

DISEÑO DE UNA CAJA DE GUANTES PARA EL ENSAMBLAJE DE BATERÍAS  
DE ION LITIO EN UN AMBIENTE CONTROLADO

Juan José Romero Flórez

Daniel Mauricio Bautista Bueno

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Óscar Andrés Vargas Ceballos

Doctor en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

A Dios por las oportunidades y bendiciones que me ha regalado.

A mis seres queridos, en especial a mis padres Juan Carlos Romero y Claudia Patricia Flórez, a mi abuela Alcira Rodríguez, quienes, con sus consejos, amor, cariño, fe, sacrificio y mucho esfuerzo han sido hasta este momento el principal soporte de mi vida motivándome siempre a seguir adelante y mejorar como persona día a día.

A mis compañeros y demás personas a quienes tuve la oportunidad de conocer a lo largo de estos años académicos, en especial a mis amigos Edwin Bermúdez, José Peñaloza, Diego Martínez, Jhon Delgado, Daniel Bueno, Keyner Fernández y Deiby Barbosa por compartir momentos inmemorables y hacer de esta etapa de mi vida una de las más alegres.

Al profesor Oscar Vargas por su paciencia, apoyo y guía.

Dedico este proyecto y su culminación a todos ustedes por su apoyo incondicional durante todo este proceso que ha moldeado la persona que soy en la actualidad.

**Juan José Romero Flórez**

### **Dedicatoria**

Primeramente, a Dios por brindarme entendimiento para no dejarme vencer por todos los obstáculos que aparecieron durante mi formación.

A mi abuela María Otilia Delgado de Bueno por mantenerse en mi corazón y ser esa motivación diaria que con mucho sacrificio y amor logró forjar en mí un carácter y una personalidad de ganador.

A mis padres Julio Bautista y Azucena Bueno por todo el apoyo brindado durante el proceso y por nunca dejar de creer en mí.

A mis demás familiares, en especial a Pedro, Uriel y Victoriano quienes en conjunto con mi difunto abuelo Enrique Bueno Flórez transmitieron todas sus enseñanzas, conocimientos y respeto por la vida, moldeándome como un ciudadano ejemplar.

A mis compañeros de aula que conocí durante la formación y en especial a mis amigos Sirley Garcia, Edwin Bermudez, Keyner Fernandez, Deiby Barbosa, Eliana Mantilla, Angie Torres, Juan Romero, Karen Estupiñan, Daniel Pinto, Jhon Delgado, Anderson Jurado, José Peñaloza y Diego Martinez quienes además de haber compartido momentos memorables a mi lado, nunca me dejaron solo en los momentos difíciles y se preocuparon por mí en gran medida.

A la familia que hoy en día he formado, en especial a Mia Samara Bautista Sosa, mi hija, quien llegó a mi vida en los momentos finales de esta preparación dando el impulso final y la motivación extra que cualquier padre estaría feliz y dichoso de recibir.

Al Profesor Oscar por ser tan paciente y brindarnos su guía a pesar de todo.

A todos ustedes los más sinceros agradecimientos pues cada uno es recordado con cariño por hacer parte de mi vida y ayudar a escalar uno a uno los peldaños de mi formación.

**Daniel Mauricio Bautista Bueno**

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Referencial.....	14
2.1 Caja de guantes .....	14
2.2 Litio.....	14
2.3 SolidWorks .....	14
2.4 Granta Edupack.....	15
2.5 Atmósfera inerte.....	15
2.6 Fatiga.....	15
2.7 Implosión .....	15
2.8 Antecámara .....	16
3. Metodología... ..	16
3.1 Consulta de requerimientos y criterios de diseño .....	16
3.2 Elaboración de propuestas de diseño .....	16
3.3 Evaluación y selección de la propuesta de diseño .....	17
4. Resultados.....	17
4.1 Cámara principal.....	17
4.2 Antecámara .....	19
4.3 Panel frontal (ventana).....	20

4.4 Complementos recomendados .....	21
4.5 Condiciones de operación .....	21
4.6 Evaluación de las alternativas de diseño.....	22
4.7 Simulación de cargas estáticas.....	23
4.8 Alternativas de refuerzo.....	24
4.9 Análisis del flujo del gas inerte al interior de la cámara principal.....	36
4.10 Selección de materiales para el diseño usando Granta EduPack .....	39
5. Conclusiones.....	42
Referencias Bibliográficas .....	44
Apéndices.....	47

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1	Dimensiones de cajas de guantes comerciales ..... 18
Tabla 2	Dimensiones de antecámaras con forma cilíndrica ofrecidas en el mercado ... 19
Tabla 3	Dimensiones de antecámaras con forma cúbica ofrecidas en el mercado ..... 20
Tabla 4	Presiones presentes en la operación de reemplazo de aire por gas inerte en la caja de guantes..... 22
Tabla 5	Comparación de volúmenes internos y áreas de visión para cada inclinación del panel frontal..... 23
Tabla 6	Estudio de diseño para la profundidad del refuerzo interno..... 27
Tabla 7	Estudio de diseño para el largo del refuerzo interno superior y lateral ..... 28
Tabla 8	Estudio de diseño para el espesor del refuerzo externo..... 29
Tabla 9	Estudio de diseño para la profundidad del refuerzo interno..... 31
Tabla 10	Estudio de diseño para el largo de refuerzo interno superior y lateral ..... 32
Tabla 11	Estudio de diseño para el ancho y el espesor del refuerzo externo seccion 1 .. 34
Tabla 12	Estudio de diseño para el espesor del refuerzo externo seccion delgada ..... 35
Tabla 13	Propiedades relevantes del acero AISI 304 utilizadas para la selección de materiales en Granta EduPack..... 39

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1	Simulación de cargas estáticas para el modelo inicial..... 24
Figura 2	Resultados de simulación del análisis estático para la alternativa de refuerzo 1 ..... 26
Figura 3	Resultados de la simulación del estudio de fatiga para vida total ..... 36
Figura 4	Trayectoria y velocidad del gas inerte desde la vista posterior y lateral izquierda ..... 37
Figura 5	Materiales con posible uso para la fabricación de la caja de guantes..... 40
Figura 6	Materiales con posible uso para la fabricación de los refuerzos de la caja de guantes ..... 42

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A	Dimensiones y geometrías del cuerpo de la caja de guantes..... 48
Apéndice B	Diseño final propuesto para la antecámara..... 49
Apéndice C	Complementos recomendados..... 50
Apéndice D	Dimensiones y geometrías para el marco y la ventana..... 54
Apéndice E	Diseño final propuesto para la caja de guantes ( <i>glove box</i> ). ..... 55
Apéndice F	Dimensiones y geometrías del refuerzo externo..... 56
Apéndice G	Dimensiones y geometrías del refuerzo interno. .... 57
Apéndice H	Vista explosionada del diseño final de la caja de guantes con la tabla de materiales de cada componente. .... 58
Apéndice I	Filtros utilizados para la selección de materiales de reemplazo del acero AISI 304. .... 59
Apéndice J	Filtros utilizados para la selección de materiales de reemplazo del acero AISI 1020. .... 62

## Resumen

**Título:** Diseño de una caja de guantes para el ensamblaje de baterías de ion litio en un ambiente controlado<sup>1\*</sup>

**Autor:** Juan José Romero Flórez, Daniel Mauricio Bautista Bueno, Oscar Andrés Vargas Ceballos<sup>2\*\*</sup>

**Palabras Clave:** Caja de guantes, Baterías de litio, Atmósfera controlada, Ensamble de baterías, Diseño asistido por simulación.

### Descripción:

La transición mundial hacia las energías sostenibles, limpias y renovables es un hecho que conlleva la búsqueda de baterías más eficientes en cuanto a tamaño, capacidad de almacenamiento y velocidad de carga. Dado que las baterías contienen componentes altamente reactivos con el aire y la humedad, se hace necesario generar un ambiente controlado para su experimentación y fabricación. En el presente documento se muestra la búsqueda y análisis de características de equipos presentes en el mercado y, a partir de ellas, la elaboración de diferentes propuestas de diseño que son evaluadas por medio de simulaciones con el software SolidWorks, definiendo así la mejor geometría, su resistencia mecánica y unas condiciones seguras, cómodas y confiables para el operador del equipo, dando como resultado el diseño de una caja de guantes probada mediante la simulación y que cumple con requisitos ingenieriles. Además, como agregado y haciendo uso del software GRANTA EduPack se realiza un análisis para brindar una serie de materiales que pueden ser usados para la fabricación de la caja de guantes en reemplazo de los establecidos en el proyecto.

## Abstract

---

<sup>1\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>2\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Dr. En Química Oscar Andrés Vargas Ceballos.

**Title:** Design of a *glove box* for the assembly of lithium ion batteries in a controlled environment<sup>1\*</sup>

**Author:** Juan José Romero Flórez, Daniel Mauricio Bautista Bueno, Oscar Andrés Vargas Ceballos<sup>4\*\*</sup>

**Key Words:** Glovebox, Lithium batteries, Controlled atmosphere, Batteries assembling, Simulation assisted design.

**Description:**

The global transition towards sustainable, clean, and renewable energies is a fact that entails the search for more efficient batteries in terms of size, storage capacity and charging rates. Since batteries contain highly reactive components with the air and moisture, it is necessary to create a controlled environment for their experimentation and manufacture. This document shows the search and analysis of characteristics of equipment present on the market and, from them, the elaboration of different design proposals that are evaluated by means of simulations with SolidWorks software, thus defining the best geometry, its mechanical strength, as well as safe, comfortable and reliable conditions for the equipment operator, resulting in a simulated *glove box* design that meets engineering requirements. In addition, using the GRANTA EduPack software, an analysis is carried out to provide a series of materials that can be used for the manufacture of the *glove box* in replacement of those established in the project.

---

<sup>1\*</sup> Degree Work

<sup>4\*\*</sup> Faculty of Physicochemical Engineering. Department of Metallurgical Engineering. Director: Dr. In Chemical Oscar Andrés Vargas Ceballos.

## Introducción

Desde su creación, las baterías de litio han tomado relevancia en la fabricación de productos de la industria electrónica y automotriz, tales como teléfonos inteligentes y vehículos eléctricos como sustitutos de los impulsados por combustión; esta relevancia ha sido mayor debido a la preocupación por la situación ambiental actual y el desarrollo tecnológico creciente. A pesar de la gran aceptación de estas baterías, también presentan algunas dificultades y una de ellas radica en la imposibilidad de manipular el litio en un ambiente normal de humedad y oxígeno. Puesto que este reacciona fuertemente en estas condiciones, es por esto que se ha buscado la manera de crear un ambiente controlado donde el litio logre permanecer estable y se pueda manipular. Los equipos utilizados para este propósito se denominan *glove box*, caja de guantes, caja seca o caja de atmósfera controlada, y se encuentran en el mercado por un precio elevado, lo cual provoca que los laboratorios que experimentan con este tipo de baterías deban incurrir en un gasto alto para la obtención de un equipo que brinde las condiciones necesarias para el ensamblaje de estas baterías.

Desde su invención, grandes empresas se dedican a la fabricación y venta de las *glove box* y de componentes necesarios para su funcionamiento, en los catálogos de estas empresas se presentan equipos pequeños para uso personal hasta grandes cuartos aislados operados por brazos robóticos y con sofisticados sistemas de deshumidificación y creación de ambientes controlados. El propósito a lograr es brindar el diseño ingenieril de una *glove box* para uso en el laboratorio, posibilitando y facilitando su fabricación, disminuyendo los costos para la obtención de un equipo propio.

Como se ha mencionado, el manejo del litio en atmósferas con presencia de oxígeno es peligroso y casi imposible de llevar a cabo, por ende, es necesario diseñar una herramienta que permita realizar procedimientos en los que se involucre el litio como lo es el ensamble de baterías

ion-litio. Es importante recordar que la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales cuenta con un semillero de investigación enfocado en materiales para el almacenamiento de energía (SIMAE), en el cual se abordan temas relacionados con las baterías de ion-litio. Por tal motivo, ofrecer la posibilidad de observar y realizar ensambles de baterías dentro de la universidad otorga un valor agregado al conocimiento teórico que se adquiere. Sin embargo, la utilidad de la caja de guantes no se limita a su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía, debido a que puede ser empleada en diferentes tipos de investigación académica o procesos donde se requiera de una atmósfera controlada.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar una caja de guantes con herramientas de simulación y diseño (CAD) para uso en laboratorio proporcionando un ambiente controlado para el ensamblaje de baterías de ion litio.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Obtener criterios de diseño tales como forma, tipo, especificaciones y materiales con potencial de uso en la construcción y operación de la caja de guantes.
- Proponer diversas alternativas de diseño que cumplan con las restricciones, los criterios y las especificaciones necesarias para la construcción y operación de la caja de guantes.
- Evaluar las diferentes alternativas de diseño con el fin de elegir la opción con la mayor viabilidad de fabricación bajo criterios ingenieriles.

## 2. Marco Referencial

### 2.1 Caja de guantes

Se refiere a una cámara para mantener un objeto dentro de un entorno aislado con un ambiente controlado y que facilita la manipulación de este por medio de unos guantes que van desde el exterior de la cámara, así como el paso de más objetos dentro o fuera de la cámara sin contaminación perjudicial de la atmósfera circundante. Las cámaras de aislamiento de entornos pequeños o, como se les llama más comúnmente, cajas de guantes, se utilizan ampliamente en la investigación, la industria y la medicina para facilitar la manipulación manual de un objeto de un tipo u otro dentro de un entorno aislado (Marion E. Cox & Mary E. Cox, 1973). Estos entornos aislados son muy útiles cuando se trabaja con productos que son reactivos o que cambian sus propiedades al estar expuestos a un ambiente normal de humedad y oxígeno.

### 2.2 Litio

El litio metálico es el metal más liviano que se conoce con una densidad de  $0,531 \text{ g/cm}^3$ , posee el mayor punto de fusión ( $186^\circ\text{C}$ ) y ebullición ( $1.336^\circ\text{C}$ ) del grupo de los metales alcalinos. Además, posee el calor específico más alto de este grupo. Sin embargo, este elemento es muy reactivo; arde en la atmósfera normal en la presencia de humedad y oxígeno (A. Valencia, 2016).

### 2.3 SolidWorks

Es un software de diseño CAD (diseño asistido por computadora) 3D y 2D que les permite a los diseñadores croquizar ideas con rapidez, experimentar con operaciones y cotas, producir modelos y dibujos detallados (Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2015). Mediante sus complementos como el software de cálculo y validación SolidWorks Simulation, somete los diseños a condiciones idénticas que experimentaría en la realidad, aumentando la calidad de los

productos al tiempo que reduce el coste de sus prototipos. Entre los tipos de simulación disponibles se encuentra la simulación de cargas, flujos y los estudios como el estudio de diseño el cual permite realizar una serie de análisis de cargas estáticas paralelo a la modificación de una o varias variables.

#### **2.4 Granta Edupack**

Es un conjunto único de recursos didácticos para apoyar la educación en materiales. Incluye una base de datos de materiales e información de procesos, herramientas de selección de materiales y una variedad de recursos de apoyo.

#### **2.5 Atmósfera inerte**

El término inerte significa 'químicamente inactivo', por tanto, una atmósfera inerte es una atmósfera que no reacciona con su entorno, su obtención se da por desplazamiento del aire con un gas inerte en el recipiente que contiene la reacción o bien por evacuación del aire con una bomba de vacío y posterior ocupación del sistema con un gas inerte.

#### **2.6 Fatiga**

Sucede cuando un componente mecánico se somete a esfuerzos cíclicos y puede alcanzar la rotura aun cuando las tensiones soportadas sean muy inferiores a la resistencia estática máxima del material o, incluso, inferiores a la tensión de fluencia del material. Las fallas por fatiga se inician en una grieta pequeña, la cual va aumentando su tamaño con el paso de los ciclos de carga hasta la ruptura repentina del material.

#### **2.7 Implosión**

La palabra implosión hace referencia a una explosión interna de un objeto, en lugar de que el estallido se expanda para el exterior, se contrae y comprime al objeto.

## **2.8 Antecámara**

Es un espacio por el cual se introducen todos los elementos a la cámara principal. En este se realiza un vacío preliminar con el fin de eliminar el aire que ingresó en el momento de la entrada de los objetos. Es de utilidad para evitar realizar un vacío a la cámara principal en cada ocasión en la que se introduzca un elemento.

## **3. Metodología**

### **3.1 Consulta de requerimientos y criterios de diseño**

La información necesaria para la obtención de datos acerca del diseño de la caja de guantes se realizó revisando distintas fuentes como catálogos de fabricantes e intermediarios, industrias donde son usadas estas cajas y en laboratorios que trabajan con materiales reactivos.

Estas fuentes de información presentan una gran variedad de modelos de cajas de guantes, donde se exponen diversos tamaños, materiales, accesorios, usos, condiciones de operación y características propias de cada ejemplar. Esta gran variedad es útil para escoger de manera adecuada los modelos que más se adapten a la necesidad del proyecto y que puedan servir como referencia para realizar el diseño del producto final.

### **3.2 Elaboración de propuestas de diseño**

Luego de elegir el tipo de caja de guantes que se ajusta a las necesidades del proyecto y conociendo requisitos operacionales y las condiciones necesarias para la manipulación del litio metálico, se determinan las geometrías, propiedades y diversos criterios de diseño que deben cumplir los materiales usados y cuáles son los equipos auxiliares (bombas, sistemas eléctricos, sensores, etc.) necesarios para el correcto funcionamiento de la caja de guantes y la disponibilidad

de estos en el mercado, con el fin de realizar en el software CAD las diferentes propuestas de diseño que serán posteriormente evaluadas.

### **3.3 Evaluación y selección de la propuesta de diseño**

El primer enfoque para la elección de la mejor propuesta de diseño es la selección de una geometría que cumpla con requisitos de ergonomía, volumen de trabajo adecuado y condiciones de operación ideales. Posteriormente, haciendo uso del Software SOLIDWORKS, específicamente con las herramientas de simulación disponibles en él, se procede a hacer los análisis para verificar la resistencia mecánica de la caja o, de ser necesario, realizar los ajustes correspondientes. El software también es útil a la hora de escoger la mejor ubicación de los componentes que permiten la entrada y salida del flujo de gas en la cámara. Por último, haciendo uso del software GRANTA EduPack se realizará una búsqueda de materiales que puedan ser útiles para la fabricación de la *glove box*.

## **4. Resultados**

### **4.1 Cámara principal**

Los primeros datos obtenidos a partir de los catálogos de fabricantes son las dimensiones de *glove box* similares a la del diseño planeado, es decir, una caja pequeña con dos porta guantes y una antecámara. La investigación indica que los volúmenes varían según la necesidad desde 350 litros para pequeñas hasta 1200 litros para las de mayor tamaño, además se observó que el material de preferencia para la fabricación de estas cajas es el acero inoxidable 304 en láminas de 3 mm de espesor. Estos datos son presentados en la Tabla 1.

Basados en los datos de la Tabla 1 se discutieron las dimensiones óptimas para la *glove box* a diseñar, de manera que fuera solo lo necesariamente grande para el ensamblaje de las baterías en el laboratorio, esto con la finalidad de reducir la cantidad de material de fabricación. Además, se propuso que estas fueran múltiplos de 10 para facilitar la medición y elaboración de la *glove box* por parte de sus futuros fabricantes. Las dimensiones derivadas de esta discusión se pueden observar en el apéndice A y son las siguientes: anchura: 900 mm, altura: 700 mm, profundidad: 600 mm y un posible espesor de pared: 3,429 mm conocido comercialmente como calibre 10.

Tabla 1  
*Dimensiones de cajas de guantes comerciales*

Proveedor	Modelo	Ancho(cm)	Alto(cm)	Profundo (cm)	Espesor (mm)	Material
Labconco	Precise HEPA-Filtered	147	80	102	3	Polietileno
MBRAUN	MB-ACRYL	113,5	56,5	82,5	3	Acrílico
INERT	PureLab HE 2GB	125	78	90	2,6	Acero inoxidable 304
MTI Corporation	Benchtop Vacuum	78	70	65	3	Acero inoxidable 304
MTI Corporation	Large Stainless Steel Vacuum  <i>Glove box</i>	112	90	74	3	Acero inoxidable 304
TOB New Energy	Single Workstation lab equipment <i>glove box</i>	122	90	75	3	Acero inoxidable 304
Labconco		90	60	70	3	Acero inoxidable 304

## 4.2 Antecámara

Las formas más comúnmente propuestas por los fabricantes consultados son cilíndricas y cúbicas con un espesor de pared de 3 mm y usando como material predilecto el acero inoxidable 304 o el mismo de la cámara principal, estas dimensiones son presentadas en la Tabla 2 para las cilíndricas y en la Tabla 3 para las cúbicas.

Tabla 2

*Dimensiones de antecámaras con forma cilíndrica ofrecidas en el mercado*

Fabricante	Diámetro (cm)	Largo (cm)	Volumen (L)
MTI	36	43,5	44,28
MTI	35,5	45	44,54
MTI	20	23,2	7,29
MTI	24	26	11,76
VTI	36	60	61,07
VTI	40	60	75,40
VTI	15	30	5,30
TMAX	20	28	8,80
TMAX	27,3	35	20,49
TMAX	35	40	38,48
VILITEK	30	35	24,74
TOB MACHINE	36	60	61,07
TOB MACHINE	15	30	5,30

Tabla 3

*Dimensiones de antecámaras con forma cúbica ofrecidas en el mercado*

Fabricante	Ancho (cm)	Alto (cm)	Profundo (cm)	Volumen (L)
TERRA	32,4	30,5	27,9	27,57
VAC	25,4	25,4	30,5	19,68
VILITEK	29	26,5	46,5	35,74

Las dimensiones varían según el modelo y tamaño, en este caso se ajustaron a los requerimientos específicos de las necesidades del proyecto. Es así como por acuerdo se decidió que la antecámara debía ser cilíndrica por su mejor relación de volumen y espacio aprovechado, así el gasto de gas y el tiempo de llenado o vaciado se reducen, además el espacio útil, es decir, al que tiene acceso el operario se optimiza al no haber aristas. También se tiene en cuenta que una geometría cilíndrica suele tener mayor resistencia mecánica pues favorece una mejor distribución de los esfuerzos evitando así concentraciones de los mismos. Las dimensiones acordadas para la elaboración de la antecámara se pueden observar en el apéndice B y son: diámetro: 150 mm y largo: 300 mm.

#### **4.3 Panel frontal (ventana)**

Para aliviar al usuario de molestias en el cuello y fatiga visual mientras se realiza el trabajo, debido a la ventana vertical plana la ventana debe estar inclinada de  $10^\circ$  a  $15^\circ$ , la ventana en ángulo permitirá más movimiento de cabeza y cuello, lo que permitirá una mayor maniobrabilidad en la postura de trabajo y mejora el rendimiento visual al reducir deslumbramiento y puntos ciegos. Para optimizar la visualización de toda la caja esta inclinación puede llegar a los  $30^\circ$ , lo cual proporciona una mejor visualización desde la parte superior de elementos en el interior de la caja

como por ejemplo contenedores de líquidos los cuales pueden derramarse y causar molestias (McNair, 2006).

Como resultado de la consulta entre varios fabricantes y distribuidores de *glove box* como XIAMEN TOB NEW ENERGY TECHNOLOGY y MTI CORPORATION se logró tener conocimiento del espesor y material utilizado para la ventana frontal que proporciona visibilidad al interior de la cámara principal desde el exterior, siendo de 8 milímetros cuando se utiliza como material de fabricación el vidrio templado y de hasta 30 mm de espesor cuando se usa plexiglás.

Para este diseño se ha propuesto un modelo de ventana con marco removible y tres inclinaciones para la geometría del frontal de la caja de guantes donde se encuentra ubicada la ventana, las cuales son de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $30^\circ$ . Lo anterior para brindar diferencias en parámetros como la ergonomía, comodidad de operación, volumen interno disponible en la caja y el área de visión de la ventana, estos parámetros serán posteriormente evaluados seleccionando el más adecuado.

#### **4.4 Complementos recomendados**

Los complementos son pequeñas partes o componentes de la *glove box*, necesarios para el correcto funcionamiento de la misma, los más relevantes y los que se recomienda utilizar para la fabricación de la caja de guantes son presentados en el apéndice C. Así mismo, estos fueron los utilizados como referencia en cuanto a dimensiones y condiciones de operación a la hora del diseño.

#### **4.5 Condiciones de operación**

Debido a que la *glove box* va a soportar una presión interna cuando se llene de gas y también va a estar sometida a vacío, se deben conocer las presiones que afectan las paredes de la

caja, esto para realizar la elección correcta del material y del espesor de pared y así evitar un posible caso de implosión o de explosión debido a las presiones de trabajo, dichas presiones se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

*Presiones presentes en la operación de reemplazo de aire por gas inerte en la caja de guantes*

<b>Unidades</b>	<b>Presión atmosférica</b>	<b>Vacío</b>	<b>Presión de llenado</b>
<b>Torr</b>	760	0.05	810

*Nota:* Se exponen las unidades en Torr ya que estas son las usadas en la mayoría de los catálogos, pero para uso del software de simulación se usaron las presiones en MPa

Con estos valores de presión se procede a hacer un análisis estático en el software SolidWorks, para definir los esfuerzos que son generados y así tener indicios de los materiales que se pueden usar para la elaboración de la *glove box*.

#### **4.6 Evaluación de las alternativas de diseño**

Para evaluar las geometrías determinadas anteriormente para cada componente se utilizó el software de diseño SOLIDWORKS, en él se elaboraron inicialmente tres prototipos donde la principal diferencia entre estos era la inclinación del frontal de la caja, obteniendo a través del software diferentes datos acerca del volumen interno y el área de visión de la ventana.

En la Tabla 5 se observa que, a mayor ángulo de inclinación, la ventana obtiene una mayor área y por lo tanto aumenta también el área de visión, sin embargo, se presenta una reducción en el volumen interno. La opción con el ángulo de 0° es descartada debido a su inadecuada ergonomía e incomodidad operativa, ahora, siendo la diferencia de 22.41 litros en cuanto al volumen interno

se refiere y de 39648.89 milímetros cuadrados ( $\text{mm}^2$ ) para el área de visión entre las alternativas de 15 y 30 °, y teniendo en cuenta que, aunque el volumen interno de la caja con inclinación de 15° es mayor, se optó por seleccionar la inclinación de 30° para la geometría final del modelo a fabricar (ver apéndice D), debido a que este último ángulo proporciona mayor facilidad y amplitud de visión a todas las esquinas de la caja, sumado a que el volumen de más que brinda la inclinación descartada es un volumen poco funcional pues está ubicado en la parte frontal superior donde el alcance del operario es limitado.

Tabla 5

*Comparación de volúmenes internos y áreas de visión para cada inclinación del panel frontal*

Angulo de inclinación (°)	Volumen interno (L)	Área de visión ( $\text{mm}^2$ )
30	335,66	325260,58
15	358,07	285611,69
0	367,195	273900

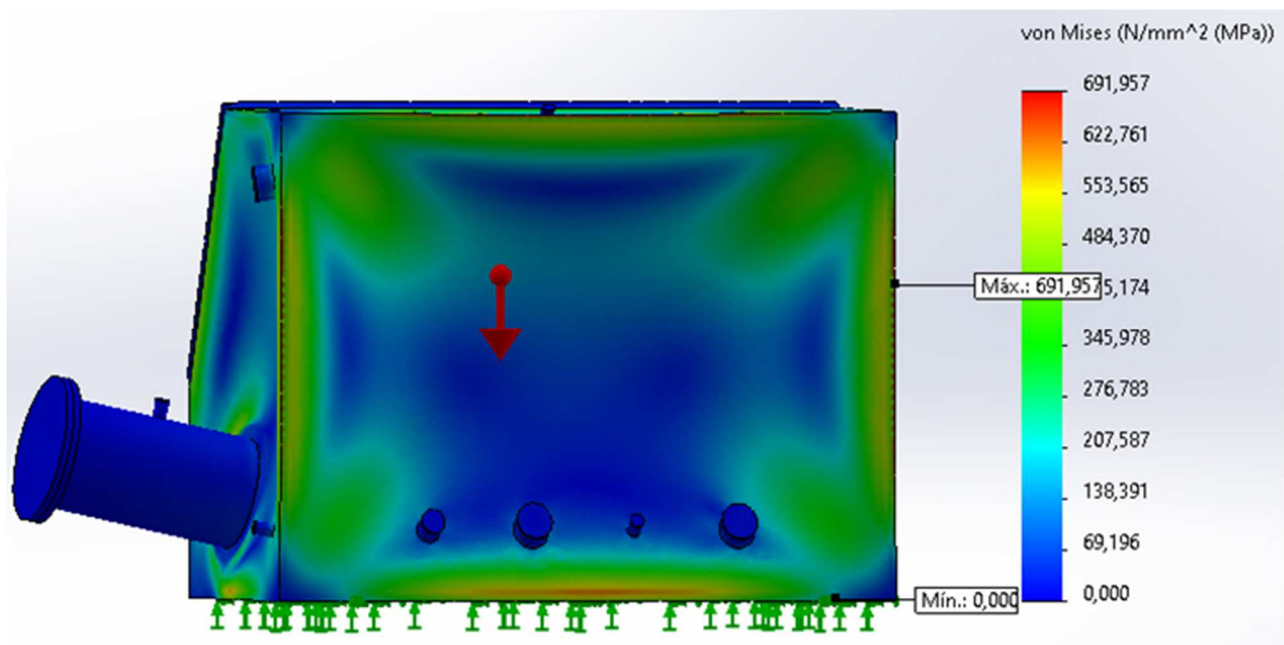
#### 4.7 Simulación de cargas estáticas

Luego de definir todas las geometrías, un único modelo y haciendo uso de las condiciones de operación establecidas, se realizaron las simulaciones de cargas estáticas mediante el uso de uno de los complementos para simulación del software Solidworks, donde el análisis estático dio como resultado un esfuerzo máximo ubicado en la parte posterior de la caja específicamente en la arista izquierda como se observa en la Figura 1. El valor de la magnitud del esfuerzo fue de aproximadamente 700 MPa. Este valor no puede ser soportado por ningún material bajo esas condiciones de geometría haciendo inviable el diseño, esto conllevó a la necesidad de encontrar una solución que redujera este máximo esfuerzo, es así como basados en propiedades mecánicas

del material inicial de la caja (acero AISI 304), principalmente su límite elástico y resistencia mecánica, se definió el máximo esfuerzo aceptable como 110 MPa y el mínimo factor de seguridad como 1.5.

Figura 1

*Simulación de cargas estáticas para el modelo inicial.*



#### 4.8 Alternativas de refuerzo

Se propusieron tres alternativas de refuerzo externo, la primera consistió en aumentar el espesor las paredes de la caja. La segunda se basó en agregar láminas de otro material, con precio menor pero con igual o mayor resistencia mecánica, en cada una de las caras de la caja de forma que cubrieran la totalidad de estas. Por último, se postuló agregar, al igual que en la segunda

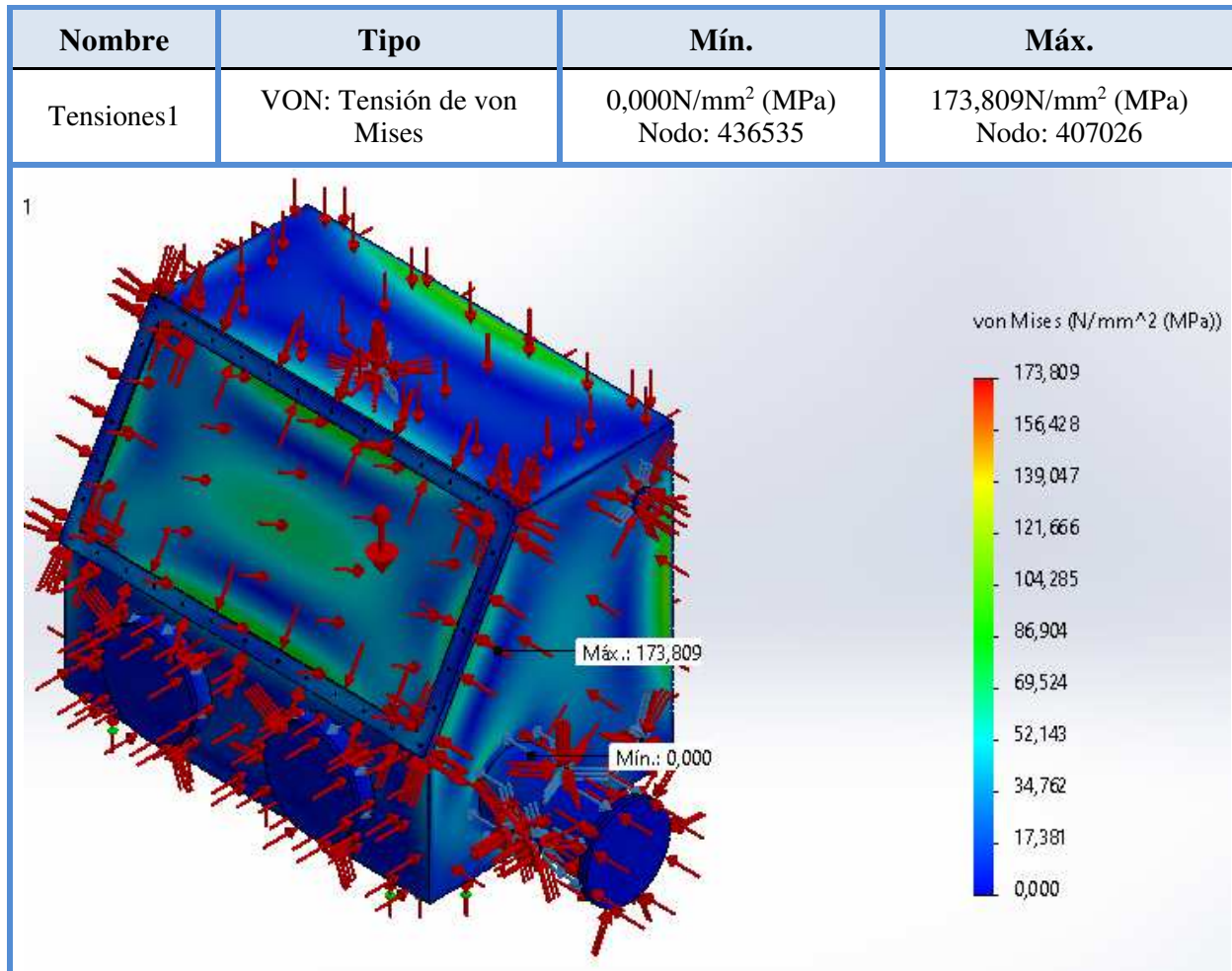
alternativa, un material de refuerzo pero esta vez no en láminas que cubrieran la totalidad de cada cara, sino en láminas más pequeñas ubicadas en zonas céntricas de las caras con el fin de contrarrestar la succión generada por el vacío; además, también se incluyó para las dos últimas alternativas un mismo refuerzo interno en forma de cuatro láminas con sección transversal similar a una cuña centradas en cada arista de la cara inclinada.

### **Alternativa de refuerzo 1**

Mediante el complemento de simulación de SolidWorks se llevó a cabo un análisis estático, donde los parámetros usados fueron la gravedad y la presión en las caras externas ( $P_{\text{ambiental}}$ ) e internas ( $P_{\text{vacío}}$ ) de los componentes, las cuales se detallan en la Tabla 4. La principal variable fue el máximo espesor de pared de la caja, el cual está determinado por la distancia existente entre la cara de la lámina hasta la zona próxima al orificio de los tornillos (ver apéndice D). Debido a que al aumentar el espesor por encima de la longitud descrita forzaba el desplazamiento de la posición de dichos orificios. Esto provocaría de igual forma un aumento en el ancho del marco de la *glove box* donde se soporta la ventana dando como resultado una disminución en el área de visión. Como se muestra en la Figura 2, este análisis estático dio resultados insatisfactorios ya que para el mayor espesor posible no se cumplían las magnitudes de esfuerzos máximos aceptables previamente establecidos.

Figura 2

*Resultados de simulación del análisis estático para la alternativa de refuerzo 1*

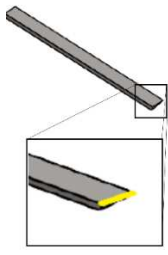


### Alternativa de refuerzo 2

Al igual que en la alternativa anterior se usó el complemento de simulación de SolidWorks, agregando como una pieza nueva las láminas de refuerzo externo con acero AISI 1020 como material inicial. Mediante el uso de un estudio de diseño se realizó la prueba de cargas estáticas para varios espesores del refuerzo externo, de igual forma se realizaron estudios de diseño para el refuerzo interno comenzando con la longitud del refuerzo superior, la cual es igual en el refuerzo

inferior. En este mismo estudio se analizó de forma paralela la longitud del refuerzo lateral cuya longitud es igual para el lado derecho como para el izquierdo. Por último, para el refuerzo interno se realizó un análisis similar para la distancia de la sección transversal en contacto con la superficie de la caja opuesta a la zona de los orificios usados para los tornillos; sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios para esta solución, ya que como se muestra en las Tablas 6, 7 y 8 en algunos casos se cumplió con el esfuerzo máximo aceptable establecido previamente, pero en ninguno se cumplió el factor de seguridad mínimo para todos los componentes por tal motivo se descartó esta alternativa.

Tabla 6  
*Estudio de diseño para la profundidad del refuerzo interno*

Nombre del componente	Ilustración (variables)	Unidades	Inicial	Óptimo
<b>Profundidad</b>		mm	30	-
<b>Tensión1</b>		N/mm <sup>2</sup> (MPa)	101.35	-
<b>Factor de seguridad mínimo1</b>			1.39	-
<b>Masa1</b>		g	318021.58	-

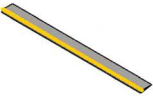

Nº escenario	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5
Profundidad	20	25	30	35	40
Tensión1	100.97	101.18	101.35	101.4	101.33
Factor de seguridad mínimo1	1.396834	1.393739	1.391397	1.390711	1.391528
Masa1	317740.6640 6	317881.12301	318021.58196	318162.0409	318302.49985

*Nota:* Los parámetros de este estudio de diseño son: la variable “Profundidad” tiene un rango de 20 a 40 mm con un paso de 5 mm, restricciones de 110 MPa para tensión máxima y un Fs mínimo de 1.5, objetivo de optimización es minimizar masa. Columna “óptimo” con símbolo (-) quiere decir que el programa no

pudo encontrar un valor que satisfaga las restricciones del estudio. Cada escenario representa los valores tomados y obtenidos por el software en busca de un valor óptimo.

Tabla 7

*Estudio de diseño para el largo del refuerzo interno superior y lateral*

Nombre del componente	Ilustracion (variables)	Unidades	Inicial	Óptimo
Largo R int Superior		mm	500	-
Largo R int Lateral		mm	150	-
Tensión1		N/mm <sup>2</sup> (MPa)	100.97	-
Factor de seguridad mínimo1			1.396849	-
Masa1		g	317740.6640 6	-

N° escenario	Escenario 1	Escenari o2	Escenari o3	Escenari o4	Escenari o5	Escenari o6
Largo R int Superior	200	400	600	800	200	400
Largo R int Lateral	50	50	50	50	150	150
Tensión1	178.65	117.46	115.71	114.99	154	110.55
Factor de seguridad mínimo1	1.157631	1.390088	1.397115	1.398037	1.342877	1.392128
Masa1	317395.24 875	317570.1	317744.9 5125	317919.8 025	317478.3 8719	317653.2 3844

N° escenario	Escenario7	Escenario8	Escenario9	Escenario10	Escenario11
Largo R int Superior	600	800	200	400	600
Largo R int Lateral	150	150	250	250	250
Tensión1	100.8	100.71	153.5	109.76	100.71
Factor de seguridad mínimo1	1.399043	1.399927	1.347251	1.393385	1.400235
Masa1	317828.08969	318002.94094	317561.52562	317736.37688	317911.22813

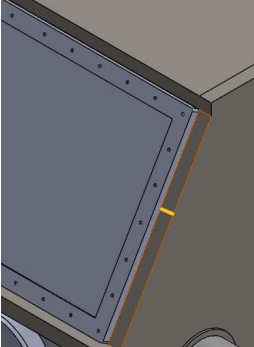
Continuación tabla 7

N° escenario	Escenario12	Escenario13	Escenario14	Escenario15	Escenario16
Largo R int Superior	800	200	400	600	800
Largo R int Lateral	250	350	350	350	350
Tensión1	100.63	153.17	109.28	100.64	100.56
Factor de seguridad mínimo1	1.401089	1.350143	1.394296	1.401116	1.401960
Masa1	318086.07938	317644.66406	317819.51532	317994.36657	318169.21782

*Nota:* Los parámetros de este estudio de diseño son: la variable “Largo R int Superior” tiene un rango de 200 a 800 mm con un paso de 200 mm y la variable “Largo R int Lateral” tiene un rango de 50 a 350 mm con un paso de 100 mm, restricciones de 110 MPa para tensión máxima y un Fs mínimo de 1.5, objetivo de optimización es minimizar masa. Columna “óptimo” con símbolo (-) quiere decir que el programa no pudo encontrar un valor que satisfaga las restricciones del estudio. Cada escenario representa los valores tomados y obtenidos por el software en busca de un valor óptimo.

Tabla 8

*Estudio de diseño para el espesor del refuerzo externo*

Nombre del componente	Ilustración (variables)	Unidades	Inicial	Óptimo
espesor		mm	20	-
Tensión1		N/mm <sup>2</sup> (MPa)	102.11	-
Factor de seguridad mínimo1			1.380649	-
Masa1		g	64475.40454	-

N° de escenario	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5	Escenario6
espesor	10	12	14	16	18	20
Tensión1	137.79	125.93	110.66	106.32	103.03	102.11

Factor de seguridad mínimo1	1.455703	1.426767	1.407571	1.395590	1.386361	1.380641
Masa1	39801.54007	44633.59105	49516.71498	54451.19987	59437.33373	64475.40454

**Continuación tabla 8**

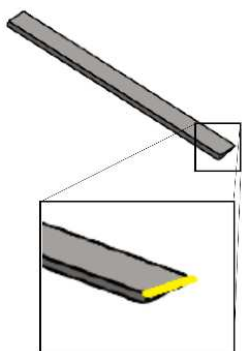
N° de escenario	Escenario7	Escenario8	Escenario9	Escenario10	Escenario11
espesor	22	24	26	28	30
Tensión1	102.35	102.43	102.54	102.65	102.69
Factor de seguridad mínimo1	1.377367	1.376383	1.374931	1.373361	1.372920
Masa1	69565.7003	74708.50903	79904.11871	85152.81736	90454.89296

*Nota:* Los parámetros de este estudio de diseño son: la variable “espesor” tiene un rango de 10 a 30 mm con un paso de 2 mm, restricciones de 110 MPa para tensión máxima y un Fs mínimo de 1.5, objetivo de optimización es minimizar masa. Columna “óptimo” con símbolo (-) quiere decir que el programa no pudo encontrar un valor que satisfaga las restricciones del estudio. Cada escenario representa los valores tomados y obtenidos por el software en busca de un valor óptimo.

**Alternativa de refuerzo 3**

En la tercera alternativa se realizaron, para el refuerzo interno, simulaciones de análisis estáticos, en este se tomaron como variables las mismas distancias que en la alternativa dos, pero con diferentes rangos en sus magnitudes como se resume en las Tablas 9 y 10. Sin embargo, para el estudio de diseño del refuerzo externo se tomó una variable adicional, ya que no solo el espesor de las secciones de láminas sería influyente, sino también el ancho de estas. Se obtuvieron resultados satisfactorios debido a que este diseño de refuerzos arrojó magnitudes de esfuerzo máximo aceptables, según lo anteriormente definido. Además, se obtuvo un factor de seguridad, en todos sus componentes, superior al mínimo establecido, dichos resultados se exponen en las Tablas 11 y 12 y el diseño final se presenta en el apéndice E.

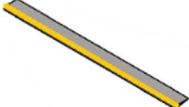

Tabla 9  
*Estudio de diseño para la profundidad del refuerzo interno*

Nombre del componente	Ilustración (variable)	Unidades	Inicial	Óptimo
<b>Profundidad</b>		mm	45	36
<b>Tensión1</b>		N/mm <sup>2</sup> (MPa)	105.07	107.06
<b>Factor de seguridad mínimo1</b>			1.731803	1.727477
<b>Masa1</b>		g	45636.71093	45583.33979

N° de escenario	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5	Escenario6
Profundidad	30	33	36	39	42	45
Tensión1	112.86	111.18	107.06	105.93	105.68	105.07
Factor de seguridad mínimo1	1.724247	1.726616	1.727477	1.728077	1.730882	1.731803
Masa1	45547.75903	45565.54941	45583.33979	45601.13017	45618.92055	45636.71093

*Nota:* Los parámetros de este estudio de diseño son: la variable “Profundidad” tiene un rango de 30 a 45 mm con un paso de 3 mm, restricciones de 110 MPa para tensión máxima y un Fs mínimo de 1.5, objetivo de optimización es minimizar masa. Cada escenario representa los valores tomados y obtenidos por el software en busca de un valor óptimo. Resaltado en color verde el escenario escogido como óptimo.

Tabla 10  
*Estudio de diseño para el largo de refuerzo interno superior y lateral*

Nombre del componente	Ilustracion (variable)	Unidades	Inicial	Óptimo	Escenario1
<b>largo R inter Sup</b>		mm	800	500	400
<b>largo R inter Lat</b>		mm	300	250	150
<b>Tensión1</b>		N/mm <sup>2</sup> (MPa)	107.06	109.75	149.14
<b>Factor de seguridad mínimo1</b>			1.727441	1.722783	1.386698
<b>Masa1</b>		g	45583.33979	45514.97442	45476.5975

N° de escenario	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Escenario 7	Escenario 8
largo R inter Sup	500	600	700	800	400	500	600
largo R inter Lat	150	150	150	150	200	200	200
Tensión1	112.96	112.21	111.74	111.31	148.25	110.45	110.49
Factor de seguridad mínimo1	1.720491	1.721856	1.724319	1.724537	1.395023	1.721669	1.723344
Masa1	45496.268	45515.939	45535.609	45555.28	45485.95	45505.621	45525.292

N° de escenario	Escenario 9	Escenario 10	Escenario 11	Escenario 12	Escenario 13	Escenario 14
largo R inter Sup	700	800	400	500	600	700
largo R inter Lat	200	200	250	250	250	250
Tensión1	109.32	108.94	147.78	109.75	110.43	107.45
Factor de seguridad mínimo1	1.725600	1.725816	1.399438	1.722783	1.724324	1.726605

Masa1	45544.962	45564.633	45495.303	45514.974	45534.645	45554.315
-------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

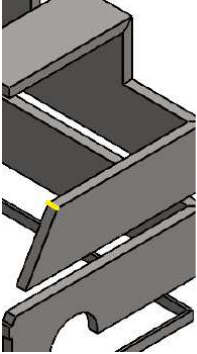
**Continuación tabla 10**

N° de escenario	Escenario 15	Escenario 16	Escenario 17	Escenario 18	Escenario 19	Escenario 20
largo R inter Sup	800	400	500	600	700	800
largo R inter Lat	250	300	300	300	300	300
Tensión1	107.09	147.46	109.7	110.38	107.41	107.06
Factor de seguridad mínimo1	1.726792	1.402483	1.723395	1.725041	1.727007	1.727441
Masa1	45573.986	45504.656	45524.327	45543.998	45563.669	45583.339

*Nota:* Los parámetros de este estudio de diseño son: la variable “Largo R int Superior” tiene un rango de 400 a 800 mm con un paso de 100 mm y la variable “Largo R int Lateral” tiene un rango de 150 a 300 mm con un paso de 50 mm, restricciones de 110 MPa para tensión máxima y un Fs mínimo de 1.5, objetivo de optimización es minimizar masa. Cada escenario representa los valores tomados y obtenidos por el software en busca de un valor óptimo. Resaltado en color verde el escenario escogido como óptimo.

Tabla 11

*Estudio de diseño para el ancho y el espesor del refuerzo externo sección 1*

Nombre del componente	ilustracion (variables)	Unidades	Óptimo	Escenario1
Ancho R ext		mm	180	100
Espesor R ext		mm	30	10
Tensión1		N/mm <sup>2</sup> (MPa)	109.72	422.98
Factor de seguridad mínimo1			1.722576	0.488928
Masa1		g	45514.97442	22807.91322

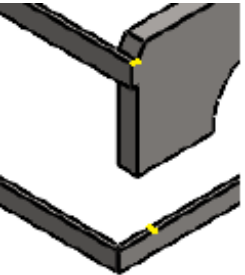
N° de escenario	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Escenario 7	Escenario 8
Ancho R ext	120	140	160	180	100	120	140
Espesor R ext	10	10	10	10	20	20	20
Tensión1	392.07	368.07	346.22	373.83	240.15	201.22	170.73
Factor de seguridad mínimo1	0.527472	0.561868	0.597329	0.553207	0.861153	1.027746	1.211319
Masa1	23804.667	24792.888	25758.273	26728.502	28041.559	30059.068	32059.510

N° de escenario	Escenario 9	Escenario 10	Escenario 11	Escenario 12	Escenario 13	Escenario 14	Escenario 15
Ancho R ext	160	180	100	120	140	160	180
Espesor R ext	20	20	30	30	30	30	30
Tensión1	161.07	190.49	154.99	144.55	138.56	127.8	109.72
Factor de seguridad mínimo1	1.283994	1.085664	1.334283	1.430724	1.492496	1.618237	1.722576
Masa1	34049.27	36013.738	33416.205	36478.468	39515.132	42532.285	45514.97

*Nota:* Los parámetros de este estudio de diseño son: la variable “Ancho R ext” tiene un rango de 100 a 180 mm con un paso de 20 mm y la variable “Espesor R ext” tiene un rango de 10 a 30 mm con un paso de 10 mm, restricciones de 110 MPa para tensión máxima y un Fs mínimo de 1.5, objetivo de optimización es minimizar masa. Cada escenario representa los valores tomados y obtenidos por el software en busca de un valor óptimo. Resaltado en color verde el escenario escogido como óptimo.

Tabla 12

*Estudio de diseño para el espesor del refuerzo externo sección delgada*

Nombre del componente	Ilustracion (variables)	Unidades	Inicial	Óptimo
<b>Espesor R ext delgado</b>		mm	10	9
<b>Tensión1</b>		N/mm <sup>2</sup> (MPa)	109.72	109.87
<b>Factor de seguridad mínimo1</b>			1.722576	1.720509
<b>Masa1</b>		g	45514.97442	45389.09442

N° de escenario	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Espesor R ext delgado	1	3	5	7	9	11
Tensión1	115.87	115.17	112.58	110.15	109.87	109.63
Factor de seguridad mínimo1	1.691038	1.701482	1.709392	1.715607	1.720509	1.725001
Masa1	44390.694	44638.854	44887.974	45138.054	45389.094	45641.094

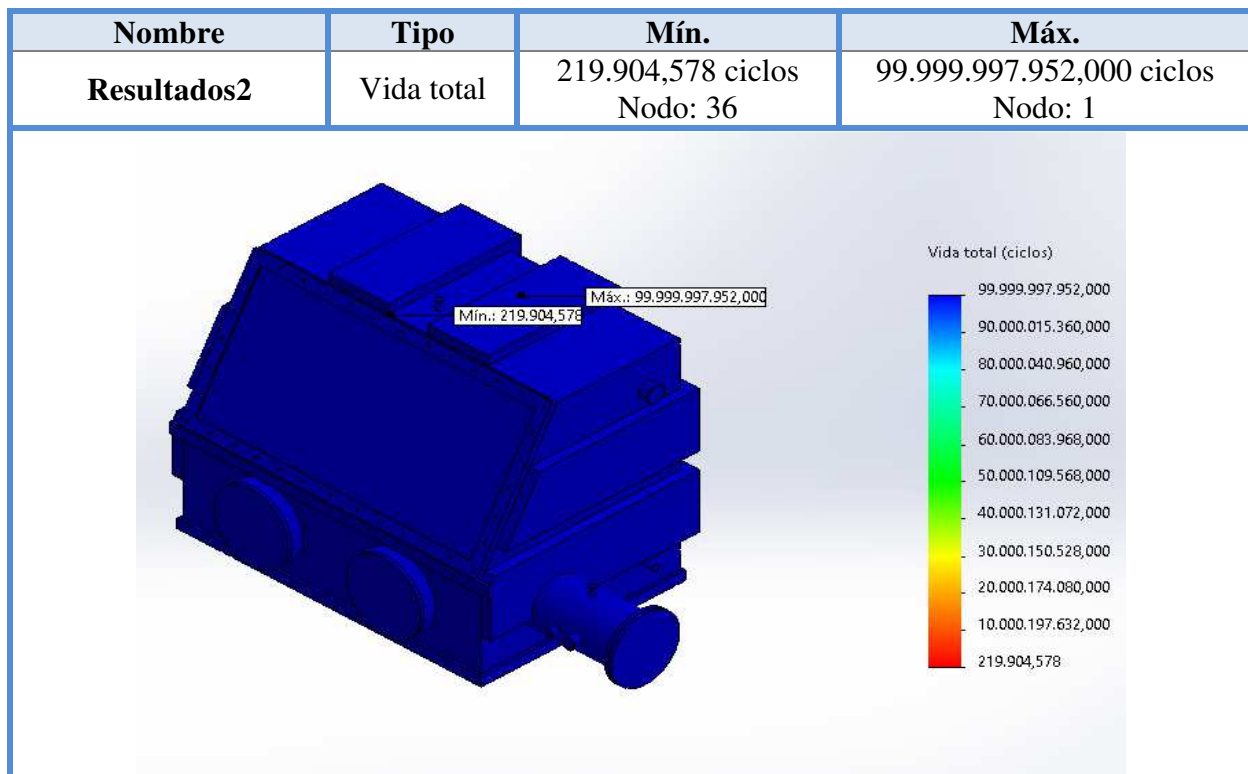
*Nota:* Los parámetros de este estudio de diseño son: la variable “Espesor R ext delgado” tiene un rango de 1 a 11 mm con un paso de 2 mm, restricciones de 110 MPa para tensión máxima y un Fs mínimo de 1.5, objetivo de optimización es minimizar masa. Cada escenario representa los valores tomados y obtenidos por el software en busca de un valor óptimo. Resaltado en color verde el escenario escogido como óptimo.

Estableciendo en el diseño final las dimensiones óptimas expuestas en los apéndices F y G obtenidas en los resultados de la alternativa 3, se llevó a cabo una simulación del estudio de fatiga con el fin de corroborar los ciclos de vida del dispositivo a fabricar con los materiales iniciales,

acero AISI 1020 para los refuerzos externos y acero AISI 304 para el refuerzo interno y todos los componentes de la caja de guantes (*glove box*), a excepción del vidrio templado de la ventana (ver apéndice H). Dando como resultado un número de ciclos de vida mínimo aproximado de 20 ciclos/día durante 30 años antes de presentar falla por fatiga, lo cual se expone en la Figura 3.

Figura 3

*Resultados de la simulación del estudio de fatiga para vida total*



#### 4.9 Análisis del flujo del gas inerte al interior de la cámara principal

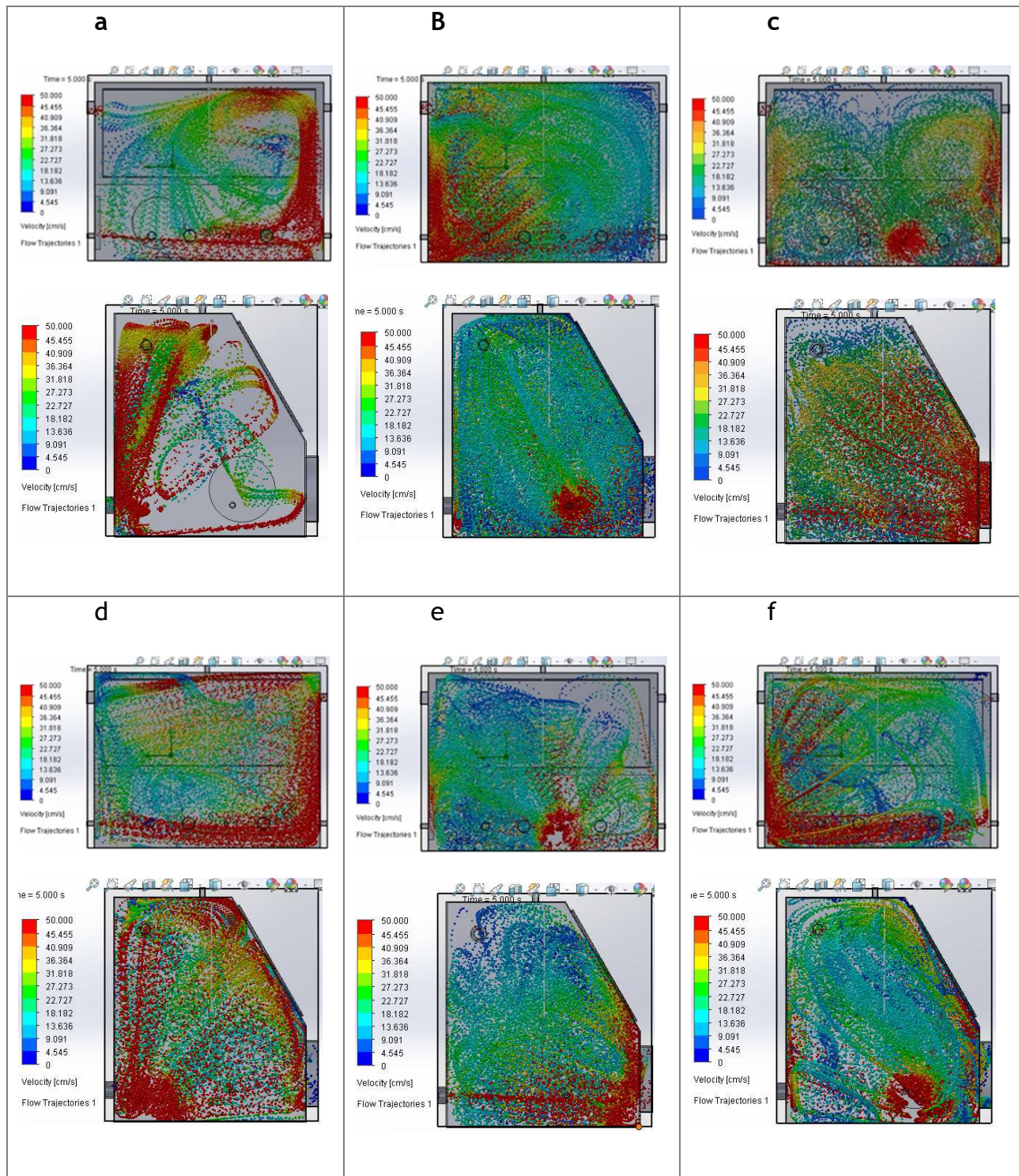
Por medio del complemento de SolidWorks llamado SolidWorks Flow Simulation, se realizó una serie de simulaciones básicas acerca del movimiento del gas utilizado como reemplazo del aire al interior de la caja de guantes, este análisis tuvo como principal variable la posición de los orificios de entrada y salida de gases; sin embargo, es importante mencionar que debido a la

alta demanda de poder de cómputo requerido por este tipo de simulación la malla usada no fue muy fina, por ende, los resultados obtenidos son muy aproximados.

Para el correcto reemplazo del aire por gas inerte se busca que este último llene lo más homogéneamente posible la caja de guantes, ya que esto garantizaría un correcto desplazamiento de la atmósfera interna. Con base en los resultados sintetizados en las Figura 4, se realiza una recomendación de operatividad la cual consiste en exponer la combinación de entrada y salida de gas más favorable, ésta según las simulaciones correspondería a la expuesta en la Figura 4 sección b, sin embargo como segunda y tercera opción en viabilidad se recomienda la combinación de las sección f seguida por la sección d, además se hace mención de cuál es menos apropiada para la operatividad, siendo esta la mencionada en la sección a.

Figura 4

*Trayectoria y velocidad del gas inerte desde la vista posterior y lateral izquierda*



*Nota:* La representación gráfica de la trayectoria del gas inerte se lleva a cabo mediante 100 elementos con forma esférica para todos los casos. a) entrada: válvula del lateral derecho de la caja, b) entrada: válvula del lateral izquierdo de la caja, c) entrada: válvula de la cara posterior de la caja, las tres anteriores con salida: brida del lateral derecho de la caja, d) entrada: válvula del lateral derecho de la caja, e) válvula de la cara

posterior de la caja, f) entrada: válvula del lateral izquierdo de la caja, estas últimas tres con salida: brida del lateral izquierdo de la caja.

Tabla 13

*Propiedades relevantes del acero AISI 304 utilizadas para la selección de materiales en Granta EduPack*

Propiedad	Valor mínimo	Valor máximo	Aceptable	Excelente
Densidad		8060 kg/m <sup>3</sup>		
Limite elástico	264 MPa			
Resistencia a la fatiga después de 10 <sup>7</sup> ciclos	229 MPa			
Durabilidad al agua				X
Precio		12100 COP/Kg		
Potencial Galvánico	-0.25V	-0.07V		
Soldabilidad			X	X
Conformado en frío			X	X
Conformado en caliente			X	X
Forja			X	X
Estampado			X	X

#### 4.10 Selección de materiales para el diseño usando Granta EduPack

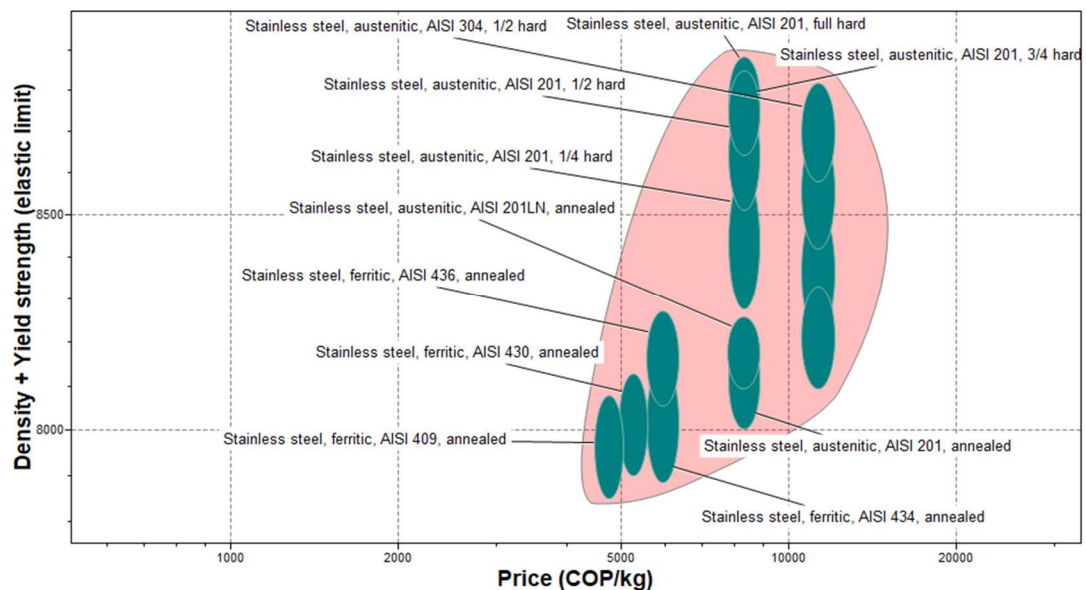
##### Cuerpo de la cámara principal de la *glove box*

Haciendo uso del software se buscaron posibles materiales que llegasen a reemplazar al acero AISI 304 en la fabricación de la *glove box* de manera que se mantengan o mejoren propiedades relevantes y se tenga en cuenta la optimización de variables como el precio y la densidad. Las propiedades que se tuvieron en cuenta para hacer los respectivos filtros en busca de materiales se presentan en la Tabla 13, y fueron consultados directamente en la base de datos del software EduPack.

Los filtros utilizados se encuentran detallados en el apéndice H y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5 donde se observan los materiales con posible uso para reemplazo del acero AISI 304 dentro de los cuales destaca el acero inoxidable ferrítico AISI 409 por su menor costo y densidad en comparación con los demás.

Figura 5

*Materiales con posible uso para la fabricación de la caja de guantes.*



### Material de refuerzo

Para la búsqueda de materiales que sirvan como reemplazo del acero 1020, utilizado para la fabricación de los refuerzos, se sigue un procedimiento similar al anterior en el cual se desea

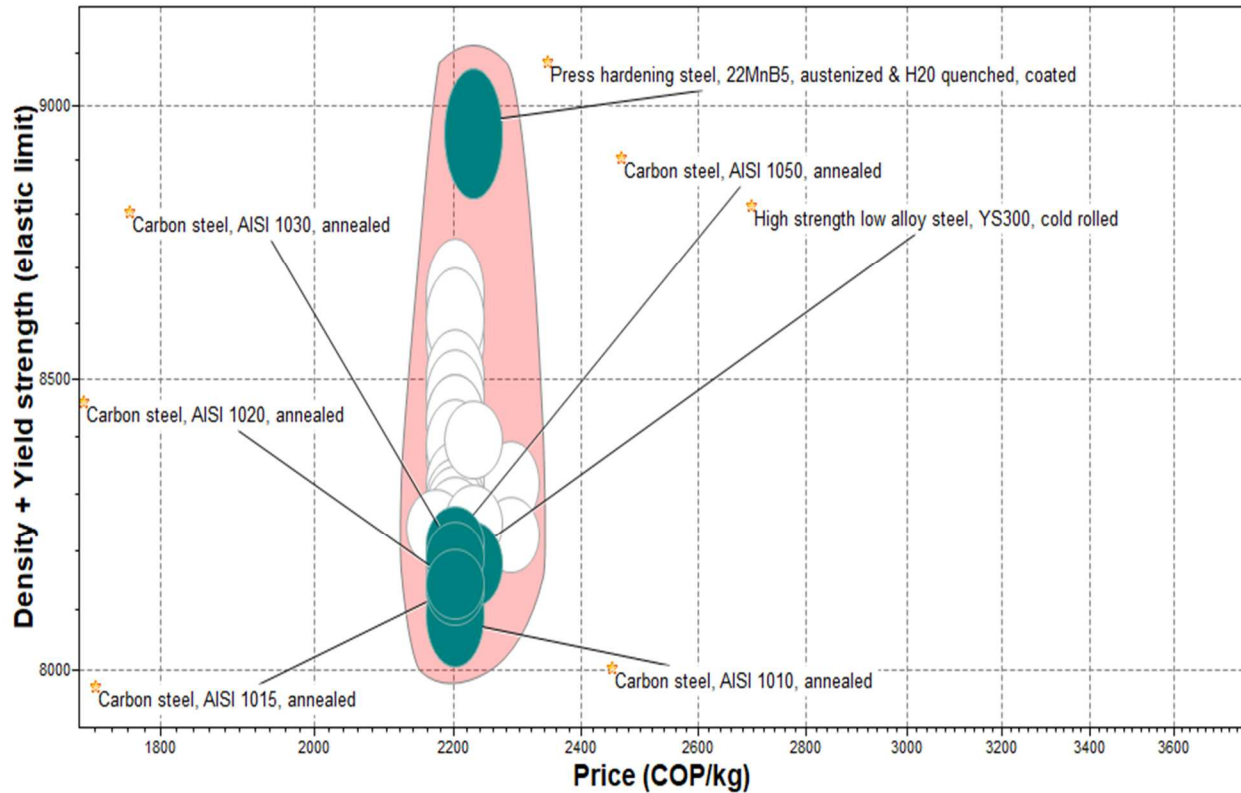
optimizar variables como densidad y precio sin afectar la resistencia mecánica. Además, ciertas propiedades ya no son tan relevantes, como por ejemplo la durabilidad al agua, pero si lo es el potencial galvánico pues se debe tener en cuenta para no seleccionar materiales que generen una diferencia de potencial elevada en conjunto con el acero de fabricación de la carcasa de la *glove box* o, dado el caso, un material que actúe como ánodo y no como cátodo pues es menos complejo el cambio del refuerzo que de la propia caja.

En la Figura 6 se aprecia que los materiales que pasan los filtros de selección tienen un precio muy similar, en ese caso el acero que resalta por su baja densidad es el AISI 1010, sin embargo, los demás también brindan las propiedades necesarias para elaborar los refuerzos y. Cabe mencionar, además, que los materiales tienen un potencial galvánico inferior a -4,5 V lo cual los hace susceptibles a sufrir corrosión galvánica por lo que se recomienda utilizar un recubrimiento como pintura para aislar las superficies de los dos materiales.

Los resultados obtenidos luego de realizar la selección se presentan en la Figura 6 y los filtros usados se detallan en el apéndice I.

Figura 6

*Materiales con posible uso para la fabricación de los refuerzos de la caja de guantes*



## 5. Conclusiones

Se logró elaborar un diseño de caja de guantes (*glove box*) con dimensiones y geometrías aptas para la operación de vacío y posterior establecimiento de la atmósfera inerte, lo cual ha de permitir la fabricación de un equipo para realizar labores que impliquen como requerimiento atmósferas controladas. Mediante la consulta de información en catálogos y fichas técnicas de fabricantes y distribuidores se pudo tener conocimiento de diferentes criterios de diseño como el

variado rango de dimensiones y geometrías usadas comúnmente en las cajas de guantes comerciales y sus componentes, notando predilección hacia las formas cilíndricas y de paralelepípedo; además, se obtuvieron condiciones de operación las cuales no varían tanto como las dimensiones manifestando en general una presión de vacío de  $6.66 \times 10^{-6}$  MPa y una presión de llenado de 0.107991 MPa, también se conoció la lista de componentes usados en la operación como los manómetros, tomacorriente, bridas, bombas de vacío, válvulas, etc. Se observó una variada gama de materiales de fabricación entre los cuales resaltaba el acero AISI 304 y el acrílico.

Se logró proponer un diseño inicial en el cual se determinaron como dimensiones ideales para la cámara principal un largo de 900 mm, ancho de 700 mm y profundidad de 600 mm elaborada con láminas de calibre 10 en acero AISI 304. De igual forma, para la antecámara un diámetro de 150 mm y un largo de 300 mm elaborada con láminas de calibre 11 del mismo material de la cámara principal. Con base en las consultas de catálogos mencionadas, también fue posible establecer los componentes básicos con los que debería ser dotada la *glove box*, siendo estas 3 válvulas  $\frac{1}{4}$ ", 2 manómetros, un tomacorriente, 2 bridas KF25 y 3 KF40 los cuales fueron distribuidos de la forma más funcional y uniformemente posible por el perímetro de la cámara como de la antecámara, para el frontal de la caja en la zona de la ventana se estableció una inclinación de  $30^\circ$  con respecto a la vertical de entre tres inclinaciones posibles, debido a que esta proporcionaba mejor comodidad al operario y mayor área de visión al interior de la cámara. Mediante el uso de simulaciones de cargas estáticas con el software SolidWorks se analizó la capacidad de este de resistir las condiciones de operación, obteniendo resultados insatisfactorios.

Se lograron proponer alternativas de diseño que conllevaron a mejorar los resultados del diseño inicial, las cuales consistieron en 3 opciones de refuerzo, siendo la primera un aumento del calibre en las láminas de cámara principal, la segunda un refuerzo externo en láminas que

recubrieran las caras de la cámara y ultima la opción constituida por un refuerzo externo en secciones de láminas de acero AISI 1020 posicionadas en el centro de las caras de la cámara principal.

Se observó que la última alternativa arrojó mejores resultados de simulación de cargas estáticas, además de proporcionar mediante una simulación de fatiga un mínimo de ciclos de vida de aproximadamente 269000 ciclos, también por medio de una simulación de flujos se logró definir la combinación de entrada y salida de gases más favorable, para esto se combinaron dos bridas para salida de gas con las tres válvulas de entrada, siendo la opción más viable compuesta por la válvula del lateral izquierdo de la caja como entrada y la brida del lateral derecho como salida.

Por último, con la ayuda del software Granta EduPack se pudieron establecer materiales con posible uso en la fabricación de la caja de guantes, entre los cuales resaltan el acero AISI 409 como reemplazo del acero AISI 304 en la fabricación de la carcasa y el acero AISI 1010 por su menor densidad como reemplazo del acero AISI 1020 en la fabricación de los refuerzos.

### **Referencias Bibliográficas**

Marion E. Cox; Mary E. Cox. (1973). *GLOVE BOX CHAMBER*. In United States Patent.

A.Valencia. (2016). LA ERA DEL LITIO. *Revista Colombiana de Materiales*, 9, 1–14.

Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. (2015). *Introducción a Solidworks*. In *Dassault Systèmes SolidWorks Corporation*.

Diego Hernán Ruiz. (2006). Fundamentos y ensayos en materiales metálicos (C. y T. I. N. de E. T. Ministerio de Educación).

MTI corporation. (s/f). *vacuum glove box*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://www.mtixtl.com/vacuum--glove-boxes.aspx>

TOB, X. T. N. E. T. (s/f). *Standard Glove box*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de [https://www.tobmachine.com/standard-glove-box\\_c192](https://www.tobmachine.com/standard-glove-box_c192)

Vilitek. (s/f). *Stainless steel gloveboxes VBOX-SS vacuum gloveboxes*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://vilitek.com/products/gloveboxes/vbox-ss/#prettyPhoto>

Terra Universal. (s/f). *Glove boxes: Isolation & Containment Chambers*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://www.terrauniversal.com/glove-boxes-isolators.php>

Vacuum Technology. (s/f). *Super glove boxes*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://vti-glovebox.com/products/glove-boxes/super-2/>

Labconco. (s/f). *Glove boxes and Gas Purifiers*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://www.labconco.com/category/glove-boxes-gas-purifiers>

Tmax Battery Equipments. (s/f). *Vacuum Glove box*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de [https://es.tmaxcn.com/vacuum-glove-box\\_c75](https://es.tmaxcn.com/vacuum-glove-box_c75)

VAC, Vacuum Atmospheres Company. (s/f). *Glovebox Systems*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://vacatm.com/glovebox-comparison>

McNair, T. (2006). *An ergonomic job analysis of a work process within a glovebox*. New Jersey Institute of Technology.

International Standards Organization. (2020). *ISO 2861, Vacuum technology -- Dimensions of clamped-type quick-release couplings*.

Tornillos y Partes Plaza. (2021). *Catalogo general - Tornillería Acero Inoxidable*.

Euroglas. (2020). *Ficha técnica cristal templado* (p. 8).

Inert. (2021). *Custom Engineered Glove box Systems*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021  
<https://www.inertcorp.com/gloveboxes/>

Tornillos y Tuercas Co. (s/f). *Tornillo Bristol Acero Inoxidable 304*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://www.tornillosytuercas.co/collections/tornillos-bristol/products/tornillo-bristol-en-acero-inoxidable-304>

DirectMaterial. (s/f). *2" Utility Pressure Gauge (WOG), 1/4" NPT Lower Mount Connection, Black Steel Cases, OEM*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://www.directmaterial.com/2-utility-pressure-gauge-wog-1-4-npt-lower-mount-connection-black-steel-cases-oem>

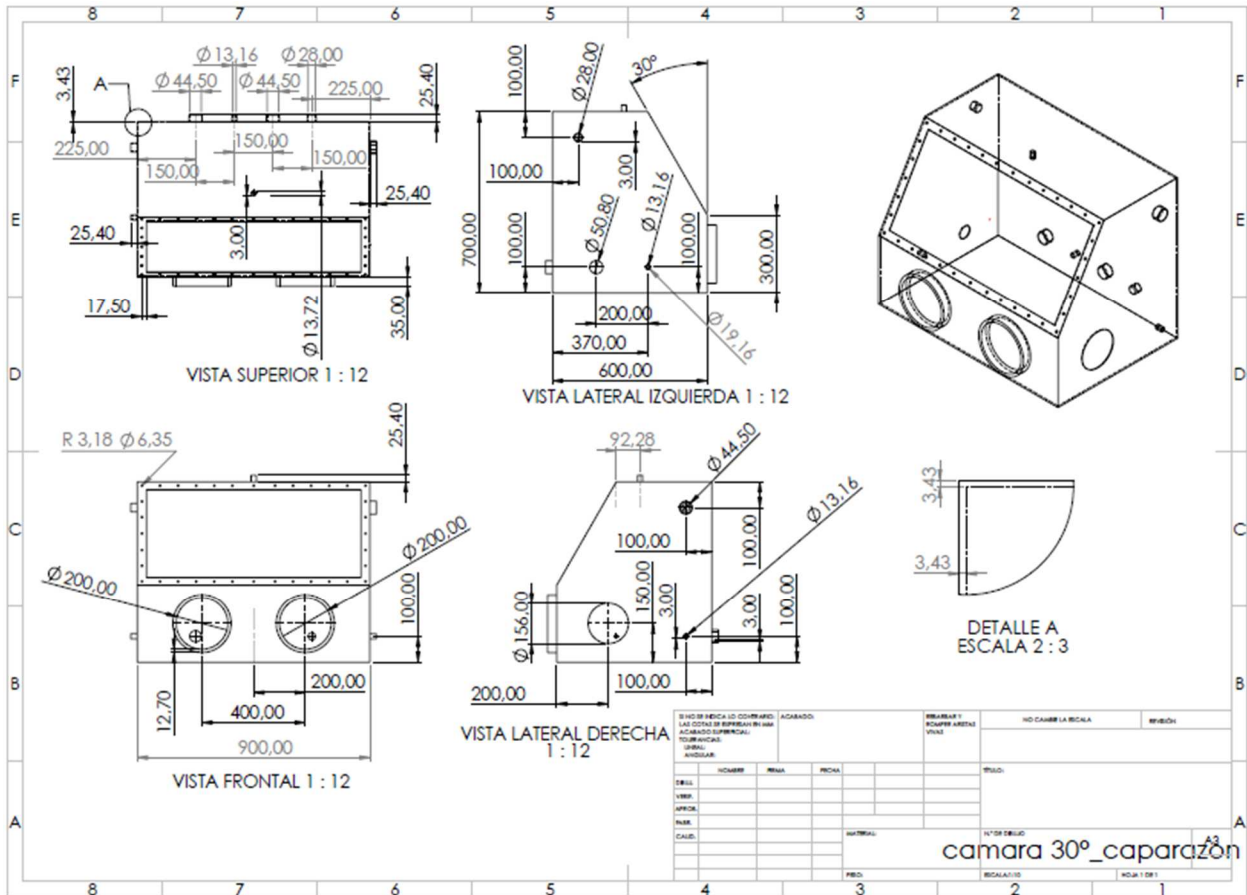
Ferreteria Reina S.A. (s/f). *Manómetros Lehren para instalaciones con o sin glicerina*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de [http://www.ferreteriareina.com/index.cfm?doc=producto\\_detalle&ID\\_Producto=97&key\\_prod=bfd2b693-eb5a-4f24-8e45-e866aa7994af](http://www.ferreteriareina.com/index.cfm?doc=producto_detalle&ID_Producto=97&key_prod=bfd2b693-eb5a-4f24-8e45-e866aa7994af)

Viaindustrial. (s/f). *Catalogo Viaindustrial*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://www.viaindustrial.com/catalogo-instrumentacion-ferreteria-suplementos-industriales/>

**Apéndices**

Apéndice A

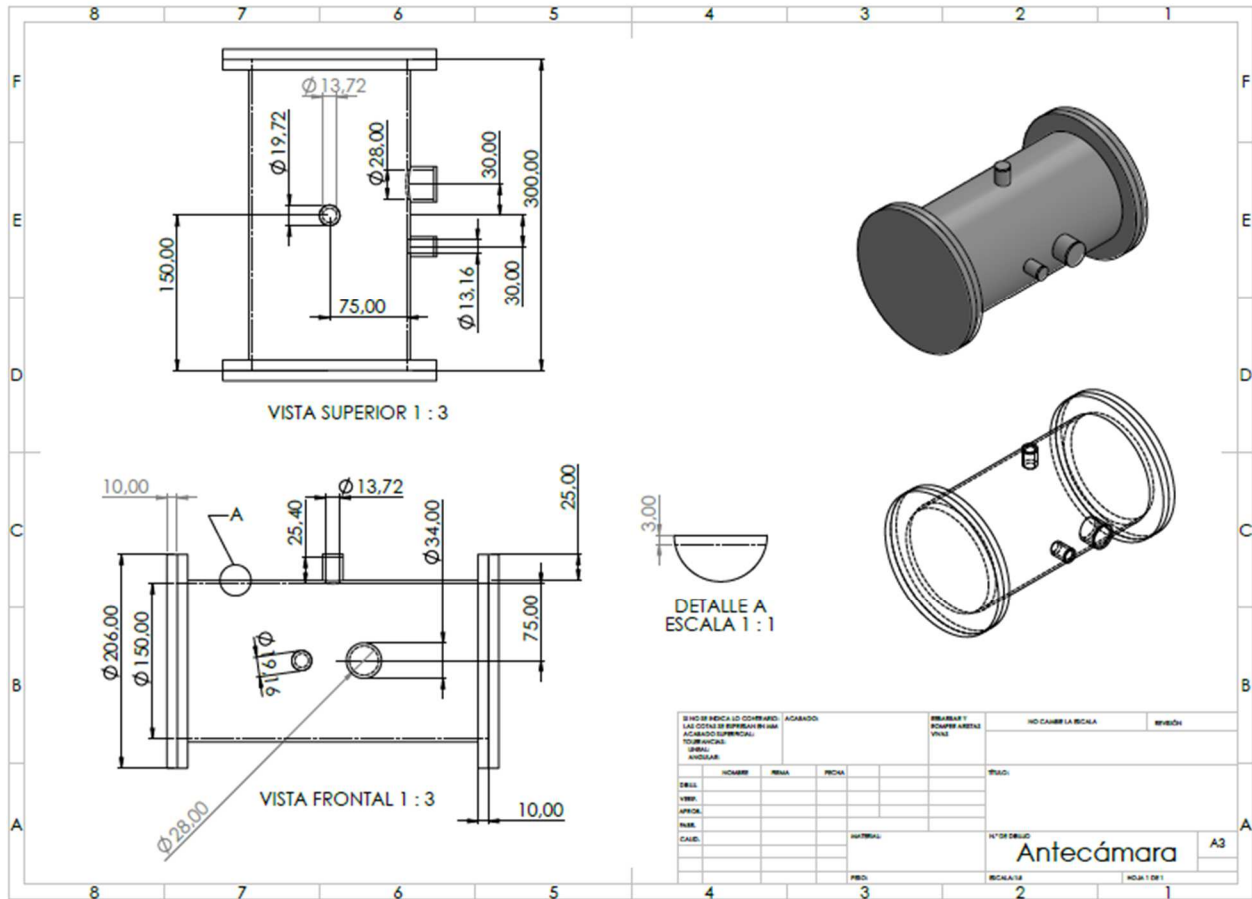
Dimensiones y geometrías del cuerpo de la caja de guantes.



Nota: unidades de distancias en milímetros.

Apéndice B

Diseño final propuesto para la antecámara



Nota: unidades de distancias en milímetros

## Apéndice C

### Complementos recomendados

#### *Guantes*

Los guantes son uno de los componentes de la caja más importantes debido a que son las piezas más frágiles, de mayor contacto y de protección directa del operario. En el mercado hay diversidad de guantes tanto en tallas como en materiales, los guantes se escogen después de definidas las dimensiones de la *glove box*.

Dentro de los materiales más destacados para los guantes están:

- Neopreno (resistencia a la tracción y flexibilidad)
- Butilo (Proporcionan una alta impermeabilidad al vapor de agua, gases y productos químicos tóxicos. Resistente a los disolventes oxigenados y a la mayoría de los productos químicos oxidantes)
- CSM Caucho de polietileno clorosulfonado, también conocido como Hypalon. (Resistente a la abrasión, el ozono y los agentes químicos oxidantes)
- Latex. (proteccion limitada, usados cuando se necesita destreza)

Para este proyecto se recomienda utilizar los guantes de butilo pues son los que brindan una mayor seguridad teniendo en cuenta que el ensamblaje de baterías de litio proporciona un ambiente relativamente reactivo el cual podría generar riesgo para la integridad del operario. La posición establecida para los guantes es el frontal de la caja y el diámetro de los porta guantes debe ser de 8 pulgadas para no limitar el uso de la *glove box* a personas de brazos gruesos (ver apéndices A y E).

### ***Válvulas***

Basados en *glove box* de varios fabricantes entre ellos MTI CORPORATION se determinó que comúnmente se utilizan válvulas de ¼" para la conexión de las mangueras que transportan el gas inerte (N o Ar) desde su recipiente externo hasta la *glove box*. En referencia a los datos de válvulas consultados y con el fin de brindar comodidad y opciones de conexión tanto para introducción del gas inerte en la caja como para la conexión de futuros accesorios o herramientas requeridas se determinó dotar con un mínimo de 3 válvulas de ¼", posicionadas de la siguiente manera (ver apéndices A, B y E: una en la zona inferior de la cara posterior y las otras dos una en cada lateral de la caja a la misma altura de la primera. De igual forma se ubicó en la parte frontal de la antecámara una de estas válvulas.

### ***Bridas***

Las bridas son elementos de conexión generalmente utilizados para la unión de dos tuberías, las bridas KF son un tipo de brida usada para la unión de tuberías de vacío, esta clase de herramienta se fabrica con diferentes dimensiones según la norma ISO 2861.

En referencia a *glove box* comerciales, conexiones de sensores de humedad y oxígeno, conexiones de bombas y otros accesorios, se logró observar que las bridas más usadas para este tipo de dispositivos son las denominadas KF 25 y KF 40.

Para el diseño se optó por utilizar tres bridas KF40 y un par KF25 intentando con esto brindar dos tipos de conexiones distintas, para lograr este fin se distribuyeron las 5 bridas de la siguiente forma: en el lateral derecho de la caja en su parte superior derecha se posicionó una brida

KF40, las otras dos se ubicaron en la parte inferior del posterior de la caja, una en el extremo derecho y la otra más centralizada. Por otra parte, una de las bridas KF25 se ubicó en el lateral izquierdo de la caja en la parte superior izquierda, mientras que la restante se posicionó en el extremo izquierdo de la cara posterior a la misma altura de las bridas KF 40 de dicha cara. De igual forma se ubicó en la parte frontal de la antecámara una brida KF25, esta distribución se muestra en los apéndices A, B y E.

### ***Tornillos***

Para la sujeción del marco y la ventana se hace la recomendación del uso de tornillos Allen o Bristol, debido a que la geometría de la cabeza de este tipo de tornillos ofrece amplia superficie de contacto entre esta y la llave, lo que permite aplicar un mayor par de torsión en comparación a los tonillos de cabeza hexagonal, además la llave Allen permite realizar el apriete en zonas con espacio reducido.

Para fines de simulación se han tomado como referencia tornillos Bristol de acero inoxidable 304 con dimensiones ¼" - 20 del distribuidor TORNILLOS Y TUERCAS CO.

### ***Toma corriente***

Algunos implementos usados dentro de la *glove box* requieren de corriente eléctrica, para suplir esta necesidad se consultaron tomas de corriente comerciales que tuvieran voltajes en los 110V ya que este es el voltaje usado por varios equipos de laboratorio en Colombia. Se observó que este tipo de elemento se fabrica en varias dimensiones y geometrías, por ende, al igual que los tornillos se deja a elección del fabricante, sin embargo, se debe tener en cuenta el voltaje (110V). El espacio para este dispositivo se ubicó en la zona inferior izquierda del lateral izquierdo de la

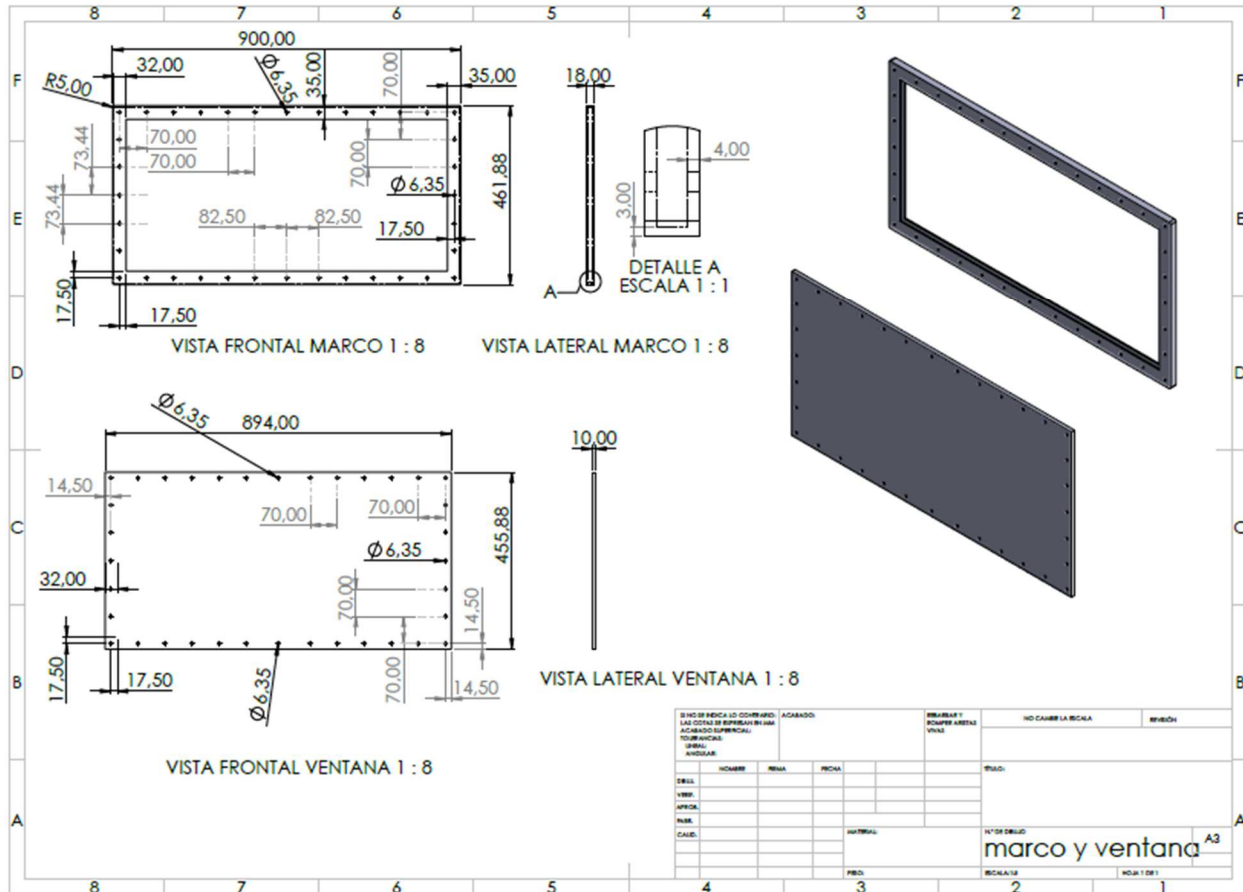
caja, para fines de simulación se realizó un orificio de 2 pulgadas en referencia a un tipo de tomacorriente consultado, esto se muestra en los apéndices A y E.

### ***Manómetro***

Este accesorio cumple un papel importante ya que permite tener conocimiento de las presiones que se generan internamente en la caja de guantes debido al vacío y llenado de la misma, según varios distribuidores como ViaIndustrial, ferretería Reina y Directmaterial se conoció que la conexión más común en este tipo de instrumento es de ¼" NPT, además, mediante la observación de *glove box* de varios fabricantes se determinó la necesidad de un dispositivo de esta clase en la antecámara y otro en la cámara principal de la *glove box*. Para la antecámara un manómetro centrado en la zona superior, de igual forma se hizo para la cámara principal, sin embargo, en esta se encuentra centrado respecto al ancho, pero no respecto a la profundidad, debido a que está posicionado ligeramente hacia el frontal como se expone en los apéndices A, B y E.

Apéndice D

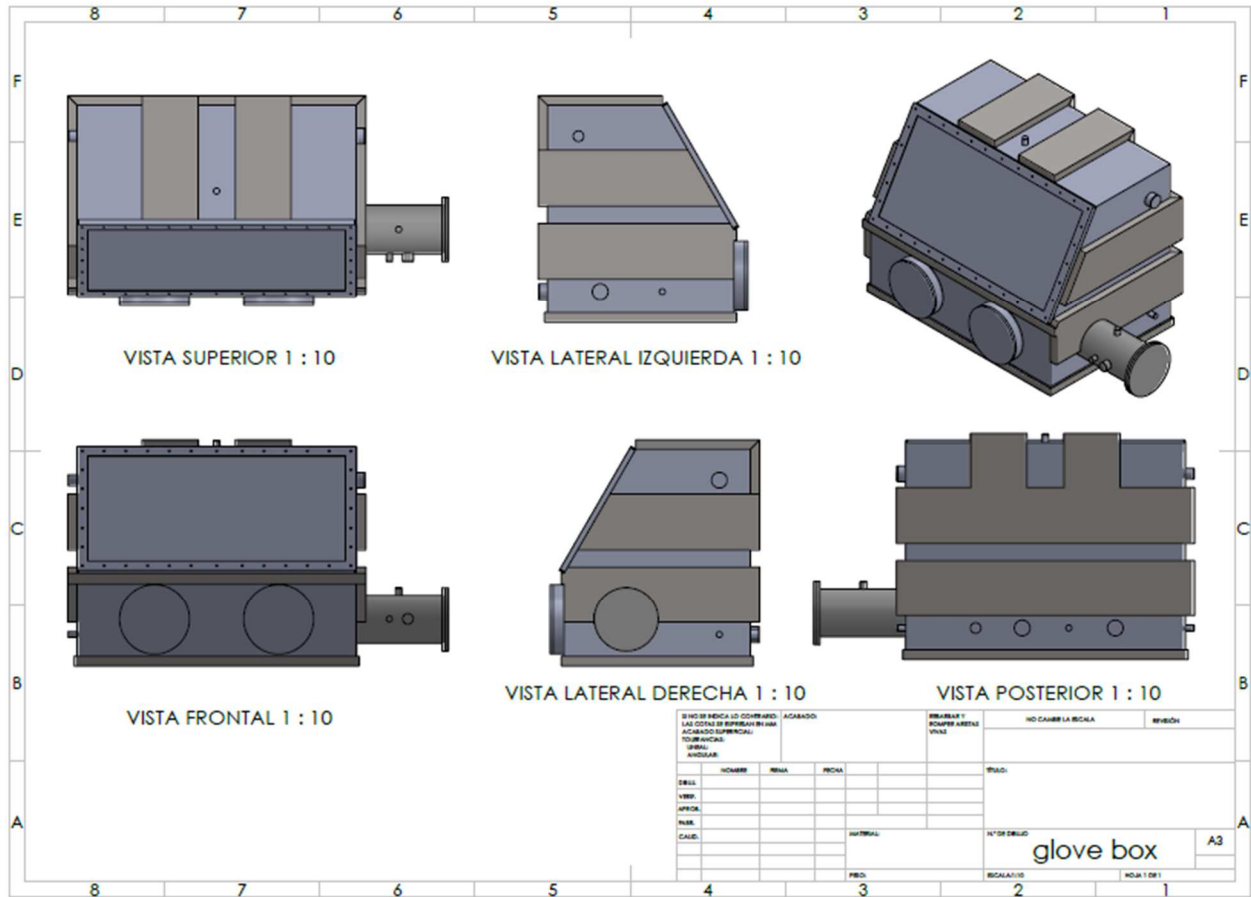
Dimensiones y geometrías para el marco y la ventana.



Nota: unidades de distancias en milímetros.

Apéndice E

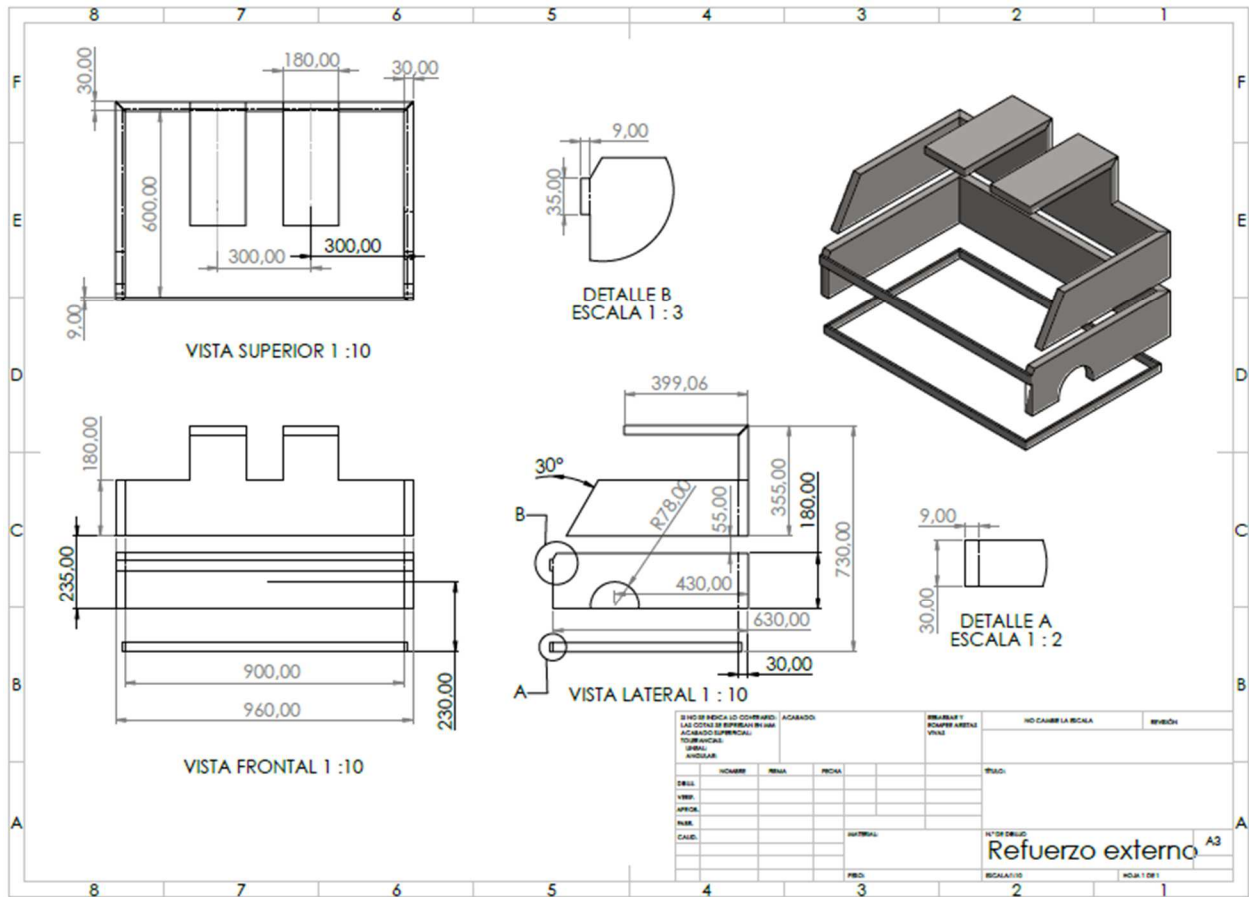
Diseño final propuesto para la caja de guantes (*glove box*).



Nota: unidades de distancias en milímetros

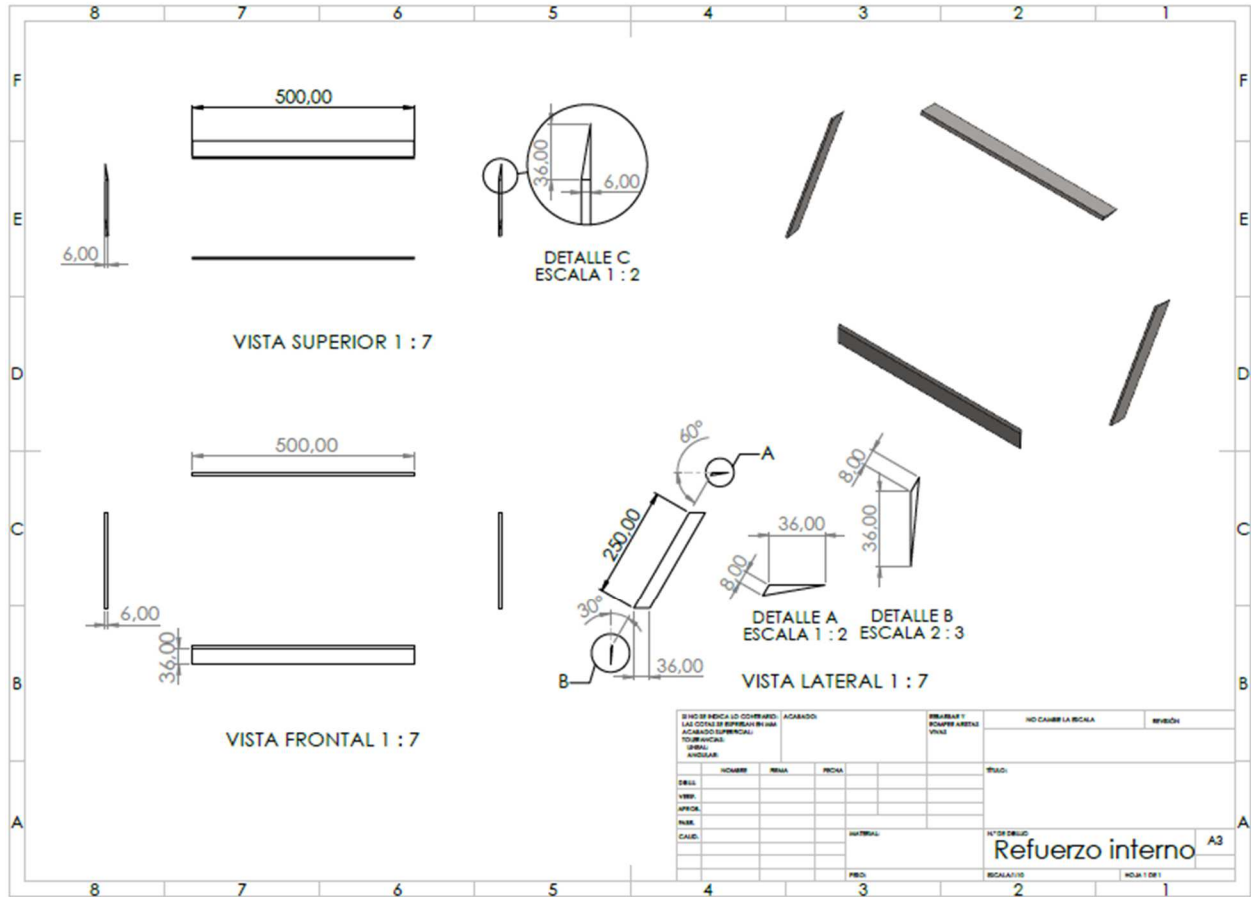
Apéndice F

Dimensiones y geometrías del refuerzo externo.



Nota: unidades de distancias en milímetros.

**Apéndice G**  
**Dimensiones y geometrías del refuerzo interno.**



DIBO DE MEDIDA LO COMPARADO: ACABADO: LAS CUCILLAS DEBERAN DE SER ACABADO SUPERFICIAL: TORNEADO: ANGULAR:		BILIMETRO: PUNTA ABRETA: VIVA:	NO CAMBIA LA ESCALA: REFINISH:
DIBO: YEAR: SPECIFIC: FILE: CAUSE:	NOMBRE: NÚMERO: PÉDIA: MATERIAL:	ESCALA: N° DE DIBO: ESCALAS DE:	HORA DE DIBO:
Refuerzo interno		A3	HORA DE DIBO:

Nota: unidades de distancias en milímetros

Apéndice H

Vista explosionada del diseño final de la caja de guantes con la tabla de materiales de cada componente.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	camara 30° caparazon	AISI 304	1
2	camara marco de ventana 30°	AISI 304	1
3	ensamblaje antecamara	AISI 304	1
4	tapa brida k25	AISI 304	2
5	tapa brida k40	AISI 304	3
6	tapa enchufe		1
7	tapa guantes	AISI 304	2
8	tapa manometro	AISI 304	1
9	tapa valvula	AISI 304	3
10	ventanal 30°	Vidrio templado	1
11	Refuerzo externo 1	AISI 1020	1
12	Refuerzo interno	AISI 304	1

SUSCRIBIDA LO CORRIÓ (A):				ACABADO:	REVISOR Y	NO CAMBIA LA ESCALA	REVISOR
LAS COTAS DE REFUERZO EN MM				ACABADO SUPERFICIAL:	DEBE HABER		
TOLERANCIA:				TOPOGRAFIA:	VALORES		
AVISO:							
	INGENIERO	FECHA	FECHA	ESTADO:			
DEBIL							
LIBRE							
APROB							
FIRM							
CAJIN							
				AUTORIZADO		Nº DE DISEÑO	
						glove box 30°	
				PROY.		ESCALA 1:1	
						RELACIONES	

Nota: unidades de distancias en milímetros.

## Apéndice I






## Filtros utilizados para la selección de materiales de reemplazo del acero AISI 304.

▼ Price			
	Mínimo	Máximo	
Price	<input type="text"/>	12100	COP/kg
Price per unit volume	<input type="text"/>	<input type="text"/>	COP/m <sup>3</sup>
▼ Physical properties			
	Mínimo	Máximo	
Density	<input type="text"/>	8060	kg/m <sup>3</sup>
▼ Mechanical properties			
	Mínimo	Máximo	
Young's modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Specific stiffness	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MN.m/kg
<u>Yield strength (elastic limit)</u>	264	<input type="text"/>	MPa
Tensile strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Specific strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	kN.m/kg
Elongation	<input type="text"/>	<input type="text"/>	% strain
Compressive strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Flexural modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Shear modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Bulk modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Poisson's ratio	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Shape factor	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Hardness - Vickers	<input type="text"/>	<input type="text"/>	HV
Elastic stored energy (springs)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	kJ/m <sup>3</sup>
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	229	<input type="text"/>	MPa

Continuación Apéndice I

▼ Electrical properties			
	Mínimo	Máximo	
Electrical resistivity	<input type="text"/>	<input type="text"/>	μohm.cm
Electrical conductivity	<input type="text"/>	<input type="text"/>	%IACS
Dielectric constant (relative permittivity)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MV/m
Galvanic potential	<input type="text" value="-0,25"/>	<input type="text" value="-0,07"/>	V
▼ Processing properties			
Metal casting	<input type="text"/>		
Metal cold forming	<input type="text" value="Acceptable; Excellent"/>		
Metal hot forming	<input type="text" value="Acceptable; Excellent"/>		
Metal press forming	<input type="text" value="Acceptable; Excellent"/>		
Metal deep drawing	<input type="text" value="Acceptable; Excellent"/>		
Polymer injection molding	<input type="text"/>		
Polymer extrusion	<input type="text"/>		
Polymer thermoforming	<input type="text"/>		
Machining speed	<input type="text"/>	<input type="text"/>	m/min
Weldability	<input type="text" value="Good; Excellent"/>		

Continuación Apéndice I





▼ Primary production energy, CO2 and water				
		Mínimo	Máximo	
Embodied energy, primary production (virgin grade)		<input type="text"/>	70	MJ/kg
Embodied energy, primary production (typical grade)		<input type="text"/>	43,1	MJ/kg
CO2 footprint, primary production (virgin grade)		<input type="text"/>	4,76	kg/kg
CO2 footprint, primary production (typical grade)		<input type="text"/>	3,01	kg/kg
Water usage		<input type="text"/>	153	l/kg
▼ Durability				
Water (fresh)		Excellent		▼
Water (salt)				▼
Weak acids				▼
<u>Strong acids</u>				▼
Weak alkalis				▼
Strong alkalis				▼
Organic solvents				▼
Oxidation at 500C				▼
UV radiation (sunlight)				▼
Galling resistance (adhesive wear)				▼
Flammability				▼

## Apéndice J

## Filtros utilizados para la selección de materiales de reemplazo del acero AISI 1020.

▼ Price			
	Mínimo	Máximo	
Price	<input type="text"/>	3624	COP/kg
Price per unit volume	<input type="text"/>	<input type="text"/>	COP/m <sup>3</sup>
▼ Physical properties			
	Mínimo	Máximo	
Density	<input type="text"/>	7900	kg/m <sup>3</sup>
▼ Mechanical properties			
	Mínimo	Máximo	
Young's modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Specific stiffness	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	265	<input type="text"/>	MPa
Tensile strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Specific strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	kN.m/kg
Elongation	<input type="text"/>	<input type="text"/>	% strain
Compressive strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Flexural modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Shear modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Bulk modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Poisson's ratio	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Shape factor	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Hardness - Vickers	<input type="text"/>	<input type="text"/>	HV
Elastic stored energy (springs)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	kJ/m <sup>3</sup>
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	207	<input type="text"/>	MPa

## Continuación Apéndice J

▼ Processing properties			
Metal casting			▼
Metal cold forming		Acceptable; Excellent	▼
Metal hot forming		Acceptable; Excellent	▼
Metal press forming		Acceptable; Excellent	▼
Metal deep drawing		Acceptable; Excellent	▼
Polymer injection molding			▼
Polymer extrusion			▼
Polymer thermoforming			▼
Machining speed		<input type="text"/>	<input type="text"/> m/min
<a href="#">Weldability</a>		Good; Excellent	▼
▶ Durability			
▼ Primary production energy, CO2 and water			
		Mínimo	Máximo
Embodied energy, primary production		<input type="text"/>	<input type="text"/> 33,9 MJ/kg
CO2 footprint, primary production		<input type="text"/>	<input type="text"/> 2,49 kg/kg
Water usage		<input type="text"/>	<input type="text"/> 47,7 l/kg