



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN Y EXTRACCIÓN DE LOS VAPORES PRODUCIDOS EN EL SISTEMA ELPO EN LA FABRICACIÓN DE CARROCERÍAS EN LA EMPRESA CIAUTO CIA. LTDA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

SALAZAR TENORIO DEYSI VIVIANA
deysi.salazar@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING. NARANJO MENDOZA CARLOS ANDRÉS, PhD.
carlos.naranjo@epn.edu.ec

CODIRECTOR:
ING. ORTEGA LÓPEZ MIGUEL DARIO, MSc.
miguel.ortega@epn.edu.ec

ABRIL, 2023

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **DEYSI VIVIANA SALAZAR TENORIO**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Andrés Naranjo Mendoza, PhD

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Miguel Darío Ortega López, MSc

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Deysi Viviana Salazar Tenorio**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Deysi Viviana Salazar Tenorio

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis papás Marco y Aída, quienes han sido mi guía, fortaleza y ejemplo de dedicación y perseverancia. Les dedico con mucho amor este logro, que es fruto de su esfuerzo y el mío. Gracias infinitas por su apoyo incondicional, por su amor y paciencia, por estar siempre a mi lado y no dejarme caer.

A mis ángeles, quienes me cuidan y están conmigo a donde quiera que vaya. Sus enseñanzas las llevo grabadas en mi corazón, y en mi mente siempre están presentes los consejos y el ejemplo de las buenas personas que fueron. A mi mamita Laura, quien con su dulzura calmaba mis días tristes y con su alegría me animaba a continuar, estoy segura de que desde el cielo estará festejando este triunfo. Ustedes son mi orgullo y motivación, siempre los recordaré.

Y por último y no menos importante, a mi mami Rosaura, porque a pesar de no estar físicamente sé que me cuida en cada paso que doy.

Deysi

AGRADECIMIENTO

Primero quiero dar gracias a Dios por todo lo que ha pasado en mi vida, por permitirme compartir con mi familia este logro y volver a reencontrar a mi hermana.

A mis padres, por tantos esfuerzos realizados para formarme como persona y profesionalmente. Ustedes han hecho todo por verme salir adelante y les agradezco por eso y mucho más.

A mi hermana Karol, por ser un pilar fundamental en mi vida, agradezco mucho su paciencia y cariño, gracias por haberme apoyado en los días que más lo necesitaba y por ser mi inspiración para ser mejor persona. A mi Isa por ser la luz en mi camino, por ser una niña tan linda que saca lo mejor de mí.

A mi querida familia, abuelitos, tíos, primos quienes con sus palabras de apoyo me ayudaron moralmente a continuar. Y en especial quiero agradecer a mi tía Liseña, que me salvó cuando más lo necesitaba y que continua ayudándome y brindándome su amor.

A mi familia de corazón, la Familia Ramírez. Gracias por los momentos lindos, por siempre estar pendientes de mí, por ser ese ejemplo de unión y lucha.

A Carlos y Miguel por su excelente guía como directores de tesis, por su paciencia, tiempo y confianza prestado para poder culminar este trabajo.

A la EPN y en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica, vaya que me llevo tantos recuerdos y experiencias vividas. Gracias por los días de felicidad y sufrimiento en las aulas de clase y también por las personas extraordinarias que conocí a lo largo de la carrera.

A mis amigos, quienes me han brindado su amistad, y por los momentos inolvidables que compartimos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Alcance	3
1 MARCO TEÓRICO	4
1.1 Contaminantes del aire industrial	4
1.1.1 Contaminantes del aire	4
1.1.2 Contaminación producida por el sector galvanoplástico	5
1.2 Ventilación industrial para tanques de tratamiento	5
1.2.1 Ventilación por dilución	6
1.2.2 Ventilación por extracción localizada	7
1.3 Proceso de recubrimiento de carrocerías	10
1.4 Software para simulación CFD	12
1.4.1 Herramientas aplicadas para el análisis por CFD	13
1.4.2 Validación del análisis CFD	14
2 METODOLOGÍA	16
2.1 Recolección de información	17
2.1.1 Dimensión de la geometría	17
2.1.2 Levantamiento de datos	18
2.1.3 Evaluación de incertidumbre de datos experimentales	24
2.2 Modelado del sistema de ventilación actual	24

2.2.1	Dominio computacional	24
2.2.2	Mallado.....	25
2.2.3	Condiciones de borde.....	28
2.2.4	Configuración del caso de estudio	29
2.3	Validación de simulación con datos experimentales	31
2.4	Diseño de alternativas	32
2.4.1	Documentos referencia.....	32
2.4.2	Tipo del sistema de ventilación	33
2.4.3	Procedimiento según ACGIH.....	33
2.4.4	Diseño de conductos	35
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1	Levantamiento de datos	37
3.1.1	Evaluación de la incertidumbre de datos experimentales	37
3.1.2	Datos para simulación CFD.....	38
3.2	Modelado del sistema de ventilación actual.....	40
3.2.1	Independencia de malla.....	40
3.2.2	Calidad de malla.....	41
3.2.1.	Validación de simulación con datos experimentales	42
3.3	Diseño de Alternativas.....	43
3.3.1	Requerimientos preliminares	43
3.3.2	Alternativas.....	45
3.3.3	Alternativa 2	46

3.3.4	Alternativa 3	46
3.4	Comparación de propuestas.....	47
3.5	Propuesta escogida.....	52
3.5.1	Selección de conductos.....	55
3.5.2	Selección del ventilador.....	56
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
	Referencias Bibliográficas	59
	Anexos	65
	ANEXO 1	65
	ANEXO 2	67
	ANEXO 3	68
	ANEXO 4	69
	ANEXO 5	71
	ANEXO 6	72
	ANEXO 7	73
	ANEXO 8	75
	ANEXO 9	77
	ANEXO 10	78
	ANEXO 11	78
	ANEXO 12	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema de ventilación por dilución	6
Figura 1.2 Distribución de inyectores y extractores en un área de trabajo	7
Figura 1.3 Proceso de electrodeposición	11
Figura 1.4 Metodología del análisis CFD	13
Figura 2.1 Metodología del caso de estudio.....	16
Figura 2.2 Fachada estructura del sistema Elpo de la empresa CIAUTO LTDA.....	18
Figura 2.3 Anemómetro	19
Figura 2.4 Cámara termográfica	20
Figura 2.5 Puntos de medición en la campana de extracción del sistema Elpo.....	22
Figura 2.6 Estructura del directorio para realizar la malla	25
Figura 2.7 Nivel de refinamiento	26
Figura 2.8 Detalle de la malla en la geometría del Elpo	27
Figura 2.9 Condiciones de borde inlet y outlet	28
Figura 2.10 Condiciones de borde en los tanques.	29
Figura 3.1 Estudio independencia de malla.	40
Figura 3.2 Independencia de malla.	41
Figura 3.3 Comparación: a) datos experimentales, b) datos simulación.....	42
Figura 3.4 Sistema de captación local.	44
Figura 3.5 Sistema de captación alzada.	44
Figura 3.6 Alternativa 1 de simulación.	45
Figura 3.7 Alternativa 2 de simulación.	46

Figura 3.8 Alternativa 3 para simulación.	47
Figura 3.9 Comparación de temperatura de las alternativas (vista lateral).	49
Figura 3.10 Comparación de Líneas de velocidad de las alternativas.	50
Figura 3.11 Curvas de comportamiento de temperatura entre alternativas.	52
Figura 3.12 Residuales de simulación Alternativa 3.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Determinación del potencial de peligro.....	4
Tabla 1.3 Tipos de campana. Ventilación localizada.....	8
Tabla 1.4 Velocidad de captación de fuentes contaminantes.....	10
Tabla 1.5 Características en los procesos previos a la electrodeposición.....	11
Tabla 1.6 Códigos comerciales de CFD.....	14
Tabla 2.1 Datos del equipo de medición (anemómetro).....	20
Tabla 2.2 Datos del equipo de medición (cámara termográfica).....	20
Tabla 2.3 Equipos de ventilación.....	22
Tabla 2.4 Condiciones de operación de los tanques del Elpo.....	23
Tabla 2.5 Características de los elementos del sistema.....	25
Tabla 2.6 Independencia de malla.....	27
Tabla 2.7 Condiciones de borde de ventiladores y extractores.....	28
Tabla 2.8 Condiciones de borde en los tanques.....	29
Tabla 2.9 Configuración del caso de estudio.....	30
Tabla 2.10 Determinación del peligro potencial.....	34
Tabla 2.11 Tasa de evolución de gas, vapor o niebla.....	34
Tabla 2.12 Valores recomendados para la velocidad de diseño de conductos.....	36
Tabla 3.1 Cálculo de incertidumbre. Datos tomados a las 08:00.....	37
Tabla 3.2 Cálculo de incertidumbre. Datos tomados a las 14h00.....	38
Tabla 3.3 Datos del ventilador para simulación CFD.....	38
Tabla 3.4 Datos del extractor para simulación CFD.....	39

Tabla 3.5 Flujo másico calculado en base a los datos de reposición de líquido en los tanques.....	39
Tabla 3.6 Flujo másico calculado con la velocidad promedio experimental.....	39
Tabla 3.7 Parámetros de estudio de independencia de malla.	41
Tabla 3.8 Calidad de la malla gruesa.....	42
Tabla 3.9 Error calculado entre los datos experimentales y la simulación.....	43
Tabla 3.10 Vectores de velocidad de las alternativas.....	51
Tabla 3.11 Perfil de temperatura para diferentes tiempos.	54
Tabla 3.12 Criterios de diseño de conductos.	55
Tabla 3.13 Resultado de diseño de ductos para el caudal de extracción.	55
Tabla 3.14 Parámetros para la selección del ventilador de extracción.	56
Tabla 3.15 Ventilador seleccionado para el suministro de aire.....	56

RESUMEN

Los procesos de galvanoplastia que utiliza la industria automotriz requieren de sistemas de ventilación especiales debido a las condiciones de operación desafiantes y el espacio reducido de los talleres. El diseño de estos sistemas de ventilación es fundamental para controlar los contaminantes que se producen durante las operaciones de desengrase. Un sistema de ventilación correctamente diseñado puede mejorar significativamente la seguridad de los talleres confinados y mantener condiciones de trabajo aceptables. En este trabajo, se ha utilizado la dinámica de fluidos computacional CFD para analizar el rendimiento del sistema de ventilación industrial en el entorno del taller de galvanoplastia de la empresa CIAUTO LTDA.

En este estudio se proponen tres alternativas de sistemas de ventilación industrial para la extracción de vapores de agua del proceso de galvanoplastia del área Elpo de la empresa CIAUTO. Las alternativas fueron diseñadas según las recomendaciones de los manuales ACGIH y ANSI. Se realizó una simulación numérica CFD en ANSYS en estado transitorio del sistema actual y de las alternativas propuestas para evaluar el rendimiento de ventilación de estas configuraciones. Como resultado del trabajo se obtuvo que con la alternativa de diseño de ventilación 3 se controló el comportamiento del flujo aire-vapor al interior del sistema Elpo. La alternativa 3, al tener sistemas de captación localizados, permitió extraer un caudal de 0,77 [m³/s] a 1,4 [m³/s], lo que significa una reducción del 47% en la concentración de vapor. En cuanto a la temperatura, las condiciones ambientales dentro del sistema Elpo tuvieron una reducción de temperatura de 26 a 19 [°C], siendo aceptable de acuerdo con las condiciones de operación y confort térmico, lo que hace que la alternativa 3 sea la más adecuada de los tres diseños propuestos.

Palabras clave: sistemas de ventilación, galvanoplastia, captación, ANSYS CFD.

ABSTRACT

Electroplating processes in the automotive industry need special ventilation systems because of challenging operating conditions and limited workshop space. Ventilation system design is important to control the contaminants produced during the degreasing operations. A properly designed ventilation system can significantly improve the safety of confined workshops and maintain acceptable working conditions. This study is based on computational fluid dynamics CFD for the analysis of the performance of the industrial ventilation system in an electroplating workshop environment.

According in this study, it was proposed three alternatives of industrial ventilation systems for the extraction of water steam generated by the electroplating process in the Elpo area of the CIAUTO company. These alternatives were developed according to the guidelines of the ACGIH and ANSI manuals. A numerical CFD simulation was performed in ANSYS in transient state of the system and the alternatives suggested to assess the performance of the ventilation of these configurations. According to the results of the simulation, alternative 3 ventilation system design was chosen to control the behavior of the air-steam flow inside the Elpo system. In this case, alternative 3, due to the localized collection systems, allowed to extract a flow rate from 0.77 [m³/s] to 1.4 [m³/s], which means a 47% reduction in the steam concentration. As for temperature, the environmental conditions inside the Elpo system had a temperature reduction from 26 to 19 [°C], which was acceptable according to the operating conditions and thermal comfort, making alternative 3 the most suitable of the three proposed designs.

Keywords: ventilation systems, electroplating, catchment, ANSYS CFD.

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN Y EXTRACCIÓN DE LOS VAPORES PRODUCIDOS EN EL SISTEMA ELPO EN LA FABRICACIÓN DE CARROCERÍAS EN LA EMPRESA CIAUTO CIA. LTDA

INTRODUCCIÓN

Una persona pasa del 80 al 90% de su tiempo en ambientes interiores, principalmente en casa o en el lugar de trabajo [1]. Por esta razón, las condiciones ambientales interiores representan una contribución notable en el bienestar humano. A nivel mundial, entre las enfermedades ocupacionales más comunes están enfermedades en el tracto respiratorio, enfermedades relacionadas con el calor y enfermedades en la piel [2]. Asimismo, el estrés térmico forma parte de los riesgos ocupacionales más comunes en el ámbito laboral afectando a las personas de forma psicológica, psicofisiológica y patológica [3].

Los trabajos y servicios que realiza la industria comprometen la calidad y condición ambiental interior, entre estas actividades se incluyen: sanidad, metalurgia, galvanoplastia, entre otros [4]. En la industria automotriz, los procesos de desengrasado, recubrimiento y galvanoplastia emiten contaminantes durante su actividad por el uso de disolventes y soluciones químicas [5]. Según un estudio realizado por la revista Americana de Salud Pública sobre la segura operación de tanques de desengrasado, menciona que la exposición a contaminantes por disolventes atribuye síntomas ocasionando problemas al sistema nervioso central y gastrointestinal, tales como náuseas, mareos, dolor de cabeza y malestar en general [6]. Por otra parte, según el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España (NTP), en la nota técnica NTP 925, los impactos en la salud asociados a disolventes repercuten en el daño del sistema nervioso, en problemas renales y efectos hepáticos [7]. Para la segura operación de estos procesos industriales que usan disolventes y soluciones químicas, la ventilación por extracción general y localizada constituye una parte fundamental en la prevención de riesgos ocupacionales, en la mejora de la calidad de aire y del confort térmico [6].

En el diseño de sistemas de ventilación, el objetivo principal es garantizar el suministro de aire necesario para controlar de forma eficaz la calidad de aire interior en la industria. Esto se ha convertido en una tarea de ingeniería desafiante a medida que

los espacios y condiciones de operación se vuelven, más grandes, más complejos y con procesos que ocupan materiales de alta toxicidad. Asimismo, cuando se habla de optimizar sistemas de ventilación, pueden aparecer parámetros críticos que con cálculos analíticos no se pueden determinar. En solución y apoyo en el análisis del flujo, se pueden utilizar métodos numéricos (CFD) para comprender el fenómeno físico del fluido y apoyar en el diseño y optimización de ventilación industrial.

La ensambladora CIAUTO CIA. LTDA. es una empresa ensambladora de vehículos de alta gama ubicada en la provincia de Tungurahua y lleva fabricando para la marca Great Wall desde el 2013. En el 2016 se inauguró la planta de pintura, la cual cuenta con el sistema Elpo, horno Elpo, línea de sellado, pulido, esmalte, horno de secado y acabado. En la planta de pintura, se emiten vapores, calor, gases y contaminantes durante todo el proceso de fabricación. Por tal razón, la empresa cuenta con sistemas de ventilación y extracción localizada en las fuentes de contaminación más críticas (hornos y sistema Elpo). Aun así, el ambiente dentro de la planta presenta altas concentraciones de contaminación e incomfort térmico.

El sistema Elpo se emplea para realizar el proceso de tratamiento térmico para la protección anticorrosiva por electrodeposición previo al proceso de pintura. Este sistema es un factor de contaminación crítico dentro de la planta porque existe un desfogue descontrolado de vapores hacia los alrededores. Los operarios que trabajan en dicho proceso están constantemente expuestos a emisiones de vapor, calor y gases concentrados que conducen a enfermedades ocupacionales e incomodidad térmica. Además, debido al contacto e infiltración de los vapores que se dirigen súbitamente al techo y paredes, la infraestructura del sistema Elpo se está deteriorando rápidamente, haciendo que los trabajos de mantenimiento sean adelantados y costosos.

El trabajo presentado detalla el proceso de diseño preliminar para una solución de ventilación para el sistema Elpo de la Ensambladora CIAUTO CIA. LTDA. El objetivo principal del proyecto es encontrar una forma más adecuada de ventilar el espacio donde se realizan los trabajos de galvanoplastia (electrodeposición) mediante el uso de análisis numérico CFD; con el objetivo de determinar el comportamiento del fluido se simula el sistema de ventilación actual y luego en base a los resultados de simulación CFD y documentos bibliográficos determinar alternativas de ventilación que permitan reducir las concentraciones de vapor en el interior del sistema Elpo a un nivel aceptable.

Objetivo general

Diseñar y simular el sistema de ventilación y extracción de los vapores producidos en el sistema Elpo en la fabricación de carrocerías en la empresa CIAUTO CIA. LTDA.

Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica del sistema de ventilación actual.
- Determinar los parámetros de diseño del sistema de ventilación.
- Evaluar el sistema de ventilación y extracción mediante simulación CFD.
- Establecer la configuración del sistema de ventilación que cumpla con los requerimientos de diseño.
- Diseñar los ductos de distribución de aire del sistema Elpo.

Alcance

Desarrollar un sistema de ventilación óptimo en la empresa CIAUTO CIA. LTDA., que funcionará durante el proceso de tratamiento térmico para la protección anticorrosiva por electrodeposición (Elpo) de las carrocerías. Este sistema brindará soluciones y beneficios a la empresa mediante la correcta captación de los vapores expulsados en algunas etapas del proceso, reduciendo así los riesgos de salud ocupacional, estrés por calor que existe en el área del Elpo y los daños provocados por estos vapores en la estructura de este.

Este proyecto se limitará a los requerimientos y sugerencias dadas por la empresa, de forma que el modelo presentado posea una extracción adecuada de vapores y correcta ventilación de las zonas críticas del sistema con costos de ejecución reducidos. Además, que cumpla con las condiciones ambientales que las carrocerías necesitan para su correcto procesamiento.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Contaminantes del aire industrial

1.1.1 Contaminantes del aire

Las diversas actividades realizadas en el sector industrial hacen que el entorno de trabajo sea propenso a emisiones y procesos contaminantes que afectan las condiciones ambientales interiores [8]. La industria automotriz hace uso de secciones especializadas en procesos galvanoplásticos para la fabricación de carrocerías donde se realizan diversos trabajos de limpieza, revestimiento y protección de las superficies metálicas contra la corrosión [9], [10]. Estos procesos implican el uso de disolventes y soluciones químicas activas, que junto a las temperaturas de trabajo emiten contaminantes que afecta potencialmente al ambiente interior y la salud ocupacional, pues los trabajadores están expuestos directamente a las nieblas y aerosoles emitidos de los baños del proceso [10].

Los contaminantes del aire más comunes en la industria galvanoplástica comprenden límites de concentración tóxica máximos que no se debe exceder en ningún momento. Esta concentración tóxica define al contaminante como un riesgo potencial de clase A-1 a D-4, donde A-1 tiene el mayor riesgo de salud y peligros de incendio, mientras que D-4 tiene el más bajo.

Tabla 1.1 Determinación del potencial de peligro.

Potencial de peligro			Tasa de evolución del gas		
Peligro potencial	Gas y vapor [ppm]	Neblina [mg/m ³]	Índice	Tiempo de evaporación	Asfixia con gas
A	0-10	0-0.1	1	0-3 [h]	Alto
B	11-100	0.11-1.0	2	3-12 [h]	Medio
C	101-500	1.1-10	3	12-50 [h]	Bajo
D	>500	>10	4	>50 [h]	Nulo

(Fuente: [11])

Los contaminantes del aire con riesgo potencial de varias sustancias utilizadas en tanques de superficie que usa la galvanoplastia en su mayoría comprenden la clase B-1. Las sustancias como Alcohol etoxilados, propoxilados, alcoholes grasos y tricloroetileno, son un ejemplo de sustancias peligrosas cuya exposición máxima permitida se detalla en la norma ANSI/AIHA Z9.1-2006 [11].

1.1.2 Contaminación producida por el sector galvanoplástico

La galvanoplastia es un proceso que genera altas concentraciones de contaminación en comparación con otras actividades industriales. Debido a la naturaleza de los productos, el tipo de baño galvánico e incluso los materiales a tratar se generan residuos peligrosos que contienen sustancias agresivas y altamente nocivas para el medio ambiente. En la industria galvanoplástica se registran contaminantes compuestos de ingredientes peligrosos como: Alcohol etoxilados, propoxilados, alcoholes grasos y tricloroetileno, etc. Estas sustancias se encuentran en descargas líquidas, restos de sólido de material generados por el arrastre de partículas y emisiones atmosféricas del proceso [9]. La Tabla 1.1 detalla los efectos a la salud de algunos solventes usados en el desengrase de superficies metálicas.

Tabla 1.2 Residuos por electrodeposición y sus efectos en la salud.

Parámetro	Efecto por respiración	Efecto por contacto
Alcohol etoxilados	Cáncer pulmonar Problemas gastrointestinales	Enfermedades de la piel
Propoxilados,	Irritación en vías respiratorias	Irritación en ojos y piel
Tricloroetileno	Irritación de vías respiratorias	Quemaduras
Alcohol graso	Daños al sistema respiratorio	Dermatitis o irritación

(Fuente:[7])

1.2 Ventilación industrial para tanques de tratamiento

Los tanques de desengrasado, tratamiento y acabado utilizados en la industria de galvanoplastia generalmente utilizan solventes orgánicos como materiales líquidos en sus procesos. Para la segura operación en estos procesos, la ventilación industrial constituye una parte fundamental en la prevención de riesgos ocupacionales [6]. La norma ACGIH recomienda ventilación en esta industria, particularmente en tanques de desengrasado por vapor, cuando:

- El fabricante de solventes recomienda ventilación.
- El depósito no está equipado con serpentines de condensador de vapor.
- Hay emisiones fugitivas, etc.

Al diseñar sistemas de ventilación para tanques abiertos, la ACGIH establece que se debe usar un sistema de ventilación de dilución para contaminantes de vapor orgánico con una toxicidad de al menos 100 ppm [12]. Por otro lado, la norma ANSI/Z9.1

establece que se requiere ventilación local para operaciones de tanque abierto cuando el riesgo potencial de contaminación es inaceptable [11].

1.2.1 Ventilación por dilución

La ventilación por dilución o general utiliza ventilación mecánica o forzada para adecuar ambientes interiores con criterios aceptables. Es un método que disminuye la concentración de aire contaminado al añadir aire limpio para el control de las condiciones atmosféricas en espacios industriales calurosos o contaminados.

El área de trabajo se ventila mediante la inyección y extracción del aire, de forma que los contaminantes (vapores, gases y partículas) son transportados por el aire limpio hacia los puntos de escape [12]. La Figura 1.1 muestra un sistema de ventilación básico por dilución.

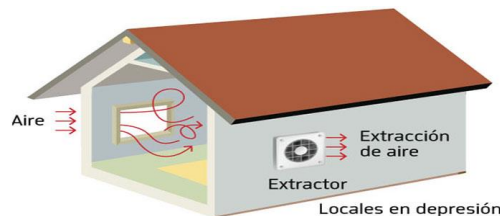


Figura 1.1 Sistema de ventilación por dilución
(Fuente: [12])

Para una correcta aplicación de estos sistemas, se deben considerar los siguientes principios de diseño:

Cálculo del flujo de aire a inyectar: La dilución adecuada de los contaminantes requiere un flujo de aire controlado para mantener el entorno de trabajo por debajo de los límites aceptables de calidad del aire. Para este cálculo se requieren parámetros como: tipo de contaminante, concentración del gas o vapor, capacidad del sistema de ventilación y dimensiones del local.

Aberturas de escape: De ser posible, las salidas de aire se deben ubicar cerca de los sectores críticos, de modo que funcione como extracción local. Esto prevé la dispersión de los contaminantes por el área de trabajo.

Correcto barrido de los contaminantes: Consiste en la ubicación de inyectores y extractores en puntos estratégicos donde el aire pase por las zonas de contaminación con un barrido global hacia los puntos de extracción.

Compensar las entradas y salidas de aire: Se refiere al balance de flujo que ingresa y sale. Pueden existir situaciones donde exista un desbalance debido a la depresión o sobrepresión que se genera en un espacio dado como cocinas, oficinas, quirófanos, entre otros. Este suceso dependerá de la ubicación y distribución de los sistemas de ventilación o de la aplicación que se requiera.

Evitar la recirculación del flujo contaminado: Las zonas de captación del contaminante deben estar ubicados de forma que estos no reingresen al espacio ventilado [13]. En la Figura 1.2 se muestra diferentes configuraciones en la distribución de inyectores y extractores en un área de trabajo.

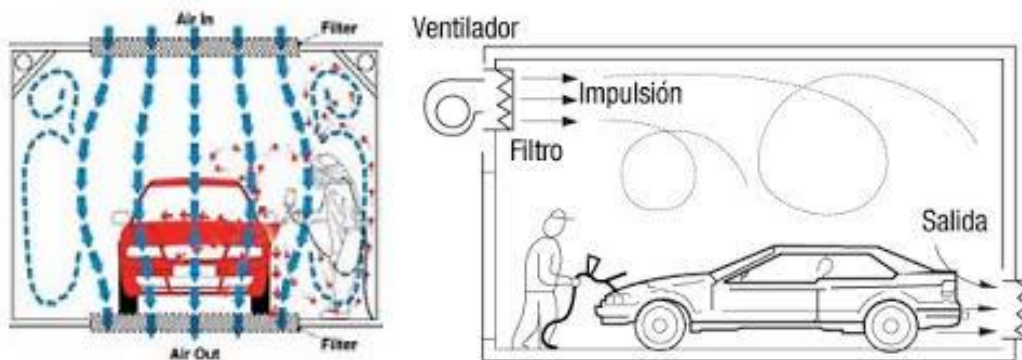


Figura 1.2 Distribución de inyectores y extractores en un área de trabajo
(Fuente: [14])

A parte de los principios de diseño considerados en la ventilación por dilución, es importante tener en cuenta las condiciones y limitaciones que pueda imponer un determinado proceso. Estas limitaciones generalmente son características del lugar de trabajo, operaciones a realizarse, materiales ocupados y condiciones climáticas de la zona.

1.2.2 Ventilación por extracción localizada

La ventilación de extracción localizada permite capturar directamente las emisiones de aire contaminado antes de que se dispersen por la atmósfera del entorno de trabajo. Los sistemas de captación localizada se ubican cerca de las zonas donde se originan las sustancias nocivas que rápidamente serán evacuadas antes de que estas se mezclen en el ambiente. Este método de extracción es estrictamente necesario en procesos donde se emiten altas cantidades de sustancias tóxicas [15].

La principal ventaja respecto a los sistemas de ventilación por dilución es el requerimiento de menores cantidades de aire para que los espacios cumplan con los niveles de calidad de aire, lo que significa la reducción de costes de implementación y

funcionamiento [16] . El Sistema de extracción localizada cuenta con los siguientes elementos para un correcto funcionamiento:

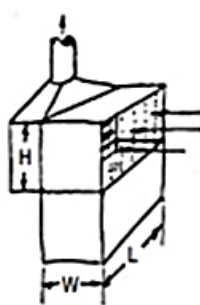
- Sistema de captación
- Sistema de transporte de contaminantes
- Sistema separador
- Extractor de aire

En base al propósito de aplicación, existen diversas configuraciones de sistemas de extracción localizada para cubas abiertas, las cuales, presentan diversas características operativas. En el ANEXO 1 se listan algunas de las configuraciones, citadas por el manual de ventilación ACGIH.

1.2.2.1 Campana de extracción local

La campana es una estructura usada en los sistemas de ventilación por extracción localizada, que permite capturar total o parcialmente los contaminantes generados en un proceso dado. Su función principal es evitar la propagación del contaminante por el resto del entorno encerrándolo en su interior para luego ser dirigido hacia los sistemas de extracción [16]. Como se muestra en la Tabla 1.2 el tipo de campana se relaciona con el caudal a extraer. Es de suma importancia que se realice un correcto diseño y posicionamiento, caso contrario, el sistema puede ser ineficiente e impedir su adecuado funcionamiento, provocando costes de operación excesivos. Para evitar esto, existen normas y notas técnicas que especifican los parámetros necesarios para su correcta aplicación.

Tabla 1.2 Tipos de campana. Ventilación localizada.

Campana	Descripción	Ec. de área aproximada [ft ²]	Notas
	<p>Cerrado, de cinco lados, también "Plenum hacia arriba"</p> <p>Área: Plano frontal, "cara"</p>	$A \approx L \times h$	<p>Profundidad del plenum $\geq 2-4$ veces la anchura total de la ranura (para todas las campanas de extracción laterales).</p> <p>Velocidades de rendija a 1500-2000 [fpm] (para todas las campanas de extracción laterales). Las velocidades de ranura > 2000 son ruidosas.</p>

	<p>Cerrado, con otras aberturas</p> <p>Área: Plano frontal más cualquier otra zona abierta en la campana</p>	<p>$A \approx L \times h$</p> <p>Más otras áreas abiertas</p>	<p>Otras aberturas deben reducirse al mínimo, pero ser compatibles con el trabajo y las prácticas laborales.</p> <p>$h \geq w$</p>
	<p>Extracción lateral (tiro lateral) Campana con deflectores laterales o en los extremos</p> <p>También Campana "Plenum hacia arriba", "Campana lateral"</p> <p>Área: Cuarto de cilindro</p>	<p>$A \approx 0,5\pi wL$</p>	<p>Las campanas en serie sin deflectores laterales actúan como una sola campana con deflectores.</p> <p>Se utiliza una sola ranura para controlar las emisiones de la superficie del tanque</p> <p>$h \geq w$</p>
	<p>Extracción lateral (tiro lateral) Campana con deflectores laterales o en los extremos</p> <p>Área: Cuarto de cilindro más dos cuartos de círculo</p>	<p>$A \approx 0,5\pi wL$</p> <p>$+\pi w^2$</p>	<p>Una pared a lo largo de cualquier lado actúa como un deflector</p> <p>$h \geq w$</p>

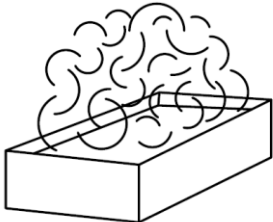
(Fuente: [11])

1.2.2.2 Velocidad de captación

Es la velocidad del flujo de aire requerida para arrastrar los contaminantes del foco de emisión hacia los sistemas de desfogue. Los sistemas de extracción localizada exigen velocidades mínimas para garantizar el transporte de contaminantes de un lugar a otro. Por este motivo, la velocidad del aire debe ser capaz de evitar un contraflujo, suspensión de aire contaminado o sedimentación en el interior de los canales [16].

La Tabla 1.3 muestra las velocidades mínimas de captación para el diseño de un sistema de extracción en función del contaminante a transportar.

Tabla 1.3 Velocidad de captación de fuentes contaminantes.

Fuente de contaminación	Características	Ejemplos	Velocidad de captación [m/s]
<p>Únicamente gases y vapores</p> 	Desprendimiento con velocidades casi nulas y aire quieto.	Cocinas. Evaporación en tanques. Desengrasado.	0,25-0,5
	Desprendimientos a baja velocidad en aire tranquilo.	Soldadura. Decapado. Talleres galvanotecnia.	0,5-1
	Generación activa en zonas de movimiento rápido del aire.	Cabinas de pintura.	1-2,5

Se adoptarán valores en la zona inferior o superior de cada intervalo según los siguientes criterios:

Inferior	Superior
Pocas corrientes de aire en el local. Contaminantes de baja toxicidad. Intermitencia de las operaciones. Campanas grandes y caudales elevados.	Corrientes turbulentas en el local. Contaminantes de alta toxicidad. Operaciones continuas. Campanas de pequeño tamaño.

(Fuente: [16])

1.3 Proceso de recubrimiento de carrocerías

La industria automotriz utiliza procesos especiales de galvanoplastia por medio de la electrodeposición de un material sobre la superficie de una pieza metálica para darle características protectoras contra agentes ambientales a los que se exponen los vehículos. Estos procesos junto con el uso de recubrimientos tienen un efecto productivo en términos de durabilidad, características estéticas, resistencia al calor, protección contra la corrosión de la carrocería, entre otras aplicaciones [16].

Electrodeposición

La electrodeposición es un tratamiento químico que consiste en sumergir una parte metálica en un medio líquido compuesto de disolventes, aditivos y pigmentos. El proceso de electrodeposición recubre la superficie metálica a través de una fuente externa de corriente continua, donde se conecta positivamente a la parte metálica y negativamente al recipiente del medio líquido [18]. Este suceso carga negativamente las partículas de los compuestos dirigiéndolos hacia la pieza donde al acumularse crea

un recubrimiento en toda la superficie metálica. La Figura 1.3 muestra cada etapa del proceso de electrodeposición.

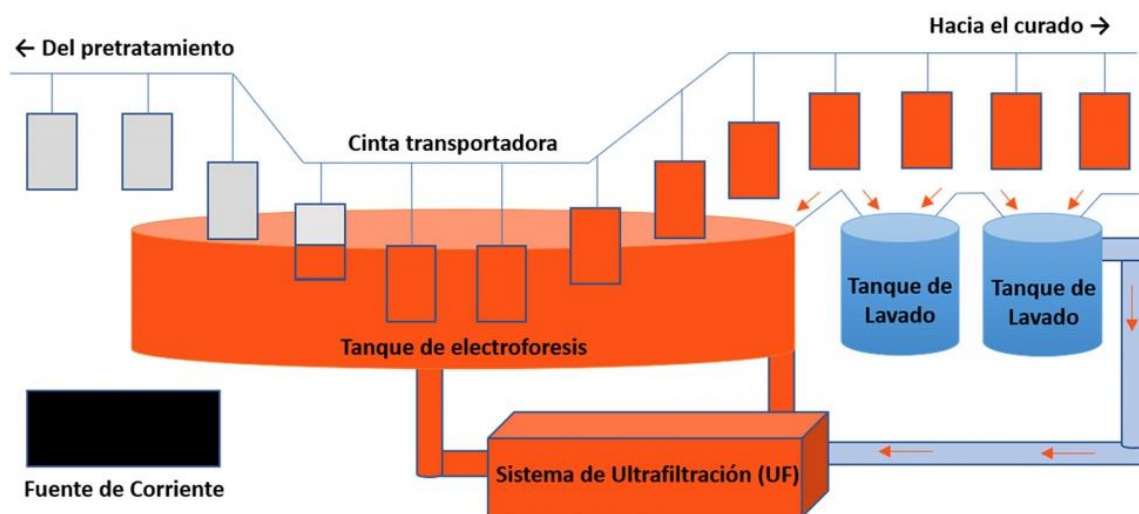


Figura 1.3 Proceso de electrodeposición
(Fuente: [19])

Para una correcta adhesión de las partículas protectoras, se realiza un pretratamiento que incluye la limpieza de la superficie metálica mediante una serie de baños cargados de componentes líquidos. La pre-limpieza superficial retira el material contaminado que proviene de los pre lubricantes, aceites minerales e inhibidores protectores contra la corrosión que usan los fabricantes de automóviles para la movilidad y manipulación de las carrocerías.

Existen tres etapas que se aplican antes de realizar la electrodeposición, estas etapas son: preparación de la superficie, tratamiento y acabado [20]. En la Tabla 1.4 se indican los procesos previos a la electrodeposición junto con la materia prima requerida para su ejecución, a esto se agregan los residuos obtenidos de los métodos que implica cada proceso.

Tabla 1.4 Características en los procesos previos a la electrodeposición.

Proceso	Método	Materia prima	Residuos
	Limpieza Manual	N/A	Granos de metal Polvos de soldadura
Preparación Superficial	Desengrase	Solventes orgánicos e inorgánicos Soluciones acuosas de álcalis Disolvente	Emisiones tóxicas de solventes orgánicos Residuos sólidos

	Decapado	Soluciones alcalinas: hidróxidos, carbonatos, aditivos orgánicos e inorgánicos y surfactantes Soluciones ácidas: ácido sulfúrico, clorhídrico, fluorhídrico Disolvente	Emisiones alcalinas y ácidas Residuos sólidos
	Activado	Soluciones ácidas: ácido sulfúrico, fosfórico, crómico, nítrico, cítrico	Emisiones alcalinas y ácidas Residuos sólidos
Tratamiento	Electrólisis	Soluciones de: Cromo-Níquel-Cobre-Cianuro Agentes químicos: trisulfonato naftaleno sódico y formaldehido	Emisiones alcalinas y ácidas Residuos sólidos
Acabado	Acabado	Soluciones de ácido clorhídrico	

(Fuente: [20])

1.4 Software para simulación CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) utiliza recursos informáticos y métodos numéricos para predecir el comportamiento de los fluidos mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes: conservación de masa, energía y momento [21]. El CFD es una herramienta versátil usada como alternativa de solución a problemas ingenieriles. Su aplicación en la industria se usa tanto como los métodos tradicionales experimentales y analíticos para resolver los problemas de flujo de los fluidos [22].

En sistemas de ventilación, el análisis CFD tiene una capacidad de investigación y desarrollo que permite obtener de forma visual, cuantitativa y cualitativa el comportamiento y propiedades del flujo de aire [23]. En general, para la aplicación de sistemas ventilación, CFD permite obtener resultados con facilidad sobre los puntos de estancamiento, concentración de contaminantes y parámetros como velocidad, presión y temperatura del flujo [24].

La Figura 1.4 muestra el orden de ejecución para desarrollar simulaciones CFD. Los pasos para seguir representan la metodología que todo software de simulación ya sea privado o gratuito utiliza para el análisis CFD.

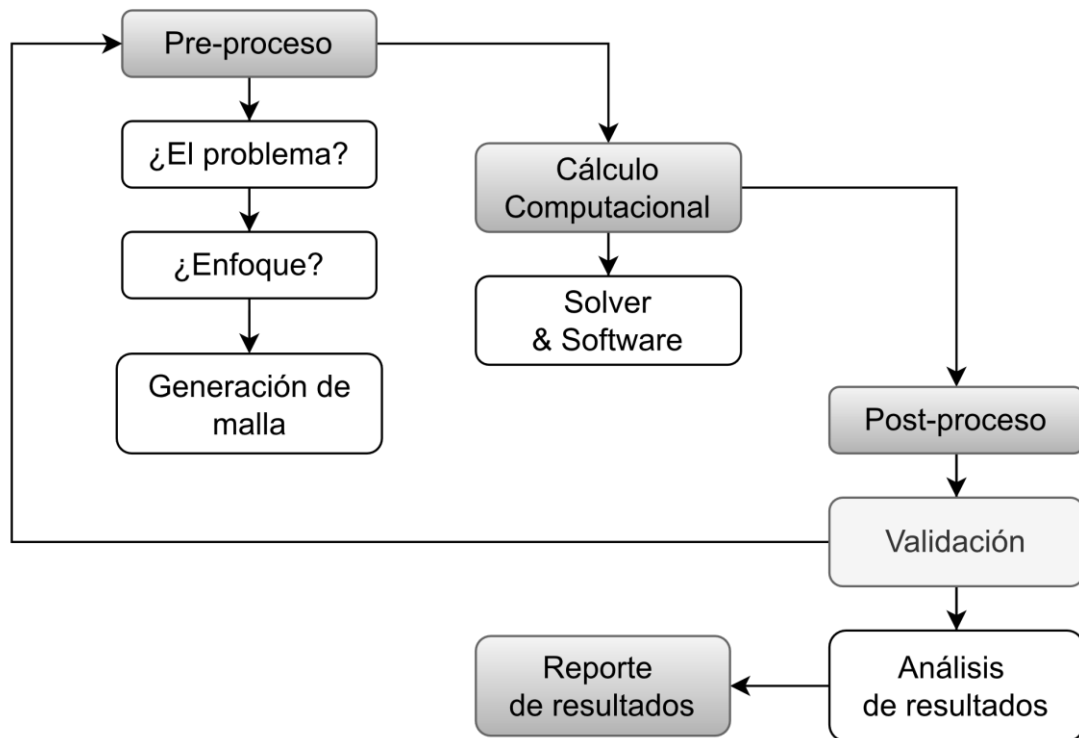


Figura 1.4 Metodología del análisis CFD
(Fuente: [25])

1.4.1 Herramientas aplicadas para el análisis por CFD

Hoy en día el desarrollo y comercialización de herramientas especializadas en CFD ha crecido notablemente con el fin de abastecer la creciente demanda y expansión en los campos de aplicación. Los códigos comerciales de CFD se clasifican en dos categorías: privados o gratuitos, cada uno con una alta gama de funcionalidades y requerimientos que proporcionan al usuario facilidad en el análisis de propósitos generales o específicos [26].

Entre las herramientas CFD más usadas para el análisis de sistemas de ventilación se encuentran OpenFOAM como herramienta gratuita, así como SimScale y Fluent de ANSYS Inc con licencias de tipo privada. Cada herramienta incluye en su composición requerimientos que permiten realizar actividades de preprocesamiento, cálculo numérico, postprocesamiento, generación de malla, condiciones iniciales y de frontera, entre otros. Aunque cada herramienta cumple con los objetivos de análisis de fluidos, existen diferencias a considerar al momento de seleccionar el programa adecuado para la simulación del sistema de ventilación. La Tabla 1.5 resume las particularidades de las herramientas CFD más comunes del mercado.

Tabla 1.5 Códigos comerciales de CFD.

Herramienta	Licencia	Interfaz Gráfica	Características
Ansys Fluent	Comercial	Si	Costo elevado, buena precisión. Resultados precisos con un alto consumo computacional.
OpenFOAM	Gratuita	No	Código abierto. Resultados precisos con un bajo consumo computacional.
SimScale	Comercial	Si	Costo elevado. Se trabaja por medio de un navegador web. Resultados precisos con un alto gasto computacional.
Autodesk CFD	Comercial	Si	Costo elevado. Mallado automático para modelos geométricos y precisión aceptable.

(Fuente: [27], [28])

1.4.2 Validación del análisis CFD

La validación permite cuantificar si los resultados del análisis numérico CFD pueden representar la realidad, por ello los resultados tienen que ser comparados con resultados analíticos o experimentales [29] Para ello, previo a la etapa de análisis de resultados, los criterios de validación del modelo como: geometría, condiciones de contorno, análisis de malla y configuración del caso deben ser validados en base a la literatura [30].

En sistemas de ventilación, los criterios a validar se relacionan directamente con las condiciones de contorno, estas pueden ser: temperatura, velocidad, presión y caudal [31]. Para la validación de resultados CFD, puede aplicarse las siguientes directrices sobre validación de modelos:

- El conjunto de datos experimentales que se emplee debe ser independiente de cualquier conjunto de datos para la construcción del modelo CFD. La calidad y exactitud de los datos deben comprobarse con atención y deben incluir mediciones destinadas a la validación del CFD. Asimismo, debe comprobarse que estos conjuntos de datos previstos son coherentes con las condiciones iniciales y de contorno para la simulación CFD.
- El modelo CFD debe ser validado con respecto al conjunto de datos de una aplicación con similares características físicas y estructuras de flujo. Los resultados obtenidos con la CFD deben contrastarse siempre con las características más destacadas y relevantes del flujo.

- En caso de flujos de fluidos complejos, debe tenerse en cuenta la taxonomía del flujo, y en este caso se recomienda validar el modelo CFD en relación con flujos más simples pertinentes. La utilización de casos de prueba sencillos permitiría evaluar diferentes densidades de malla, de modo que puedan investigarse los resultados de los cálculos con la resolución de malla típica prevista en la aplicación [32].

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo. Este estudio se enfoca en analizar el comportamiento actual de los sistemas de ventilación en el sistema Elpo y mejorar su diseño para obtener un incremento en su eficiencia. Esto se realizará mediante un análisis CFD con el módulo Fluent del software ANSYS, el cual permitirá determinar los puntos críticos del sistema para encontrar la solución más factible.

La Figura 2.1 muestra la metodología para desarrollar el presente estudio. La cual inicia con el levantamiento de datos para modelar el sistema de ventilación del Elpo. Se empleará instrumentos de medida proporcionados por la empresa para la toma y validación de datos y se realizará la prueba de incertidumbre para obtener los datos fiables de las mediciones experimentales.

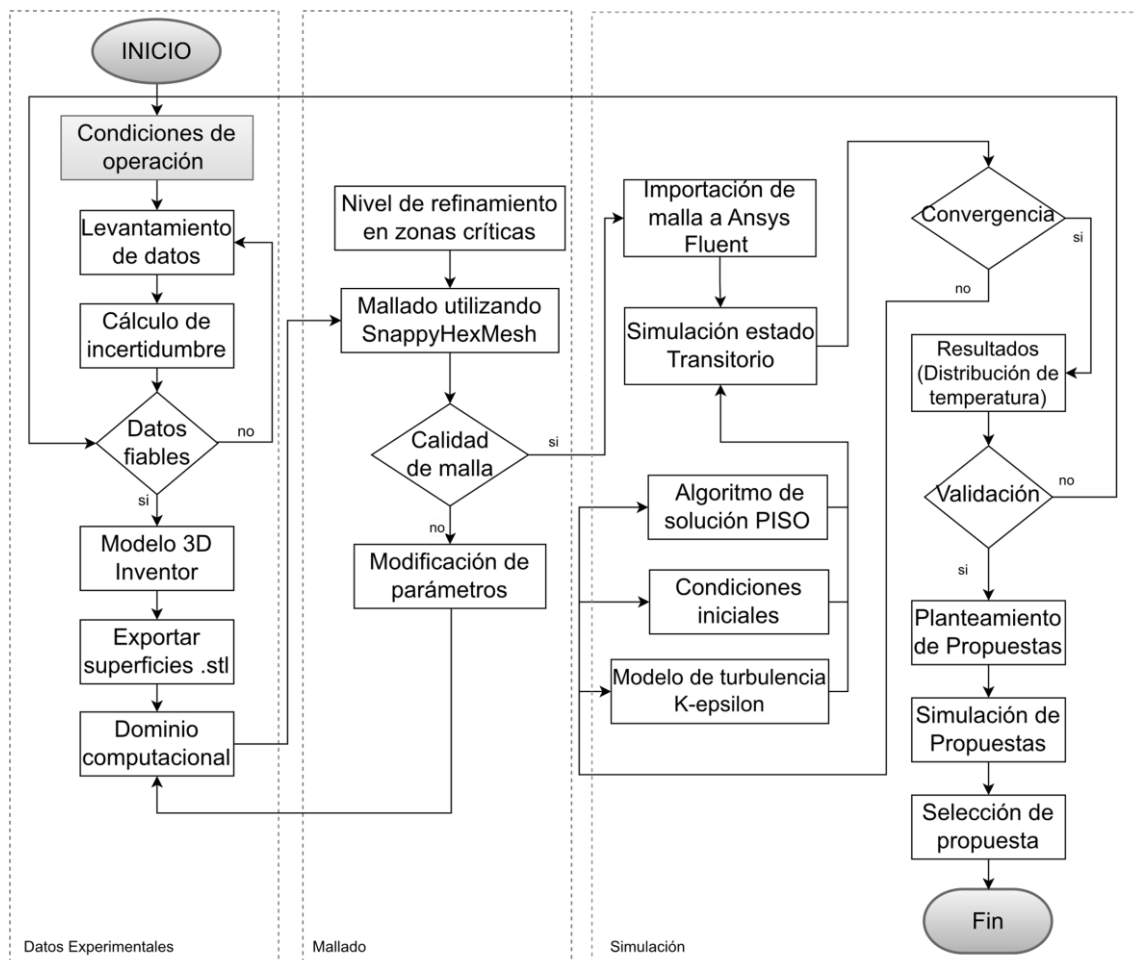


Figura 2.1 Metodología del caso de estudio
(Fuente: Propia)

Una vez obtenidos los datos fiables, el siguiente paso es realizar el mallado del dominio computacional. Para esto, se realiza la modelación 3D del sistema con el software Inventor, posteriormente se importa las superficies de este modelo al software snappyHexMesh de *OpenFoam* para generar la malla. Se verificará que cumpla con los criterios de calidad y aceptación de malla establecidos, caso contrario se realizarán las modificaciones de los parámetros necesarios y se mallará nuevamente. Luego, se importa el dominio mallado al módulo *Fluent* de ANSYS, con la finalidad de desarrollar una simulación de CFD.

Una vez importada la malla, se procede a definir las condiciones iniciales y de borde en base a las condiciones de operación que posee el sistema. Luego se procede a seleccionar el modelo de turbulencia requerido para describir adecuadamente el comportamiento del caso de estudio. Después de obtener una simulación que cumpla con los criterios establecidos, se realiza un post proceso con la finalidad de obtener los perfiles de temperatura requeridos para validar el estado actual del sistema. Esta validación permite identificar las zonas críticas existentes y proceder con el planteamiento de las propuestas y modificaciones del sistema. El diseño de las propuestas se realizará en base normas y guías técnicas, una vez diseñadas serán simuladas con la configuración actual para evidenciar si existe una mejora.

Se realiza una verificación de cumplimiento de requerimientos del sistema brindados por la empresa. En caso de que estos se cumplan se seleccionará dicha propuesta como ganadora, y se procederá a realizar un post proceso que permita visualizar la mejora de los campos de temperatura y distribución de velocidades. Finalmente se presentará un informe con los resultados obtenidos para así concluir con el objetivo de este estudio.

2.1 Recolección de información

2.1.1 Dimensión de la geometría

La geometría del caso fue escalonada de tal forma que cumpla las dimensiones de la geométrica existente del sistema Elpo. Los datos más relevantes para el modelado incluyen las dimensiones de la estructura, ubicación de las fuentes de calor, aberturas en el espacio, escapes mecánicos y suministro de aire. En el ANEXO 2 se observa la dimensión estructural del Elpo proporcionado por la empresa.

El sistema Elpo cuenta con cinco sistemas de ventilación distribuidos a lo largo del techo, cada sistema de ventilación tiene suministro y succión de flujo. La Figura 2.2 muestra la ubicación de los sistemas de ventilación actual en el sistema Elpo de la empresa CIAUTO.



Figura 2.2 Fachada estructura del sistema Elpo de la empresa CIAUTO LTDA.
(Fuente: Propia)

Por otro lado, internamente la estructura del Elpo cuenta con once tanques utilizados en el proceso de galvanoplastia, estos se ubican secuencialmente a lo largo de la estructura, y bajo el techo un puente grúa se encarga de mover la carrocería por todos los tanques. En el diseño del modelo CAD se omitirá la geometría del puente grúa ya que es un elemento que no representa un análisis para el fluido.

Una vez obtenida la información relevante de todo el caso de estudio, se recreó el modelo 3D del sistema de forma realista mediante el software *Inventor 2023*. La escala del modelo recreado es de 1:1.

2.1.2 Levantamiento de datos

A través de una investigación de campo se obtuvo la información requerida para el desarrollo del estudio donde como punto crucial se inicia determinando los datos de temperatura y condiciones de operación del sistema Elpo de la empresa CIAUTO. Para obtener esta información se utilizan instrumentos y dispositivos de medición, aplicando las técnicas de recolección de datos para determinar las condiciones de

trabajo. Para asegurar que la obtención de datos sea adecuada es necesario referenciar a la Norma 111 de ASHRAE que indica la instrumentación y calibración mínima requerida para efectuar las mediciones en campo [33].

Para medir el caudal, temperatura y presión según la norma ASHRAE 111-2008 es preciso que la obtención de datos se realice en diferentes puntos de control, donde dependerán de la longitud y los cambios de sección que existen en el diseño de ductos. Además, la nota técnica NTP 668 menciona criterios a seguir a la hora de medir los caudales en sistemas de ventilación localizada [34].

2.1.2.1 Equipos

Recolectar datos con precisión y exactitud de velocidad, temperatura y presión del aire a través de conductos en sistemas de ventilación es una tarea difícil, es por eso que existen varios equipos que ayudan a la obtención de estos datos [33].

- Equipos de medición de la velocidad del aire: Sensores de flujo de aire, Anemómetro, anemómetro de hilo caliente.
- Equipos de medición de temperatura del aire: Sensor de temperatura, termómetro bimetalico, termocupla, cámara termográfica.
- Equipos de medición de presión del aire: manómetros, transmisores de presión diferencial.

Anemómetro

Este instrumento también es conocido como velocímetro de álabes y su medición se basa en las revoluciones por minuto del rodete, medida directamente proporcional a la velocidad del fluido.



Figura 2.3 Anemómetro
(Fuente: propia)

Este instrumento puede medir la temperatura del flujo y la humedad relativa; los anemómetros son comúnmente utilizados como instrumento de medida en campos de

ventilación, calefacción, aire acondicionado, etc. Se deben calibrar cada seis meses [33]. Certificado de calibración del equipo se encuentra en el ANEXO 3.

Tabla 2.1 Datos del equipo de medición (anemómetro).

Modelo	Características	Datos
Equipo	Marca	MASTECH
	Modelo	MS6252B
	Serie	
Datos de imagen y ópticos	Rango de medición	0,2-5 [m/s]
	Precisión de temperatura	3% 0,1 dgt
	Rango de viento	0
	Precisión de temperatura	2 [°C]
	Resolución	0,1 [m/s]

(Fuente: [35])

Cámara termográfica

Es un equipo que mide la temperatura e indica una imagen térmica de los objetos a partir de las emisiones de radiación infrarroja. La información de temperatura de las imágenes térmicas es determinada por cada píxel; y su calibración es anual [33]. Certificado del equipo se encuentra en el ANEXO 4.



Figura 2.4 Cámara termográfica
(Fuente: propia)

Tabla 2.2 Datos del equipo de medición (cámara termográfica).

Modelo	Características	Datos
Equipo	Marca	FLIR
	Modelo	E4
	Serie	Ex
Datos de imagen y ópticos	Resolución de IR	60 x 60 píxeles
	Sensibilidad térmica NETD	0,15 °C (0,27 F)/ 150 mK
	Campo de visión FOV	45° x 34°

	Distancia mínima de enfoque	0,5 [m]
	Resolución espacial IFOV	10,3 [rad]
	Número F	1,5
	Frecuencia de imagen	9 Hz
	Enfoque	Fijo
Datos del detector	Tipo de detector	Matriz de plano focal FPA
	Rango espectral	7,5 – 13
Medición	Rango de temperatura	-20 [°C] a +250 [°C]
	Precisión	2°C% de lectura para temperatura ambiente de 10 [°C] a 35 [°C] Temperatura del objeto superior a +0 [°C]

(Fuente: [35])

2.1.2.2 Mediciones de velocidad del flujo

Se realizaron varias tomas de velocidad en dos puntos importantes. La primera toma se realizó en la entrada de las campanas de extracción exactamente en cada uno de los orificios que muestra la Figura 2.5 La segunda medición fue en la entrada de aire del ventilador. Para las dos tomas se consideró criterios que proporciona la nota técnica NTP 668 a la hora de medir. La nota técnica menciona que la medición de la velocidad depende del tipo de régimen de flujo que circula por la sección del ducto. Se determina que en la entrada de sistemas de ventilación localizada el régimen de trabajo es turbulento incluso a velocidades bajas [34].

Tanto para la toma de datos en los conductos cuadrangulares del ventilador y extractor, se realizó una división de la sección del conducto en cuadrados de igual área. Como especifica la NTP 668, el instrumento de medida se ubica en dirección del flujo donde se mide la velocidad en el centro de cada uno de ellos.

En cuanto al horario de medición, como el sistema Elpo se encuentra en funcionamiento de 07:00 a 15:00, los sistemas de ventilación permanecen encendidos durante todo este periodo, por tanto, se realizaron dos mediciones de velocidad de aire en los turnos de: 08:00 y 14:00.

Se realizaron 5 mediciones en cada orificio del conducto, generando 10 mediciones por cada orificio según el horario mencionado.



Figura 2.5 Puntos de medición en la campana de extracción del sistema Elpo
(Fuente: Propia)

2.1.2.3 Datos de presión

Por otro lado, los datos de presión de los equipos mecánicos se obtuvieron a través de fichas técnicas de los fabricantes. En el ANEXO 5 se muestra la ficha técnica del equipo de ventilación.

Tabla 2.3 Equipos de ventilación.

Datos	Ventilador centrífugo	Extractor 1	Extractor 2
Modelo:	CYIH100-80-125	F4-72	F4-72
Potencia:	1,5 [kW]	1,5 [kW]	5,5 [kW]
Velocidad:	2900 [RPM]	2900 [RPM]	2900 [RPM]
Amperaje:	5,5. [A]	2 [A]	5,5 [A]
Capacidad:	2356 [m ³ /h]	4012-7419 [m ³ /h]	4012-7419 [m ³ /h]

(Fuente: Propia)

2.1.2.4 Flujo másico de piscinas

La empresa proporcionó una información estimada sobre la reposición de volumen del componente líquido después de una jornada de trabajo. Este valor proporcionado tiene poca credibilidad debido a la falta de evaluación, por lo que se realizaron medidas experimentales de velocidad de emisión para determinar el flujo másico de vapor en los tanques y compararlo según normas.

En base al proceso de galvanoplastia mencionado en la sección 1.3, las condiciones de operación de los tanques varían dependiendo su aplicación. A continuación, la Tabla 2.4 menciona las características de operación de trabajo de los tanques dentro del proceso de galvanoplastia en la empresa CIAUTO.

Tabla 2.4 Condiciones de operación de los tanques del Elpo.

CUBA	Tipo de limpieza	Temperatura [°C]	Tiempo de trabajo [s]
1	Aspersión	43-60	210
2	Inmersión	43-60	210
3	Enjuague 1	Ambiente	60
4	Activador sustrato	Ambiente	80
5	Fosfato	43-49	210
6	Enjuague 2	Ambiente	60
7	Agua Desionizada 1	Ambiente	60
8	Electrodeposición E-COAT	Ambiente	210
9	Ultrafiltrado UF1	43-49	60
10	Ultrafiltrado 2	Ambiente	60
11	Agua Desionizada 2	Ambiente	60

(Fuente: Propia)

La toma de datos en los tanques de desengrase, decapado y tratamiento variaran significativamente su valor de flujo másico, mientras que la temperatura permanecerá constante. El flujo másico de vapor que emiten los tanques de galvanizado se calcula con el área rectangular del tanque, la densidad de vapor de agua y velocidad del vapor. Se realizaron 3 tomas en los tanques 1, 2, 5 y 9; cada toma se realiza cuando se encuentra en operación el tanque/carrocería, este suceso pasa cada 30 minutos, pues este tiempo es lo que toma completar todo el tratamiento del auto.

Como la carrocería tiene un tiempo de contacto con la solución de 210 [s] y su ingreso es lento para poder alcanzar una alta adhesión del contenido de agua emitida por los aspersores y la inmersión, en este punto de operación se toman dos mediciones de velocidad de vapor de agua a una altura de 20 [cm] de la superficie del tanque en los horarios de 8:00 y 14:00 horas.

2.1.2.5 Captura de temperatura

Para obtener información de temperaturas en las fuentes de calor y el entorno, se realizaron capturas de imagen del sitio con una cámara termográfica durante varios modos de operación en el plano transversal al eje x. Las imágenes térmicas fueron analizadas utilizando el software Flir Tools para estimar las zonas térmicas dentro del sistema y la concentración de vapor existente. El horario de captura fue el mismo que en la medición de caudal para poder capturar la neblina en su totalidad.

2.1.3 Evaluación de incertidumbre de datos experimentales

Una vez tomados los datos de operación del caso se procede a evaluar la confiabilidad de la medida. Para esto se seguirán ciertos procedimientos donde se realizará una estimación del valor medido respecto al error experimental de modo que nos indiquen la incertidumbre de la medición realizada. Esta incertidumbre debe compararse con la del equipo de medida [36].

Mediante la incertidumbre se puede comparar resultados obtenidos con diferentes metodologías analíticas, o con un determinado producto, por ejemplo, materiales de referencia certificados, o datos obtenidos de manuales, entre otros. Para el cálculo de la incertidumbre se emplea la Ecuación (2.1) [36].

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

x_i : variable aleatoria estadística

\bar{x} : media

n: Número de elementos de la muestra

2.2 Modelado del sistema de ventilación actual

2.2.1 Dominio computacional

Para el desarrollo del dominio computacional del caso se evaluó el modelo CAD realizado previamente en el programa Autodesk Inventor 2021. Esta evaluación incluyó la simplificación funcional del CAD, donde se descartaron características superficiales que se considera puedan conducir a conclusiones no válidas en la simulación.

Los detalles geométricos simplificados fueron ductos y cajas de extracción por sus bordes y detalles sobrantes, en su lugar se dibujan aberturas de entrada y salida para mejorar el dominio geométrico. También se simplificó la distancia entre tanques, uniendo todas aquellas que no tendrán una condición de borde en la simulación, solo los tanques con criticidad serán dibujados de forma independiente. La simplificación realizada facilita la etapa de generación de malla mediante el descarte de ángulos agudos sobre las caras y creación de refinamientos en zonas de poco interés.

Finalmente, con la simplificación hace factible el cálculo en términos de tiempo y costo computacional, al igual que resultados válidos. La ubicación y dimensión de los elementos de entrada, salida y emisión de flujo del caso se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Características de los elementos del sistema.

Elemento	Cantidad	Ubicación	Dimensión [m]
Entradas	5	Cerca de la mitad del canal	0,25x0,25
Salidas	10	En los extremos de cada entrada	0,25x0,25
Tanques	11	A lo largo del sistema	3,5x6,5

(Fuente: Propia)

2.2.2 Mallado

El objetivo de este trabajo es determinar soluciones al problema de ventilación que tiene la empresa, por lo que, el enfoque en el análisis de malla tendrá poca relevancia, sin embargo, los criterios de calidad de malla serán evaluados según la bibliografía.

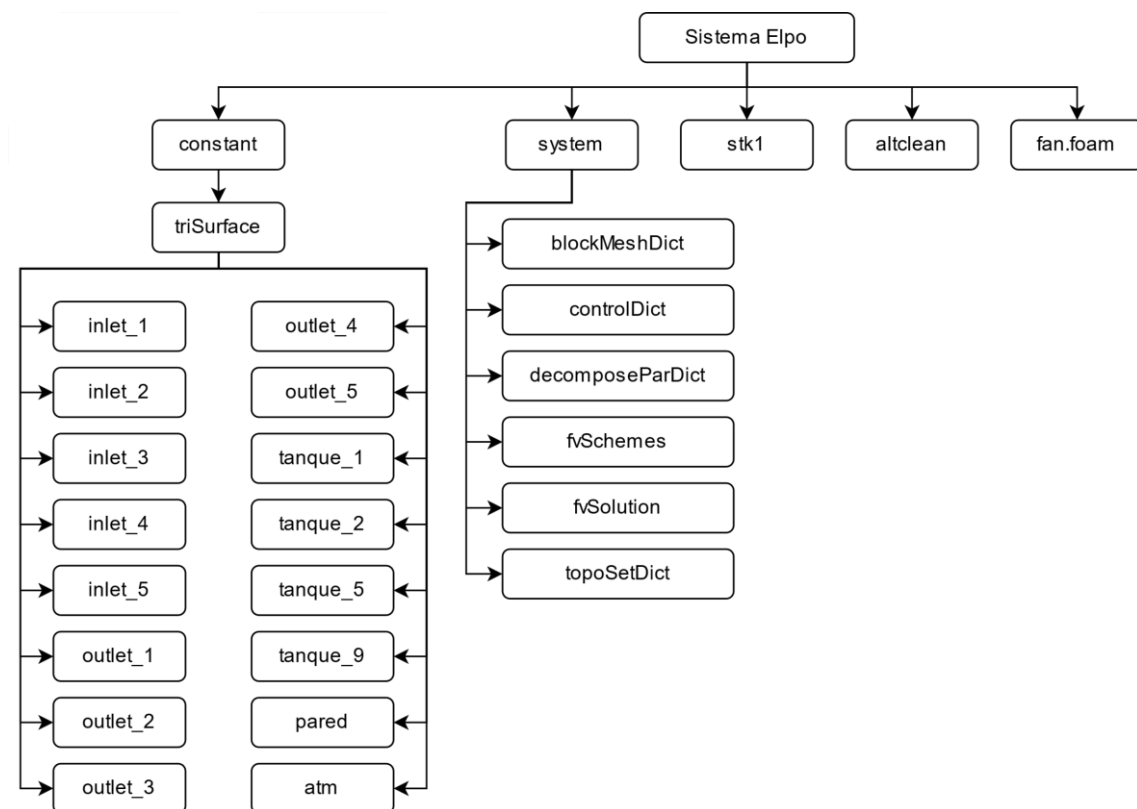


Figura 2.6 Estructura del directorio para realizar la malla
(Fuente: propia)

Una vez optimizado el modelo geométrico, se realiza la creación de la malla mediante SnappyHexMesh. Esta herramienta forma parte de una serie de directorios que habilita

OpenFOAM para el desarrollo de la malla. La Figura 2.6 representa el formato de estructura en el que se trabaja.

El dominio computacional presenta zonas específicas de análisis, estas zonas tendrán mayor relevancia a la hora de generar la malla por lo que se aplicará un refinamiento con el objetivo de capturar con precisión el comportamiento de los fluidos. Estas zonas críticas se refieren a fuentes de vapor y zonas con altos gradientes de velocidad, siendo los tanques y las bocas de ventilación y extracción los puntos clave para integrar la refinación en su área. El resto del dominio usa mallas más grandes debido a sus bajos gradientes de velocidad.

El proceso de mallado empieza con la creación de la malla base, en blockMeshDict se define un bloque base capaz de englobar todas las superficies del sistema Elpo. Luego, se guardan las superficies creadas en Inventor en formato.stl en la carpeta triSurface y mediante el visualizador de Paraview se observa que las superficies se encuentren contenidas dentro del bloque base.

La malla del bloque base iniciará con un mallado de nivel 1, donde el tamaño de la celda será de 16 [cm]. Con forme se ubican las superficies del modelo en la malla base, el número de celdas se verá afectado debido al nivel de refinamiento de nivel aplicado. A continuación, la Figura 2.7 detalla el comportamiento exponencial según el incremento del nivel.

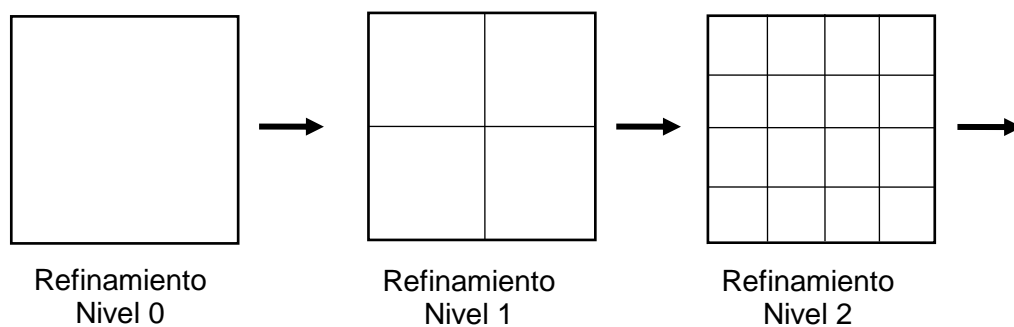


Figura 2.7 Nivel de refinamiento
(Fuente: [37])

Finalmente, se configura el archivo SnappyHexMesh dando nombres, valores del nivel de refinamiento y un punto referencia, mismo que usará el programa para descartar celdas que queden fuera del dominio. La Figura 2.8 muestra la malla que se realizó a la geometría del sistema Elpo.

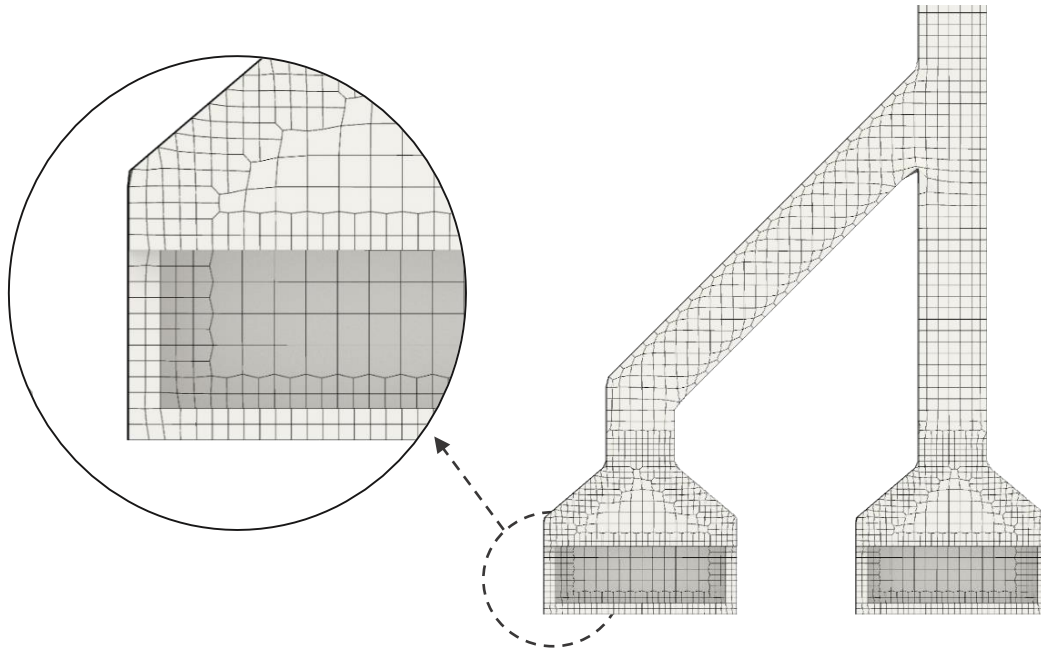


Figura 2.8 Detalle de la malla en la geometría del Elpo
(Fuente: Propia)

Independencia de malla y calidad

Como se mencionó anteriormente, la calidad de malla es un parámetro fundamental en la simulación CFD. Para asegurar la convergencia y validez de los resultados en soluciones numéricas, los elementos de malla deben contener criterios de calidad aceptables. Para realizar el estudio del mallado y su calidad, tanto OpenFoam como Ansys ofrece un comando *CheckMesh* que permite examinar los criterios básicos de la malla y se compararán según los parámetros (escalas) sugeridos en la literatura [38].

En cuanto a la independencia de malla. Se realizarán tres tipos de malla de diferente densidad (cantidad de elementos) pero manteniendo las especificaciones de nivel de refinamiento en las áreas de interés. Se simulará el caso del sistema actual en cada malla para luego compararlas.

Tabla 2.6 Independencia de malla.

Malla	Tamaño de celda base [mm]	Número de elementos
Fina	12	810073
Media	16	488304
Gruesa	26	254968

(Fuente: Propia)

2.2.3 Condiciones de borde

En base a los datos adquiridos del apartado 2.1, se realiza un promedio de los datos obtenidos y se escogen las velocidades de ingreso y salida de ventilación como condición de borde. En cuanto a la presión, se obtuvieron datos de las fichas técnicas del fabricante.

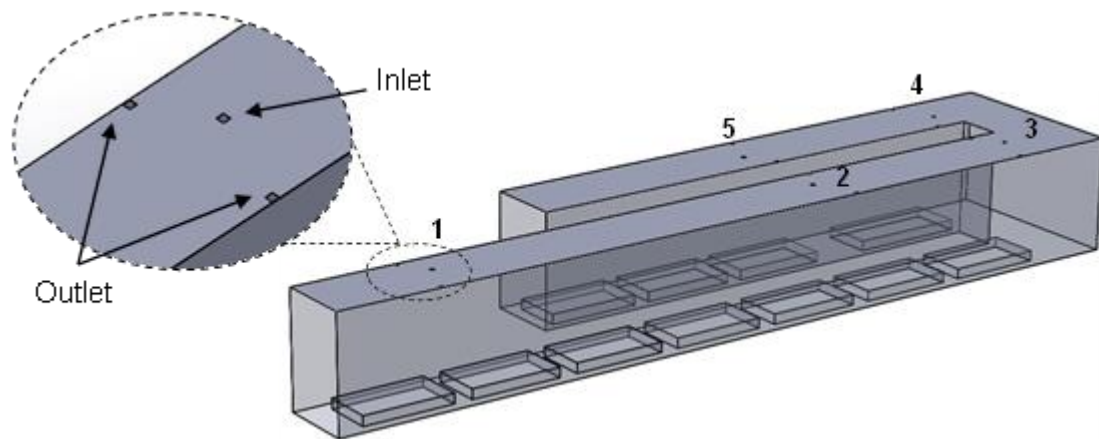


Figura 2.9 Condiciones de borde inlet y outlet
(Fuente: Propia)

La Tabla 2.7 muestra cada una de las condiciones de borde aplicados en el modelo de simulación. Un punto para tener en cuenta es que las entradas de aire principales se han establecido como velocidad de entrada. Es decir, la condición de *velocity inlet* solo se aplica al aire, para vapor de agua la condición es igual a cero.

Tabla 2.7 Condiciones de borde de ventiladores y extractores.

Gr.	Parte	Tipo	Valor	Parte	Tipo	Valor
1	Inlet_1	Velocity inlet Aire	6,80	Outlet_1	Pressure-outlet	660 [Pa]
2	Inlet_2	Velocity inlet Aire	9,06	Outlet_2	Pressure-outlet	1007 [Pa]
3	Inlet_3	Velocity inlet Aire	5,07	Outlet_3	Pressure-outlet	660 [Pa]
4	Inlet_4	Velocity inlet Aire	10,30	Outlet_4	Pressure-outlet	1007 [Pa]
5	Inlet_5	Velocity inlet Aire	5,87	Outlet_5	Pressure-outlet	660 [Pa]

(Fuente: Propia)

La condición de borde establecida en los tanques se aplica a cuatro de los once existentes en el proceso de galvanoplastia. Como muestra la Figura 2.10 los tanques 1, 2, 5 y 9 emiten vapor de agua durante el proceso.

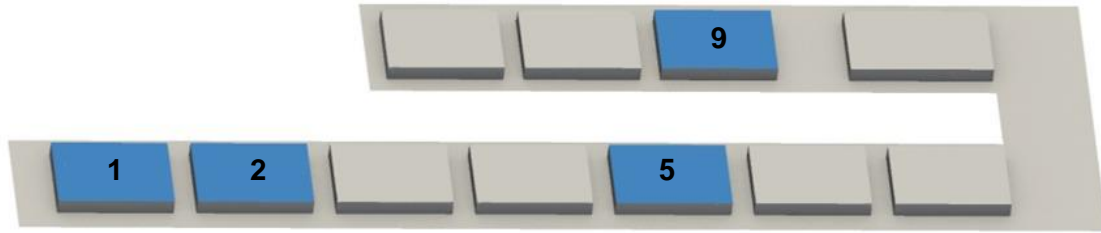


Figura 2.10 Condiciones de borde en los tanques.
(Fuente: Propia)

La cantidad de flujo másico en cada uno de los tanques varía en base a la cantidad de boquillas de aspersión, en cuanto a la temperatura del contenido de los tanques permanece constante en cada uno. La Tabla 2.8 establece la condición de *Mass Flow inlet* para los cuatro tanques mencionados anteriormente.

Tabla 2.8 Condiciones de borde en los tanques.

Id.	Parte	Tipo	Valor	Temperatura
1	Tanque_1	Mass Flow inlet	1,233 [kg/s]	33 [°C]
2	Tanque _2	Mass Flow inlet	1,233 [kg/s]	33 [°C]
5	Tanque _5	Mass Flow inlet	0,401 [kg/s]	33 [°C]
9	Tanque _9	Mass Flow inlet	0,336 [kg/s]	33 [°C]

(Fuente: Propia)

2.2.4 Configuración del caso de estudio

El caso de estudio se ha desarrollado con el software CFD FLUENT en versión académica R2. El caso se resolvió en estado transitorio, cuya configuración general se basa en la presión y velocidad absoluta, además se tipea las condiciones de gravedad con el valor de -9,81 [m/s] en el eje y.

El modelo adoptado para evaluar el desempeño del sistema de ventilación consiste en un modelo multifásico constituido por dos fases, aire y vapor de agua. Las propiedades físicas de los dos fluidos se midieron a la temperatura de funcionamiento del sistema Elpo y se consideró una tensión superficial con una constante de 0,0728 [N/m] para establecer las interacciones entre las etapas [39].

En cuanto al modelo de turbulencia, el método escogido es RANS mediante el modelo $k - \varepsilon$, es el más usado en la actualidad por su aplicación en modelos de transporte de turbulencia para fines industriales, además de su bajo costo computacional [31]. Luego, se estableció las condiciones de borde como se muestra en las Tablas 2.7 y 2.8.

Con el fin de optimizar los resultados, se usó el método de doble precisión para solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes; se recurrió al algoritmo PISO como condición para análisis transitorio para relacionar las ecuaciones de presión y velocidad. Por otra parte, se utilizó el esquema *Second Order Upwind* para la discretización del momento, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta. Del mismo modo, para el análisis del modelo multifásico se usó un esquema primer orden (*First Order Upwind*) para la formulación explícita de los procesos transitorios.

Por último, el tamaño del paso de tiempo utilizado en la simulación se calculó mediante la ecuación (2.2), bajo la condición de un número de Courant variable (CFL) hasta de 0,9 [40]. Donde Δx es el tamaño mínimo de la celda y la velocidad máxima de condición de borde. La Tabla 2.9 representa una lista resumen de los parámetros configurados en Fluent de ANSYS.

$$\Delta t = \frac{CFL \times \Delta x}{u} = \frac{0,9 \times 0,040 [m]}{10,30 [m/s]} = 3,5e^{-3} [s] \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Tabla 2.9 Configuración del caso de estudio.

General	Solver: Velocity Formulation Time Gravity	Pressure-Based Absolute Transient Y=-9,81 [m/s]
Models	Multiphase Energy Viscous Model	Mixture On Realizable k-e
Materials	Fluid (Fase 1) Fluid (Fase 2)	Air Water-vapor
Cell Zone	Estacionario	Mixture: air-vapor water
Boundary Conditions	Inlet Outlet Piscinas Atm Ducto	Velocity inlet Pressure outlet Mass Flow Inlet Pressure outlet Wall
Methods	Scheme Gradient Pressure Mixture Momentum Turbulent Energy Transient Formulation	Piso Least Squares Cell Based Second order Second order Second order Second order First order

Monitor	Residuals	All 1e-4
Inicialization	Temperature	18 [°C]
Run Calculation	Time Step Size	3,5e-3
	Number of time step	4000
	Max iterations	20

(Fuente: Propia)

En base a los datos de operación se calculó el número de Reynolds con el fin de identificar el régimen de turbulencia en la entrada de los conductos de ventilación.

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde:

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

v = velocidad del fluido [m/s]

μ = viscosidad del fluido [kg/ms]

D_H = diámetro hidráulico [m]

El diámetro hidráulico para un ducto cuadrado viene dado por:

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

$$D_H = \frac{4a^2}{4a}$$

$$D_H = a$$

2.3 Validación de simulación con datos experimentales

La validación experimental del modelo desarrollado consiste en comparar los valores arrojados de simulación del sistema actual con los valores experimentales de temperatura que se obtuvieron con la cámara termográfica de la zona crítica, se realizará una comparación cualitativa de la sección semi transversal capturada con la cámara.

En cuanto a los datos de velocidad, se compararán los datos de simulación con los datos experimentales mediante el cálculo del error porcentual absoluto. La ecuación del error se muestra a continuación.

$$\text{Error \%} = \left| \frac{Val_{Exp} - Val_{Sim}}{Val_{Exp}} \right| \times 100 \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Para determinar que el método simulado captura la naturaleza del fenómeno se consideró que el error porcentual calculado en cada criterio de operación del sistema de ventilación del Elpo debe ser menor o igual a 10% como indican estudios realizados relacionados con ventilación localizada [41].

2.4 Diseño de alternativas

El objetivo del planteamiento de alternativas es conseguir la reducción significativa de las condiciones ambientales del sistema Elpo a partir de nuevas configuraciones. Acorde a la literatura, se determinó que las principales causas que afectan el desfogue de los vapores son el diseño de las campanas y la capacidad de los equipos de ventilación. Por esta razón, se consideran dichos parámetros en las nuevas propuestas tomando como punto de partida el sistema actual.

Los requerimientos específicos del sistema Elpo deben contrarrestarse en las propuestas, con el fin de brindar una solución sólida previo a la simulación. Las características variarán según requerimientos de la empresa y criterios de diseño establecidos por normativas.

2.4.1 Documentos referencia

El desarrollo de este trabajo incluye una investigación bibliográfica-documental sobre la determinación del tipo de sistemas de ventilación a aplicar en tanques de desengrase que usa la industria automotriz. Esta documentación aportará en el análisis del caso sirviendo de soporte para el desarrollo del tema.

A continuación, se representa la documentación teórica que engloba los principios de diseño de sistemas de ventilación para tanques y los criterios técnicos establecidos por notas, guías y manuales:

- ✓ ANSI/AIHA Z9.1-2006 Open-Surface Tanks – Ventilation and Operation [11]
- ✓ INDUSTRIAL VENTILATION, A Manual of Recommended Practice for Design, American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) [12]
- ✓ NTP 190: Cubas o tanques de desengrase con tricloroetileno y percloroetileno. Prevención de riesgos higiénicos [42].

- ✓ Duct Design, INDUSTRIAL VENTILATION, A Manual of Recommended Practice for Design, American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) [12]
- ✓ Fans, capítulo 21 del manual HVAC Systems and Equipment de la ASHRAE [33]

2.4.2 Tipo del sistema de ventilación

Como se menciona en la sección 1.2, por recomendaciones de las normas y debido a la complejidad del caso, se decidió que las configuraciones propuestas fusionarán los dos tipos de ventilación (dilución y extracción localizada) debido a la capacidad de control de contaminantes en procesos que incluyen varios tanques en un mismo espacio. Además, la norma ANSI/AIHA Z9.1-2006 recomienda esta configuración en lugares donde la contaminación de los componentes orgánicos se dispersa de forma descontrolada por el área de trabajo [11].

2.4.3 Procedimiento según ACGIH

Para el dimensionamiento del sistema de ventilación, se utilizó el procedimiento del Manual de Ventilación Industrial ACGIH junto con los aspectos relevantes de ventilación en tanques de superficie abierta de la norma ANSI/Z9.1 [12]. Los requerimientos preliminares para el diseño de este sistema se detallan a continuación:

- Distribución en planta de las operaciones.
- Esquema del sistema de captación
- Diseño previo o esquema de la campana.
- Informe sobre los detalles de cada operación y características de los materiales

Diseño de campana

En la sección 1.2.2 se muestra los tipos de campana, su forma, tamaño y capacidad de captación del contaminante para extracción en tanques de desengrase. Además, ACGIH presenta configuraciones especiales para el caso de estudio, ver ANEXO 1. La campana seleccionada utiliza las configuraciones de las normas acomodándose al área de trabajo dentro del Elpo. Además, en base a criterios de trabajo que deben mantener y requerimientos de la empresa, se diseñó la mejor alternativa del sistema de captación. Sin embargo, la posibilidad de adquirir otras alternativas es válido para el propósito de extracción.

Características del contaminante

El estándar ANSI/Z9.1, menciona que según las circunstancias operativas y equipos de tanques de superficies abiertas deben tener concentraciones típicas de contaminante entre el 5 y 50% [11]. En la Tabla 2.10, se presenta la categoría del contaminante en base a su potencial de peligro. De igual forma la toxicidad (TLV) de la norma ANSI y los materiales ocupados en el proceso de desengrase se presentan en el ANEXO 6 y 7.

Tabla 2.10 Determinación del peligro potencial.

Peligro Potencial	Normativa OEL		
	Gas y vapor [ppm]	Niebla [mg/m ³]	Punto de ignición °F/°C
A	0-10	0-0.1	-
B	11-100	0,11-1,0	< 100 °F/ 38°C
C	101-500	1,1-10	100-200 °F/ 38-93°C
D	>500	>10	> 200 °F/ >93°C

(Fuente: [11])

Una vez determinado el contenido tóxico dictado por TLV de ANSI/Z9.1, se procede a determinar la tasa de evolución de vapor o neblina para cada operación del tanque. La Tabla 2.11 detalla la tasa de evolución del contaminante.

Tabla 2.11 Tasa de evolución de gas, vapor o niebla.

Tasa	Temperatura Líquido [°F/°C]	Grados por debajo del punto de ebullición [°F/°C]	Evaporación relativa [Tiempo para una evaporación del 100%]	Gasificación*
1	>200/ >93	0-20/ 0-11	Rápida 0-3 [h]	Alta
2	150-200/66-93	21-50/ 12-28	Media 3-12 [h]	Media
3	94-149/34-65	51-100/ 29-56	Lenta 12-50 [h]	Baja
4	<94/ <34	>100/ >56	Nula sobre 50 [h]	Nulo

*Nota: La velocidad de gaseado depende de la velocidad de la acción química o electroquímica. Tiende a aumentar con: 1) la cantidad de trabajo en el tanque en un momento dado; 2) la fuerza de la solución en el tanque; 3) la temperatura de la solución en el tanque; y 4) la densidad de corriente aplicada al trabajo en tanques electroquímicos.

(Fuente: [11])

Velocidad de captura

Para realizar el dimensionamiento de los componentes del sistema de ventilación, es necesario determinar la velocidad de captura recomendada [12]. Esta velocidad se determina en función del caudal de aire aspirado y la forma de la campana. Según ACGIH, los valores recomendados para la velocidad de captura en tanques de desengrase y tratamiento varía entre 0,25 y 0,5 [m/s] [12]. Sin embargo, por recomendación de la norma se usa 0,5 [m/s] como condición de diseño para el estudio (revisar Tabla 1.3).

$$Q = 0,5 \text{ [m}^3\text{/s]}, \text{ por cada m}^2 \text{ de la superficie de la cuba} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$P_{\text{carga}} = 0,25P_{\text{conducto}} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

$$V_{\text{conducto}} = 5 - 15 \text{ [m/s]}$$

Caudal de volumen de escape

ANSI menciona un método para determinar el caudal de volumen de aire/vapor de escape en procesos que utilizan varios tanques en un lugar y que además están colocados uno al lado del otro [11]. Este método proporciona una mejor comprensión de las velocidades reales en el que aplica factores de seguridad para seleccionar la velocidad de captura. En este enfoque, se emplea la ecuación fundamental $Q = VA$ para determinar Q , el caudal volumétrico de aire. Seguir las recomendaciones de ACGIH [12].

2.4.4 Diseño de conductos

Para lograr una ventilación adecuada y asegurar que el aire sea distribuido de manera efectiva en puntos específicos, es necesario conectar un ventilador o extractor a un sistema de conductos. Según el Handbook de ASHRAE, es importante tener en cuenta aspectos de diseño de ductos según: relación entre espacio-presión, diseño de reguladores y reducción de ruido [43].

Se propone a continuación un proceso general para diseñar un sistema de ductos de ventilación:

1. Planos del edificio y lugar a ventilar
2. Seleccionar la rejilla y el difusor, según las especificaciones del fabricante.

3. Hacer un esquema del sistema de ductos, indicando la cantidad de aire a manejar.
4. Dividir el sistema de ductos en secciones en los lugares donde cambie el caudal y numere cada sección.
5. Calcular las dimensiones de los ductos mediante el método seleccionado.
6. Calcular la caída de presión del sistema.
7. Seleccionar el ventilador adecuado.

Método de igual fricción

El método utilizado para determinar el tamaño adecuado de los conductos se conoce como el método de igual fricción. Este método implica asumir que hay una pérdida de fricción uniforme por unidad de longitud en cada sección de los conductos del sistema (secciones de longitud no mayores a 30 metros). Este enfoque es útil para equilibrar los costos de los conductos y la operación del ventilador. Se le conoce también como método de caída de presión constante (EFM) [43].

Antes de seleccionar un conducto, se deben haber realizado los cálculos convenientes que requiere la instalación. Para ello, debemos seguir los siguientes pasos:

1. Calcular el caudal
2. Determinar la velocidad de paso
3. Minimizar las pérdidas de carga

Tabla 2.12 Valores recomendados para la velocidad de diseño de conductos.

Naturaleza del contaminante	Ejemplos	Velocidad de diseño [m/s]
Humos de soldadura	Soldadura	10-12,5
Polvo muy fino y ligero	Hilos de algodón, harina de madera, polvo de talco	12,5-15
Vapores, gases, humos de combustión	Todos los vapores, gases y humos	Indiferente (la velocidad óptima económicamente suele encontrarse entre 5 y 10)
Polvos secos	Polvo fino de caucho, baquelita en polvo para moldeo, hilos de yute, polvo de algodón, virutas (ligeras), polvo de detergente, raspaduras de cuero	15-20

(Fuente: [12])

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Levantamiento de datos

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de incertidumbre de las mediciones experimentales de velocidad de flujo en las entradas de los extractores. Después, en base a los resultados se determinarán las condiciones de borde requeridas para modelar el área del sistema Elpo mediante simulación CFD.

3.1.1 Evaluación de la incertidumbre de datos experimentales

Se calculó la incertidumbre de los datos medidos experimentalmente con el fin de determinar si cumple con los valores de incertidumbre de los equipos. Las Tablas 3.1 y 3.2 indican las tres mediciones, su promedio y el resultado del cálculo, tomados en dos horarios de operación. En el ANEXO 8 se muestra un ejemplo de cálculo.

Tabla 3.1 Cálculo de incertidumbre. Datos tomados a las 08:00.

Extractor	Cajetín	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	v_3 [m/s]	v_m [m/s]	$u(x_i)$
1	1	0	0	0	0,000	0,000
	2	0,23	0,21	0,24	0,227	0,009
	3	0,74	0,73	0,77	0,747	0,012
	4	1,13	1,14	1,17	1,147	0,012
	5	1,24	1,26	1,27	1,257	0,009
	6	0,56	0,58	0,59	0,577	0,009
	7	0,34	0,31	0,35	0,333	0,012
	8	0,23	0,21	0,23	0,223	0,007
	9	0	0	0	0,000	0,000
2	1	0	0	0	0,000	0,000
	2	0,66	0,69	0,68	0,677	0,009
	3	0,92	0,94	0,91	0,923	0,009
	4	3,21	3,23	3,22	3,220	0,006
	5	4,42	4,45	4,43	4,433	0,009
	6	3,47	3,48	3,46	3,470	0,006
	7	1,61	1,64	1,63	1,627	0,009
	8	1,1	1,12	1,13	1,117	0,009
	9	0,21	0,22	0,24	0,223	0,009

(Fuente: Propia)

Los valores obtenidos de la incertidumbre del extractor 1 y 2 de la Tabla 3.1 se encuentran en un rango de 0,006 y 0,012, mientras que los valores de la Tabla 3.2 se encuentran en un rango de 0,006 y 0,019; al compararlos con los valores de incertidumbre del certificado de calibración que se empleó se determinó que estos datos se encuentran por debajo e igual del valor de incertidumbre ANEXO 4. Por lo tanto, los valores obtenidos son fiables y pueden ser usados a continuación.

Tabla 3.2 Cálculo de incertidumbre. Datos tomados a las 14h00.

Extractor	Cajetín	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	v_3 [m/s]	v_m [m/s]	$u(x_i)$
1	1	0	0	0	0,000	0,000
	2	0,23	0,27	0,26	0,253	0,012
	3	0,77	0,76	0,78	0,770	0,006
	4	1,14	1,15	1,18	1,157	0,012
	5	1,25	1,28	1,26	1,263	0,009
	6	0,58	0,56	0,6	0,580	0,012
	7	0,35	0,34	0,36	0,350	0,006
	8	0,22	0,23	0,25	0,233	0,009
	9	0	0	0	0,000	0,000
2	1	0	0	0	0,000	0,000
	2	0,68	0,63	0,69	0,667	0,019
	3	0,93	0,96	0,94	0,943	0,009
	4	3,28	3,27	3,26	3,270	0,006
	5	4,45	4,44	4,47	4,453	0,009
	6	3,47	3,48	3,46	3,470	0,006
	7	1,63	1,64	1,66	1,643	0,009
	8	1,1	1,12	1,13	1,117	0,009
	9	0,23	0,24	0,26	0,243	0,009

(Fuente: Propia)

3.1.2 Datos para simulación CFD

Mediante el valor medio determinado en el apartado anterior y aplicando las ecuaciones pertinentes se tiene como resultado los valores de caudal y flujo másico de operación. En base a estos datos junto con la configuración del modelo matemático definido en la sección 2.2.4, se procede a simular el sistema de ventilación actual en el software Ansys Fluent. Los datos obtenidos del cálculo son:

- Ventilación: datos de entrada

Tabla 3.3 Datos del ventilador para simulación CFD.

Ventilador	Vel. Prom [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Flujo másico [kg/s]
1	6,80	0,425	0,521
2	9,06	0,566	0,694
3	5,07	0,317	0,388
4	10,30	0,644	0,789
5	5,87	0,367	0,449

(Fuente: Propia)

- Extracción: datos de salida

Tabla 3.4 Datos del extractor para simulación CFD.

Extractor	Vel. Prom [m/s]	Vel x cajetín [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Flujo másico [kg/s]
1	10,13	5,065	0,317	0,388
2	24,73	12,365	0,773	0,947
3	13,02	6,510	0,407	0,498
4	25,42	12,710	0,794	0,973
5	12,18	6,090	0,381	0,466

(Fuente: Propia)

- Tanques: Con el volumen de solución líquida que se reponen después de un día de operación, se calculó una aproximación de la cantidad de flujo másico que se pierde en la operación.

Tabla 3.5 Flujo másico calculado en base a los datos de reposición de líquido en los tanques.

Tanques	Horas de funcionamiento	Altura que se reduce	Volumen perdido [m ³]	Flujo másico [kg/s]
1	0,8 h	20 cm	4,55	1,580
2	0,8 h	20 cm	4,55	1,580
5	0,8 h	15 cm	3,41	1,184
9	0,8 h	15 cm	3,41	1,184

(Fuente: Propia)

Los datos de velocidad de flujo experimentales tienen cierta relación en cuanto a la velocidad de emisión de vapores en tanques de superficie abierta que indica la norma ACGIH. La diferencia en la velocidad calculada difiere de la teoría debido al tamaño y complejidad de las operaciones en el sistema Elpo. Por este motivo se calculó el flujo másico de vapor con la velocidad tomada. La Tabla 3.6 muestra los valores de flujo másico calculados.

Tabla 3.6 Flujo másico calculado con la velocidad promedio experimental.

Tanques	Temperatura [°C]	Vel prom [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Flujo másico [kg/s]
tanque 1	33	2,71	61,653	1,338
tanque 2	33	2,68	60,970	1,323
tanque 5	33	0,81	18,428	0,400
tanque 9	33	0,68	15,470	0,336

(Fuente: Propia)

Debido a la incertidumbre de los datos proporcionados de volumen de reposición, los datos de flujo másico de la Tabla 3.5 serán descartados en el análisis. Mientras que

los datos de la Tabla 3.6 serán considerados como condiciones de borde en el desarrollo de la simulación CFD.

3.2 Modelado del sistema de ventilación actual

3.2.1 Independencia de malla

Para el análisis de independencia de malla se consideró el caso de estudio del sistema de ventilación original con una malla base (media), y se simuló la configuración del caso en dos cuadrículas adicionales: malla fina y malla gruesa. Las variables que se consideraron para la evaluación de las tres mallas fueron presión de ingreso y velocidad de salida respecto al número de iteraciones.

Los perfiles de presión de ingreso (inlet 1) de las tres mallas conforme avanza el paso de tiempo se comparan en la Figura 3.1. La discrepancia entre las tres mallas es aceptable, y considerando el tiempo computacional y el costo, la cuadrícula gruesa se conserva para el análisis.

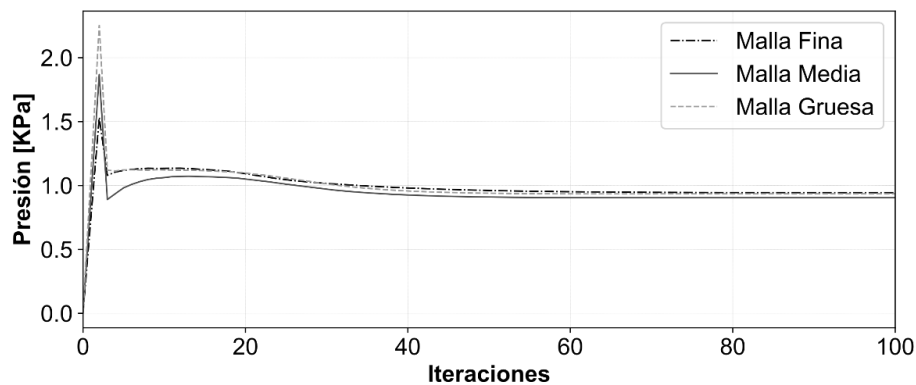


Figura 3.1 Estudio independencia de malla.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.2 presenta el comportamiento de velocidad con respecto al número de iteraciones. Se puede observar que la malla fina tiene un valor alto de velocidad y conforme avanzan las iteraciones la velocidad se va estabilizando. Las mallas restantes tienen un comportamiento similar cuya velocidad tiene a ser el mismo que la velocidad de ingreso medida experimentalmente.

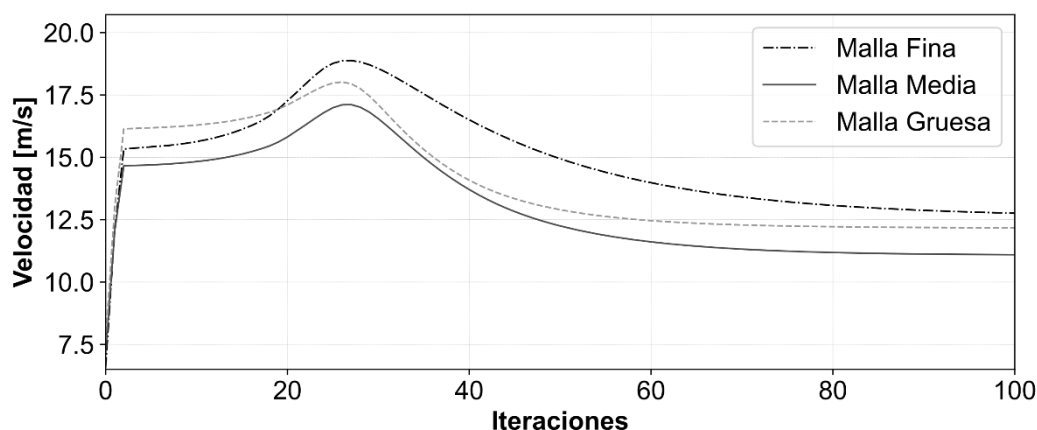


Figura 3.2 Independencia de malla.
(Fuente: Propia)

Finalmente, la Tabla 3.7 representa los valores de velocidad y presión máximo obtenidos en los tres tipos de malla. También, en base al refinamiento el tiempo de simulación crecerá considerablemente. En base a esto, se seleccionó la malla gruesa por su estabilidad en la convergencia de los resultados, sirviendo como malla base para el análisis con las configuraciones posteriores.

Tabla 3.7 Parámetros de estudio de independencia de malla.

Malla	Tamaño de celda base [mm]	Número de elementos	Velocidad [m/s]	Presión [kPa]	Tiempo de simulación
Fina	12	810073	19.34	1532.57	9h 50min
Media	16	488304	16.41	1867.95	5h 10min
Gruesa	26	254968	17.96	2251.50	3h 18min

(Fuente: Propia)

3.2.2 Calidad de malla

Si bien la independencia de malla tuvo un comportamiento convergente en el transcurso de las iteraciones, es importante comprobar que la calidad de malla se ajusta a los criterios aceptables de ANSYS, con esto se puede validar el análisis numérico del caso.

Acorde a la literatura, entre los criterios más importantes considerados en la evaluación de la calidad de malla son: calidad del elemento (*element quality*), calidad ortogonal (*ortogonal quality*) y oblicuidad (*skewness*). La Tabla 3.8 muestra las características de la malla escogida.

Tabla 3.8 Calidad de la malla gruesa.

Característica de malla gruesa					
Número de elementos:	488304	Número de parches:	16		
Número de nodos:	510358	Tamaño elemento base:	16 cm		
Criterio	Valor Mínimo	Valor máximo	Límite aceptado	Valor obtenido	Calificación
Element Quality	0,18	1,00	0,90-1,00	0,98	Excelente
Orthogonal Quality	0,24	1,00	0,90-1,00	0,94	Excelente
Skewness	0,00	0,99	0,00-0,25	0,08	Excelente

(Fuente: Propia)

Los criterios de calidad de malla que proporciona ANSYS respecto a los resultados de calidad obtenidos de la malla gruesa se encuentran dentro del límite aceptable. Esto tiene mucho que ver con la estructura de la celda, pues las cuadrículas de la malla son de tipo estructuradas en la mayoría de sus elementos, lo que permite obtener criterios aceptables.

3.2.1. Validación de simulación con datos experimentales

Se realizó la validación de los resultados simulados mediante la comparación cualitativa de los perfiles de temperatura tomados por la cámara termográfica. Para encontrar los puntos Sp, se trazó un plano transversal con inclinación al eje x en la zona de mayor emisión de vapor (piscinas 1 y 2), donde los puntos se ubicaron siguiendo la posición de los datos tomados. La Figura 3.3 indica el comportamiento de flujo de vapor y los puntos de análisis de temperatura. Los resultados termográficos de la cámara termográfica se adjuntan en el ANEXO 9.

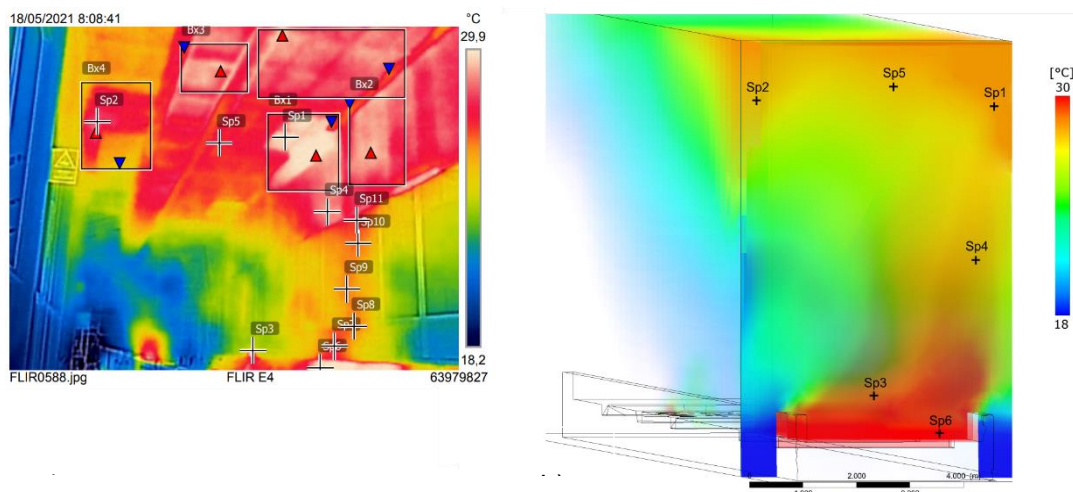


Figura 3.3 Comparación: a) datos experimentales, b) datos simulación.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.9 se muestran los resultados de temperatura de: los puntos Sp de la simulación, puntos Sp de valores experimentales y el cálculo del error porcentual absoluto. En este caso se observa que los errores son bajos en los puntos de temperatura junto a los tanques mientras que los errores varían parcialmente en los puntos cercanos al techo, teniendo una variante de error por debajo del 10%. En este sentido, es difícil determinar la validación de este error debido a las diversas variables que engloba el caso.

Tabla 3.9 Error calculado entre los datos experimentales y la simulación.

Punto	Texp. [°K]	Tsim. [°K]	Error [%]
Sp1	302,75	301,55	0,396
Sp2	301,65	300,55	0,365
Sp3	300,55	300,25	0,1
Sp4	302,05	300,95	0,364
Sp5	300,95	299,75	0,399
Sp6	303,25	302,85	0,132

(Fuente: Propia)

3.3 Diseño de Alternativas

En el diseño de las alternativas de ventilación se considerarán los requerimientos y componentes de la empresa junto con los criterios de diseño de manuales y guías de ventilación en tanques de superficie abierta.

3.3.1 Requerimientos preliminares

Diseño de campana

El diseño de la campana de ventilación para tanques de desengrase en la industria automotriz tiene cierta dificultad de aplicación debido al tamaño necesario que debe mantener la campana para acaparar la superficie del tanque. Este motivo considera buscar métodos para un diseño efectivo de la campana.

La norma nacional estadounidense ANSI/AIHA Z9.1 de “Ventilación y control de contaminantes transportados por el aire durante las operaciones de tanques de superficie abierta”, recomienda configuraciones de diseño de campanas tipo extracción localizada lateral para ambos lados, pero, debido a la distribución de espacio dentro de la planta, el aplicar sistemas de captación en ambos lados traerá problemas de movilidad. Por esta razón, las campanas se ubicarán en un mismo lado.

La Figura 3.4 representa una de las campanas escogidas en el caso de estudio. Su configuración cumple con las características geométricas necesarias dentro del área Elpo para acaparar los vapores del proceso.

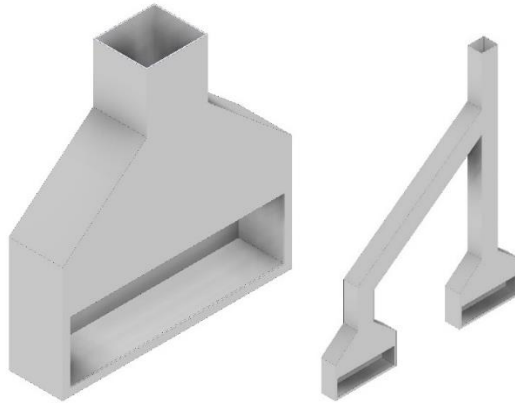


Figura 3.4 Sistema de captación local.
(Fuente: Propia)

Otra de las campanas seleccionadas, utiliza las configuraciones de las normas acomodándose al área de trabajo dentro del Elpo. Además, en base a criterios de trabajo que deben mantener y requerimientos de la empresa, se diseñó la mejor alternativa del sistema de captación. Sin embargo, la posibilidad de adquirir otras alternativas es válido para el propósito de extracción. La Figura 3.5 representa la campana tipo alzada utilizada en el diseño del sistema de ventilación.

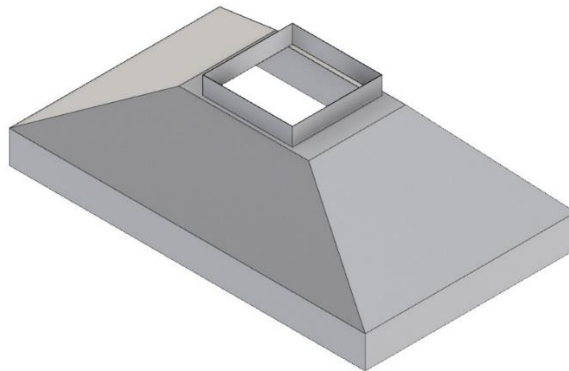


Figura 3.5 Sistema de captación alzada.
(Fuente: Propia)

Características del contaminante

En el caso de estudio, son cuatro los tanques que producen vapor a una escala arbitraria (ver Tabla 2.4). Por tanto, en base al peligro del contaminante y la tasa de evolución del vapor, se determinó que los contaminantes del proceso se encuentran en la categoría B1, B2 y C3, dicha condición del contaminante obliga aplicar un

sistema de extracción local cerca del punto de emisión y complementar con ventilación por dilución. Por tanto, la configuración del sistema de ventilación de las alternativas utilizará estos dos métodos de aplicación.

3.3.2 Alternativas

Alternativa 1

En base a los requerimientos por la empresa CIAUTO, la geometría de la propuesta 1 en su totalidad busca reducir posibles gastos económicos. Los cambios se realizaron en base a los equipos que actualmente opera en la planta, estos equipos de ventilacion cuentan con dos tipos de potencia 1.5 [kW] y 5.5 [kW]. El sistema actual ubica los ventiladores de mayor potencia en las zonas de baja emisión de vapor de agua, mientras que los equipos de menor potencia están sobre el foco de contaminación.

Como primera alternativa se propuso trasladar los equipos de mayor potencia a las áreas críticas. Y con respecto a los sistemas de ventilación, todo permanecerá en su posición inicial, dichos cambios tendrán bajas repercusiones en cuanto a costo y tiempo de ejecución. La Figura 3.6 muestra la configuración del sistema de ventilación de la propuesta 1, las superficies de color verde en la simulación tendrán los valores de potencia de 5,5 [kW].

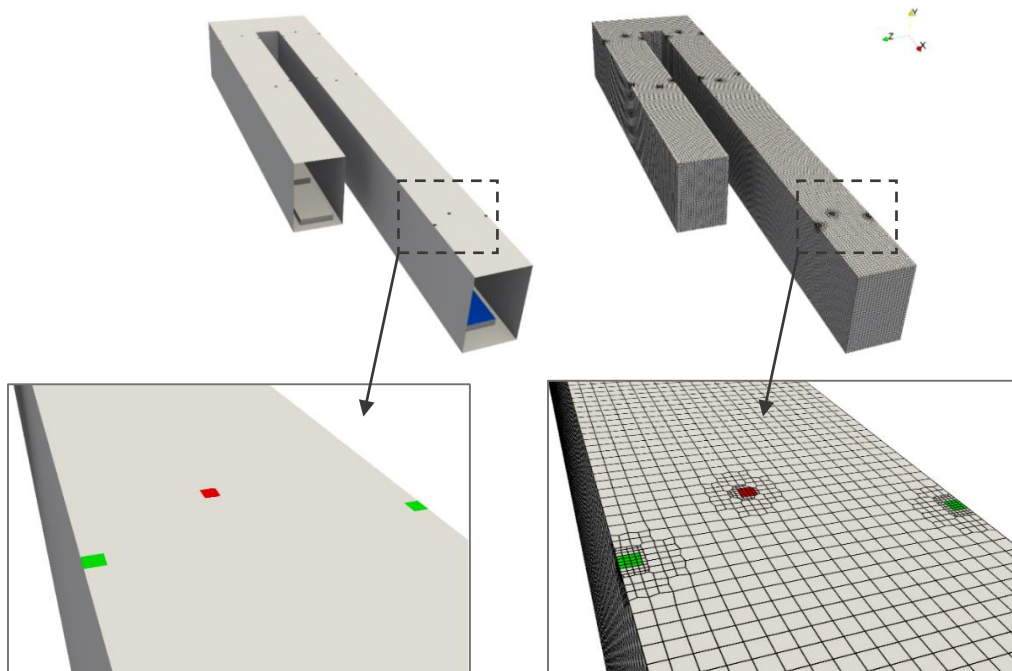


Figura 3.6 Alternativa 1 de simulación.
(Fuente: Propia)

3.3.3 Alternativa 2

En la geometría de la propuesta 2, al igual que la alterativa anterior, se busca controlar los problemas de ventilación a bajos costos. Por lo que, como estrategia se considerarán campanas alzadas enlazadas a los extremos de los conductos del sistema ya existente. Es decir, se sustituirán los cajetines actuales por campanas abiertas de dimensión 1x0,5 [m]. Se utilizaron los equipos de 5,5 [kW] para succión como condición de borde para las campanas alzadas.

En cuanto a los sistemas de ventilación, los equipos de ingreso de aire continuarán en la misma posición debido al problema de movilidad.

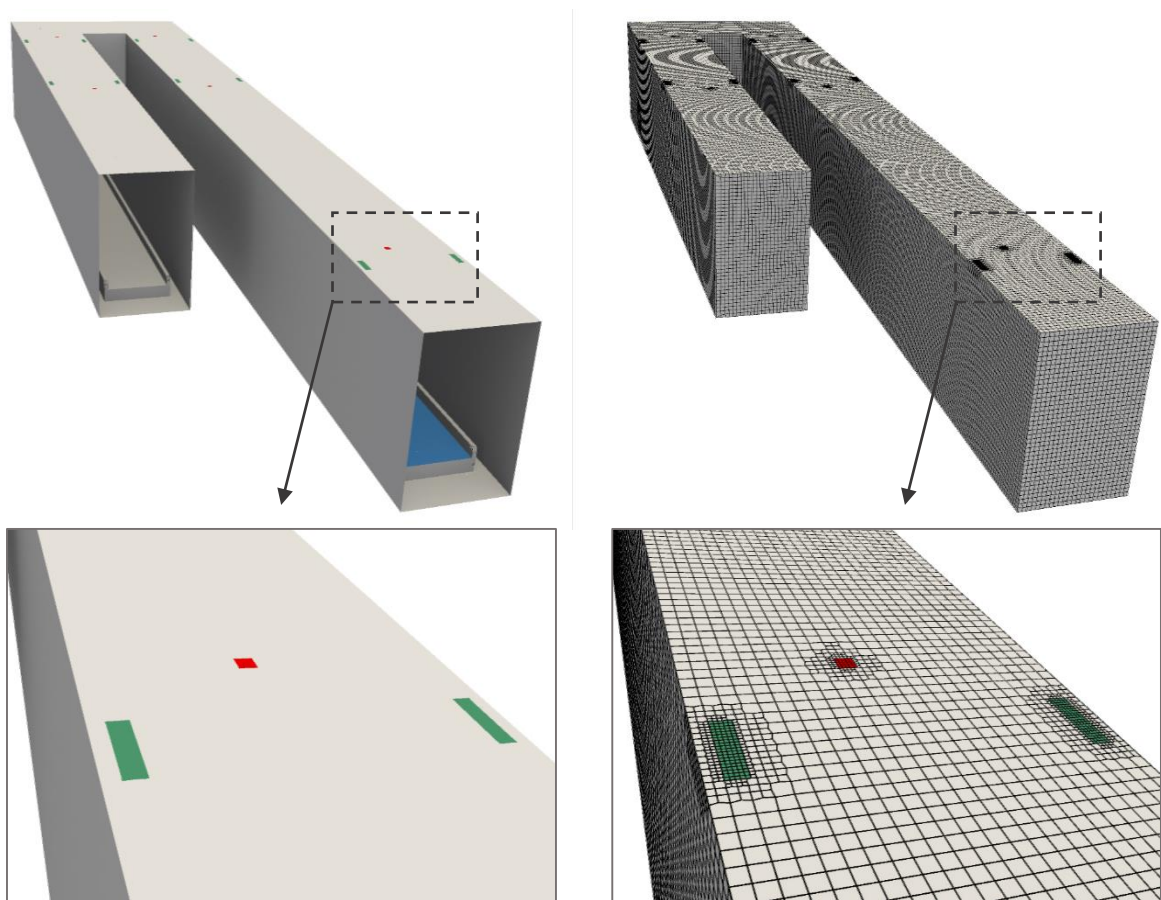


Figura 3.7 Alternativa 2 de simulación.
(Fuente: Propia)

3.3.4 Alternativa 3

En base al manual de ventilación industrial ACGIH y las norma ANSI, la configuración de la campana para cubas abiertas se determina en la Figura 3.8 esta alternativa de diseño seguirá en cierta medida el ámbito costo por el diseño de la boca de aspiración, dimensionamiento y material de construcción. Por otro lado, la campana seleccionada

debe cumplir con los requerimientos de velocidad de captación establecidos en las normas mencionadas anteriormente, las cuales determinan que en valor se encuentra entre 5 a 10 [m/s], según se muestra en el Anexo II.

El área Elpo al contener una serie de tanques con superficie abierta, donde las operaciones cuya tasa de evaporación y desprendimiento de contaminantes tienen una clasificación tipo B1, B2 y C3; y que además la ventilación natural es limitada, se concluye que el Elpo es un recinto confinado. La nota técnica NTP 223 menciona que los espacios considerados como recintos confinados requieren sistemas de ventilación especial.

Por tanto, con la guía de las normas mencionadas en el apartado 2.4.1, el diseño de la alternativa 3 del sistema de ventilación del Elpo aplicará las técnicas de dilución y extracción local donde se requiera para mantener la concentración del vapor desengrasante por debajo de los niveles higiénicamente admisibles.

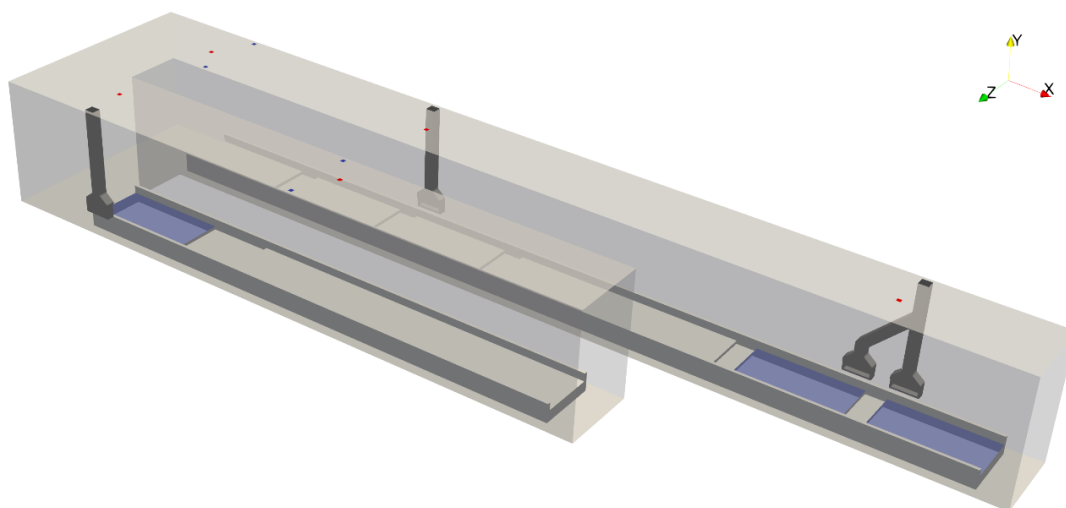


Figura 3.8 Alternativa 3 para simulación.
(Fuente: Propia)

3.4 Comparación de propuestas

Una vez planteadas las tres propuestas del sistema de ventilación, se procedió a simular dichos escenarios con el software ANSYS-FLUENT. Los resultados obtenidos para cada escenario se muestran en este capítulo. Además, se realizó una comparativa del comportamiento de la temperatura entre los resultados obtenidos en las tres simulaciones y los resultados obtenidos en la simulación del comportamiento

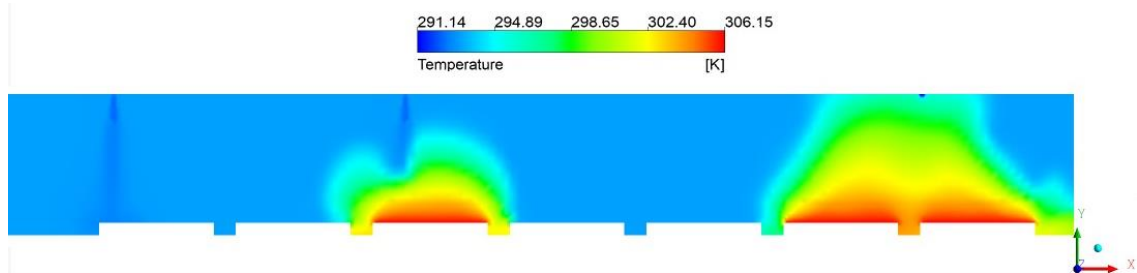
actual del sistema de ventilación. Con base en los resultados analizados, se procedió a seleccionar la alternativa más adecuada.

Concentración de vapor

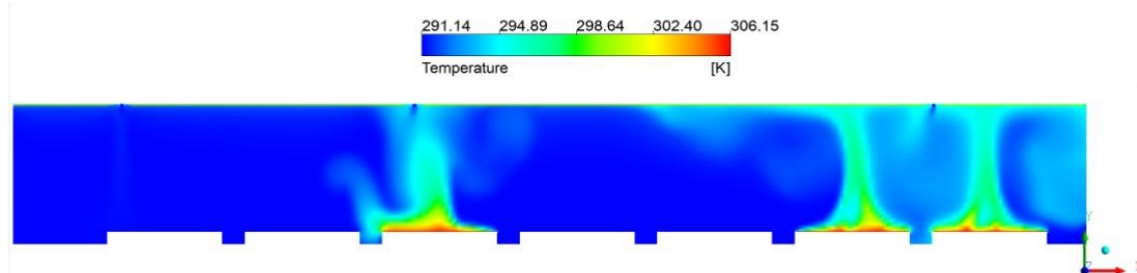
Como se puede ver en la Figura 3.9, la concentración de vapor de agua de la alternativa 1 es ligeramente mejor que la alternativa 2. El diseño de captación de la geometría de la alternativa 3 conduce a una reducción de vapor de agua del 47%, de igual forma se determina una reducción de la temperatura de 26 a 19 [°C]. Por lo tanto, las eficiencias de eliminación de contaminantes de la alternativa de diseño 3 es mejor que las del diseño 1 y 2.

También se puede ver que a partir de los perfiles de concentración que, aunque el flujo de aire de los tres diseños ha disminuido en cierta medida la temperatura ambiental en el Elpo, la condición de temperatura debe mantenerse debido a los parámetros de trabajo del proceso.

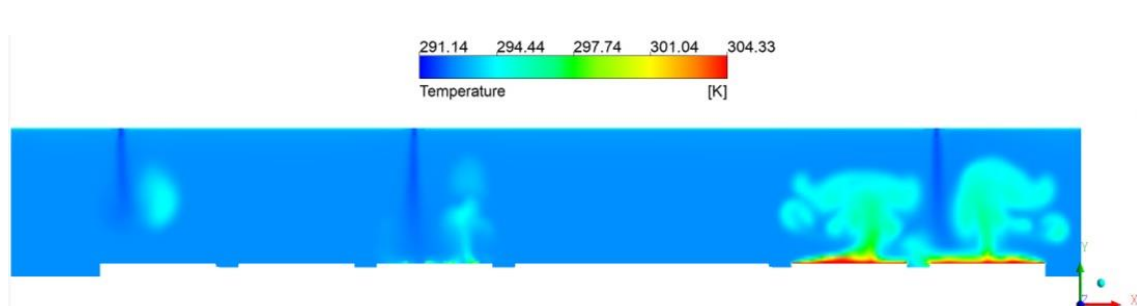
Sistema Actual



Alternativa 1



Alternativa 2



Alternativa 3

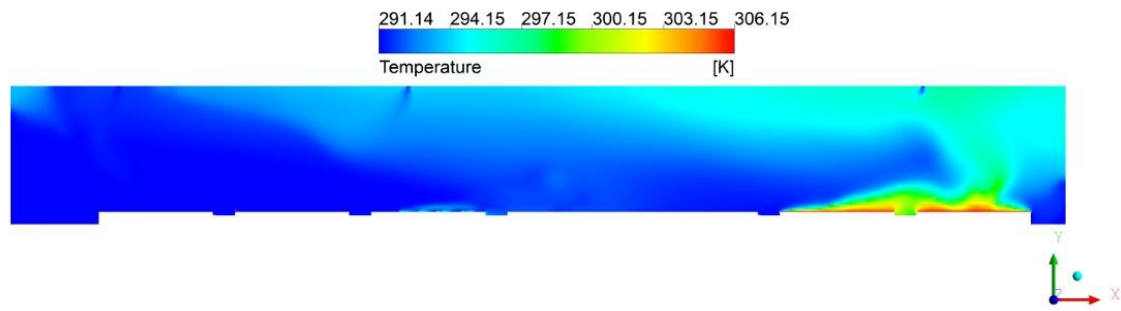


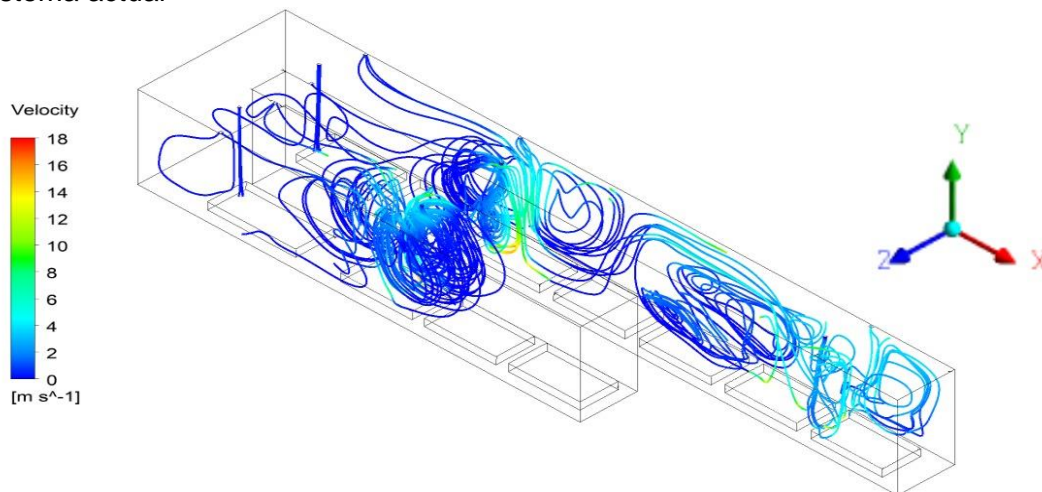
Figura 3.9 Comparación de temperatura de las alternativas (vista lateral).
(Fuente: Propia)

Líneas de velocidad del flujo

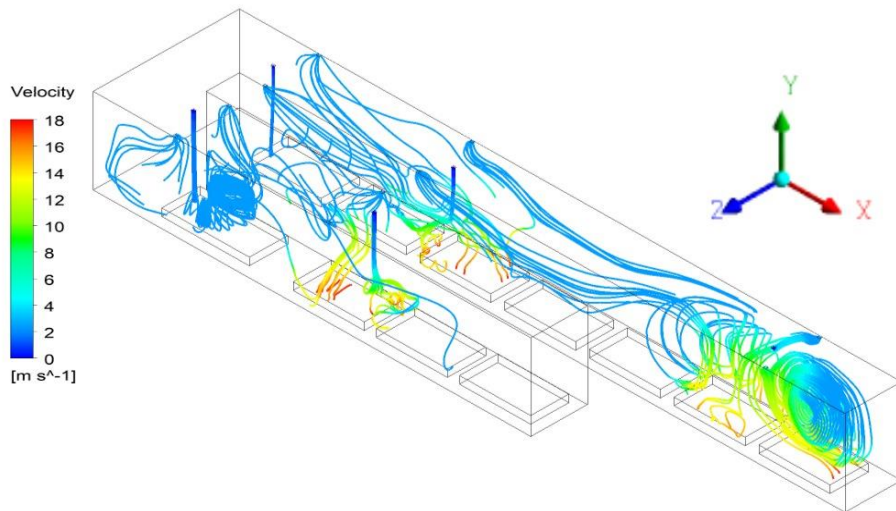
Los contornos de velocidad de la sección horizontal del sistema actual y alternativas 1-3 se muestran en la Figura 3.10. Se puede ver en la figura que el flujo de vapor en la alternativa 1 tiene una trayectoria limitada en la zona crítica y una recirculación turbulenta en el centro del Elpo por la capacidad del equipo de ventilación. Cuando los equipos de mayor potencia se trasladan a la fuente de contaminación (alternativa 1), las trayectorias del vapor aumentan logrando un movimiento considerable durante un tiempo de 20 [s] antes de ser expulsado.

El remolino que genera el flujo en las alternativas 1 y 2 indican la dispersión del vapor que choca con las paredes y tanques provocando un rebrote y distorsión. Al no tener un sistema de captación, el flujo se direcciona aleatoriamente con tendencia a acumulación sobre los tanques. Por el contrario, con el sistema de captación de la alternativa 3, el flujo de vapor logra controlarse en todo el recinto logrando una eficiencia de distribución frente a las demás alternativas.

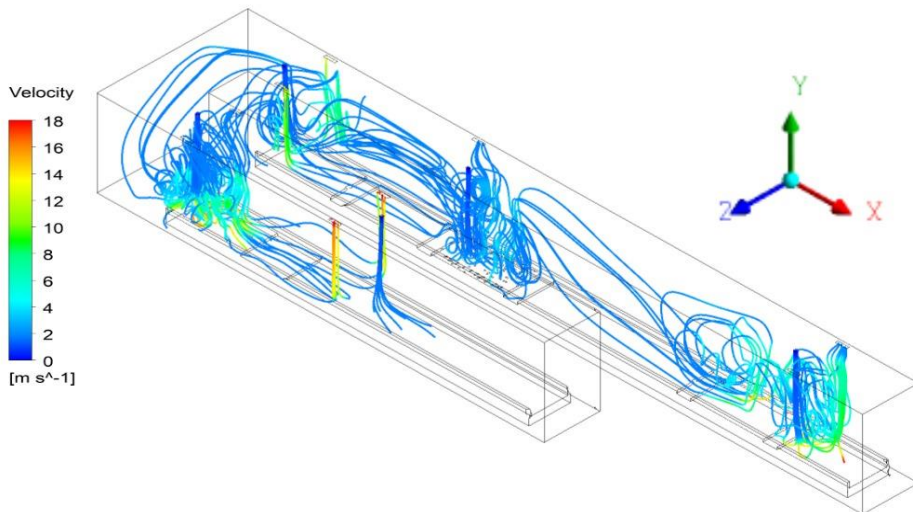
Sistema actual



Alternativa 1



Alternativa 2



Alternativa 3

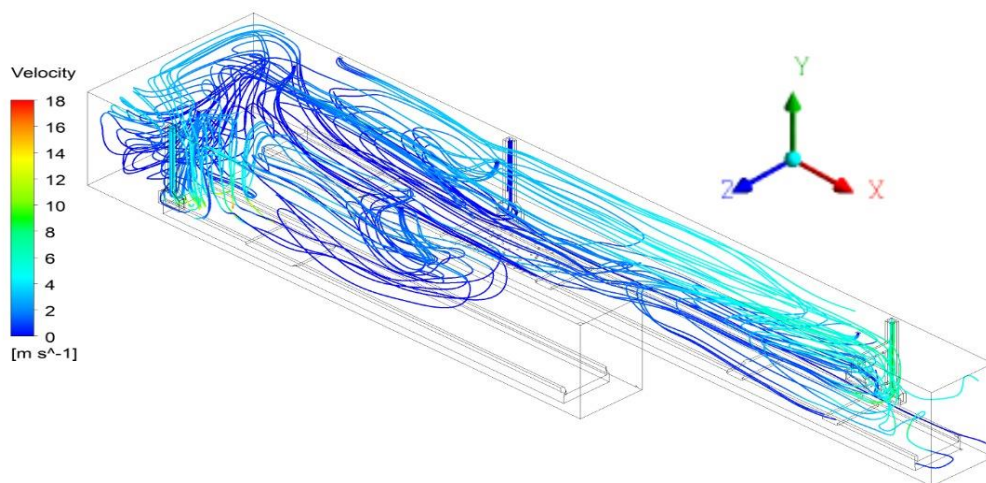


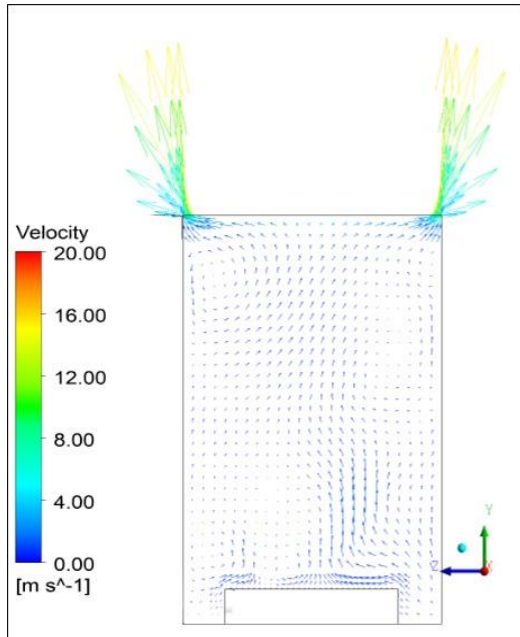
Figura 3.10 Comparación de Líneas de velocidad de las alternativas.
(Fuente: Propia)

Vectores de velocidad

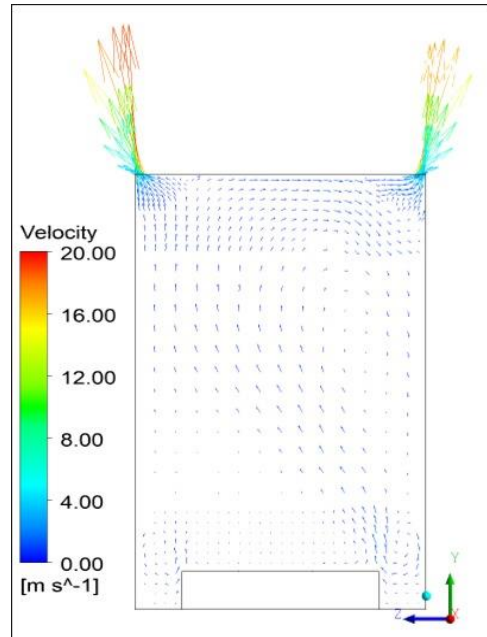
Los vectores de velocidad de la alternativa 1 aumenta respecto a los resultados del sistema actual debido a la potencia de los equipos. Existe un cambio significativo de la velocidad del flujo del vapor en esa área, su trayecto se direcciona hacia el techo diluyéndose hacia los extremos.

Tabla 3.10 Vectores de velocidad de las alternativas.

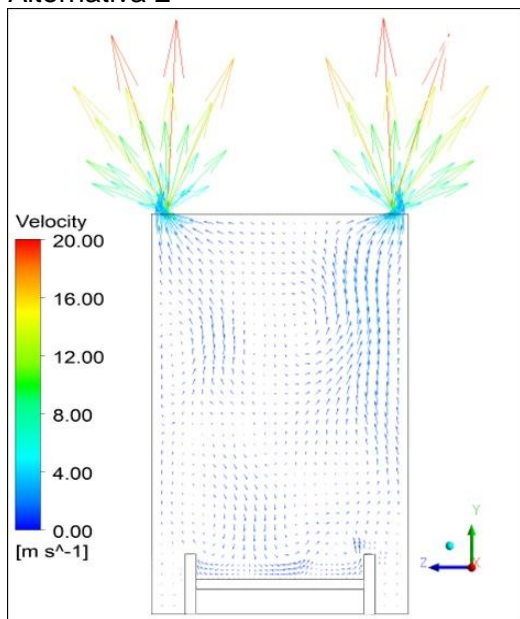
Sistema actual



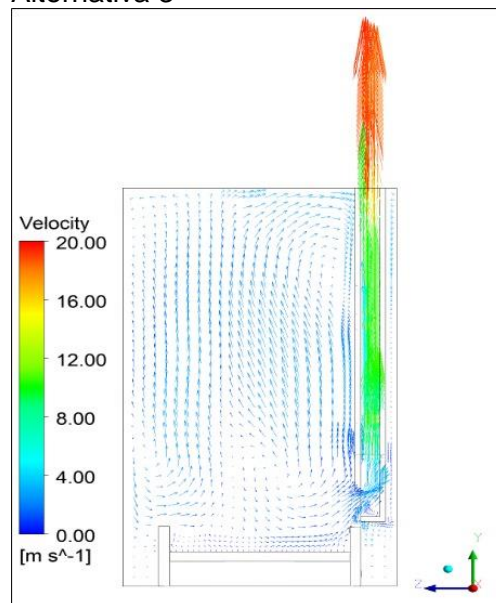
Alternativa 1



Alternativa 2



Alternativa 3



(Fuente: Propia)

Por otro lado, la alternativa 2 utiliza los equipos de 5,5 [kW] pero con un sistema de captación diferente al original. La campana alzada es capaz de extraer un caudal de mezcla vapor y aire de 0,2 [m³/s] más que la alternativa 1.

En cuanto a la alternativa 3, los vectores de flujo se direccionan por la campana y sistema de conductos. El movimiento de flujo es mayor en este análisis por la capacidad de succión del equipo. En las alternativas anteriores el equipo de extracción dividía su caudal de captación a los dos ductos pero para la alternativa 3, el equipo abastece únicamente a la campana lateral por lo que la succión alcanza el 1.4 [m³/s] de caudal succionado en ese tramo.

Temperatura

La Figura 3.11 indica los perfiles de temperatura para cada una de las propuestas con respecto a la simulación del sistema actual. Se observa que las curvas presentan la misma tendencia de comportamiento. Sin embargo, las variaciones que presentan en la curva de temperatura experimental se deben a diversos factores, por ejemplo, la precisión de los instrumentos de medición, impurezas presentes, pérdidas de calor, entre otros, intervienen en la medición de los valores.

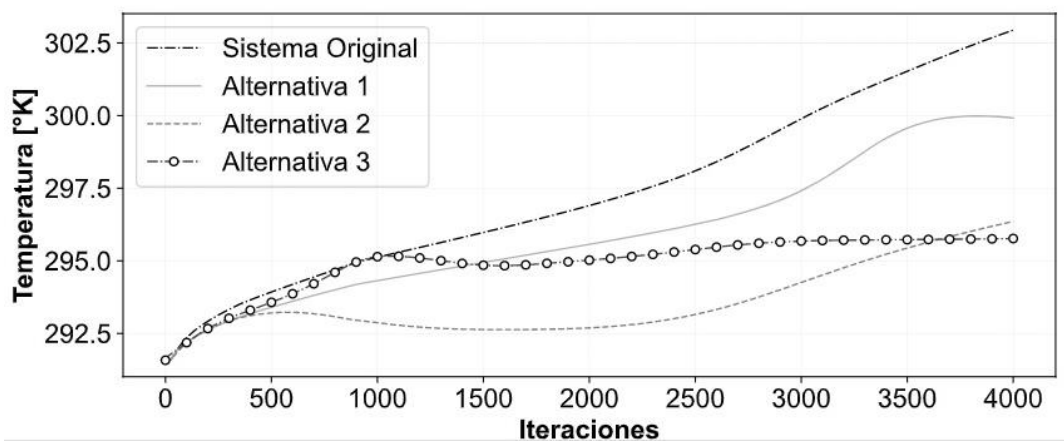


Figura 3.11 Curvas de comportamiento de temperatura entre alternativas.
(Fuente: Propia)

3.5 Propuesta escogida

La propuesta seleccionada como alternativa de diseño óptimo del sistema de ventilación del área Elpo es la 3 debido a su diseño funcional de captación que permite controlar de forma eficiente los vapores de agua del proceso.

Residuales

Al realizar la alternativa 3, se revisó la convergencia de los esquemas de solución, para ello se obtuvieron los valores de los residuales para cada término en relación con las ecuaciones de continuidad, momento y energía. El software ANSYS-FLUENT recomienda, que al alcanzar un valor de 10^{-3} en los residuales se tiene una convergencia satisfactoria.

La Figura 3.12 muestra el comportamiento de los residuales para cada término de las ecuaciones. Se realizaron diversas corridas variando el número de iteraciones hasta alcanzar la convergencia, se analizó hasta 12000 iteraciones. Sin embargo, no se presentaron cambios significativos a partir de las 5000 iteraciones. Puede observarse que en 5000 iteraciones los residuales tienden a disminuir con pequeñas variaciones entre iteraciones y se logró alcanzar un valor menor a $1e^{-3}$ en todos los parámetros.

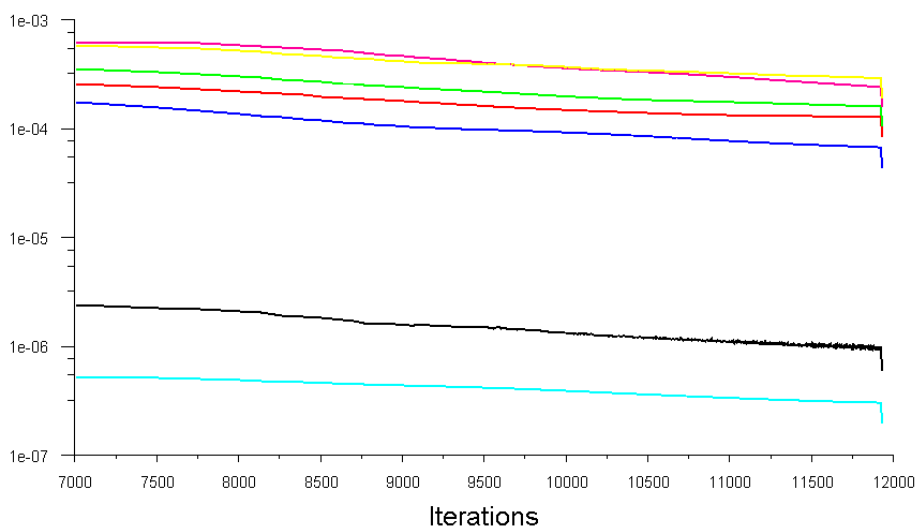
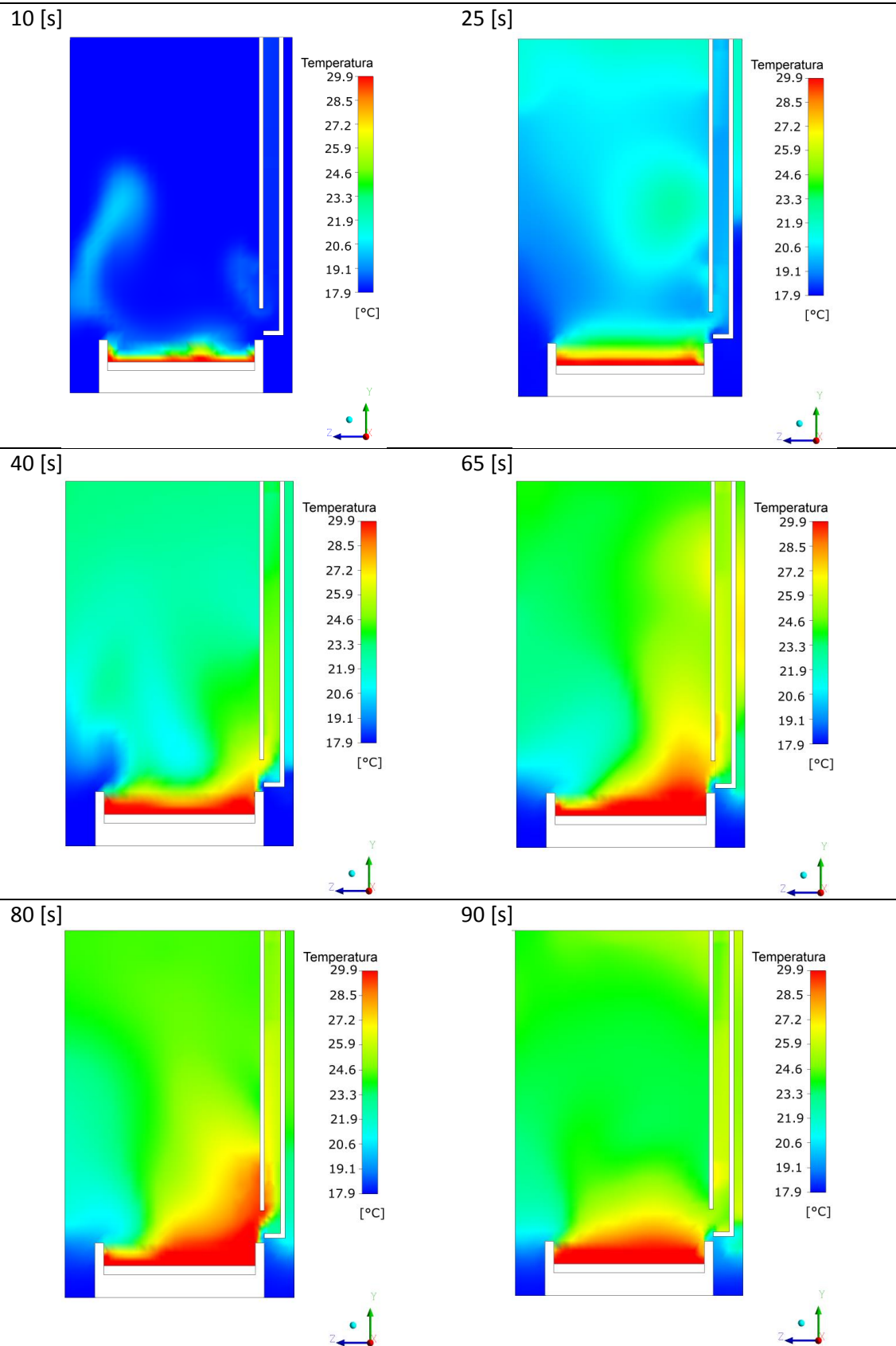


Figura 3.12 Residuales de simulación Alternativa 3.
(Fuente: Propia)

Perfil de temperatura

En el perfil de temperatura transversal se observa la distribución del flujo vapor de agua-aire por los canales de ductos, teniendo un recorrido hacia los puntos de desfogue. La Tabla 3.11 muestra el tiempo de evolución de la mezcla vapor de agua y aire, se puede observar que el vapor de agua queda inicialmente atrapado en la superficie del techo justo sobre la zona crítica de emisión de vapor de agua y, finalmente, se distribuye a través de los extractores de aire. Después de los 90 segundos, se observa una distribución del vapor a lo largo de los ductos hacia el desfogue.

Tabla 3.11 Perfil de temperatura para diferentes tiempos.



(Fuente: Propia)

3.5.1 Selección de conductos

De acuerdo con el diseño del sistema de ventilación y extracción de la Alternativa 3, la condición de dispersión del contaminante se libera por el área de los tanques a cierta velocidad, misma que es considerada como parámetro en el diseño de conductos. Según las recomendaciones de velocidad de captura que proporciona el manual ACGIH, se escoge la velocidad de diseño de conductos de 7 [m/s] [12].

Por otro lado, los resultados de la simulación de la Alternativa 3 arrojaron valores de caudal en la campana de extracción de 1.4 [m³/s] o 2900 [CFM]. Con el caudal de aire a extraer, velocidad de captura y longitud del ducto obtenidos, se determina las pérdidas de presión por fricción mediante un gráfico que proporciona la norma ASHRAE [43]. Ver Anexo 10.

Tabla 3.12 Criterios de diseño de conductos.

Parámetro	Valor
Caudal de extracción	[CFM]
Velocidad de aire en el ducto	1377 [ft/min]
Diámetro del ducto	500 [mm]

(Fuente: Propia)

Con el diámetro de ducto obtenido se selecciona la dimensión rectangular del conducto mediante la tabla equivalente de la norma ASHRAE [43]. Ver Anexo 11.

La Tabla 3.12 especifica los resultados de pérdida de fricción de los conductos que conforman el sistema de ventilación de la Alternativa 3, mediante estos datos se procede con la selección de los equipos de ventilación.

Tabla 3.13 Resultado de diseño de ductos para el caudal de extracción.

Parámetro	Caudal [cfm]	Dimensión del ducto [in]	Velocidad [ft/min]	Longitud del ducto [in]	Pérdida unitaria [pulgH ₂ O]	Pérdida unitaria x longitud [pulgH ₂ O]	Pérdida de presión total [pulgH ₂ O]
Ducto 1	2900	40x50		6.56	0.11	0.72	
Ducto 2		16x20	1377	21.32	0.11	2.34	3.1
Codo 90°		--		--	0.03	0.03	

(Fuente: Propia)

3.5.2 Selección del ventilador

El ventilador es un dispositivo que transmite su potencia al flujo dentro del ducto para vencer la pérdida de presión. Para la selección de los ventiladores de extracción es necesario conocer los caudales que se requerirán por la longitud del ducto de acuerdo con las diferentes pérdidas de carga que se deben vencer.

En base a lo determinado en el apartado anterior, se plantea los requerimientos de velocidad, caudal de extracción, condiciones ambientales de temperatura y densidad del flujo. A continuación, se especifica en la Tabla 3.13 las condiciones de trabajo.

Tabla 3.14 Parámetros para la selección del ventilador de extracción.

Parámetro	Valor
Caudal de extracción	1.4 [m ³ /s] o 2900 [CFM]
Caídas de presión	3.1 [pulgH ₂ O]
Temperatura	20 [°C]
Densidad del vapor	0.0514 [kg/m ³]

(Fuente: Propia)

Se selecciona un ventilador que cumpla con los datos requeridos en el diseño del sistema de extracción. La selección del equipo se realiza mediante el catálogo del fabricante S&P, cuyo equipo de extracción pertenece al grupo CX. Los parámetros técnicos del equipo de muestran en la Tabla 3.14, mientras que las curvas características se detallan en el Anexo 12 [44].

Tabla 3.15 Ventilador seleccionado para la extracción de vapor.

Parámetro	Unidades	Dato
Marca	--	S&P
Modelo	--	CX 5500
Potencia del motor	[hp]	7 ½
Velocidad de giro	[Rpm]	3500
Caudal a descarga libre	[CFM]	2647
Eficiencia	[%]	69

(Fuente: Propia)

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En el caso de estudio, son cuatro los tanques que producen vapor a una escala arbitraria, Por tanto, en base al peligro del contaminante y la tasa de evolución del vapor, se determinó que los contaminantes del proceso del Elpo se encuentran en la categoría B1, B2 y C3, dicha condición del contaminante obliga a aplicar un sistema de extracción local cerca del punto de emisión y complementar con ventilación por dilución. Por tanto, la configuración del sistema de ventilación de las alternativas utilizó los dos métodos de ventilación industrial.

El diseño y selección de conductos y equipos mecánicos se realizaron en base a los resultados obtenidos de la simulación de la Alternativa 3. Los datos de caudal y velocidad de captación se utilizaron para determinar los componentes del sistema de ventilación de la propuesta seleccionada a través de normas específicas.

Mediante simulación CFD se analizó el comportamiento del flujo de la mezcla vapor-aire del sistema de ventilación actual del sistema Elpo y se comparó con los resultados de tres alternativas de diseño del sistema de ventilación. La simulación del desempeño del sistema de ventilación de la Alternativa 3 aporta información sobre el comportamiento ambiental del interior del sistema Elpo. El sistema de ventilación de la alternativa 3 redujo la concentración de vapor de los tanques 1 y 2 en un 47%, y la temperatura ambiental se redujo de 26 a 19 [°C].

Aunque la Alternativa 3 es apta para su uso en espacios confinados, la configuración del sistema de ventilación para la extracción en los procesos galvánicos en la industria automotriz debe ser puntual a través de sistemas centralizados con cabina. Sin embargo, debido al espacio dificulta el uso de estos sistemas.

Una de las limitaciones que se detectó a la hora de realizar el trabajo fue la capacidad de cómputo. Integrar todo el sistema Elpo en una simulación generó un modelo demasiado grande, requiriendo una gran capacidad de cómputo, no disponible en la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Recomendaciones

En este proyecto, el proceso para obtener los datos de operación del Elpo fue de gran complejidad, por lo que, se recomienda utilizar equipos de medición especializados para capturar los datos experimentales en el área de difícil acceso. Con estos instrumentos se pueden determinar condiciones de error por factor humano y resultados con baja incertidumbre.

La norma ANSI menciona que el diseño de captación ideal en las operaciones que usan cubas debe utilizar campanas localizadas en sus dos lados. Sin embargo, debido a la limitación de espacio se diseñó la campana a un solo lado. En base a esto, se recomienda determinar la configuración que más se acomode a las condiciones del lugar siguiendo las especificaciones de las normas.

Debido a la complejidad del caso, los resultados de simulación se obtuvieron en tiempos de uno a ocho días, tiempo excesivo que conlleva altos recursos computacionales. Por lo que, se recomienda optimizar el diseño o disminuir la complejidad del caso para obtener resultados en poco tiempo.

El presente trabajo indica una alternativa de diseño que puede ser mejorada en varios aspectos, principalmente es necesario encerrar completamente los golpes de vapor que ocurren en cada ingreso y salida del auto de las piscinas cuyo contenido se encuentra a altas temperaturas. Por lo que, como trabajo futuro se considera desarrollar un diseño de ventilación y extracción de vapores que incluya cortinas de aire que delimiten las piscinas críticas de las que trabajan con agua a temperatura ambiente. Sin embargo, para desarrollar esta consideración es necesario realizar un estudio previo del impacto que provocarían las barreras de aire sobre la superficie del auto cuando traspasa la barrera.

Referencias Bibliográficas

- [1] J. A. Leech, W. C. Nelson, R. T. Burnett, S. Aaron, and M. E. Raizenne, "It's about time: A comparison of Canadian and American time-activity patterns," *J Expo Anal Environ Epidemiol*, vol. 12, no. 6, pp. 427–432, 2002, doi: 10.1038/sj.jea.7500244.
- [2] Organización Panamericana de la Salud, "Salud de los Trabajadores: Recursos-Preguntas." https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=1527:workers-health-resources&Itemid=1349&limitstart=2&lang=es (accessed Sep. 09, 2021).
- [3] I. Ávila Roque *et al.*, "Estrés Térmico, Salud Y Confort Laboral," *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [4] V. K. and F. Kudász, "Work-related shin diseases," *OSH WIKI*, 2017. https://oshwiki.eu/wiki/Work-related_skin_diseases#cite_note-twelve-13 (accessed Aug. 09, 2021).
- [5] R. A. Wadden, P. A. Scheff, J. L. Hawkins, and J. E. Franke, "Characterization of emission factors related to source activity for trichloroethylene degreasing and chrome plating processes," *Am Ind Hyg Assoc J*, vol. 52, no. 9, pp. 349–356, 1991, doi: 10.1080/15298669191364866.
- [6] W. B. Harris, C. B. Ford, F. A. Patty, and T. Hatch, "Safe Operation of Degreasing Tanks Using Trichlorethylene," *Am J Public Health Nations Health*, vol. 29, no. 6, pp. 603–614, 1939, doi: 10.2105/ajph.29.6.603.
- [7] N. Cavallé Oller, "Exposición simultánea a varios agentes químicos: criterios generales de evaluación del riesgo," *Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo*, pp. 1–8, 2011, [Online]. Available: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/891a925/925w.pdf>

- [8] M. Revueltas Agüero, J. A. Betancourt Bethencourt, R. del Toro Ramírez, and Y. Martínez García, "Caracterización del ambiente térmico laboral y su relación con la salud de los trabajadores expuestos," *Revista Cubana de Salud y Trabajo*, vol. 16, no. 2, pp. 3–9, 2015.
- [9] K. Y. Kirichenko, I. A. Vakhniuk, V. v Ivanov, I. A. Tarasenko, and D. Y. Kosyanov, "Complex study of air pollution in electroplating workshop," *Sci Rep*, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-67771-3.
- [10] Ministerio de Ambiente, "Estudio De Potenciales Impactos Ambientales Y Vulnerabilidad Relacionada Con Las Sustancias Químicas Y Tratamiento De Desechos Peligrosos En El Sector Productivo Del Ecuador," *Ministerio de Ambiente*, 2014. <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART5.pdf>
- [11] American National Standards Institute. and American Industrial Hygiene Association., *American national standard-- ventilation and control of airborne contaminants during open-surface tank operations*. The Association, 2006.
- [12] K. M. MORSE, *Industrial ventilation*, vol. 3, no. 2. 1946. doi: 10.4324/9781003116820-5.
- [13] N. Cavallé Oller and A. Hernández Calleja, "NTP 741: Ventilación general por dilución," *Notas Técnicas de Prevención. INSHT*, p. 11, 2006, [Online]. Available: https://www.insst.es/documents/94886/327446/ntp_741.pdf/6e87a3f1-0c81-4323-9be5-772e2e593a18
- [14] S. Huertas, "Ventilación y extracción localizada," *MUNDO HVAC&R*, pp. 20–23, Feb. 2013. [Online]. Available: <https://www.mundohvacr.com.mx/2013/02/febrero-2013/>
- [15] N. C. Oller, I. Químico, and A. H. Calleja, "NTP 741: Ventilación general por dilución."
- [16] Soler & Palau, "CAPITULO 4: Claves y conceptos de la ventilación localizada," pp. 5–7, [Online]. Available:

https://www.solerpalau.mx/ASW/recursos/mven/Capitulo_4_Manual_de_Ventilacion.pdf

- [17] N. K. Akafuah, S. Poozesh, A. Salaimeh, G. Patrick, K. Lawler, and K. Saito, "Evolution of the automotive body coating process-A review," *Coatings*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.3390/coatings6020024.
- [18] Hans-Joachim Streitberger and Karl-Friedrich D"ossel, *Automotive Paints and Coatings*, vol. 1999, no. December. 2006.
- [19] J. R. y M. B. G. Rosalina Pérez, "Electroforesis como alternativa a los tratamientos convencionales," 2021. <https://www.interempresas.net/TTS/Articulos/356270-Electroforesis-como-alternativa-a-los-tratamientos-convencionales.html> (accessed Jul. 24, 2022).
- [20] D. L. I. S. A, "Universidad Nacional de Córdoba Físicas y Naturales Escuela de Ingeniería Industrial Proyecto de producción limpia para el sector de galvanoplastia Tutor :," 2013.
- [21] S. Jamshed, "Introduction to CFD," *Using HPC for Computational Fluid Dynamics*, pp. 1–20, 2015, doi: 10.1016/b978-0-12-801567-4.00001-5.
- [22] Cluster de Seguretat Contra Incendis, "Análisis de resultados de simulaciones CFD para la validación de sistemas de ventilación." <https://clusterincendis.com/analisi-de-resultados-de-simulaciones-cfd-para-la-validacion-de-sistemas-de-ventilacion/> (accessed Sep. 09, 2021).
- [23] J. Zhang, W. Johnson, and T. Plikas, "Application of computational fluid dynamics for solving ventilation problems in metallurgical industrial processes," *International Journal of Ventilation*, vol. 16, no. 3, pp. 200–212, 2017, doi: 10.1080/14733315.2017.1299516.
- [24] R. Zhao, L. Zhou, and J. Ma, "CFD design of ventilation system for large underground bus terminal in Macau Barrier Gate," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, no. August 2017, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.05.010.

- [25] H. Medina, A. Beechook, J. Saul, S. Porter, S. Aleksandrova, and S. Benjamin, "Open source Computational Fluid Dynamics using OpenFOAM," vol. 2015, no. November, pp. 1–10, 2015, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/286359861>
- [26] E. P. A. Ojeda, P. M. López, S. A. Farah, and R. A. C. Ramirez, "Cfd como una herramienta para diseño de productos," *Memorias Del Xv Congreso Internacional De La Somim*, pp. 431–442, 2009.
- [27] M. Engineering, "CFD Guide – Types of CFD Software and Applications," 2022. <https://mechanicalland.com/cfd-guide/> (accessed Sep. 07, 2022).
- [28] J. Tu, G.-H. Yeoh, and C. Liu, *Practical Guidelines for CFD Simulation and Analysis*. 2018. doi: 10.1016/b978-0-08-101127-0.00007-6.
- [29] P. J. Roache, "QUANTIFICATION OF UNCERTAINTY IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS," 1997. [Online]. Available: www.annualreviews.org
- [30] T. D. Canonsburg, "ANSYS Fluent Theory Guide," *ANSYS Inc., USA*, vol. 15317, no. November, p. 814, 2013, [Online]. Available: http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
- [31] D. Ingham and L. Ma, *Part One An Overview of Computational Fluid Dynamics Schemes Fundamental equations for CFD in river flow simulations*, Omputation., vol. 4. Wiley Online Library, 2005.
- [32] S. J. Jo, J. Jones, and F. Battaglia, "Validation of Computational Fluid Dynamics (CFD) Platforms for the Early Stages of Architectural Design," *Prometheus: Buildings, Cities, and Performance II*, vol. 4, pp. 74–77, 2020.
- [33] ASHRAE STANDAR, "Measurement, Testing, Adjusting, and Balancing of Building HVAC Systems," 2008, vol. 2008, pp. 3–15, 2008, [Online]. Available: www.ashrae.org
- [34] P. González Villegas Lda en Ciencias Químicas Emilio Turmo Sierra, "NTP 223: Trabajos en recintos confinados."

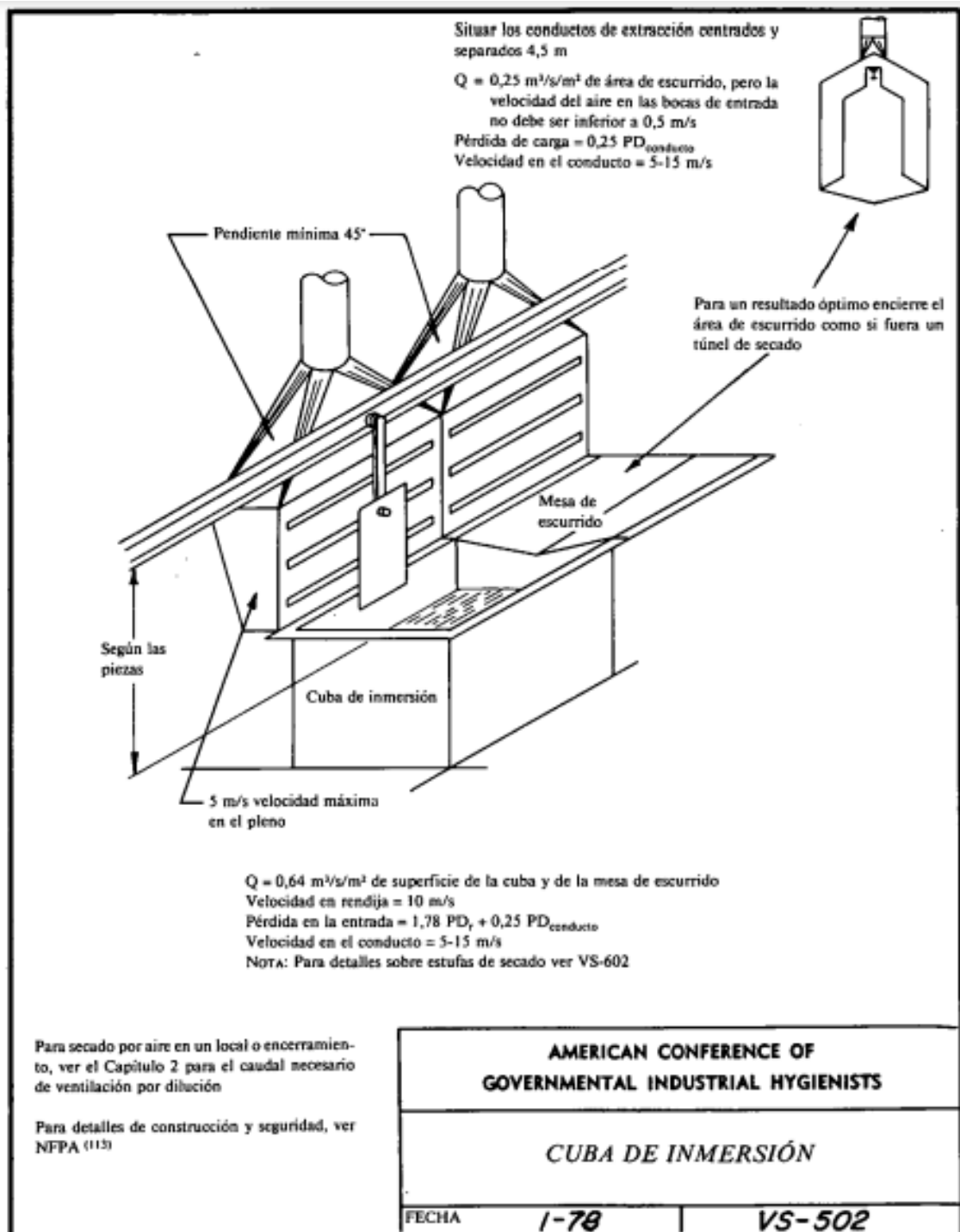
- [35] J. Quinatoa, “ESTRÉS TÉRMICO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DE LA SOBRECARGA TÉRMICA ESTIMADA PARA LA NAVE DE PINTURA EN EL ÁREA ELPO DE LA EMPRESA CIAUTO,” UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, Ambato, 2019.
- [36] M. del Campo, “EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN DATOS EXPERIMENTALES.” Accessed: Dec. 01, 2021. [Online]. Available: https://www.fisica.unam.mx/personales/crespo/es/Estudiantes_files/EVAL_INCERT-2003.pdf
- [37] Woldynamics, “Mesh generation using snappyHexMesh,” p. 100, 2018.
- [38] E. M. Alawadhi, “Meshing guide,” *Finite Element Simulations Using ANSYS*, vol. 15317, no. November, pp. 407–424, 2020, doi: 10.1201/b18949-12.
- [39] ANSYS Inc., “Using the VOF Model”, Accessed: Oct. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/resource-center/webinar/ansys-2021-r1-multiphase-volume-of-fluid-vof-and-regime-transition-update>
- [40] J. Erazo, “DESARROLLO DE UN MODELO PARAMÉTRICO PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE TURBINAS HIDRÁULICAS TIPO PELTON EN PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.,” Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [41] K. W. Yi, Y. il Kim, and G. N. Bae, “Effect of air flow rates on concurrent supply and exhaust kitchen ventilation system,” *Indoor and Built Environment*, vol. 25, no. 1, pp. 180–190, 2016, doi: 10.1177/1420326X14541558.
- [42] L. Ntp, V. Ingeniero, I. Centro, and N. D. E. Condiciones, “NTP 190: Cubas de desengrase con tricloroetileno y percloroetileno. Prevención de riesgos higiénicos,” p. 5, 1986, [Online]. Available: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_190.pdf

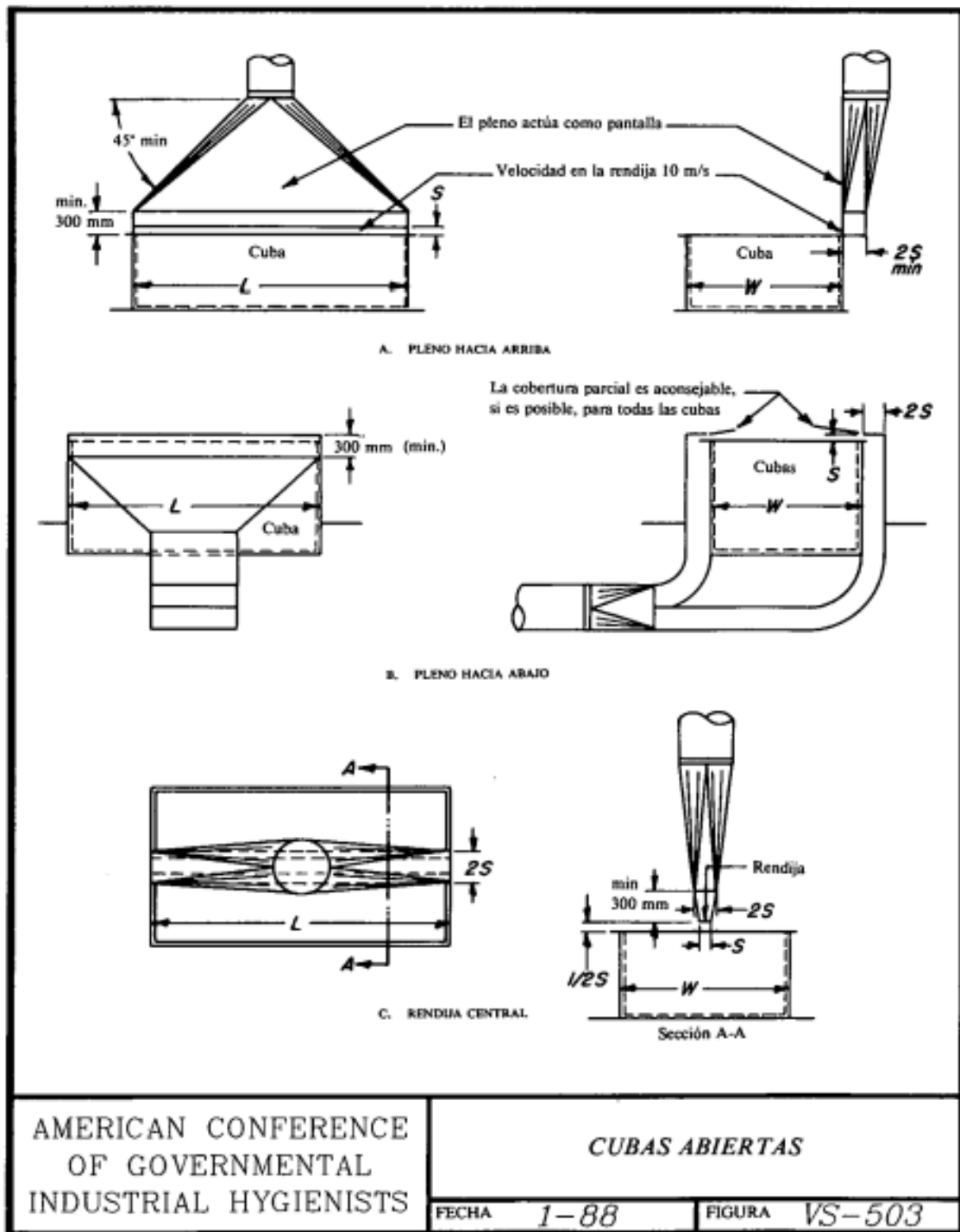
- [43] R. and A.-C. Engineers. American Society of Heating and R. and A.-C. E. American Society of Heating, *2015 ASHRAE handbook: heating, ventilating, and air-conditioning applications, Inch - Pound Edition*.
- [44] SOLER&PALAU, "Catalogo Ventiladores".

Anexos

ANEXO 1

Configuraciones especiales de campanas de extracción lateral para cubas de inmersión.





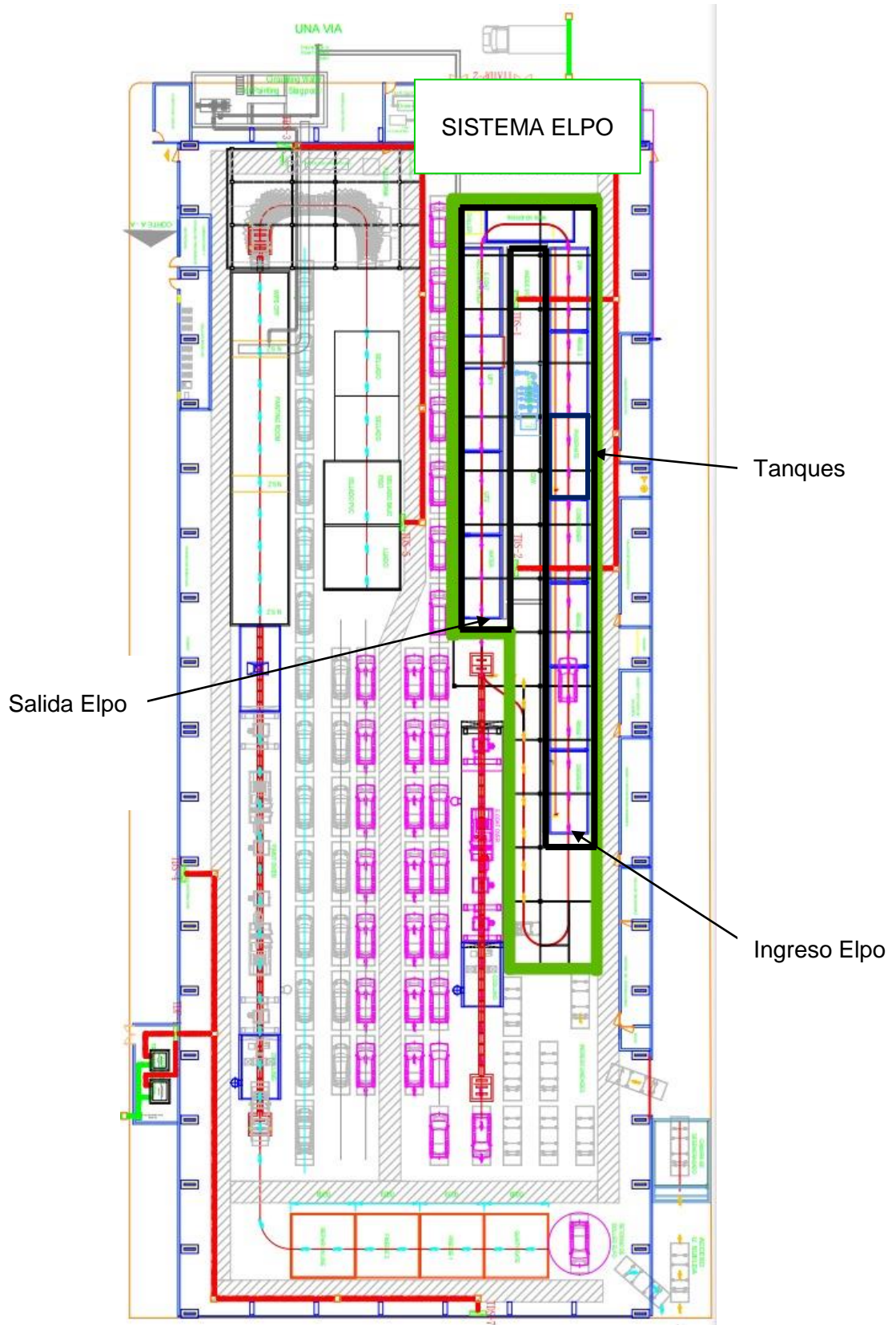
AMERICAN CONFERENCE
 OF GOVERNMENTAL
 INDUSTRIAL HYGIENISTS

CUBAS ABIERTAS

FECHA 1-88 FIGURA VS-503

ANEXO 2




Ubicación del sistema Elpo en la planta de pintura de la empresa CIAUTO.



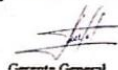
ANEXO 3

Certificados de calibración de los equipos de medición (Anemómetro).

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN No: CC-2540-004-21

						
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE						
NOMBRE:	CIAUTO CIA. LTDA.					
DIRECCIÓN:	AMBATO. R9XR+7CV, EL CONDE					
TELÉFONO:	0993300735					
PERSONA(S) DE CONTACTO:	MIGUEL TAIPE					
IDENTIFICACIÓN DEL ÍTEM						
ÍTEM:	ANEMOMETRO	CÓDIGO ⁽¹⁾ :	NO ESPECIFICA			
MARCA:	MASTECH	UNIDAD DE MEDIDA:	m/s			
MODELO:	MS	RESOLUCIÓN:	0,1			
SERIE:	MS6252B	INTERVALO DE MEDIDA ⁽²⁾ :	(0,6 a 40) m/s			
UBICACIÓN:	NO ESPECIFICA					
EQUIPAMIENTO UTILIZADO						
CÓDIGO	NOMBRE	MARCA	MODELO	SERIE	VENCE CAL.	N° CERTIFICADO
EL.PC.060	ANEMOMETRO PATRON	TSI ALNOR	AVM440	AVM441813009	2022-06-11	800424102
EL.PT.1366	BARÓMETRO DIGITAL	CONTROL COMPANY	6530	192445056	2021-08-30	6530-10674044
EL.PT.365	TERMOHIGROMETRO	CENTER	342	190601459	2022-04-01	CC-1497-001-21
DECLARACIÓN DE TRAZABILIDAD METROLÓGICA						
Los resultados de calibración contenidos en este certificado son trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI) por medio de una cadena ininterrumpida de calibraciones a través del NIST (National Institute of Standards and Technology - Estados Unidos) o de otros Institutos Nacionales de Metrología (INMs).						
CALIBRACIÓN						
MÉTODO:	COMPARACIÓN DIRECTA CON ANEMÓMETRO PATRÓN Y TUNEL DE VIENTO					
DOCUMENTO DE REFERENCIA:	ISO 17713-1:2007					
PROCEDIMIENTO:	PEC.EL.53					
LUGAR DE CALIBRACIÓN:	LABORATORIO DE TORQUE, FUERZA Y PRESIÓN (ELICROM)					
TEMPERATURA AMBIENTAL MEDIA:	23,4 °C	±0,4 °C				
HUMEDAD RELATIVA MEDIA:	53,5 %HR	±1,7 %HR				
PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA:	1012 hPa	±1 hPa				
RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN						
Nominal	Lectura Ítem	Lectura Patrón	Error de Medición	Incertidumbre	Factor de Cobertura (k)	
m/s	m/s	m/s	m/s	m/s		
0,6	0,6	0,600	0,000	0,060	2,00	
2	2,0	1,989	0,011	0,066	2,00	
7	7,1	7,038	0,062	0,078	2,00	
OBSERVACIONES						
La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición (intervalo de confianza), la cual se evaluó con base en el documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k, que para una distribución t (de Student) corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente el 95,45%. Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom-Calibración. Los resultados contenidos en este certificado son válidos únicamente para el ítem aquí descrito, en el momento y bajo las condiciones en que se realizó la calibración.						
NOTA: La lectura del patrón y el error de medición (mejor estimación del valor verdadero) se muestran con la misma cantidad de decimales que la incertidumbre reportada (véase 7.2.6 de la GUM).						
⁽¹⁾ Información proporcionada por el cliente. Elicrom no es responsable de dicha información.						
⁽²⁾ Información tomada de las especificaciones del ítem de calibración (proporcionada por el fabricante).						
CALIBRACIÓN REALIZADA POR:	Alex Bajaña					
FECHA DE RECEPCIÓN DEL ÍTEM:	2021-06-10	FECHA DE EMISIÓN:	2021-06-15			
FECHA DE CALIBRACIÓN:	2021-06-14					

Autorizado y firmado electrónicamente por:


Alex Bajaña



Firma electrónica

ANEXO 4

Certificados de calibración de los equipos de medición (Cámara termográfica).



CENTRO DE METROLOGÍA DEL EJÉRCITO ECUATORIANO
"Contribuyendo a la cultura de calidad del país"
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

CÁMARA TERMOGRÁFICA

Marca: SATIR
Modelo: HOTFIND-S
Serie : 46020535
Código: S/N

Este documento certifica que la CÁMARA TERMOGRÁFICA, fue calibrada usando estándares de referencia del Centro de Metrología del Ejército, durante un periodo de 01 día.

La calibración se realizó a una temperatura ambiente de (22 ± 3) °C y humedad relativa en el rango de 35 % a 65 %. Para determinar la incertidumbre se considera un nivel de confianza del 95 % y un factor de cobertura $k = 2$ de acuerdo a la G.U.M., se relaciona únicamente a los valores medidos y no incluye estabilidad del instrumento bajo prueba para largo tiempo.

Las mediciones realizadas por nuestros laboratorios se basan en patrones de Referencia que mantienen Trazabilidad a Patrones Internacionales, los certificados de calibración se encuentran en los archivos del CMEE y pueden ser revisados por cualquier personal autorizado, se utilizan procedimientos reproducidos y/o desarrollados por este Centro, de acuerdo a requerimientos de la norma NTE INEN ISO/IEC 17025.

La estabilidad y funcionamiento de la CÁMARA TERMOGRÁFICA, depende de varios factores, los cuales están fuera del control de nuestros laboratorios de calibración. No obstante, si al equipo se le da un mantenimiento y uso adecuado, los valores descritos en el reporte de calibración pueden mantenerse dentro de los rangos en el periodo que se establezca como válida la calibración.

Este certificado solo se aplicará para el ítem identificado, únicamente se podrá reproducir en forma completa y con la aprobación escrita específica del Centro de Metrología del Ejército. No será usado para reclamo de endoso de productos por el INEN ó cualquier otra entidad Estatal.

Patrón (es) utilizado (s):

Equipo	Marca	Modelo	Serie	Fecha de calibración	Fecha de próxima calibración
Calibrador IR	Fluke	9133	ASC155	2020-09-14	2021-09-14
Calibrador IR	Fluke	4181	B59324	2020-01-22	2021-01-22

- * TRAZABILIDAD: Certificado No TE200292CIR -Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano.
- * TRAZABILIDAD: Certificado No TE200037CIR -Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano.
- * La Calibración se realizó utilizando el método: Por comparación directa.

J. DAVID MUÑOZ V.
TCRN. DE E.M.
DIRECTOR DEL CENTRO DE METROLOGÍA DEL EJÉRCITO.
CAZ.L.FI-2

Número de Reporte: TE200377PIR
Fecha de calibración: 2020-12-15
Fecha de emisión: 2020-12-15

Pág. 1 de 1

FUERTE MILITAR "RUMIÑAHUI" Av. de los Pinos E7-105
Intersección Manuel Cabeza de Vaca URB. Kennedy
Teléfono: (593 2) 3285 202 • Fax: (593 2) 2414 432
E-mail: dpa_cmee@cmee.mil.ec • dpa_cmee@hotmail.com
www.cmee.mil.ec • Quito - Ecuador

C.M.E.E.

CENTRO DE METROLOGÍA DEL EJÉRCITO
LABORATORIO DE TERMOMETRÍA



SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO
Accreditación N° SAE LC 10-005
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

REPORTE DE CALIBRACIÓN

Cliente: Ciafo Cia. Ltda

Representante: Ing. Miguel Taipa

Dirección: Ambato, R9XR+7CV, El Conde

Teléfono: 0993300735

Reporte No.: TE200377PIR

Fecha. Inl. Cal: 2020-12-15

Fecha. Fin. Cal: 2020-12-15

Equipo: CÁMARA TERMOGRÁFICA

Marca: FLIR

Modelo: FLIR E4

Serie: Ex

Código: S/N

Patrones: Calibrador IR

Marca: Fluke

Modelo: 9133

Serie: A5C155

Procedimiento empleado: CA6.P3

Temperatura Media: 19,6 °C

Humedad Relativa Media: 54,1 %

Calibrador IR

Marca: Fluke

Modelo: 4181

Serie: B59324

# Ítem	Parámetro / Rango de Calibración	Lectura Media Referencia	Lectura Media (UBP)	Corrección	Incertidumbre (±)	Observación
POR COMPARACIÓN						
GRADOS CELSIUS (°C)						
	-20 °C a 400 °C					
1		-20,9	-21,5	0,6	1,4	
2		-0,8	-1,3	0,5	1,5	
3		99,4	99,7	-0,3	1,4	
4		199,4	199,7	-0,3	1,5	
5		400,7	400,9	-0,2	2,2	

UBP = Unidad Bajo Prueba

Nota: Las lecturas fueron tomadas a una distancia de 15 cm. entre el Patrón y la UBP con factor de emisividad de 0,95.

DECLARACIÓN DE LA CONFORMIDAD

Requiere Cliente Regla de decisión:

SI

NO

Los puntos que no cumplan la regla de decisión serán marcados con dos asteriscos (**)

Realizado por

Ing. Fredy Cárdenas O.
Técnico del CMEE

Revisado por

Ing. Garzón M. Marcelo J.
Jefe del Departamento Técnico

FUERTE MILITAR "RUMIÑAHUI" Av. Los Pinos E7-105 Intersección Manuel Cabeza de Vaca.
(593)2 3285202/FAX. (593)2 2414432. E-mail: dpa_cmee@cmee.mil.ec

CA6.P3.F1-1

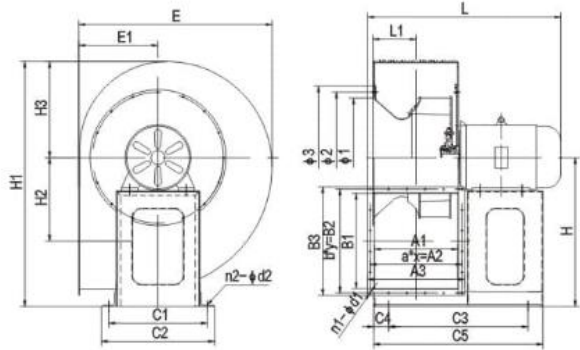
Reporte: TE200377PIR Pág. 1 de 1

ANEXO 5



A 式

安装尺寸图 Mounting dimensions



主要参数 The main parameters

型号及机号 (No)	转速 (r/min)	配用电机 (kw-p)	流量 (m ³ /h)	全压 (pa)
2A	2900	0.55-2	412-859	507-310
2.5A	2900	0.75-2	805-1677	792-483
2.8A	2900	1.5-2	1131-2356	994-606
3.2A	2900	2.2-2	1688-3517	1300-792
	1450	1.1-4	884-1758	324-198
3.6A	2900	3.0-2	2664-5268	1578-989
	1450	1.1-4	1332-2634	393-247
4A	2900	5.5-2	4012-7419	2014-1320
	1450	1.1-4	2006-3709	501-329
4.5A	2900	7.5-2	5712-10562	2554-1673
	1450	1.1-4	2856-5281	634-416
5A	2900	15-2	7728-15445	3187-2019
	1450	2.2-4	3864-7728	790-502
5.6A	1450	3-4	7062-9885	975-759

ANEXO 6

Índice de toxicidad TLV de la norma ANSI de los componentes y su clasificación: comunes, inflamables y tóxicos.

Appendix A. Chemical Data Tables

Numbers refer to Paragraph in Standard.

Table A4.2-1 Toxic Concentration, flash point, boiling point, and class of common flammable and toxic solvents

Substance	8-Hour time-weighted average- exposure ^f ppm	Flash Point ^g		Boiling Point ^h		Relative Evaporation Rate ⁱ	Class ^{iv}
		°F	°C	°F	°C		
Acetone	500	-4	-18	133	56	Fast	B-1
N-amyyl acetate	100	70	21	300	149	Slow	B-3
Benzol (benzene) ^v	0.5	12	-11	176	80	Fast	A-1
N-butyl acetate	150	72	22	260	127	Medium	B-2
N-butyl alcohol (butanol)(skin)(C) ^{vi}	20	98	37	243	117	Slow	B-3
Butyl cellosolve (2-butoxy ethanol) (skin) ^{vi}	20	143	62	340	171	Nil	B-4
Carbon tetrachloride (skin) ^{vi, vii}	5	None	None	170	77	Fast	A-1
Cellosolve (2-ethoxyethanol)(skin) ^{vi}	5	110	43	275	135	Slow	C-3
Cellosolve acetate (2-ethoxy-ethylacetate) (skin) ^{vi}	5	124	52	313	156	Slow	B-3
Chlorobenzene (monochlorobenzene)	10	82	28	270	132	N/A ^{viii}	B-2
Chloroform (trichloromethane)(C) ^{viii}	10	None	None	142	61	Fast	A-1
Cyclohexane	100	-4	-20	179	82	Fast	C-1
Cyclohexanone (skin) ^{vi}	25	111	44	313	156	Nil	B-4
1,2-dichloroethylene	200	36	2	119	48	Fast	B-1
Ethyl acetate	400	24	-4	171	77	Fast	B-1
Ethyl alcohol (ethanol)	1000	55	13	173	78	Fast	B-1
Ethyl ether	400	-49	-45	95	35	Fast	B-1
Ethylene dichloride (1,2-dichloroethane)	10	56	13	183	84	Fast	A-1
Heptane	400	25	-4	209	98	Fast	B-1
Hexane	50	-7	-22	156	69	Fast	B-1
Methyl acetate	200	14	-10	140	60	Fast	B-1
Methyl alcohol (methanol) (skin) ^{vi}	200	52	11	147	64	Fast	B-1
Methyl n butyl ketone (2-hexanone)	5	77	25	262	128	N/A ^{viii}	A-2
Methyl cellosolve (2-methoxyethanol) (skin) ^{vi}	5	102	39	255	124	Nil	A-4
Methyl cellosolve acetate (2-methoxyethyl acetate) (skin) ^{vi}	5	111	44	243	145	Nil	A-4
Methyl chloroform (1,1,1-trichloroethane)	350	None	None	165	74	Fast	C-1
Methyl ethyl ketone (2-butanone)	200	16	-9	176	80	Fast	B-1
Methyl isobutyl ketone (hexone)	50	64	18	244	118	Medium	B-2
Methyl propyl ketone (2-pentanone)	200	45	7	216	102	N/A ^{viii}	B-2
Methylene chloride (dichloromethane) ^{vii}	50	None	None	104	40	Fast	C-1
Perchloroethylene (tetrachloroethylene)	25	None	None	250	121	N/A ^{viii}	B-2
Petroleum distillates:							
Naptha (VM & P)	300	<100	56	212-320	100-160	Fast	B-1
Stoddard solvent	100	≥100	5656	300-400	149-204	Fast/N/A ^{viii}	B-3
Isophorone (C)	5	184	84	419	215	N/A ^{viii}	A-4
Isopropyl acetate	250	35	2	194	90	Fast	B-1
Isopropyl alcohol	400	53	12	181	83	Fast	B-1
Styrene monomer (phenylethylene)	20	88	31	295	146	N/A ^{viii}	B-3
Toluol (toluene)	50	40	4	231	111	Medium	B-2
Trichloroethylene	50	None	None	188	87	Fast	B-1

ANEXO 7

Identificación del producto que usa la empresa CIAUTO en el proceso de desengrase: CLEANER 1523-S

Ficha de Datos de Seguridad



Número de Revisión: 001.0

Fecha de Emisión: 03/25/2013

1. IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA EMPRESA

Nombre del producto: **BONDERITE C-AD 1523 S conocido como PARCO® CLEANER 1523 S**
Tipo de producto: Limpiador

Número de IDH: 1233969

Región: Mexico

Denominación de la empresa:
Henkel Capital S.A. de C.V.
Blvd. Magnocentro 8- P2
Centro Urbano Interlomas
52760 Huixquilucan Edo. de Mexico

México

Teléfono: +52 (55) 33003000

Teléfonos de Emergencia:

En caso de emergencia, Por favor llamar a SETIQ 01 800 0 0214 00 al 55 59 15 88, disponible 24 hrs al día, 365 días al año.

2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS DEL PRODUCTO

INFORMACIÓN DE EMERGENCIA

Estado físico:	Líquido	HMIS:	
Color:	Amarillo	SALUD:	2
Olor:	Suave	INFLAMABILIDAD:	0
		REACTIVIDAD:	0
		Protección personal:	Ver la sección 8 de MSDS

ADVERTENCIA: PRODUCE IRRITACIÓN EN LOS OJOS, PIEL Y TRACTO RESPIRATORIO.

Rutas de Exposición: Ojos, Inhalación, Piel

Efectos potenciales sobre la salud

Inhalación: La inhalación de vapores o neblina de este producto puede irritar al sistema respiratorio.
Contacto con la piel: El contacto prolongado o repetido con la piel, este producto puede causar irritación y la dermatitis.
Contacto con los ojos: Este producto puede ser seriamente irritante a los ojos.
Ingestión: La ingestión de este producto puede causar la náusea, vomitando y la diarrea.

Condiciones existentes que se agravan con la exposición: Trastornos oculares, cutáneos y respiratorios.

Identificación del producto que usa la empresa CIAUTO en el proceso de desengrase: CLEANER ALKALINE 1523-R

Ficha de Datos de Seguridad



Número de Revisión: 001.1

Fecha de edición: 04/03/2012

1. IDENTIFICACIÓN DE LA PREPARADO Y DE L'EMPRESA

Denominación del producto:	BONDERITE C-AK 1523 R ALKALINE CLEANER known as PARCO CLEANER 1523 R	Número de IDH:	594564
Tipo de producto:	Limpiador	Región:	Estados Unidos
Denominación de la empresa:	Henkel Corporation 32100 Stephenson Highway Madison Heights, MI 48071	Datos del contacto:	Teléfono: 248.583.9300 MEDICAL EMERGENCY Phone: Poison Control Center 1-877-671-4608 (toll free) or 1-303-592-1711 TRANSPORT EMERGENCY Phone: CHEMTREC 1-800-424-9300 (toll free) or 1-703-527-3887 Internet: www.henkelna.com

2. POSIBLES PELIGROS DEL PRODUCTO

INFORMACIÓN DE EMERGENCIA

Estado físico:	Líquido	HMS:	
Color:	Incoloro	SALUD:	3
Olor:	Ninguna	INFLAMABILIDAD:	0
		PELIGRO FÍSICO:	1
		Protección personal:	Ver la sección 8 de MSDS

PELIGRO-CORROSIVO!: PRODUCE QUEMADURAS EN LOS OJOS, PIEL Y TRACTO RESPIRATORIO

Vía de Base Exposición: Ojos, Inhalación, Piel

Efectos potenciales sobre la salud

Inhalación:	Nieblas, vapores y líquidos pueden causar irritación o quemaduras.
Contacto de la piel:	Corrosiva para la piel. El contacto con la piel o las mucosas pueden provocar graves irritaciones y quemaduras.
Contacto con los ojos:	Este producto es severamente irritante a los ojos y puede causar daños irreversibles incluyendo quemaduras y ceguera.
Ingestión:	Este producto puede producir un daño corrosivo al tracto gastrointestinal si se ingiere

Condiciones existentes que se agravan con la exposición: Trastornos oculares, cutáneos y respiratorios.

Este material es considerado peligroso por la OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200).

ANEXO 8

Ejemplo de cálculo de incertidumbre

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

Donde:

x_i = variable aleatoria estadística

\bar{x} = media

n = número de elementos de la muestra

Extractor	Cajetín	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	v_3 [m/s]
1	1	0,23	0,27	0,26

Se calcula la media

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{0,23 + 0,27 + 0,26}{3}$$

$$\bar{x} = 0,253$$

Se calcula el error absoluto

$$x_i - \bar{x} = x_1 - \bar{x} = 0,23 - 0,253 = -0,023$$

$$x_i - \bar{x} = x_2 - \bar{x} = 0,27 - 0,253 = 0,017$$

$$x_i - \bar{x} = x_3 - \bar{x} = 0,26 - 0,253 = 0,007$$

Se eleva al cuadrado el error absoluto

$$(x_i - \bar{x})^2 = (x_1 - \bar{x})^2 = (-0,023)^2 = 0,00054444$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (x_2 - \bar{x})^2 = (0,017)^2 = 0,00027778$$

$$(x_1 - \bar{x})^2 = (x_3 - \bar{x})^2 = (0,007)^2 = 0,0000444$$

Sumatoria del error absoluto al cuadrado

$$\sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,00054444 + 0,00027778 + 0,0000444$$

$$\sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,00086667$$

Se calcula la incertidumbre

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{0,00086667}{3(3-1)}}$$

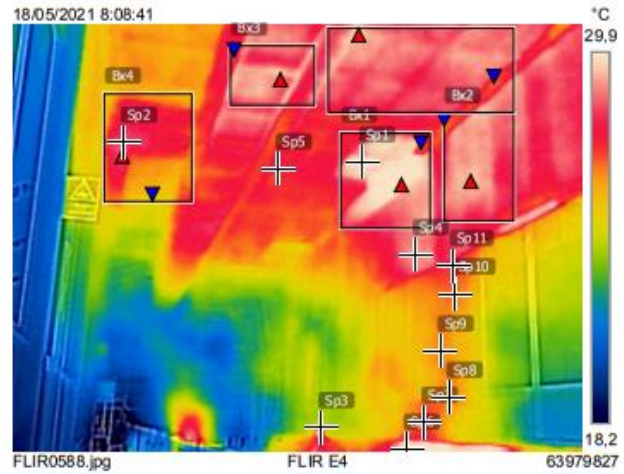
$$u(x_i) = 0.012$$

ANEXO 9

Resultado análisis termográfico con la cámara termográfica.



Medidas		
Bx1	Max	30,3 °C
	Min	27,4 °C
Bx2	Max	29,2 °C
	Min	27,4 °C
	Average	28,7 °C
Bx3	Max	29,3 °C
	Min	27,7 °C
	Average	28,7 °C
Bx4	Max	28,6 °C
	Min	26,2 °C
	Average	27,6 °C
Bx5	Max	29,4 °C
	Min	27,5 °C
	Average	28,6 °C
Sp1		29,6 °C
Sp2		28,5 °C
Sp3		27,4 °C
Sp4		28,9 °C
Sp5		27,8 °C
Sp6		30,1 °C
Sp7		27,9 °C
Sp8		27,3 °C
Sp9		27,3 °C
Sp10		27,4 °C
Sp11		27,8 °C
Parámetros		
Emisividad		0.95
Temp. refl.		20 °C



ANEXO 10

Gráfica de pérdida de presión por fricción en pulgadas de agua por cada 100 pies de longitud en función de la cantidad de aire en CFM que se maneja en el ducto. Gráfica obtenida de la norma ASHRAE.

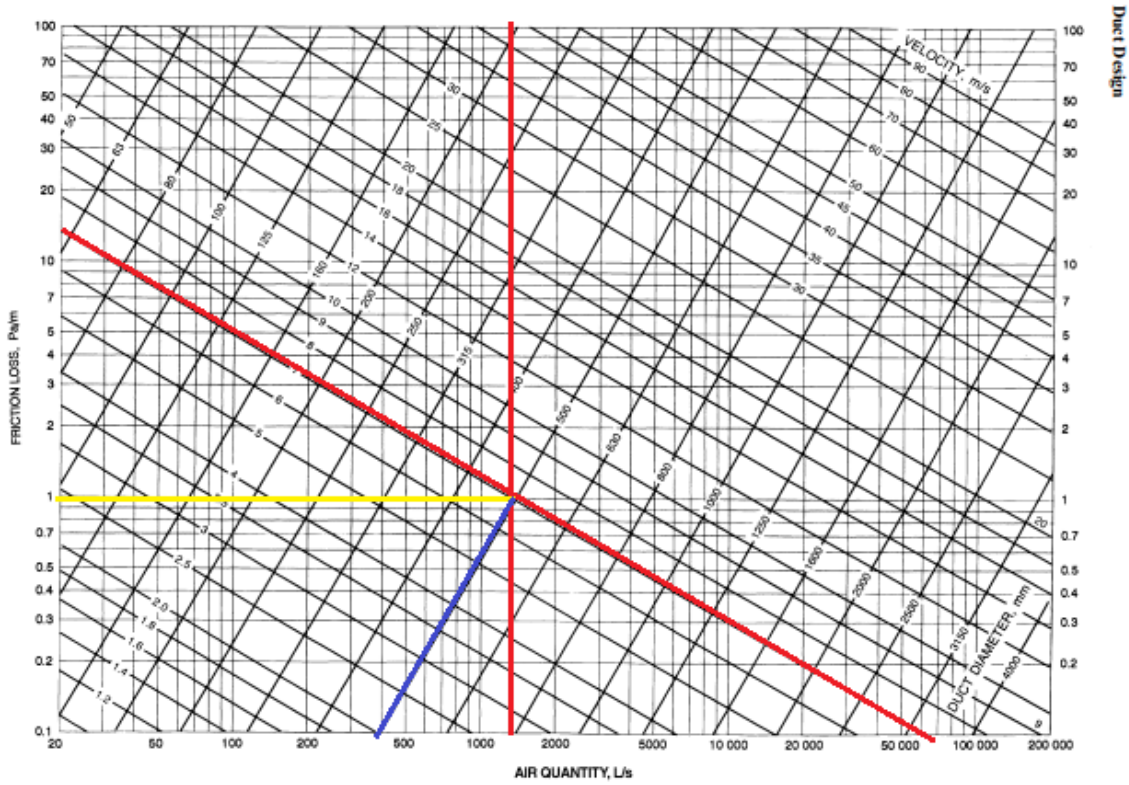


Fig. 10 Friction Chart for Round Duct ($\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$ and $\epsilon = 0.09 \text{ mm}$)

Duct Design

21.9

ANEXO 11

Selección del conducto rectangular equivalente.

21.10

2017 ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)

Table 3 Circular Equivalents of Rectangular Duct for Equal Friction and Airflow*

Side Lengths, mm	Length of One Side of Rectangular Duct a , mm										
	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1 000	1 200
	Circular Duct Diameter, mm										
200	152	189	219								
250	169	210	244	273							
300	183	229	266	299	328						
400	207	260	305	343	378	437					
500		287	337	381	420	488	547				
600		310	365	414	457	533	598	656			
800			414	470	520	609	687	755	875		
1 000				517	574	674	762	840	976	1 093	
1 200					620	731	827	914	1 066	1 196	1 312
1 400						781	886	980	1 146	1 289	1 416
1 600							827	939	1 041	1 219	1 373
1 800								988	1 096	1 286	1 451
2 000									1 034	1 147	1 348
										1 523	1 680

*Table based on Equation (25).

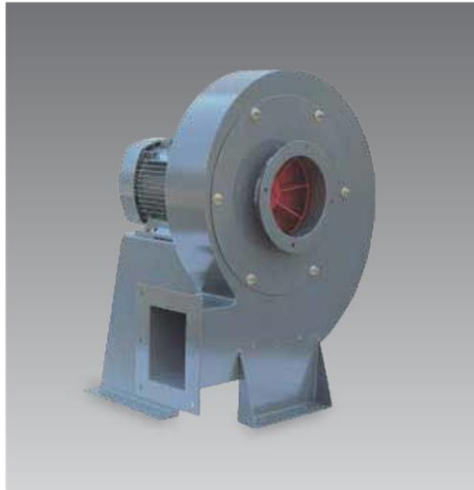
ANEXO 12

Características técnicas del extractor centrífugo CX 4500.



EXTRACTORES CENTRÍFUGOS DE ÁLABES RADIALES DE MEDIANA PRESIÓN 4500, 5500 y 6500 m³/hr

CX



Esta gama de ventiladores centrífugos de mediana presión, ha sido estructurada en tres tamaños dentro de una construcción robusta que le permite adaptarse a cualquier instalación o máquina en todo tipo de industria.

Características Principales:

- Rodete de alabes rectos radiales en chapa de hierro electrosolada.
- Motor dos polos, 3F, con brida en acoplamiento directo.
- Carcasa electrosada con brida en succión y descarga.
- Recubrimiento en pintura en polvo con características anticorrosivas.

Aplicaciones:

- Transportación neumática de: Virutas, polvos, granos, etc.
- Impulsión de aire en: Quemadores, Fraguas, Cubilotes
- Aireación de semillas y materiales.
- Procesos industriales diversos.

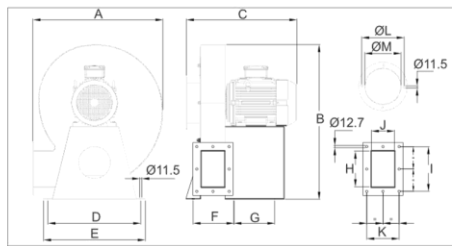
* Todos los modelos de línea son rotación derecha.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Modelo	Velocidad RPM	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal a descarga libre m ³ /hr / CFM	Presión sonora dB(A)*	Peso aprox. Kg
CX 4500	3500	7 1/2	208-230/460	17.2 / 8.6	4,500 / 2,647	89	109
CX 5500	3515	10	208-230/460	22.4 / 11.4	5,500 / 3,235	90	120
CX 6500	3520	15	208-230/460	34.0 / 17.0	6,500 / 3,824	93	182

*Nivel sonoro medido de acuerdo a las normas AMCA 300/05 y 301/05

DIMENSIONES Y CURVAS CARACTERÍSTICAS



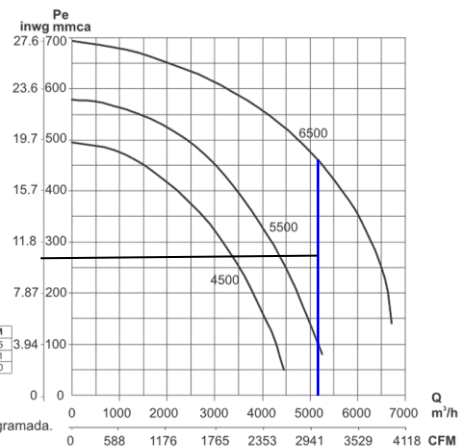
MODELO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	ØL	ØM
CX-4500	678	848	574	522	572	229	230	180	232	130	182	239	205
CX-5500	732	971	622	522	572	230	230	209	254	130	182	259	221
CX-6500	795	984	705	553	603	230	300	220	272	130	182	269	230

*Dimensiones mm.

*ADVERTENCIA: Este equipo no debe trabajar a descarga libre.

*Fabricación con distinta rotación y descarga, bajo consulta y demanda programada.

Posiciones de rotación 0°, 90° y 180°.



ORDEN DE EMPASTADO