

Especificaciones de los parámetros para calcular las resistencias del sistema

Ya definido el delta de temperatura se procede a calcular la resistencia total del sistema 1 y 2 estas resistencias se expresan como R_{sis1} y R_{sis2} respectivamente. Para realizar este cálculo sumamos las resistencias en serie presentes en cada sistema. Para el sistema 1 se encuentra presente la resistencia por conducción del electrodo 1 ($L1/kA1$), para el sistema dos se suman las resistencias del dieléctrico ($L2a/ka*A2$) y del electrodo 2 ($L2b/kb*A2$). El circuito que representa la celda generadora de ozono y el sistema de enfriamiento se puede observar en la **Figura 10**

Especificación de los parámetros para calcular la resistencia convectiva del disipador.

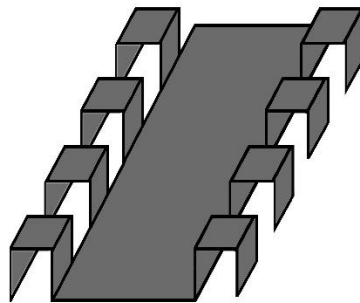
Con el valor de las resistencias del sistema 1 y 2 se calcula la resistencia por convección que debe tener el disipador para garantizar una buena refrigeración y mantener la temperatura de operación requerida. La instalación del disipador debe ir con una junta o almohadilla que evitara el desgaste de los electrodos por efectos de expansión y compresión provocada por el calor, la resistencia de la junta será

expresada como R_{al} y la resistencia del disipador como R_{dconv} . Se Resuelve el circuito de la **Figura 10**.

Después de calcular las resistencias convectivas se obtienen valores cercanos a 1.6 y para garantizar el correcto funcionamiento del disipador se debe cumplir que $R_{dconv} > R_{eleg}$ por esta razón se elige un disipador con una resistencia térmica de 1 K/W

$$R_{eleg} = 1 \frac{K}{W} \quad \text{Ecuación 20}$$

Figura 32. Disipador



Especificaciones para realizar el cálculo del calor disipado para cada sistema.

Para calcular el calor disipado se realizan los cálculos a partir de la resistencia del disipador y tomando las temperaturas de este en funcionamiento, para estos valores se toma de referencia [14], obteniéndose así que el calor disipado es un 21,05 % del calor total transferido.

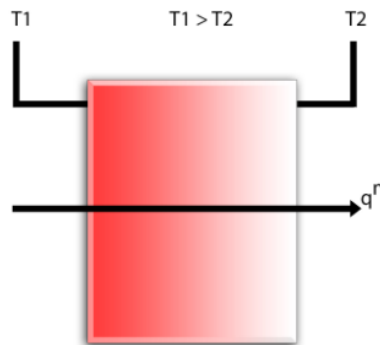
Anexo O. Principios Básicos De La Transferencia De Calor

La transferencia de calor es aquel flujo de energía debido a una diferencia de temperatura. Se conocen diferentes tipos de transferencia el conductivo, convectivo y de radiación

Transferencia de calor por conducción

Es La transferencia de calor que se producirá a través del medio, es decir que la transferencia de calor se presenta cuando hay un gradiente de temperatura en un medio estacionario bien sea un fluido o sólido.

Figura 33. Representación gráfica de la transferencia de calor por conducción



Fuente [37]

Para poder cuantificar la transferencia de calor se hace uso de la ecuación de Fourier que permite determinar la velocidad del calor transferido por unidad de área.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde k es el coeficiente de conductividad térmica del material a usar (**tabla 12**), A es el área de contacto, L es el espesor del material y T las temperaturas de frontera, siendo $T_1 > T_2$.

Tabla 12. Valores experimentales de algunos materiales

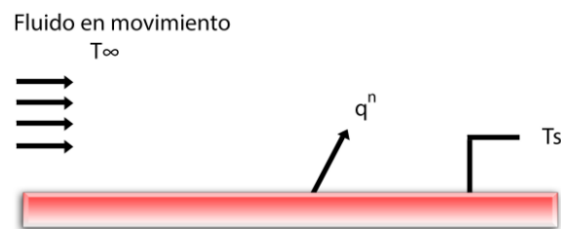
Material	Conductividad Térmica K (W/M.K)
Acero inoxidable AISI 316	13,4
Mica	0,35

Fuente: [38]

Transferencia de calor por convección

Este tipo de transferencia se presenta cuando hay una diferencia de temperatura entre una superficie y un fluido en movimiento. Puede ser de dos tipos según la naturaleza del flujo: por convección forzada que se presenta cuando el flujo en movimiento se da por medios externos y convección libre o natural donde el flujo se mueve por efectos de fuerzas de empuje que nacen por diferencias de densidad.

Figura 34. Representación gráfica de la transferencia de calor por convección.



Fuente [39]

La ecuación 15 es usada para determinar la cantidad de calor transferido por convección en un proceso.

$$q = hA(T_s - T_\infty)$$

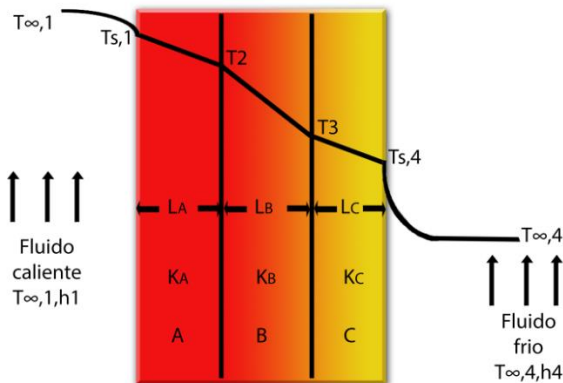
Ecuación

22

Conducción unidimensional de estado estable y resistencia térmica.

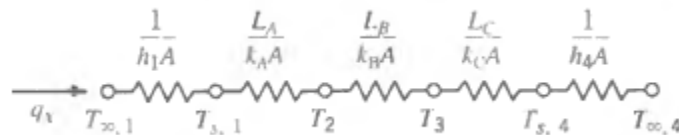
Para efectos del diseño se toma en cuenta la transferencia que se realiza a través de una pared compuesta, debido a la forma que posee la celda generadora de ozono. La explicación de la conducción en una pared compuesta permitirá entender mejor las diferentes transferencias presentes en el sistema.

Figura 35. Transferencia de calor en una pared compuesta



Fuente [39]

Figura 36. Circuito térmico que relaciona la conducción de calor en una pared compuesta.



Fuente [39]

En una pared compuesta la temperatura se presenta como función de una coordenada, realizándose en esta dirección la transferencia de calor. En la **Figura 35** la transferencia de calor del punto T_{∞_1} a T_{s_1} al igual que en el punto T_{s_4} a T_{∞_2} es por convección y la transferencia de calor por conducción se da del punto T_{s_1} al punto T_{s_4} .

Otra manera de cuantificar la transferencia de calor es representando el circuito térmico equivalente del proceso, herramienta útil que relaciona la conducción de calor con su resistencia térmica de la misma forma como se hace con la resistencia eléctrica y su conducción eléctrica, esto se puede hacer ya que existe una relación entre la difusión de calor y la carga eléctrica.

La resistencia para la conducción es:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad \text{Ecuación}$$

23

La resistencia térmica para la convección es:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_{\infty}}{q} = \frac{1}{hA} \quad \text{Ecuación}$$

24

Para calcular la resistencia total de una pared compuesta de diferentes materiales se hace sumando las resistencias calculadas por separado de cada material.

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}$$

Ecuación

25

La transferencia de calor unidimensional es

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\sum R_t}$$

Ecuación

26

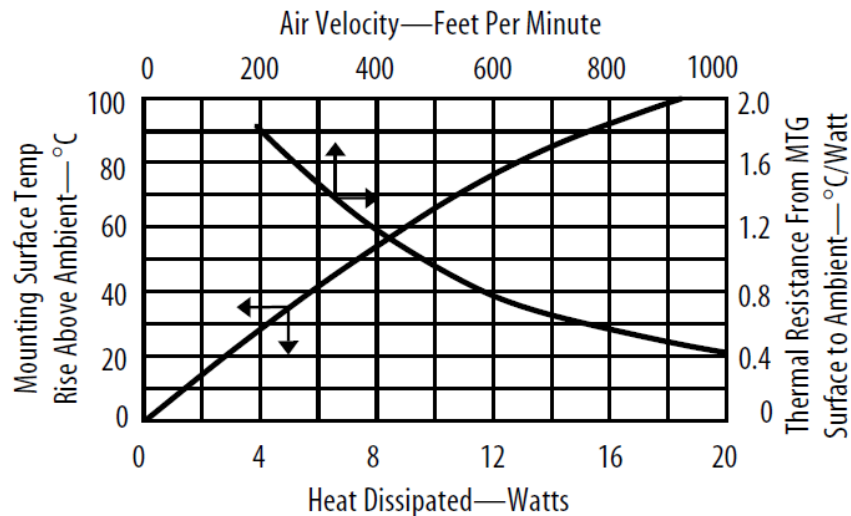
El calor es constante en todo el enmallado entonces:

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\frac{L}{kA}} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{h_2 A}}$$

Ecuación 27


Anexo P. Gráfica del disipador elegido que permite calcular el flujo de aire del ventilador.

Figura 37. Gráfica que permite calcular el flujo de aire del ventilador



Fuente [40]

Anexo Q. Ficha Internacional de Seguridad Química del Ozono.

OZONO		ICSC: 0068 Abril 2009	
CAS: RTECS: CE / EINECS:	10028-15-6 RS8225000 233-069-2	O ₃ Masa molecular: 48.0	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible pero facilita la combustión de otras sustancias. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con combustibles.	En caso de incendio en el entorno: usar un medio de extinción adecuado.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión en contacto con sustancias combustibles.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión.	Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICIÓN		¡HIGIENE ESTRICTA!	
Inhalación	Dolor de garganta. Tos. Dolor de cabeza. Jadeo. Dificultad respiratoria.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio y reposo. Posición de semincorporado. Proporcionar asistencia médica inmediatamente.
Piel	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Gautes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Pantalla facial o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión			
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Ventilar. Traje de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración.		Clasificación GHS Peligro Puede provocar o agravar un incendio; comburente. Mortal si se inhala. Provoca irritación ocular. Provoca daños en los pulmones si se inhala. Provoca daños en los pulmones tras exposiciones prolongadas o repetidas si se inhala.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
		A prueba de incendio, si está en local cerrado. Separado de todas las sustancias. Mantener en lugar fresco.	

OZONO		ICSC: 0068
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Gas incoloro o azulado, de olor característico.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El gas es más denso que el aire.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS La sustancia se descompone al calentarla suavemente, produciendo oxígeno y originando peligro de incendio y explosión. Reacciona violentamente con compuestos orgánicos e inorgánicos, originando peligro de incendio y explosión. Ataca al caucho.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: (trabajo ligero) 0,1 ppm como TWA; TLV: (trabajo moderado) 0,08 ppm como TWA; TLV: (trabajo pesado) 0,05 ppm como TWA; TLV: (trabajo pesado, moderado o ligero <= 2 horas) 0,2 ppm como TWA; A4 (no clasificable como cancerígeno humano) (ACGIH 2009). MAK: Cancerígeno: categoría 3B (DFG 2008).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Al producirse una pérdida de gas, se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irita los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central, dando lugar a alteraciones funcionales. La inhalación de gas a una concentración por encima de 5 ppm, puede causar edema pulmonar (ver Notas). Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. El líquido puede producir congelación.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA Los pulmones pueden resultar afectados por la exposición prolongada o repetida al gas.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: -112°C Punto de fusión: -193°C Solubilidad en agua: ninguna Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1,6</p>		
DATOS AMBIENTALES		
Esta sustancia puede ser peligrosa para el medio ambiente; debe prestarse atención especial a los vegetales.		
NOTAS		
Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles. Debe considerarse la inmediata administración de un aerosol adecuado por un médico o persona por él autorizada. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en Abril 2010: ver Lucha contra incendios y Clasificación GHS.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2011):</p> <p>VLA-ED (trabajo pesado): 0,05 ppm; 0,1 mg/m³</p> <p>VLA-ED (trabajo moderado): 0,08 ppm; 0,16 mg/m³</p> <p>VLA-ED (trabajo ligero): 0,1 ppm; 0,2 mg/m³</p> <p>VLA-ED (trabajo pesado, moderado o ligero, menor o igual a 2 horas): 0,2 ppm; 0,4 mg/m³</p>		