



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



MEMORIA DE TÍTULO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CARCASA DE PROTECCIÓN
PARA CORTADORA LASER**

POR

Gonzalo Canales

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesor Guía:
Dr. Frank Joachim Tinapp Dautzenberg

Agosto 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Gonzalo Canales

© 2024 Gonzalo Canales

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Esta Memoria está dedicada a mi novia y futura esposa, que con su amor y dedicación me ayudó a encontrar la temple y el método que yo necesitaba para alcanzar mis metas, y así poder cumplir nuestros sueños juntos.

Resumen

El presente proyecto busca resolver una problemática presente en el Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales de la Universidad de Concepción, donde existe una máquina de corte por láser la cual no tiene forma de contener ni evacuar los humos tóxicos producidos por el corte de material, y debido a no cumplir con las medidas de seguridad apropiadas, no puede ser operada. Es por ello que este proyecto busca concebir, diseñar, e implementar una carcasa de protección para el confinamiento y evacuación de los humos de corte generados por la máquina. Además, se requiere que la construcción de la carcasa no requiera del desmontaje de la máquina existente, y que permita su libre y total funcionamiento una vez la solución sea implementada. Se busca llevar a cabo el proyecto con un costo acotado a determinado presupuesto, y completamente realizable en dependencias de la Universidad.

El proyecto es de un alcance práctico, el cual busca una solución a una problemática existente. Se propondrán soluciones posibles, y la solución escogida será diseñada y optimizada desde el punto de vista ingenieril. El diseño estructural será principalmente mediante CAD, iniciando por un levantamiento geométrico de lo actualmente instalado, para diseñar la solución a partir de esos parámetros. El sistema de ventilación de la carcasa será respaldado mediante análisis CFD, para que toda decisión en el diseño que busque optimizar la eficiencia del sistema sea debidamente justificada.

A pesar de que no se tiene completa libertad en la búsqueda de una solución, debido a que el proyecto debe ajustarse tanto a un presupuesto y una geometría ya establecidos, el proyecto dará cuenta de que siempre se puede encontrar una solución mejor que otras, que cierta geometría optimiza mejor el espacio y a la vez es más económica, o cierta distribución de tomas de aire permiten una mejor eficiencia de ventilación del espacio de trabajo con respecto a otras distribuciones posibles.

El proyecto finaliza con la implementación de la carcasa junto a su sistema de extracción de humos, derivados del respectivo proceso de diseño. De esta forma, se validó el buen desempeño del sistema integrado mediante la puesta en marcha de la máquina de corte, y se observó que la solución implementada respondió adecuadamente a la necesidad original, la cual es contener y evacuar, de la manera más efectiva y segura posible, los humos tóxicos producidos por el trabajo de la máquina de corte por láser.

Palabras clave: Carcasa, Láser, CFD, Edad del aire, Ventilación.

Abstract

This project aims to address an issue present in the Aerospace Techniques Laboratory at the University of Concepción, where a laser cutting machine lacks a means to contain or evacuate toxic fumes generated during material cutting. Due to inadequate safety measures, the machine cannot be operated. Therefore, this project seeks to conceive, design, and implement a protective enclosure for the confinement and extraction of cutting fumes. The enclosure's construction should not require dismantling the existing machine and must allow for its unrestricted operation once the solution is implemented. The project aims to maintain a constrained budget and be entirely feasible within the university's facilities.

The project is practical in scope, focusing on solving an existing problem. Viable alternatives will be proposed, and the chosen solution will be designed and optimized from an engineering perspective. Structural design will primarily utilize CAD, starting with a geometric survey of the current setup to design the solution based on those parameters. The ventilation system of the enclosure will be supported by CFD analysis, ensuring that every design decision aimed at optimizing system efficiency is appropriately justified.

Despite not having complete freedom in exploring a solution, given the project's need to align with predetermined budget and geometry parameters, the project will demonstrate that better solutions can always be found. Certain geometries optimize space more effectively while remaining cost-efficient, and specific air intake distributions enable superior ventilation efficiency in the enclosure compared to other possible configurations.

The project concludes with the implementation of the enclosure and its fume extraction system, following the respective design process. The integrated system's performance was validated by commissioning the laser cutting machine, and it ensured that the implemented solution effectively and safely contains and evacuates toxic fumes generated during its operation.

Keywords: Enclosure, Laser, CFD, Age of Air, Ventilation.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	5
Lista de Tablas	7
Lista de Figuras	8
Glosario	10
CAPÍTULO 1: Introducción.....	11
1.1 Contexto.....	11
1.2 Planteamiento del problema	11
1.3 Objetivo general	12
1.4 Objetivos específicos	12
1.5 Condiciones de Diseño	12
CAPÍTULO 2: Estado del Arte y Marco Teórico	14
2.1 Estado del arte: Investigaciones y literatura relevante	14
2.2 Marco Teórico: Ventilación y Flujo de aire en recintos	16
CAPÍTULO 3: Metodología de Trabajo	17
3.1 Dimensionamiento del banco de trabajo	17
3.2 Caracterización y Parametrización de la máquina de corte por láser	18
3.3 Modelamiento y Proceso de diseño	20
3.4 Elección de materiales y componentes	20
CAPÍTULO 4: Diseño y Modelamiento de la Carcasa	21
4.1 Diseños preliminares	21
4.2 Configuraciones opcionales	23
4.3 Diseño estructural de la Carcasa.....	25
CAPÍTULO 5: Diseño y Modelamiento del Sistema de ventilación	28
5.1 Parametrización y Disposición del Sistema de ventilación	28
5.2 Búsqueda de la ventilación óptima.....	34
5.3 Configuraciones Inlet - Outlet	35
CAPÍTULO 6: Implementación y Validación	43
6.1 Implementación de la Carcasa	43
6.2 Validación del Sistema implementado	51
CAPÍTULO 7: Conclusiones	57

APÉNDICE A: Plano del banco de la Cortadora Láser	59
APÉNDICE B: Plano del ensamble entre banco y Cortadora Láser	60
APÉNDICE C: Plano del armazón de la carcasa de la Cortadora Láser.....	61
APÉNDICE D: Instructivo de uso para la Carcasa	62
Bibliografía.....	63

Lista de Tablas

Tabla 1: Costos de materiales para implementación del Diseño estructural	27
Tabla 2: Propiedades para el <i>Inlet</i> y el <i>Outlet</i> del V.C. seteadas en CFX.....	32
Tabla 3: Parámetros y resultados análisis preliminar.....	33
Tabla 4: Configuraciones <i>Inlet</i> - <i>Outlet</i> para el Volumen de Control – Mapeado de Edad del Aire .	35
Tabla 5: Parámetros y resultados análisis Configuración A	37
Tabla 6: Parámetros y resultados análisis Configuración B.....	38
Tabla 7: Parámetros y resultados análisis Configuración C.....	38
Tabla 8: Parámetros y resultados análisis Configuración D	39
Tabla 9: Parámetros y resultados análisis Configuración E	39
Tabla 10: Parámetros y resultados análisis Configuración D.2	41
Tabla 11: Parámetros y resultados análisis Configuración E.2	42
Tabla 12: Fotogramas representativos de la ventilación al interior de la Carcasa	54
Tabla 13: ROI resaltada por fotograma en escala de grises	55

Lista de Figuras

Figura 1: Fotografía de la máquina de corte por láser situada en el LTA.....	11
Figura 2: Modos de ventilación en un recinto según el patrón de ventilación y su eficiencia.....	16
Figura 3: Primera aproximación en geometría 3D mediante software CAD	17
Figura 4: Fotografía de la máquina de corte por láser en su condición primera	17
Figura 5: CAD tridimensional del ensamble entre la estructura del banco y la cortadora láser	18
Figura 6: Gráfico de la capacidad de corte de la máquina en función de la potencia y velocidad de avance. Muestra en madera balsa 3.5 mm de espesor	19
Figura 7: Carcasa con geometría de prisma rectangular y tapa frontal	21
Figura 8: Carcasa con geometría de prisma rectangular con tapa superior y frontal inclinada	22
Figura 9: Configuración de carcasa y sistema de contención de gases para máquinas de corte por láser ubicadas en la Facultad de Arquitectura, Universidad de Concepción	23
Figura 10: Configuración de carcasa con puertas frontales deslizantes	24
Figura 11: Estructura de cortina retractil o plegable	24
Figura 12: CAD tridimensional de carcasa para Cortadora Láser	25
Figura 13: Vista isométrica del banco de acero junto a la estructura de soporte para el armazón de la carcasa	26
Figura 14: Vista isométrica del armazón de la carcasa montada en el banco de acero.....	26
Figura 15: Volumen de Control interno a la Carcasa.....	28
Figura 16: Volumen de Control correspondiente a aire al interior de la carcasa y circundante a la mesa de corte	29
Figura 17: Disposición de <i>inlet</i> y <i>outlet</i> en el V.C. preliminar	30
Figura 18: Caracterización del mallado del V.C. presente en el estudio	31
Figura 19: Gráficas de la calidad del mallado generado al V.C. – <i>Aspect Ratio</i> , <i>Skewness</i> , <i>Orthogonality</i>	31
Figura 20: Ingreso de condiciones de borde en CFX	32
Figura 21: Sectores en la base de la carcasa abiertos al ambiente	34
Figura 22: Principales sectores en la base del V.C. disponibles para <i>inlets</i>	35
Figura 23: Nuevas propuestas en la base del V.C. disponibles para <i>inlets</i>	40
Figura 24: Mapeado de la Edad del Aire en el V.C. - Config. D.2 - $V_{out} = 0.25 \text{ (m}^3/\text{s)}$	40
Figura 25: Mapeado de la Edad del Aire en el V.C. - Config. E.2 - $V_{out} = 0.25 \text{ (m}^3/\text{s)}$	41
Figura 26: Geometría de los paneles laterales (izquierda) y paneles posteriores (derecha).....	43
Figura 27: Geometría y principales dimensiones de la puerta superior	43
Figura 28: Geometría y principales dimensiones de la puerta frontal.....	44
Figura 29: Anclado de la base de la estructura al banco de acero de la cortadora	44
Figura 30: Montaje de los paneles laterales y posteriores a la base de la estructura	45
Figura 31: Resultado del montaje del esqueleto de la carcasa junto a sus puertas de acceso	45
Figura 32: Resultado de la construcción con sellado e impermeabilización.....	46
Figura 33: Resultado de la construcción de la carcasa con sus paredes respectivas	47
Figura 34: Vista en perspectiva de la implementación de la Carcasa	47
Figura 35: Vista perfil izquierdo de la implementación de la Carcasa	48

Figura 36: Vista frontal de la implementación de la Carcasa	48
Figura 37: Vista posterior de la implementación de la Carcasa	49
Figura 38: Disposición y ubicación del <i>outlet</i> para el Sistema de extracción.....	50
Figura 39: Vista inferior del sellado implementado a la Carcasa	50
Figura 40: Máquina generadora de humo disponible en el LTA	51
Figura 41: Incorporación panel lateral transparente para visualización de resultados.....	52
Figura 42: Conexión de aspiradora al <i>outlet</i> de la carcasa.....	52
Figura 43: Prueba de saturación con humo al interior de la carcasa	53
Figura 44: Gráfica de brillo de luz versus tiempo para la ventilación de la carcasa	55
Figura 45: Mapeado de la Edad del Aire en el V.C. - Config. E.2 - $V_{out} = 0.038 \text{ (m}^3/\text{s)}$	56

Glosario

CAD	:	Diseño Asistido por Computador
CFD	:	Dinámica de Fluidos Computacional
LTA	:	Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales
ROI	:	Región de Interés
V.C.	:	Volumen de Control

Símbolos

t	:	tiempo
V	:	volumen
$\dot{V}$	:	flujo volumétrico

Letras griegas

η	:	eficiencia
τ	:	tiempo

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

El Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales (LTA) de la Universidad de Concepción, posee una máquina de corte por láser (ver Figura 1), la cual actualmente no cuenta con una carcasa de protección para la contención de los humos de corte ni un sistema que permita la correcta evacuación de éstos. Esto genera la inoperatividad de la máquina, dado que el espacio en el que está ubicada es una sala de limitada ventilación, la cual a su vez alberga otras máquinas y dispositivos. Además, se encuentra personal trabajando frecuentemente, y la presencia de humo y gases generados por el corte de la máquina láser junto a la posibilidad de daño ocular por reflexión del haz de láser es inaceptable, según establece la norma ANSI Z136.1 [1].



Figura 1: Fotografía de la máquina de corte por láser situada en el LTA

1.2 Planteamiento del problema

El trabajo y puesta en marcha de la cortadora láser del LTA implica tener en cuenta muchos aspectos de seguridad para el usuario y el medio circundante. El Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI) provee de un documento guía y regulatorio denominado *American National Standard for Safe Use of Lasers*, cuyo propósito es guiar y asistir tanto al fabricante, al usuario, y al público en general de los alcances y disposiciones del producto o tecnología respectiva.

Por otro lado, se debe tener especial cuidado con los peligros asociados a la inhalación de contaminantes del aire generados por el corte con láser, dado que se trabajarán materiales como madera, fibras sintéticas, acrílicos, abs, etc., cuyos productos de combustión pueden llegar a ser nocivos si son inhalados por el operario de la máquina, o personas alrededor [2].

1.3 Objetivo general

El objetivo general del presente proyecto es diseñar e implementar una solución para contener y evacuar los gases producidos de la quema del material trabajado en la cortadora láser ubicada en el LTA (ver Figura 1). La solución apunta en primer lugar a una carcasa o tapa móvil para el banco de corte por láser, de modo que sea la primera barrera de contención para el material particulado que pueda desprenderse del proceso de corte, además de contener cualquier tipo de reflexión especular proveniente del haz de luz, e impedir que dañe físicamente al operario. De manera siguiente, se desea incluir/acoplar un sistema de extracción de gases el cual sea capaz de desplazar el volumen de aire contaminado producido por el proceso de corte al interior de la carcasa, de manera que pueda ser extraído del laboratorio de manera segura y apropiada.

1.4 Objetivos específicos

1. Realizar un levantamiento mediante CAD, de la geometría inicial de la máquina de corte láser existente en el LTA, respetando sus dimensiones y la disposición de sus componentes con suficiente detalle para el posterior proceso de diseño de la carcasa.
2. Concebir más de una solución para la carcasa protectora, con el fin de evaluar y elegir la solución más conveniente.
3. El sistema implementado debe ser instalado sin pasar a llevar la actual disposición de la máquina de corte, sin tener que desmontar ni desarmar ningún componente del actual mecanismo.
4. El proceso de construcción e implementación de la solución escogida debe ser mediante la utilización de materiales disponibles en el LTA, o bien adquiridos en el mercado nacional.
5. La solución definitiva a ser implementada debe ser derivada de un proceso de diseño y optimización mediante herramientas de CFD pertinentes a la problemática.
6. Validar el funcionamiento de la solución implementada, tanto las funciones de protección, contención, y evacuación del sistema desarrollado.
7. Crear una guía básica de uso para el sistema y mecanismo implementado, con el fin de que el operario o usuario sea capaz de utilizar correctamente el sistema.

1.5 Condiciones de Diseño

Como condiciones de diseño, se tiene principalmente aspectos como las dimensiones del proyecto, tanto físicas como económicas.

1. El sistema carcasa debe ser soportado por el banco ya existente, no exagerando en sus dimensiones lineales ni el peso de la estructura, pudiendo ser instalado en el espacio asignado en la sala (aprox. 2.20 x 1.50 (m)). Además, debe poder ser completamente manipulable por un solo operario.
2. El sistema debe ser llevado a cabo, en cuanto a materialidad, con un presupuesto no mayor a los 150.000 CLP, es decir, el diseño en su totalidad debe integrar óptimamente calidad y costos acotados.
3. El sistema implementado debe ser capaz de ventilarse adecuadamente. Para evaluar y cuantificar que la capacidad de extracción de humos de corte del sistema implementado sea adecuada, se consultará teoría pertinente a sistemas de ventilación. El análisis se ayudará de herramientas computacionales para modelar, optimizar y en cierta medida poder validar parámetros presentes en el sistema.

4. Por último, la carcasa o sistema resultante no debe permitir escapar humo ni ningún material particulado a la sala en la que se encuentra la máquina. Además, el funcionamiento de la carcasa debe cumplir con normas de seguridad internacionales asociadas al trabajo con tecnología láser, normas establecidas para evitar accidentes en su futuro uso [1].

CAPÍTULO 2: Estado del Arte y Marco Teórico

2.1 Estado del arte: Investigaciones y literatura relevante

Actualmente se encuentra disponible literatura y documentación que describen el comportamiento y versatilidad de las máquinas de corte por láser. Presentan también las bases e información relevante sobre sistemas de ventilación aplicados, y lo nocivo que puede resultar la mala ventilación de un recinto. A continuación se mencionan algunas de ellas, dado su relevancia para el presente proyecto.

2.1.1 American National Standard Institute, *ANSI for Safe Use of Lasers (Z136.1)*, 2007 [3]

Es el documento principal de la serie Z136 de normas de seguridad en el trabajo con láser. El documento ANSI Z136.1 es la base de los programas de seguridad para la industria, el ejército, la investigación y el desarrollo (laboratorios) y la educación superior (universidades), cuando se involucran procedimientos con tecnología láser. Establece pautas recomendadas para el uso seguro de láseres que operan en longitudes de onda entre 180 nm y 1 mm.

El estándar especifica tanto el entorno en el que se utiliza el láser como cualquier entorno alrededor de la trayectoria del haz. Además, clasifica cada tipo de láser según su potencial de daño biológico, desde la Clase 1, exentos de cualquier tipo de control por su falta de peligrosidad, hasta la Clase 4, que requirieren controles estrictos para reducir el riesgo de exposición de los ojos o la piel.

Hace diferencia entre los peligros asociados directamente a la luz proveniente del láser, y los peligros ajenos al láser como tal. Los peligros asociados al láser son principalmente la exposición de los ojos o la piel del operario al haz de luz. Por otro lado, indica que los peligros no asociados directamente al láser incluyen principalmente: agentes físicos (peligros eléctricos, radiación por plasma, riesgos de incendio, explosivos, ruido, etc.), agentes químicos (principalmente los contaminantes aéreos generados, gases comprimidos, gases colorantes y disolventes, etc.) medidas de control (ventilación y sistemas de extracción de aire contaminado, protección para las vías respiratorias del operario, correcto aislamiento del proceso, sensores y alarmas, etc.), agentes biológicos, factores humanos (ergonomía del sistema, espacio limitado de trabajo).

2.1.2 Bachmann et al., *High Power Diode Lasers - Technology and Applications*, 2007 [4]

Este libro hace referencia a tecnologías de diodos láser de alta potencia, que van desde las pocas decenas de watts hasta varios kilowatts de potencia. Enseña la teoría tras esta tecnología, y da cuenta de los parámetros que dimensionan las características y el rendimiento de estos dispositivos.

Indica que la tecnología de diodos láser se utiliza en procesos de manufactura como herramienta de corte en la industria desde los años 70, debido a la excelente enfocabilidad y precisión de un láser. El pequeño tamaño del punto de trabajo permite cortes estrechos y por lo mismo permite mayor precisión, además de velocidades de corte más altas en comparación con las técnicas de corte térmico convencionales, como el corte con llama o plasma.

2.1.3 Baison Laser Systems, *Laser Cutter Exhaust Systems: A Comprehensive Guide*, 2024 [5]

El artículo hace un breve acercamiento a lo referido a sistemas de ventilación para sistemas de corte por láser, indicando por qué un buen sistema de ventilación es esencial para este tipo de procesos, y las ventajas de crear un sistema personalizado según los requerimientos de la máquina. Es por esta razón, indica, que una máquina de corte por láser no se vende junto a un sistema de ventilación.

Entrega directrices básicas sobre las características y componentes del sistema (ductos, filtros, ventiladores, etc.). Además, entrega nociones sobre las condiciones de borde necesarias para que la operación de ventilación se adecúe con la operación de la máquina en particular.

2.1.4 Ning et al., *Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO₂ distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet*, 2016, [6]

Esta publicación enseña los resultados de un estudio realizado para determinar parámetros como eficiencia de ventilación, campo de flujo de aire, y concentraciones de un contaminante (CO₂) en un determinado espacio, esto a través de un análisis CFD al dominio involucrado.

Este estudio entrega directrices sobre cómo realizar un correcto análisis CFD a un determinado volumen de control, cuando lo que se requiere es optimizar las posiciones de *inlets* y *outlets* en un recinto que requiere ser ventilado para la salud y bienestar de los ocupantes. El estudio abarca parámetros tanto térmicos como dinámicos del comportamiento del aire en el recinto, y concluye que es posible optimizar la ventilación reposicionando la salida del aire en la habitación.

2.1.5 Van Pinxteren et al., *Residential Wood Combustion in Germany: A Twin-Site Study of Local Village Contributions to Particulate Pollutants and Their Potential Health Effects*, 2024 [2]

Esta publicación expone un análisis y estudio sobre la contaminación del aire en zonas pobladas, la cual representa un importante riesgo para la salud. Se basa en mediciones hechas en dos puntos situados a 700 metros entre sí, los cuales están abiertos al ambiente. Las mediciones se enfocan en el material particulado que se encuentra en el aire ambiente debido principalmente a combustión residencial de madera.

Se evalúa los riesgos para la salud de las personas mediante estándares recomendados por la Organización Mundial de la Salud, según una métrica de exceso de riesgo de cáncer (ECR), debido a la contaminación del aire exterior. El ECR es un número que se debe a la inhalación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), como el benzo(a)pireno, que tiene directa relación con el exceso de casos de cáncer en la población con exposición crónica por inhalación a 1 (ng/m³) de ese PAH durante un periodo de unos 70 años.

De ahí la relevancia de evitar exponerse a respirar concentraciones altas de material particulado derivados de la combustión de madera o similares, dado que la concentración en el ambiente es mucho menor que la esperada en una sala o laboratorio que alberga una máquina de corte por láser que produce humos nocivos constantemente en un espacio tan reducido.

2.2 Marco Teórico: Ventilación y Flujo de aire en recintos

Dependiendo de la distribución del flujo de aire en una habitación o recinto, y para un caudal de aire determinado, la concentración de contaminantes en el espacio ocupado puede variar en un factor o más. La literatura [7] menciona un concepto denominado “edad del aire”, el cual hace referencia al tiempo de permanencia que tiene una partícula de aire desde que ingresa a un edificio o sistema de ventilación, hasta que abandona ese determinado espacio. Es por ello que mientras más tiempo permanezca un volumen de aire en un recinto, mayor será su contaminación con las partículas del recinto.

La edad promedio de todas las partículas de aire en un recinto es definida como $\langle\tau\rangle$, y se postula la siguiente expresión para la eficiencia de cambio de aire o eficiencia de ventilación η_a .

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{2\langle\tau\rangle}$$

Donde τ_n es la constante de tiempo nominal, la cual se define como el cociente entre el volumen del recinto y el flujo volumétrico de aire fresco que se introduce, o aire contaminado que sale de éste.

Roulet [7] hace referencia a tres modos de ventilación presentes en un recinto en función de la eficiencia de ventilación η_a , donde la ventilación óptima del recinto viene dada por la *ventilación de tipo pistón*. La Figura 2 categoriza estos tres modos de ventilación en función de la eficiencia de ventilación η_a .

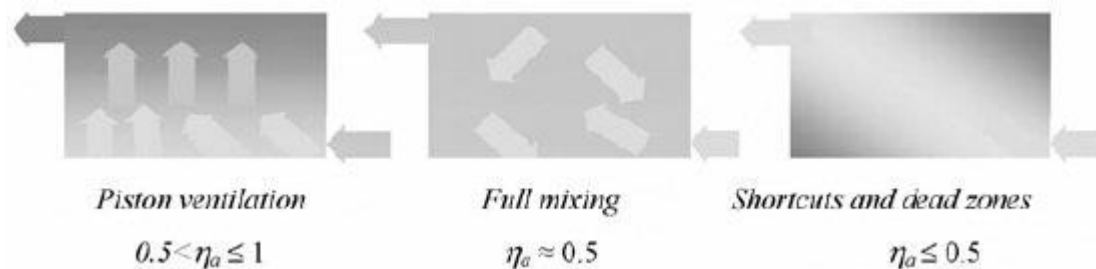


Figura 2: Modos de ventilación en un recinto según el patrón de ventilación y su eficiencia η_a (Fuente [7])

Más adelante en este estudio se hará uso de la teoría recientemente expuesta, haciendo uso además de un respectivo análisis CFD del volumen de control estudiado, el cual posibilite la obtención de un respectivo valor de $\langle\tau\rangle$, el cual pueda dar constancia de la eficiencia de ventilación del sistema de extracción de humos que se quiera implementar para la cortadora láser.

CAPÍTULO 3: Metodología de Trabajo

3.1 Dimensionamiento del banco de trabajo

Se inicia con el levantamiento de mediciones del banco de trabajo para hacer una réplica tridimensional de éste mediante algún software CAD. El software utilizado en esta primera aproximación corresponde a Autodesk Fusion.

En la Figura 3 se enseña una primera aproximación del levantamiento geométrico realizado al banco, es decir, la estructura de acero que sostiene toda la maquinaria, y la cual será responsable de sostener la carcasa que se desea fabricar. Se acompaña a su vez de la Figura 4, la cual corresponde a una fotografía de la máquina de corte por láser antes de cualquier modificación.

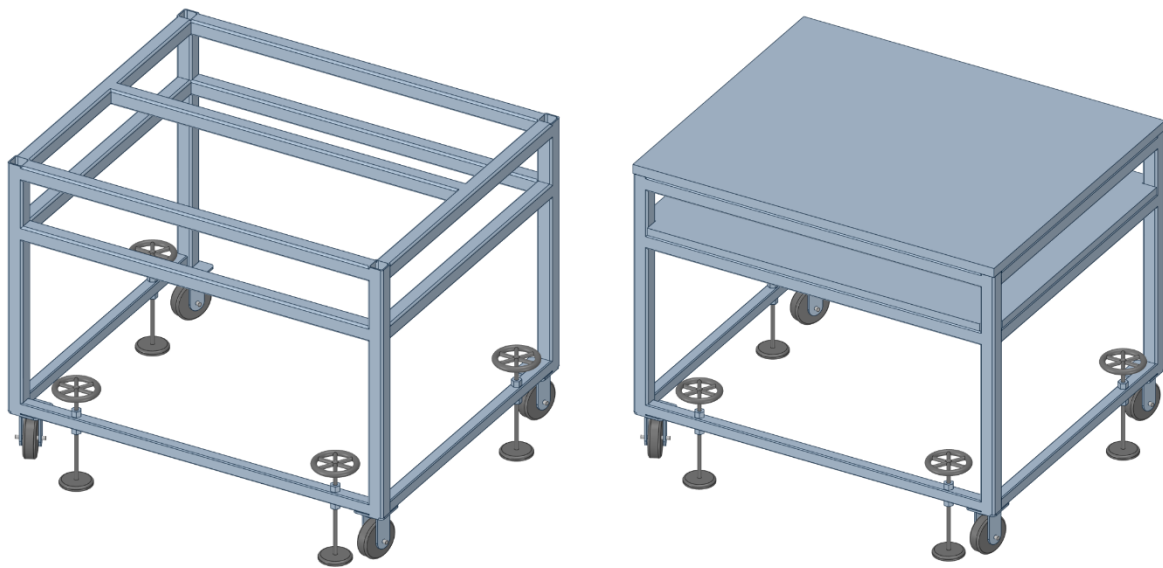


Figura 3: Primera aproximación en geometría 3D mediante software CAD



Figura 4: Fotografía de la máquina de corte por láser en su condición primera

Posteriormente, se agrega a lo anteriormente expuesto, el detalle en CAD del mecanismo de corte por láser. Se genera entonces el ensamblaje del banco con la respectiva cortadora láser, según se enseña en la Figura 5.

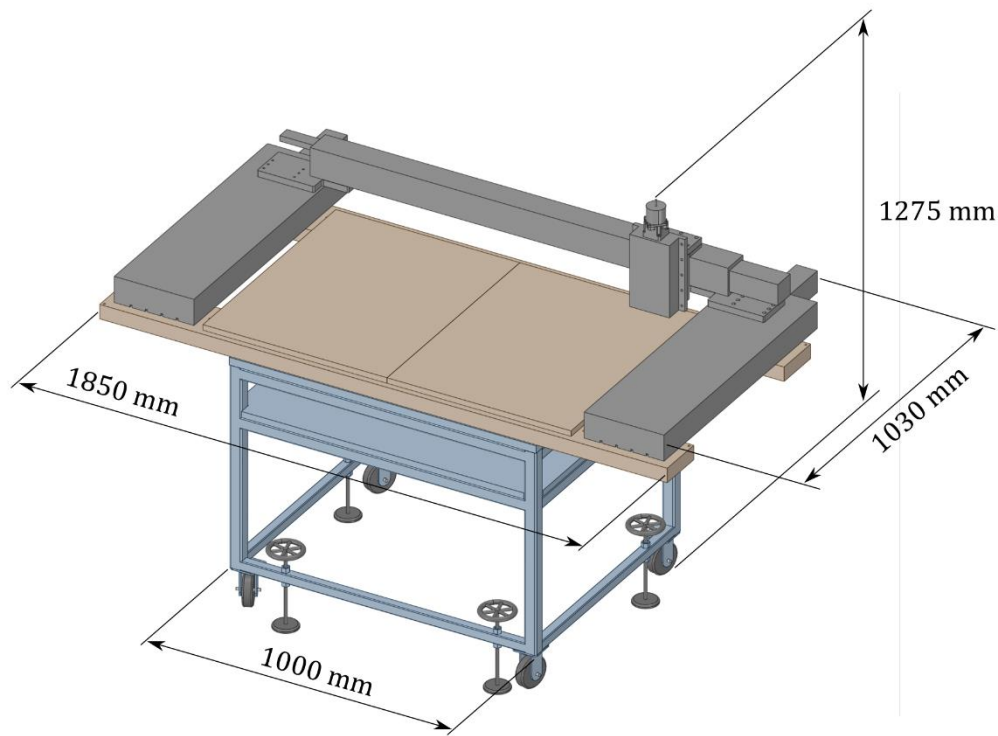


Figura 5: CAD tridimensional del ensamblaje entre la estructura del banco y la cortadora láser

En el APÉNDICE A y APÉNDICE B: Plano del ensamblaje entre banco y Cortadora Láser, se enseñan los planos con las principales dimensiones del banco observado en la Figura 3 y del ensamblaje observado en la Figura 5.

3.2 Caracterización y Parametrización de la máquina de corte por láser

Se debe en primer lugar realizar un estudio y caracterización de la máquina de corte por láser con la cual se está trabajando. Por ejemplo, las dimensiones de la mesa de corte, o la cantidad de flujo de material particulado que se desprende para el corte de determinado material. Se tiene que la velocidad de corte de la máquina va en directa relación con la cantidad de humo generado, esto para cierto espesor de material cortado. De esta forma se tiene un determinado flujo másico de humo que se requiere evacuar del recinto mediante el sistema de ventilación que le será acoplado a la carcasa. Parámetros como los mencionados anteriormente son los que darán las directrices iniciales sobre la capacidad de trabajo que deberá tener el sistema de evacuación de gases.

En la Figura 6 se enseña un muestrario de las capacidades de grabado de la cortadora láser sobre madera de balsa, material trabajado comúnmente en el LTA, donde se observa la profundidad de corte en función de la potencia y velocidad de corte implementada por el sistema. Para realizar un corte limpio con una sola pasada, normalmente se trabaja a 70% de potencia y a una velocidad de 1400 (mm/min), esto para una muestra de 3.5 mm de espesor, lo cual da indicios del flujo de material particulado desprendido en el proceso.

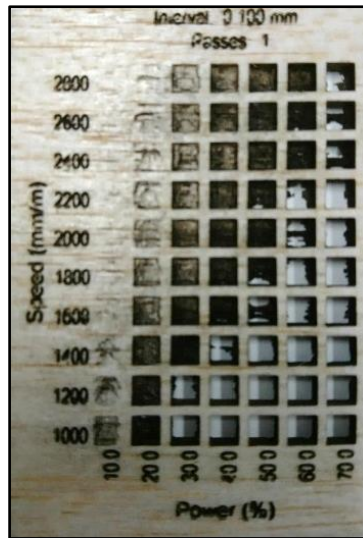


Figura 6: Gráfico de la capacidad de corte de la máquina en función de la potencia y velocidad de avance. Muestra en madera balsa 3.5 mm de espesor

3.2.1 Características del sistema carcasa

La carcasa o tapa que se debe implementar a la máquina de corte debe cumplir ciertos requisitos básicos. Por ejemplo, su forma y dimensiones deben permitir el libre desplazamiento de todos los componentes móviles de la máquina que alberga, en todo punto de su recorrido.

Además, la tapa o carcasa debe ser lo suficientemente liviana para ser manejada por una sola persona, además de contar con un soporte firme y seguro para dejar abierta la tapa cuando se requiera hacer ingreso, dado que si cae bruscamente puede causar daños o contratiempos al trabajo.

Debe contar con puertas o escotillas adicionales para el mantenimiento de la máquina, procedimientos que no pueden ser realizados a través de puertas frontales o superiores, sino que deben ser realizados por los costados de la máquina. Además, debe haber una ventanilla a través de la cual se pueda observar el proceso de corte sin necesidad de abrir la tapa, y con las medidas de seguridad correspondientes.

Por otro lado, la carcasa no debe ser completamente hermética, sino que debe contar con entradas o *inlets* a presión ambiente, adecuadas para permitir el ingreso de aire limpio y fresco desde el exterior de la máquina. Posteriormente el flujo de aire interior debe ser dirigido hacia los ductos de salida o *outlets* mediante una trayectoria apropiada, para que en ningún momento se estanque el flujo de aire durante el proceso de corte, ni perdure al interior de la carcasa por más del tiempo deseado. Es por ello que la carcasa debe permitir la correcta ubicación de las ranuras de ventilación para optimizar el flujo de aire.

Por último, la carcasa debe ser construida sin desmontar el aparataje ya existente en la máquina, dado que su instalación es compleja y requiere de mucho tiempo y calibraciones. Es por ello que la construcción y anclaje de la carcasa al banco de corte, debe rodear la maquinaria, sin modificarla de manera alguna.

3.2.2 Características del sistema de ventilación

En cuanto al sistema de ventilación, se tiene que debe cumplir con requisitos mínimos para que su funcionamiento sea efectivo. La experiencia indica que se necesita tanto un flujo de aire como una presión estática adecuada en el respiradero de la carcasa. Baison Laser Systems [5] indica que una mesa de corte láser de 12" por 24" requiere al menos 0.236 (m^3/s) de flujo de aire, y 1.5 (atm) de presión estática [5].

La actual mesa de corte presenta unos 900 000 (mm^2), igual a 1395 (in^2). Es decir, según estos criterios podría requerir de un flujo volumétrico de aire de hasta 2400 (ft^3/min), es decir, cerca de 1.1 (m^3/s). Si bien este valor parece elevado, se hará uso de la simulación numérica para encontrar el flujo volumétrico de extracción que más convenga a la carcasa que se haya de implementar en el presente proyecto.

Por otro lado, se tiene que los ductos de ventilación deben ser de un material adecuado, revestimiento en PVC o metálico. Además, puede ser que deba incluirse un elemento filtrante del aire procedente de la máquina, antes de ser liberado al exterior de la sala.

3.3 Modelamiento y Proceso de diseño

Se desea respaldar y validar, el diseño y disposición de los elementos propios del sistema de ventilación mediante un modelado en CFD, el cual permita buscar y optimizar la posición de los puntos de ventilación dentro de la carcasa, para así defender el por qué se escogieron esas ubicaciones, y no otras distribuciones posibles. Este análisis será hecho mediante el software de simulación numérica Ansys, pudiendo hacer uso de múltiples herramientas que incluye, como lo son CFX, Fluent, o Discovery. El procedimiento y uso de este software a lo largo del proyecto será detallado más adelante en este informe.

3.4 Elección de materiales y componentes

Se tiene por último, que la elección de materiales y componentes debe adecuarse a las necesidades de diseño, y a su vez, someterse al presupuesto planteado en un comienzo para el proyecto. Es por ello que se debe llegar a un equilibrio entre lo adecuado y lo económico, para su uso en el proyecto.

Se debe tener en cuenta igualmente las capacidades personales con las que se cuente para construir una estructura, dado que no implica igual nivel de dificultad, el construir una estructura en listones de madera, a construirla en perfiles de metal.

Otros criterios a considerar son la optimización del peso, dado que es posible construir una carcasa con perfiles y láminas de acero, pero el peso resultante de esa estructura dificultaría tanto su fabricación como su posterior utilización.

CAPÍTULO 4: Diseño y Modelamiento de la Carcasa

4.1 Diseños preliminares

Para este punto, se inicia la búsqueda de propuestas de geometría para la carcasa, aun sin sistema extractor de humos de corte, pero sí con su geometría y disposición espacial con respecto al banco y cortadora láser. Los componentes escogidos preliminarmente son en su mayoría perfiles de pino cepillado y planchas de MDF.

4.1.1 Carcasa del tipo prisma rectangular

En un inicio pareciera ser la geometría más intuitiva de implementar, un simple armazón compuesto de cuatro paneles laterales y uno superior, el cual sea capaz de encerrar todo el mecanismo de la cortadora láser. A esta geometría se le debe implementar una tapa de dimensiones moderadas, dado que si la tapa comprendiera todo su panel frontal por ejemplo, este panel tendría que rotar alrededor de sus bisagras unos 180° si pivotea y abre hacia abajo, o bien 270° si pivotea y abre hacia arriba (ver Figura 7), esto para poder quedar en equilibrio en algún punto, y a su vez complicaría su uso y no optimizaría el espacio.

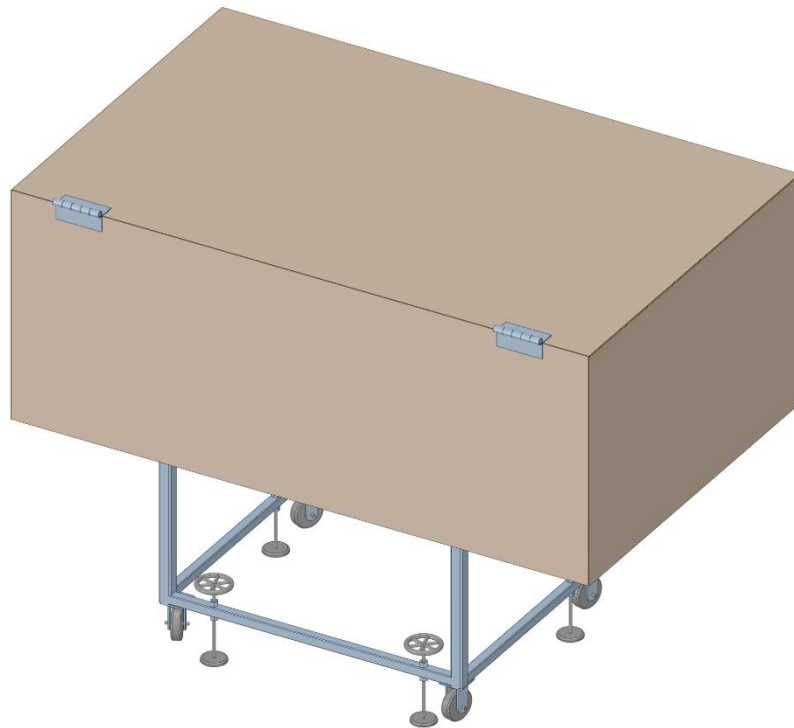


Figura 7: Carcasa con geometría de prisma rectangular y tapa frontal

4.1.2 Carcasa del tipo prisma rectangular con frontis inclinado

Otra opción propuesta, la cual se desprende del diseño anterior, consiste en una especie de cajón prismático, pero con puertas situadas en la zona frontal y superior (ver Figura 8), las cuales puedan ser más pequeñas que la puerta del caso anterior, pero al estar abiertas conjuntamente, son capaces de permitir un gran espacio de acceso. Además, esta geometría permite que tanto la puerta superior como

la puerta frontal puedan quedar cerradas naturalmente debido a su propio peso, y al estar abierta la puerta frontal pueda quedar suspendida en la vertical sin obstaculizar el ingreso a la mesa de corte.

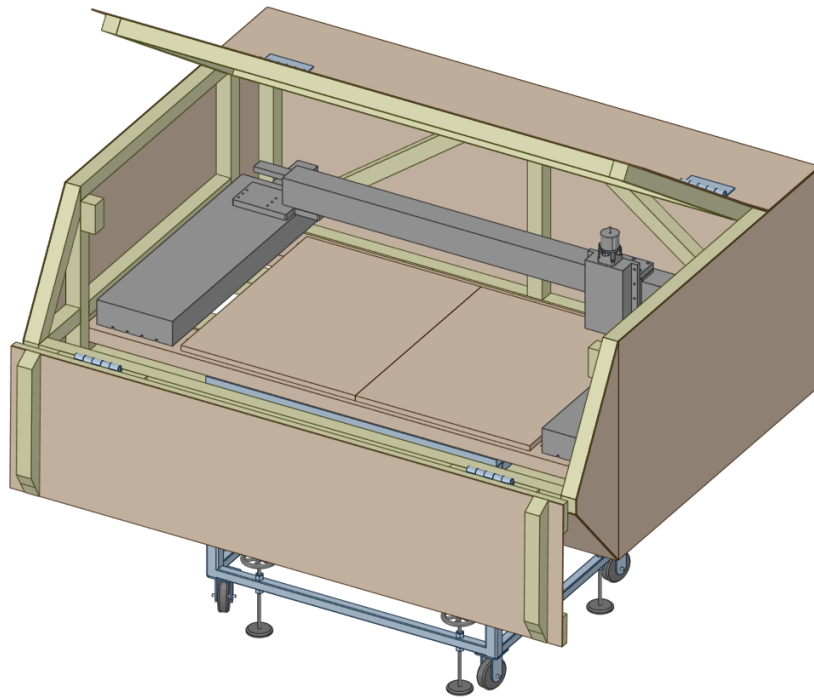


Figura 8: Carcasa con geometría de prisma rectangular con tapa superior y frontal inclinada

4.2 Configuraciones opcionales

A este punto se han concebido un par de ideas para la estructura general de la carcasa para poder encerrar la máquina de corte y contener los gases nocivos. A continuación, se mostrarán algunas opciones que fueron consideradas para implementar en la carcasa, y se resaltarán características como la geometría, materialidad, o facilidad de uso, y se verá si son o no viables de implementar.

4.2.1 Carcasa del tipo esqueleto de aluminio con cobertor de lona

Existe un precedente de una geometría similar a la planteada en la Figura 8, la cual consiste en los actuales sistemas de corte por láser que se encuentran en laboratorios respectivos de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Concepción. A continuación, en la Figura 9 se visualiza un ejemplo de esta configuración dispuesta para la contención y extracción de humos de corte. Consiste en un esqueleto compuesto en rieles acanalados y perforados de aluminio, los cuales se unen mediante pernos y esquineros, y la estructura se cubre con un toldo de lona para evitar el escape de los gases de corte generados por la maquinaria. Se descarta esta idea debido a que el metro de riel de aluminio en cuestión es más caro que el metro lineal de listón de pino cepillado conveniente a utilizar.



Figura 9: Configuración de carcasa y sistema de contención de gases para máquinas de corte por láser ubicadas en la Facultad de Arquitectura, Universidad de Concepción

4.2.2 Carcasa del tipo vitrina con puertas deslizantes

Según se observa en la Figura 10, esta configuración de carcasa pudiera servir para encerrar la parte superior de la máquina, en efecto optimiza mucho el espacio, dado que no hay puertas que pivoteen con respecto a bisagras las cuales necesiten de un amplio margen alrededor del banco para poder abrir y cerrar correctamente. El problema con esta configuración se presenta en el espacio disponible que deja cada puerta al abrirse, dado que no pueden abrirse ambas simultáneamente a su máxima amplitud, quedando siempre un limitado espacio para introducir a la cortadora láser algún material de mayores dimensiones. Por otro lado, si se incorporara solamente una puerta corrediza, ésta tendría que desplazarse sobresaliendo mucho hacia un costado del banco, pudiendo interferir con otros sistemas o equipos del laboratorio. Por último, el sellado de puertas deslizantes no es fácil de implementar, y lo que se busca es optimizar en tiempo y costos la construcción de la carcasa.



Figura 10: Configuración de carcasa con puertas frontales deslizantes

4.2.3 Carcasa del tipo vitrina con cortina retráctil

Es una opción la cual combina optimización del espacio y una estructura liviana. Considérese la Figura 11, estos elementos están comercialmente disponibles como cortinas *roller* y plegable, respectivamente, y están presentes en una amplia variedad de dimensiones. El problema de la instalación de un elemento de este tipo como puerta para la máquina, es que no son capaces de proporcionar un sellado suficientemente bueno, dejando espacios críticos por los que podrían escapar los humos de corte de la máquina. Además, la guía que dirige la cortina plegable, está presente solamente en unos de sus extremos, dejando el otro extremo desprovisto de un buen agarre o fijación a la carcasa, y solamente complicaría el trabajo el tener que fabricar un mecanismo de fijación en el extremo que no lo incluye por defecto.



Figura 11: Estructura de cortina retráctil o plegable

4.3 Diseño estructural de la Carcasa

4.3.1 Elección del tipo de carcasa

A este punto se considera una buena opción de carcasa para la máquina, una solución del tipo cajón prismático con superficies frontales inclinadas, la cual cuente con una puerta frontal y una puerta superior (ver Figura 12), debido a que esta configuración de puertas optimiza el espacio disponible de trabajo y acceso. Por otro lado, es mucho más fácil de generar un sellado adecuado, y esta geometría permite que el mismo peso de las puertas ayude a presionar y permitir un sellado efectivo ante gases y humos. Se tiene que la construcción de un cajón prismático en madera es más sencilla y puede ser llevada a cabo en su totalidad en el LTA. Además, los materiales a utilizar son de fácil adquisición en el mercado, y se puede trabajar con las herramientas presentes en las instalaciones del LTA.

La construcción de una estructura como la antes mencionada, se concibe originalmente en madera, compuesta mayormente de listones de pino cepillado de 2x2(in) y planchas de MDF o terciado de entre 3-5 (mm) de espesor. Se priorizará la elección de listones de pino, dado que los perfiles de aluminio expuestos en la configuración de la Figura 9, si bien presentan un menor peso y una buena resistencia estructural, en el mercado tienen un costo mayor por metro lineal (aprox. 3500 CLP/m) en comparación al metro de listón de pino cepillado de 2x2(in) (aprox. 1200 CLP/m).

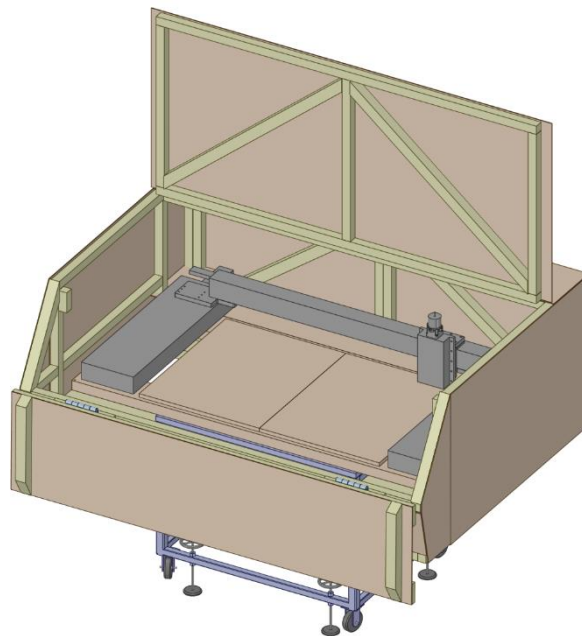


Figura 12: CAD tridimensional de carcasa para Cortadora Láser

Se concibe que el armazón sea soportado por la estructura metálica del banco, mediante vigas de pino de 2x4(in) ubicadas en la zona inferior (ver Figura 13). De esta forma, deberá ser acoplado al banco de acero de la cortadora láser, esto mediante tres vigas de 2x4(in) dispuestas transversalmente al armazón, y otras dos vigas de 2x4(in) dispuestas longitudinalmente. Estas cinco vigas quedarán encerradas en la zona intermedia del banco de acero (ver Figura 13 y Figura 14), y por las cuatro caras exteriores al banco de acero, se situarán otras cuatro vigas de 2x2 y 2x4 (in), según sea la dirección, de modo que abracen al banco junto a las vigas internas, y permitan un anclaje a la estructura metálica

sin uniones mecánicas directas entre metal y madera. En el APÉNDICE C: Plano del armazón de la carcasa de la Cortadora Láser, se enseña un plano con las principales dimensiones del armazón para la carcasa de la cortadora láser, las cuales se ajustan a las dimensiones del banco de acero, y de la cortadora láser y sus componentes respectivos, los cuales representan las principales limitantes en el diseño geométrico.

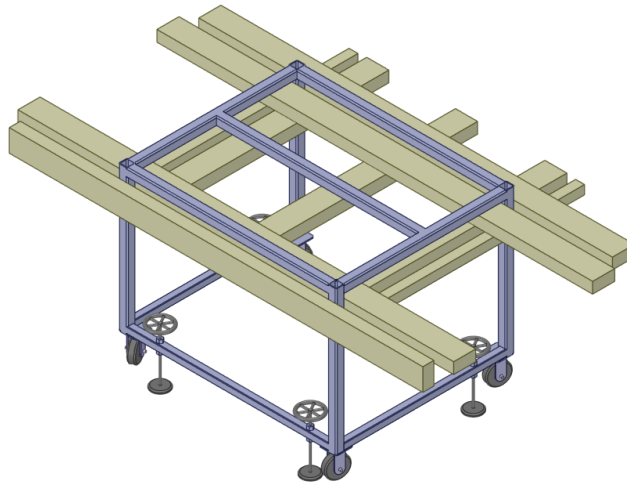


Figura 13: Vista isométrica del banco de acero junto a la estructura de soporte para el armazón de la carcasa

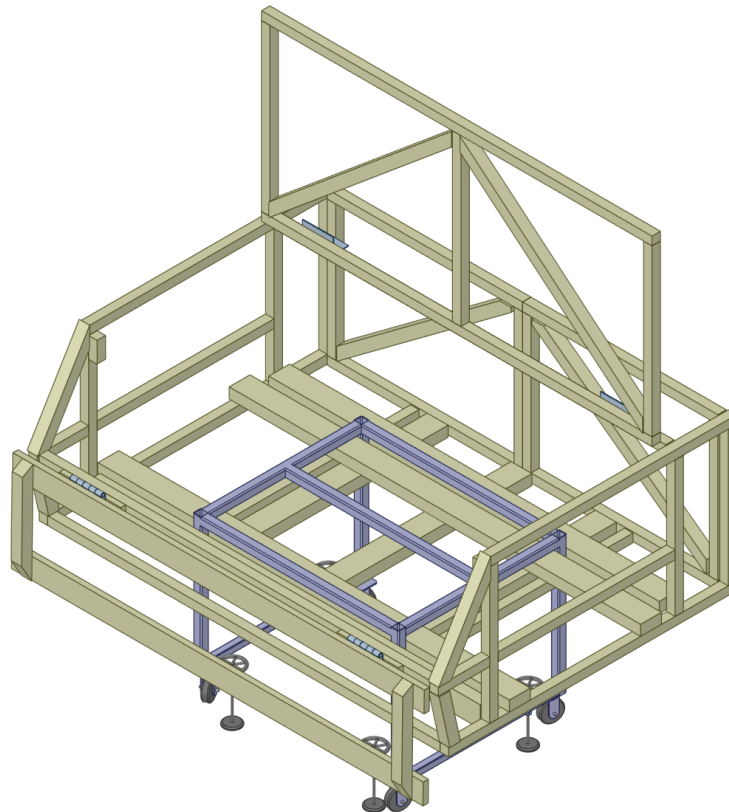


Figura 14: Vista isométrica del armazón de la carcasa montada en el banco de acero

4.3.2 Costos asociados al Proyecto

Al comienzo de este Informe, se mencionó que uno de los parámetros limitantes de este proyecto es el presupuesto de 150 000 CLP. Este presupuesto permite cómodamente la construcción del diseño escogido (ver Figura 12), dado que se compone principalmente de listones de pino y planchas de MDF comercialmente disponibles. El presupuesto de 150 000 CLP no incluye costos asociados a h.h. de trabajo, sea tanto en el proceso de diseño o implementación, sino que solamente se enfoca en solventar la adquisición de los materiales requeridos.

En la sección anterior (4.3.1) se hizo referencia a que se elegirá trabajar con madera, principalmente debido a su facilidad de uso, y a la disponibilidad de las herramienta e instalaciones adecuadas en el LTA para un trabajo de este tipo. Se hizo referencia a que el metro lineal de listón de pino cepillado de 2x2(in) se encuentra a un valor comercial de 1200 CLP, a diferencia de materiales como el aluminio, cuyo costo es mucho mayor por metro, además de ser difícil trabajarlo sin la experiencia adecuada.

A continuación, se describe brevemente en la Tabla 1 los costos asociados a los materiales requeridos para la construcción de la carcasa cuyo diseño ya ha sido escogido a este punto.

Tabla 1: Costos de materiales para implementación del Diseño estructural

Material	Unidades	Costo (CLP)
pino cepillado seco 1x4(in) x 3,20(m)	2	4 900
pino cepillado seco 2x2(in) x 3,20(m)	14	33 740
pino cepillado seco 2x4(in) x 3,20(m)	4	19 920
plancha MDF 1,5x2,4(m) x 3(mm)	2	20 880
fieltro asfáltico liso 1x16(m)	1	6 390
tornillo p/madera 8(mm) x 3(in) (100un.)	2	5 150
tornillo p/madera 8(mm) x 3/4(in) (100un.)	1	860
Cinta para ductos 10(m)	5	8 500
Tubo PVC D11(cm) x 1(m)	1	2 500
Codo 90° PVC D11(cm)	1	3 000
	Total:	105 840

Se tiene entonces que el costo de los materiales utilizados para la fabricación del sistema Carcasa con extracción de humos de corte, se mantiene por debajo del presupuesto previsto de 150 000 CLP, dejando un margen generoso para posibles costos de transporte o imprevistos asociados al proyecto.

CAPÍTULO 5: Diseño y Modelamiento del Sistema de ventilación

5.1 Parametrización y Disposición del Sistema de ventilación

Se mencionó anteriormente que el análisis del comportamiento del sistema extractor de humos de corte sería respaldado mediante el software Ansys. Este software ofrece varias extensiones para el análisis CFD, con herramientas de modelación de flujo de fluidos como lo son CFX o Fluent. Estas herramientas requieren de una adecuada geometría 3D, para luego generar el mallado adecuado correspondiente al volumen de control, y posteriormente asignarle características físico-mecánicas junto a condiciones de borde apropiadas según el problema.

En este punto, se tiene que escoger un sistema de extracción de los humos de corte que ha de contener la carcasa, esto de acuerdo con las características que presenta la propia máquina de corte. Además, se debe justificar la disposición espacial de los componentes respectivos, y dejar en claro las condiciones de borde con las que operará este sistema.

Actualmente está en desarrollo en el LTA un ventilador capaz de mover un flujo de aire del orden de 10^{-1} (m^3/s), el cual estará disponible para su uso como componente principal del sistema de extracción de humos de corte para la carcasa. Desde este supuesto, es que se utilizará una condición de borde para trabajar los análisis en CFX, el cual será un flujo másico de aire en rangos de 0.05 - 0.5 (m^3/s), el cual será extraído del volumen de control (V.C.) empleado.

A partir de la geometría adoptada para la carcasa (ver Figura 12), se ha generado un V.C. interno a ella, el cual se encierra dentro de los paneles o paredes que tendrá la carcasa, y está abierto en su zona inferior a la presión ambiente de la sala (aprox. presión atmosférica). Además, el V.C. contiene en su interior una simplificación del mecanismo de la cortadora láser, según se observa en la Figura 15, esto para asegurar una simplificación en el mallado y posterior optimización del cálculo correspondiente.

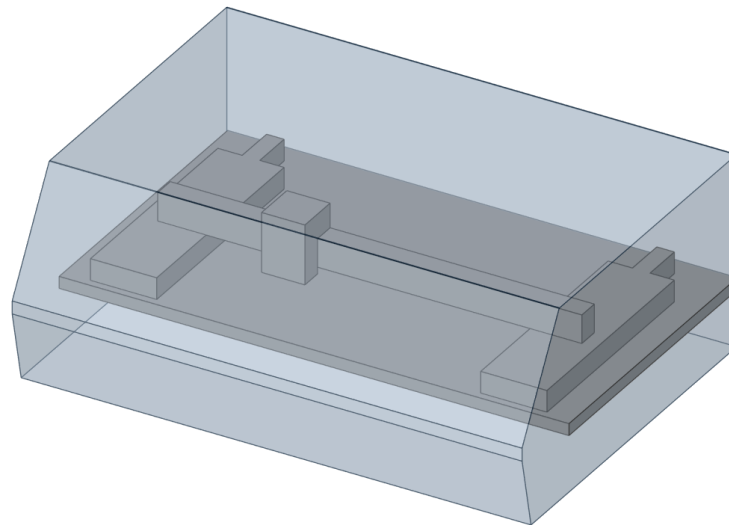


Figura 15: Volumen de Control interno a la Carcasa

Posteriormente, a lo enseñado en la Figura 15 se le genera una especie de molde negativo, el cual pasa a ser el volumen que ocupa el fluido al interior de la carcasa, y se le asigna un *outlet* (cuadrado naranja) según se observa en la Figura 16. La ubicación del *outlet* se encuentra sobre la mesa de corte, y justo en la mitad del largo de la carcasa, que es donde se espera implementar la entrada del ducto de extracción para el término del proyecto, de modo que haya simetría en la extracción de los gases provenientes de la mesa de corte.

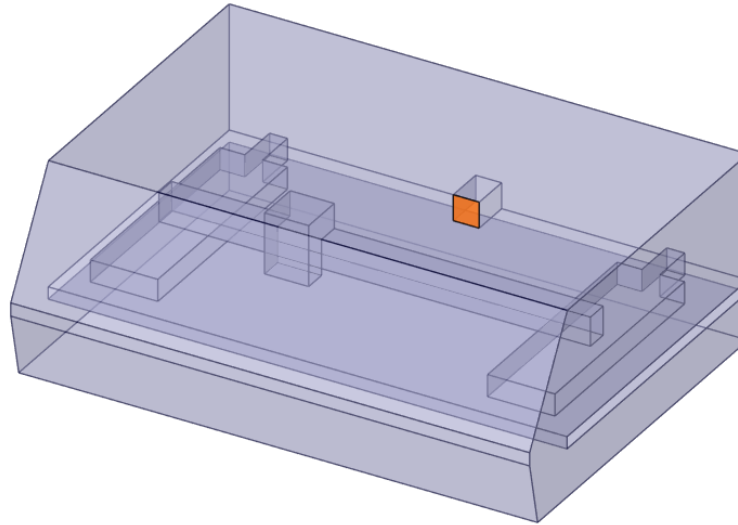


Figura 16: Volumen de Control correspondiente a aire al interior de la carcasa y circundante a la mesa de corte

Como ya se ha mencionado antes, se ha simplificado el interior del V.C. eliminando el armazón de la carcasa, y suponiendo solamente paredes lisas. Además, la mesa de corte abarca el volumen de control desde la zona posterior hasta el frente de la cortadora, esto con el propósito de impedir que entre aire por esa zona directamente al *outlet*, buscando el camino más corto. Se obligará así a que el flujo de aire pueda recorrer el volumen de control desde abajo, pasando por el frente de la máquina de corte, a modo de extraer los humos de corte de manera uniforme y óptima.

A continuación, se detallará el proceso de búsqueda del *inlet* apropiado para el volumen de control presentado recientemente, el cual se encuentra a presión atmosférica. Por otro lado, se buscará optimizar el flujo volumétrico que se requiera en el *outlet* como condición de borde para la salida, a modo de buscar la mejor eficiencia de ventilación de este determinado recinto, según la teoría expuesta en la Sección 2.2 de este trabajo.

5.1.1 Análisis de Flujo de aire: Geometría y Mallado

Se procede a iniciar el trabajo en Ansys, según se explicará a continuación en detalle solamente para este caso, dado que el estudio de los casos futuros conlleva el mismo procedimiento.

Se inicia en la interfaz de SpaceClaim, imponiendo la geometría que representará tanto el *inlet* como el *outlet* del volumen de control a ser analizado. Según se enseña en la Figura 17, el *inlet* corresponde al rectángulo naranja en la base del V.C., y el *outlet* corresponde al cuadrado anaranjado situado más arriba. Se delimitan igualmente todas las paredes externas al volumen de control, exceptuando el *inlet*. Las dimensiones preliminares para el *inlet* son 2000 x 1400 (mm), la cual será seteada a presión atmosférica. Para el caso del *outlet*, corresponde a un cuadrado de 100 x 100 (mm).

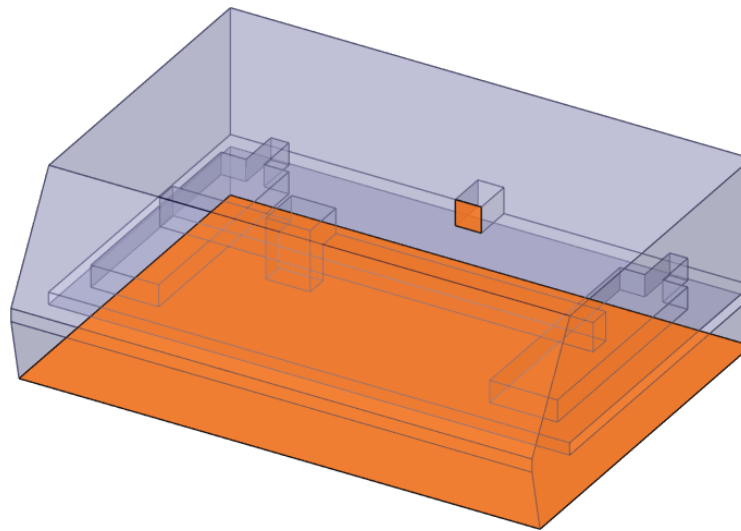


Figura 17: Disposición de *inlet* y *outlet* en el V.C. preliminar

A continuación del desarrollo de la geometría 3D del V.C., se procede a generar el mallado respectivo (ver Figura 18).

Dadas las grandes dimensiones del volumen de control, se inicia con un *Edge Sizing* de todo borde presente en la geometría, tanto interno como externo, con un largo de elemento de 0.01 (m). Luego, se genera un *Body Sizing*, para asegurar que ningún elemento tridimensional interno al V.C. posea un tamaño superior a los 0.06 (m). Se continua con un *Face Sizing*, esto para refinar la malla tanto para el *inlet* como el *outlet* del V.C., con un tamaño de elemento de 0.01 (m). Posteriormente, se establece otro *Face Sizing*, pero esta vez para las paredes del V.C., asegurando que ningún elemento superficial sobrepase los 0.03 (m) lineales. Finalmente, se genera un conformado de geometría tetraédrica al V.C., esto debido a que CFX lee este tipo de malla, y no es capaz de trabajar con mallas hexaédricas como las generadas mediante Fluent Meshing.

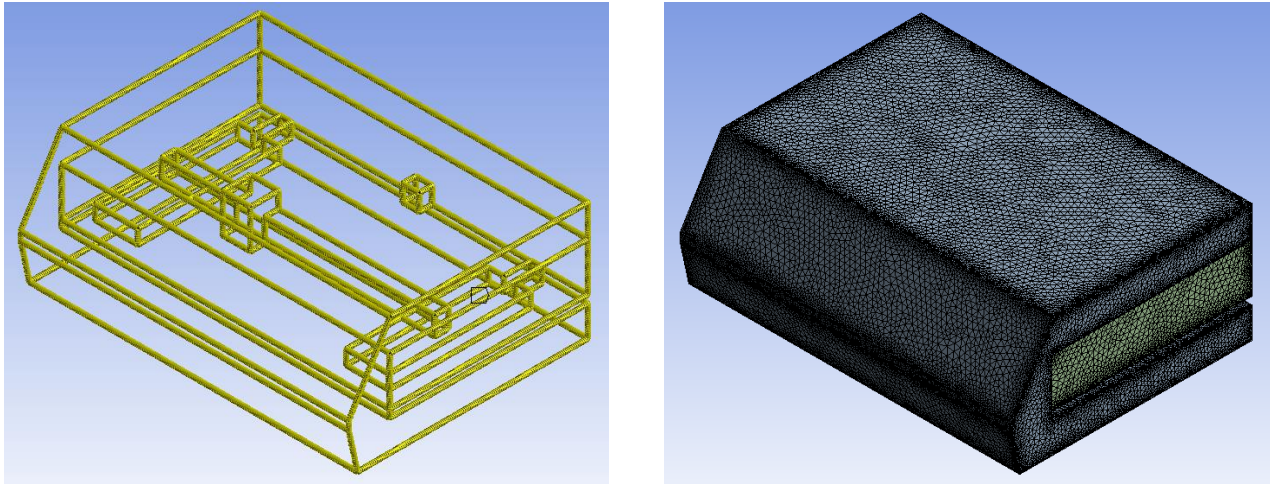


Figura 18: Caracterización del mallado del V.C. presente en el estudio

Se tiene entonces que el mallado resultante posee una cantidad de 1 603 233 elementos para este caso, con una calidad de mallado según lo indica la Figura 19, indicando (de arriba a abajo) la razón de aspecto, la oblicuidad, y la ortogonalidad de los elementos presentes en el V.C.

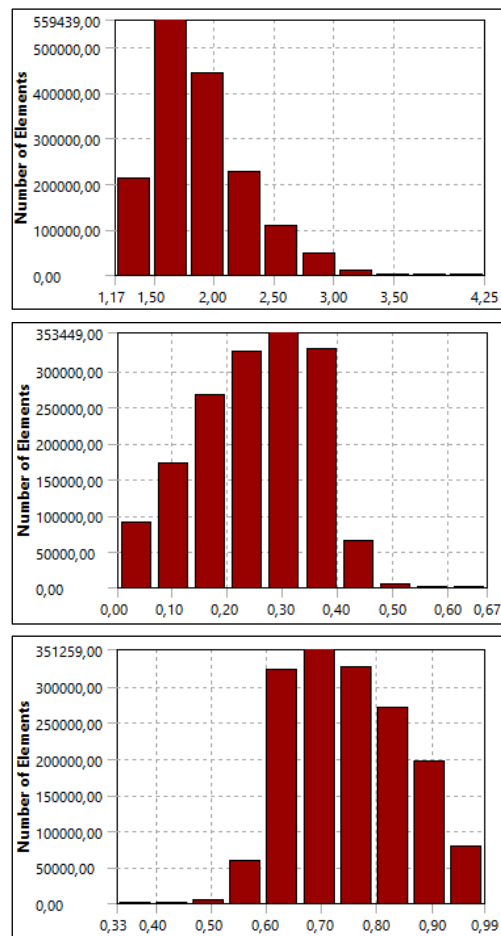


Figura 19: Gráficas de la calidad del mallado generado al V.C. – *Aspect Ratio*, *Skewness*, *Orthogonality*

Se observa así de la Figura 19, por la experiencia y teoría de CFD, que el mallado cuenta con una razón de aspecto inferior a 5 para todos sus elementos, y una oblicuidad menor que 0.7, lo cual indica una calidad bastante buena, implicando así condiciones adecuadas para la futura resolución de las ecuaciones respectivas. Cabe mencionar que para el resto de los análisis se mantendrán los mismos estándares de calidad en el mallado.

5.1.2 Análisis de Flujo de aire: Condiciones de borde y Simulación numérica

A continuación, se expone brevemente el procedimiento para buscar mediante el análisis CFD la variable *edad del aire*, la cual se expuso en la Sección 2.2 Marco Teórico, que conllevará a la obtención de la *eficiencia de ventilación* la cual desde este punto en adelante será la principal directriz para evaluar lo óptimo de toda configuración propuesta para las condiciones de borde en el sistema de ventilación de la carcasa, donde la configuración que presente mejores resultados, será la que se ha de implementar físicamente en dependencias del LTA.

Se inicia acoplando el mallado generado previamente, a la herramienta de análisis de flujo de fluidos CFX de Ansys. Se comienza introduciendo condiciones de borde al V.C., como lo son un *inlet* y un *outlet* (ver Figura 20). Las propiedades seteadas para ambas zonas son enseñadas en la Tabla 2.

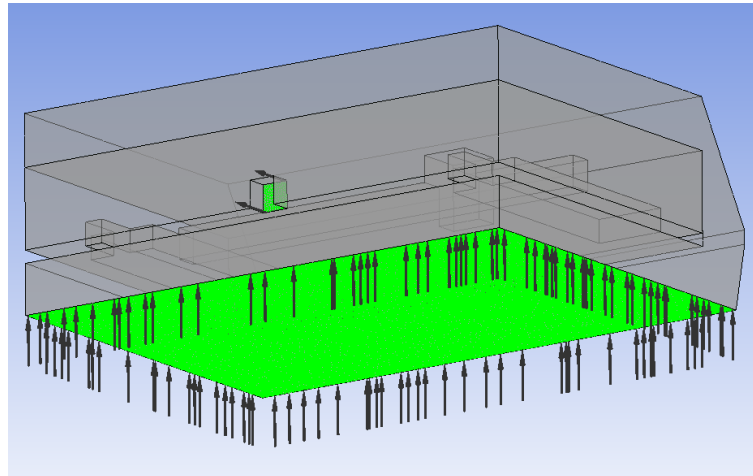


Figura 20: Ingreso de condiciones de borde en CFX

Tabla 2: Propiedades para el *Inlet* y el *Outlet* del V.C. seteadas en CFX

Boundary	Condiciones
<i>Inlet</i>	Presión estática relativa: 0 (Pa) Dirección de flujo: normal a la superficie Turbulencia: gradiente cero
<i>Outlet</i>	Flujo másico de salida: 0.6125 (kg/s)

Junto a lo enseñado en la Tabla 2, se tiene que agregar una variable adicional al programa, para que CFX sea capaz de dimensionar el tiempo que tarda un volumen determinado de fluido desde que entra por el *inlet*, hasta que sale por el *outlet*. Es por ello que se agrega una variable escalar *AgeOfAir*, asociada al volumen de control completo, a la cual se le da como unidad de medida el segundo [s]. Posterior a ello se regresa a las propiedades del *inlet* y se le asigna *AgeOfAir* = 0 (s), para indicarle al programa que el aire que ingrese por esa zona será aire fresco, y cada paso de tiempo que esté dentro del V.C. será un segundo más que se sumará a su edad, hasta que finalmente salga a través del *outlet*.

Otros parámetros básicos a ser configurados son, por ejemplo: el volumen de control es aire a 25 °C, el sistema se resuelve en modo estacionario, el volumen de control es isotérmico (25 °C), el modelo para la resolución corresponde a Shear Stress Transport (SST), modelo avalado por la teoría [6], debido a que toma las ventajas de los modelos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$, y funciona mejor para predecir la velocidad del aire dentro de una habitación. La cantidad de iteraciones se establece en 100, dada la sencillez del problema, con un criterio de convergencia RMS y residuales de a lo menos 1×10^{-4} .

La Tabla 3 enseña las principales variables y resultados que se rescatan de este primer análisis realizado para un *inlet* que abarca la totalidad de la base del V.C.

Tabla 3: Parámetros y resultados análisis preliminar

V_{total}	$\dot{V}_{\text{out}}$	$\langle \tau \rangle$	η_a
1.80 (m ³)	0.50 (m ³ /s)	3.71 (s)	0.49

Donde V_{total} corresponde al volumen total del V.C., y $\dot{V}_{\text{out}}$ es el flujo volumétrico que se extrae desde el *outlet* del sistema. De esta forma, se tiene que el software CFX calcula que la edad promedio que el aire pasa en el dominio antes de salir por el *outlet* es de 3.71 (s). De esta manera, dada la teoría expuesta previamente [7], se tiene que la eficiencia de ventilación para el V.C. según la teoría es insuficiente, pero puede mejorar si se busca optimizarlo.

5.2 Búsqueda de la ventilación óptima

A este punto se ha mostrado que lo que se busca es optimizar la eficiencia de ventilación del interior de la carcasa, esto para permitir que los gases nocivos, producto del trabajo de la cortadora láser, puedan ser eliminados eficientemente del interior de la carcasa, y posteriormente de la sala. Se tiene que la posición del *outlet* para la carcasa no puede tener grandes modificaciones ni cambios de lugar, dado que la disposición de los elementos dentro de la carcasa, y la ubicación de la carcasa dentro de la sala misma así lo permiten. De momento solamente se puede variar el flujo de aire que extrae del recinto. Se tiene entonces, que todos los esfuerzos por optimizar la eficiencia de ventilación de la carcasa estarán centrados en modificar la geometría y distribución del *inlet*, y ver cómo reacciona esa configuración para cierto flujo volumétrico de extracción situado en el *outlet*.

En el capítulo anterior, específicamente en la Sección 5.1.1, se estableció la totalidad del área inferior del V.C. como *inlet* disponible. De ahora en adelante se plantearán nuevas configuraciones basadas en lugares que efectivamente tiene disponibles la carcasa para utilizar como *inlet*. Como se vio en la Figura 13 y Figura 14, la carcasa se ancla al banco de acero mediante un entramado de vigas que solo dejan algunos sectores de la base abiertos al ambiente de la sala. A continuación, en la Figura 21, puede observarse una distribución de sectores abiertos al ambiente en la base de la carcasa, los cuales, dada la construcción realizada, quedan disponibles como *inlets* para el sistema de ventilación.

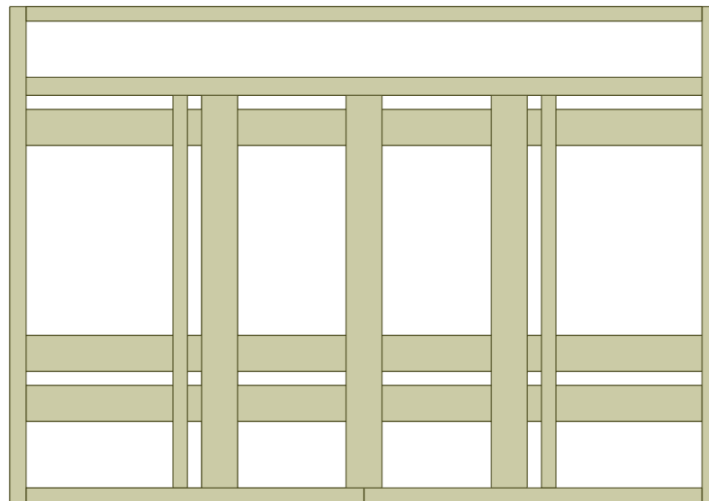


Figura 21: Sectores en la base de la carcasa abiertos al ambiente

A partir de este punto, se irá probando *inlets* distribuidos según la disponibilidad observada en la Figura 21, esto para evaluar su comportamiento, y así poder medir la eficiencia de ventilación resultante de estas configuraciones tentativas. El detalle de estos procedimientos no será incluido de ahora en adelante en el informe, dado que el procedimiento es más bien genérico, y se dejó establecido al inicio de este capítulo.

5.3 Configuraciones Inlet - Outlet

A continuación (ver Figura 22) se enseña una sencilla nomenclatura de los *inlets* disponibles para adoptar como entradas de flujo de aire para el V.C. construido. De esta manera la búsqueda de la eficiencia de ventilación óptima recaerá sobre la distribución del *inlet* escogido para el V.C.

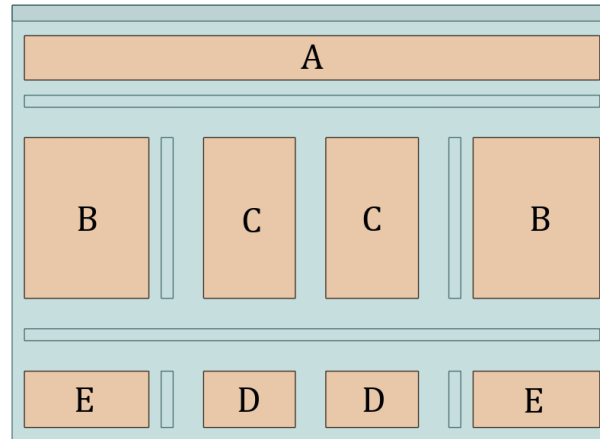


Figura 22: Principales sectores en la base del V.C. disponibles para *inlets*

A continuación, en la Tabla 4 se presentan ordenadamente, la distribución *inlet-outlet* para cada una de las configuraciones posibles mostradas en la Figura 22. Junto al esquema *inlet-outlet* para cada configuración, se visualiza el mapeado de colores representativo de la *edad del aire* resultante de la simulación respectiva a través de la herramienta CFX, como se explicó en las Secciones 5.1.1 y 5.1.2. El mapeado de la *edad del aire* es ejemplificativo solamente para un flujo de extracción de $0.25 \text{ (m}^3/\text{s)}$.

Tabla 4: Configuraciones *Inlet - Outlet* para el Volumen de Control – Mapeado de Edad del Aire

Config.	Disposición <i>Inlet - Outlet</i>	Edad del Aire - $\dot{V}_{out} = 0.25 \text{ (m}^3/\text{s)}$	Escala
A			Age Of Air 39.29 29.47 19.64 9.82 0.00 [s]

Config.	Disposición <i>Inlet</i> - <i>Outlet</i>	Edad del Aire - $\dot{V}_{out} = 0.25 \text{ (m}^3/\text{s)}$	Escala
B			Age Of Air 12.72 9.54 6.36 3.18 0.00 [s]
C			Age Of Air 14.78 11.08 7.39 3.69 0.00 [s]
D			Age Of Air 12.67 9.50 6.33 3.17 0.00 [s]
E			Age Of Air 13.08 9.81 6.54 3.27 0.00 [s]

A continuación, se resumen los resultados para las Configuraciones expuestas en la Tabla 4.

5.3.1 Configuración A: Inlet frontal

Para este primer caso, se inicia estableciendo el *inlet* A (Tabla 4), cuya área es un rectángulo de casi el mismo ancho que la carcasa, y está ubicado en la zona frontal inferior del V.C.

Se realiza entonces el mallado correspondiente, junto al acoplamiento y simulación en CFX, obteniéndose su respectivo mapeado tridimensional de colores para el V.C., el cual muestra la variable *edad del aire* en el recinto, indicando por cada zona la cantidad de tiempo que el aire lleva dentro del V.C. para un flujo de aire de 0.25 (m³/s) (ver Tabla 4).

A modo de evaluar el desempeño de esta configuración, se realiza el mismo análisis en CFX, pero esta vez se hace variar el flujo volumétrico de salida, con valores de 0.15, 0.10 y 0.05 (m³/s). Los resultados respectivos se disponen en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros y resultados análisis Configuración A

V_{total} (m ³)	$\dot{V}_{\text{out}}$ (m ³ /s)	τ_n	$\langle \tau \rangle$ (s)	η_a
1.80	0.25	7.20	11.9	0.33
1.80	0.15	12.0	20.1	0.34
1.80	0.10	18.0	26.8	0.34
1.80	0.05	36.0	54.8	0.33

Se concluye de los resultados para esta primera configuración, que la eficiencia de ventilación se mantiene casi constante para este primer *inlet* adoptado, quizás dada su posición frontal, dado que aunque baje el flujo de extracción, aumenta a su vez el tiempo nominal del sistema, estableciendo una eficiencia casi invariable.

5.3.2 Configuración B: Inlet dual, costados de zona intermedia

En esta segunda configuración, se inicia estableciendo la zona B como *inlet*, cuya área se compone de dos rectángulos, ubicados en los costados de la zona intermedia inferior del V.C.

Se realiza igualmente la simulación a través de CFX, y se obtiene el mapeado tridimensional para el V.C., el cual muestra la *edad del aire* en el recinto (ver Tabla 4).

Al igual para el caso anterior, se realiza el mismo análisis, pero haciendo variar el flujo volumétrico de salida, con valores de 0.15, 0.10 y 0.05 (m³/s). Los resultados respectivos se disponen en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros y resultados análisis Configuración B

$V_{\text{total}} \text{ (m}^3\text{)}$	$\dot{V}_{\text{out}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$\langle \tau \rangle \text{ (s)}$	η_a
1.80	0.25	5.06	0.71
1.80	0.15	8.33	0.72
1.80	0.10	12.6	0.72
1.80	0.05	25.6	0.70

Se concluye de los resultados para esta segunda configuración, que el aumento en la eficiencia de ventilación fue considerable, casi un 40% en comparación al primer caso. Al igual que en el caso anterior, a medida que se disminuye el flujo de aire, no se tienen variaciones considerables en la eficiencia, con resultados no mayores al 72%.

5.3.3 Configuración C: Inlet dual, centro de zona intermedia

En esta tercera configuración, se inicia estableciendo la zona C como *inlet*, cuya área se compone de dos rectángulos, ubicados en el centro de la zona inferior del V.C. (ver Tabla 4).

Para este caso igualmente, se realiza el mismo análisis en CFX haciendo variar el flujo volumétrico de salida, con valores de 0.25, 0.15, 0.10 y 0.05 (m³/s). Los resultados respectivos se disponen en la Tabla 7.

Tabla 7: Parámetros y resultados análisis Configuración C

$V_{\text{total}} \text{ (m}^3\text{)}$	$\dot{V}_{\text{out}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$\langle \tau \rangle \text{ (s)}$	η_a
1.80	0.25	4.93	0.73
1.80	0.15	8.12	0.74
1.80	0.10	12.3	0.73
1.80	0.05	24.7	0.73

Los resultados expuestos en esta configuración dan cuenta de que la eficiencia de ventilación muestra valores similares a los obtenidos en la Configuración B, esto debido a la similitud que hay en la distribución y geometría de los *inlets* de las Configuraciones B y C. Por otro lado, se observa que la eficiencia de ventilación casi no varía al cambiar el flujo de aire, sino que se mantiene en torno a 73%.

5.3.4 Configuración D: Inlet dual, centro de zona posterior

Para esta cuarta configuración, se inicia estableciendo la zona D como *inlet*, cuya área se compone de dos pequeños rectángulos, ubicados atrás en el centro de la zona inferior del V.C. (ver Tabla 4).

Para este caso, igualmente se hace variar el flujo volumétrico de salida, con valores de 0.25, 0.15, 0.10 y 0.05 (m^3/s). Los resultados respectivos se disponen en la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros y resultados análisis Configuración D

V_{total} (m^3)	$\dot{V}_{\text{out}}$ (m^3/s)	$\langle \tau \rangle$ (s)	η_a
1.80	0.25	4.66	0.77
1.80	0.15	7.77	0.77
1.80	0.10	11.7	0.77
1.80	0.05	23.9	0.75

Los resultados para esta configuración muestran que la eficiencia de ventilación no bajó de 75%, e incluso alcanzó un valor de 77%, considerando los flujos de extracción entre 0.05 y 0.25 (m^3/s), respectivamente.

5.3.5 Configuración E: Inlet dual, esquinas de zona posterior

Para esta última configuración, se inicia estableciendo la zona E como *inlet*, cuya área se compone de dos rectángulos ubicados atrás en las esquinas de la zona inferior del V.C. (ver Tabla 4).

Para este último caso igualmente, se obtiene el respectivo mapeado tridimensional para el V.C. mediante CFX, y se hace variar el flujo volumétrico de salida, con valores de 0.25, 0.15, 0.10 y 0.05 (m^3/s). Los resultados respectivos se disponen en la Tabla 9.

Tabla 9: Parámetros y resultados análisis Configuración E

V_{total} (m^3)	$\dot{V}_{\text{out}}$ (m^3/s)	$\langle \tau \rangle$ (s)	η_a
1.80	0.25	5.19	0.69
1.80	0.15	8.61	0.70
1.80	0.10	12.9	0.70
1.80	0.05	25.6	0.70

Se concluye de los resultados, que esta última configuración alcanza valores de eficiencia de ventilación iguales a 70%, lo cual es un valor bastante bueno. Se observa además que, a pesar de variar el flujo de aire, la calidad de ventilación no muestra grandes variaciones.

Dado que tanto la Configuración D como la Configuración E mostraron buenos valores de eficiencia de cambio de aire, 77% y 70% respectivamente, se propone a continuación una variante para cada una

de aquellas configuraciones, denominadas D.2 y E.2, esquematizadas en la Figura 23. Ambas configuraciones son una simplificación de la configuración original, solamente que dejaron de ser rectángulos y se volvieron *inlets* de tipo cuadrado.

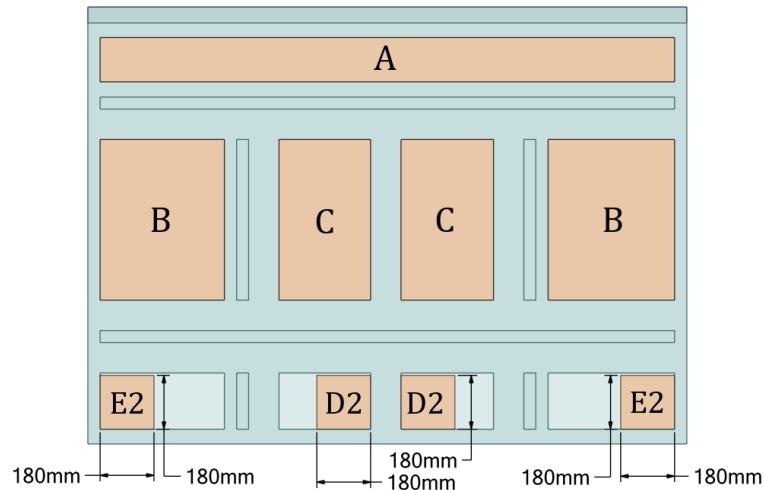


Figura 23: Nuevas propuestas en la base del V.C. disponibles para inlets

5.3.6 Configuración D.2: Inlet cuadrado dual, centro de zona posterior

Esta configuración, variante la Config. D se compone de dos pequeños cuadrados de arista 18 cm, ubicados atrás en el centro de la zona inferior del V.C. El *outlet* se mantuvo en la misma posición.

Posteriormente se obtiene el respectivo mapeado tridimensional de colores para el V.C. mediante CFX, el cual muestra la *edad del aire* en el recinto para esta nueva distribución de *inlets* (ver Figura 24).

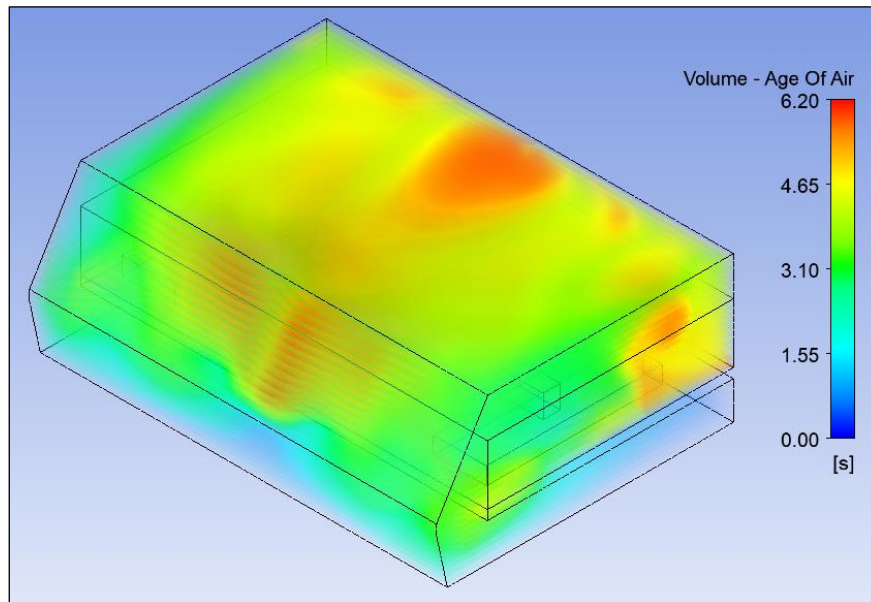


Figura 24: Mapeado de la Edad del Aire en el V.C. - Config. D.2 - $V_{out} = 0.25 \text{ (m}^3/\text{s)}$

Igualmente que para la Config. D, se hace variar el flujo volumétrico de salida, con valores de 0.25, 0.15, 0.10 y 0.05 (m^3/s). Los resultados se exponen en la Tabla 10.

Tabla 10: Parámetros y resultados análisis Configuración D.2

V_{total} (m^3)	$\dot{V}_{\text{out}}$ (m^3/s)	$\langle \tau \rangle$ (s)	η_a
1.80	0.25	3.67	0.97
1.80	0.15	6.09	0.97
1.80	0.10	9.12	0.98
1.80	0.05	18.3	0.98

Los resultados para esta configuración muestran que la eficiencia de ventilación alcanza valores de incluso 98%, es por lo tanto, una mejora notable para la geometría del *inlet* original de la Config. D.

5.3.7 Configuración E.2: Inlet cuadrado dual, esquinas de zona posterior

A partir de lo establecido en la Configuración E, esta variante se compone de dos pequeños cuadrados de arista 18 cm, ubicados en las esquinas posteriores de la base del V.C. Igualmente para este caso, el *outlet* se mantuvo en la misma posición.

Se obtiene así, el respectivo mapeado tridimensional de colores para el V.C. mediante CFX, el cual muestra la *edad del aire* en el recinto para esta nueva distribución de *inlets* (ver Figura 25).

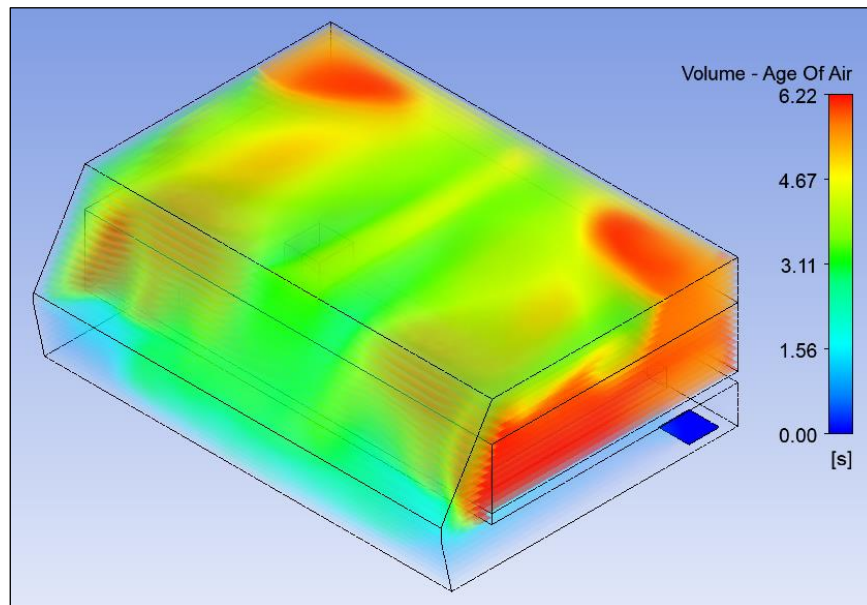


Figura 25: Mapeado de la Edad del Aire en el V.C. - Config. E.2 - $V_{\text{out}} = 0.25$ (m^3/s)

Por último, igual que para los casos anteriores, se hace variar el flujo volumétrico de salida, con valores de 0.25, 0.15, 0.10 y 0.05 (m^3/s). Los resultados se exponen en la Tabla 11.

Tabla 11: Parámetros y resultados análisis Configuración E.2

$V_{\text{total}} \text{ (m}^3\text{)}$	$\dot{V}_{\text{out}} \text{ (m}^3/\text{s}\text{)}$	$\langle \tau \rangle \text{ (s)}$	η_a
1.80	0.25	3.72	0.96
1.80	0.15	6.20	0.97
1.80	0.10	9.28	0.97
1.80	0.05	18.5	0.97

Los resultados para esta última configuración muestran que igualmente se alcanzan valores de eficiencia de cambio de aire muy buenos, de hasta 97%, es por ello que se considera una correcta optimización de la configuración original (Config. E).

Dado que ambas configuraciones, D.2 y E.2, muestran resultados similares en cuanto a eficiencia de ventilación (aprox. 97%), se opta por escoger la Configuración E.2 para ser implementada en la Carcasa, dado que la posición en la que se encuentran los *inlets* D.2 interceptan la tubería que se requiere implementar para el *outlet*, el cual estará ubicado sobre la mesa de corte, en el centro de la zona posterior a ella. Aunque se escogiera la Configuración D.2 igualmente el tubo que baja desde el *outlet* tendría que atravesar uno de estos *inlets* cuadrados y reduciría igualmente su área disponible, reduciendo su desempeño a fin de cuentas.

La ubicación en las esquinas que ofrece la Configuración D.2, permite una entrada limpia y libre de obstáculos para el aire fresco que proviene de la sala, y en ningún momento estos *inlets* cuadrados ubicados en las esquinas se verán obstaculizados una vez la construcción sea finalizada y la máquina sea ubicada en su sitio definitivo dentro de la sala.

Cabe señalar que los valores alcanzados en eficiencia de ventilación en el modelo computacional no reflejan los valores exactos que tendrá el proyecto una vez implementado, dado que se asumieron paredes lisas al interior del V.C., y en la realidad el flujo de aire que ingresa a la carcasa se encontrará con varios elementos y obstáculos en su camino hacia el *outlet*, como lo son la estructura interna o esqueleto de la carcasa, la estructura del banco de acero, el movimiento propio de la máquina de corte al estar trabajando, entre otras consideraciones.

CAPÍTULO 6: Implementación y Validación

A partir de ahora se dejará constancia del proceso de implementación de la carcasa para el sistema. Se describirá brevemente el proceso de armado y montaje, acompañado de diseños CAD de la carcasa. Finalmente se documentará la puesta en marcha del sistema, junto a los resultados observables y su comparación con los resultados de las simulaciones por CFD.

6.1 Implementación de la Carcasa

Se inició primeramente con el armado individual de los paneles laterales y posteriores, cuya geometría puede observarse en la Figura 26. Cabe señalar que el armazón se compone de dos paneles de cada uno, dada su simetría, es por ello que la construcción de cada panel es idéntica al del segundo elemento.

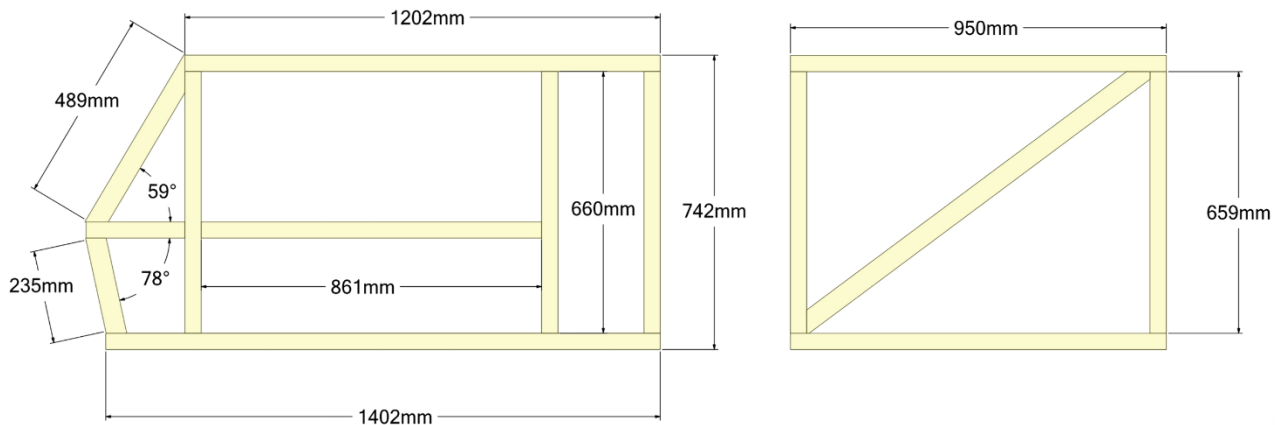


Figura 26: Geometría de los paneles laterales (izquierda) y paneles posteriores (derecha)

Posteriormente se construyó la puerta superior, que puede observarse en la Figura 27.

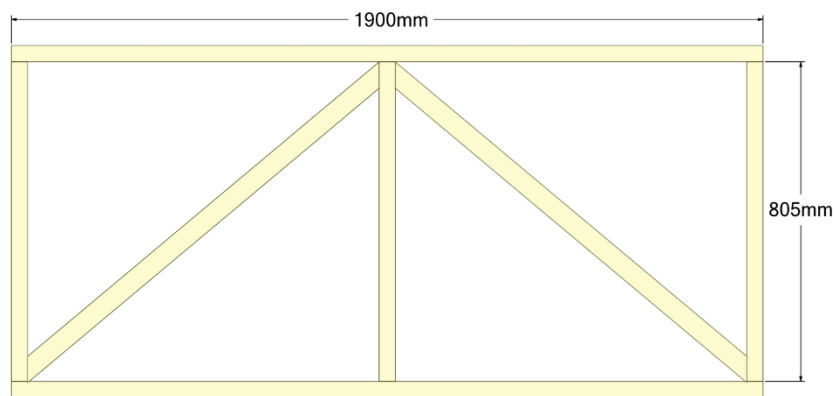


Figura 27: Geometría y principales dimensiones de la puerta superior

Se construye además la puerta frontal, la geometría se observa en la Figura 28.

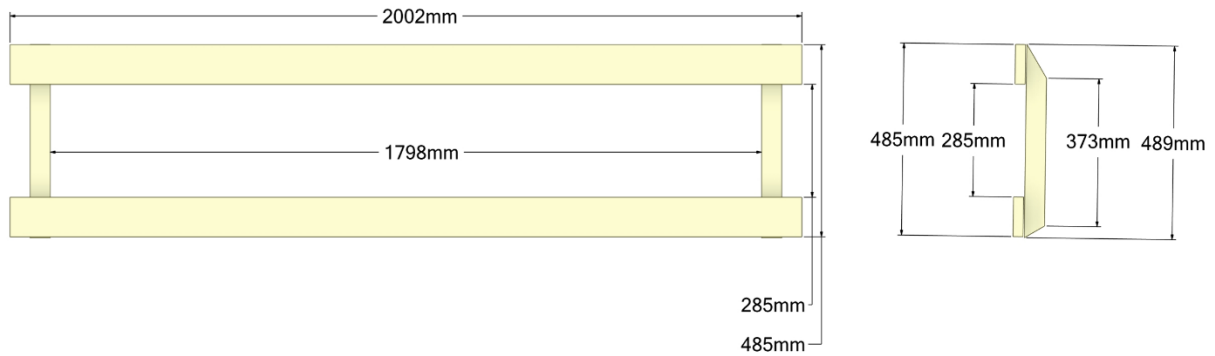


Figura 28: Geometría y principales dimensiones de la puerta frontal

6.1.1 Armado de la Carcasa

Se inicia entonces el armado de la estructura, comenzando por la instalación de las vigas para la base de la estructura, que fueron enseñadas al inicio en la Figura 13. A continuación, en la Figura 29, se enseña una vista isométrica del armado, pero esta vez con la máquina de corte láser instalada, que es como se debió enfrentar el problema.

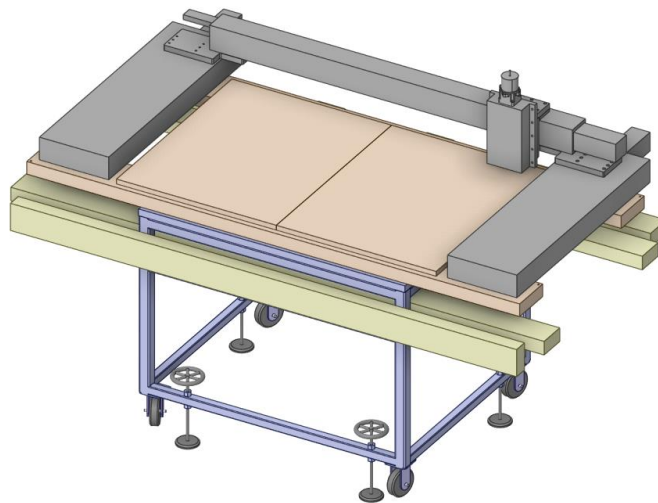


Figura 29: Anclado de la base de la estructura al banco de acero de la cortadora

Posterior a ello, se inició con la instalación de los paneles laterales y posteriores. Las uniones mecánicas entre elementos fueron a través de tornillos para madera de 3 (in) de largo. En la Figura 30 se bosqueja la inclusión de estos cuatro paneles, dos laterales y dos posteriores. Al último se agregaron tres listones de pino cepillado (2x2 in) entre los paneles laterales, como elementos longitudinales rigidizadores.

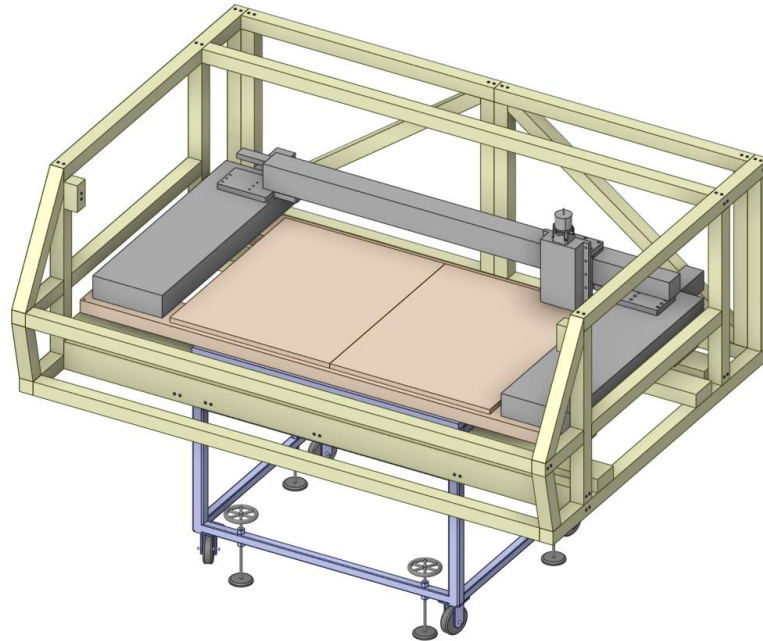


Figura 30: Montaje de los paneles laterales y posteriores a la base de la estructura

Por último, se instaló la puerta superior y la puerta frontal. El funcionamiento de las puertas quedó en función de bisagras, tres bisagras para la puerta superior, por ser la de mayor peso, y dos bisagras para la puerta inferior. En la Figura 31 se observa el resultado del montaje de los elementos mencionados.

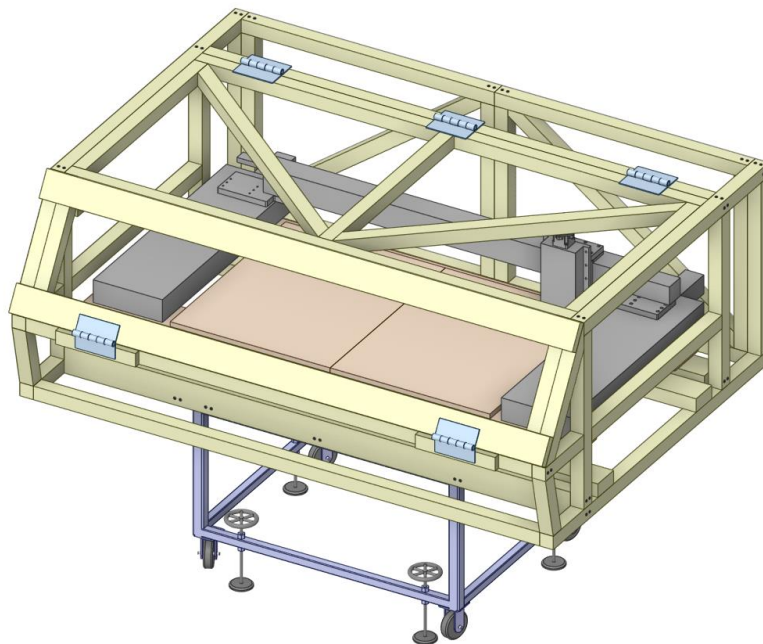


Figura 31: Resultado del montaje del esqueleto de la carcasa junto a sus puertas de acceso

6.1.2 Impermeabilización de la Carcasa

A este punto la carcasa debe ser forrada para impedir que el aire se escape de su interior. Además, se debe impedir que el aire recorra caminos más cortos por algún rincón de la estructura, mermando así la eficiencia de ventilación obtenida en la simulación por CFD. Es por ello que, antes de cerrar la estructura con paredes compuestas de MDF y terciado, se debe asegurar que el aire se comporte de la manera deseada dentro del V.C., similar a lo establecido en las simulaciones. El material utilizado entre las planchas de madera y el esqueleto corresponde a fieltro asfáltico, un material muy utilizado en la aislación e impermeabilización de casas. Cabe mencionar que las bisagras de la puerta superior se dieron vuelta hacia abajo para permitir que toda la superficie superior de la carcasa quedara lo más plana posible. La Figura 32 enseña un CAD del resultado aproximado de este procedimiento.

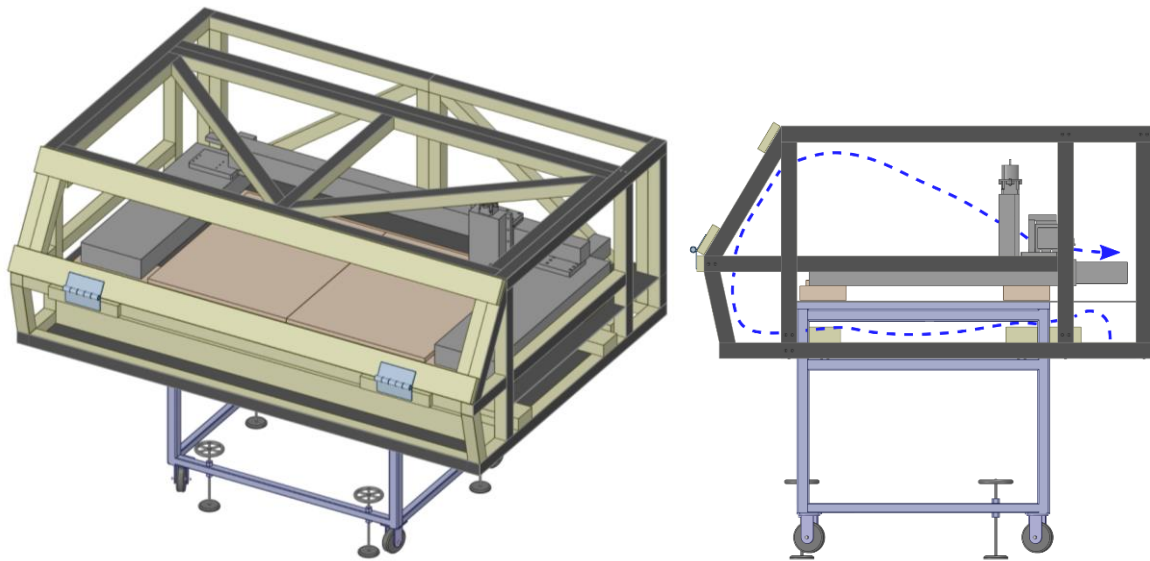


Figura 32: Resultado de la construcción con sellado e impermeabilización

Por último, la Figura 33 enseña mediante CAD el resultado del forrado de la carcasa con cada pared instalada, y lista para ser utilizada. Se observa también que en la puerta frontal fue incluida una ventanilla para poder vigilar el trabajo de la cortadora láser al interior de la carcasa. Esta ventanilla está compuesta de acrílico anaranjado transparente, lo que cumple con la norma ANSI [1] para el cuidado de los ojos del operador de tecnologías láser de Clase 3, y evita el daño ocular debido a reflexión especular. La ubicación de la ventanilla favorece el extremo izquierdo de la carcasa, esto debido a que la mayor parte de los trabajos se realizan en la mitad izquierda de la mesa de corte.

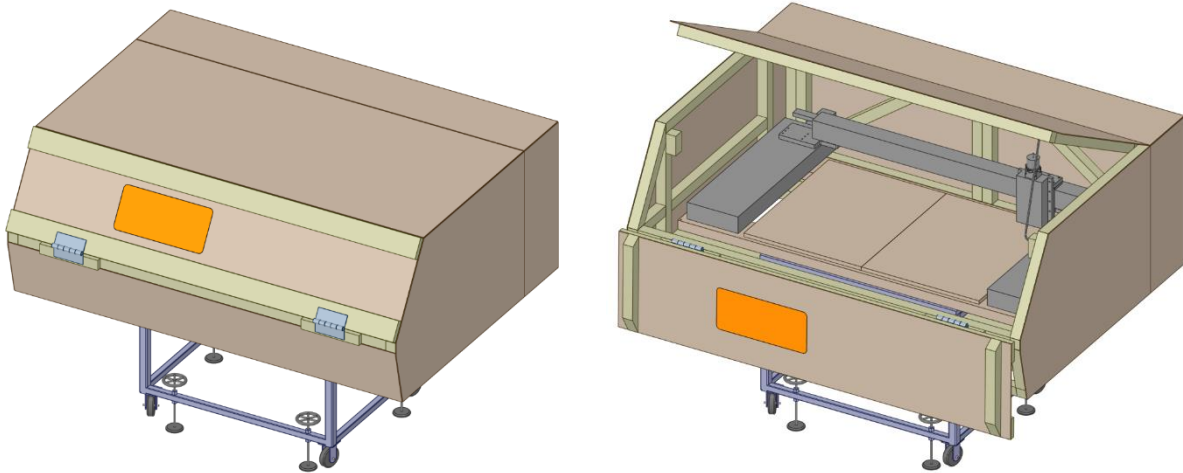


Figura 33: Resultado de la construcción de la carcasa con sus paredes respectivas

6.1.3 Resultados Implementación

A continuación, se enseñan fotografías del resultado del armado de la carcasa, con su respectiva configuración derivada del proceso de diseño, su geometría, configuración, y distribución de los principales componentes, como lo son las ubicaciones óptimas de su *inlet* y *outlet*, resultantes de la optimización mediante CFD.

Desde la Figura 34 a la Figura 37 se enseñan las vistas principales de la implementación de la Carcasa, antes y después de su revestimiento con planchas de MDF y terciado.



Figura 34: Vista en perspectiva de la implementación de la Carcasa



Figura 35: Vista perfil izquierdo de la implementación de la Carcasa



Figura 36: Vista frontal de la implementación de la Carcasa

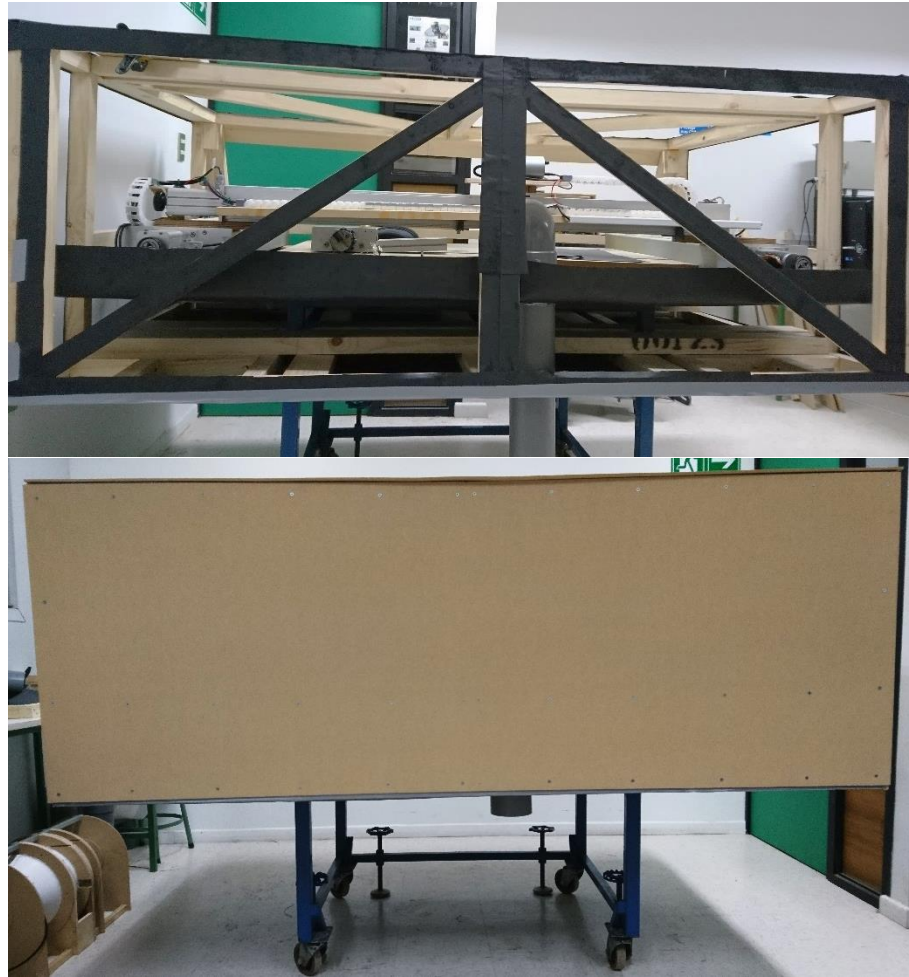


Figura 37: Vista posterior de la implementación de la Carcasa

La Figura 38 enseña la posición relativa del *outlet* al interior de la Carcasa, esto es exactamente donde se diseñó y modeló previamente a su implementación. Cabe mencionar que el *outlet* implementado corresponde a un codo de 90° de tubería de PVC con una sección circular para la salida del aire, y cuenta con un área de aproximadamente 95cm^2 , muy cercano al área del *outlet* utilizado en la simulación numérica (sección cuadrada de 100 cm^2).

En la Figura 39 se enseña una vista inferior de la carcasa, en donde se puede observar la implementación de los *inlets* obtenidos de la Configuración E.2 (ver Sección 5.3.7). A su vez se puede observar el orificio circular situada en el centro de la orilla posterior, por donde pasa el tubo de PVC que unirá el *outlet* con el ventilador que funcionará como extractor de los humos de corte, para posteriormente expulsarlos hacia el exterior de la sala. Estas fotografías (Figura 38 y Figura 39) dan cuenta de por qué no se utilizó la Configuración D.2.

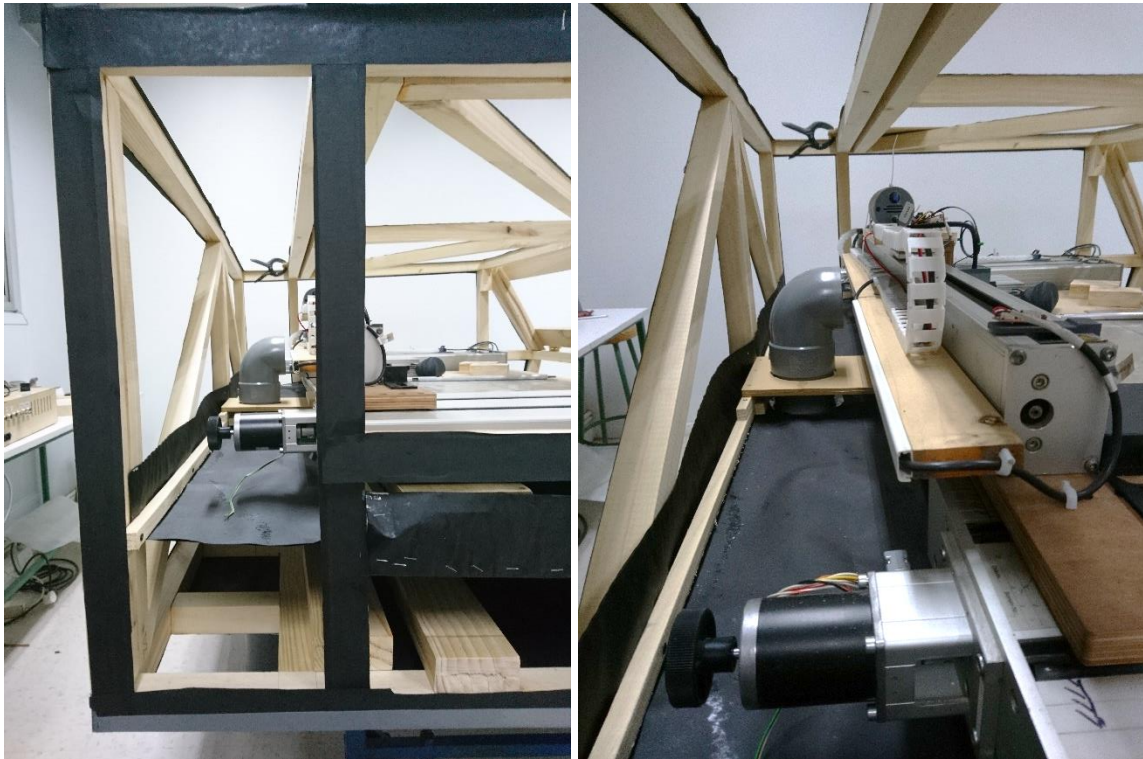


Figura 38: Disposición y ubicación del outlet para el Sistema de extracción



Figura 39: Vista inferior del sellado implementado a la Carcasa

6.2 Validación del Sistema implementado

Para validar el correcto funcionamiento de este sistema implementado, se desea hacer funcionar el sistema de extracción mientras que al interior de la carcasa se esté generando un humo visible, donde pueda detectarse si efectivamente el humo es desalojado del interior de la carcasa sin acumularse innecesariamente. La generación de este humo puede ser a través del propio funcionamiento de la cortadora láser, o bien, mediante el uso de un dispositivo generador de humo disponible en el LTA utilizado para experimentos con el túnel de viento (ver Figura 40). Se opta por la segunda opción, debido a ser más práctica y menos riesgosa, dado que el humo que entrega no es nocivo. Esta máquina genera un humo a partir de la evaporación dosificada de un líquido comercialmente disponible, especializado para este fin. El flujo de humo que dispensa a través de su tobera es de 1500 cfm, o bien, cerca de $0.70 \text{ (m}^3/\text{s)}$.



Figura 40: Máquina generadora de humo disponible en el LTA

Con el fin de visualizar el funcionamiento del sistema de extracción al interior de la carcasa, junto al comportamiento del flujo de humo al interior, se reemplazó temporalmente el panel lateral izquierdo de la carcasa por una especie de mampara creada con un marco de madera terciada y pliegos de mica transparente (ver Figura 41). Por dentro de la carcasa se adhirió una luz en su extremo derecho, con el fin de visualizar mejor el humo al interior del recinto.



Figura 41: Incorporación panel lateral transparente para visualización de resultados

Para reemplazar preliminarmente el sistema de extracción de humos de corte, se instaló una máquina aspiradora conectada en la tubería del *outlet* de la carcasa (ver Figura 42). El flujo volumétrico obtenido en el *outlet* para esta configuración fue de aproximadamente $0.038 \text{ (m}^3/\text{s)}$.

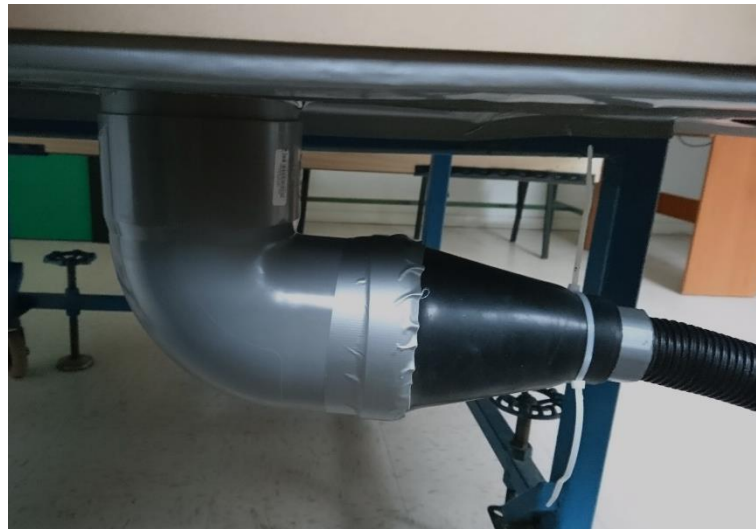


Figura 42: Conexión de aspiradora al *outlet* de la carcasa

Dada la preparación explicada anteriormente, se tuvo el sistema listo y dispuesto para ser validado, y para poder observar el comportamiento de la carcasa, y sus funciones básicas de contención y evacuación de humo, los cuales son el objetivo principal de este proyecto.

6.2.1 Contención de humo y material particulado

Se procedió a cerrar adecuadamente la carcasa, y sin encender el sistema de extracción, se dio marcha a la máquina generadora de humo durante unos minutos, hasta saturar el interior de la carcasa, según puede distinguirse en la Figura 43. Cabe mencionar que el flujo de humo que se produce normalmente por el funcionamiento de la máquina de corte láser es mucho menor a lo que es capaz de arrojar la máquina generadora de humo utilizada en esta experiencia.



Figura 43: Prueba de saturación con humo al interior de la carcasa

Se saturó el interior de la carcasa solamente hasta evitar que el humo saliera por los propios *inlets* de la misma. Resultó de esta prueba que la carcasa enseñó fugas de humo casi imperceptibles, esto en las esquinas frontales, donde se une la puerta superior con la puerta frontal, pero solamente se podían ver estas tenues estelas de humo si se miraban contraluz, pero el ambiente del laboratorio y el espacio circundante a la carcasa permaneció completamente limpio y libre de humo. Otro indicativo utilizado fue el olor, dado que el humo generado por la máquina tenía un notable olor de madera ahumada. Aun así, en ningún momento se sintió el olor, ni estando frente a la carcasa saturada de humo en su interior, pero sí se percibía al final de los ensayos al abrir la tapa frontal, aun cuando el humo ya había sido extraído casi en su totalidad.

Se obtuvo entonces un apreciable buen desempeño de la capacidad de la carcasa para contener grandes cantidades de humo. Una situación así de extrema no debiese darse en la realidad, dado que el funcionamiento de la máquina de corte láser debe ser siempre acompañado por el sistema de extracción de aire en funcionamiento. Pero de todas maneras se obtuvo un buen margen de tiempo ante cualquier imprevisto, en el cual la carcasa efectivamente impediría que escapen humos nocivos desde su interior, aun cuando se acumulen por varios minutos de funcionamiento de la cortadora láser.

6.2.2 Extracción de humo y Ventilación

Para evaluar y cuantificar la capacidad de la carcasa para ser ventilada adecuadamente dadas sus características físicas, tanto su geometría, distribución de *inlets* y *outlet*, sellado, etc., se procedió a medir cómo respondía la carcasa completamente saturada de humo una vez se encendiera el sistema de ventilación. Esto se hizo mediante la instalación de una cámara en su interior, la cual grabó en video desde el extremo izquierdo de la carcasa, mirando directamente hacia la luz puesta en el extremo derecho del recinto. La grabación comenzó cuando el interior de la carcasa estaba despejado y libre de humo, cerrando luego la carcasa y cubriendo toda fuente de luz exterior. Se filmó así continuamente el proceso de llenado de humo y la posterior ventilación de la carcasa.

Se extrajo una sección del video obtenido, una sección de 3 minutos de duración, la cual enseña el proceso de ventilación desde que la carcasa está completamente saturada de humo y es encendido el extractor, hasta que el interior de la carcasa está completamente limpio y despejado.

A continuación, en la Tabla 12, se enseñan tres cuadros o fotogramas representativos de este video, uno con la carcasa saturada de humo ($t = 0$ s), uno a la mitad del proceso de ventilación ($t = 75$ s), y el último cuando el recinto ya se encontraba libre de humo ($t = 150$ s).

Tabla 12: Fotogramas representativos de la ventilación al interior de la Carcasa

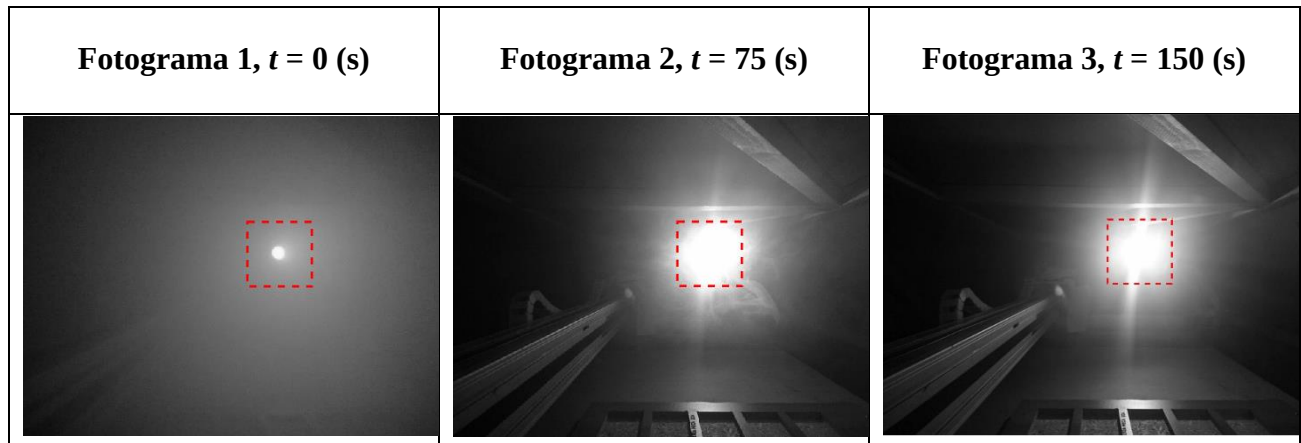
Fotograma 1, $t = 0$ (s)	Fotograma 2, $t = 75$ (s)	Fotograma 3, $t = 150$ (s)
		

A modo de dimensionar el comportamiento de la ventilación al interior de la carcasa a lo largo del proceso completo, se utilizó la herramienta MATLAB para hacer análisis del video cuadro por cuadro. El código hace que MATLAB divida el video en subintervalos de igual duración, y luego analiza una región de interés (ROI) para cada fotograma en el intervalo, para luego promediar el brillo de cada fotograma en el intervalo, y así finalmente poder obtener el comportamiento del brillo en la luz con el paso del tiempo, a medida que la carcasa se va ventilando.

La ROI que analiza MATLAB, es un rectángulo centrado sobre la luz, cuya base y alto son respectivamente un 15% y 20% de la base y alto del fotograma. Lo que hace MATLAB es transformar los fotogramas a escala de grises, y cada píxel en la ROI analizada tiene un valor de intensidad que va de 0 a 255, donde 0 representa el negro total y 255 representa el blanco total. Así, el brillo en la ROI de un fotograma es el promedio del brillo de todos los píxeles encerrados en esa región.

A continuación, la Tabla 13 enseña lo visto anteriormente en la Tabla 12, pero de la manera en que lo analiza MATLAB, esto para 0 (s), 75 (s), y 150 (s), igual que en la muestra anterior.

Tabla 13: ROI resaltada por fotograma en escala de grises



Se tiene entonces que a medida que crece la cantidad de intervalos que analiza el código, el intervalo de tiempo en el video es menor, y mejor representación tienen los resultados del promedio del brillo a lo largo del tiempo para el video completo. De esta manera, se obtiene una gráfica de brillo versus tiempo para el video (ver Figura 44), donde se observa el promedio del brillo de todos los píxeles en la ROI considerada para cada intervalo de tiempo, con un intervalo de 2 segundos.

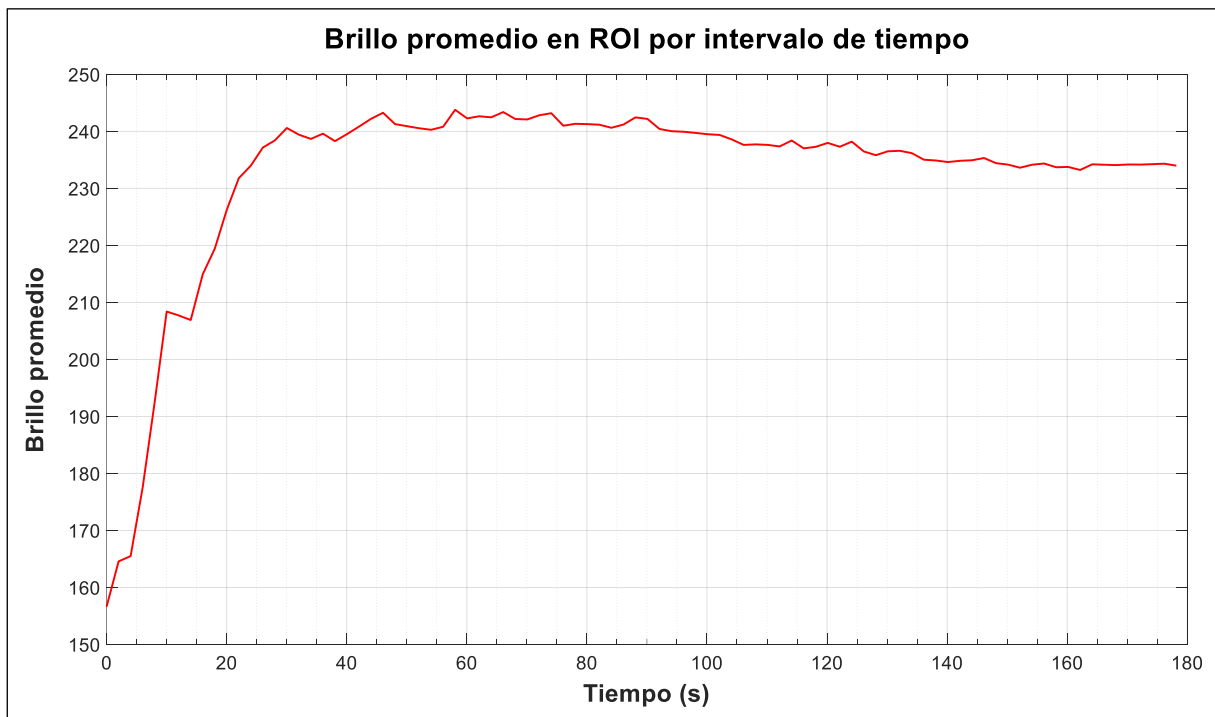


Figura 44: Gráfica de brillo de luz versus tiempo para la ventilación de la carcasa

De la gráfica se observa que la mayor pendiente en el brillo es para un tiempo entre 0 y 30 segundos, es decir, la luz se hace más visible ante la cámara, o bien la carcasa se despeja más rápidamente en los primeros 30 segundos.

Como se mencionó al inicio de este Subcapítulo 6.2, esta validación fue realizada con un flujo volumétrico de extracción igual a $0.038 \text{ (m}^3/\text{s)}$. A modo de visualizar computacionalmente lo acontecido, se realizó una simulación mediante CFX de Ansys, para la configuración E.2 (ver Sección 5.3.7), pero esta vez seteando el flujo volumétrico de extracción en $0.038 \text{ (m}^3/\text{s)}$, como se indica en la Figura 45, donde resultó que el aire se renueva completamente en el V.C. luego de 41.5 (s), con una edad media del aire de 24.4 (s), y una eficiencia de ventilación de 97%.

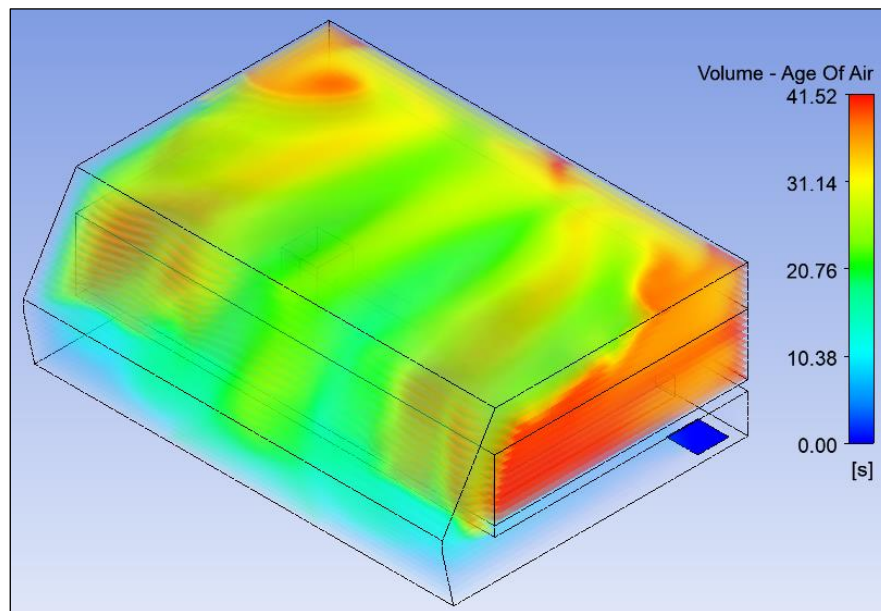


Figura 45: Mapeado de la Edad del Aire en el V.C. - Config. E.2 - $V_{out} = 0.038 \text{ (m}^3/\text{s)}$

Si bien en la realidad la eficiencia de ventilación debe ser inferior a 0.97, debido a diversos factores mencionados anteriormente en este estudio, se observa que el tiempo de ventilación es muy cercano al que muestra el gráfico de la Figura 44, donde la mayor “tasa de despeje” se observa para los primeros 30 segundos en el video, el cual se acerca bastante al tiempo promedio del aire en el interior. El despeje total del interior del recinto se alcanza entre 150 y 180 segundos, es decir, hacen falta cerca de cuatro ciclos totales de cambio de aire.

CAPÍTULO 7: Conclusiones

A pesar de tener un alcance muy práctico, el presente proyecto concluye que se puede abordar una problemática no enfocada precisamente en investigación, pero aplicando soluciones desde la ingeniería en búsqueda de optimizar el resultado, y no conformarse con la primera solución que parezca ser suficiente.

Se cumplió con el principal objetivo, diseñar, crear e implementar una carcasa funcional capaz de contener la máquina de corte por láser, y capaz de integrar un sistema de extracción de humos de corte, para posteriormente evacuarlos del laboratorio. Se llevó a cabo la correcta instalación del equipo, cumpliendo con las normas básicas de seguridad establecidas para el trabajo con tecnologías láser en laboratorios e instituciones educativas [1], previniendo el riesgo de accidentes o lesiones oculares dadas sus características físicas, y principalmente, se erradicó por completo la posibilidad de inhalar gases nocivos a la salud, mediante un apropiado sistema de ventilación del espacio de trabajo.

De esta manera se cumplió con los objetivos específicos planteados al comienzo. A continuación, se detalla el logro respectivo del proyecto frente a cada uno de estos objetivos.

1. Se generaron las geometrías en CAD de la manera más fiel a la realidad que fue posible, para después llevar a cabo la construcción de cada parte del sistema. Este objetivo fue logrado, dado que una vez implementada la solución, el montaje de los componentes contruidos (derivados del proceso de diseño CAD) no mostró ninguna falta de concordancia con el banco de acero ni los componentes de la cortadora situados en el laboratorio.
2. Se plantearon geometrías y soluciones posibles para la carcasa. Si bien no hubo mucha libertad de diseño geométrico, dadas las dimensiones propias de la cortadora láser, sí se plantearon soluciones opcionales, siendo escogida la solución definitiva dada su facilidad de construcción, sus costos reducidos, y las ventajas que presentaba a su futuro desempeño.
3. La construcción de la carcasa pudo ser llevada a cabo sin desmontar la máquina de corte ni dañar sus sensibles componentes, dado que el montaje de todas sus partes (base de la carcasa, paneles laterales y posteriores, puertas de acceso, etc.) se realizó completamente alrededor y sobre la máquina de corte, debiendo adaptar el trabajo a estas restricciones.
Por otro lado, la carcasa se adaptó perfectamente a las dimensiones de la maquinaria y su funcionamiento. Se puso en marcha el mecanismo móvil de la máquina de corte, y se movió libremente en todo su campo de trabajo, ningún componente de la carcasa estorbó su libre desplazamiento ni funcionamiento.
4. La construcción del sistema fue completamente realizada en instalaciones del LTA, mediante herramientas y maquinaria disponible en el lugar. Además, la adquisición de materiales fue en su gran mayoría en el comercio local, y otros pocos fueron conseguidos directamente en dependencias del LTA.
5. Se consultó y aplicó teoría pertinente a ventilación de edificios y flujo de aire en recintos para poder establecer la principal directriz en el proceso de diseño, que fue la eficiencia de ventilación. Se utilizaron herramientas ingenieriles de CFD para optimizar la eficiencia de ventilación del volumen de control, lo cual ayudó en la búsqueda de una óptima distribución de tomas de aire para la carcasa, encontrando finalmente un diseño eficiente para poder ser implementado.

En la teoría y simulaciones numéricas se alcanzaron valores de eficiencia de ventilación de hasta 97% para el sistema escogido. En la realidad este valor debe ser un poco menor debido a diversos factores, como las idealizaciones propiamente establecidas para el modelo y simulación numérica. De igual manera el resultado visto en la implementación cumplió ampliamente con lo esperado.

6. Se validó el sistema implementado poniéndolo en funcionamiento en condiciones exigentes. Su capacidad de contener grandes cantidades de humo fue notoria, sin dejar escapar humos que se percibieran en el laboratorio.

En la práctica, la capacidad del sistema para deshacerse del humo en su interior fue validada mediante técnicas de análisis de luz e imagen, resultando en un desempeño de ventilación sobresaliente, donde basta solamente la conexión de un extractor de capacidad apropiada (aprox. $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$) para generar una ventilación satisfactoria del espacio de trabajo.

7. Por último, se diseñó un breve instructivo de uso para dar a conocer al usuario sobre la apropiada manipulación y cuidados básicos con respecto a la carcasa, esto para evitar daños sobre el mismo operario de la cortadora láser, y además evitar deterioro innecesario sobre la carcasa misma, como puede ser su sellado, sus bisagras, sus puertas de acceso, etc.

El instructivo será adherido sobre la puerta frontal de la carcasa para quedar permanentemente en el laboratorio al alcance del usuario. Éste puede apreciarse en el APÉNDICE D: Instructivo de uso para la Carcasa.

En cuanto a las condiciones y restricciones de diseño impuestas al inicio del proyecto, se concluye principalmente lo siguiente.

1. La carcasa implementada resultó perfectamente acoplada al banco de acero, bien firme en su unión en la base, sin mostrar juego alguno ni movimientos inestables.

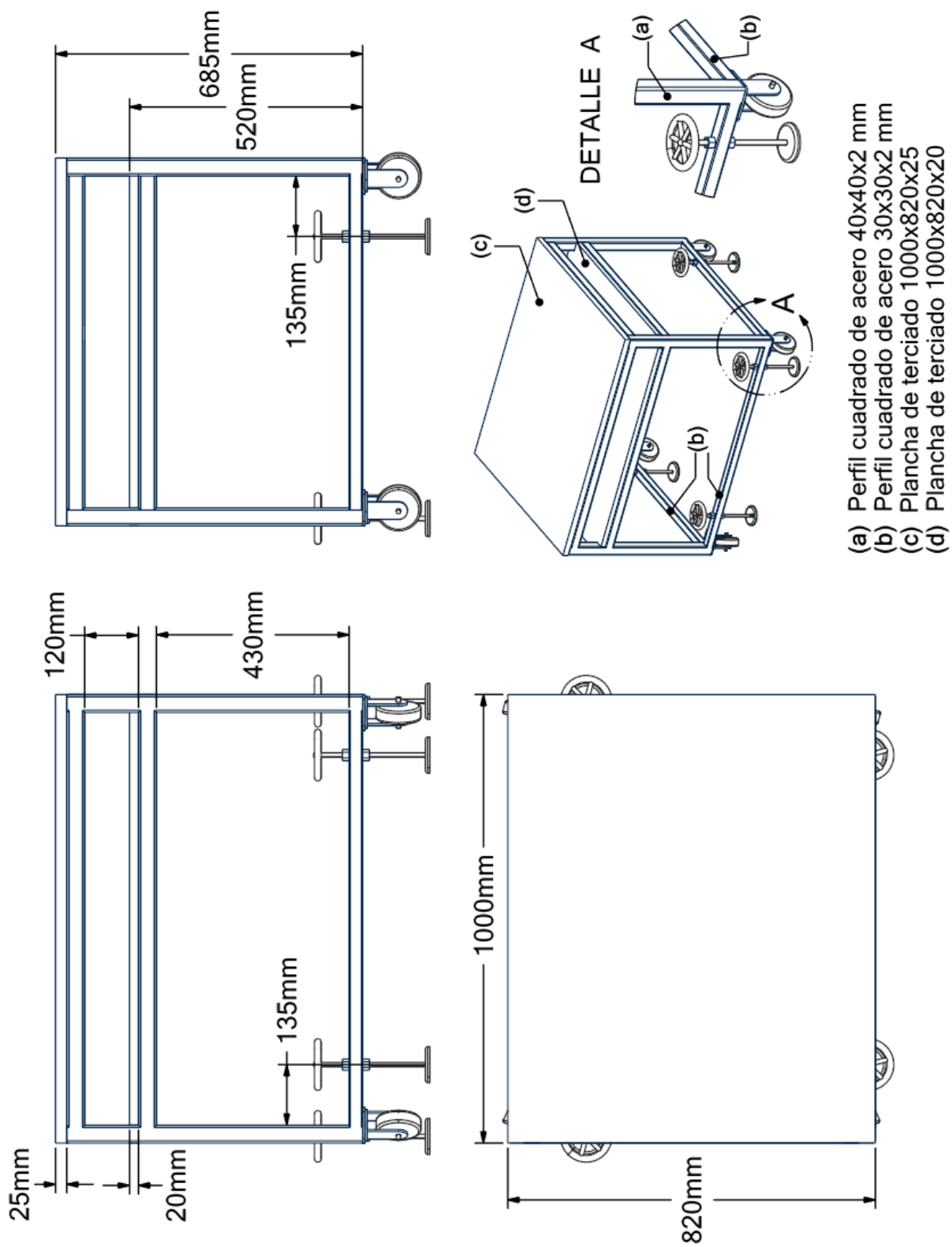
Por otro lado, dado que el banco de acero de la cortadora láser incluye ruedas, el sistema completo puede ser fácilmente desplazado y trasladado dentro de la sala. Además, la carcasa es completamente manipulable por una sola persona dada la configuración de sus puertas de acceso, las cuales cuentan con asas para abrir y cerrar, y una barra de soporte para sostener y mantener abierta la puerta superior.

Por último, el sistema resultante fue adecuado para su espacio asignado dentro del laboratorio, el cual consistía en una esquina de la sala con cerca de 2.20 (m) de largo y 1.50 (m) de fondo, para poder ubicar el sistema completo, el cual quedó perfectamente situado en su lugar.

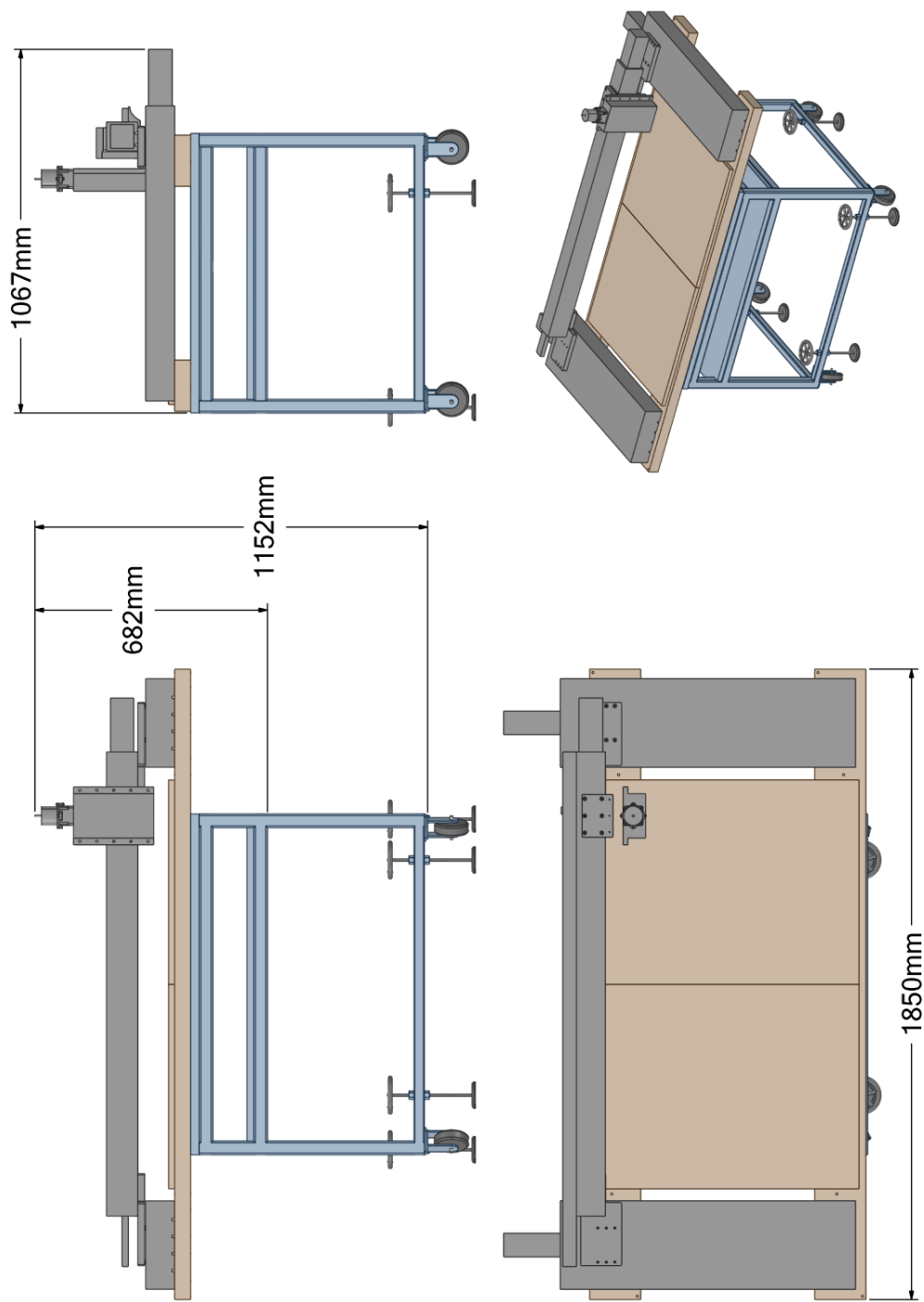
2. En cuanto a las limitantes de presupuesto económico, se observó en la Sección 4.3.2, que el costo en los materiales fue cercano a los 105.000 CLP, con un gasto extra en transporte de los materiales (10.000 CLP), resultando en 115.000 CLP.

Dado que el presupuesto inicial para el proyecto fue de 150.000 CLP, se tiene que se utilizó cerca de un 77% del presupuesto, cumpliendo con un generoso margen para esta limitante.

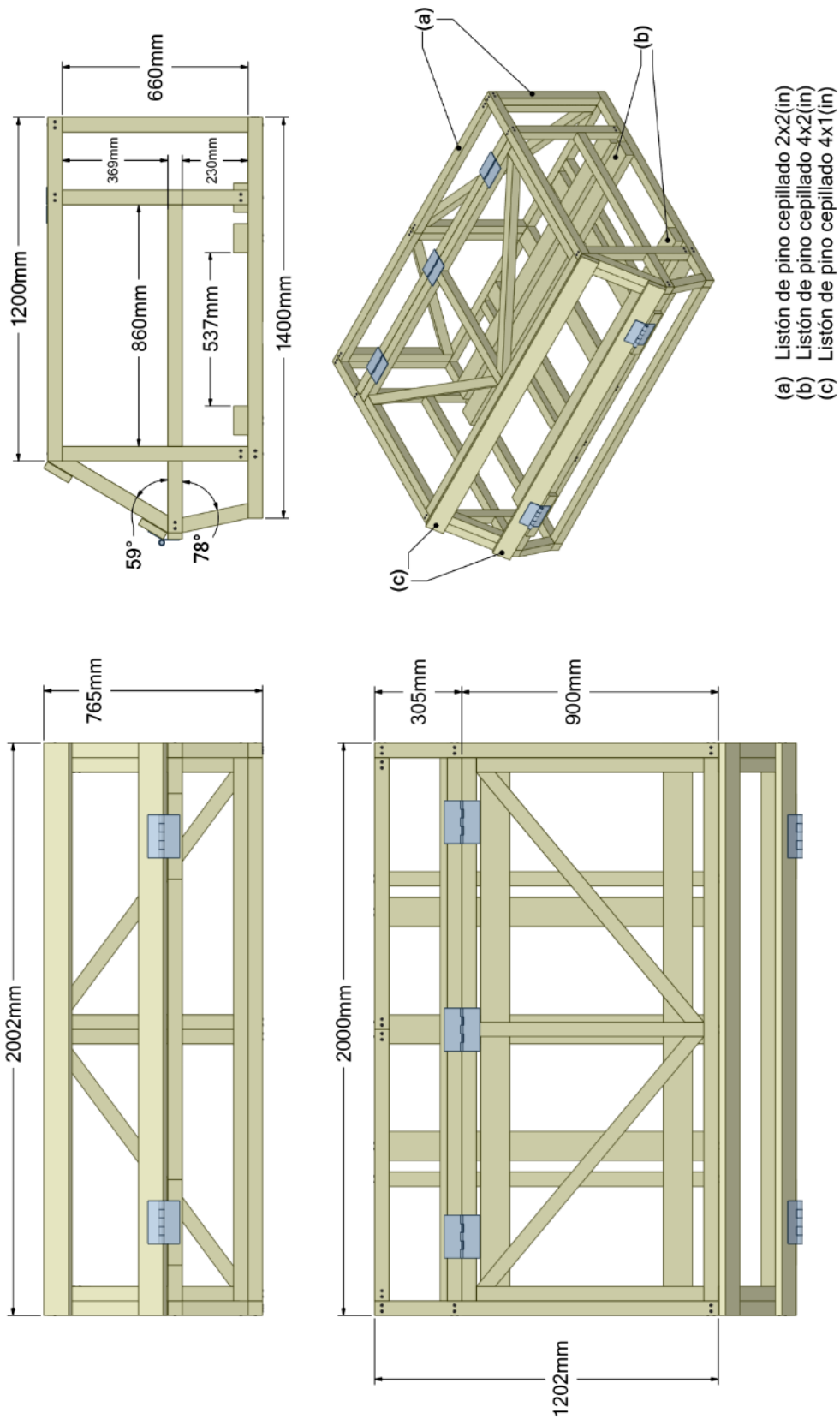
APÉNDICE A: Plano del banco de la Cortadora Láser



APÉNDICE B: Plano del ensamble entre banco y Cortadora Láser



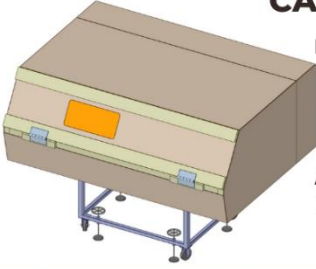
APÉNDICE C: Plano del armazón de la carcasa de la Cortadora Láser



APÉNDICE D: Instructivo de uso para la Carcasa

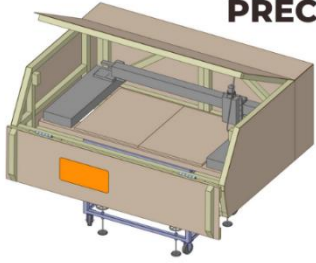
GUÍA DE USO

CARCASA CORTADORA LÁSER (MANIPULACIÓN Y CUIDADO)



CARCASA

La Carcasa tiene por objetivo contener los gases tóxicos del proceso de la máquina de corte láser y evacuarlos fuera del laboratorio. Además, protege sus ojos de la reflexión del haz de láser.



PRECAUCIÓN

Nunca utilizar la máquina de corte sin antes cerrar correctamente ambas puertas.
Revisar que el extractor de humos esté encendido antes de iniciar el proceso de corte láser.



ABRE/CIERRE PUERTAS

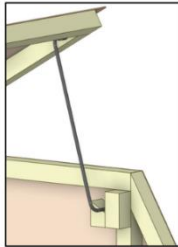
Si la puerta superior está cerrada, debe levantarla 3 cm aprox. cada vez que abra o cierre la puerta frontal, para no dañar el sellado de espuma.



PUERTAS DE ACCESO

La puerta superior de la Carcasa cuenta con una varilla de soporte en su extremo derecho, ubíquela correctamente en su tope respectivo al abrir la puerta.

La puerta frontal descansa solamente sobre sus bisagras, debe ser bajada y suspendida cuidadosamente en la vertical cada vez que la abra.



Bibliografía

- [1] T. Kennedy *et al.*, “American National Standards Institute, Safe Use of Lasers, ANSI Z136,” *J. Photochem. Photobiol. B*, vol. 70, no. 12, 1999.
- [2] D. Van Pinxteren *et al.*, “Residential Wood Combustion in Germany: A Twin-Site Study of Local Village Contributions to Particulate Pollutants and Their Potential Health Effects,” *ACS Environmental Au*, vol. 4, no. 1, pp. 12–30, Jan. 2024, doi: 10.1021/acsenvironau.3c00035.
- [3] R. J. Thomas and B. Sams, “An overview of the ANSI Z136 committees and current issues,” in *International Laser Safety Conference*, Laser Institute of America, 2017, pp. 100–107. doi: 10.2351/1.5056862.
- [4] F. G. Bachmann, “High-power diode laser technology and applications,” X. Chen, T. Fujioka, and A. Matsunawa, Eds., 2007, p. 550. doi: 10.1117/12.377093.
- [5] Baison Laser Systems, “Laser Cutter Exhaust Systems: A Comprehensive Guide,” baisonlaser.com.
- [6] M. Ning, S. Mengjie, C. Mingyin, P. Dongmei, and D. Shiming, “Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO₂ distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet,” *Appl Energy*, vol. 164, pp. 906–915, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.096.
- [7] C.-A. Roulet, *Ventilation and Airflow in Buildings*. Routledge, 2012. doi: 10.4324/9781849773713.