

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto de graduación

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE UN SISTEMA DE
PRODUCCIÓN DE MICRO-NANOBURBUJAS DE OZONO PARA
APLICACIÓN EN RIEGO AGRÍCOLA

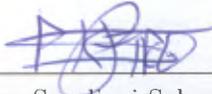
Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la
Universidad de Costa Rica para optar por el título y grado de
Licenciatura en Ingeniería Mecánica

Pablo José de la Hormaza Padilla

Marzo de 2022

Hoja del Tribunal

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el título y grado de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.



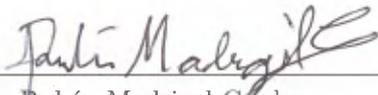
Director de la Unidad Académica

Dr. Pietro Scaglioni Solano
Director Escuela de Ingeniería mecánica



Director del Comité Asesor

Lic. Israel Chaves Arbaiza
Escuela de Ingeniería Mecánica



Comité Asesor

Lic. Rubén Madrigal Cordero
Escuela de Ingeniería Mecánica



Comité Asesor

Lic. Andrés Caldera Schaubek
Escuela de Ingeniería Mecánica



Evaluador externo

Mag. Juan Gabriel Monge Gapper
Escuela de Ingeniería Mecánica



Ponente

Pablo José de la Hormaza Padilla

Índice

1. Introducción	8
1.1. Objetivo General	9
1.2. Objetivos Específicos	9
1.3. Justificación	9
1.4. Antecedentes	10
1.4.1. El ozono	10
1.4.2. Sistemas generadores de ozono	11
1.4.3. Aplicaciones agrícolas de ozono	12
1.4.4. Factores que inciden sobre la preservación de la calidad de las disoluciones acuosas de MNBs en el tiempo	13
1.5. Alcance y Limitaciones	13
1.6. Areas de Pertinencia Temática	14
1.7. Metodología	14
1.8. Patrocinio Y Terceras Partes Interesadas	16
2. Marco Teórico	17
2.1. Micro-nanoburbujas y su generación	17
2.1.1. Propiedades de las Micro-nanoburbujas	17
2.1.2. Métodos de Generación de MNBs	18
2.2. Teoría del Diseño Hidráulico	19
2.2.1. Accesorios y su funcionamiento	19
2.2.2. Selección de Materiales	25
2.2.3. Selección de tuberías	28
2.2.4. Flujo Laminar y Turbulento y Condiciones de Corriente Convectiva Óptimas	32
2.2.5. Cálculo de Pérdidas	36
2.3. Diseño del Experimento	39
2.3.1. Instrumentación	39
2.3.2. Tamaños de Muestra y Pruebas Estadísticas a Realizar	41
2.4. Diseño Electromecánico y Automatización	45
2.4.1. Electrónica de Potencia	45
2.4.2. Automatización del Sistema: Electrónica de Control	50
3. Resultados	53
3.1. Construcción del prototipo 1 (PMV)	53
3.2. Pruebas de Presión	56
3.3. Demostraciones en Campo para Evaluación del Desempeño del Prototipo 1.0	58
3.4. Selección de Componentes para Prototipo 2.0 y su automatización	62
3.5. Resultados de Programación en LD	68
3.6. Planos eléctricos y mecánicos formales para construcción del prototipo 2.0	69
4. Análisis de Resultados	73
4.1. Análisis Estadístico de las Pruebas de Presión	73
4.1.1. Pruebas de bondad de ajuste	73
4.1.2. Pruebas de análisis de varianza	75
4.2. Análisis y discusión del proceso de construcción del prototipo	79

5. Conclusiones y recomendaciones **80**

Anexos.....78

Referencias Bibliográficas.....92

Abreviaturas:

ANOVA: prueba de análisis de varianzas (Analysis Of Variance)

AO: agua ozonificada

ASME: American society of Mechanical Engineers

ASTM: American Society for testing and materials. Organización de estándares sobre materiales a nivel internacional

AWG: tamaños estándar para cables conductores (American Wire Gauge)

DN: diámetro nominal (diametre nominal en francés) medida estándar europea para diámetros de tubería

EC: conductividad eléctrica (electrical conductivity)

HMI: interfaz máquina-humano (human machine interface), cualquier interfaz que permita a una persona interactuar con una máquina

IEC: Comisión electrotécnica internacional (international electrotechnical comisión); entidad de estándares eléctricos a nivel internacional

IP: estándar de niveles de protección contra ingreso de polvo y agua a un componente (ingress protection)

LD: lenguaje de programación en escalera para PLC

LPM: litros por minuto, medida de caudal

MNB: micro-nano burbujas, mezcla de burbujas de ambas magnitudes (micrómetros y nanómetros)

NA: normalmente abierto

NB: nano-burbujas

NC: normalmente cerrado

NEC: National Electrical code; código de estándares eléctricos de USA

NFPA: National Fire Protection Agency; organizacion de estandares para protección contra incendios de USA

NPS: nominal pipe size, medida estándar de diámetros de tubería en USA

ORP: potencial oxido-reducción

PI: propiedad intelectual

PLC: controlador lógico programable

PMV: producto mínimo viable

PPM: partes por millón, medida de concentración

PSA: pressure swing adsorption, proceso de concentración de oxígeno

Resumen

El presente proyecto consistió en el diseño, selección de equipos y componentes, construcción, y determinación de la presión de operación óptima de un sistema que permite producir una disolución de micro-nanoburbujas de ozono en agua, aplicable a tratamientos de riego experimental a mediana escala en fincas agrícolas. Para esto se diseñó y construyó primeramente un sistema de tipo producto mínimo viable con diferentes máquinas readaptadas; disponibles comercialmente para otros fines. Este sistema permitió la exploración de los parámetros de funcionamiento, características de la disolución en sí, y también la familiarización con los componentes necesarios para este tipo de sistema. Seguidamente, se determinó la mejor presión de operación para el sistema, mediante pruebas comparativas simples entre dos diferentes presiones y un análisis estadístico de los datos obtenidos. No se observó ninguna diferencia significativa entre las variables medidas, por lo que se optó por la menor de las dos. Terminadas estas pruebas, se realizaron giras en campo para evaluar el desempeño del sistema y las características requeridas en una máquina de agua ozonificada especializada para el riego agrícola. Se diseñó y ensambló un segundo prototipo, priorizando algunas de estas características, dado el presupuesto limitado. El proyecto concluyó con la creación de un diseño original y compacto, es decir, con todos los componentes en una sola carcasa, de un sistema funcional con capacidad para ozonificar hasta 1000 litros de agua a 5 partes por millón en aproximadamente 30 minutos. Además, el prototipo se logró automatizar exitosamente, de forma que el usuario debe activar solamente un botón para iniciar el proceso, y se apaga de forma independiente al alcanzar la concentración deseada.

Cítese este trabajo como:

P.J. de la Hormaza-Padilla. [Diseño y optimización de parámetros de un sistema de producción de micro-nanoburbujas de ozono para aplicación en riego agrícola] Trabajo final de graduación de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Costa Rica. San José, COSTA RICA, 2022.

Abstract

This project covers the design, component selection, construction, and determination of the optimal pressure of operation of a system capable of producing a solution of micro and nano bubbles in water, which can then in turn be applied to crops through irrigation in small to medium scale agricultural operations. For this, a minimum viable product like system was constructed with different repurposed machines, available on the market but for a variety of different uses. This allowed for exploration of the system parameters, the ozone micro-nano bubble dissolution and familiarization with the components and technology necessary for this type of system. Secondly, the internal pressure of water circulating through the system had to be established. For this, simple comparative experiments with two different pressures were carried out; which showed no significant differences in data after statistical analysis of the relevant variables, and thus the lowest of the two pressures was selected. Once these were finished, field demonstrations were given to evaluate the performance and the required features for an ozonated water system specialized in agriculture. A second prototype was then designed and assembled, prioritizing some of these features (given limited budget). The project concluded with the creation of an original, compact (as in all parts are integrated) machine, with a maximum capacity to ozonate up to 1000 L of water at 5 parts per million in 30 minutes. The prototype was also automated to start with the push of a single button, and turn off independently after the desired concentration is reached.

1. Introducción

El ozono (O_3) es una sustancia con una alta capacidad oxidante, lo cual le da utilidad en procesos en los cuales la oxidación conviene, como los tratamientos de aguas para potabilización o procesamiento de aguas residuales, la desinfección, la eliminación de compuestos orgánicos volátiles del aire, entre otros. ^[1] El O_3 se genera naturalmente en la atmósfera pero también se puede generar artificialmente donde se necesite, mediante sistemas generadores de O_3 . Éstos realizan la ionización de un flujo de aire u oxígeno purificado, generando O_3 gaseoso de alta pureza dispensado a partir del sistema^[2].

En las operaciones de producción agrícola, el O_3 funciona como una herramienta útil para el control de enfermedades de origen biológico y algunas plagas, así como para la estimulación de la productividad de los cultivos^{[3][4]}. Esta herramienta se destaca por importantes beneficios en comparación con tecnologías convencionales como el uso de plaguicidas sintéticos, teniendo un menor impacto ambiental y sobre la salud humana. Además, puede producir beneficios económicos para los productores agrícolas^[5]. Para las aplicaciones de O_3 directamente a los cultivos agrícolas en la etapa de producción, se disuelve su forma gaseosa en agua y se aplica al suelo o a las hojas de las plantas mediante sistemas de riego, aspersores, etc. Sin embargo, el estado del arte del desarrollo de esta tecnología con fines agrícolas es aún altamente incipiente, hasta el momento limitado por varias desventajas de los métodos y maquinaria disponibles en la actualidad, como su alto costo, su alta necesidad de mantenimiento, su complejidad y riesgos de salud ocupacional. ^[4]

Este proyecto se realiza como parte de una investigación a mayor escala que busca optimizar un prototipo de sistema de producción de soluciones acuosas de ozono para cultivos agrícolas. Este prototipo genera e inyecta el ozono gaseoso a la disolución acuosa a través de una bomba que produce burbujas de tamaño muy pequeño, entre las magnitudes de micrómetros y nanómetros, a esta mezcla producida por la bomba se le llaman Micro-nanoburbujas (MNBs) y a la bomba que las produce se le denomina generador de micro-nano burbujas, abreviadas en adelante como MNBs. Esta bomba produce un flujo de agua con las MNBs de O_3 en su salida y con capacidad de recircular la disolución. Se hipotetiza que el desempeño de las soluciones acuosas en términos de la concentración y tiempo de retención del ozono en la disolución acuosa es afectado por diversos factores físicos internos del sistema de generación y los recipientes de almacenamiento, así como externamente por el ambiente y el manejo del agua tratada. De esta manera, la viabilidad de la utilización de estas soluciones acuosas con MNBs de O_3 en operaciones agrícolas se relaciona también a estos factores físicos. Dada la falta de información específica necesaria para optimizar estos factores físicos del sistema siendo utilizado en este proyecto para su implementación práctica a gran escala, se plantea este estudio con el objetivo de dilucidar estas incógnitas.

Se desea comentar antes de proseguir, que el presente proyecto se realiza como parte de una iniciativa empresarial y de investigación; y los resultados, planos, diseños, especificaciones de partes, etc. son propiedad del ponente y de la empresa Oxifire Ltda., y no deben ser reproducidos sin el permiso expreso del autor, ni deben ser utilizados para fines comerciales bajo ninguna circunstancia. El proceso para asegurar la propiedad intelectual del diseño aquí expuesto se ha iniciado al momento de la redacción de este documento.

1.1. Objetivo General

Diseñar un equipo de generación de micro-nanoburbujas de ozono para riego agrícola mediante dos iteraciones de prototipado, considerando factores críticos de diseño y condiciones de operación del sistema.

1.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar un prototipo mínimo viable para generación de MNBs de ozono con su respectiva selección de partes, accesorios y materiales, optimizado para experimentos y demostraciones agrícolas en campo.
2. Realizar un diseño experimental estadísticamente válido para modular y determinar la presión más adecuada de operación del prototipo.
3. Realizar las pruebas diseñadas y reunir los datos necesarios para un análisis estadístico de la influencia de la presión sobre la calidad del proceso.
4. Analizar los datos generados mediante las pruebas.
5. Concluir qué presión de operación genera una disolución de MNB más apropiada para el uso en riego agrícola, en términos de las tasas de ozonificación y pérdida de ozono de las muestras.
6. Proponer las modificaciones pertinentes para el diseño del prototipo que se utilizará para subsecuente validación comercial de la empresa, en función de los requerimientos de la aplicación y las conclusiones generadas por el análisis de la presión de operación.
7. Adaptar o construir el segundo prototipo, integrando las mejoras en funcionalidad y diseño propuestas durante el desarrollo del proyecto.

1.3. Justificación

Los problemas generados en los cultivos agrícolas por enfermedades y plagas son de gran importancia económica y social a nivel mundial en este sector^[6]. Las soluciones actuales para el control de estos problemas predominantemente se basan en las aplicaciones de plaguicidas sintéticos a los cultivos, lo cual a su vez está asociado a riesgos ambientales como la contaminación de cuerpos de agua, acumulación en los suelos, muertes colaterales de otros organismos, entre otras; así como a diversos riesgos a la salud humana de los trabajadores agrícolas que los aplican y de los consumidores que ingieren los productos vegetales contaminados ^{[8][9]}.

Costa Rica se distingue por una de las mayores tasas de consumo de agroquímicos a nivel mundial en términos de kg de ingrediente activo por hectárea (kg i.a./ha) y aquí se manifiestan constantemente los problemas asociados a este nivel de consumo^[6]. Por ejemplo, existen casos de comunidades cuyos recursos hídricos se encuentran altamente contaminados debido al excesivo uso de agroquímicos, imposibilitando su utilización por parte de la población y requiriendo la importación de agua a las comunidades^[7]. Además, dada la tendencia nacional y global hacia la eco-amigabilidad y sostenibilidad de actividades humanas, los mercados internacionales ejercen presión para que países que son importantes exportadores de productos agrícolas disminuyan el uso de estos plaguicidas.^[10]

El uso de O_3 como sustituto de muchos de estos plaguicidas agrícolas soluciona gran parte los problemas ya mencionados. Por ejemplo, no produce ningún residuo derivado de su acción oxidante más que la forma de oxígeno que conforma naturalmente a la atmósfera (O_2) ^[7]. El aplicar AO a los cultivos agrícolas también puede estimular el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas así como su capacidad de tolerar condiciones de estrés y estimular su sistema inmune natural

contra las enfermedades y plagas.^{[4][12][13][19]} Además del equipo necesario, los recursos necesarios para producir y aplicar el O_3 en cultivos agrícolas son abundantes y/o comunes de encontrar en operaciones agrícolas: agua, aire, energía y, en algunos casos, sales minerales. Por estas razones, la aplicación de AO a los cultivos agrícolas es una solución de alto valor para los agricultores y, en algunos casos, produce beneficios económicos significativos. De esta manera, este proyecto es de una gran pertinencia para la región dada su naturaleza agroexportadora, porque existe un potencial de reducir drásticamente el uso de agro-químicos dañinos en variedad de productos, así como aumentar la eficiencia de producción.

Una de las principales limitantes para la implementación de sistemas de ozono en la agricultura, es la falta de desarrollo de soluciones técnicas integrales orientadas a este campo, lo que requiere la determinación y control de muchos parámetros de los cuales no hay información disponible. Más precisamente, el desarrollo de sistemas para la aplicación de O_3 a cultivos agrícolas requiere conocer el comportamiento de las soluciones acuosas de ozono a aplicar a los cultivos agrícolas, ante estos distintos factores físicos que pueden variar durante su producción y sus implementaciones.

1.4. Antecedentes

1.4.1. El ozono

El ozono (O_3) es un compuesto conformado por tres átomos de oxígeno unidos por dos enlaces covalentes, uno simple y uno doble, con resonancia entre los dos y una carga neta positiva en su molécula ^[14]. Es de ocurrencia natural en la atmósfera, generándose por descargas eléctricas en tormentas o por la radiación solar ultravioleta (UV), la cual ocasiona la disociación de las moléculas de oxígeno diatómico (O_2) del aire, llegando a conformar momentáneamente al O_3 . Su temperatura de ebullición es de -110°C y su densidad es 1.3 veces mayor al aire, por lo que tiende a acumularse en forma gaseosa principalmente entre la troposfera y la estratósfera, en la popularmente denominada “capa de ozono”, con una gran importancia en la regulación climática del planeta.^{[2][15]} Es uno de los agentes oxidantes moleculares más fuertes que se conocen (con un potencial RedOx de 2,07 eV), capaz de oxidar compuestos orgánicos con facilidad en el proceso conocido como ozonólisis, el cual genera moléculas de O_2 como único residuo por parte del ozono ^{[16] [17]}

A esta cualidad oxidante se le ha encontrado utilidad en la desinfección de distintos materiales, ozonolizando microorganismos indeseados en distintos procesos de utilidad humana, como el tratamiento de alimentos almacenados, tratamientos de agua y procedimientos médicos.^{[18][19][20]} Más específicamente, se ha demostrado su nocividad contra bacterias, nematodos protozoarios, hongos y virus, con la gran ventaja de ser incapaz de inducir resistencia biológica por parte de los micro-organismos blanco debido a su mecanismo de acción oxidativa fulminante. ^{[20][21]}

Una vez se produce el ozono, debido a su alta reactividad, éste tiende a degradarse rápidamente. En el caso de su producción en el aire, su vida media es alrededor de 30-40 minutos, influenciada principalmente por la temperatura y la cantidad de movimiento en la masa de aire.^[22] En el caso de su disolución en una masa de agua, el ozono reacciona directamente con el agua, así como con otros componentes suspendidos y disueltos, produciendo también una vida media corta, entre 1-20 minutos en agua potable por ejemplo.^[23] La disolución directa de ozono en agua con un tubo venturi o difusor poroso es la técnica tradicional para la preparación de agua ozonificada, y es uno de los puntos que se buscan mejorar con el uso de MNB. Este tema se profundiza más adelante, en la sección 2.1.2.

Como producto de su reacción con el agua, el ozono produce una serie de especies reactivas de oxígeno (ROS por sus siglas en inglés), como peróxidos y radicales de oxígeno, que a su vez también tienen una alta capacidad oxidante.^[24] De esta manera, el agua ozonificada (AO) no solamente contiene al O_3 , sino también a todas estas demás sustancias que pueden contribuir a la acción oxidante que ocasiona el daño a los microorganismos con los que entra en contacto.

1.4.2. Sistemas generadores de ozono

El ozono puede ser generado artificialmente de las mismas dos maneras que se dan en la atmósfera: a partir de la exposición de O_2 a radiación UV (alrededor de 185 nm de longitud de onda) o a descargas eléctricas.^{[25][26]} Debido a su mayor eficiencia y modulabilidad de entre estos dos, la mayoría de generadores de ozono utilizan las descargas eléctricas. Una tercera técnica de generación artificial es la electrólisis del ácido sulfúrico, sin embargo, su aplicabilidad es prácticamente nula debido a su mínima eficiencia.^[2]

Los sistemas basados en estas descargas eléctricas llamadas "descargas de corona" toman un flujo de aire u oxígeno purificado (presurizado o simplemente impulsado) y lo hacen fluir a través de una cavidad que expone cátodos y ánodos dispuestos en diversos diseños a través de los que pasa el gas. El uso de aire como gas de entrada se acostumbra cuando el objetivo es distribuir ozono en el aire para su desinfección, la desinfección de las superficies en un espacio, la degradación de compuestos volátiles, entre otros. La producción de ozono a partir del aire es desventajosa, dado que el gas producido tiene un alto contenido de otras sustancias ionizadas, como el óxido nítrico y el ácido nítrico, capaces de a su vez reaccionar con los materiales y entre ellos, disminuyendo la eficiencia del gas resultante para desinfección.^[28] Éstos equipos para aire suelen compensar esta deficiencia al utilizar un caudal de aire relativamente alto entre los sistemas generadores de ozono.

Por otro lado, en el caso de los sistemas dirigidos particularmente a la producción de agua ozonificada (AO), el gas de entrada al mecanismo de descarga de corona suele ser oxígeno purificado, maximizando la pureza del gas de salida. El mecanismo predominante para proveer oxígeno purificado es la utilización de concentradores de oxígeno de Adsorción por Oscilación de Presión (PSA por sus siglas en inglés). Uno de los principales usos para estos concentradores de oxígeno es con fines médicos, lo cual condiciona en términos de su caudal, pureza de oxígeno y diseño. En ese sentido, los caudales de salida de concentradores de oxígeno individuales son modulables mediante una válvula mecánica entre 0-10 L/min, adecuados para su utilización con pacientes a los que se les deba suministrar oxígeno purificado, produciendo una concentración de O_2 en el gas de salida de alrededor del 90 % por volumen, inversamente proporcional al caudal de salida de gas.^[29]

Considerando este mecanismo, los sistemas generadores de ozono para la producción de AO se componen de dos equipos principales: un concentrador de oxígeno y un generador de ozono. El flujo de entrada de gas entre ambos componentes y a la salida del sistema se da a través de mangueras. La mezcla del gas con el agua se puede realizar mediante un Venturi o mediante difusores porosos, requiriendo éstos últimos una presión de empuje por parte del generador de ozono.^[36] Éstos componentes se conectan directamente a la salida del sistema generador de ozono. Ambos mecanismos producen burbujeo del gas en el agua, permitiendo la difusión del gas desde las capas externas de la burbuja al líquido y disolviéndolo en el agua.

1.4.3. Aplicaciones agrícolas de ozono

Las aplicaciones de AO se realizan a cultivos agrícolas con dos objetivos principales: la protección y la estimulación de los cultivos. Para la protección, se basan en los mecanismos de desinfección oxidativa directa del ozono contra los distintos microorganismos que parasitan o infectan a las plantas y a los mecanismos indirectos de estimulación a nivel interno de la producción de hormonas que median la respuesta inmune de las plantas ^{[12][13][19]}. El AO se puede aplicar mediante dispositivos de fumigación personales o aspersores para fumigación acoplados a maquinaria (tractores, drones, etc.). Estas aplicaciones de AO se realizan a las partes aéreas de las plantas (hojas, frutos, tallos, entre otros), hasta el suelo y las raíces, comúnmente mediante la fumigación o bien mediante aplicaciones de mayor caudal dirigidas al suelo y/o la base de la planta.^{[3][30]}

Las concentraciones de ozono disuelto en agua adecuadas para los propósitos de protección están por encima de los 0.5 ppm y por debajo de 5 ppm, nivel a partir del cual se ha observado la capacidad del AO de causar estrés oxidativo y/o daños visibles de los tejidos de la planta de manera crónica.^{[5][31][32]} Considerando que estas concentraciones son relativamente altas entre las concentraciones logrables a nivel práctico utilizando sistemas de ozono basados en la difusión porosa o inyección por venturi del gas al agua y que el proceso de aspersión puede disminuir la concentración de ozono disuelto en el agua entre un 80-90 por ciento al presurizar el líquido y disminuir el tamaño de las gotas, se requiere entonces contar con una fuente de agua ozonificada a una alta concentración (alrededor de 5 ppm) relativamente cerca del sitio donde se va a aplicar para poder abastecer a los equipos de aplicación.^{[33][34]}

Por otro lado, si bien las aplicaciones a la parte aérea también pueden ocasionar cierta estimulación del crecimiento y vigor de las plantas, las aplicaciones de estimulación más efectivas se realizan mediante sistemas de riego que provean un caudal suficiente para cubrir de AO el volumen de suelo donde se encuentran las raíces del cultivo (Ing. Aarón Fajardo, Comunicación personal). Para ésto, se recurre a sistemas de riego que pueden proveer estos caudales de manera más eficiente. El objetivo del O_3 en este material aplicado no es necesariamente la oxidación de patógenos, sino más bien proveer oxígeno a la planta desde sus raíces, lo cual acelera su metabolismo y así estimula su crecimiento y desarrollo. ^{[4][35]} El caudal de agua necesario para la profundización en el perfil del suelo que provea la cobertura necesaria de las raíces suele ser mucho más alto que el caudal de aplicaciones para la protección de las plantas. Las concentraciones necesarias para la estimulación por su lado requieren de una menor concentración, para lo cual convencionalmente se recurre a la inyección de una disolución de alta concentración (alrededor de 5 ppm) con un factor de dilución alrededor de 1:10 al caudal de riego principal.

En ese sentido, los sistemas de ozono para operaciones agrícolas suelen requerir la capacidad de producir AO para aplicaciones de alta concentración de manera que esta pueda disponibilizarse a los equipos de fumigación o aplicación en el campo y que puedan proveer AO apta para inyectarse con una dilución de al menos 1:10 a los caudales de riego de la operación durante los tiempos de riego (desde pocos minutos a varias horas o días enteros).

1.4.4. Factores que inciden sobre la preservación de la calidad de las disoluciones acuosas de MNBs en el tiempo

Mediante experimentación inicial del sistema de producción de MNB se observó como primer factor importante, que el variar la presión causa un gran efecto en la calidad visual de la disolución a la salida; que se ve como un líquido más blanco espumoso a mayor densidad de MNB. Además, es el factor de operación más modulable y fácil de medir.

Otros factores, aparte de la presión, que también se hipotetiza que podrían funcionar son: la cantidad de recirculaciones por el sistema, temperatura, pH, contenido iónico, exposición UV, agitación del recipiente y tasa de flujo de ozono. Si bien la evaluación de estos factores no se incluye en el alcance del proyecto, es de gran importancia considerarlos, y las pruebas generadas en el mismo servirán de base para evaluarlos en un futuro.

Para pruebas futuras en las estaciones agrícolas experimentales y fincas, se debe saber con certeza antes de invertir en accesorios e instalar el sistema de riego, que éste funcionará apropiadamente y cumplirá con generar las MNB más estables posibles a nivel físico; sabiendo cómo se va a adaptar e instalar el prototipo y qué modalidad de riego es más viable según los resultados obtenidos. Además, se debe diseñar un equipo que sea fácil de operar incluso para alguien que no esté familiarizado, por lo que determinar todas las variables que permiten un producto/sistema final óptimo son de gran ayuda para transmitir el conocimiento a quien opere el equipo, o incluso automatizar su funcionamiento.

1.5. Alcance y Limitaciones

En cuanto a los parámetros a evaluar, el proyecto se limitará a presión solamente. Este es sólo uno de varios factores que se deben explorar en el proyecto a gran escala, sin embargo da un precedente de uso del equipo para pruebas de factores físicos que se puede replicar para otros parámetros, ya que existen otros factores físicos como los mencionados en el apartado anterior; y aspectos químicos que se escapan del alcance de este proyecto, que también afectan sobre la calidad de la disolución de MNB y sobre su efectividad en sistemas de riego.

Por otro lado, sí se incluyen en el alcance del proyecto las tareas de diseño y construcción de los sistemas físicos. Tanto del prototipo para hacer las pruebas como el sistema final para uso experimental en fincas agrícolas como validación comercial del producto. Se incluye la adquisición de los equipos y accesorios, muchos de los cuales ya se han ido procurando, diseño y realización de experimentos estadísticamente significativos para determinar de forma aislada la mejor presión de operación para el equipo. Finalmente se realizará la recolección de datos, análisis estadístico y conclusiones pertinentes.

Se propondrán una serie de mejoras en el diseño para la segunda iteración del prototipo, incluyendo la selección de nuevos componentes, automatización del proceso, planos eléctricos y mecánicos, y construcción del mismo, así como la discusión de las decisiones de diseño que se toman a lo largo del proceso.

Se escapa del enfoque del proyecto la discusión de aspectos agronómicos y discusión profunda de conceptos biológicos y bioquímicos que explican la acción del ozono sobre los cultivos y los patógenos en el posterior desarrollo del proyecto, ya que la información teórica relevante se ha expuesto en los antecedentes y justificación. Basado en las reacciones de productores ante el PMV respecto a su funcionalidad y características, y el uso del mismo por parte de nuestro propio equipo, si mencionará la información anecdótica que haya ayudado a justificar las mejoras que se propo-

nen para el segundo prototipo. La validación experimental de la efectividad de la solución sobre patógenos en cultivos no es relevante a este proyecto, y se realiza paralelamente por el equipo de investigación y desarrollo agrícola de la empresa durante las mismas giras utilizadas para observar el desempeño del equipo.

1.6. Areas de Pertinencia Temática

- Ingeniería Mecánica: electrónica y electromecánica, diseño de tuberías; diseño 3D, termofluidos, metrología, materiales, mecánica del sólido, etc.
- Estadística
- Agronomía
- Química
- Biología
- Nano-tecnología y microscopía

1.7. Metodología

El primer paso para la realización del proyecto es la consecución de los equipos y materiales requeridos para el sistema prototipo de generación de MNB. Esto implica utilizar criterios ingenieriles para su construcción, selección de accesorios, realizar conexiones, verificar la segura operación por medio del diseño hidráulico y la verificación del espesor. También se debe relizar al inicio un estudio bibliográfico sobre las áreas temáticas pertinentes a los objetivos del proyecto, aclarando así los fenómenos que dictan, por ejemplo, la generación de una micro-burbuja y una nano-burbuja y como esto se ve afectado por los parámetros que se desean variar. Se debe contemplar en este primer prototipo la funcionalidad para poder llevar a cabo la experimentación. Estos aspectos se discuten en la sección 2.2

Una vez construido el sistema, se procede a diseñar y aplicar una serie de experimentos que permitan aislar el factor a estudiar, se debe determinar un tamaño de muestra, establecer la confiabilidad, error y potencia de la prueba y recurrir a la experimentación previa con el equipo para calcular el tamaño de muestra. Mediante el análisis estadístico del factor de operación propuesto, se podrá dilucidar cómo este favorece la producción y retención de micro-nanoburbujas de ozono o cómo la perjudica. Para este análisis es muy importante tener en consideración los límites y rangos que se consideran como aceptables o aplicables a la agricultura, por lo que en el diseño de experimentos se define la variable de respuesta y cómo se obtiene este valor como un sólo dato a partir de mediciones a lo largo de un período de tiempo, y con qué criterio. Es relevante mencionar que aunque el ORP es indicativo del potencial oxidante de la muestra, no refleja el contenido de ozono en la muestra. Por este motivo también se cuenta con un medidor fotométrico de ozono disuelto en agua el cual da una idea más real del contenido en partes por millón; no obstante, este equipo tampoco está diseñado para ozono medir ozono en burbujas tan pequeñas. La verdad es, que ningún equipo encontrado en el mercado es específico para medir contenido de ozono en forma de micro-nanoburbujas suspendidas en agua; por ser una aplicación relativamente incipiente. Se observa con pruebas preliminares que la duración de una prueba es de unas 8 horas. Así, teniendo para la experimentación 5 diferentes estañones intercambiables. Se pueden generar 5 pruebas en paralelo cada día durante la fase de experimentación.

Finalmente, cuando se establezcan las condiciones óptimas para producción y retención de las micro-nanoburbujas bajo las condiciones requeridas, se adaptará el equipo con modificaciones que permitan su instalación o uso en fincas agrícolas, para iniciar con los tratamientos en cultivos a una escala estadísticamente significativa y posterior desarrollo de la investigación. Una vez determinadas estas adaptaciones, se incluirá en el sistema un PLC para automatizar el procedimiento de operación óptimo determinado mediante las pruebas; así como proponer en detalle una incursión del proyecto en la revolución industrial 4.0 por medio de control y monitoreo del sistema desde la nube. Con la adaptación y automatización del sistema listo para operar se concluiría el presente proyecto. Se propone para el desarrollo del proyecto, el siguiente cronograma de trabajo con lo que se debe completar mes a mes:

Cronograma de Trabajo	
Mes	<i>Se contempla una duración de 12 meses para el desarrollo del proyecto.</i>
1	Se inicia con el proyecto, se redacta la propuesta y se define el marco temático, orden de capítulos y se inicia con la investigación
2	Se hace un ensamble empírico del equipo y pruebas exploratorias para definir los factores a evaluar. Se delimita definitivamente el alcance del proyecto.
3	Se realiza la investigación y cálculos de diseño hidráulico.
4	Se realiza la investigación sobre nano-burbujas. Se define también el diseño de experimentos, cantidad de presiones y recirculaciones a usar y tamaño de muestra.
5	Se realiza la investigación pertinente a los sistemas electromecánicos, electrónica de potencia y automatización del sistema
6	Se prepara el material para la presentación de la propuesta. Se realiza la presentación de la propuesta y se redacta el trabajo escrito para su entrega.
7	Se construye el equipo según las consideraciones de diseño establecidas para realizar las pruebas.
8	Se inicia con la realización de pruebas y recolección de datos.
9	Se continúa con las pruebas y recolección de datos. Se realizan las conclusiones de los experimentos y se proponen adaptaciones del sistema con base en estos.
10	Se realiza la programación del PLC y se genera un código LD como referencia
11	Se proponen los mecanismos para control desde teléfono móvil.
12	Preparación de documento escrito final y defensa pública. Se terminan de generar todos los planos y diseños

1.8. Patrocinio Y Terceras Partes Interesadas

- Banca para el Desarrollo/AUGE: el proyecto ya finalizó con éxito la etapa de capital semilla de AUGE y se encuentra actualmente en la etapa de puesta en marcha con AUGE. El proyecto AUGE también provee asesoría y redes de contactos a empresas incipientes como el caso de esta.
- OxiFire Ltda.: Nombre comercial de la empresa "start-up" para la cual se desarrolla este proyecto. Principalmente, se debe conocer que la visión final de la investigación en la que se incluye este proyecto, es la integración a nivel comercial de soluciones de ozono en la agricultura a un precio accesible y que sean prácticas para estas aplicaciones. Permitiendo posiblemente no solo un beneficio económico sino un cambio radical en el impacto de las actividades agrícolas a nivel nacional y global. En este aspecto, se quisiera hacer saber al comité lector de la propuesta que aunque toda la información generada será incluida en el documento final y en la defensa pública, se debe llegar a un acuerdo sobre la información sensible y la confidencialidad. El conocimiento generado le proporcionará a la empresa "start-up" una ventaja competitiva en la comercialización de estas soluciones. Y cualquier usurpación o mal uso de información sensible podría ser extremadamente perjudicial para la viabilidad de esta solución y su imagen con el público en general. El potencial del ozono no lo libra de peligros, ni de la posibilidad de fracasar en ciertos casos; y se deben realizar las pruebas correspondientes para probar su efectividad a largo plazo antes de que el conocimiento técnico generado se pueda compartir sin arriesgar el futuro de la empresa.
- PROINNOVA: Con el fin de asegurar el buen uso y confidencialidad de la información sensible relevante al desarrollo y comercialización de esta solución, se recurre a esta institución para asesoría en temas de protección de propiedad intelectual. Mediante reuniones con esta entidad, se han llegado a considerar los diseños industriales y los modelos de utilidad como posibles herramientas para proteger algunos de los materiales generados en el transcurso de este proyecto.

2. Marco Teórico

2.1. Micro-nanoburbujas y su generación

2.1.1. Propiedades de las Micro-nanoburbujas

Ante las dificultades logísticas que implican el corto tiempo de retención del ozono disuelto en agua dentro de los esquemas agrícolas con las necesidades mencionadas, las Micro-nanoburbujas (MNBs) ofrecen una posible solución. Estas se caracterizan por tener un rango de diámetros entre 10 nm - 10 μ m, lo que les confiere menor velocidad de ascenso a la superficie del líquido, tasas de transferencia de masas más rápidas y presiones internas más altas, todas características que aumentan la miscibilidad y durabilidad de los gases contenidos en la burbuja en el agua^[37]. Por ejemplo, las MNBs de aire convencionales pueden permanecer estables en agua hasta dos semanas^[38]. La formación de una burbuja de cualquier tamaño dentro de un flujo inicia con la condición turbulenta del mismo.^[46] Las regiones de baja presión en el fluido, también llamadas cavidades, se llenan de gas, formando una proto-burbuja. si la interfaz de esta cavidad llega a ser continua, se forma una burbuja. La estabilidad de las micro-nanoburbujas es un fenómeno que se puede explicar mecánica y termodinámicamente. Se teoriza que las micro-nanoburbujas tienen las siguientes características, lo cual explica su larga permanencia en el medio líquido, a diferencia de las macro burbujas.

- Se caracterizan por diámetros entre 10 nm - 10 μ m, lo que les confiere menor velocidad de ascenso a la superficie del líquido.^[44]
- Se encuentran atrapadas en un mínimo local de energía libre^[42]; por lo que la interfaz de la burbuja se puede describir mediante las ecuaciones de Young.^[43]
- Tienen por su pequeño tamaño una altísima presión de LaPlace^{[42][43]}, esto es, la diferencia entre la presión en el exterior y en el interior de la burbuja, lo cual sería desfavorable si no fuera porque mecánicamente, esta presión se equilibra.^[36]
- Generan a su alrededor una acumulación o capa protectora de iones cuya adsorción es causada por la lenta tasa de difusión en la interfaz acuosa^{[44][46]}. Estos iones tienen una carga que puede calcularse midiendo la velocidad de una burbuja en un campo eléctrico conocido. A partir de esto, se utilizan las ecuaciones de Coulomb para aproximar la presión ejercida por este campo eléctrico sobre la burbuja^[45]. Así, se agrega al equilibrio de presiones de la burbuja una fuerza ponderomotriz ejercida por la capa iónica. Esta fuerza es el factor determinante en la existencia de las burbujas micro y nano, y especialmente cierto de las nanoburbujas.^[46]
- Son compresibles y su deformación se puede modelar mediante una constante de resorte; esto les permite tener una forma achatada, con radios 5 a 6 veces mayores a su altura, reduciendo la presión de LaPlace en la nanoburbuja con respecto a las micro y macro burbujas, cuya interfaz no es elástica y tienen una forma esférica.
- Para la estabilidad de una micro-nanoburbuja, su reducción de volumen en el tiempo debe suceder de manera adiabática^[50], es decir que existe un intercambio constante de calor y masa con los alrededores. Esto no solo favorece la formación de la capa iónica sino que también evita un colapso de la burbuja debido a la acumulación de energía en su interior y aumento de la presión de La Place. Teóricamente, las MNB en estado de colapso no adiabático pueden llegar a temperaturas de hasta 5000K en su interior^[50], lo cual desfavorece su estabilidad y genera un colapso violento. Esto es de utilidad cuando se desea su colapso, ya que ayudan a la acción desinfectante, pero no durante su formación y almacenamiento.

2.1.2. Métodos de Generación de MNBs

Las MNBs se pueden generar de distintas maneras. La mayoría de métodos buscan crear las condiciones favorables de turbulencia y fuerzas cortantes para producir MNB, mientras que otros utilizan métodos químicos o incluso ultrasonido. Algunas tecnologías y métodos de generación de MNB disponibles en el mercado se listan seguidamente, indicando cuál se utiliza para la experimentación en este proyecto. A pesar de ya contar con el equipo, es vital para el desarrollo de prototipos y sistemas posteriores con más versatilidad de uso, el explorar las opciones disponibles para esta tecnología.

1) Métodos con flujo líquido:

- Flujo en Vórtice: es el más común, y utilizado para el proyecto por su naturaleza económica. Este método consiste en generar colisiones entre las burbujas en vórtices del líquido, causando su rotura en burbujas más pequeñas.^{[48][49]} Su funcionamiento se describe más detalladamente en breve.
- Tipo Eyector: utiliza una boquilla con geometría específica que genera un flujo en vórtice, fuerzas cortantes y colisiones entre burbujas, permitiendo la formación de MNB. Las burbujas generadas por este método son de un tamaño mayor en su formación que para el método de vórtice, lo cual desfavorece su estabilización y reducción de tamaño al nivel nanométrico.^[49]
- Tipo Venturi: este método utiliza un mecanismo de inyección tipo Venturi, generando una región de baja presión donde se forman MNB, sin embargo, este método requiere de aditivos especiales para evitar la coalescencia de las burbujas.^[49]

2) Métodos sin flujo líquido:

- Tipo capilar: se pueden producir MNB haciendo pasar agua ozonizada por tamices o membranas con una porosidad del tamaño de burbuja deseado a presión^{[39][47]}. Este método presenta la desventaja de requerir materiales y diseños altamente especializados y de alto costo.^[49]
- Tipo rotor: consiste en colocar un rotor de material sinterizado con poros del tamaño de burbuja deseado y hacerlo girar en un recipiente de agua ozonizada, generando así las MNB.^[49]
- Ultrasonido: las ondas ultrasónicas son capaces de formar microcavidades en el fluido y a su vez MNB, sin embargo este método produce burbujas de duración corta y tiene alto costo y complejidad. No presenta una opción viable para las aplicaciones del sistema.^[49]
- Electrólisis: este método utiliza el fenómeno de la electrólisis para producir pequeñas burbujas de ozono en un líquido mediante reacciones reducción oxidación. Requiere de electrodos especializados y además tiene alto costo.^[49]

La tecnología más relevante para el caso de este estudio es la patentada por Chiba Takahashi^[41], en la cual las MNBs se generan por un vórtice en una disolución de electrolitos (calcio, hierro, magnesio, sodio, entre otros) con una conductividad eléctrica de hasta 300 mS/cm. La inyección de ozono hacia el flujo en vórtice propicia la formación de pequeñas burbujas. Un segundo flujo en vórtice en el tanque de mezclado o reactor de transferencia permite crear las fuerzas cortantes y colisiones que separan las burbujas grandes y las convierten en burbujas más pequeñas del orden deseado, reduciendo la cantidad de macro burbujas y aumentando la cantidad de MNB. En la interfaz entre las MNBs y la disolución acuosa se acumulan hidroxilos (OH⁻) que atraen y acumulan a los cationes de la disolución, formando la capa de iones que rodea a las MNBs protegiéndolas de la degradación y permitiendo así almacenarlas en una concentración constante por períodos extendidos. Para motivos de las pruebas a realizar, no se utilizarán sales iónicas, ya que se desea determinar solamente el efecto de factores físicos.

2.2. Teoría del Diseño Hidráulico

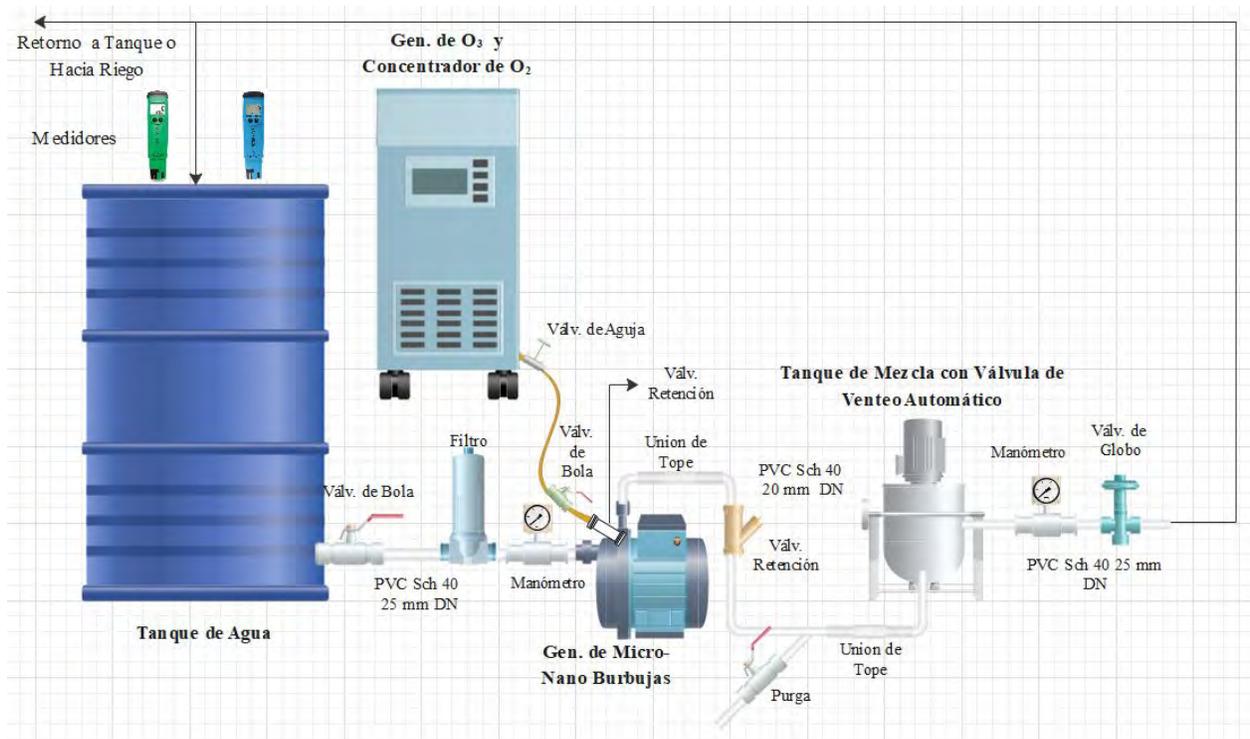


Figura 1: Representación esquemática del sistema de producción de MNBs de ozono propuesto para estudio de los factores físicos (elab. propia).

2.2.1. Accesorios y su funcionamiento

Como resumen, el proceso mediante el cual se generan las MNB, y en el cual se basa la construcción del sistema prototipo PMV, inicia con un estanión de 180 L lleno de agua, con una salida en su parte inferior y una válvula de bola que permite abrir o cerrar la salida del tanque. Para filtrar sólidos de gran tamaño como hojas, insectos, partículas sólidas y otros, se cuenta con un filtro de malla en la succión antes de la bomba. La bomba en cuestión tiene como característica particular una cavidad interna donde se genera un vórtice. Aquí, se inyecta un flujo de ozono generado por un sistema compuesto por dos máquinas distintas que se conectan en serie entre ellas y mediante manguera y luego de la misma forma a una entrada de gas en la bomba, con una válvula de retención que previene contraflujo de agua en la manguera de gas. Estas dos máquinas que proveen el gas son un concentrador de oxígeno y un generador de ozono alimentado del oxígeno concentrado. Para este generador de ozono en particular, se debe restringir con una válvula de aguja el flujo en su salida, para asegurar una mínima presión de 34,5 kPa (5 psi) en su interior, según especificación del fabricante. A la salida de la bomba, se cuenta con una válvula de retención, necesaria para prevenir contraflujo, y una purga en la parte más baja para vaciar el sistema. Un tanque de mezclado finaliza el proceso de generación de MNB iniciado en la cámara de mezclado de la bomba, y este cuenta con una válvula de venteo para expulsar el exceso de gas en el flujo. Finalmente, una válvula en la salida permite regular la presión de operación, aspecto necesario para poner en marcha la producción de MNB y para experimentar con las diferentes presiones. Las mediciones de contenido de ozono se realizan con medidores manuales directamente por parte superior del tanque sin tapa.

Abajo, se listan más detalladamente los accesorios de tuberías esenciales para la cómoda y segura operación del sistema, que permita controlar la presión fácilmente, y que además cumpla

con los requerimientos del prototipo; se deben tener en cuenta varios accesorios de tuberías que deben incluirse en el mismo, considerando su funcionamiento, y las ventajas que estos le aportan al sistema. Para las secciones siguientes se definen las abreviaciones utilizadas:

1) MBs: se refiere exclusivamente a las burbujas en el orden de magnitud de los micrómetros, estas son aún visibles al ojo humano y se manifiestan como una nube densa dentro del líquido formada por millones de estas.

2) NBs: se refiere exclusivamente a las burbujas en el orden de magnitud de los nanómetros. Estas no son visibles al ojo humano y aún en su presencia el agua se ve clara. Las MBs pueden reducirse en tamaño y pasar a ser NBs después de un lapso de tiempo en el agua. Es deseable tener la mayor proporción posible de NB en la mezcla de MNB producida por la bomba, ya que estas presentan mayor estabilidad.

3) MNBs: se refiere a la mezcla de micro y nano burbujas generada por la bomba, o al concepto que engloba ambos tamaños; esta es una mezcla que contiene una proporción desconocida de cada tipo de burbuja, sin embargo, estocásticamente, se busca que la mayoría de MBs pasen a ser NBs. Esto se observa como una aclaración del agua con aspecto blanco que contiene las MBs (por la gran cantidad estas opacan completamente el agua), sin embargo no todas las MBs se van a la superficie, algunas pasan al nivel nanométrico convirtiéndose en NBs.

Abajo se listan y describen las válvulas a utilizar:

- **Válvulas de Bola:** La válvula de bola es una de las más conocidas y utilizadas comercialmente para construcciones simples de tuberías. En el área de horticultura, el diseño de tuberías se limita casi en todos los casos a la funcionalidad empírica, y no se utiliza un diseño formal de tuberías. Por lo que una tendencia inicial sería la utilización de este tipo de válvula en todos los puntos donde se requiera regular o cortar el flujo. Es importante notar que las válvulas de bola son buenas para aplicaciones de cierre o apertura completa, ya que son altamente imprecisas para un control más gradual del flujo, y así mismo de la presión. Se decide instalar válvulas de bola en 3 puntos del sistema, según la ilustración presentada al inicio de esta sección: a la salida de los tanques, ya que estos requieren estar cerrados para llenarse y agregar y mezclar sales iónicas de ser necesario. Además, se idea un acople para cada estañón, de modo que estos se puedan rotar y acoplar al sistema para las diferentes pruebas. En cada tanque se construye una salida con válvula de bola y unión de tope. Esta válvula se abre cuando el tanque está acoplado a la bomba y permite inundar el sistema cuando se abre, también permite que el estañón de agua tratada con ozono se transporte, y que la salida se use luego para llenar regaderas o acoplar a un sistema de riego. Una válvula de bola se instala también en una sección recta en la parte más baja del sistema, a modo de purga, para vaciar el agua antes de desacoplar los módulos. Finalmente, se utiliza como regulador secundario del flujo de ozono, solamente para el proceso de encendido y no para la regulación de la presión en el reactor de corona, la cual es altamente crítica, como se detallará más adelante. Esta válvula opera, como su nombre lo indica, con una bola perforada que mediante un giro de 90 grados abre o cierra el flujo. Adicionalmente, la válvula de bola tiene una caída de presión baja, permite el paso de sólidos lo cual es importante ya que la entrada de agua al filtro generalmente los tendrá, es autolimpiante por su propia acción de operación y además tiene un bajo costo.

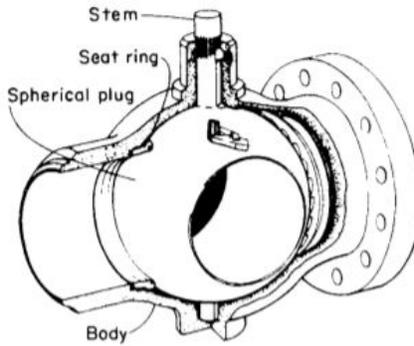


Figura 2: Representación Esquemática de Válvula de Bola^[51].

■ **Válvula de Retención (Check) Tipo Resorte (Flujo de Ozono)**

Para evitar que un cambio de presión por el apagado del equipo o algún otro fenómeno genere contraflujo de agua a través de la manguera de ozono y hacia el reactor o celda de corona, se debe instalar una válvula de retención en la manguera antes de la entrada a la bomba. El fabricante del generador de ozono indica el peligro de que esto suceda y el daño que puede causar en el equipo, el cual es sin duda el más costoso del sistema. Además, se elige una válvula de retención tipo resorte ya que esta tiene una operación sencilla y se encuentra en tamaños pequeños, como el de DN 4 (1/8" NPS) requerido. En general, las válvulas de retención utilizan a su favor la geometría y la fuerza de empuje del fluido. En este caso, el fluido tiende a empujar el resorte y abrir la válvula en dirección del flujo deseado, pero empuja el elemento móvil contra un empaque al ser sometida a contraflujo, cerrando la válvula. Como desventaja esta válvula no permite una evaluación de su estado interno y tiene un alto costo relativo.

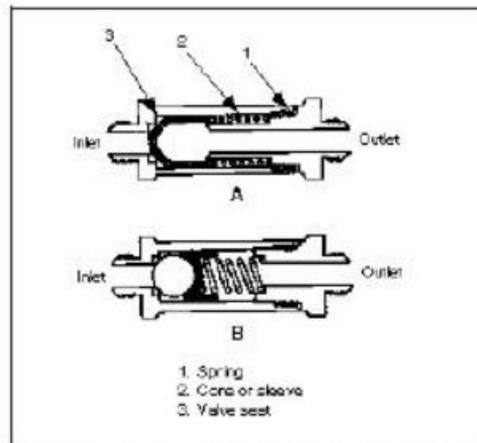


Figura 3: Representación Esquemática de Válvula de Retención tipo Resorte^[52]

- **Válvula de Retención tipo Columpio (Swing) (flujo de agua):** Para evitar el contraflujo de agua a través de la bomba, lo cual puede ocasionar graves daños a la misma, en caso de un golpe de ariete por apagado brusco o una sobrepresión en el lado de descarga, se debe instalar una válvula de retención a la salida de la bomba(generator de MNBs) para este caso, se elige una válvula tipo columpio, la cual tiene un elemento pivoteado que actúa como tapa en una dirección, pero que puede abrirse en la otra. Este tipo de válvula es de las más comúnmente utilizadas y por lo tanto tiene un bajo costo relativo. Sin embargo, no hay forma de evaluar su estado interno, al menos para el caso de PVC.

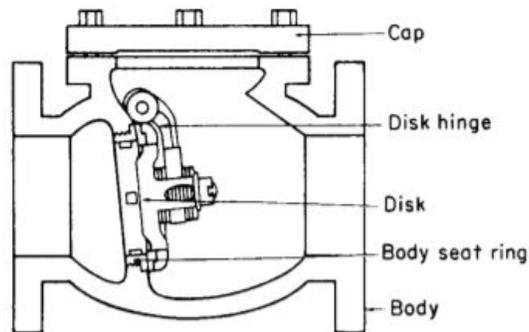


Figura 4: Representación Esquemática de Válvula de Retención tipo Columpio^[51].

- **Válvula de Globo (Flujo de Agua):** Dadas las necesidades de modulación de presión en el sistema para la experimentación con el equipo y la determinación de los factores óptimos para su operación; y además la limitante de otros tipos de válvula en este sentido, se recurre para la salida del sistema a una válvula de globo, en este caso de tamaño DN 25 (1" NPS). La válvula de globo opera con una tapa unida a un vástago roscado. Esta baja al girar el volante en la parte superior y se posa sobre el asiento, creando un sello hermético en el cerrado total. Este tipo de válvula permite una regulación de flujo confiable incluso en condiciones severas, con caudales y presiones altas. Además, por lo general se puede abrir para inspeccionar su estado y limpiarla, aunque en el caso de válvulas de PVC de bajo costo se carece de esta opción. Por su configuración geométrica, esta válvula genera una gran pérdida por fricción.

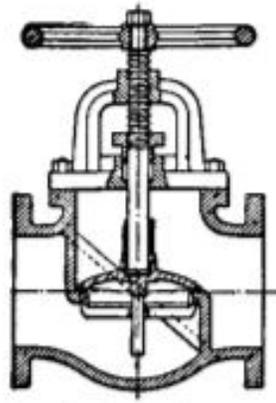


Figura 5: Representación Esquemática de Válvula de Globo^[51].

- **Valvula de Aguja (flujo de ozono):** Un aspecto de gran importancia para la segura operación de la celda de descarga de corona en el generador es que esta opere a una presión constante en su interior de 34,5 kPa (5 psi), esto indicado por el fabricante. De otro modo, pueden producirse daños permanentes y no cubiertos por la garantía al componente más costoso del sistema. El compresor del equipo concentrador de oxígeno que provee al generador de O_3 produce en teoría hasta 68,9 kPa (10 psi), sin embargo ya sea por defectos de este u otra razón, solo se miden unos 20.7 kPa (3 psi) a la salida. El generador de ozono cuenta con un potenciómetro para el reactor de corona (controla la potencia y por lo tanto la cantidad de ozono producido) y un manómetro. Y el concentrador cuenta también con un regulador de flujo. Se instala una válvula de aguja en la manguera a la salida del generador de ozono, y poniendo el flujo de oxígeno al máximo se puede regular de forma muy fina la válvula de aguja, restringiendo el flujo para generar mayor presión interna. Este procedimiento se probó con el equipo con resultados satisfactorios, manteniendo los 34,5 kPa (5 psi) requeridos en el reactor y un buen flujo de ozono hacia el generador de MNBs. Como se mencionó, esta válvula tiene la ventaja de ser muy precisa en su control, y ya que el caudal de gas es muy bajo relativo al caudal de agua, la regulación debe ser muy fina para lograr las condiciones deseadas. También se debe evitar que ingrese demasiado gas a la bomba causando que esta se trabe, por lo que el control preciso de ozono inyectado es de vital importancia.

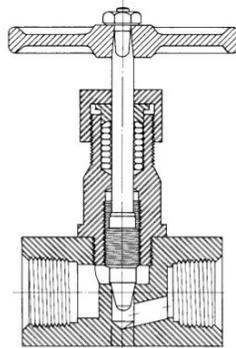


Figura 6: Representación Esquemática de Válvula de Aguja^[51].

- **Válvula de Venteo Automática:** Al inyectar un gas en un flujo de líquido, una parte de éste será disuelta en el agua, y otra parte formará las MNBs. Sin embargo, este no es un proceso 100 % eficiente, y se debe evacuar el gas en exceso del sistema. Para esto, se coloca una válvula de venteo automática resistente al ozono en la parte superior del tanque de mezcla. Esta funciona por medio de un flotador con sello el cual sube cuando pasa agua, tapando la salida superior; y cae en presencia de aire o gas, dejando vía libre para que el mismo salga. Al ser el gas compresible, es decir, que puede almacenar una gran cantidad de energía al estar bajo presión, es de gran importancia para la seguridad y para la correcta operación del sistema el no tener un exceso de gas en un flujo presurizado. La válvula seleccionada no tiene un alto costo ya que es de PVC y de simple operación interna, además se puede abrir para revisar su estado interno y reemplazar el empaque.

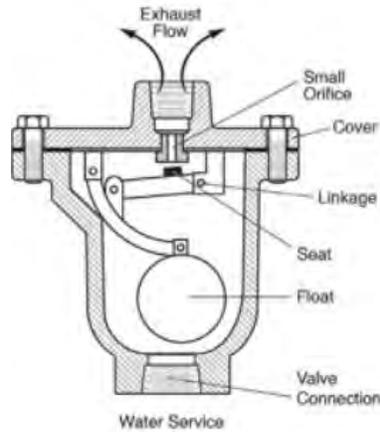


Figura 7: Representación Esquemática de Válvula de Venteo Automática^[53]

- Manómetro:** el manómetro es un elemento mecánico que permite medir la presión interna en las tuberías. Se utilizan dos manómetros: uno con escala negativa en la succión y otro con escala positiva en la descarga, para controlar las condiciones de presión internas durante la operación y las pruebas a realizar. La operación más común de manómetros es de tipo Bourdon, en la cual el líquido con la presión del sistema empuja un elemento mecánico calibrado con la aguja indicadora. Cabe notar que los manómetros pueden ser sensibles a deformación permanente por efecto de una presión muy alta. Por lo que se escogen manómetros de bajo costo para la experimentación con el sistema, de las marcas Winters.

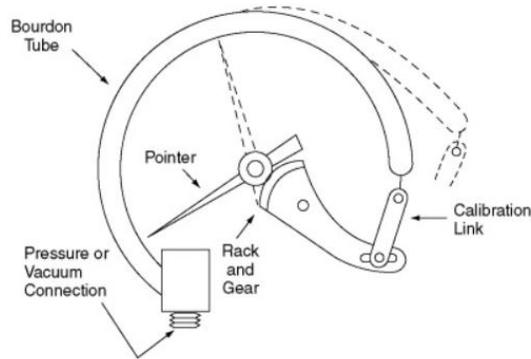


Figura 8: Representación Esquemática de un Manómetro tipo Bourdon.^[54]

2.2.2. Selección de Materiales

Al ser el ozono un agente oxidante tan fuerte, incluso en su forma acuosa; se vuelve de vital importancia una correcta selección de materiales para las tuberías y accesorios que se deberán utilizar en el sistema. Los metales son notoriamente propensos a la oxidación, y materiales como aceros al carbón, hierro galvanizado, cobre y otros metales son altamente vulnerables a una corrosión completa en cuestión de días de uso con ozono. Se describen las abreviaturas para esta sección:

- PVC: policloruro de vinilo. Es un polímero sintético ampliamente utilizado a nivel mundial. Uno de sus mayores usos es en tuberías para trasiego de fluidos, especialmente agua.
- EPDM: Es un tipo de hule sintético que cae bajo la especificación ASTM D1418. sus cadenas saturadas de polietileno lo hacen más resistente a la corrosión, el calor y el ozono que los hules naturales.^[63]
- ABS: el ABS es un termoplástico plomérico ampliamente utilizado por sus buenas propiedades mecánicas de resistencia al impacto y dureza, además de su bajo costo y facilidad de procesamiento. ABS significa: acrilonitrilo-butadieno-estireno. [64]
- SAE 304: Es el acero austenítico inoxidable más comúnmente utilizado. Aparte de hierro y carbono, contiene cromo entre 18 y 20% y níquel en un 8 a 10,5%. Se especifica por la normativa SAE International (Sociedad de Ing. Automotrices).
- VITONTM: es una marca de hule sintético producido por la compañía Chemours. Es un fluoro-polímero que se describe bajo la norma ASTM 1418.

En primer lugar, se debe seleccionar un material para las tuberías que sea lo menos reactivo posible con el ozono. En general, el ozono no tiene una afinidad específica por reaccionar con polímeros, aunque al ser tan oxidante (reacciona con casi todo), sí tiene un grado de afectación inicial sobre las partes no saturadas de las macromoléculas, generalmente en la forma de enlaces dobles de carbono presentes en los polímeros. Según estudios consultados^{[59][60]}, los diferentes materiales poliméricos no hulosos, tienen una disminución de un 3-25% de sus propiedades, sin embargo se determina que esto no es lo suficientemente grave en la mayoría de los casos como para afectar el desempeño del material.^{[59][60]} Se decide evaluar el PVC dada su naturaleza polimérica, su bajo costo y su alta disponibilidad comercial. En el caso de este, la cantidad de enlaces dobles no saturados es baja en comparación con los enlaces hidrógeno carbono saturados; por lo que después de una reacción inicial, el PVC permanece inerte por tiempo indefinido en presencia de ozono acuoso. ^[56] El ozono gaseoso sin embargo sí puede causar cierta fragilidad del material.^[57] Es importante considerar que en general, el ozono gaseoso provoca más problemas de corrosión que el ozono acuoso. ^[57]

Otro elemento importante del sistema son los empaques utilizados en válvulas y uniones para evitar fugas de agua bajo presión. El hule es un material con un importante grado de afectación por exposición al ozono y los empaques de hule natural sufren gran desgaste y agrietamiento después de un tiempo de uso muy reducido.^[59] La norma ASTM D11.15^[55], especifica los métodos estándar para evaluar el efecto del ozono sobre hules, y las pruebas con que se producen tablas de fabricantes y de compatibilidad química deben estar basadas en esta norma para el material respectivo.

Existen varios tipos de hules con mezcla polimérica comercialmente disponibles para empaques, que presentan alta resistencia al desgaste por exposición a agentes corrosivos y oxidantes, y que además no muestran síntomas de agrietamiento. Se recurre a las tablas de 2 fabricantes, el primero Ozone Solutions, una de las empresas fabricantes de generadores de ozono con más renombre internacional, ubicada en Estados Unidos y proveedor comercial del emprendimiento asociado a este proyecto; también se consulta al fabricante Marco Rubber and Plastics, que proporciona una tabla de materiales recomendados para empaques redondos ('O' Rings). [58]

Se decide por su disponibilidad comercial utilizar EPDM para los empaques reemplazables ya que este no muestra mucho desgaste ni agrietamiento en pruebas realizadas^[60]; sin embargo sí se debe monitorear su condición, ya que las tablas de compatibilidad consultadas dan diferentes grados de desempeño^{[58][59]}. Para algunos casos, como las uniones de tope, y salidas de los tanques (se utilizarán estañones "Jr." para las muestras) en las que los empaques redondos incluidos son fácilmente reemplazables y baratos, se dejan estos y se monitorea su condición mientras se compran empaques de un material más resistente y eventualmente se reemplazan una vez destruidos los originales. En el caso de las válvulas, los empaques deben ser más duraderos. En este aspecto, se determina que el silicón, también como material disponible para este uso, se puede considerar para un reemplazo permanente de los empaques de las válvulas; o en su defecto, conseguir posteriormente válvulas con empaques de este material. Esto basado también en las tablas de los fabricantes [57][58], ya que ambas muestran la más alta compatibilidad con este material. Se puede considerar dependiendo del costo, utilizar también empaques de silicón para las uniones de tope y salidas de los tanques, asegurando que no se requiera ningún reemplazo de empaques.

Finalmente, la manguera de trasiego de ozono se ve restringida a un diámetro de DN 4 (1/8" NPS), ya que de este diámetro es la salida del concentrador y generador de ozono. Como el compresor en el concentrador de oxígeno solo genera unos 34,5-68,9 kPa (5-10 psi) de presión, no se debe tener especial consideración por las características mecánicas de la misma. Sí por sus características químicas ya que esta llevará el ozono gaseoso en su estado más puro. Se usa manguera de silicón; ya que es de uso estándar y muy disponible comercialmente, además de su resistencia al ozono antes mencionada. La manguera requiere una válvula de retención, por lo que se importan válvulas de retención de alta resistencia a la corrosión con carcasa de plástico ABS, diafragma VITON y resorte SUS316L/ASTM A240 316L) el cual es un acero inoxidable austenítico con alta resistencia a la corrosión. [61] De igual forma, se verifica la compatibilidad de cada material con las tablas consultadas. Al haber diferencias entre estas calificaciones, y no estar siempre todos los materiales en una misma tabla es importante considerar la información de varias fuentes; por lo que se consulta adicionalmente una tabla del fabricante Oxidation Technologies LLC. [62]

Se repite el mismo procedimiento para todos los componentes listados en la primera parte de este subcapítulo, y así se genera la siguiente tabla resumen con la decisión para cada componente. Es importante entender que en algunos casos no se elige el material óptimo, dadas condiciones específicas de disponibilidad relativa al desarrollo comercial necesario, costo, y otros factores, sin embargo esto se considera en el aspecto de la decisión final tomada para cada componente. También se muestra la simbología usada para la elaboración de la tabla.

Calificación	Significado
A	El ozono no tiene efecto en estos materiales y pueden durar indefinidamente. Insensibles a concentración y tiempo de exposición.
B	El ozono tiene un efecto menor en estos materiales. El uso prolongado a altas concentraciones los dañará más allá de cualquier utilidad.
C	El ozono degrada estos materiales en cuestión de semanas. Uso prolongado a cualquier concentración los dañará más allá de cualquier utilidad.
D	El ozono degrada estos materiales en cuestión de días o incluso horas. No se recomienda su uso a ninguna concentración.

Figura 9: Calificaciones típicas de resistencia al ozono, basadas en criterios de los fabricantes Ozone Solutions y Oxidation Technologies. [57][62]

Decisión	Significado
1	No existe probabilidad de falla. Selección óptima.
2	Muy baja probabilidad de falla. Se decide utilizar monitoreando su desempeño. Opción económica y de alta disponibilidad.
3	Se puede utilizar pero se debe monitorear su condición para decidir entre reemplazo periódico o reelección de material.
4	Se espera falla. Uso temporal por facilidad de conseguir componente para las pruebas. Se debe reemplazar este material para prototipo 2.0

Figura 10: Simbología de las decisiones tomadas en cuanto a la selección de materiales (elab. propia)

Componente	Material	Calificación dada por Fabricante Ozone Solutions	Calificación dada por Fabricante Oxidation Technologies	Decisión Final
Válvula de retención 3 mm DN (1/8" NPS)	-	-	-	-
Carcasa	ABS	B	B	2
Diáfragma	VITON	A	A	1
Resorte	ASTM316L	A	A	1
Maguera O ₃ 4 mm DN	Silicon	A	A	1
Empaques 1	EPDM	C(acuoso)/B(gas)	B	3
Empaques 2	Silicon	A	A	1
Tubería	PVC	B(gas)/A(acuoso)	B	2
Válvula de Globo 25 mm DN (1" NPS)	PVC	B(gas)/A(acuoso)	B	2
Válvula de Bola 25 mm DN (1" NPS)	PVC	B(gas)/A(acuoso)	B	2
Válvula de Bola 8 mm DN (1/4" NPS)	SAE 304	A	B	2
Adaptadores 8 a 4 mm DN (1/4" a 1/8" NPS)	Latón	B	B	4
Válvula de Venteo	-	-	-	-
Cuerpo	PVC	B(gas)/A(acuoso)	B	2
Empaque	EPDM	C(acuoso)/B(gas)	B	3
Válvula de Retención tipo columpio 20 mm DN (3/4" NPS)	PVC	B(gas)/A(acuoso)	B	2
Válvula de Aguja	Latón	B	B	4
Uniones y codos	PVC	B(gas)/A(acuoso)	B	2

Figura 11: Tabla de Resumen para Materiales del Prototipo (elab. propia)

2.2.3. Selección de tuberías

Se definen inicialmente presión y temperatura de operación del sistema. Para la experimentación se proponen rangos de 0 a 413,7 kPa (0 a 60 psi), pero se diseñará buscando un factor de seguridad mínimo de 2, ya que al modular la presión es fácil sobrepasar los 413,7 kPa accidentalmente. Además sería conveniente que el sistema resista una presión mayor para poder considerar también presiones de 483 a 552 kPa (70 a 80 psi) en experimentos futuros. La temperatura del fluido será en todos los casos la temperatura ambiente del agua; es decir unos 23 °C en su mayoría. Esta temperatura puede fluctuar como máximo a 28 °C para agua que esté más caliente pero de igual forma a temperatura ambiente. Finalmente, utilizando el factor de seguridad y la temperatura de operación se tienen los parámetros de diseño siguientes: 827,4 kPa (120 psi) y 23 °C. Por las dimensiones de la entrada y salida de la bomba el diseño se ve limitado a tubería DN 25 (1" NPS) en la succión y DN 20 (3/4" NPS) desde la salida de la bomba hasta la entrada del tanque de mezcla (TM). Después del TM, se continúa en DN 25. La bomba (generador de MNBs) tiene un caudal de 2000 L/h y una cabeza de 40m.

Se utiliza tubería de PVC de acuerdo a la selección de materiales indicada anteriormente. Se recurre a la normativa ASTM 1785 para obtener las especificaciones dimensionales y de presión máxima que puede soportar la tubería de PVC. Estas se muestran seguidamente:

Diametro Nominal NPS (pulgadas)	OD (diám. externo) (pulgadas)	Espesor de Pared Mínimo (pulgadas)	ID (diám. Interno) (pulgadas)
3/4	1.050	0.113	0.824
1	1.315	0.133	1.049

Figura 12: Extracto de tabla de especificaciones dimensionales para tubería de PVC ASTM D1785 (Sch 40) dada en sistema imperial^[65]

Díámetro Nominal DN (mm)	OD (diám. externo) (mm)	Espesor de Pared Mínimo (mm)	ID (diám. Interno) (mm)
20	26.7	2.87	20.9
25	33.4	3.38	26.6

Figura 13: Conversión a sistema internacional de dimensiones para tubería de PVC ASTM D1785 (Sch 40) (elab. propia)

Nominal Pipe Size	Pressure Ratings [□]			
	PVC1120 ^B PVC1220 PVC2120	PVC2116	PVC2112 ^B	PVC2110 ^B
in.	psi			
1/8	810	650	500	400
1/4	780	620	490	390
3/8	620	500	390	310
1/2	600	480	370	300
3/4	480	390	300	240
1	450	360	280	220

Figura 14: Extracto de tabla de clasificaciones de presión según la normativa ASTM 1785 (Sch 40)^[65]

Se puede apreciar en este caso que para las tuberías DN 20 y DN 25 mm (NPS de 3/4" y 1"), el material seleccionado, en este caso PVC1120 (material indicado en la tubería comercial), tiene una resistencia máxima de 3102,6 kPa (450 psi), para el caso de DN 25 (1" NPS) y para una temperatura de 23 °C. Al ser operado a temperatura ambiente, el nuevo factor de seguridad es: $3102,6/413,7 = 7,5$. Al estar usando tubería de PVC cédula 40, la cual es lo mínimo y lo más común en el mercado en términos de espesor, además de ser tan bajo su precio; no se considera otra selección para reducir el factor de seguridad, ya que no implicaría una reducción en costos. En todo caso, la clasificación de presión provista por los vendedores siempre es menor a la indicada en la norma; y corresponde casi siempre a 1034,2 kPa (150 psi) para tubo de PVC de DN 25. En este caso el factor de seguridad sigue siendo alto, de $1034,2/413,7 = 2,5$ según la información de los proveedores.

Sin embargo, se desea verificar de forma teórica con la normativa ASME B31.3 que el espesor sea adecuado también para el caso crítico de diseño a presión de 1034,2 kPa (150 psi) y 28 °C. (Máximo indicado en el tubo a temperatura máxima de operación con agua en ambiente caliente y soleado). Se considera necesario saber que aún si algún cliente u operario sube demasiado la presión y sobrepasa los 150 psi, o incluso si cierra la válvula de globo con la bomba en funcionamiento, no habrá riesgo de falla. El capítulo 7 del código ASME B31.3 indica la necesidad de considerar el caso crítico siempre para materiales termoplásticos como el PVC ya que no son permisibles variaciones en la temperatura de operación.. Las características relevantes de este tubo son:

$$\begin{aligned} \text{OD} &= 33,40 \text{ mm} = 1.315 \text{ in} \\ \text{ID} &= 26.64 \text{ mm} = 1.049 \text{ in} \\ t &= 3,38 \text{ mm} = 0.133 \text{ in} \end{aligned}$$

Las ecuaciones a continuación son válidas siempre y cuando:

$$t \leq D/6 = 33,4/6 = 5,56 \text{ mm} \quad (1)$$

Al cumplirse la condición y considerando las indicaciones de la normativa se plantean entonces las ecuaciones:

$$t_{min} = t + c \quad (2)$$

Donde t_{min} es el espesor mínimo de la tubería
 t es el espesor calculado por diseño a presión
 c es la suma de las tolerancias mecánicas.

Al ser "c" un parámetro que no se indica bajo ninguna normativa, este se determina usualmente por medio de aproximaciones. Este factor es necesario para considerar en el diseño el cambio de espesor de tubos metálicos por acción de la corrosión; sin embargo, para el caso del PVC, ya que este no sufre corrosión, se considera $c = 0$.

Para calcular el espesor por diseño a presión se utiliza la siguiente ecuación:

$$t = \frac{PD}{2S + P} \quad (3)$$

Donde:

t es el espesor calculado por diseño a presión [in] que se puede convertir a [mm]

S es el esfuerzo hidrostático (HDS) a la temperatura crítica, se toma el dato de la tabla III-4.2.1 del código ASME, para la temperatura mínima de diseño, 37,8 °C (100 °F) [psi]

D es el diámetro externo para el caso DN 25 mm Sch 40 [in]

P es la presión de diseño [psi].

**TABLE III-4.2.1
 HYDROSTATIC DESIGN STRESSES (HDS) AND RECOMMENDED TEMPERATURE LIMITS FOR
 THERMOPLASTIC PIPING COMPONENTS**

ASTM Spec. No.	Material	Recommended Temperature Limits ^{1,2,3}		Hydrostatic Design Stress at		
		Minimum, ⁴ °F	Maximum, ⁵ °F	73°F, ⁶ ksi	100°F, ksi	180°F, ksi
...
D 1785	PVC1120	0	140	2.0	1.6	...
D 2241	PVC1220	0	150	2.0	1.6	...
D 2513	PVC2110	0	130	1.0	0.8	...
D 2672	PVC2112	0	130	1.25	1.0	...
	PVC2116	0	150	1.6	1.25	...
	PVC2120	0	150	2.0	1.6	...

Figura 15: Extracto de tabla de Presión Hidrostática de Diseño y Temperaturas Recomendadas para Tuberías Termoplásticas ASME B31.3 III-4.2.1

Según lo indica la tabla de la Fig. 15, para PVC1120 bajo el estándar ASTM D1795, la presión de diseño HDS a 100 °F es de 1,6 ksi = 1600 psi, valor que se utiliza para el cálculo,

Entonces:

$$t = \frac{(150 * 1,315)}{(2 * 1600) + 150} = 0,058 \text{ in} = 1,47 \text{ mm} \quad (4)$$

Y así:

$$t_{min} = t + c = 1,47 \text{ mm} + 0 = 1,47 \text{ mm} \quad (5)$$

Comparando con el valor de tabla para el espesor de tubería de PVC de DN 25.

$$t = 3,38 \text{ mm} \geq t_{min} = 1,47 \text{ mm} \quad (6)$$

Por lo que el tubo resiste operación a la presión indicada por el fabricante de 1034,2 kPa (150 psi), con un factor de seguridad de: $3,38/1,47 = 2,3$

Por otro lado, para calcular la presión máxima generada por un golpe de ariete, ya sea por apagado de la bomba con flujo a alta velocidad, o si se enciende con la válvula de salida cerrada, se recurre a la ecuación de Joukousky [67], la cual permite calcular el golpe de ariete generado por un cambio brusco en la velocidad del flujo. Cabe resaltar que para que se dé un golpe de ariete, el tiempo del evento debe ser menor al tiempo de comunicación; en este caso el tiempo de comunicación corresponde al tiempo de propagación de una onda sónica por el sistema. Un cerrado accidental durante la operación no crearía sobrepresión, pero sí trabaría la bomba y le podría generar graves daños. De este modo, se enuncia la ecuación de Joukousky:

$$\Delta P = \rho a V \quad (7)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido, $997,8 \text{ kg/m}^3$

a es la velocidad de propagación de la onda de presión, en este caso la velocidad del sonido en agua, que corresponde a 1481 m/s para agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

v es el cambio en la velocidad del fluido, se utilizará la velocidad máxima calculada en la tabla para un delta V de $1,35 \text{ m/s}$

Por lo tanto:

$$\Delta P = 997,8 * 1481 * 1,35 = 1994951 \text{ kg/ms}^2 = 289,3 \text{ psi} \quad (8)$$

2.2.4. Flujo Laminar y Turbulento y Condiciones de Corriente Convectiva Óptimas

Como se mencionó anteriormente, la literatura habla de ciertos requerimientos teóricos para la formación de gran cantidad de MNBs usando este tipo de sistema, se desea verificar que estas se cumplan durante la experimentación, por lo que se calcula un aproximado del valor de dos números adimensionales que describen estos fenómenos.

Primeramente, el número de Reynolds describe el comportamiento laminar o turbulento de las líneas de flujo en el sistema. Se desea que el flujo sea turbulento, según lo discutido en el marco teórico, ya que esto permite crear fuerzas cortantes que formen las cavidades (proto-burbujas). Para el agua, se considera flujo laminar cuando este parámetro se encuentra por debajo de 2300, y turbulento cuando se encuentra por encima de 4000. La zona intermedia, denominada de transición, no describe ningún tipo de flujo específico, sino un estado de transición entre los dos.

El número de Reynolds se calcula según la ecuación:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (9)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido (en este caso agua, aunque se desconoce como la inyección de gas y formación de MNBs afectan este valor) que equivale a $997,8 \text{ kg/m}^3$

μ es la viscosidad dinámica en kg/m s que equivale a: $0,9532 \text{ cP} = 0,0009532 \text{ kg/m s}$

D es el diámetro interno de la tubería de DN 25 (1" NPS): $1,049 \text{ in} = 0,02664 \text{ m}$

V es la velocidad del fluido en m/s

Por el momento, se dejará como parámetro variable la velocidad, ya que esta se verá afectada por la restricción de flujo usada como modulación de presión.

Calculando la expresión, tenemos:

$$\text{Re} = \frac{(997,8)V(0,02664)}{0,0009532} = 27880V \quad (10)$$

Para calcular la velocidad a la salida, debemos convertir la energía del fluido bajo presión a energía cinética del flujo liberado, utilizando la ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (11)$$

Donde:

P_1 es la presión a la entrada [kPa].

ρ es la densidad del fluido, que para el caso de agua es $997,8 \text{ kg/m}^3$

v_1 y v_2 son las velocidades de entrada y de salida respectivamente [m/s]

h_1 y h_2 son las elevaciones de los puntos inicial y final respectivamente g es la aceleración por gravedad, igual a $9,81 \text{ m/s}^2$

Se cancelan las energías potenciales a ambos lados de la ecuación, ya que la elevación inicial y final son iguales. Además, para balancear la ecuación de Bernoulli, se deben agregar las pérdidas por fricción entre la bomba y el punto de descarga donde se encuentra la válvula de descarga, sin embargo, al ser un tramo extremadamente corto, las pérdidas se desprecian para motivos de este cálculo. La ecuación de Bernoulli queda entonces de la siguiente forma:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (12)$$

El caudal de la bomba es de 2000 L/h; $1 \text{ L/s} = 0.001 \text{ m}^3/\text{s}$; y la presión a la salida siempre es 0. Además, el diámetro interno de la tubería se obtiene a partir de las dimensiones especificadas por la norma ANSI B36.10. Para DN 25 (1" NPS), el diámetro externo es de 33,4 mm y el espesor de pared para cédula 40 es de 3,38 mm, por lo que el diámetro interno corresponde a 26,64 mm. Entonces, la velocidad a la entrada corresponde a:

$$V = Q/A = \frac{2000}{3600} * 0,001 = 0,968 \text{ m/s} \quad (13)$$

Donde:

Q es el caudal que equivale a $0,000\ 556 \text{ [m}^3/\text{s]}$.

A es el área transversal de tubería, en este caso de DN 25, que corresponde a $\pi * (\frac{D}{2})^2$; con $D = 0,026\ 64 \text{ m}$, $A = 0,000\ 574 \text{ m}^2$

Por lo que, despejando v_2 de (12):

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(P_1) + (0,5)(997,8)(0,968)^2}{997,8}} = \sqrt{\frac{2(P_1 + 467,5)}{997,8}} \quad (14)$$

Utilizando Excel, se calcula la velocidad de salida para presiones de 0 a 414 kPa (0-60 psi) utilizando la ecuación (13); haciendo incrementos en kPa equivalentes a 10 psi, por conveniencia en la operación y lectura del manómetro en esta unidad. También se calcula el número de Reynolds para la velocidad respectiva mediante (10). Se muestran en gris las presiones que se utilizarán para la prueba.

Presion (psi)	Presion (kPa)	V ₂ (m/s)	# Reynolds
0	0	0.97	26988
10	69.0	1.04	28910
20	137.9	1.10	30712
30	206.9	1.16	32414
40	275.8	1.22	34030
50	344.8	1.28	35574
60	413.7	1.33	37053

Figura 16: Número de Reynolds para Rangos de Presión de Operación del Prototipo (elab. propia)

Aquí, se puede observar que aún sin presurizar el flujo, es decir sin cerrar la llave de globo, se crea un flujo turbulento que sobrepasa por mucho el límite establecido de 4000. Sin embargo, el generador de MNBs sin presurizar no crea las micro-nanoburbujas, sino que simplemente inyecta el gas al agua en macro burbujas visibles. Por este motivo, se desea estudiar para este rango de presiones, en términos del número de Reynolds para lograr una generalización adimensional del fenómeno, el punto en el que la generación de MNB estables se logra, y a partir de esto, cómo se comporta la retención de ozono al aumentar la presión. La formación de MNB se empieza a observar a partir de los 206,9 kPa (30 psi), y es por esto que se parte de una presión de 241,3 kPa (35 psi) para la experimentación.

Por otro lado, se encontró en la misma literatura consultada sobre los mecanismos de formación de las MNBs^[69], que se recomienda un flujo convectivo por evaporación en el recipiente donde se preparan las MNBs. Para esto se recurre al número de Rayleigh. Este parámetro adimensional describe las condiciones de flujo por diferencias de temperatura en un fluido, y en este caso, el rango sugerido de contraflujo para permitir una formación estable de gran número de nanoburbujas resultantes de la mezcla de MNBs en el recipiente. Tiene un valor mínimo de $11,01Ra_{crit.}$ ^[69]; siendo este valor entre 1100 y 1700 para el agua. El número de Rayleigh se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Ra_x = PrGr_x \quad (15)$$

Donde:

Pr es el número de Prandtl
 Gr_x es el número de Grashof

Luego:

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (16)$$

Donde:

T_s es la temperatura del líquido [K]
 T_∞ es la temperatura de los alrededores [K]
 ν es la viscosidad cinemática [m^2/s]
 g es la constante de gravedad = $9,81 m/s^2$
 L es la altura de la celda [m]
 β es el coeficiente de expansión térmica volumétrico = 3α [$1/K$]
 α es el coeficiente de expansión térmica lineal [$1/K$]
 Y:

$$Pr = \frac{c_p\mu}{k} \quad (17)$$

Donde:

C_p es el calor específico [$J/kg K$]
 μ es la viscosidad dinámica [Ns/m^2]
 k es la conductividad térmica [W/mK]

No se considera necesario realizar el cálculo numérico de este parámetro por el momento, ya que un recipiente abierto a la atmósfera con evaporación en su superficie cumplirá las condiciones de contraflujo necesarias para que las MBs en la mezcla de MNBs se estabilicen en el recipiente^[69], y eventualmente se genere una mayor densidad burbujas en el nivel nano. Sin embargo, es importante considerar este cálculo en futuras aplicaciones, donde no siempre se tendrá un recipiente adecuado que genere los flujos convectivos sugeridos. El análisis del número de Rayleigh proporciona una herramienta poderosa para evitar la coalescencia de las MNBs a la superficie, o al menos para inhibirla lo suficiente en casos en que un contenedor abierto no sea posible.

2.2.5. Cálculo de Pérdidas

Como se estipuló anteriormente al discutir los métodos y mecanismos de formación de MNBs, el flujo requerido en una parte del trayecto es de naturaleza turbulenta. Esto significa que en aplicaciones a gran escala será de gran importancia el cálculo de pérdidas para lograr llegar a la presión requerida a la salida del sistema. Aunque para el sistema de pruebas los requisitos de cabeza de presión son mínimos, y la bomba está sobredimensionada para un sistema con menos de 2m lineales totales entre tubería recta y accesorios; no se debe dejar de lado este análisis si se desea poder ajustar, adaptar o diseñar un sistema a gran escala. Al tener el proyecto un aspecto empresarial, este cálculo será primordial en un futuro cercano. Se decide utilizar la ecuación de Hazen-Williams para agua fría, dado que se utiliza agua a temperatura ambiente. Esta ecuación proporciona directamente un valor de pérdidas para el sistema en metros de columna de agua, pero que sólo considera la caída de presión por tubería lineal.

$$h_f = \frac{10,674LQ}{c^{1,852}D^{4,8704}} \quad (18)$$

Donde:

h_f : son las pérdidas por fricción [mca]

Q es el caudal en $m^3/s = 0,000\ 556\ m^3/s$

c es el coeficiente de fricción de Hazen-Williams, que para PVC menor a DN 38 (1,5 in) es igual a 140

L es la longitud de tubería en metros lineales, que corresponde a 0,7 m para el tramo de DN 25 y 0,42 m para el tramo de DN 20.

D es el diámetro interno: 0,026 64 m para DN 25 y 0,0209 m para DN 20.

Así, las pérdidas por tubería lineal según Hazen-Williams para el tramo de DN 25 y DN 20 respectivamente son:

Discharge, Q (m ³ /s):	0.000556
Velocity, V (m/s):	0.99750819
Pipe Diameter, D (m):	0.02664
Pipe Length, L (m):	0.7
Hazen-Williams C:	140
Head Loss, h _f (m):	0.03457531

Figura 17: Resultado de Pérdidas para tramo recto de DN 25 usando una herramienta de software^[73]

Discharge, Q (m ³ /s):	0.000556
Velocity, V (m/s):	1.6206616
Pipe Diameter, D (m):	0.0209
Pipe Length, L (m):	0.42
Hazen-Williams C:	140
Head Loss, h _f (m):	0.067638755

Figura 18: Resultado de Pérdidas para tramo recto de DN 20 usando una herramienta de software^[73]

Para agregar las pérdidas de los accesorios, se debe recurrir a tablas que indican la longitud de tubería recta equivalente que se debe agregar por el efecto de pérdidas por accesorios y válvulas. Existen gran cantidad de tablas para determinar estos factores de diferentes entidades comerciales y no comerciales, en este caso se recurre a una tabla proporcionada por el Piping Handbook^[71].

Así, se listan todos los accesorios con sus respectivas longitudes de tubería recta equivalentes (convertidos de pies equivalentes en tabla) primero para la sección de DN 20 (3/4" NPS) y luego para la sección de DN 25 (1" NPS).

Accesorios DN 25 (1" NPS)				
Accesorio	Ctd.	L eq' (ft)	L eq' (m)	L eq (m)
Salida Tanque	1	3.70	1.13	1.13
Union de Tope	1		0.00	0.00
Adaptador hembra	4		0.00	0.00
Filtro de Malla	1		0.00	0.00
Valvula de Globo	1	29.70	9.05	9.05
Codo	3	2.60	0.79	2.38
T lineal	2	1.70	0.52	1.04
Adaptador Macho	4		0.00	0.00
Válvula de Bola Abierta	1	3.00	0.91	0.91
Reducción DN 25 a DN 20	1	0.70	0.21	0.21
TOTAL (m)				14.72

Figura 19: Longitud de tubería Recta Equivalente para accesorios DN 25 (elab. propia con base en Piping Handbook^[71])

Accesorios DN 20 (3/4" NPS)				
Accesorio	Ctd.	L eq' (ft)	L eq' (m)	L eq (m)
Valvula de Retención Tipo Columpio	1	8.00	2.44	2.44
Adpatador Macho	1		0.00	0.00
Codo	4	2.00	0.61	2.44
Union de Tope	1		0.00	0.00
T lineal	1	1.40	0.43	0.43
TOTAL (m)				5.30

Figura 20: Pérdidas por Accesorios DN 20 (elab. propia con base en Piping Handbook^[71])

Sumando cada una de estas longitudes equivalentes con las respectivas longitudes de tubo tomadas del prototipo físico, se obtienen unas nuevas longitudes de: $0,7 \text{ m} + 14,7 \text{ m} = 15,4 \text{ m}$ para DN 25. Y, $0,4 + 5,3 = 5,9 \text{ m}$ para DN 20. De esta forma, se recalculan las pérdidas:

Discharge, Q (m ³ /s):	0.000556
Velocity, V (m/s):	0.99750819
Pipe Diameter, D (m):	0.02664
Pipe Length, L (m):	15.4
Hazen-Williams C:	140
Head Loss, h _f (m):	0.76065682
Energy Slope, S (m/m):	0.0493933

Figura 21: Resultado de pérdidas con accesorios para tramo recto de DN 25 usando una herramienta de software^[73]

Discharge, Q (m ³ /s):	0.000556
Velocity, V (m/s):	1.6206616
Pipe Diameter, D (m):	0.0209
Pipe Length, L (m):	5.9
Hazen-Williams C:	140
Head Loss, h _f (m):	0.95016347
Energy Slope, S (m/m):	0.16104466

Figura 22: Resultado de pérdidas con accesorios para tramo recto de DN 20 usando una herramienta de software ^[73]

A pesar de que esta caída de presión por fricción (0,76 m + 0,95 m = 1,71 m) no es crítica para el prototipo, ya que este tiene una capacidad de 40 m de cabeza, se debe considerar este cálculo para su futura adaptación a otras condiciones, y para el diseño de una línea de productos prácticos para el desarrollo empresarial y aplicaciones agrícolas, donde diferentes arreglos de tuberías con accesorios y longitudes variables causarían diferentes pérdidas. Se debe tener en cuenta un cálculo de pérdidas análogo considerando cualquier longitud de tubería y/o accesorios adicionales que se utilicen, considerando estas pérdidas internas del equipo, y comparar el resultado final con la especificación de la bomba (generador de MNBs).

2.3. Diseño del Experimento

2.3.1. Instrumentación

Para la realización de estas pruebas, se debe proseguir con un diseño de experimentos adecuado utilizando un diseño del experimento que permita que los resultados y su análisis tengan una validez estadística. El primer aspecto del cual se deben conocer todas las características es la instrumentación a utilizar; ya que de esto dependen la precisión de las mediciones, el error de los datos y si dentro de este margen de error, existe una diferencia significativa entre las variables de respuesta entre las dos presiones de operación. Se listan abajo los instrumentos de medición a utilizar.

- Medidor ORP (potencial oxidación/reducción): El medidor ORP consiste de un electrodo de material específico que se oxida o reduce de una forma conocida por los fabricantes, y calibrado para que esta tasa de reacción refleje un potencial de oxidación en milivoltio respecto a un electrodo de referencia con tasa de oxidación conocida. Se utiliza un medidor de potencial red-ox (ORP) marca Hannah Instruments. Este tiene un rango de ± 1000 mV, una resolución de 1mV y un error de ± 2 mV. Este medidor se utiliza para monitorear el potencial de oxidación de la muestra, sin embargo no refleja una cantidad de ozono sino que se utiliza para medir indirectamente el contenido de cloro (el agua de fuentes potables tiene un alto contenido de cloro debido a su tratamiento) y asegurar condiciones iniciales homogéneas en todo caso. Para el agua de tubo utilizada, se observa que este valor oscila entre 700-770 mV, sin embargo, para agua sin cloro, este valor es de entre 200 y 380 mV, lo cual es más deseable para la experimentación, dado que el cloro reacciona inicialmente con el ozono. El instrumento es nuevo y viene calibrado de fábrica. Además, tiene una disolución de referencia de 240 mV de especificación HI-7021m ORP test solution.^[73] Abajo se muestra una esquemática de su funcionamiento:

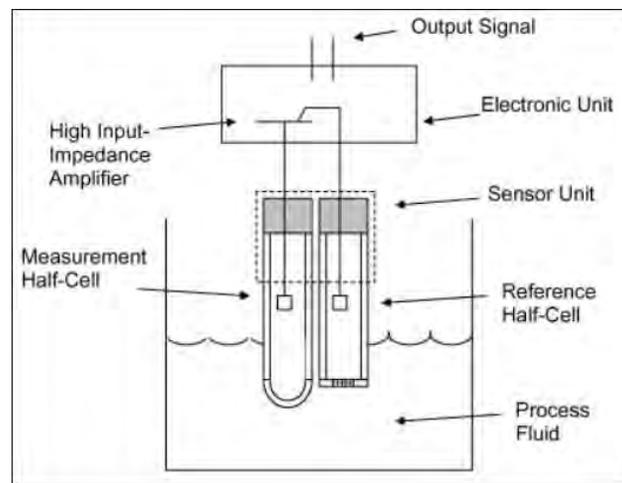


Figura 23: Representación esquemática de funcionamiento de medidor ORP^[77]

- Medidor EC (conductividad eléctrica): El medidor de conductividad eléctrica funciona mediante dos electrodos sumergidos en el líquido, de los cuales se conoce la diferencia de potencial entre ellos. Se puede medir la corriente que pasa por el líquido entre los dos electrodos a una distancia conocida y así generar un valor de resistividad, cuyo inverso es EC. Se utiliza un medidor marca Hannah Instruments. Se monitorea la condición de conductividad eléctrica del agua, para asegurar que ésta no sea mayor a la resolución del instrumento (0,05 mS/cm). Esto para asegurar que la cantidad de iones en el agua no afectará los resultados. El cloro en el agua aporta conductividad por lo que se exponen los tratamientos a 24 horas de luz UV (sol) para desclorinar. Este medidor tiene un rango de 0 a 20 mS/cm, una resolución de 0,05 mS/cm y error de $\pm 2\%$. Utiliza también una disolución de referencia.^[74] Se muestra abajo una representación esquemática de su funcionamiento.

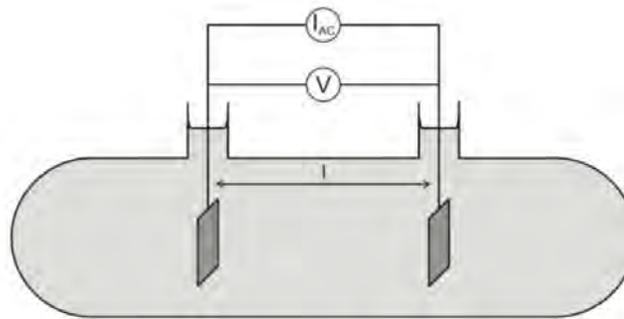


Figura 24: Representación esquemática de funcionamiento de medidor EC^[77]

- Medidor fotométrico de ozono disuelto en agua: se utiliza un medidor fotométrico de ozono disuelto en agua marca Chemetrics. Este tiene un rango de 0-5 ppm, pudiendo diluirse la muestra para determinar la concentración a partir de la medición disuelta. El error es de 10 % a 75 % del rango y de 30 % a 25 % del rango. Tiene una resolución de 0,001 ppm. Se debe verificar el cero con un vial especial. Este medidor funciona mediante una escala cromática calibrada por el fabricante. La concentración de ozono causa una coloración más o menos intensa, por la reacción con un indicador líquido dentro del vial de pruebas, el cual luego se inserta en el medidor.^[78]
- Manómetros: La descripción de funcionamiento de estos se ilustra en la sección de diseño hidráulico. Los manómetros utilizados son de la marca Winters y sus características son:
 - 1) En la descarga: rango de 0-690 kPa (0-100 psi) resolución de 10 kPa y un error del 1 %^[76].
 - 2) En la succión: rango de -207 a 207 kPa (-30 a 30 psi), resolución de 5kPa y un error del 1,5 %^[76]

2.3.2. Tamaños de Muestra y Pruebas Estadísticas a Realizar

Se desean evaluar los efectos de la presión; factor más determinante en la producción dada su influencia en la turbulencia del flujo y por la observación de primera mano de su efecto en el funcionamiento del sistema, sobre la tasa de ozonización del agua y la tasa de pérdida del ozono. Ya que se puede lograr una modulación de la presión de operación interna del sistema; se llevará a cabo un experimento comparativo simple que permite medir estas dos variables de respuesta ante una presión cercana al límite de formación de MNB (241,3 kPa ó 35 psi), y otra que se encuentre entre esta y el límite de resistencia de las tuberías (se utilizará 413,7 kPa ó 60 psi). A continuación, se muestran las hipótesis estadísticas para las dos variables de respuesta ante la variación de presión:

$$H_0 : \mu_{Tasa\ Ozonización\ Presión1} = \mu_{Tasa\ Ozonización\ Presión2} \quad (19)$$

H_1 : Al menos una de las medias es estadísticamente diferente a las demás.

$$H_0 : \mu_{Tasa\ Pérdida1} = \mu_{Tasa\ Pérdida2} \quad (20)$$

H_1 : Al menos una de las medias es estadísticamente diferente a las demás.

Así, se desea determinar si alguna de las dos presiones resulta en una muestra estadísticamente mejor en ambos aspectos, donde lo que se desea es una alta tasa de ozonización (medida en partes por millón por minuto ó ppm/min) y una muy baja tasa de pérdida, expresada en la misma unidad. Según fuentes consultadas, este contenido de ozono mínimo se refleja en una medición mayor a 0,5 ppm^[80], por lo que al llegar a este valor, la muestra se dice expirada. Es deseable obtener el último dato de retención de ozono en un momento en que la concentración esté cercana a este valor, ya que algunos experimentos exploratorios demostraron que la curva de pérdida de ozono tiene un comportamiento exponencial, imposibilitando la extrapolación lineal de datos.

Para la correcta determinación del tamaño de muestra, es decir el número de réplicas que se debe hacer para cada tratamiento (241,3 kPa ó 35 psi comparado a 413,7 kPa ó 60 psi), se utiliza la siguiente ecuación, tomada de la guía de usuario de la herramienta Minitab^[83].

$$n = \left(\frac{zs}{\epsilon}\right)^2 \quad (21)$$

Donde:

n es el número óptimo de muestras

z es el intervalo de confianza, que para una confiabilidad de 90 %, corresponde a un valor de 1,64, según las tablas de z crítico para una distribución normal como la que se muestra abajo.

s es la desviación estándar de la muestra.

ϵ es la magnitud aceptable del error en ppm/min, que se establece en 0,001 ppm/min para los datos de retención, y en 0,05 para la tasa de solubilidad.

Confidence level	Critical (z) value to be used in confidence interval calculation
50%	0.67449
75%	1.15035
90%	1.64485
95%	1.95996
97%	2.17009
99%	2.57583
99.9%	3.29053

Figura 25: Tabla de z-crítico para intervalos de confianza dados. [98]

Al ser una prueba que busca conocer de forma práctica una condición de operación del sistema que permita utilizarlo en pruebas y demostraciones en campo, los requerimientos de confiabilidad no son en extremo estrictos, y un indicio estadístico en la dirección correcta es suficiente para cumplir el objetivo de las pruebas. Se tiene un experimento que proporciona resultados de las dos variables de respuesta, por lo que se puede considerar cada análisis por separado. Sin embargo, después de un período de calibración y ajustes con el equipo, y varias pruebas fallidas, se determina que, primero, existen 2 factores que deben mantenerse constantes. El flujo de gas inyectado se fija en 3 L.P.M. con el regulador de flujo integrado en el concentrador de oxígeno. La otra variable a mantener constante es el tiempo de ozonización, este se mantiene en 5 minutos, ya que en este punto se alcanza un nivel de concentración de entre 5 ppm, muy por encima del límite mínimo establecido de 0,5 ppm. Al momento del análisis estadístico, se evaluará la potencia de las pruebas realizadas para determinar si es necesario realizar más pruebas en el futuro. Abajo, se muestra la forma en la que se calculan, a partir de los datos medidos, las variables de respuesta.

$$t_{oz.} = \frac{[O_3] - [O_3]_0}{t} \quad (22)$$

Donde:

$t_{oz.}$ es la tasa de ozonización del agua en el tanque, en ppm/min

$[O_3]$ es la concentración de la muestra después de un tiempo determinado de ozonización.

t es el tiempo de ozonización, que se establece en 2,5 minutos.

$$t_{pérd.} = \frac{[O_3]_1 - [O_3]_2}{t_2 - t_1} \quad (23)$$

Donde:

$t_{pérd.}$ es la tasa de pérdida de ozono del agua en el tanque, en ppm/min

$[O_3]$ es la concentración de la muestra después de un tiempo determinado de reposo.

t_1 es el tiempo de finalización de la ozonización, que se establece en 2,5 minutos.

t_2 es el tiempo de reposo transcurrido entre la finalización de la ozonización y la última medición tomada. [min]

La confiabilidad y el error aceptable se establecen en estos valores con el propósito de minimizar costos (cantidad de repeticiones, tiempo de los socios en realización de ensayos, materiales para ensayos, tiempo de recurso humano contratado), esto teniendo en mente el aspecto empresarial del proyecto, y además por la naturaleza comparativa simple del experimento.

A continuación se muestra una tabla resumen con los dos tratamientos a probar y las variables a evaluar.

Tratamiento	Variable de Respuesta 1	Variable de Respuesta 2
241 kPa/35 psi	Tasa de Ozonización (ppm/min)	Tasa de Pérdida (ppm/min)
414 kPa/ 60 psi	Tasa de Ozonización (ppm/min)	Tasa de Pérdida (ppm/min)

Figura 26: Cuadro resumen del experimento y las variables a evaluar. (elab. propia)

Con los resultados de las primeras 5 pruebas realizadas preliminarmente, se obtiene un n-óptimo para cada tratamiento, 4 en total, y se realizará una cantidad final de experimentos equivalente al n-óptimo mayor entre estos. Estos cálculos se observan en las siguientes tablas:

Ozonificación 241 kPa/35 psi, 180 L					
Prueba	Tasa	Promedio	Desv. Est.	Error Esperado	Tamaño de muestra
1	0.95	1.12	0.17	0.05	12
2	1.27				
3	1.18				
4	1.32				
5	0.89				

Figura 27: N-óptimo calculado para la tasa de ozonización a 241 kPa/ 35 psi (elab. propia)

Ozonificación 414 kPa/60 psi, 180 L					
Prueba	Tasa	Promedio	Desv. Est.	Error Esperado	Tamaño de muestra
1	0.89	1.05	0.14	0.05	8
2	1.30				
3	1.09				
4	1.00				
5	0.97				

Figura 28: N-óptimo calculado para la tasa de ozonización a 414 kPa/ 60 psi (elab. propia)

Retencion 241 kPa/35 psi, 180 L					
Prueba	Tasa	Promedio	Desv. Est.	Error Esperado	Tamaño de muestra
1	0.0108	0.0073	0.00213	0.001	5
2	0.0084				
3	0.0069				
4	0.0056				
5	0.0048				

Figura 29: N-óptimo calculado para la tasa de pérdida a 241 kPa/ 35 psi (elab. propia)

Retencion 414 kPa/60 psi, 180 L					
Prueba	Tasa	Promedio	Desv. Est.	Error Esperado	Tamaño de muestra
1	0.0098	0.01	0.0016	0.001	2
2	0.0072				
3	0.0059				
4	0.0056				
5	0.0058				

Figura 30: N-óptimo calculado para la tasa de pérdida a 414 kPa/ 60 psi (elab. propia)

Así, se concluye realizar 12 repeticiones para cada tratamiento. Una vez se hayan obtenido los datos, se analizarán primero mediante una prueba de bondad de ajuste Shapiro-Wilk para confirmar o rechazar la normalidad de los mismos. Después, se realizarán las siguientes pruebas estadísticas: prueba de análisis de varianzas, conocida como ANOVA, para medir si existe una diferencia entre las medias de tasa de ozonificación y tasa de pérdida para alguna de las dos presiones. Además, se realiza una prueba Levene para medir si existe una diferencia entre las varianzas de los resultados para las dos presiones, y finalmente, una prueba Kruskal-Wallis para medir si existe una diferencia en el rango de los datos para alguna de las dos presiones. ^[79]

2.4. Diseño Electromecánico y Automatización

2.4.1. Electrónica de Potencia

Para la conexión y alimentación eléctrica de los diferentes sistemas, se deben tener en cuenta varios aspectos de diseño. Inicialmente, para el prototipo, estas consideraciones son básicas y consisten en la selección de componentes apropiados, la seguridad eléctrica de los equipos y para los usuarios, y la demanda energética que se debe suplir. Se cuenta con tres equipos que requieren alimentación eléctrica. Estos se listan a continuación:

- Bomba generadora de micro-nanoburbujas: El motor es un componente que convierte energía eléctrica en energía mecánica. funciona mediante alimentación monofásica de 220 V, 60 Hz. Utiliza el fenómeno de inducción electromagnética para girar un rotor; produciendo energía mecánica utilizable en este caso para el bombeo de un fluido. Se elige este componente por su precio accesible para realizar las pruebas. Su consumo de potencia es de 0,75 kW. Funciona mediante el método de flujo en vórtice descrito en la sección 2.1.2.

Para la instalación de la bomba se debe seleccionar un cable, ya que esta no lo incluye. Para esto se debe calcular primero la corriente que el cable tendrá que manejar, por lo que se recurre a la ley de Ohm, que indica:

$$P = IV \quad (24)$$

Despejando se obtiene que:

$$I = \frac{P}{V} \quad (25)$$

Donde:

P: es la potencia, en esta caso 750W

V: es el voltaje de alimentación, en este caso 220 V

Por lo que:

$$I = \frac{750}{220} = 3,41 \text{ A} \quad (26)$$

La norma ASTM B258-02, indica tamaños de cable estandarizados bajo el código AWG (American Wire Gauge)^[83]. En este documento, se indican las dimensiones y resistividad del cable. Es conveniente siempre conocer las características del cable, en caso de que se deba diseñar para algo más crítico considerando pérdidas.

Para la selección de uno de estos tamaños de cable AWG que opere de forma segura para los usuarios y el equipo, se debe recurrir al código eléctrico nacional, que a su vez se basa en el NEC (national electrical code) emitido por la agencia de protección contra incendios de los Estados Unidos (NFPA). Este detalla la corriente máxima que cada cable AWG puede soportar y a qué temperatura. Así, según la indicación del NEC, el cable AWG más pequeño comercialmente disponible (AWG 14) tiene una capacidad de 15 A para funcionamiento a un máximo de 60°C^[84].

El código de la NFPA también especifica un tamaño diferente para cables de conexión a tierra, para el caso de 3.41 A, este también puede ser AWG 14, por lo que se consigue un cable aislado de 3 líneas de los colores recomendados por el código nacional de Costa Rica para más fácil identificación. Y también basándose en el código de colores del NEC. Negro para la línea viva, blanco para la línea neutra y verde para la línea de tierra.

NEC® TABLE 6-2

Table 310.15(B)(16) (formerly Table 310.16) Allowable Ampacities of Insulated Conductors Rated Up to and Including 2000 Volts, 60°C Through 90°C (140°F Through 194°F), Not More Than Three Current-Carrying Conductors in Raceway, Cable, or Earth (Directly Buried), Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)*

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.104(A).]						Size AWG or kcmil
	60°C (140°F)		75°C (167°F)		90°C (194°F)		
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM				
18 ^{AWG}	—	—	14	—	—	—	—
16 ^{AWG}	—	—	18	—	—	—	—
14 ^{AWG}	15	20	25	—	—	—	—
12 ^{AWG}	20	25	30	15	20	25	12 ^{AWG}
10 ^{AWG}	30	35	40	25	30	35	10 ^{AWG}
8	40	50	55	35	40	45	8

Figura 31: Extracto de tabla de amperaje permisible para cables AWG. [85]

Se verifican las terminales de conexión indicadas por un diagrama de circuito del fabricante de la bomba; y se realizan las conexiones. Se utiliza un enchufe tipo I según la IEC (comisión electrotécnica internacional) comúnmente usado en Costa Rica para 220 V en instalaciones caseras (que es lo que muy probablemente se encontrará en los sitios de prueba o demostración). Este tipo de enchufe se ilustra abajo. Se instala también para conveniencia de operación, un interruptor de 220V con caja impermeable para uso exterior.



Figura 32: Enchufe tipo "I" según la IEC^[90]

- Concentrador de Oxígeno por PSA: Se utiliza un concentrador de oxígeno de la marca Yuwell con alimentación monofásica de 110 V, 60 Hz. Tiene un consumo de potencia que se debería calcular a partir del valor de 500 VA dado por el fabricante. Este es el consumo de potencia aparente y proviene del voltaje y corriente rms. En casos en que haya algún componente reactivo (capacitor o inductor) se debe conocer el consumo de potencia real, que será menor. Sin embargo, se asume por seguridad y por ser valor de placa que es equivalente a 500 W. Funciona mediante el proceso PSA (pressure swing adsorption). Este proceso es posible gracias un sólido poroso selectivamente adsorbente llamado zeolita. Cuando se aumenta la presión, esta adsorbe el oxígeno separándolo de la mezcla de gases que es el aire. Cuando se reduce la presión lo libera. Por medio de un circuito de flujo con dos tanques de adsorción y un sistema de válvulas solenoides que alternan el flujo entre los dos tanques, se logra bombear oxígeno de forma constante a un 95 % de pureza.^{[86][87]} Es de gran importancia purificar el suministro de oxígeno al reactor de corona para evitar la formación de compuestos como óxido nítrico o dióxido de nitrógeno. Estos son incluso más reactivos que el ozono y en la presencia de agua crean ácido nítrico, siendo una potencial causa de falla de los componentes internos por corrosión excesiva.^[88]

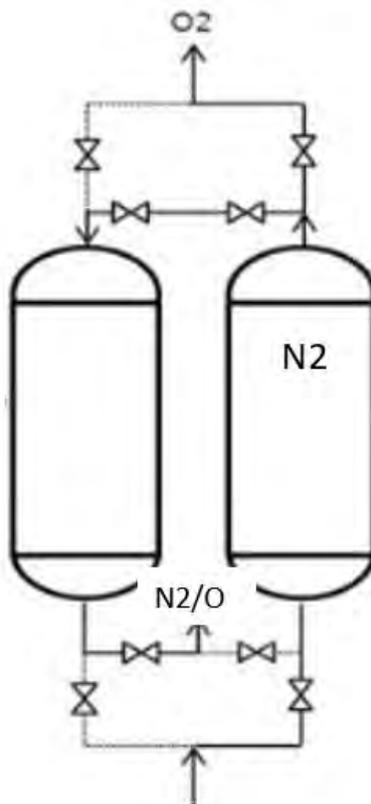


Figura 33: Configuración típica de sistema de dos recipientes para proceso PSA^[91]

- Reactor de Descarga de Corona: el generador de ozono, que contiene el reactor de descarga de corona, tiene alimentación monofásica de 110 V, 60 Hz. Su consumo es de 300 W especificado por el fabricante. La descarga de corona es un fenómeno que sucede alrededor de un material conductor cuando este genera una carga por alta tensión pero que no es suficiente para causar una descarga de arco eléctrico. Se ve físicamente como un brillo azul/violeta alrededor del sólido conductor. Esto genera una descarga eléctrica en forma de ionización del fluido alrededor del conductor. Este oxígeno ionizado luego reacciona con el oxígeno diatómico creando ozono.^[88] Este fenómeno se ilustra abajo:

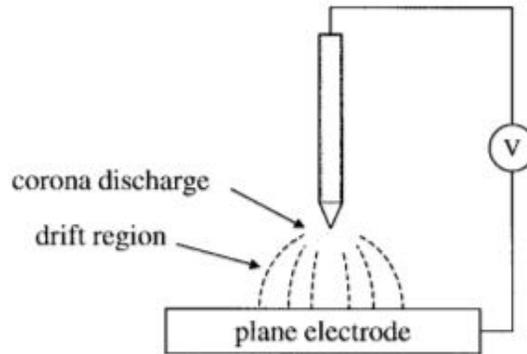


Figura 34: Representación esquemática simplificada de descarga de corona^[94]

- Transformador: El transformador utiliza un núcleo de material ferromagnético continuo para transmitir potencia de un circuito primario, alimentado en este caso por los 110 V del inversor o de la alimentación residencial (toma de pared) y por medio de un número variable de vueltas de una bobina a cada lado del núcleo, induce una corriente diferente a la de entrada en el circuito secundario. Esto a su vez genera una diferencia de potencial distinta, en este caso de 220V, manteniendo la potencia constante. Se debe asegurar que el mismo tenga una capacidad suficiente de al menos $500 \times 1,3 = 650$ W, para alimentar la bomba con un factor de seguridad para el arranque de 1,3. Abajo se ilustra un circuito transformador:

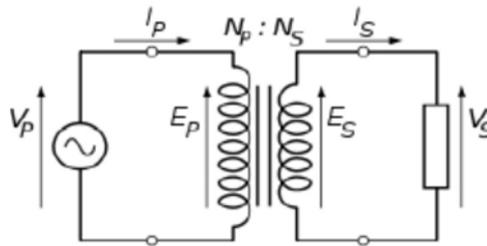


Figura 35: Circuito típico para un transformador^[92]

- Inversor: Una adaptación importante que se le debe poder hacer al sistema en el caso de no contar con instalación eléctrica pero sí con alguna batería de vehículo, caso común en el campo, se contempla el uso de inversores. Esto ya que las baterías de vehículos proveen corriente directa a una diferencia de potencial teórica de 12V, y se requiere conectar equipos que utilizan 110 V y 220 V. En este caso, se requiere un inversor con tres entradas y una capacidad 1,3 veces mayor a la suma de potencias, ya que se desea considerar el pico de arranque de las máquinas con un factor de seguridad de 1,3. Entonces: $(300 \text{ W} + 500 \text{ W} + (750)) * 1,3 = 2990 \text{ W}$. Se utilizaría así; de ser necesario, un inversor de 3000 W de capacidad nominal. Abajo se ilustra un circuito inversor típico:

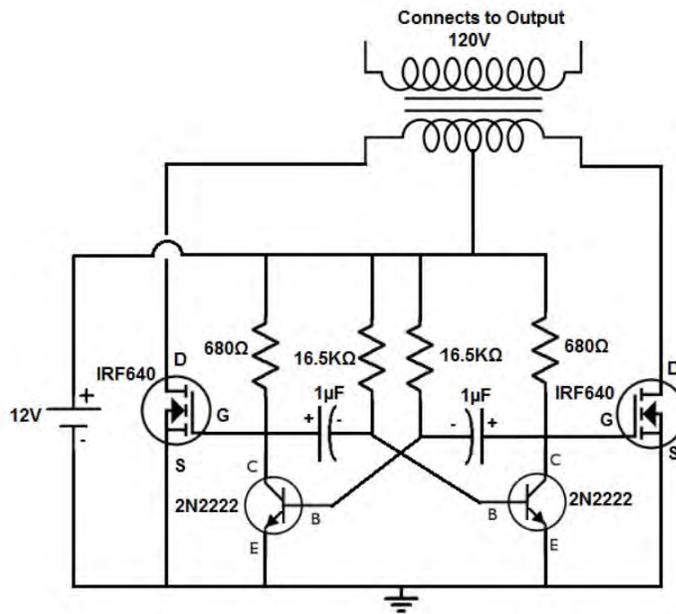


Figura 36: Circuito típico para un inversor^[93]

Posteriormente, para ilustrar el diseño eléctrico, una vez se inicie la construcción formal del prototipo, se contempla generar planos eléctricos sencillos a modo de utilizarlos en futuros proyectos asociados a la empresa.

2.4.2. Automatización del Sistema: Electrónica de Control

Manteniéndose en línea con la visión innovadora de la empresa, se desea contemplar a futuro para la adaptación del prototipo un grado de automatización que permita una operación casi nula por parte del usuario. La puesta en marcha del equipo requiere no solo encender la bomba, sino un procedimiento de regulación de flujos y presiones de agua y gas para iniciar la generación de MNBs. Este proceso por su naturaleza manual es poco eficiente y puede fácilmente prestarse para mala operación si no se hace en el orden correcto y en un tiempo determinado. Por esto, se desea instalar en la versión optimizada del prototipo (2.0) una serie de componentes electrónicos y electromecánicos que permitan una puesta en marcha automática. Para esto se contempla un sistema que se compone de 3 partes:

- PLC (Controlador Lógico Programable): Los PLC son computadoras industriales simples, optimizadas para ambientes donde la robustez es una necesidad. Permiten controlar procesos industriales y de manufactura de forma automática. Se basan en el uso de un microprocesador, en el cual se puede escribir un programa que le indique al PLC la respuesta a diferentes entradas de sensores. Este también puede activar actuadores como electro válvulas, motores, servos, etc. El PLC está diseñado con ingenieros en mente, que normalmente no serán muy adeptos para la programación. Por este motivo, usa lenguajes de programación simples e intuitivos orientados a la lógica. EL PLC es un elemento fácil de reprogramar y sirve para una amplia gama de aplicaciones. Sólo se deben conectar las señales que se desean controlar al PLC y crear el programa que se desea correr en su memoria. Además, son de naturaleza compacta, es decir, contienen todo lo necesario para ponerlos en funcionamiento dentro de una sola carcasa. Abajo, se ilustra un diagrama esquemático del interior de un PLC:

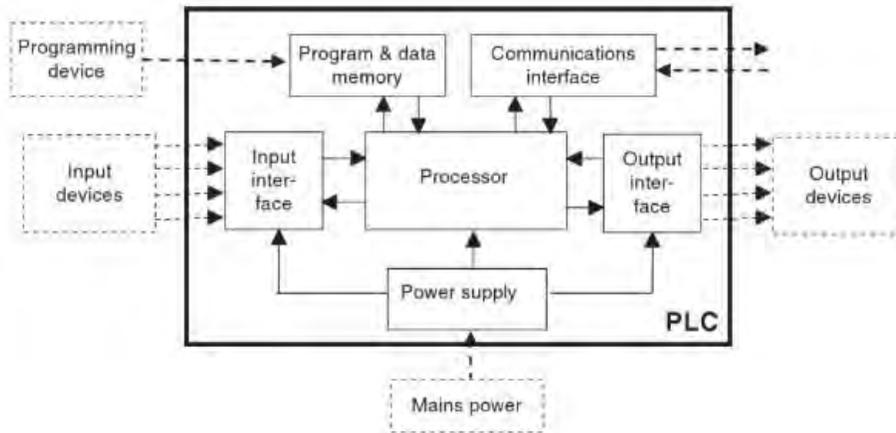


Figura 37: Diagrama de flujo de un PLC^[95]

Los PLC se definen por medio de condiciones booleanas y permiten entradas NC y NA (normalmente cerradas o normalmente abiertas). Existen varios lenguajes de programación básicos para PLC utilizados comúnmente y especificados por la norma IEC 61131-3.^[96] La norma define dos lenguajes textuales: Texto Estructurado (ST) y Lista de Instrucciones (IL); así como 3 lenguajes gráficos: Diagrama de Escalera (LD), Diagrama de Bloques (FBD) y Tabla de Funciones Secuenciales (SFC). Se utilizará LD ya que es el más común y se considera el más sencillo.

El lenguaje LD se define por una serie de "peldaños" que se ejecutan a gran velocidad en orden secuencial, además, las funciones en cada peldaño se ejecutan también de forma secuencial, y el siguiente peldaño no se ejecuta hasta que el anterior se complete. Estas operaciones suceden a gran velocidad generando el efecto de que todo se ejecuta al mismo tiempo, sin embargo, es importante tener esta limitación en cuenta. Ya que en realidad, solo se ejecuta una acción a la vez. Abajo, se puede observar un ejemplo del lenguaje de escalera. Nótese que cada entrada y salida tiene una dirección específica, lo cual se recomienda como buena práctica en la programación de PLC

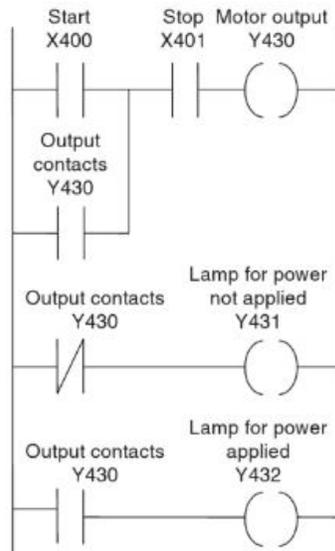


Figura 38: Ejemplos de lenguaje gráfico de escalera (LD) para PLC, utilizando entradas NC y NA y compuerta lógica OR^[95]

En cada peldaño, se describe de izquierda a derecha al menos una entrada, y al menos una salida. Las salidas y entradas se designan con direcciones en el sistema. También se pueden utilizar compuertas lógicas para peldaños con más de una entrada (AND, OR, NAND, XOR, NOR, NOT y más), descritas de forma binaria en la figura 39. Los PLC permiten adicionalmente el uso de temporizadores y contadores, subrutinas y más, dando amplia versatilidad a la programación de las tareas que se desee automatizar.

AND		
Entradas		Salida
A	B	
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

OR		
Entradas		Salida
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

NAND		
Entradas		Salida
A	B	
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NOR		
Entradas		Salida
A	B	
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

XOR		
Entradas		Salida
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NOT	
Entrada	Salida
0	1
1	0

Figura 39: Tabla de Verdad para compuertas lógicas básicas utilizables en PLC (elab. propia)

- Válvulas solenoides y Electro-Válvulas: Como actuadores del sistema, se utilizarán electro-válvulas. Estas son válvulas controladas como su nombre lo dice, por una entrada de señal eléctrica que genera una apertura o cerrado de la válvula; o una modulación de la válvula. Esto permite una automatización del sistema en conjunto con el PLC. Las diferentes electro válvulas se utilizan como salidas del PLC. La válvula solenoide es un tipo de electroválvula que funciona mediante una bobina que produce un campo magnético al pasar corriente por la misma; este es capaz de mover el elemento sellante de la válvula. Sin embargo no todas las electro-válvulas funcionan mediante este mecanismo.
- Sensores: finalmente, se consideran como posibilidad para el diseño del prototipo optimizado, una serie de sensores. Estos tienen el propósito de funcionar como entradas al PLC, generando la información necesaria para que el PLC ejecute los programas en tiempo real con el proceso.

3. Resultados

La sección de resultados de este trabajo, se divide por conveniencia en varias partes de acuerdo a las fases de desarrollo del proyecto discutidas en el marco metodológico.

3.1. Construcción del prototipo 1 (PMV)

Tras el desarrollo del diseño hidráulico y de electrónica de potencia expuestos en las secciones 2.2 y 2.4, se procedió a adquirir todos los componentes especificados y construir el sistema. Las mejoras físicas que se consideraron más esenciales para adaptar el prototipo inicial a las condiciones de demostración y experimentación, fueron la portabilidad de las diferentes máquinas utilizadas en el sistema (Concentrador de oxígeno, Generador de Ozono, bomba y tanque de mezcla) y dar soporte y protección a las mismas. Se diseñaron mediante un prototipado rápido con el software de diseño en 3D Solidworks, marcos de tubo para dar soporte, protección, y un medio de portabilidad a los equipos. A continuación se muestra el marco diseñado para el generador de ozono:



Figura 40: Marco para el generador de ozono del prototipo 1 (elab. propia)

Seguidamente, se adquieren tubos metálicos galvanizados de bajo costo, y se arman marcos sobre los cuales se montan el generador, y la bomba con todas sus tuberías. También se construye con partes recicladas un soporte para el tanque de mezclado, el cual no incluye ninguna forma de sujetarlo. Así, se ilustra en las siguientes imágenes el proceso de construcción de los marcos y soportes, ensamble del Prototipo 1, y finalmente el sistema listo para poner en marcha la experimentación y la demostración.



Figura 41: Proceso de construcción del marco para el generador de ozono del prototipo 1 (elab. propia)



Figura 42: Marco para la bomba generadora de MNB del prototipo 1 (elab. propia)



Figura 43: Proceso de construcción de soporte del tanque de mezcla del prototipo 1 (elab. propia)



Figura 44: Prototipo 1 ensamblado, con sistema listo para experimentación y con todos sus componentes (elab. propia)

Con el prototipo 1 construido, se puede proceder, por medio de las pruebas planteadas en la sección 2.3, a medir las variables de interés y obtener los datos que permitan determinar la mejor presión de operación para el sistema.

3.2. Pruebas de Presión

Como se mencionó anteriormente, para determinar el tamaño de muestra por medio de N-óptimo, se tomaron los primeros 5 datos, generados preliminarmente para este propósito. Abajo, se muestran los resultados finales de tasa de ozonización y pérdida para las dos presiones a comparar, con el tamaño de muestra que se calculó en la sección 2.3.2, tomados tras realizar las repeticiones necesarias con cada tratamiento. Con estos resultados, se puede proceder a realizar el análisis estadístico para determinar si la presión de operación causa una diferencia estadísticamente significativa sobre los factores medidos, y así elegir la presión de operación regular para el segundo prototipo a construir.

Ozonificación 241 kPa/35 psi, 180 L			
Prueba	Tasa (ppm/min)	Promedio	Desv. Est.
1	0.95	1.16	0.16
2	1.27		
3	1.18		
4	1.32		
5	0.89		
6	1.08		
7	1.31		
8	1.08		
9	1.24		
10	1.04		
11	1.13		
12	1.45		

Figura 45: Resultado de las pruebas de tasa de ozonización para 241 kPa/ 35 psi (elab. propia)

Ozonificación 414 kPa/60 psi, 180 L			
Prueba	Tasa (ppm/min)	Promedio	Desv. Est.
1	0.89	1.08	0.15
2	1.30		
3	1.09		
4	1.00		
5	0.97		
6	1.32		
7	1.04		
8	0.97		
9	0.86		
10	1.12		
11	1.21		
12	1.19		

Figura 46: Resultado de las pruebas de tasa de ozonización para 414 kPa/ 60 psi (elab. propia)

Pérdida 241 kPa/35 psi, 180 L			
Prueba	Tasa (ppm/min)	Promedio	Desv. Est.
1	0.0108	0.0071	0.0023
2	0.0084		
3	0.0069		
4	0.0056		
5	0.0048		
6	0.0094		
7	0.0097		
8	0.0069		
9	0.0056		
10	0.0041		
11	0.0035		
12	0.0089		

Figura 47: Resultado de las pruebas de tasa de pérdida para 241 kPa/ 35 psi (elab. propia)

Pérdida 414 kPa/60 psi, 180 L			
Prueba	Tasa (ppm/min)	Promedio	Desv. Est.
1	0.0098	0.0063	0.0016
2	0.0072		
3	0.0059		
4	0.0056		
5	0.0058		
6	0.0053		
7	0.0066		
8	0.0046		
9	0.0084		
10	0.0037		
11	0.0076		
12	0.0053		

Figura 48: Resultado de las pruebas de tasa de pérdida para 414 kPa/ 60 psi (elab. propia)

De este modo, con todos los resultados obtenidos, se puede proceder a realizar la prueba de bondad de ajuste (análisis de normalidad) y posteriormente la prueba ANOVA de análisis de varianza para ambas tasas, verificando así si existe alguna diferencia estadística entre las dos presiones en cuestión. Este análisis se muestra en detalle en la sección 4.1.

3.3. Demostraciones en Campo para Evaluación del Desempeño del Prototipo 1.0

Además de la experimentación para determinar la óptima presión de operación, se utilizó el equipo para varias pruebas en campo, con diferentes cultivos alrededor del país y en variedad de condiciones. Para la empresa asociada al proyecto, esto tuvo dos objetivos paralelos. El primero fue la validación experimental agronómica de la solución, que como se mencionó anteriormente, se llevó a cabo por el equipo de investigación y desarrollo agronómico de la empresa. Por otro lado, estas giras de demostración sirvieron con el propósito de evaluar el desempeño del equipo, su practicidad ante las condiciones reales del campo, y recibir retroalimentación de potenciales clientes sobre la funcionalidad y encaje del prototipo en sus operaciones.

A continuación, se provee evidencia fotográfica del equipo desempeñándose en variedad de ambientes, para ejemplificar el proceso cualitativo mediante el cual se idean las propuestas de mejora para la segunda iteración de prototipado.



Figura 49: Demostración del prototipo en finca de tomate (Santa Bárbara, Heredia, Costa Rica)(elab. propia)



Figura 50: Demostración del prototipo en vivero de flores ornamentales (San Isidro, Alajuela, Costa Rica)(elab. propia)



Figura 51: Demostración del prototipo en finca de gengibre orgánico (Río Cuarto, Alajuela, Costa Rica)(elab. propia)



Figura 52: Demostración del prototipo en finca de melon (Nicoya, Guanacaste, Costa Rica)(elab. propia)

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, el prototipo se utilizó en gran variedad de ambientes con diferentes sistemas de riego, medidas de seguridad e infraestructura, tipo de terreno, ubicación de fuentes de poder y muchas otras características. De las observaciones, retroalimentación, problemas y aciertos del prototipo 1, se pueden resumir las principales características deseables:

- **Portabilidad:** es esencial para que el equipo pueda ser utilizado en el mayor número de aplicaciones y ubicaciones, que el mismo sea portátil, y fácilmente transportable del sitio de aplicación a un sitio de resguardo, dadas las limitaciones en infraestructura, además es vital que el equipo sea compacto, es decir contenido en una sola unidad.
- **Protección contra Ingreso (IP):** Como también se puede apreciar en la primera imagen, en muchos casos las condiciones de campo presentan alto grado de suciedad en forma de polvo y barro, y por estar rodeado de fuentes de agua y sistemas de bombeo, que comúnmente no están en condición óptima, el peligro de que salpique agua sobre el equipo es constante. Por esto, se determina que el equipo requiere cierto grado de protección contra ingreso de sólidos y fluidos a las partes sensibles de la máquina.
- **Facilidad de acople a sistemas existentes:** Se observó también, que existe gran variedad de sistemas de riego. Para lograr que el segundo prototipo pueda operar con la mayor cantidad de sistemas, se utilizarán uniones rápidas de entrada y salida de agua, que pueden luego por medio de manguera, recircular agua en un tanque para su bombeo o inyectar un porcentaje de agua ozonizada a un flujo de riego existente, de forma ágil y rápida.
- **Integración de componentes:** Otra característica importante del segundo prototipo que se desea construir, es que este tenga todos sus componentes integrados en una sola máquina, facilitando colocarla en mayor variedad de lugares sin tomar mucho espacio y además siendo así portátil. Para esto, se adquieren todos los componentes internos de las máquinas que ya conforman el primer prototipo, realizando una amplia investigación de proveedores a nivel mundial, se logra encontrar cada componente sin carcasa, para realizar todas las conexiones localmente y diseñar un equipo que contenga todo en una sola carcasa y marco.
- **Marco y placas para soporte y protección:** Se comprobó la efectividad y necesidad del marco metálico para proteger el equipo de golpes y tener un agarre para su transporte por personas. Además, se incluirán placas que protejan la totalidad del equipo, y todos sus componentes electrónicos irán en una carcasa metálica
- **Facilidad de operación:** Como se puede ver en los varios ejemplos, se enseñó a varios de los trabajadores de las empresas a utilizar el equipo, con una retroalimentación constante sobre la complejidad de operarlo, ya que este requiere cerrar la válvula de salida de agua en 3 incrementos mientras se abre la válvula de gas entre estos. Este problema confirma la necesidad de automatizar el equipo, haciendo que su operación sea tan simple para el usuario como pulsar un botón de encendido, y que la máquina pare el proceso y se apague de forma automática al llegar a la concentración deseada.
- **Monitoreo de la concentración:** Para el apagado automático, se decide utilizar la concentración como referencia, sin embargo, también se aprendió que es útil conocer la concentración de ozono del tanque en todo momento, sobre todo después de terminado el proceso. Esto ya que en muchos casos, no se aplica el AO inmediatamente después de prepararse, y es importante para el productor saber cuanto tiempo tiene para esto.

Con esto en mente, se procede a realizar una selección de los nuevos componentes a integrar para la automatización del prototipo.

3.4. Selección de Componentes para Prototipo 2.0 y su automatización

Los componentes adicionales que se deben adquirir para una automatización del prototipo son los siguientes:

- Controlador Lógico Programable (PLC): Como se mencionó anteriormente, se debe utilizar un PLC como el componente encargado de recibir las entradas y señales de los sensores, así como enviar energía a los actuadores ó encender y apagar componentes, para así poder llevar a cabo el proceso de forma automática. Las características esenciales para el PLC son: el número de entradas y salidas analógicas y digitales, donde las entradas analógicas permiten generar acciones continuas, y las digitales sirven para señales de entrada y salida binarias, es decir energizado o no energizado. También se debe comprobar que el tipo de señal analógica del PLC elegido sea compatible con los sensores y actuadores. La señal más comúnmente encontrada en componentes de automatización para la escala de este proyecto es de 4-20 mA. Por lo que se utilizarán todas las señales analógicas de este tipo.
- Electro válvula reguladora: Este componente se colocará a la descarga del tanque de mezclado, para llevar la presión interna al valor de presión determinado en las pruebas. Por este motivo, debe ser capaz de cerrarse a un porcentaje especificado. Esto significa que es un componente de señal analógico, actuado por una salida del PLC.
- Válvula solenoide para ozono: se utiliza una válvula solenoide con función de abierto y cerrado solamente, para iniciar el flujo de ozono hacia la bomba de MNB cuando la presión leída por el sensor alcanza la mitad de la presión de operación. Esta válvula es actuada por una salida digital del PLC.
- Sensor de presión: este componente, que proporciona una entrada al PLC, se usa en conjunto con la válvula reguladora de presión. Permite generar una señal que el PLC interpreta como el valor actual de presión del sistema, y así utilizarla como referencia para saber en qué momento el cierre de la válvula alcanza la presión de operación interna requerida. Este componente se conecta a una entrada analógica del PLC.
- Medidor digital de concentración de Ozono con pantalla HMI: Finalmente, se utiliza un medidor digital de concentración de ozono con señal de 4-20 mA que se conectará a otra entrada analógica del PLC, este componente también muestra la concentración en una pantalla que se colocará en el panel de instrumentos de la máquina. Permite al PLC actuar para apagar el equipo automáticamente cuando se llega a la concentración especificada por el usuario, o internamente programada en el PLC.

Para dar concretamente con los componentes que se requieren, tomando en cuenta las características deseables y necesarias no sólo del equipo sino también de cada componente, se recurre a la metodología Kano, una herramienta que permite priorizar las funcionalidades o características de un producto o componente, para así lograr una elección óptima entre la gran oferta global, o para enfocar los recursos de desarrollo en las características más importantes. Entonces, según la priorización Kano, se tienen cuatro curvas en las cuales se puede clasificar cualquier característica de un producto como: imprescindible (must be), relacionado al desempeño (performance), atractivo (attractive) e indiferentes.

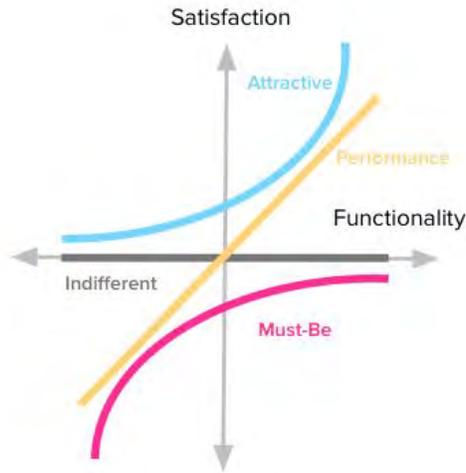


Figura 53: Gráfica de priorización Kano^[99]

Con base en el contenido de la gráfica, se completa para cada funcionalidad del equipo y de cada componente, una matriz como la siguiente, donde varios participantes del proyecto marcan una 'x' en el espacio donde se interseca la respuesta a las dos preguntas mostradas en cada eje.

1. Característica en cuestión		¿Cómo se sentiría si el producto NO tuviera esta funcionalidad?					
		Me gusta	Lo espero	No me importa	Puedo tolerarlo	No me gusta	
¿Cómo se sentiría si el producto tuviera esta funcionalidad?	Me gusta						Participante 1
							Participante 2
							Participante 3
							Participante 4
	Lo espero						Participante 1
							Participante 2
							Participante 3
							Participante 4
	No me importa						Participante 1
							Participante 2
							Participante 3
							Participante 4
	Puedo tolerarlo						Participante 1
							Participante 2
							Participante 3
							Participante 4
	No me gusta						Participante 1
							Participante 2
							Participante 3
							Participante 4

Figura 54: Matriz de priorización Kano^[99]

Para cada característica, el color que tenga más votos de los participantes es el que se considera según los colores de la gráfica como la prioridad para esa característica. Se completa una matriz para cada una de las siguientes características:

- Prototipo 2.0 en general:
 1. Apagado automático por concentración
 2. Apagado automático por tiempo
 3. Medidor integrado con pantalla
 4. Protección IP14: contra ingreso de objetos mayores a 50 mm (como una mano) y protección limitada contra ingreso de agua desde cualquier dirección
 5. Peso menor a 55 kg
 6. Ruedas
 7. Control automático del proceso

- Sensores:
 8. Sensor de presión en celda
 9. Sensor de presión en succión
 10. Sensor de presión en descarga
 11. Medidor de concentración
 12. Medidor de flujo de gas

- Válvulas:
 13. Electro válvula reguladora en descarga
 14. Válvula abierto/cerrado para inyección de ozono
 15. Válvula de regulación de presión en celda.

- Celda de Corona:
 16. Producción de ozono de 40 g/h.
 17. Enfriada por aire
 18. Celda programable con potencia modulable
 19. Vida útil mayor a 8 años

- PLC:
 20. Capacidad de al menos 2 entradas analógicas
 21. Conexión inalámbrica a internet
 22. Peso menor a 200 g
 23. Pantalla HMI
 24. Capacidad de al menos 2 entradas analógicas.
 25. Alimentación de 24 V
 26. Costo accesible
 27. Capacidad total de 3 entradas o más
 28. Capacidad total de 3 salidas o más

Una vez completadas las matrices para estas 28 características, se priorizan como muestra la siguiente tabla, para así buscar primeramente los componentes que cumplan con las características más importantes, o provean al equipo las funcionalidades más importantes.

Prioridad	3	2	1	4
-	Atractivo	Desempeño	Imprescindible	Indiferente
Funcionalid	1,5,6		3,4,7	2
Sensores		8	10,11	9,12
Valvulas			13,14	15
Celda de Corona	18,19	17	16	
PLC	21,26	22	20,23,24,25,27,28	

Figura 55: Tabla de priorización Kano para adquisición de los componentes (elab. propia)

Por medio de esta priorización, basada en las observaciones del desempeño del prototipo 1.0, se logran seleccionar y se adquieren todos los componentes necesarios para la construcción del prototipo 2.0 y su automatización. Se muestran abajo, los componentes adquiridos para este fin:



Figura 56: Controlador lógico programable y fuente de poder de 24 VDC, tomada en Bello Horizonte, Escazú, San José, Costa Rica. (elab. propia)



Figura 57: Válvula reguladora para la descarga de agua, tomada en San Rafael, Escazú, San José, Costa Rica. (elab. propia)



Figura 58: Válvula solenoide para la inyección de gas, tomada en San Rafael, Escazú, San José, Costa Rica. (elab. propia)



Figura 59: Sensor de presión con señal de salida de 4-20 mA, tomada en San Rafael, Escazú, San José, Costa Rica. (elab. propia)



Figura 60: Medidor de Ozono digital con señal de salida de 4-20 mA, tomada del manual de usuario^[101]

3.5. Resultados de Programación en LD

Para escribir el programa que será guardado en la memoria del PLC, se recurrió al lenguaje en escalera o LD. Los pasos para generar este programa inician con la redacción de un pseudo código del proceso, el cual se muestra a continuación:

Se activa boton de purga		Se activa ozonificacion	
1. Cerrar valvula de purga		3. Encender concentrador de oxígeno	
2. Abrir válvula de entrada de agua		4. Verificar presión de opercion de la celda	
Se programa concentracion deseada		5. Ajusta flujo de oxígeno	
		6. Ajustar cierre de válvula de salida de ozono	
		7. Encender celda de ozono	
		8. Ajustar potencia de la celda de ozono	
		9. Verificar apertura completa de valvula de salida de agua	
		10. Encender bomba de MNB	
23. Cerrar valvula de inyeccion de gas al 15%		11. Cerrar válvula de entrada al 15%	
24. Abrir valvula de salida a % calibrado para 40 psi		12. Cerrar vavula de salida a % calibrado	
25. Cerrar valvula de gas al 0%		13. Verificar presion de 30 psi	
26. Apagar celda de ozono		14. Abrir valvula de inyeccion de gas al 15%	
27. Apagar concentrador de oxígeno		15. Cerrar vavula de salida	
28. Cerrar valvula de salida de agua a % calibrado para 30psi		16. Verificar presion de 40 psi	
29. Abrir valvula a % calibrado para 15 psi		17. Abrir valvula de inyeccion de gas al 100%	
30. Apagar la bomba de MNB		18. Iniciar mediciones de ORP/O3 del medidor en tanque	
31. Cerrar la valvula de entrada		19. Cerrar vavula de salida	
		20. Verificar presion final (60psi)	
Se activa boton de purga		21. Continuar con mediciones de O3	
31. Abrir valvula de purga		22. Se mide concentracion deseada	

Figura 61: Pseudo-código de la operación del prototipo 2.0 (elab. propia)

Tras la realización de este proceso, se pasa el pseudo-código a un diagrama de flujo, para permitir una transición conceptual más fácil al LD, y representar el proceso y las operaciones de forma gráfica. Las decisiones se simbolizan con un rombo, mientras que las acciones y entradas se simbolizan con un círculo. Los círculos de colores representan la conexión entre diferentes secciones del diagrama.

Como penúltimo paso, se debe desarrollar la programación LD en la herramienta PLC Fiddle, la cual es altamente intuitiva para una primera programación este lenguaje, antes de incursionar en los software reales más complejos que se utilizan para programar el PLC. Abajo, se muestra el programa LD desarrollado mediante PLC Fiddle.

Con este programa preliminar, se procede finalmente a descargar el software CLICK, que es específicamente para el PLC utilizado, y con este se crea un programa equivalente al de la figura 62. El resultado final del programa luego se sube a la memoria del PLC por medio de un cable de datos incluido con el controlador, completando así la automatización del equipo. En el anexo 2 se incluye una explicación detallada línea por línea de este programa, para mayor claridad técnica.

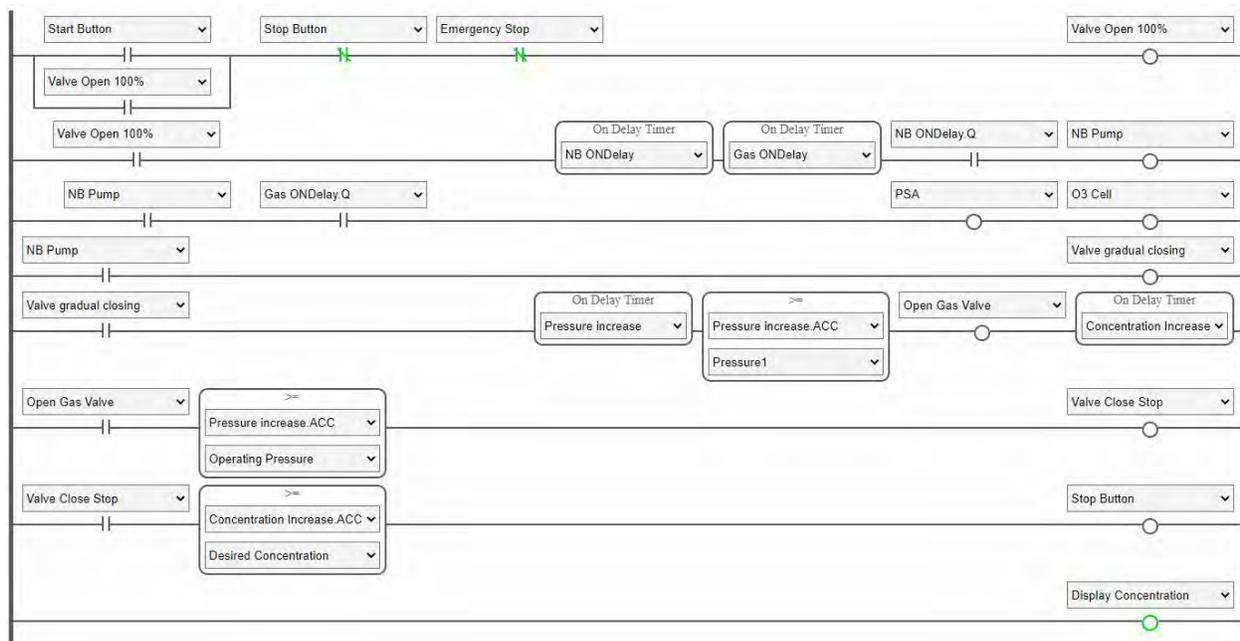


Figura 62: Programación LD del proceso en PLC Fiddle (elab. propia)

3.6. Planos eléctricos y mecánicos formales para construcción del prototipo 2.0

Para finalizar con la presentación de los resultados previos a la construcción del prototipo 2.0; se generan planos eléctricos y mecánicos por medio de la herramienta de diseño de planos eléctricos Electracloud, y el software de diseño en 3D Solidworks para proponer un diseño replicable y ensamblado digitalmente de forma precisa y detallada. Para esto, se debieron digitalizar todos los componentes de la forma mas precisa posible en referencia a sus medidas y forma reales. Esto no solo para prever el acomodo y posición de todas las partes, sino para idear y diseñar el marco y la carcasa en sí, ya que estos se debieron fabricar en acero inoxidable con una empresa metalmecánica, y las medidas para los planos debían estar especificadas.

Se hizo una primera iteración de la idea de diseño, que se puede ver en las figuras 63, 64 y 65. Este fue un modelado mas rápido, usando las partes de mayor tamaño solamente y descargando modelos genéricos de la pagina Grabcad donde fuera posible, los cuales son de libre uso justamente para fines como este.

Luego, se procedió a digitalizar las versiones reales de todas las partes a utilizar de forma manual; para aproximar el ensamble digital lo mas posible a la realidad. El cambio mas importante que se realizó en la segunda iteración fue el de agregar una carcasa rectangular en vez de en "L", ya que esto sería mucho mas complejo y costoso de fabricar. Además, la gran cantidad de componentes, su forma y tamaño, hicieron que la segunda iteración de modelado digital fuera mas grande, y con una distinción clara entre la parte inferior, donde los componentes mas robustos y/o expuestos al agua se encuentran sobre platinas transversales, y la carcasa cerrada superior, la cual contiene los componentes eléctricos y electrónicos, de control, la interfaz con el usuario (botones y monitor) y cableado.

En las figuras 66, 67 y 68, se muestran vistas de la segunda iteración del modelo 3D, comparadas con el prototipo real ensamblado, y se incluyen en los anexos 3 y 4 las láminas completas de los planos eléctricos y mecánicos respectivamente. Estas no solo fueron indispensables para la construcción de la máquina, sino que también sirven como base para llevar un registro de versiones y actualizar el modelo con los cambios necesarios que se evidencien después de probar el sistema en campo; lo cual es un paso crítico para la escalabilidad, protección de PI y manufactura en serie.

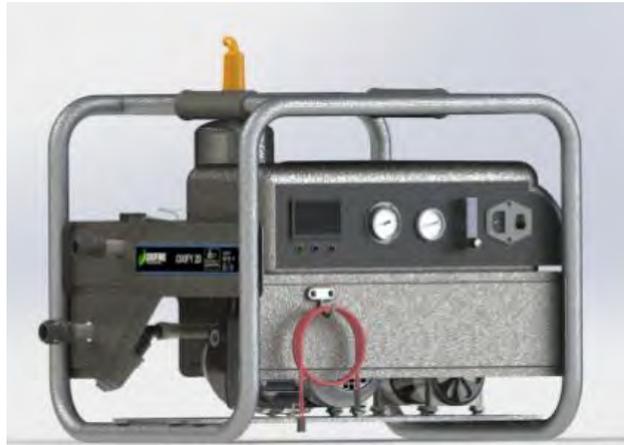


Figura 63: Representación en 3D del prototipo 2.0, primera iteración, vista 1 (elab. propia)



Figura 64: Representación en 3D del prototipo 2.0, primera iteración, vista 2 (elab. propia)



Figura 65: Representación en 3D del prototipo 2.0, primera iteración, vista 3 (elab. propia)

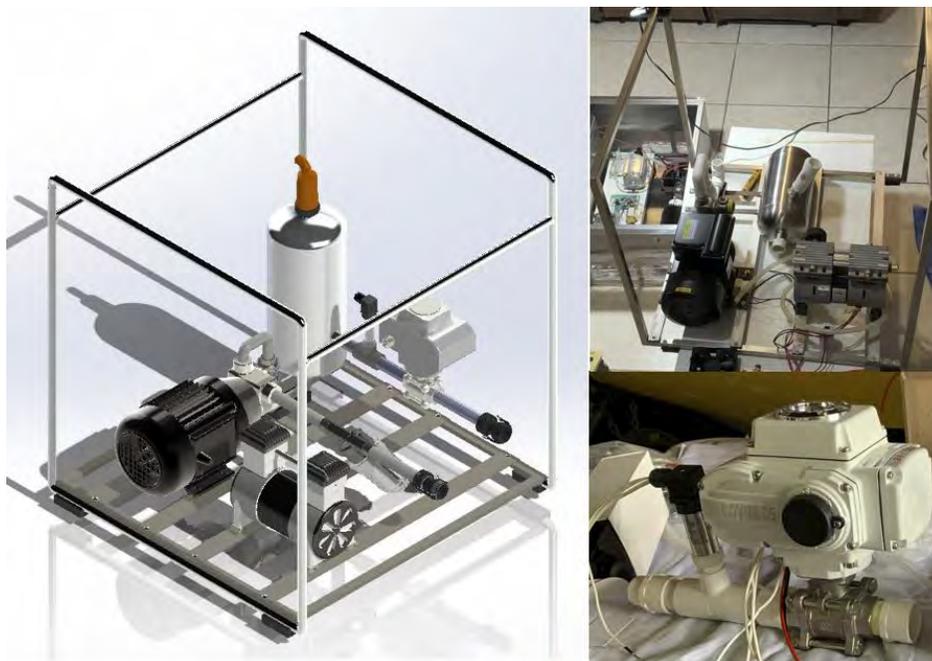


Figura 66: Representación en 3D del prototipo 2.0, iteración final vs. prototipo real, subensamble inferior 1 (elab. propia)

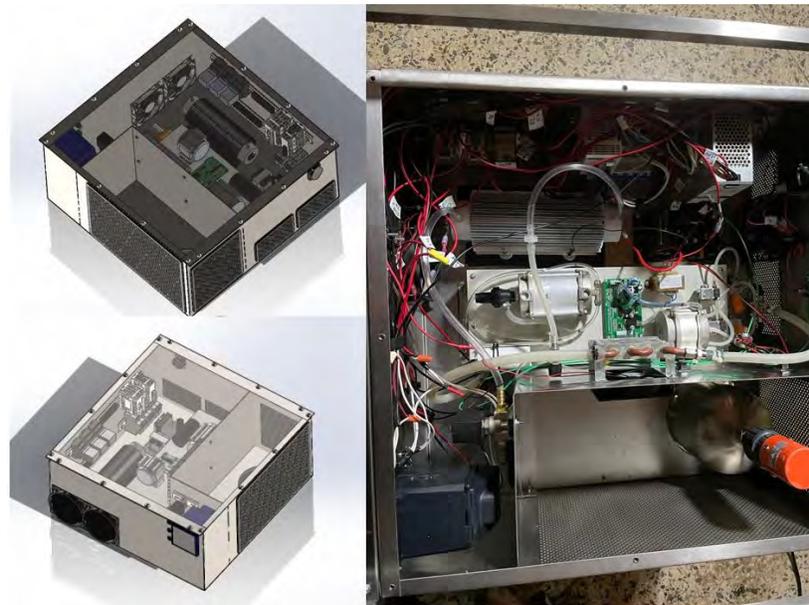


Figura 67: Representación en 3D del prototipo 2.0, iteración final vs. prototipo real, subensamble superior (elab. propia)

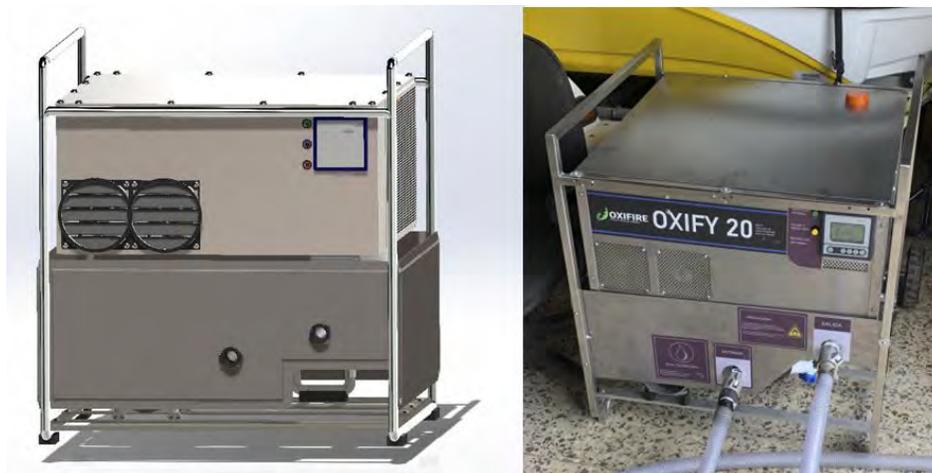


Figura 68: Representación en 3D del prototipo 2.0, iteración final vs. prototipo real, ensamble completo (elab. propia)

De esta manera se concluye con el diseño y la construcción del prototipo final que se utilizará para pruebas comerciales con clientes y como base para futuras versiones del equipo.

4. Análisis de Resultados

4.1. Análisis Estadístico de las Pruebas de Presión

4.1.1. Pruebas de bondad de ajuste

Seguidamente, se procede a realizar el análisis estadístico para las pruebas realizadas, con el fin de determinar cuál será la presión de operación del equipo. Primero, se realizan pruebas de bondad de ajuste para comprobar la normalidad de los datos para cada tratamiento. Las pruebas se realizan con la herramienta libre en línea para pruebas estadísticas "Statistics Kingdom"^[100], la cual calcula los estadísticos relevantes para cada prueba y da un criterio según el rango numérico para cada uno. Abajo se muestra el resultado de las 4 pruebas de bondad de ajuste para ozonificación y pérdida:

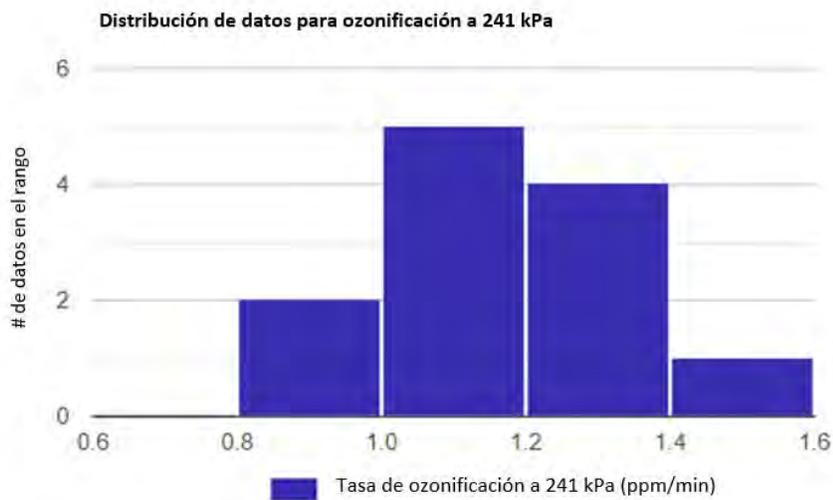


Figura 69: Histograma de distribución normal para datos de ozonificación a 241 kPa/ 35 psi^[100]

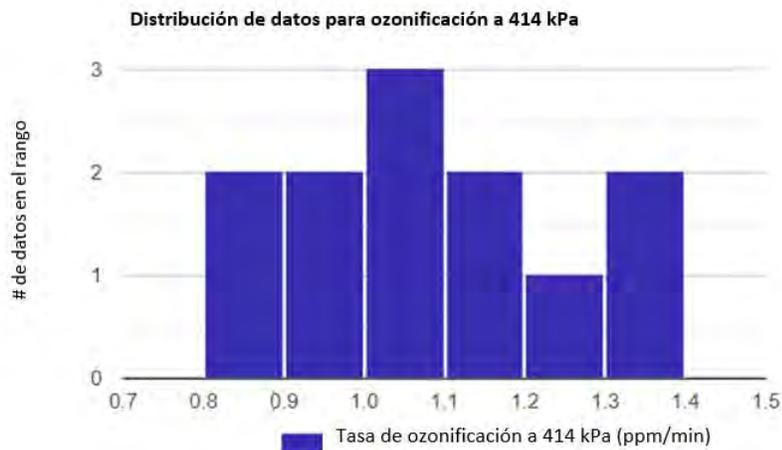


Figura 70: Histograma de distribución normal para datos de ozonificación a 414 kPa/ 60 psi^[100]



Figura 71: Histograma de distribución normal para datos de pérdida a 241 kPa/ 35 psi^[100]

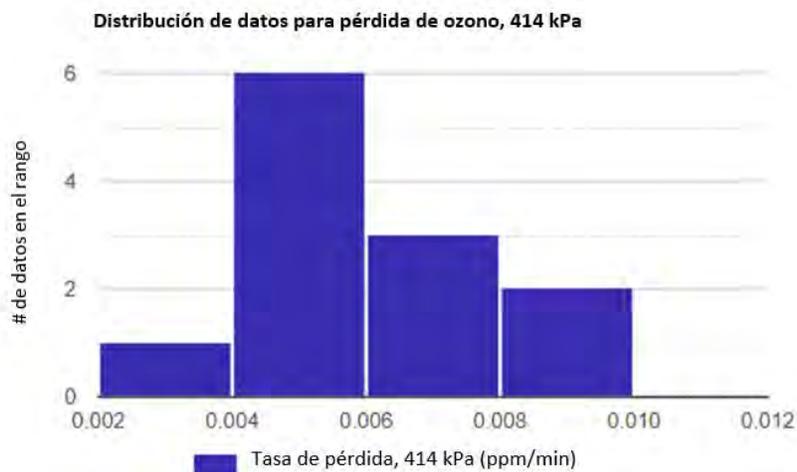


Figura 72: Histograma de distribución normal para datos de pérdida a 414 kPa/ 60 psi^[100]

Como se puede apreciar en los histogramas, los datos se asemejan en su forma a una distribución normal, y así lo comprueban los estadísticos de la prueba. En el caso de esta herramienta, se utiliza el estadístico W; que se debía mantener en el rango entre 0.0806 y 1.0000; el rango de valor crítico aceptado de 95% . Así, se comprueba la hipótesis nula, y se asume que los datos son normales. Los valores del estadístico W que se obtuvieron para cada grupo de datos representado arriba respectivamente fueron: 0.9824, 0.9552, 0.9540 y 0.9651.

4.1.2. Pruebas de análisis de varianza

Ahora, se procede a realizar diferentes pruebas de análisis de varianza entre los tratamientos de 241 kPa y 414 kPa, para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa en el comportamiento, habiendo medido la velocidad de ozonificación y la tasa de pérdida. De nuevo, se recurre a histogramas, esta vez de los dos tratamientos juntos, para representar de forma visual la distribución de los datos obtenidos para ambos en cada experimento, y se discute el resultado de los estadísticos obtenidos con la herramienta "Statistics Kingdom".

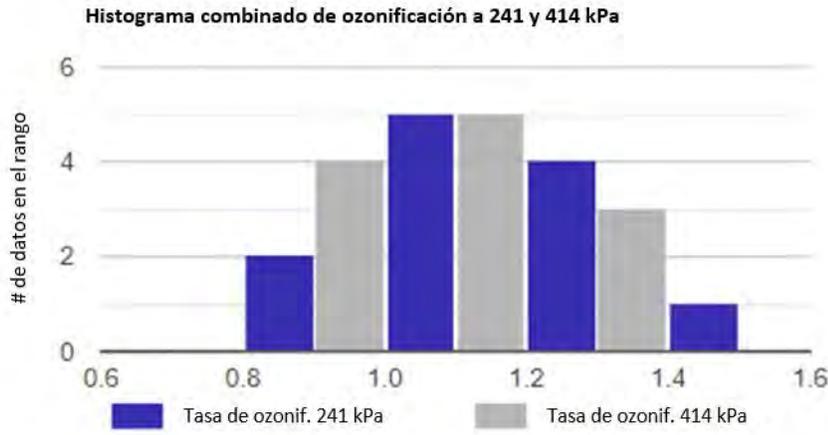


Figura 73: Histograma combinado de datos para ozonificación a 241 y 414 kPa^[100]

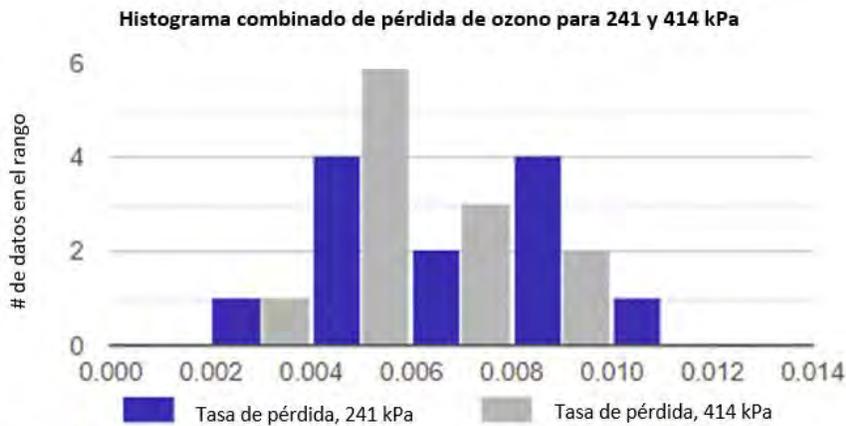


Figura 74: Histograma combinado de datos para tasa pérdida a 241 y 414 kPa^[100]

En los histogramas anteriores, se aprecia una distribución muy equitativa de los datos entre los dos tratamientos para ambos experimentos, indicando preliminarmente que no existe gran diferencia entre los tratamientos para las variables de respuesta medidas, caso que se confirmaría con las pruebas subsecuentemente mostradas y sus estadísticos

Prueba ANOVA de 1 vía

Se realiza una prueba de análisis de varianzas ANOVA para determinar si existe una diferencia estadística significativa en la media de las tasas de ozonificación y pérdida entre las dos presiones utilizadas. Abajo se muestran los resultados en forma de un diagrama de caja y bigotes o "box plot", que representa las medias de cada tratamiento.



Figura 75: Diagrama de caja para las medias de tasa de ozonificación: 241 y 414 kPa^[100]

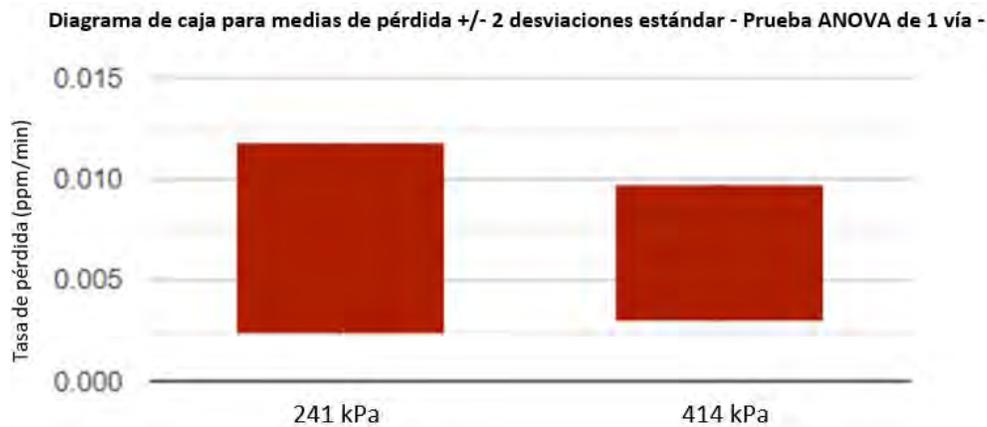


Figura 76: Diagrama de caja para las medias de tasa de pérdida: 241 y 414 kPa^[100]

La prueba ANOVA utiliza el estadístico F, del tipo de distribución F, para dar un criterio sobre el rechazo o aceptación de la hipótesis nula, que estipula una igualdad de medias. Para las pruebas de ozonif. y pérdida se obtienen $F = 1.6019$ y $F = 0.7530$ respectivamente. El rango para aceptar la hipótesis nula es de menos infinito a 4.3009, por lo tanto se acepta, y las medias entre los dos grupos correspondientes a las dos presiones utilizadas no se consideran estadísticamente distintas entre sí.

Prueba Levene para diferencia entre desviaciones estándar

Se realiza una prueba de Levene para determinar si existe una diferencia estadística significativa en la desviación estándar de las tasas de ozonificación y pérdida entre las dos presiones utilizadas. Abajo se muestran estos resultados en un diagrama como el de la sección anterior.



Figura 77: Diagrama de caja para la desv. estándar de tasa de ozonificación: 241 y 414 kPa^[100]



Figura 78: Diagrama de caja para la desviación estándar de tasa de pérdida: 241 y 414 kPa^[100]

Para la prueba de Levene, se utiliza también el estadístico F, para rechazar o no la hipótesis nula de igualdad de desviaciones estándar. Para las pruebas de ozonif. y pérdida se obtienen $F = 0.0603$ y $F = 2.0544$ respectivamente. El rango para aceptar la hipótesis nula es de menos infinito a 4.3009, por lo que no se puede decir que las desviaciones estandar son diferentes entre los dos tratamientos de presión.

Prueba Kruskal-Wallis para diferencia entre rangos

Se realiza una prueba de Kruskal-Wallis para determinar si existe una diferencia estadística significativa en el rango de las tasas de ozonificación y pérdida entre las dos presiones utilizadas. Abajo se muestran los resultados:

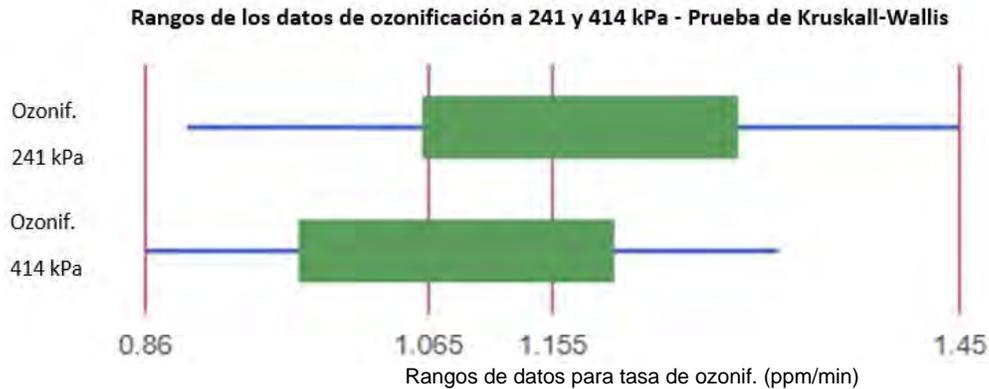


Figura 79: Diagrama de caja para el rango de tasa de ozonificación: 241 y 414 kPa

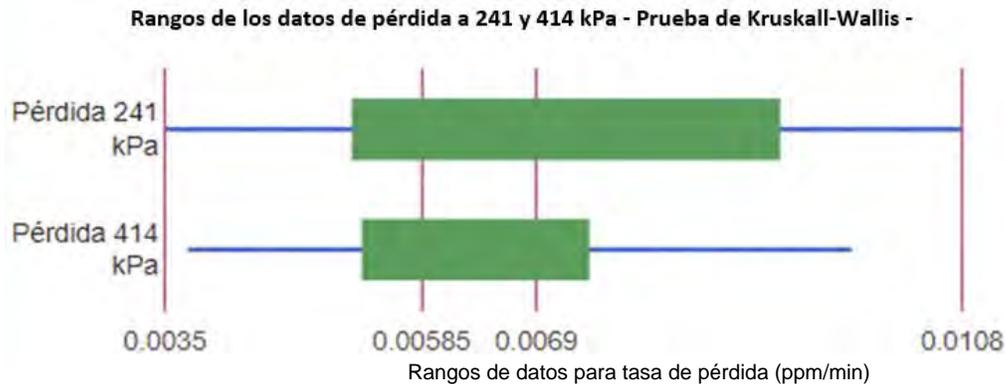


Figura 80: Diagrama de caja para rango de tasa de pérdida: 241 y 414 kPa

En este caso, el estadístico utilizado es H para una distribución Chi cuadrada. Los valores de este son 1.2703 y 0.4422 para los rangos de ozonif. y pérdida respectivamente, el rango aceptable para no rechazar la hipótesis nula es desde menos infinito a 3.8415, por lo que no se puede rechazar que los rangos sean iguales.

Conclusión general de todas las pruebas

Así, tomando en consideración los resultados de todas las pruebas, y lo discutido en los puntos anteriores, se determina que por el momento no se encuentra ninguna diferencia significativa en el comportamiento de las tasas de ozonificación y pérdida. Es decir, se puede operar el equipo a 241 kPa (35 psi) o a 414 kPa (60 psi). Así, el factor que determina finalmente cual presión usar es el desempeño de la bomba. A una menor presión, los esfuerzos internos, fatiga de los materiales, golpes de ariete y consumo eléctrico son menores, reduciendo los costos de operación y mantenimiento; por lo que se utilizará 241 kPa/ 35 psi para las demostraciones comerciales de este equipo.

4.2. Análisis y discusión del proceso de construcción del prototipo

El ensamble de la máquina completa a partir de los componentes base fue un proceso bastante largo y de alta complejidad. Aún con un diseño digital en software 3D como el que se generó, hubo 3 factores principales que causaron dificultades para el ensamble y puesta en marcha:

- Tolerancias de fabricación: Lo primero que se aprendió fue la importancia real de las tolerancias en la fabricación y la necesidad de considerar esto en futuros diseños, así como tener mayor exactitud en las medidas de los planos. Al ser la primera iteración de este diseño, no se estaba seguro de muchas medidas exactas hasta el momento del ensamble, ya que siempre hay un error en la digitalización de componentes, y esto se acumula al tener un ensamble con tantas partes. Se puede recurrir a mejorar la exactitud y nivel de detalle de los planos gradualmente, aplicando las mejoras al proceso que se observen en cada iteración y estandarizando lo más posible las dimensiones y posición de todos los componentes. La carcasa requirió de retrabajo para ampliar algunos agujeros, y al ser de acero inoxidable, hacer esto con herramientas más básicas como esmeril es una tarea más larga, cansada y riesgosa que obtener la medida correcta desde la fabricación.
- Primera interacción con un PLC: Al ser la primera vez que se programa un proceso por medio de un PLC, fue evidente que el cableado y operación para poner estos sistemas a funcionar en el mundo real, conlleva problemas imprevistos que son difíciles de identificar previamente con el planteamiento teórico, pero que a la vez pudieron ser resueltos, logrando controlar todo el proceso automáticamente con el PLC, usando señales digitales y analógicas de control. El cableado físico fue el mayor reto, ya que cada componente tiene un diferente cableado, y a veces diferente número de terminales, los manuales de usuario de estos componentes eran traducciones de Mandarín, y contenían explicaciones muy limitadas y pocas instrucciones, haciendo uso casi exclusivamente de diagramas eléctricos que a veces no reflejan de forma tan clara lo que se ve en el componente ya físico. Además, el PLC también tiene un cableado específico que se debe seguir, y descifrar esto fue un gran reto.
- Dificultad de acceso y complejidad del ensamble real: Finalmente, hacer las conexiones físicas para tantos componentes, sobre todo cuando se acumulan los cables y se va reduciendo cada vez más el espacio libre para trabajar dentro de la carcasa, fue una tarea extremadamente laboriosa. Al acumularse los cables y componentes es cada vez más extenuante instalar partes adicionales, conectar terminales y atornillar. Esto evidenció que tener un plan preconcebido para el ensamble, de forma que sea lo más modular y ágil posible, y previendo esta falta de espacio eventual, es un aspecto altamente crítico para replicar este prototipo. Además, la incomodidad y dificultad de acceso físico limitan la calidad de conexiones y aperturas. Por último, también limitó la limpieza ya que al final, con todo ensamblado, hay lugares inaccesibles o casi inaccesibles para la mano humana. Con esto se aprende que llevar un orden y una limpieza constante durante el ensamble es vital.

5. Conclusiones y recomendaciones

Abajo se enumeran las conclusiones del presente proyecto, con base en los objetivos específicos que fueron planteados al inicio del mismo:

1. Se diseñó exitosamente un prototipo mínimo viable del sistema de producción de ozono con diferentes máquinas comercialmente disponibles, pudiendo generar disoluciones de MNB de ozono para los experimentos y demostraciones a productores en campo.
2. Se planteó un diseño experimental que para realizar experimentos con el primer prototipo, se varió entre dos tratamientos de presión en la tubería y se midieron las variables de respuesta de velocidad de ozonificación y velocidad de pérdida del ozono en el agua después de tratarla.
3. Se realizaron exitosamente 12 mediciones de cada variable para las presiones de 241 y 414 kPa, llevando el agua a una concentración de 5 partes por millón y dejándola reposar, obteniendo así datos de la tasas de ozonificación y pérdida de ozono en la disolución preparada por la máquina, en PPM/min. No se apreció durante las pruebas una diferencia notable en el comportamiento entre los tratamientos, y hubo una gran variabilidad en los resultados para ambas presiones de operación.
4. Se realizó un análisis estadístico comprobando por medio de una prueba de bondad de ajuste la distribución normal. Luego, con pruebas ANOVA, Levene y Kruskal-Wallis, no se logró observar una diferencia significativa entre las presiones en las variables medidas, por este motivo se aceptan las dos hipótesis nulas planteadas en el diseño del experimento.
5. Se concluye que la presión de operación para las pruebas y demostraciones del equipo será de 241 kPa ó 35 psi, ya que esto implica un desempeño con menor consumo y menor riesgo de falla, reduciendo gastos de operación y mantenimiento respecto a operar a 414 kPa/ 60 psi.
6. Se priorizaron y propusieron las modificaciones para la segunda iteración de la máquina, observando que los aspectos más importantes a incluir son robustez, que sea compacta y semi-portátil, y sencilla de operar. Se seleccionaron así los componentes para construir el sistema en una sola unidad y con operación automática del proceso de encendido y apagado a la concentración necesaria.
7. Se construyó exitosamente el segundo prototipo, realizando luego pruebas de desempeño y demostraciones en campo del mismo, con la documentación y planos necesarios para su replicación, optimización, mejora y ensamble más ágil y organizado a futuro. La primera iteración de la máquina constaba de 4 componentes separados con una huella promedio de 0,3 x 0,3 m cada uno y un peso total de 100 kg (aprox.), pero además múltiples mangueras y tuberías que los deben conectar entre sí. El segundo prototipo consta de una sola máquina, con huella de 0,7 x 0,7 m (aprox.) y un peso de 80 kg, y solamente una entrada y salida para manguera de conexión rápida directamente al tanque que se debe tratar.
8. Se observó que a pesar de que la máquina logra una ozonificación a la concentración apropiada en volúmenes de 0 a 200 L (volúmenes de prueba), en un tiempo razonable de 5-10 minutos; a partir de los 200 L y hasta 1000 L, (los volúmenes más comúnmente utilizados en productores pequeños y medianos) el tiempo de preparación no es proporcional al de volúmenes de prueba, y el proceso se da de forma más lenta de lo extrapolado a partir de las mismas. Esto indica que el volumen del tanque que se está tratando juega un papel importante en el proceso, fenómeno que se que se estudiará en el futuro, y que se debe mitigar por ahora con un aumento en la capacidad de producción de ozono de la celda.

Recomendaciones y trabajo futuro

Para concluir con este proyecto se desea resaltar que el prototipo resultó completamente operacional, cumpliendo con lo que se había planteado originalmente como requerimientos críticos. Sin embargo, como es el caso en todo proceso de innovación, se identificaron inmediatamente varias mejoras y consideraciones para la máquina, algunas de las cuales fue necesario incluir en esta primera iteración para asegurar su funcionamiento apropiado o para evitar complicaciones previsibles:

- Control del calor interno: se utilizaron cámaras infrarrojas y termopares provistos por la escuela de Ing. Mecánica de la Universidad de Costa Rica, para hacer mediciones de temperatura de los componentes y el aire a la salida del compresor. Se encontró que la tarjeta de circuito de la celda estaba muy caliente respecto a su temperatura máxima recomendable, y el aire a la salida del condensador del compresor estaba muy caliente. Esto se resolvió instalando dos ventiladores adicionales en paralelo con los dos que ya se tenían. Este ajuste debió realizarse sobre el actual prototipo.
- Tamaño y peso: a pesar de ser mas portátil que tener 3 máquinas separadas, o que cualquier sistema integrado como este, se observó que el ancho del mismo dificulta el acceso por puertas de tamaño regular, así que en siguientes iteraciones se tomará como referencia de ancho máximo el que sea necesario para que entre cómodamente por puertas. Esta mejora no es aplicable a este prototipo, cuyo marco y carcasa ya existen, pero se realizará en la próxima iteración.
- Ruedas traseras y barras delanteras: Se agregaron también unas ruedas traseras gruesas y barras transversales en el frente para poder levantar la máquina y desplazarla como un carrito, ya que el peso de todo el sistema es de unos 80 kg; demasiado para ser levantado por una persona. Esta modificación ya fue realizada por la empresa metalmecánica que hizo el marco y la carcasa con un diseño estándar para ellos. Sin embargo se debe incluir esta actualización futuramente en los planos y será parte de todas las futuras iteraciones, con el propósito de mantener el diseño siempre al día.
- Celda de Ozono de mayor capacidad: Se incorporará futuramente a este prototipo para validar el desempeño del nuevo componente antes de definirlo para siguientes iteraciones del diseño, y con el fin de aumentar la capacidad, como se mencionó en las conclusiones.
- Otras mejoras: Otras mejoras que ya se identificaron e implementaron por medio de rondas de demostración a productores son: Dos botones de activación para llegar a dos diferentes concentraciones (una para riego de estimulación a bajas partes por millón y otra para fumigación a altas PPM), manual de usuario e interruptor general para poder dejar el equipo conectado. Las que se han identificado pero no implementado son: alarma de proceso terminado y una luz indicadora de estado y modo de operación.
- Se considera que sería de gran provecho continuar con esta investigación y el aprendizaje de esta tecnología, por lo que se insta a estudiantes del área de agronomía a contribuir mediante sus propios trabajos de investigación con la validación de las aplicaciones de ozono para distintos cultivos, extendiendo así la base global de conocimiento sobre el potencial de esta tecnología emergente. El efecto del ozono sobre cada cultivo y cada plaga podría ser diferente, por lo que esto ayudaría enormemente a difundir esta tecnología de manera mejor y más rápida hacia más sectores del mercado agrícola.

Referencias Bibliográficas

- [1]: Rice, R. G. (2002). Century 21-pregnant with ozone. *Ozone: science engineering*, 24(1), 1-15.
- [2]: Faytong, WE. (2017). Evaluación del efecto inhibitor del ozono sobre *Moniliophthora roreri* en condiciones in vitro (Tesis grad.). Guayaquil, Ecuador, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. 83 p.
- [3]: Villalobos, C. M., Díaz Serrano, F. R., Martínez Jaime, O. A., Torres Morales, J. J. (2016). Efecto del ozono sobre la población microbiana del suelo y el crecimiento de plantas de fresa. *Terra Latinoamericana*, 34(2), 229-237.
- [4]: Graham, T., Zhang, P., Woyzbun, E., Dixon, M. (2011). Response of hydroponic tomato to daily applications of aqueous ozone via drip irrigation. *Scientia horticulturae*, 129(3), 464-471.
- [5]: Llerena, A., Olivo, R. C., Aguirre, C. J. (2015). Relación de la concentración y frecuencia de aplicación de ozono con el nivel de daño de la Sigatoka Negra en banano. Diseño de un protocolo de riego con agua ozonificada. *Alternativas*, 16(2), 66-75.
- [6]: FAO. (2020). Plagas y Enfermedades de las Plantas. Consultado el 21 de abril 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/emergencias/tipos-de-peligros-y-de-emergencias/plagas-y-enfermedades-de-las-plantas/es/>
- [7]: Rodríguez, C. (2014, 20 de setiembre). Librar de crisis de agua a El Cairo costaría 2200 millones de dólares. *La Nación*. Recuperado de: <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/>
- [8]: Castillo, L. E., Ruepert, C., Solis, E. (2000). Pesticide residues in the aquatic environment of banana plantation areas in the north Atlantic zone of Costa Rica. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 19(8), 1942-1950.
- [9]: Wang, S., Wang, J., Wang, T., Li, C., Wu, Z. (2019). Effects of ozone treatment on pesticide residues in food: a review. *International journal of food science technology*, 54(2), 301-312.
- [10]: PROCOMER, 2020. Consumidores dejarían de comprar sus productos favoritos si no son sostenibles. Consultado el 20 de abril 2020. Disponible en: <https://www.procomer.com/es/alertas-comerciales/consumidores-dejarian-de-comprar-sus-productos-favoritos-si-no-son-sostenibles>
- [11]: Zheng, L., Liu, C., Song, W. (2019). Effect of Ozonated Nutrient Solution on the Growth and Root Antioxidant Capacity of Substrate and Hydroponically Cultivated Lettuce (*lactuca Sativa*). *Ozone: Science Engineering*, 1-7.
- [12]: Dizengremel, P. (2001). Effects of ozone on the carbon metabolism of forest trees. *Plant Physiology and Biochemistry*, 39(9), 729-742.
- [13]: Yalpani, N., Enyedi, A. J., León, J., Raskin, I. (1994). Ultraviolet light and ozone stimulate accumulation of salicylic acid, pathogenesis-related proteins and virus resistance in tobacco. *Planta*, 193(3), 372-376.

- [14]: Trambarulo, R., Ghosh, S. N., Burrus Jr, C. A., Gordy, W. (1953). The molecular structure, dipole moment, and g factor of ozone from its microwave spectrum. *The Journal of Chemical Physics*, 21(5), 851-855.
- [15]: Weatherhead, E. C., Andersen, S. B. (2006). The search for signs of recovery of the ozone layer. *Nature*, 441(7089), 39.
- [16]: Koppenol, W. H. (1982). The reduction potential of the couple $O_3/O\cdot^-$. *FEBS letters*, 140(2), 169-172.
- [17]: Villanueva, E.J. (2016). Patente española: ES2625034B1. Oficina Española de Patentes y Marcas.
- [18]: Antony-Babu, S., Singleton, I. (2009). Effect of ozone on spore germination, spore production and biomass production in two *Aspergillus* species. *Antonie van Leeuwenhoek*, 96(4), 413.
- [19]: Fujiwara, K. Fujii, T. (2002). Effects of spraying ozonated water on the severity of powdery mildew infection on cucumber leaves. *Ozone: science engineering*, 24(6), 463-469.
- [20]: Hayakumo, S., Arakawa, S., Takahashi, M., Kondo, K., Mano, Y., Izumi, Y. (2014). Effects of ozone nano-bubble water on periodontopathic bacteria and oral cells-in vitro studies. *Science and technology of advanced materials*, 15(5), 055003.
- [21]: Qiu, J. J., Westerdahl, B. B., Pryor, A. (2009). Reduction of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*, and ozone mass transfer in soil treated with ozone. *Journal of nematology*, 41(3), 241.
- [22]: McClurkin, J. D., Maier, D. E., Ileleji, K. E. (2013). Half-life time of ozone as a function of air movement and conditions in a sealed container. *Journal of stored products research*, 55, 41-47.
- [23]: Hoigné, J. (1988). The chemistry of ozone in water. In *Process technologies for water treatment* (pp. 121-141). Springer, Boston, MA.
- [24]: Kasprzyk-Hordern, B., Ziólek, M., Nawrocki, J. (2003). Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46(4), 639-669.
- [25]: Rice, R. G. (1996). Applications of ozone for industrial wastewater treatment—a review. *Ozone: science engineering*, 18(6), 477-515.
- [26]: Zoschke, K., Börnick, H., Worch, E. (2014). Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment—a review. *Water research*, 52, 131-145.
- [28]: Li, K., Javed, H., Zhang, G. (2015, December). Calculation of Ozone and NO_x Production under AC Corona Discharge in Dry Air Used for Faults Diagnostic. In *2015 2nd International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology*. Atlantis Press.

- [29]: Organización Mundial de la Salud (OMS), (2015). Technical specifications for oxygen concentrators. Consultado el 22 de abril 2020. Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/199326/9789241509886_eng.pdf;jsessionid=B8FE0013C6D17B97902089A84C2FA0D5?sequence=1
- [30]: Fujiwara, K., Fujii, T., Park, J. S. (2009). Comparison of foliar spray efficacy of electrolytically ozonated water and acidic electrolyzed oxidizing water for controlling powdery mildew infection on cucumber leaves. *Ozone: science engineering*, 31(1), 10-14.
- [31]: Guo, Z., Wang, Z., Li, Y., Wang, Q. (2019). Effect of Different Concentrations of Ozone on in Vitro Plant Pathogens Development, Tomato Yield and Quality, Photosynthetic Activity and Enzymatic Activities. *Ozone: Science Engineering*, 41(6), 531-540.
- [32]: Graham, T., Zhang, P., Zheng, Y., Dixon, M. A. (2009). Phytotoxicity of aqueous ozone on five container-grown nursery species. *HortScience*, 44(3), 774-780.
- [33]: Fujiwara, K., Fujii, T. (2004). Research note: Effects of ozonated water spray droplet size and distance on the dissolved ozone concentration at the spray target. *Ozone: Science and Engineering*, 26(5), 511-516.
- [34]: He, H., Zheng, L., Li, Y., Song, W. (2015). Research on the feasibility of spraying micro/nano bubble ozonated water for airborne disease prevention. *Ozone: Science Engineering*, 37(1), 78-84.
- [35]: Ohashi-Kaneko, K., Yoshii, M., Isobe, T., Park, J. S., Kurata, K., Fujiwara, K. (2009). Nutrient solution prepared with ozonated water does not damage early growth of hydroponically grown tomatoes. *Ozone: science engineering*, 31(1), 21-27.
- [36]: Sereno, A.M. (2016). Patente española: ES1169408U. Oficina Española de Patentes y Marcas.
- [37]: Hu, L., Xia, Z. (2018). Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation. *Journal of hazardous materials*, 342, 446-453.
- [38]: Azevedo, A., Etchepare, R., Calgaroto, S., Rubio, J. (2016). Aqueous dispersions of nanobubbles: generation, properties and features. *Minerals Engineering*, 94, 29-37.
- [39]: Villanueva, E.J. (2016). Patente española: ES2625034B1. Oficina Española de Patentes y Marcas.
- [40]: Hayakumo, S., Arakawa, S., Takahashi, M., Kondo, K., Mano, Y., Izumi, Y. (2014). Effects of ozone nano-bubble water on periodontopathic bacteria and oral cells-in vitro studies. *Science and technology of advanced materials*, 15(5), 055003.
- [41]: Chiba, K.; Takahashi, M. (2008). Japanese patent: JP4059506B2. Japanese Patent Office
- [42]: Zhang, X. H., Maeda, N., Craig, V. S. (2006). Physical properties of nanobubbles on hydrophobic surfaces in water and aqueous solutions. *Langmuir*, 22(11), 5025-5035.
- [43]: Butt, H. J., Graf, K., Kappl, M. (2013). *Physics and chemistry of interfaces*. John Wiley Sons
- [44]: Takahashi, M., Chiba, K., Li, P. (2007). Free-radical generation from collapsing microbubbles

in the absence of a dynamic stimulus. *The Journal of Physical Chemistry B*, 111(6), 1343-1347.

[45]: Spavieri, G., Gillies, G. T., Rodriguez, M. (2004). Physical implications of Coulomb's Law. *Metrologia*, 41(5), S159.

[46]: Bunkin, N. F., Shkirin, A. V., Suyazov, N. V., Babenko, V. A., Sychev, A. A., Penkov, N. V., ... Gudkov, S. V. (2016). Formation and dynamics of ion-stabilized gas nanobubble phase in the bulk of aqueous NaCl solutions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 120(7), 1291-1303.

[47]: KATAYAMA, H., HAYASHI, F., SHIMBARA, N., UNO, A., SUZUKI, Y., OKUDA, Y. (2016). Next-Generation Nanoporous PTFE Membrane. *SEI Technical Review*, (83), 51.

[48]: Chen, Y. (2016, April). Innovative Design for Vortex Micro-Nano Bubble generator Based on TRIZ. In 2016 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology. Atlantis Press.

[49]: Tsuge, H. (Ed.). (2014). *Micro-and Nanobubbles: Fundamentals and Applications*. CRC press.

[50]: Khuntia, S., Majumder, S. K., Ghosh, P. (2012). Microbubble-aided water and wastewater purification: a review. *Reviews in Chemical Engineering*, 28(4-6), 191-221.

[51]: Nayyar, M. L. (1992). *Piping handbook* (Vol. 1, No. 45370771, p. 1). New York: Mcgraw-hill.

[52]: Modern Hydraulics. (2014). Hydraulic Check Valves. Recuperado de: <http://www.modernhydraulics.net/hydraulic-check-valves.html>

[53]: Ballum, J.V.(2018). Air Valves in Piping Systems. *Valve Magazine*. Recuperado de: <https://www.valvemagazine.com/magazine/sections/back-to-basics/9170-air-valves-in-piping-systems.html>

[54]: Montgomery, R., McDowall, R. (2008). *Fundamentals of HVAC control systems*. Elsevier. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bourdon-tube>

[55]: ASTM. (2012). *Standard Test Methods for Rubber Deterioration—Cracking in an Ozone Controlled Environment* (Standard Number D11.15)

[56]: Abdullin, M. I., Gataullin, R. F., Minsker, K. S., Kefelil, A. A., Razumovskii, S. D., Zaikov, G. E. (1978). Effect of ozone on poly (vinyl chloride) degradation. *European Polymer Journal*, 14(10), 811-816.

[57]: Ozone Solutions. (2020). Ozone Compatible Materials. Recuperado de: <https://ozonesolutions.com/blog/ozone-compatible-materials/>

[58]: Marco Rubber and Plastics. (2020). *Cart O-Ring Material Quick Reference Guide - Rubber Sealing Materials*. Recuperado de: <https://www.marcorubber.com/o-ring-material-quick-reference.htm>

[59]: Ma, B., Andersson, J., Gubanski, S. M. (2010). Evaluating resistance of polymeric materials for outdoor applications to corona and ozone. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(2), 555-565.

- [60]: Nair, T. M., Kumaran, M. G., Unnikrishnan, G., Kunchandy, S. (2008). Ageing studies of ethylene propylene diene monomer rubber/styrene butadiene rubber blends: Effects of heat, ozone, gamma radiation, and water. *Journal of applied polymer science*, 107(5), 2923-2929.
- [61]: ASTM. (2019). Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications (Standard Number A240 / A240M-19)
- [62]: Oxidation Technologies LLC. (2018). Materials Ozone Resistance Chart. Recuperado de: <https://www.oxidationtech.com/blog/materials-ozone-resistance-chart/>
- [63]: ASTM. (2010). Standard practices for Rubber and Rubber Lattices (Standard Number D1418).
- [64]: Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K., Vivek, C. S. (2016). Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of materials science*, 51(8), 3657-3674.
- [65]: ASTM. (2012). Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe, Schedules 40, 80, and 120 (Standard Number 1785).
- [66]: ASME (2008) Process Piping ASME code for Pressure Piping, B31 (Standard number B31.3)
- [67]: Tijsseling, A. S., Anderson, A. (2006). The Joukowsky equation for fluids and solids. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, CASA-Report, (0608).
- [68]: Cengel, Y. (2014). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- [69]: Bunkin, N. F., Shkirin, A. V., Suyazov, N. V., Babenko, V. A., Sychev, A. A., Penkov, N. V., ... Gudkov, S. V. (2016). Formation and dynamics of ion-stabilized gas nanobubble phase in the bulk of aqueous NaCl solutions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 120(7), 1291-1303.
- [70]: Allen, R. G. (1996). Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach friction loss equations for pressurized irrigation. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(6), 685-693.
- [71]: Nayyar, M. L. (1992). *Piping handbook* (Vol. 1, No. 45370771, p. 1). New York: Mcgraw-hill.
- [72]: Manual, P. F. (1954). Hydraulic Institute. New York.
- [73]: LMNO Engineering. (2014). Hazen Williams Friction Loss Calculator. Recuperado de: <https://www.lmnoeng.com/hazenwilliams.php>
- [74]: Hannah Instruments. Product Specifications: HI-98120 Pocket ORP(Redox)/°C Tester. Recuperado de: <https://www.hannainstruments.co.uk/pocket-orp-redox-c-tester.html#specifications>
- [75]: Chemetrics. Technical Data Sheet: Ozone SAM Kit I-2019. Recuperado de: <https://www.chemetrics.com/product/ozone-sam-kit-i-2019/>

- [76]: Winters Instruments. MENA Product Catalogue. Recuperado de: http://winters.com/PDF/winters_MENAcatalogue.pdf
- [77]: Oxidation Technologies LLC. (2018). Measure ozone in water with ORP. Recuperado de: <https://www.oxidationtech.com/blog/measure-ozone-in-water-with-orp/>
- [78]: Corrosion Doctors. Water Resistivity Measurement. Recuperado de: <https://corrosion-doctors.org/Corrosion-Kinetics/Ohmic-drop-water.htm>
- [79]: Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons.
- [80]: Graham, T. G. (2012). New Perspectives on the Maintenance of Aqueous Ozone Residuals in Greenhouse and Nursery Irrigation Solutions.
- [81]: Minitab 19 Support. What is the pooled standard deviation? Recuperado de: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/what-is-the-pooled-standard-deviation/>
- [82]: Minitab 19 Support. Methods and formulas for Power and Sample Size for One-Way ANOVA. Recuperado de: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/statistics/power-and-sample-size/how-to/linear-models/power-and-sample-size-for-one-way-anova/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>
- [83]: ASTM. (2008). Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors (Standard Number B258-02)
- [84]: National Fire Protection Association. (2007). National Electrical Code: 2008. National Fire Protection Assoc.
- [85]: Smith, R.L.; Herman, S.L. (2005). Electrical Wiring Industrial: Based on the 2005 National Electrical Code, 12th Ed., Thomson Delmar Learning.
- [86]: Sircar, S. (2002). Pressure swing adsorption. Industrial engineering chemistry research, 41(6), 1389-1392.
- [87]: Kenney, C. N., Kirkby, N. F. (1984). Pressure Swing Adsorption. In Zeolites: Science and Technology (pp. 657-694). Springer, Dordrecht.
- [88]: Chang, J. S., Lawless, P. A., Yamamoto, T. (1991). Corona discharge processes. IEEE Transactions on plasma science, 19(6), 1152-1166.
- [89]: Peek, F.W. (1929). Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. McGraw-Hill.
- [90]: IEC. International Standards and Conformity Assessment for all electrical, electronic and related technologies: World Plugs - List by Country. Recuperado de: https://www.iec.ch/worldplugs/list_bylocation.htm
- [91]: Toyo Engineering Korea. Pressure Swing Adsorption Unit. Recuperado de: <https://www.toyo-eng.com/kr/en/business/industrials/psau/>

- [92]: How to Build a Power Inverter Circuit. Learning about Electronics. Recuperado de: <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Power-inverter-circuit.php>
- [93]: Singour, R., Solanki, P., Pathak, N Daram, S. (2012). Simulation of Single Phase Transformer with Different Supplies. International Journal of Scientific and Research Publications. 2.
- [94]: Schutze, A. Jeong, J., Babayan, S., Park, J., Selwyn, G., Hicks, R. (1999). The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources. Plasma Science, IEEE Transactions on. 26. 1685 - 1694. 10.1109/27.747887.
- [95]: Bolton, W., (2015). Programmable Logic Controllers, 6th Ed. Newnes.
- [96]: International Electrotechnical Commission. (2013). PLC Programming Languages (Standard Num. 61131-3)
- [97]: Lorenz, M. (2015) Industry 4.0: How Intelligent Machines will Transform Everything we Know [video file]. Recuperado de: https://www.ted.com/talks/markus_lorenz_industry_4.0_how_intelligent_machines_will_transform_everything_we_knowt-559420
- [98]: Hazra, A. (2017) Using the Confidence Interval Confidently. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/320742650_Using_the_confidence_interval_confidently
- [99]: The Complete Guide to the Kano Model Prioritizing Customer Satisfaction and Delight. obtenido de: <https://foldingburritos.com/kano-model/>
- [100]: Statistics online - checks assumptions, interprets results. Obtenido Septiembre 14, 2021, de <https://www.statskingdom.com/>
- [101]: Doz-3000 Panel Mounted Online Dissolved Ozone Meter Water Ozone Analyzer - Buy Online Dissolved Ozone Meter,Ozone Analyzer Product on Alibaba.com. (n.d.). Alibaba. Obtenido Septiembre 14, 2021, de https://www.alibaba.com/product-detail/DOZ-3000-Panel-Mounted-Online-Dissolved_60837634996.html

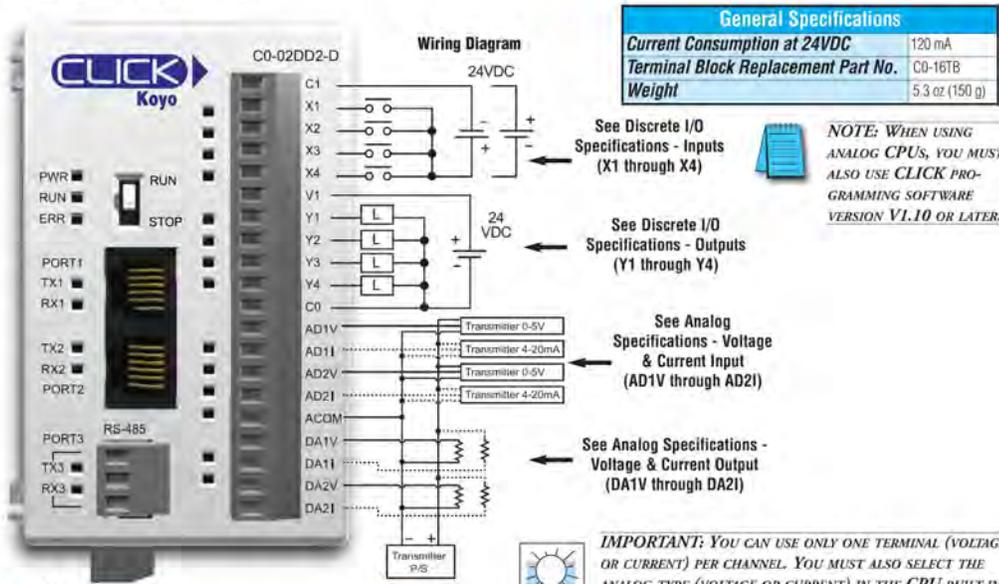
Analog CPU Module Specifications

C0-02DD2-D



4 DC Input/4 Sourcing DC Output; 2 Analog In/2 Analog Out Micro PLC

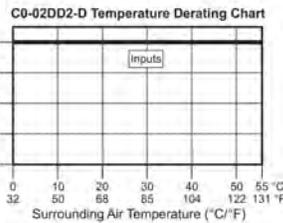
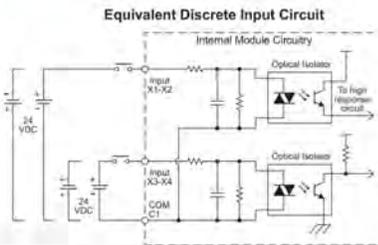
CLICK PLC CPU, 4 DC in / 4 sourcing DC out, 2-Ch Analog In / 2-Ch Analog out (current/voltage selectable), requires a 24 VDC power supply, 8K steps program memory, Ladder Logic programming, built-in RS232C programming port and RS232C Modbus/ASCII communications port (configurable up to 115.2K baud) and 3-wire RS485 Modbus/ASCII communications port, Real Time Clock/Calendar and battery backed memory. Discrete Inputs: 4 DC inputs, 24 VDC sink/source, 1 common. Discrete Outputs: 4 DC outputs, 24 VDC sourcing, 0.1A/point, 1 common. Analog Inputs: 2 channels, 4-20 mA, 0-5 VDC. Analog Outputs: 2 channels, 4-20 mA, 0-5 VDC. Removable terminal block included.



X1 - X4

C0-02DD2-D Discrete I/O Specifications - Inputs	
Inputs per Module	4 (Sink/Source)
Operating Voltage Range	24 VDC
Input Voltage Range	21.6 - 26.4 VDC
Input Current	X1-2: Typ 5 mA @ 24 VDC X3-4: Typ 4 mA @ 24 VDC
Maximum Input Current	X1-2: 6.0 mA @ 26.4 VDC X3-4: 5.0 mA @ 26.4 VDC
Input Impedance	X1-2: 4.7 kΩ @ 24 VDC X3-4: 6.8 kΩ @ 24 VDC
ON Voltage Level	X1-2: > 19 VDC X3-4: > 19 VDC
OFF Voltage Level	X1-2: < 4 VDC X3-4: < 7 VDC
Minimum ON Current	X1-2: 4.5 mA X3-4: 3.5 mA
Maximum OFF Current	X1-2: 0.1 mA X3-4: 0.5 mA
OFF to ON Response	X1-2: Typ 5 μs Max 20 μs* X3-4: Typ 2 ms Max 10 ms
ON to OFF Response	X1-2: Typ 5 μs Max 20 μs* X3-4: Typ 3 ms Max 10 ms
Status Indicators	Logic Side (4 points, green LED)
Commons	1 (4 points/common)

* Threshold level is 70% amplitude.



There are no ZipLink pre-wired PLC connection cables and modules for the analog CPUs. (Cannot mix discrete I/O and analog I/O signals in a ZipLink cable.)

Analog CPU Module Specifications

C0-02DD2-D (cont'd)

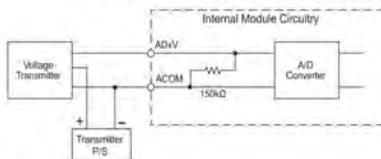
Y1 - Y4

C0-02DD2-D Discrete I/O Specifications - Outputs	
Outputs per Module	4 (Source)
Operating Voltage Range	24 VDC
Output Voltage Range	19.2-30 VDC
Maximum Output Current	0.1 A/point, 0.4 A/common
Minimum Output Current	0.2 mA
Maximum Leakage Current	Y1: 0.1 mA @ 30VDC; Y2-4: 0.1 mA @ 30VDC
On Voltage Drop	Y1: 1 VDC @ 0.1A; Y2-4: 0.5VDC @ 0.1mA
Maximum Inrush Current	150 mA for 10 ms
OFF to ON Response	Y1: typ 5 μ s; max 20 μ s; Y2-4: < 0.5 ms
ON to OFF Response	Y1: typ 5 μ s; max 20 μ s; Y2-4: < 0.5 ms
Status Indicators	Logic Side (4 points, red LED)
Commons	1 (4 points/common)

AD1V - AD2I

C0-02DD2-D Analog Specifications - Voltage Input	
Number of Channels	2 (voltage/current selectable)
Input Range	0 - 5 VDC
Resolution	12 bit
Conversion Time	50 ms
Input Impedance	150 k Ω
Input Stability	± 2 LSB maximum
Full-Scale Calibration Error	$\pm 1.2\%$ maximum
Offset Calibration Error	± 5 mV maximum
Accuracy vs. Temperature Error	± 100 ppm / $^{\circ}$ C maximum

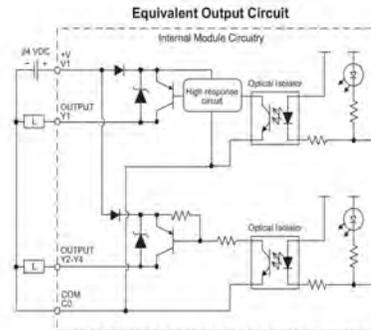
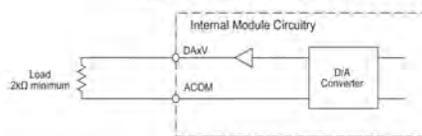
Analog Voltage Input Circuit



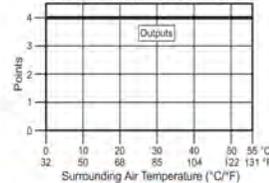
DA1V - DA2I

C0-02DD2-D Analog Specifications - Voltage Output	
Outputs per Module	2 (voltage/current selectable)
Output Range	0 - 5 VDC
Resolution	12 bit
Conversion Time	1 ms
Load Impedance	2 k Ω minimum (output current 2.5 mA maximum)
Full-Scale Calibration Error	$\pm 0.8\%$ maximum
Offset Calibration Error	± 5 mV maximum
Accuracy vs. Temperature Error	± 100 ppm / $^{\circ}$ C maximum

Analog Voltage Output Circuit

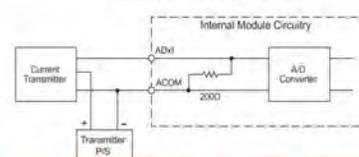


C0-02DD2-D Temperature Derating Chart



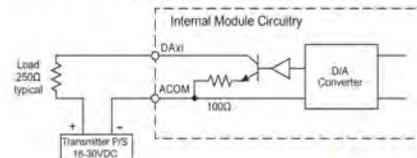
C0-02DD2-D Analog Specifications - Current Input	
Inputs per Module	2 (voltage/current selectable)
Input Range	4 - 20 mA
Resolution	12 bit
Conversion Time	50 ms
Input Impedance	200 Ω
Input Stability	± 2 LSB
Full-Scale Calibration Error	$\pm 1\%$ maximum
Offset Calibration Error	± 0.1 mA maximum
Accuracy vs. Temperature Error	± 100 ppm / $^{\circ}$ C maximum

Analog Current Input Circuit



C0-02DD2-D Analog Specifications - Current Output	
Outputs per Module	2 (voltage/current selectable)
Output Range	4 - 20 mA
Resolution	12 bit
Conversion Time	1 ms
Loop Supply Voltage	DC 18 - 30 V
Load Impedance	250 Ω Load Power Supply: DC 18V: 600 Ω maximum DC 24V: 900 Ω maximum DC 30V: 1200 Ω maximum
Full-Scale Calibration Error	$\pm 1\%$ maximum
Offset Calibration Error	± 0.1 mA maximum
Accuracy vs. Temperature Error	± 100 ppm / $^{\circ}$ C maximum

Analog Current Output Circuit



Company Info.

PLCs

Field I/O

Software

C-more & other HMI

AC Drives

AC Motors

Power Transmiss.

Steppers/Servos

Motor Controls

Proximity Sensors

Photo Sensors

Limit Switches

Encoders

Current Sensors

Pressure Sensors

Temp. Sensors

Pushbuttons/Lights

Process

Relays/Timers

Comm.

Terminal Blocks & Wiring

Power

Circuit Protection

Enclosures

Tools

Appendix

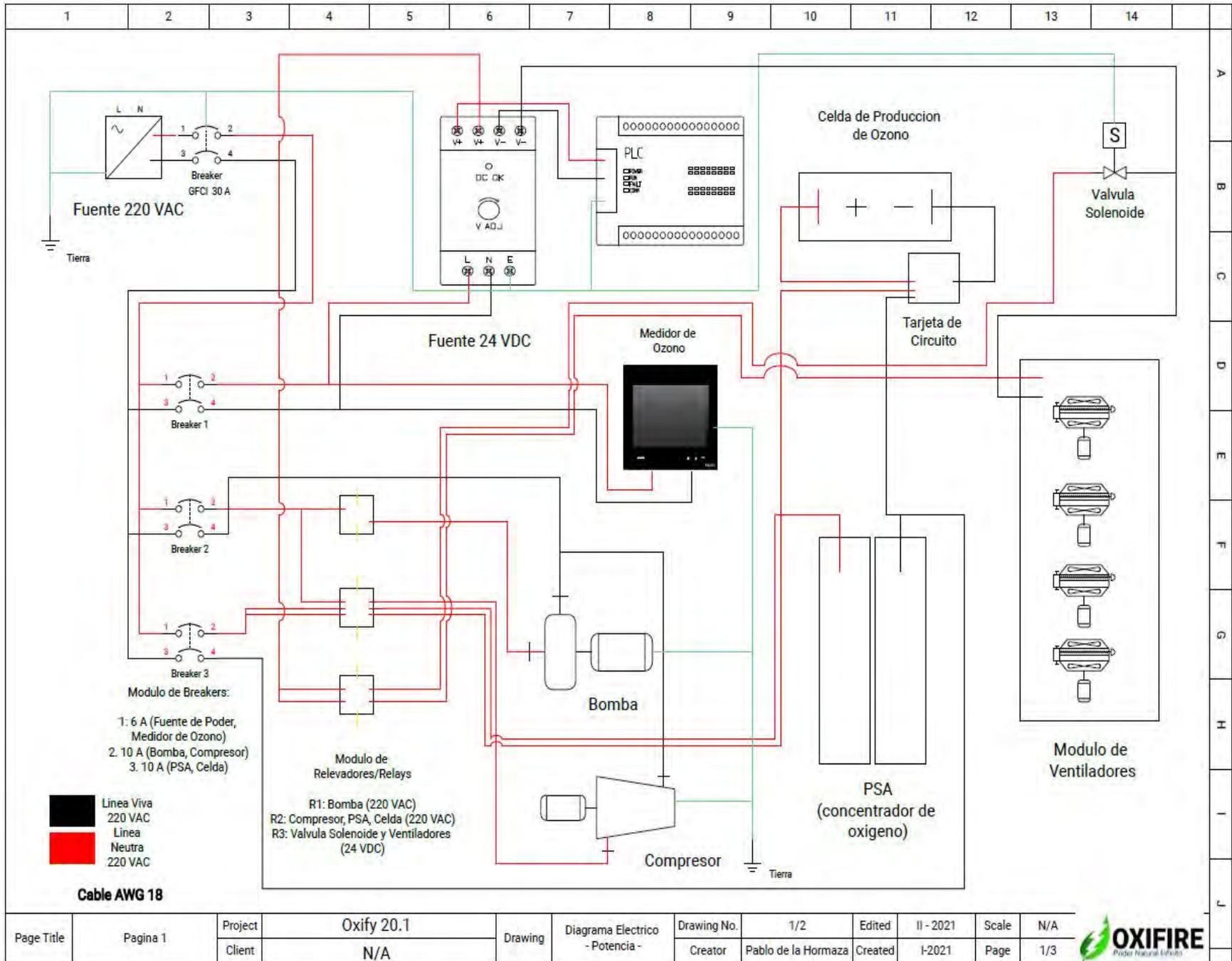
Part Index

Anexo 2: Explicación línea por línea del programa LD.

Explicación línea por línea del código para el prototipo automatizado

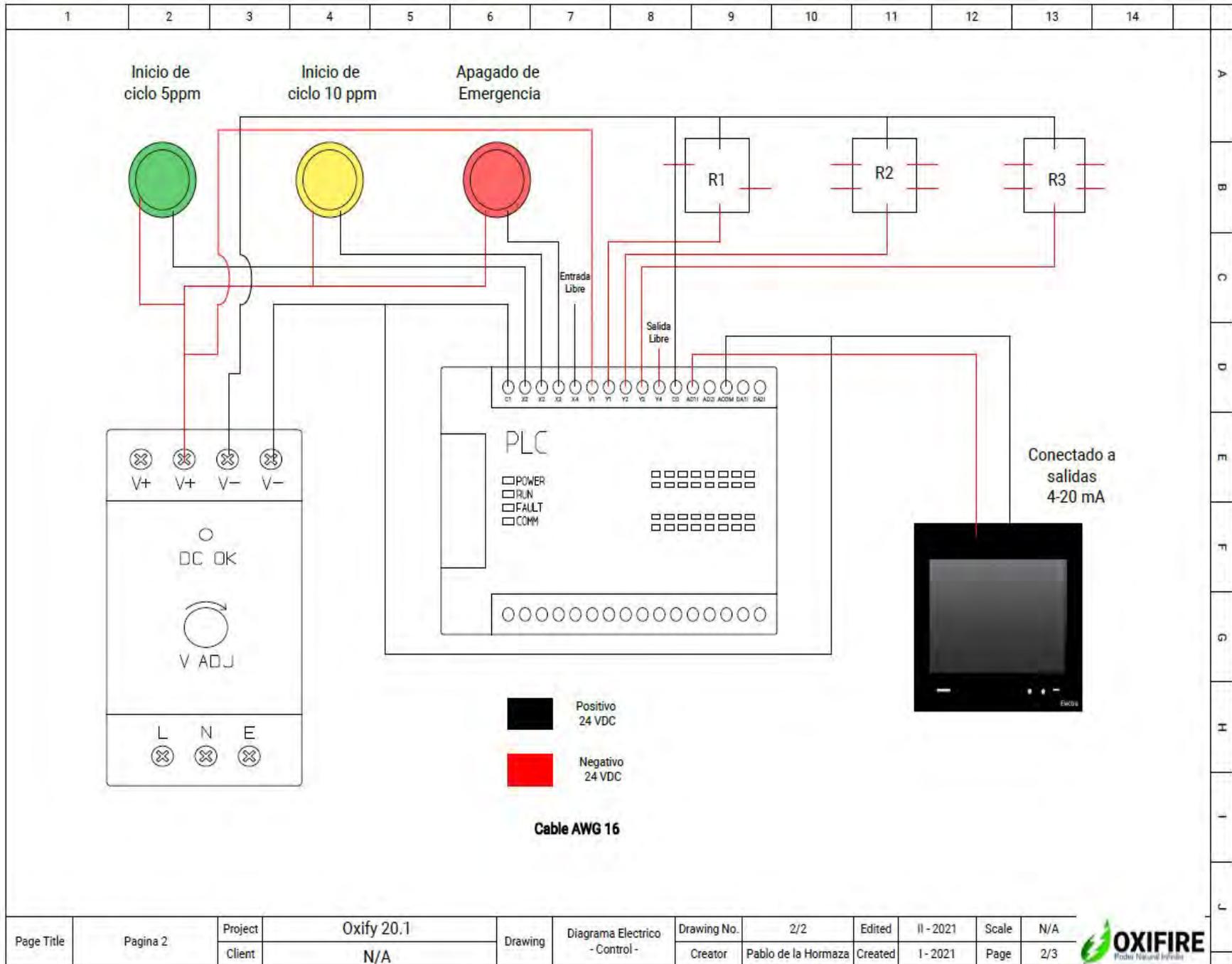
1. El usuario activa el botón de encendido, cerrando el contacto “Start Button” que se asocia a una entrada digital del PLC. Aquí se tienen dos contactos normalmente abiertos aguas abajo del contacto de arranque/ Estos contactos corresponden a las señales digitales para apagado de emergencia (emergency stop) y para el apagado automático (stop button). Al activar el encendido, como salida análoga en esta línea, se abre al 100 % la válvula de salida de agua. La conexión en paralelo condicionada a apertura de la válvula mantiene la máquina encendida luego de que el usuario deja de estrifar el botón, ya que sólo lo hace por un instante.
2. Se asigna un contacto normalmente abierto condicionado a la apertura completa de la válvula. Así, cuando esta se termina de abrir se inicia un temporizador corto y tras unos segundos el encendido de la bomba, así como otro temporizador más largo para retrasar el encendido de el PSA y la celda de ozono respecto a la bomba. Esto para dar tiempo a que esta esté trasegando ya agua al momento de inyectar gas.
3. Al estar activa la bomba (contacto NB pump se cierra, es decir la salida correspondiente a este componente está energizada) y al completarse el temporizador de retraso del encendido de gas (gas ON delay) se activa la salida digital que cierra en turno el relevador que enciende los componentes de producción de gas (celda y PSA). Cabe notar que el PSA se debe activar en conjunto con el compresor que le proporciona caudal.
4. Ya encendidos los componentes, se tiene como salida en este escalón, el inicio del cierre de la válvula reguladora de presión de agua, por medio de una señal digital al contacto de cierre de la válvula, sin especificar su porcentaje. La válvula reguladora posee una salida de 4-20 mA que retroalimenta su porcentaje de apertura, pudiendo así usar esta señal de referencia.
5. Al llegar a una presión de referencia 1 por medio del cerrado gradual de la válvula (valve gradual closing), alrededor de la mitad de la presión de operación, se realiza una comparación de la medición de presión y este valor de referencia, cerrando así el contacto el cerrado gradual de la válvula (valve gradual closing) se abre con otra salida digital (nombrada “open gas valve”) la válvula solenoide de gas, inyectando así ozono al agua y produciendo un aumento de concentración. En esta herramienta, se modeló el aumento de presión por cierre de la válvula y el aumento de concentración de ozono como los temporizadores “pressure increase” y “concentration increase”, sin embargo, en el programa que se sube al PLC, estos dos realmente son las entradas analógicas del medidor de ozono y el sensor de presión que irán en aumento y sirven de referencia para dejar de cerrar la válvula al alcanzar la presión deseada.
6. En este escalón se realiza la comparación del valor de presión de operación medido desde el sensor de presión, con el valor de presión de operación encontrado mediante las pruebas realizadas, y al llegar la presión del sistema a cruzar este valor deseado, se envía la señal a la válvula para que deje de cerrarse.
7. Con el sistema ya ozonificando el agua, se realiza una comparación entre la concentración actual y la deseada, y al cumplirse esta se cierra el contacto, energizando la salida “Stop button”, que se encuentra como contacto normalmente cerrado en la primera línea, abriendo así este y interrumpiendo todo el programa desde el primer escalón.
8. Esta línea se usa solamente para que el medidor de ozono no se desactive en ningún momento y así pueda desplegarle al usuario la concentración durante la ozonificación de la mezcla, y también después, para monitorear la concentración mientras aplica al riego.

Anexo 3: Planos eléctricos del prototipo final.



Page Title	Pagina 1	Project	Oxify 20.1	Drawing	Diagrama Electrico - Potencia -	Drawing No.	1/2	Edited	II - 2021	Scale	N/A
		Client	N/A			Creator	Pablo de la Hormaza	Created	I-2021	Page	1/3





Page Title	Pagina 2	Project	Oxify 20.1	Drawing	Diagrama Electrico - Control -	Drawing No.	2/2	Edited	11 - 2021	Scale	N/A
		Client	N/A			Creator	Pablo de la Hormaza	Created	1 - 2021	Page	2/3

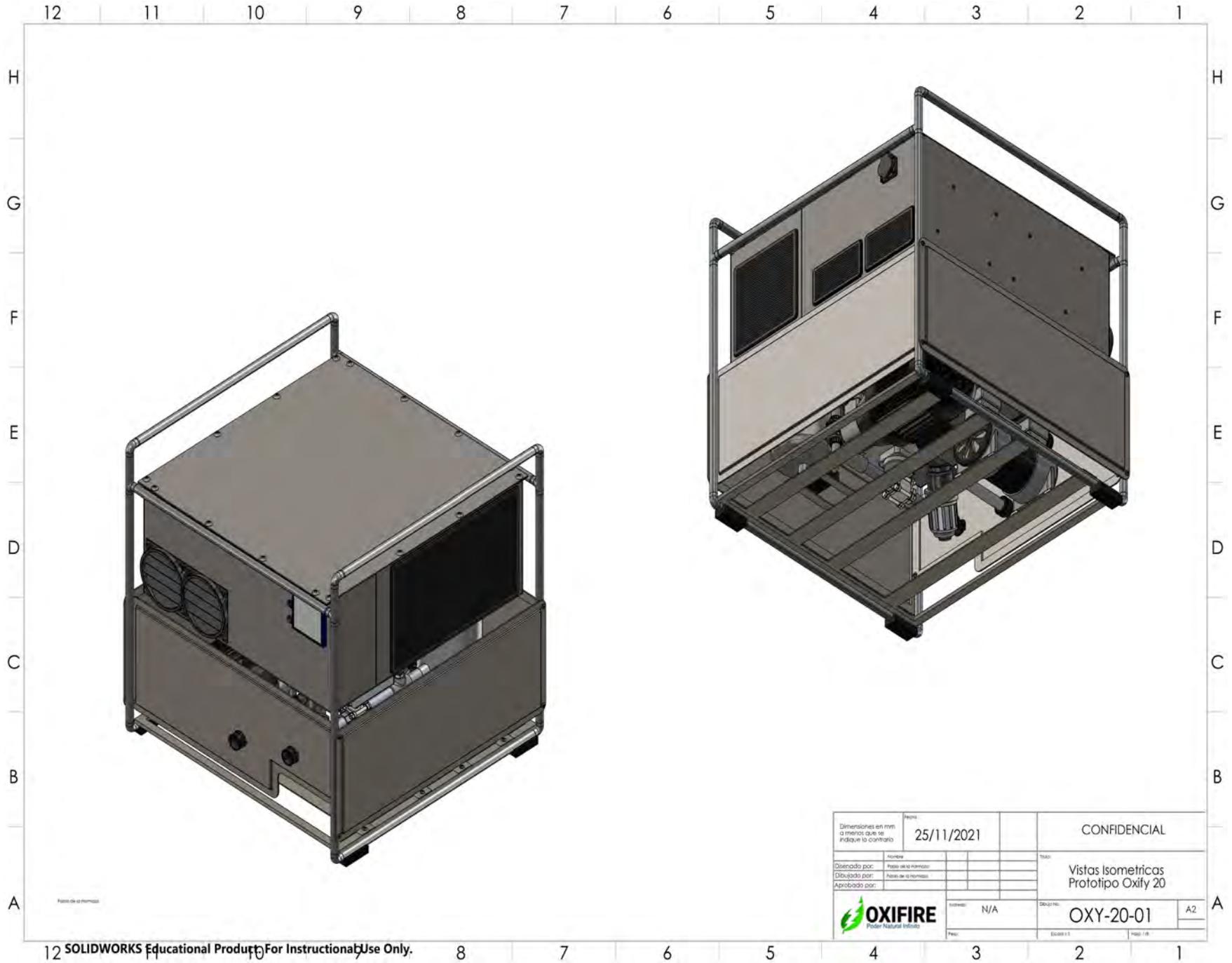


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Num. Parte</th> <th style="width: 20%;">Descripcion</th> <th style="width: 10%;">Marca</th> <th style="width: 45%;">Detalles</th> <th style="width: 15%;">Cantidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td>Fuente de Poder</td> <td>Rhino</td> <td>Entrada: 110 - 220 VAC Salida: 24 VDC</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td>PLC</td> <td>Koyo CLICK</td> <td>Modelo C0-02-DD2-D 24 VDC Salidas: C1: comun de entradas digitales X1,X2,X3,X4 (entradas digitales) V1: comun + de salidas digitales Y1,Y2,Y3,Y4 (salidas digitales) C0: comun - de salidas digitales AD1V, AD1I, AD2V, AD2I : entradas analogas por voltaje o corriente (solo se muestran entradas de corriente) ACOM: comun de entradas y salidas analogas DA1V, DA1I, DA2V, DA2I: salidas analogas por voltaje o corriente (solo se muestran salidas de corriente)</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td>Breaker reg.</td> <td>N/A</td> <td style="text-align: center;">6 A - 250 V</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td>Breaker reg.</td> <td>N/A</td> <td style="text-align: center;">10 A - 250 V</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td>Relevador</td> <td>N/A</td> <td style="text-align: center;">8 patas - cap. Maxima 10 A - 250 V</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td>Boton</td> <td>N/A</td> <td style="text-align: center;">3 A - 125 V en colores verde, amarillo y rojo</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> </tbody> </table>														Num. Parte	Descripcion	Marca	Detalles	Cantidad	1	Fuente de Poder	Rhino	Entrada: 110 - 220 VAC Salida: 24 VDC	1	2	PLC	Koyo CLICK	Modelo C0-02-DD2-D 24 VDC Salidas: C1: comun de entradas digitales X1,X2,X3,X4 (entradas digitales) V1: comun + de salidas digitales Y1,Y2,Y3,Y4 (salidas digitales) C0: comun - de salidas digitales AD1V, AD1I, AD2V, AD2I : entradas analogas por voltaje o corriente (solo se muestran entradas de corriente) ACOM: comun de entradas y salidas analogas DA1V, DA1I, DA2V, DA2I: salidas analogas por voltaje o corriente (solo se muestran salidas de corriente)	1	3	Breaker reg.	N/A	6 A - 250 V	2	4	Breaker reg.	N/A	10 A - 250 V	1	5	Relevador	N/A	8 patas - cap. Maxima 10 A - 250 V	3	6	Boton	N/A	3 A - 125 V en colores verde, amarillo y rojo	3
Num. Parte	Descripcion	Marca	Detalles	Cantidad																																												
1	Fuente de Poder	Rhino	Entrada: 110 - 220 VAC Salida: 24 VDC	1																																												
2	PLC	Koyo CLICK	Modelo C0-02-DD2-D 24 VDC Salidas: C1: comun de entradas digitales X1,X2,X3,X4 (entradas digitales) V1: comun + de salidas digitales Y1,Y2,Y3,Y4 (salidas digitales) C0: comun - de salidas digitales AD1V, AD1I, AD2V, AD2I : entradas analogas por voltaje o corriente (solo se muestran entradas de corriente) ACOM: comun de entradas y salidas analogas DA1V, DA1I, DA2V, DA2I: salidas analogas por voltaje o corriente (solo se muestran salidas de corriente)	1																																												
3	Breaker reg.	N/A	6 A - 250 V	2																																												
4	Breaker reg.	N/A	10 A - 250 V	1																																												
5	Relevador	N/A	8 patas - cap. Maxima 10 A - 250 V	3																																												
6	Boton	N/A	3 A - 125 V en colores verde, amarillo y rojo	3																																												
Page Title	Pagina 3	Project	Oxify 20.1	Drawing	Detalles adicionales planos electricos	Drawing No.	N/A	Edited	II-2021	Scale	N/A																																					
		Client	N/A			Creator	Pablo de la Hormaza	Created	I-2021	Page	1/3																																					



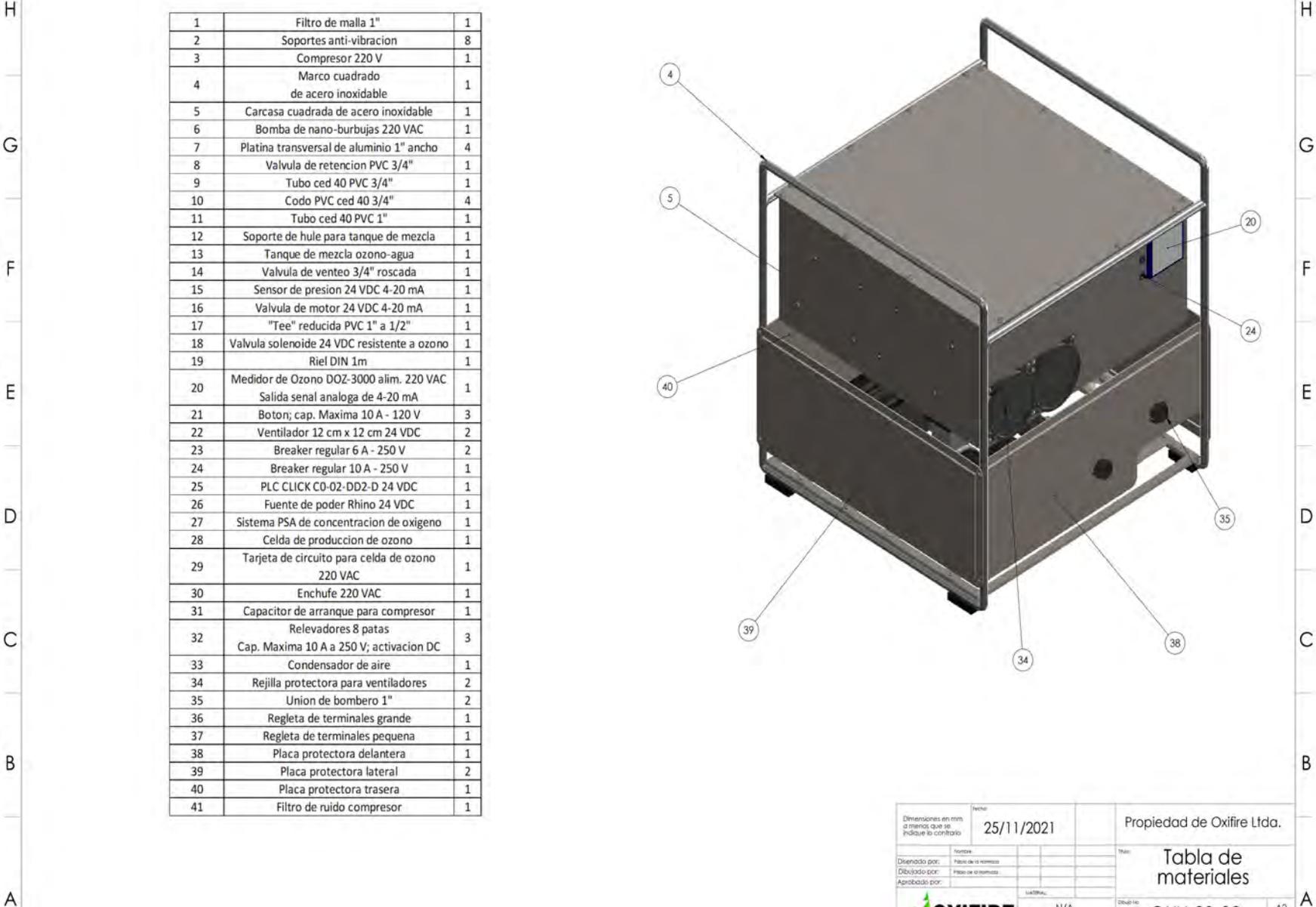
Anexo 4: Planos mecánicos del prototipo final.

95



Dimensiones en mm o milímetros que se indique lo contrario	Fecha: 25/11/2021	CONFIDENCIAL	
Diseñado por: Dibujado por: Aprobado por:	Nombre: Fecha de la revisión: Fecha de la aprobación:	Título: Vistas Isométricas Prototipo Oxyfire 20	
		Autos: N/A	Dibujo No: OXY-20-01
SOLIDWORKS Educational Product For Instructional Use Only.		Hoja: 1 de 1	A2

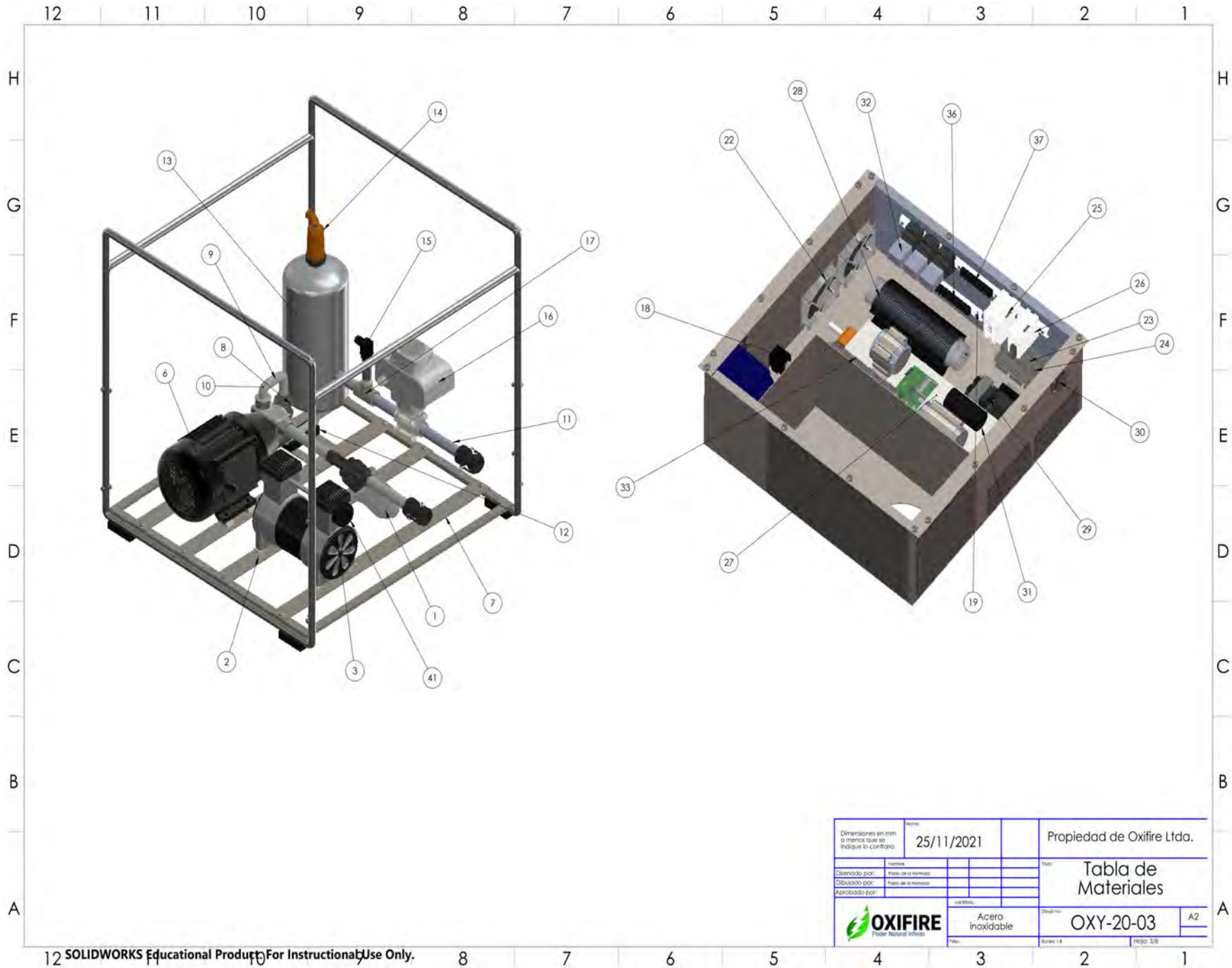
12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1



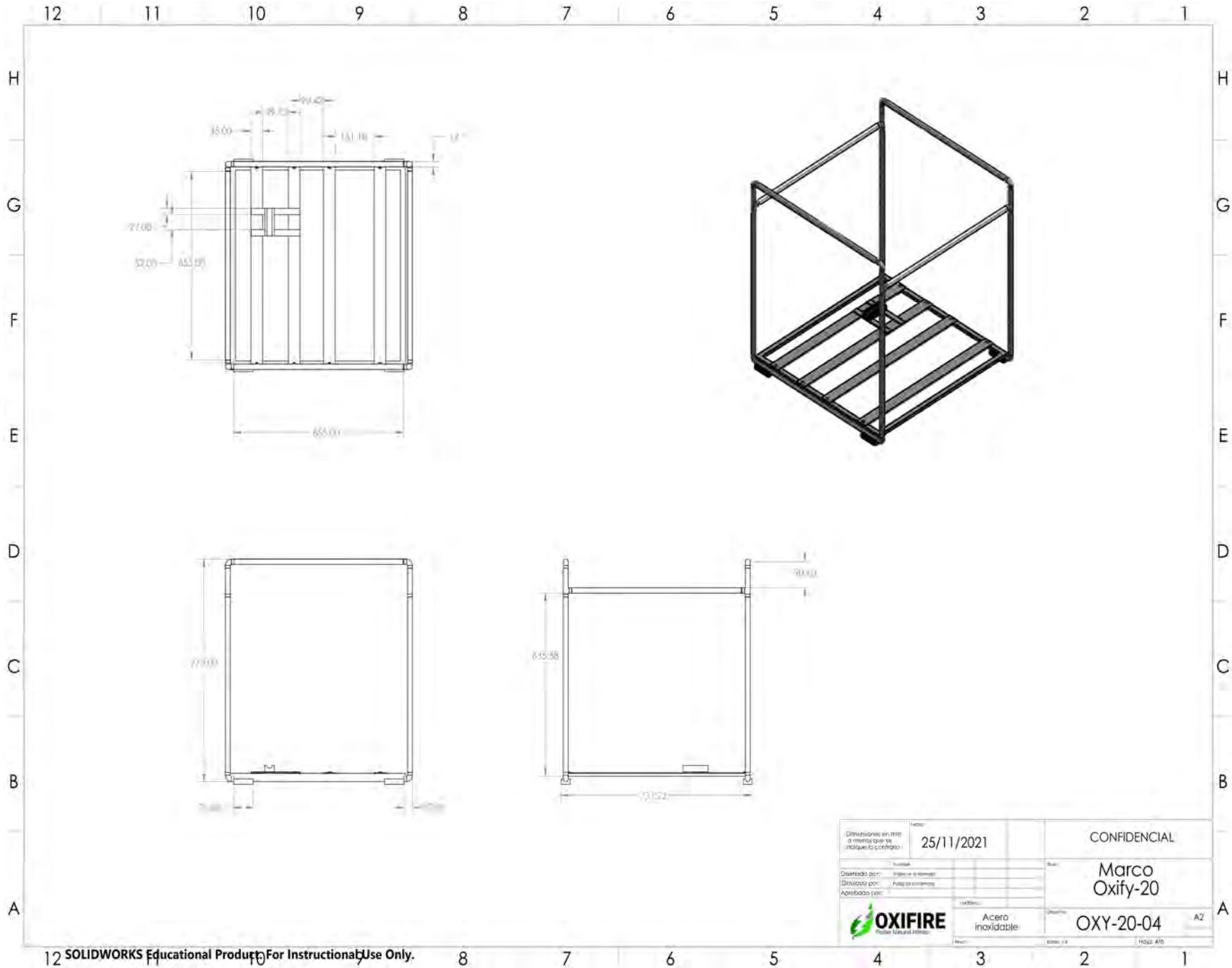
1	Filtro de malla 1"	1
2	Soportes anti-vibracion	8
3	Compresor 220 V	1
4	Marco cuadrado de acero inoxidable	1
5	Carcasa cuadrada de acero inoxidable	1
6	Bomba de nano-burbujas 220 VAC	1
7	Platina transversal de aluminio 1" ancho	4
8	Valvula de retencion PVC 3/4"	1
9	Tubo ced 40 PVC 3/4"	1
10	Codo PVC ced 40 3/4"	4
11	Tubo ced 40 PVC 1"	1
12	Soporte de hule para tanque de mezcla	1
13	Tanque de mezcla ozono-agua	1
14	Valvula de venteo 3/4" roscada	1
15	Sensor de presion 24 VDC 4-20 mA	1
16	Valvula de motor 24 VDC 4-20 mA	1
17	"Tee" reducida PVC 1" a 1/2"	1
18	Valvula solenoide 24 VDC resistente a ozono	1
19	Riel DIN 1m	1
20	Medidor de Ozono DO2-3000 aim. 220 VAC Salida senal analoga de 4-20 mA	1
21	Boton; cap. Maxima 10 A - 120 V	3
22	Ventilador 12 cm x 12 cm 24 VDC	2
23	Breaker regular 6 A - 250 V	2
24	Breaker regular 10 A - 250 V	1
25	PLC CLICK C0-02-DD2-D 24 VDC	1
26	Fuente de poder Rhino 24 VDC	1
27	Sistema PSA de concentracion de oxigeno	1
28	Celda de produccion de ozono	1
29	Tarjeta de circuito para celda de ozono 220 VAC	1
30	Enchufe 220 VAC	1
31	Capacitor de arranque para compresor	1
32	Relevadores 8 patas Cap. Maxima 10 A a 250 V; activacion DC	3
33	Condensador de aire	1
34	Rejilla protectora para ventiladores	2
35	Union de bombero 1"	2
36	Regleta de terminales grande	1
37	Regleta de terminales pequena	1
38	Placa protectora delantera	1
39	Placa protectora lateral	2
40	Placa protectora trasera	1
41	Filtro de ruido compresor	1

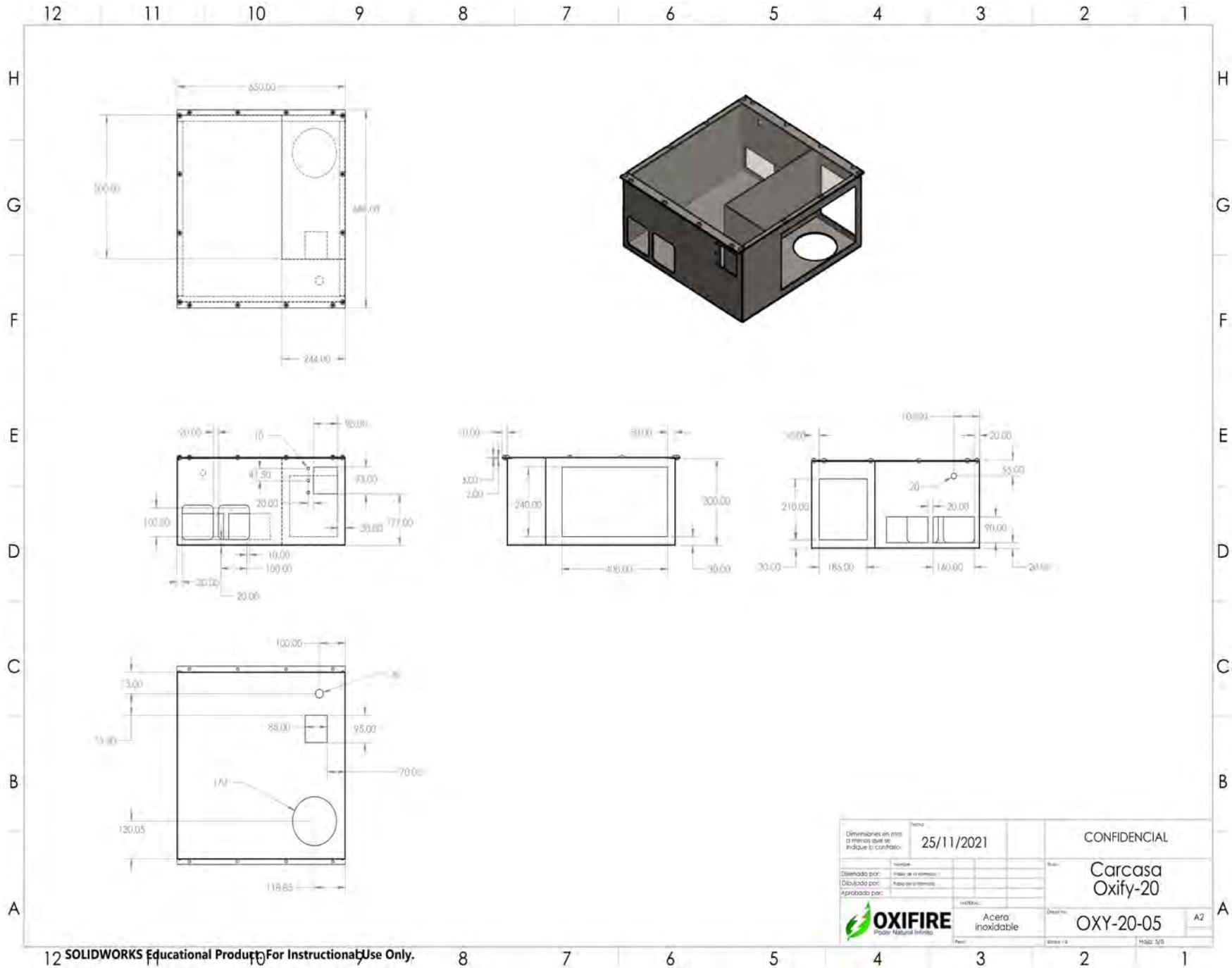
12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Dimensiones en mm a menos que se indique lo contrario		Fecha: 25/11/2021	Propiedad de Oxifire Ltda.	
Diseñado por:	Nombre:		Titulo: Tabla de materiales	
Dibujado por:	Fecha de la revisión:		Objeto: OXY-20-02	
Aprobado por:	Fecha de la revisión:		Hoja: 2/8	
		Escala: N/A	A2	

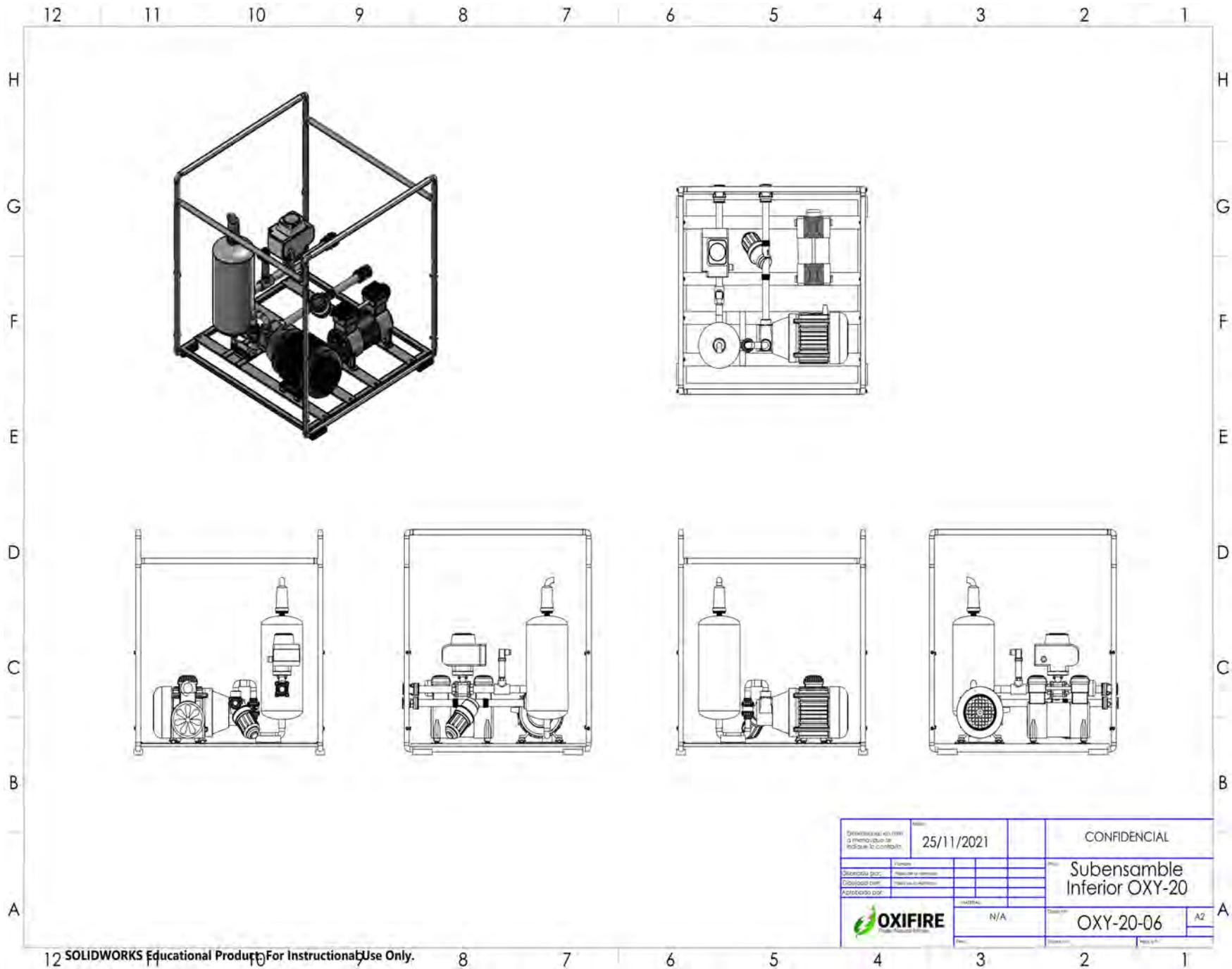


Dimensiones en mm a menos que se indique lo contrario		Fecha: 25/11/2021		Propiedad de Oxifire Ltda.	
Diseñado por:		Nombre:		Dibujo:	
Dibujado por:		Fecha de la revisión:		Tabla de Materiales	
Aprobado por:		Fecha de la revisión:		OXY-20-03	
MATERIAL: Acero inoxidable		Escala: 1:1		Hoja: 3/8	
		OXIFIRE PULVERIZADOR MANUAL		A2	

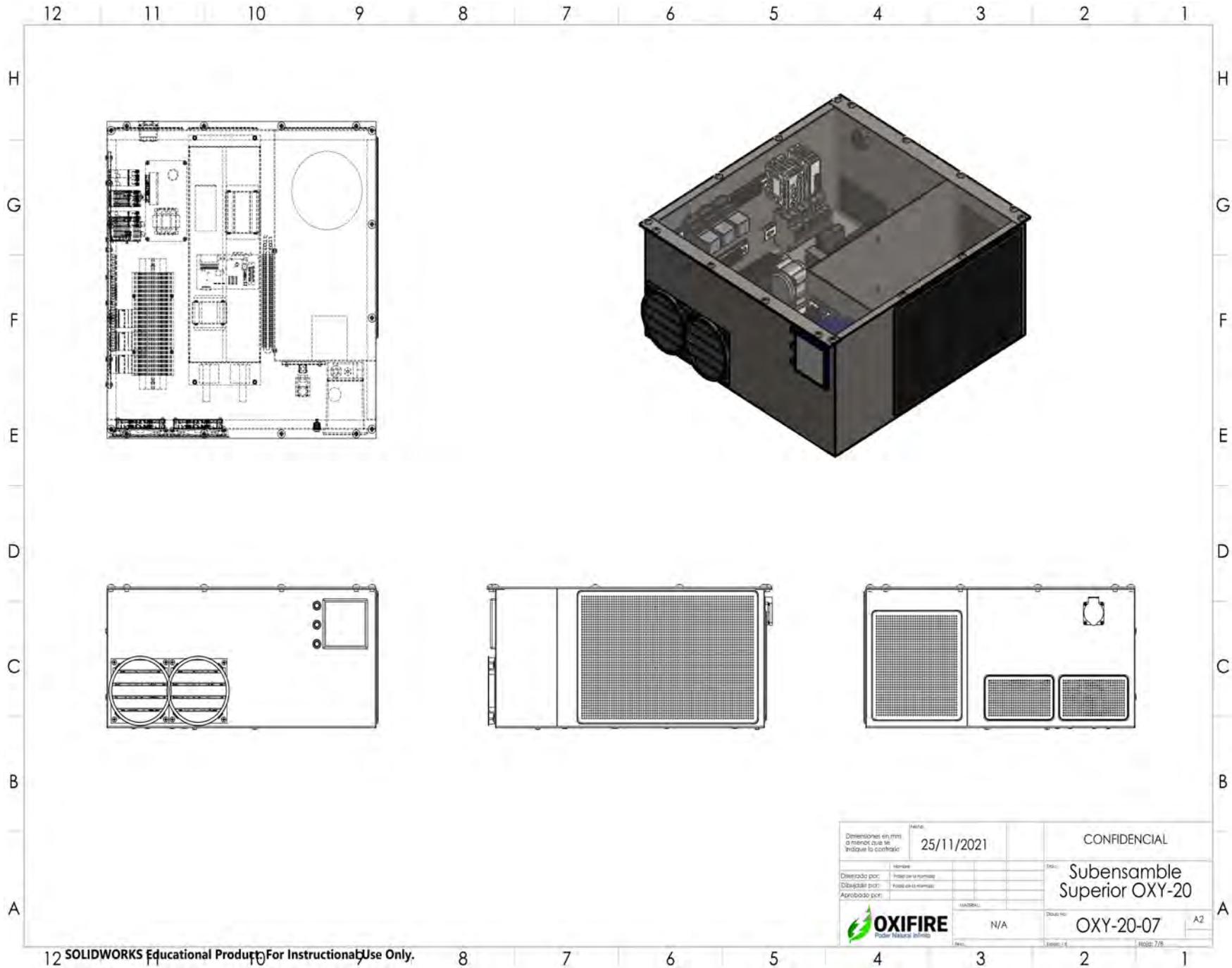




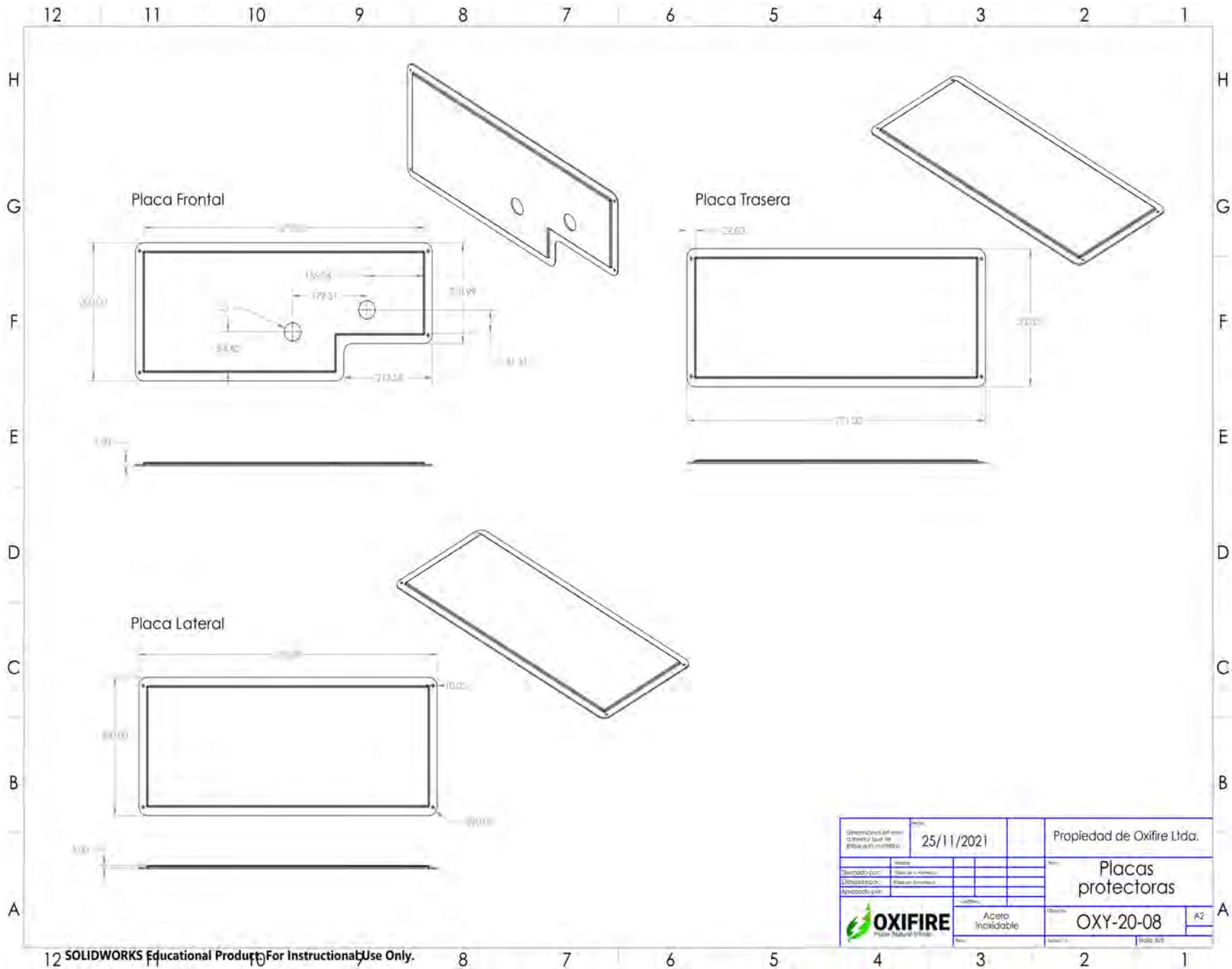
Dimensiones en milímetros que se indique lo contrario:		Fecha: 25/11/2021	CONFIDENCIAL
Diseñado por:	Nombre:		Revisado:
Dibujado por:	Estado de la revisión:		Carcasa Oxify-20
Aprobado por:	Fecha del siguiente:		OXY-20-05
	Material: Acero inoxidable		A2
	Partes:		Hoja: 5/5



Fecha: 25/11/2021		CONFIDENCIAL	
Diseñado por: Desarrollado por: Aprobado por:		Subensamble Inferior OXY-20	
		OXY-20-06	



Dimensiones en mm. o menor que se indique lo contrario	Fecha: 25/11/2021	CONFIDENCIAL
Diseñado por:	Revisado por:	Proyecto:
Dibujado por:	Revisado por:	Proyecto:
Aprobado por:	Revisado por:	Proyecto:
MATERIAL: N/A		Dibujo No: OXY-20-07
Logo: 		Hoja: 1 de 1



Dimensiones del modelo en milímetros (1:1)		Fecha: 25/11/2021	Propiedad de Oxifire Ltda.	
Elaborado por:	Revisado por:	Nombre:	Placas protectoras	
Aprobado por:	Fecha de revisión:	Fecha:	OXY-20-08	
Materia: Acero inoxidable		Material:	A2	