



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE REFRIGERACIÓN Y CLIMATIZACIÓN

Selección de dispositivos de suministro y extracción de aire acondicionado para un área de laboratorio de la industria del gas y petróleo mediante CFD

Nicolás Andrés Mantilla Álvarez (1)

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Ingeniería de Refrigeración y Climatización

Director

Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

PhD. En Ingeniería Térmica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Ingeniería de Refrigeración y Climatización

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

A Lina por acompañarme en este camino; a mi familia por hacerme lo que soy; y a la Universidad por las oportunidades de formación que me lleva brindando ya hace años.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Materiales y métodos	17
2.1 Análisis de información recopilada	17
2.2 Modelo CFD	17
2.2.1 Modelado geométrico	17
2.2.2 Asignación de datos del modelo	19
2.2.3 Modelado de bloques de componente y montajes	22
2.2.4 Modelado de dispositivos de suministro y extracción de aire	22
2.3 Selección de difusores de suministro y rejillas de extracción.....	24
2.4 Análisis CFD.....	25
3. Resultados	28
3.1 Análisis de la información recopilada.....	28
3.1.1 Relaciones de presurización.....	28
3.1.2 Ventilación.....	30
3.1.3 Confort.....	31
3.1.4 Velocidad de aire de suministro.....	34
3.1.5 Resumen de requerimientos	34
3.2 Modelo CFD	35

3.3	Selección de dispositivos de distribución de aire	42
4.	Conclusiones	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Demanda de flujo de extracción por cabinas</i>	23
Tabla 2 <i>Guía de selección para ADPI (PRICE INDUSTRIES, 2024)</i>	33
Tabla 3 <i>Resumen de requerimientos desde el punto de vista de aire acondicionado para laboratorios</i>	35
Tabla 4 <i>Flujos requisito por carga térmica, renovación y demanda de extracción</i>	36
Tabla 5 <i>Áreas efectivas de fuga por diferentes fuentes</i>	36
Tabla 6 <i>Cálculo de flujo de presurización</i>	37
Tabla 7 <i>Condiciones de contorno para cálculo CFD</i>	40
Tabla 8 <i>Verificación de cumplimiento de ADPI con selección de difusores</i>	44
Tabla 9 <i>Evaluación del cumplimiento de los requisitos identificados</i>	49

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Revisión de la figura</i>	14
Figura 2 <i>Representación geométrica del modelo del edificio</i>	18
Figura 3 <i>Detalle del área del laboratorio considerado</i>	18
Figura 4 <i>Datos de locación geográfica para el modelo</i>	19
Figura 5 <i>Asignación de datos a muros exteriores e interiores</i>	20
Figura 6 <i>Asignación de datos a cubierta</i>	21
Figura 7 <i>Asignación de datos del modelo a piso</i>	21
Figura 8 <i>Ubicación de cabinas de extracción</i>	24
Figura 9 <i>Esquemático de malla para el cálculo CFD en DesignBuilder</i>	25
Figura 10 <i>Estadísticas de la malla para cálculo CFD</i>	26
Figura 11 <i>Representación gráfica de la malla para cálculo CFD</i>	27
Figura 12 <i>Esquema de flujos para presurización</i>	30
Figura 13 <i>Condiciones para confort térmico</i>	32
Figura 14 <i>Diagrama de presurización</i>	37
Figura 15 <i>Modelo construido para simulación CFD</i>	40
Figura 16 <i>Definición de longitudes características para los difusores seleccionados</i>	43
Figura 17 <i>Distribución de temperatura a 1.55m de altura</i>	44
Figura 18 <i>Distribución de PPD a 1.55m de altura</i>	45
Figura 19 <i>Contorno de velocidad a una altura de 2.16m</i>	46
Figura 20 <i>Contorno de velocidad a una altura de 1.82m</i>	46
Figura 21 <i>Velocidad de contorno en corte a 4.74m de la pared suroeste (ala izquierda)</i>	47

Figura 22	<i>Velocidad de contorno en corte a 10.79m de la pared noreste (ala derecha)</i>	47
Figura 23	<i>Vectores de velocidad a nivel tridimensional</i>	48

Glosario

Air Diffusion Performance Index (ADPI): porcentaje de locaciones dentro del espacio de ocupación que satisface los requisitos de confort basados en la medida de los valores de velocidad y temperatura en un número de dado de puntos uniformemente distribuidos.

Aire del recinto: es todo el resto del aire del recinto (no es aire total ni primario); es donde ocurre la transferencia de calor que da sentido a los sistemas de aire acondicionado.

Aire primario: aire acondicionado descargado por los dispositivos de suministro; constituye la causa del movimiento del aire del recinto.

Aire total: mezcla del aire primario y el aire del recinto inducido. La diferencia de temperatura entre este aire y el del recinto hace que, por flotabilidad, el aire frío de suministro caiga y el aire caliente suba.

Aislamiento por vestimenta: resistencia a la transferencia de calor sensible que provee un conjunto de prendas de vestir sobre quien las usa. Expresada en la unidad *clo* que es equivalente a $0.155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Caída de un difusor (drop): es la distancia vertical a la que se extiende el chorro de aire por debajo del punto de suministro, debido a la tendencia natural que tiene el aire frío suministrado a caer, hasta alcanzar una velocidad terminal dada. Al igual que el tiro, se suele referenciar de acuerdo con las mismas velocidades terminales (0.75 m/s, 0.5 m/s y 0.25 m/s).

Dinámica de fluidos computacional: ramificación de la mecánica de fluidos que se sirve de algoritmos y métodos numéricos resueltos a través de medios computacionales para obtener aproximaciones y analizar problemas relacionados con el modelamiento del comportamiento de fluidos en sistemas complejos.

Exfiltraciones: paso no controlado de aire de un área analizada hacia otra, a través de aberturas, grietas o porosidades en los cerramientos de un área o edificio.

Humedad: referencia general del contenido de agua (vapor) que contiene el aire. Puede representarse en términos de humedad relativa, humedad absoluta, temperatura de bulbo húmedo, presiones de vapor y temperatura de rocío.

Infiltraciones: paso no controlado de aire de un sitio hacia el área que se está analizando, a través de aberturas, grietas o porosidades en los cerramientos de un área o edificio.

Tasa metabólica: tasa de transformación de la energía química en calor y trabajo en las personas, mediante actividades metabólicas, por unidad de área de piel.

Temperatura del aire: temperatura de bulbo seco del aire en un punto estudiado.

Temperatura radiante: medida representativa de la temperatura de las superficies circundantes a una persona y que incluye muros, pisos y objetos.

Tiro de un difusor (throw): es la distancia horizontal medida desde el eje central de la cara de un dispositivo de suministro hasta donde el aire alcanza una velocidad dada que suele ser 0.75 m/s ($T_{0.75}$), 0.5 m/s ($T_{0.5}$) o 0.25 m/s ($T_{0.25}$).

Velocidad del aire: rata de movimiento de aire en un punto.

Ventilación mecánica: proceso controlado de renovación del aire interior de una zona mediante la introducción de aire exterior y/o la extracción de aire viciado, con el propósito de diluir contaminantes, asegurar niveles adecuados de oxígeno, procurando mantener la calidad del aire interior.

Zona ocupada o de ocupación: zona delimitada por un plano horizontal a 1.8 m del nivel del suelo y a no menos de 0.3 m de los límites del espacio como muros, ventanas, etc.

Resumen

Título: Selección de dispositivos de suministro y extracción de aire acondicionado para un área de laboratorio de la industria del gas y petróleo mediante CFD*

Autor: Nicolás Andrés Mantilla Álvarez (1)**

Palabras Clave: Dinámica de Fluidos Computacional, Laboratorios *Oil & Gas*, HVAC, Difusión de aire acondicionado.

Los laboratorios de la industria del gas y del petróleo se caracterizan por trabajar con materiales y sustancias que pueden representar un riesgo para la salud de los ocupantes. Un aspecto clave para la mitigación de este riesgo se halla en los sistemas de aire acondicionado y ventilación que atienden estas áreas y, más específicamente, en la selección de los dispositivos para suministro y extracción de aire que allí se disponen. El presente trabajo desarrolló una metodología para la selección de dispositivos de suministro y extracción de aire mediante modelado CFD en cumplimiento de los requisitos especiales para la aplicación particular de un laboratorio hipotético de la industria del gas y petróleo situado en Barrancabermeja, Santander. Para esto, se hizo una revisión bibliográfica exhaustiva que permitió establecer los requisitos especiales que deben cumplirse en la aplicación en cuestión y luego se procedió a desarrollar un modelo en el software DesignBuilder para cálculo CFD, a través del que se pudo encontrar una configuración con cabinas de extracción perimetrales a una altura de 1.3 m y difusores de suministro de dos vías a una altura de 4.0 m con la que se logró el cumplimiento de estos requisitos. Entre los hallazgos se destacan valores de confort de PPD menor al 10% en la mayor parte del área atendida y velocidades inferiores a los 0.25 m/s en el aire de suministro dentro de la zona de ocupación en las áreas circundantes a las cabinas.

* Trabajo de Grado

** Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. PhD. En Ingeniería Térmica.

Abstract

Title: Selection of air conditioning supply and exhaust air devices for an oil and gas industry laboratory area through CFD*

Author(s): Nicolás Andrés Mantilla Álvarez¹

Key Words: *Computational Fluid Dynamics, Oil & Gas Laboratories, HVAC, Air Conditioning Diffusion.*

Laboratories in the oil and gas industry are characterized by working with materials and substances that can pose a health risk to the occupants. A key aspect for the mitigation of this risk is in the air conditioning and ventilation systems that serve these areas and, more specifically, in the selection of the air supply and exhaust devices that are available there. This document developed a methodology for the selection of air supply and exhaust devices by CFD modeling in compliance with the special requirements for the particular application of a hypothetical laboratory of the oil and gas industry located in Barrancabermeja, Santander. For this, an exhaustive bibliographic review was made to establish the special requirements to be met in the application in question and then proceeded to develop a model in the DesignBuilder software for CFD calculation, through which it was possible to find a configuration with perimeter extraction cabinets at a height of 1.3 m and two-way supply diffusers at a height of 3.0 m in height with which compliance with these requirements was achieved. Findings included PPD comfort values of less than 10% in most of the area served and supply air velocities of less than 0.25 m/s within the occupancy zone in the areas surrounding the booths.

* Degree Work

¹School of Mechanical Engineering. Specialization in Refrigeration and Air-conditioning Engineering. Advisor: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

Introducción

Los laboratorios pueden entenderse como aquellas áreas dotadas de los medios necesarios para la ejecución correcta de tareas de investigación que, a su vez, conforman parte de los pilares de innovación y desarrollo de la academia y de diversas industrias. De hecho, los laboratorios constituyen el lugar donde científicos, investigadores y estudiantes contribuyen al conocimiento en sus campos de trabajo; de ahí que exista un interés importante en la planeación, diseño, operación y ciclo de vida de edificios de este tipo. Estos recintos pueden presentarse en una amplia gama de tipologías y configuraciones, con características particulares de las actividades que allí tienen lugar y con manejo de materiales que van desde el bajo riesgo hasta el riesgo extremadamente alto con patógenos biológicos, razón por la que su diseño, construcción y operación suelen ser tareas trascendentales, pero también exhaustivas y complejas.

Particularmente, el diseño y la implementación de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés) para aplicaciones que involucran áreas de laboratorio tienen un papel clave. De acuerdo con la guía de diseño de sistemas HVAC para laboratorios de ASHRAE, el diseño de los sistemas de suministro y extracción de aire acondicionado (AA) resulta crítico para el aseguramiento del correcto desarrollo de los procesos allí ejecutados, ya que es a través de estos sistemas que es posible: a) garantizar un nivel de renovación de aire requerido; b) mantener condiciones de confort en términos de temperatura y humedad; c) establecer niveles de presurización que orienten el flujo del aire de áreas más limpias hacia más sucias; y d) captar aire viciado para la operación segura de dispositivos de extracción como cabinas, campanas, trompas de extracción, entre otros (ASHRAE, 2015).

Un aspecto de especial interés en los sistemas HVAC para laboratorios se halla en la distribución del aire de zona, ya que éste tiene influencia en casi todos los aspectos enumerados

en el párrafo anterior. En términos concretos, se tiene un interés especial en temas como velocidades del aire de las zonas ocupadas, las ubicaciones relativas de los dispositivos de suministro y extracción, los tipos de estos dispositivos, el balanceo y la captación y distribución de contaminantes. Por ejemplo, para garantizar la contención de contaminantes en cabinas de laboratorio es necesario mantener las velocidades del aire en valores bajos en las cercanías de las cabinas (DiBerardinis, Baum, First, Gatwood, & Seth, 2013), así como es deseable que los difusores se encuentren tan lejos como sea posible de las cabinas para evitar cortos-circuitos o bypass de aire frío, condiciones que dependerán de las velocidades de descarga, temperaturas interiores y tipos de dispositivos utilizados (Caplan & Knutson, 1982), a la vez que también se procure garantizar el confort térmico para los ocupantes.

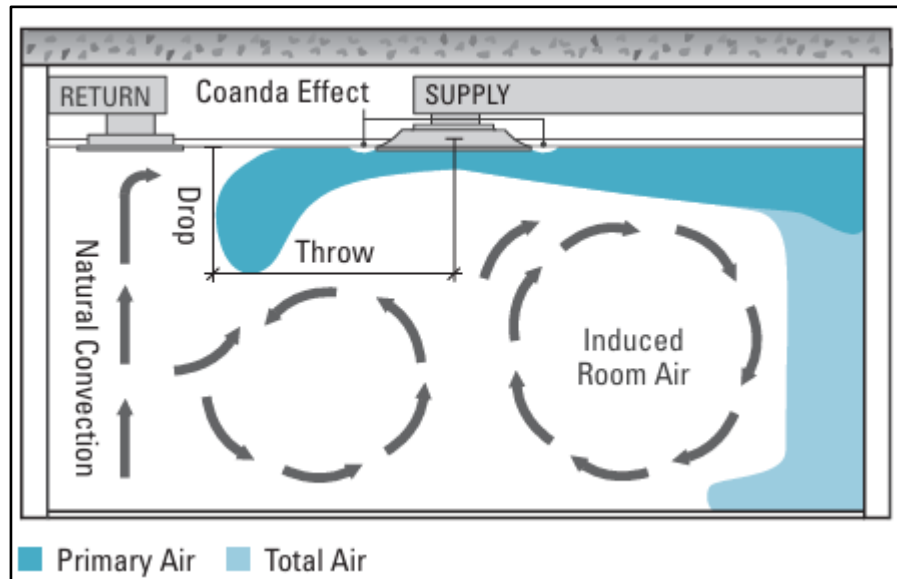
Ahora, en sistemas de aire acondicionado basados en dispositivos de suministro y extracción (o retorno de aire) es clave el conocimiento del desempeño de estos dispositivos, ya que la distribución y homogeneidad del aire está altamente condicionada por éste; esto se ilustra en la Figura 1, en donde se aprecia cómo el aire primario es suministrado a baja temperatura y alta cantidad de movimiento, induciendo el aire interior circundante para formar el aire total y de esa forma recibir la carga térmica del área atendida.

No obstante, actualmente la información proporcionada por los fabricantes y proveedores de dispositivos de suministro y extracción de AA suele limitarse a predicciones del comportamiento que exhibe este fluido en dirección horizontal o concretamente en el área efectiva del dispositivo, mientras que la información equivalente para la dirección vertical suele omitirse; es decir, la información de los fabricantes puede hacer posible que se conozca la velocidad del aire impulsado por un dispositivo de suministro a una distancia horizontal dada (tiro o *throw*), pero no permite el conocimiento del valor correspondiente de velocidad a una altura dada (*drop*), de

manera que no se cuenta con medios suficientes para procurar la satisfacción de los requerimientos de velocidades terminales del aire en zonas de ocupación desde el diseño.

Figura 1

Revisión de la figura



En este punto es que la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) surge como una alternativa para que los ingenieros de sistemas HVAC puedan modelar y predecir el desempeño en términos de distribución de aire interior de sus diseños (Limane, Fellouah, & Galanis, 2018). Así pues, surge como pregunta si se puede desarrollar una metodología basada en esta herramienta, con la finalidad de garantizar los requerimientos de velocidades y temperaturas de aire que se pueden tener en el caso hipotético de un área de laboratorio de máximo 500 m² de área para la industria de petróleo y gas (O&G por sus siglas en inglés).

En este sentido, los antecedentes muestran un panorama favorable para esta pregunta, pues hay múltiples trabajos en donde esta temática ha sido abordada en áreas afines con éxito. Por ejemplo, previamente ya ha sido usado el CFD para: visualizar el efecto coanda y las velocidades

del aire para una habitación acondicionada (Gupta, 2023); estudiar el confort térmico y el consumo de energía en varias configuraciones de ángulos y velocidades de suministro de aire para una oficina (Wang, y otros, 2023); definir la ubicación de difusores de suministro y rejillas de extracción de manera que se mitigue la propagación de un virus en un cuarto de aislado infeccioso (Lim, Cho, & Kim, 2010); y, finalmente, optimizar las condiciones de diseño y operación de los dispositivos de suministro y extracción de aire para conseguir mayores niveles de limpieza sin altos niveles de cambios de aire por hora en aplicaciones exigentes como laboratorios farmacéuticos (Khankari, 2023).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología basada en CFD para la selección de difusores de suministro y rejillas de extracción de aire para cumplir con los requerimientos aplicables al caso particular de un laboratorio para la industria del gas y petróleo.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer los requerimientos específicos en términos de velocidad y difusión de aire aplicables a laboratorios de la industria de O&G según estándares de referencia.
- Construir un modelo de CFD en el software DesignBuilder para predecir el comportamiento del aire suministrado y extraído en términos de temperatura y velocidad en el área analizada.
- Seleccionar los tipos y dimensiones de difusores de suministro y rejillas de extracción adecuados para cumplir con los requerimientos establecidos.

2. Materiales y métodos

2.1 Análisis de información recopilada

Se efectuó una búsqueda de fuentes bibliográficas en donde se recopilan requisitos y recomendaciones a cumplir desde el punto de vista del aire acondicionado y la ventilación para la aplicación particular de laboratorios. Entre las fuentes consultadas se destacaron:

- Ventilación en laboratorios de la Asociación Americana de Higiene Industrial (American Industrial Hygiene Association, 2012).
- La guía de diseño de laboratorios de ASHRAE (ASHRAE, 2015).
- La guía para el diseño de laboratorios según consideraciones de salud, seguridad y ambientales (DiBerardinis, Baum, First, Gatwood, & Seth, 2013).

Ahora bien, en cuanto a aspectos específicos que se consultaron en las fuentes antes mencionadas, con el fin de establecer los requisitos aplicables a los propósitos del presente trabajo, se resaltan:

- Confort.
- Distribución de aire y su efecto en el confort y en dispositivos de extracción como cabinas.
- Renovación de aire para ventilación.
- Relaciones de presurización.

2.2 Modelo CFD

2.2.1 Modelado geométrico

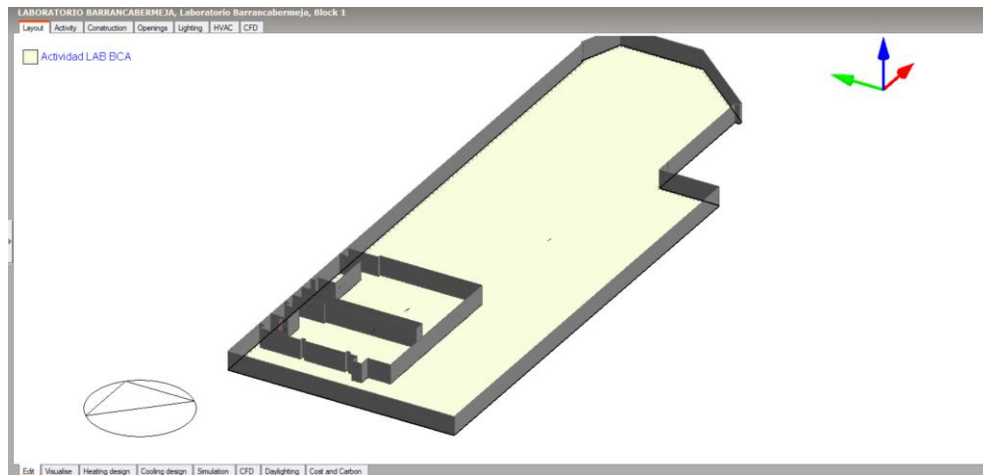
Dado que el trabajo no se enmarca dentro de un proyecto específico de un laboratorio, no se cuenta con una configuración arquitectónica específica; por tanto, se propone una configuración

arquitectónica típica para un laboratorio, pero que procuró incluir condiciones que lo hagan susceptible de ser aplicado a un caso realista como son:

- Ubicación en una primera planta de un entorno industrial con la configuración geométrica que se ilustra seguidamente.

Figura 2

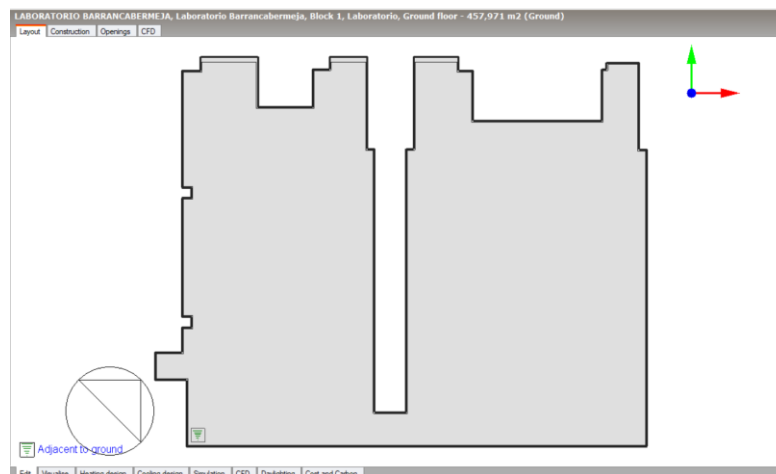
Representación geométrica del modelo del edificio



- Un área considerable para extender su aplicabilidad a casos más puntuales (458 m²).

Figura 3

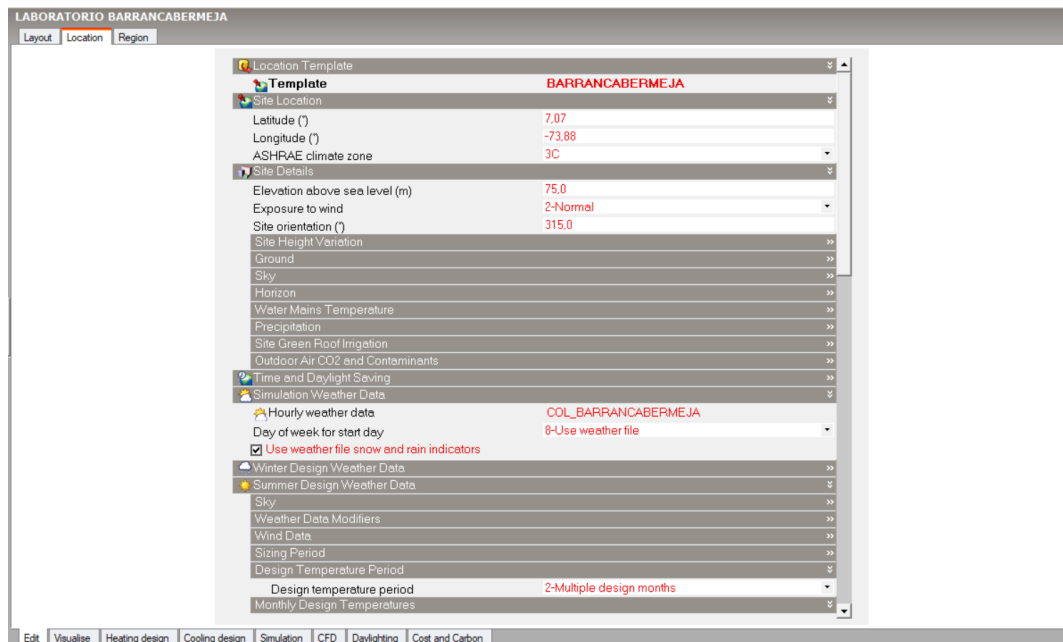
Detalle del área del laboratorio considerado



- Locación geográfica en el municipio de Barrancabermeja, Santander, en donde se hace probable la presencia de un laboratorio con estas características por la cercanía con operaciones de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB), para lo cual se utilizó el archivo climático (formato .epw) de este municipio.

Figura 4

Datos de locación geográfica para el modelo



- Altura del bloque de 5.7 m con una disposición esperable de difusores y rejillas a una altura de 4.0 m, de manera que se considera que el volumen hasta los 4.0 m se encuentra climatizado, en tanto que de los 4.0 m a los 5.7 m es aire no climatizado, altamente influido por las cargas térmicas exteriores.

2.2.2 Asignación de datos del modelo

Para el desarrollo a nivel de información del modelo fue necesario asignar valores a los siguientes puntos:

- *Actividad.* Para la ocupación se considera que ésta es permanente, es decir, 24/7, con una densidad de ocupación de 9.3 m² por persona (0.1075 personas por m²) correspondiente a un ambiente industrial especializado (National Fire Protection Association, 2024), un nivel de vestimenta de 0.74 clo correspondiente a pantalones ligeros y camisa manga larga, una temperatura de setpoint de 23 °C para enfriamiento, una humedad relativa de 55%, una tasa de ventilación de 22 lps por m² equivalente a los requisitos de ventilación calculados, una densidad de potencia por equipos de 50 W por m² con una fracción radiante del 30% con uso permanente (24/7).
- *Cerramientos opacos.*

Figura 5

Asignación de datos a muros exteriores e interiores

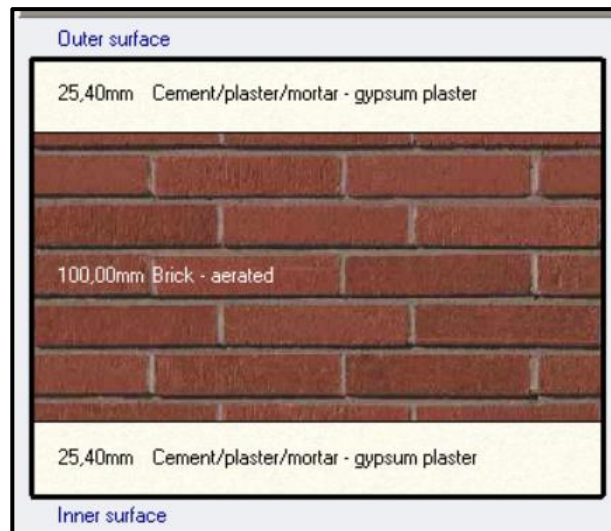


Figura 6

Asignación de datos a cubierta

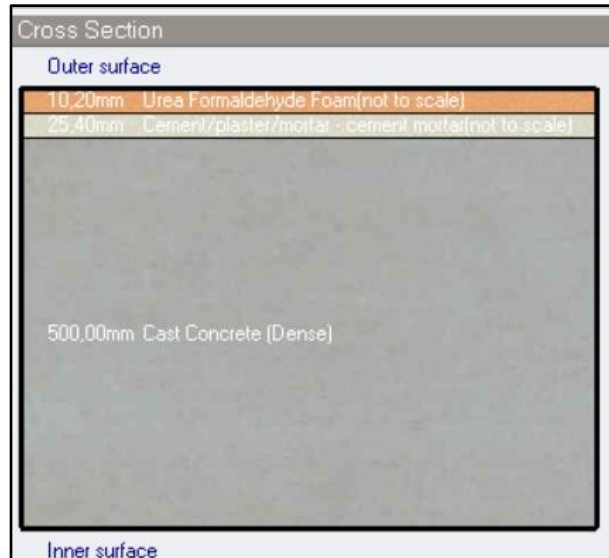


Figura 7

Asignación de datos del modelo a piso



- *Cerramientos transparentes.* Para ventanas se considera vidrio genérico de 3mm.

- *Iluminación.* Se considera una densidad de iluminación de 1.08 W por ft² o, lo que es equivalente, 11.63 W por m².
- *HVAC.* Dado que sólo se necesita modelar el sistema HVAC para determinar capacidades y mantener la temperatura interior dentro de los parámetros de diseño, para los propósitos de este trabajo se modela mediante la herramienta de HVAC simple de DesignBuilder, orientada a simplemente igualar la capacidad de enfriamiento requerida por un área a su carga térmica instantánea.

2.2.3 Modelado de bloques de componente y montajes

Para obtener una aproximación a la influencia que puede tener la presencia de obstáculos como personas o mesas de trabajo dentro del laboratorio, estos fueron modelados como montajes de manera arbitraria, procurando una gran cantidad de escenarios como personas justo frente a cabinas, en mesas de trabajo, separadas a una distancia prudente de las cabinas o circulando por los pasillos interiores.

2.2.4 Modelado de dispositivos de suministro y extracción de aire

Para proceder a modelar las superficies de CFD que representan los dispositivos de suministro y extracción de aire se debe partir inexorablemente de la definición de los flujos de suministro y extracción requeridos. En particular, para los propósitos de este trabajo, se partirá de la suposición de una demanda de extracción de aire asociada únicamente a cabinas; esta demanda se considera basándose en diferentes geometrías de cabinas y en el hecho de que para cada cabina se debe mantener una velocidad de 0.5 m/s en la cara para asegurar la extracción focalizada de los posibles contaminantes (ASHRAE, 2015). El resumen de esta demanda se presenta seguidamente:

Tabla 1*Demanda de flujo de extracción por cabinas*

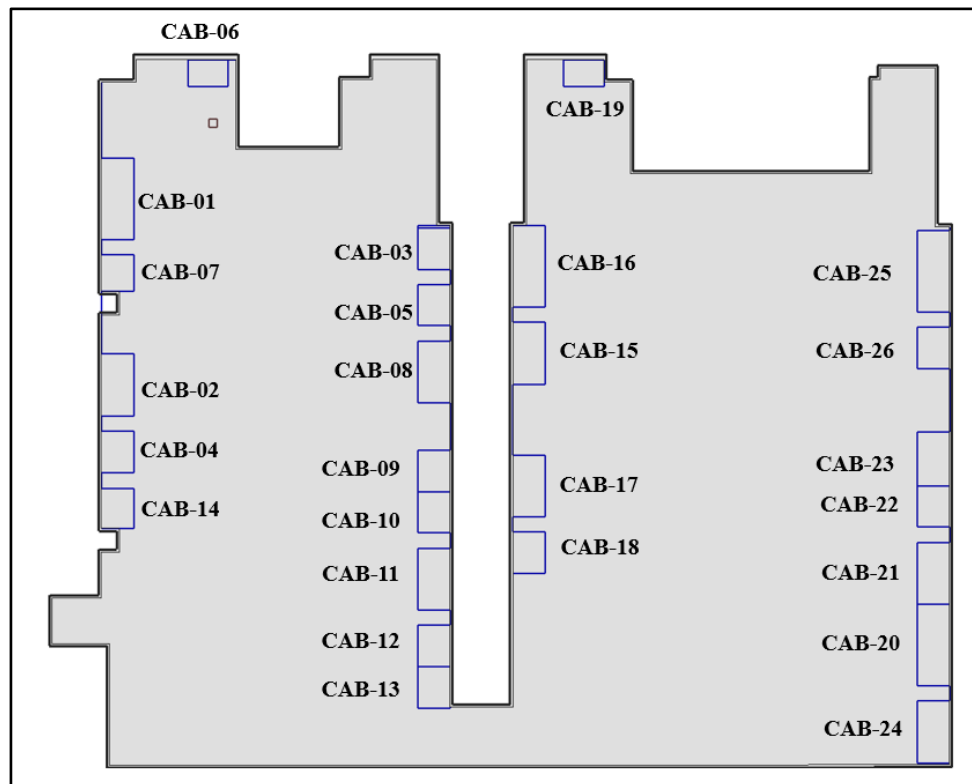
CABINA	ANCHO CABINA [m]	ALTURA GUILLOTINA CABINA [m]	VELOCIDAD EN CARA [m/s]	DEMANDA FLUJO [lps]
CAB-01	2.4	0.45	0.5	547
CAB-02	1.8	0.45	0.5	411
CAB-03	1.2	0.45	0.5	274
CAB-04	1.2	0.45	0.5	274
CAB-05	1.2	0.45	0.5	274
CAB-06	1.2	0.45	0.5	274
CAB-07	1.2	0.45	0.5	274
CAB-08	1.8	0.45	0.5	411
CAB-09	1.2	0.45	0.5	274
CAB-10	1.2	0.45	0.5	274
CAB-11	1.8	0.45	0.5	411
CAB-12	1.2	0.45	0.5	274
CAB-13	1.2	0.45	0.5	274
CAB-14	1.2	0.45	0.5	274
CAB-15	1.8	0.45	0.5	411
CAB-16	2.4	0.45	0.5	547
CAB-17	1.8	0.45	0.5	411
CAB-18	1.2	0.45	0.5	274
CAB-19	1.2	0.45	0.5	274
CAB-20	2.4	0.45	0.5	547
CAB-21	1.8	0.45	0.5	411
CAB-22	1.2	0.45	0.5	274
CAB-23	1.6	0.45	0.5	368
CAB-24	1.6	0.45	0.5	368
CAB-25	2.4	0.45	0.5	547
CAB-26	1.2	0.45	0.5	274
TOTAL				9221

Adicionalmente, se considera la siguiente configuración de ubicación de las cabinas, cuyo propósito es situarlas en el perímetro del laboratorio, de manera que puedan estar tan lejos como

sea posible de los dispositivos de suministro de aire acondicionado, en aras de no verse perturbado por el efecto de éstos. La altura de ubicación de las cabinas es 1.3m con respecto al nivel del suelo.

Figura 8

Ubicación de cabinas de extracción



2.3 Selección de difusores de suministro y rejillas de extracción

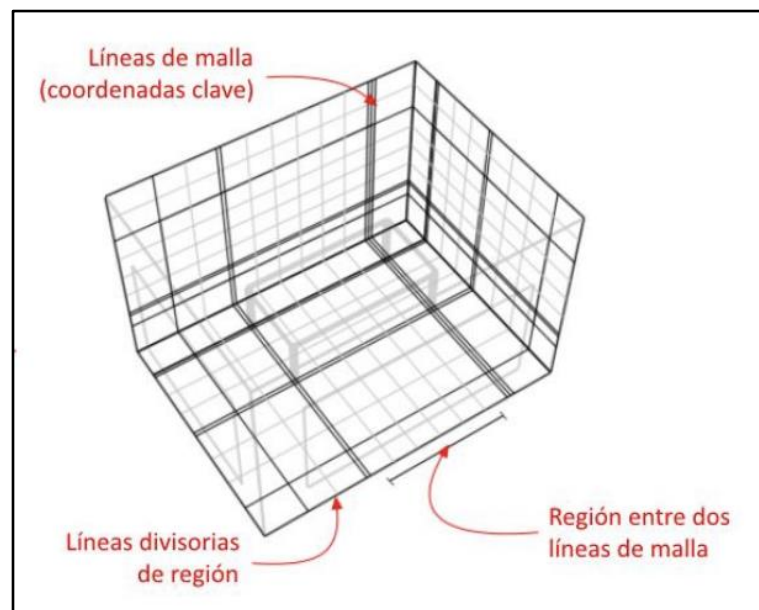
Para la selección de los dispositivos de suministro y extracción de aire, se recurrirá a modelos existentes a nivel comercial de la marca PRICE INDUSTRIES, de manera que la información técnica básica se extraerá de las fichas técnicas y catálogos de este fabricante. Esta información será llevada al modelo y partiendo de la necesidad de cumplir los requerimientos identificados en el análisis de la información recopilada se llevó un proceso iterativo hasta encontrar una configuración en que las cantidades, dimensiones y configuración de los dispositivos seleccionados muestren el cumplimiento de estos requerimientos en la simulación modelada.

2.4 Análisis CFD

Se recurre al módulo de análisis CFD internos de DesignBuilder, para predecir velocidades y temperaturas del aire en la zona analizada. Para esto, se considera como dominio el volumen de aire climatizado del laboratorio en cuestión, es decir, el volumen constituido por la proyección de toda el área del laboratorio hasta la altura en donde se dispongan los difusores de suministro; este volumen se divide en un número de celdas adyacentes (no se superponen) que conforman una malla de volumen finito mediante la proyección de líneas de malla a lo largo de los ejes geométricos principales (malla cartesiana rectilínea); la malla es creada automáticamente por el programa a partir de la geometría del modelo, identificando todos los vértices de los objetos contenidos en éste y empleando un valor de espaciamiento lo más cercano posible al que es definido por el usuario (Ordóñez García, 2017). Véase a continuación el ejemplo de una malla para uno de los cálculos realizados.

Figura 9

Esquemático de malla para el cálculo CFD en DesignBuilder



Para el caso particular de este trabajo, se consideró lo siguiente:

- Malla uniforme, lo que implica que ésta se definirá por celdas cúbicas con dimensiones fijas dadas.
- Espaciamiento de malla de 0.3 m, que corresponde a la distancia entre líneas ; como valor por defecto sugerido por el software y que indica el valor que tomará como guía el programa para dividir las regiones de la malla construida.
- Límite inferior de separación de líneas de malla de 0.03 m; como valor sugerido por defecto por el software, representa que las líneas de malla a distancias menores a él serán omitidas para unificar celdas adyacentes.

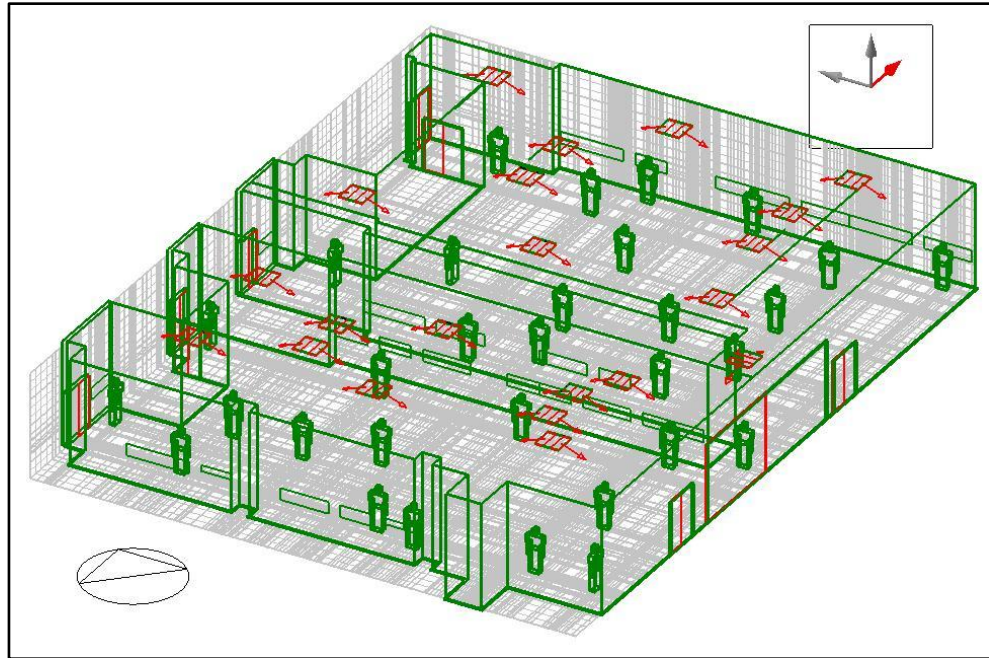
Figura 10

Estadísticas de la malla para cálculo CFD

Analysis: Configuración 10 T15° 4.0m	
Domain: Laboratorio Barrancabermeja, Block 1, Laboratorio O&G	
Grid Statistics	
Description	Data
Number X Cells	165
Number Y Cells	202
Number Z Cells	16
Max aspect ratio	19,133
Required Memory (MB)	68,7
Available Memory (MB)	878,0
Check	OK

Figura 11

Representación gráfica de la malla para cálculo CFD



- Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$, dado que se trata de un modelo que, si bien es más demandante que la otra opción disponible en el software (viscosidad efectiva constante), se trata de uno de los modelos de turbulencia más ampliamente usados y validados. En este modelo se reemplaza la velocidad instantánea de las ecuaciones de energía y Navier-Stokes con un componente promedio fluctuante; dando lugar a términos adicionales denominados tensiones de Reynolds y flujos de calor turbulentos que, a su vez, se reemplazan con términos que involucran velocidades instantáneas, en las que las viscosidades moleculares son sustituidas por viscosidades efectivas (Ordóñez García, 2017).
- Número máximo de iteraciones externas de 5000, lo que implica que éste es el número máximo de iteraciones que se producen en el bucle externo de cálculo iterativo en que

entra el software para tratar de reducir los residuales (los indicativos de cuánto se acercan los cálculos a la convergencia) hasta el valor admisible que se establezca.

- Método de discretización barlovento, lo que indica que se reemplazan las ecuaciones diferenciales parciales por ecuaciones diferenciales finitas, mediante formulación de la serie de Taylor para producir un conjunto de ecuaciones diferenciales centrales. En este método, las condiciones barlovento afectan a las condiciones sotavento, de manera que el término convectivo se calcula asumiendo que el valor de la variable dependiente en una celda es igual al valor en la parte barlovento de la interface de dicha celda (Ordóñez García, 2017).
- Coeficientes de transferencia superficial de calor calculados, de forma que el software los obtiene a partir de la información ingresada al modelo.

3. Resultados

3.1 Análisis de la información recopilada

De acuerdo con la literatura recopilada y revisada, la ventilación en un edificio de laboratorios es necesaria para proveer un ambiente seguro y sano a sus ocupantes. En concreto, esto es logrado mediante el control de las cantidades de suministro y extracción, la temperatura, la humedad y la velocidad del aire. Ahora bien, para los propósitos particulares de este trabajo, es necesario hacer énfasis en aquellos puntos que pueden controlarse mediante la selección de dispositivos de suministro y de extracción de aire; a continuación se despliega esto.

3.1.1 Relaciones de presurización.

Mediante el balance entre flujos de suministro y extracción de aire se debe procurar que sólo ocurra flujo de aire sin control (infiltraciones y exfiltraciones) de áreas limpias a áreas más

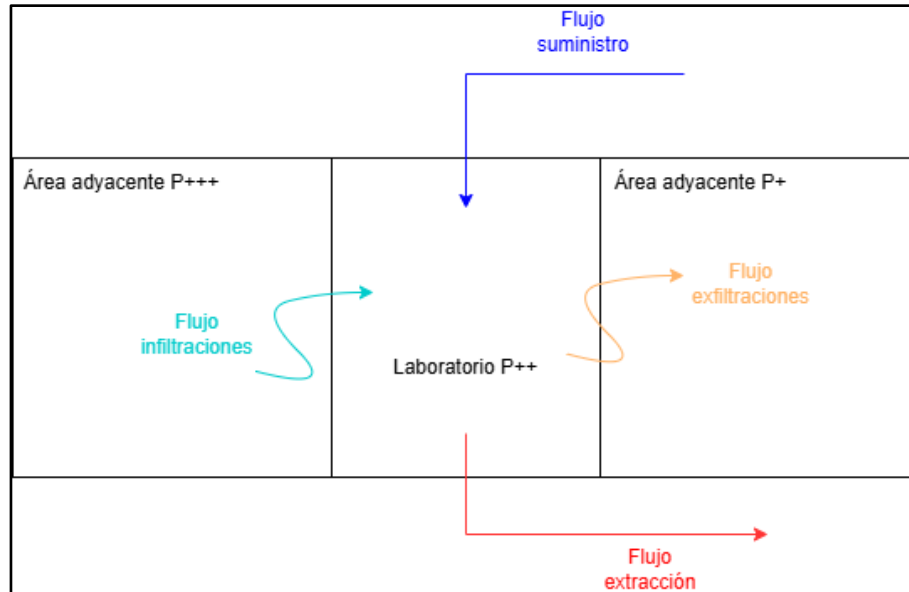
sucias o de áreas de bajo riesgo a áreas de alto riesgo. Este flujo o transferencia de masa de aire es el que se da a través de todas las aberturas en las fronteras de un recinto (claros en puertas, brechas en muros, perforaciones en cerramientos, etc...) y está directamente relacionado con la presión diferencial que hay entre las dos áreas adyacentes.

Específicamente, en el caso de laboratorios para la industria O&G se considera que se debe mantener diferenciales de presión negativos entre áreas peligrosas y no peligrosas: por ejemplo, para el caso de Barrancabermeja, es probable que no sea adecuado tener presiones manométricas negativas aun en áreas que implican el manejo de sustancias peligrosas, ya que también debe mitigarse la ocurrencia de infiltraciones del aire exterior (se tiene un ambiente de alta temperatura y alta humedad), de manera que para estas áreas es sugerido que se tenga una presión positiva, pero baja, y que debe complementarse con presiones positivas más altas en las áreas administrativas circundantes, tales como oficinas, esclusas o antecámaras. Valores típicos de diferencial de presión entre áreas se encuentran entre 2.5 y 12.5 Pa (DiBerardinis, Baum, First, Gatwood, & Seth, 2013).

La presurización o diferencial de presión entre áreas, a su vez, depende de la diferencia entre los flujos de suministro y extracción de aire (a veces denominado offset), ya que el mecanismo para garantizar la conservación de la masa de aire en el recinto es el flujo a través de exfiltraciones o infiltraciones según sea el caso. Para el cálculo del flujo de compensación (offset) se hace un balance entre flujos de suministro, extracción y presurización según lo siguiente:

Figura 12

Esquema de flujos para presurización



$$Flujo_{suministro} = Flujo_{extracción} + Flujo_{offset}$$

$$\rightarrow Flujo_{suministro} = Flujo_{extracción} + Flujo_{exfiltraciones} - Flujo_{infiltraciones}$$

De acuerdo con esto, el primer requerimiento, desde el punto de vista de la distribución del aire y para el diseño de un sistema HVAC en un laboratorio, debe ser que la definición de los volúmenes de aire de suministro y extracción sea tal que se logre un diferencial de presión deseable entre zonas adyacentes.

3.1.2 Ventilación.

La ventilación para un laboratorio cumple la función de diluir las emisiones y olores que allí puedan generarse con el fin de proveer un ambiente de trabajo seguro y sano bajo condiciones normales y esperadas de operación. La ventilación debe analizarse en términos del flujo de extracción en laboratorios presurizados negativamente y en términos del flujo de suministro en laboratorios presurizados positivamente y se suele dar en términos de número de cambios de aire

por hora (ACH); los ACH representan la cantidad de aire equivalente al volumen total de un recinto que pasa por éste cada hora. Los valores sugeridos típicos para las tasas de ventilación por dilución para laboratorios pueden variar entre 4 y 10 cambios por hora (American Industrial Hygiene Association, 2012).

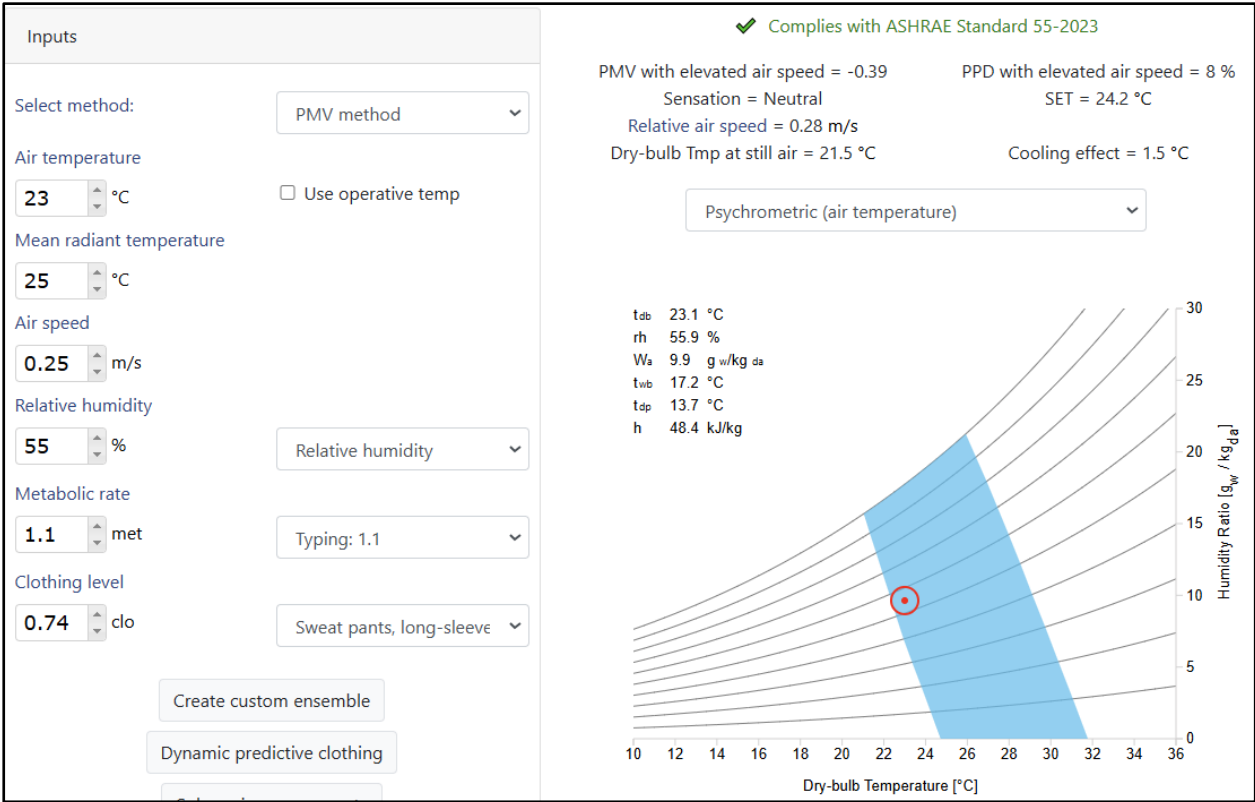
3.1.3 Confort.

La siguiente pregunta, una vez definidos los volúmenes de suministro y extracción de aire, debe ser cómo suministrar y extraer el aire para mantener unas condiciones confortables en el ambiente interior.

Por un lado, el estándar 55 de ASHRAE introduce los conceptos de Voto Medio Previsto (PMV) y el Porcentaje Previsto de Insatisfechos (PPD): PMV pretende predecir el voto medio de sensación térmica que daría un grupo grande de personas expresado mediante los números enteros entre -3 y +3, correspondiendo cada número a categorías como “frío”, “neutral” o “caliente”, en tanto que el PPD establece la predicción del porcentaje de personas que estarían satisfechas para un valor dado de PMV (ASHRAE, 2023). Según este método, el confort térmico depende de: tasa metabólica, aislamiento por vestimenta, temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire y humedad. Para este caso, se supondrá que los valores de tasa metabólica y aislamiento por vestimenta son los que fueron definidos en la sección de asignación de datos al modelo y una velocidad del aire de 0.25 m/s que, según se verá, es recomendada para el área de ocupación en laboratorios; así mismo, se supondrá que la temperatura media radiante está 2°C por encima de la temperatura del aire; a partir de esto, se encuentran las siguientes condiciones para confort térmico en la herramienta de confort de CBE:

Figura 13

Condiciones para confort térmico



No obstante, para garantizar el confort térmico en laboratorios, también se debe lograr una buena distribución del aire interior, para lo que es necesario considerar el Índice de Desempeño de Difusión del Aire (ADPI por sus siglas en inglés), y que se entiende como el porcentaje de puntos de un arreglo definido en un espacio acondicionado para los que la temperatura de corriente de aire efectiva se encuentra dentro de los márgenes admisibles (-2°C y 1°C) (ASHRAE, 2019).

Específicamente, entre mayor sea el ADPI, mayor se considera la calidad de difusión del aire de un recinto y se define un 80% como el valor mínimo aceptable. Para poder proyectar valores del ADPI desde un diseño, se considera que la relación entre el tiro del difusor para una velocidad de 0.25 m/s ($T_{0.25}$) y las longitudes características son el parámetro clave en la proyección del ADPI y, para ello, se tiene la siguiente tabla de selección.

Tabla 2

Guía de selección para ADPI (PRICE INDUSTRIES, 2024)

Tipo de dispositivo terminal	Carga del recinto	$\frac{T_{0.25}}{L}$ para máximo ADPI	Máximo ADPI	ADPI mayor que	Rango de $\frac{T_{0.25}}{L}$
Rejillas laterales altas	250	1.8	68	70	1.5 a 2.2
	190	1.8	72	870	1.2 a 2.3
	125	1.6	78	80	1.0 a 1.9
	65	1.5	85	80	1.0 a 1.9
	<30	1.4	90	70	0.7 a 2.1
Difusores circulares, de cono y cuadrados de placa	250	0.8	76	80	0.7 a 1.3
	190	0.8	83	80	0.7 a 1.2
	125	0.8	88	80	0.5 a 1.5
	65	0.8	93	80	0.4 a 1.7
	<30	0.8	99	60	0.4 a 1.7
Rejilla inferior de cuchillas rectas	250	1.7	61	70	1.5 a 1.7
	190	1.7	72	80	1.4 a 1.7
	125	1.3	86	90	1.2 a 1.8
	65	0.9	95	90	0.8 a 1.3
Rejilla inferior de cuchillas curvas	250	0.7	94	80	0.6 a 1.5
	190	0.7	94	-	0.6 a 1.7
	125	0.7	94	-	-
	65	0.7	94	80	-
Difusores de ranura de techo $\frac{T_{0.5}}{L}$	250	0.3	85	80	0.3 a 0.7
	190	0.3	88	80	0.3 a 0.8
	125	0.3	91	80	0.3 a 1.1
	65	0.3	92	80	0.3 a 1.5
Difusores de techo aleteados y perforados	35 a 160	2.0	96	90	1.4 a 2.7
	35 a 160	2.0	96	80	1.0 a 3.4

Del mismo modo, una selección adecuada de los dispositivos de suministro debería contemplar también el criterio adicional del nivel de ruido. El nivel de ruido del dispositivo de suministro da una referencia de la presión sonora que se genera por el paso del aire y que debe mantenerse por debajo de unos valores máximos dependientes del tipo de servicio que presta la zona atendida (*noise criteria* máximo entre 35 y 55 para laboratorios).

Por último, no sobra destacar que, a diferencia de lo que ocurre con los dispositivos de suministro de aire, las rejillas de retorno o extracción suelen no tener un efecto significativo en la difusión del aire del recinto sin importar el tipo de dispositivo que se utilice o su ubicación (PRICE

INDUSTRIES, 2024), siempre y cuando no sean ubicados de manera que se puedan producir cortos circuitos de aire frío; de hecho, se considera que estos dispositivos sólo tienen un efecto apreciable en el movimiento del aire del recinto en las zonas inmediatamente cercanas a ellos.

3.1.4 Velocidad de aire de suministro.

Altas velocidades del aire de suministro pueden crear turbulencias excesivas que perjudican el desempeño de los dispositivos de extracción para la remoción de contaminantes y el ingreso de éstos en el espacio de ocupación humana. Por tanto, se recomienda el uso preferible de difusores con descarga no directa hacia dispositivos de extracción.

Además, teniendo en cuenta que la mayor fuente de perturbaciones para el movimiento del aire es el aire de suministro, se tiene la recomendación de que la velocidad máxima del aire de suministro a una altura de 2.1 m con respecto al nivel del piso sea 0.25 m/s (DiBerardinis, Baum, First, Gatwood, & Seth, 2013) en las zonas circundantes a cabinas, en aras de no afectar el requerimiento de velocidad mínima en la cara de éstas.

3.1.5 Resumen de requerimientos

Partiendo de todo lo anterior, esta sección se dedica a recoger los parámetros de diseño encontrados que deben ser atendidos a la hora de seleccionar dispositivos de suministro y extracción para la aplicación particular considerada y que servirán posteriormente para la selección de dispositivos mediante la evaluación de estos requerimientos en el modelo CFD construido.

Tabla 3

Resumen de requerimientos desde el punto de vista de aire acondicionado para laboratorios

PARÁMETRO	REQUISITO	FUENTES
Presurización	De 2.5 Pa a 12.5 Pa entre áreas de menor riesgo a mayor riesgo Presiones manométricas positivas para evitar infiltraciones	(DiBerardinis, Baum, First, Gatwood, & Seth, 2013)
Ventilación (renovación de aire)	Entre 4 y 10 ACH	(American Industrial Hygiene Association, 2012)
Temperatura de bulbo seco del aire	23±2 °C	(ASHRAE, 2023)
Ruido	NC entre 35 y 55	(PRICE INDUSTRIES, 2024)
ADPI	Mayor al 80%	(ASHRAE, 2015)
Velocidad de suministro de aire	Máximo 0.25 m/s a una altura de 2.1 m con respecto al nivel del piso en el entorno de las cabinas	(ASHRAE, 2015)

3.2 Modelo CFD

La finalización del modelo CFD y la definición de las condiciones de frontera requiere, como se mencionó previamente, de la definición de los flujos de diseño para suministro y extracción de aire. Ahora bien, utilizando el conocimiento de los diferentes flujos posibles y sabiendo que para definir los flujos de suministro y extracción de aire se requiere establecer el mayor valor entre los flujos necesarios para 1) carga térmica, 2) renovación de aire y 3) demanda de extracción, se procede a comparar estos valores.

Tabla 4

Flujos requisito por carga térmica, renovación y demanda de extracción

CRITERIO	FLUJO REQUERIDO [lps]
Carga térmica (de estimación)	4380
Renovación de aire (10 ach)	7252
Demanda de extracción	9221

A partir de esto, se concluye que el requerimiento crítico es la demanda de extracción, de manera que no se requiere de rejillas de extracción auxiliares, ya que se tiene suficiente extracción de aire con estos dispositivos y, luego, se procede a realizar el modelo con este parámetro; no obstante, dado que, se desea presión positiva en el laboratorio considerado, el flujo de suministro debe ser aún mayor que el de extracción, de manera que se debe estimar el flujo de presurización; esto se desarrolla mediante el método propuesto en el manual de fundamentos de ASHRAE (ASHRAE, 2001), basado en áreas efectivas de fuga, como se verá a continuación. Primero, se parte de las áreas efectivas de fuga por diversas fuentes.

Tabla 5

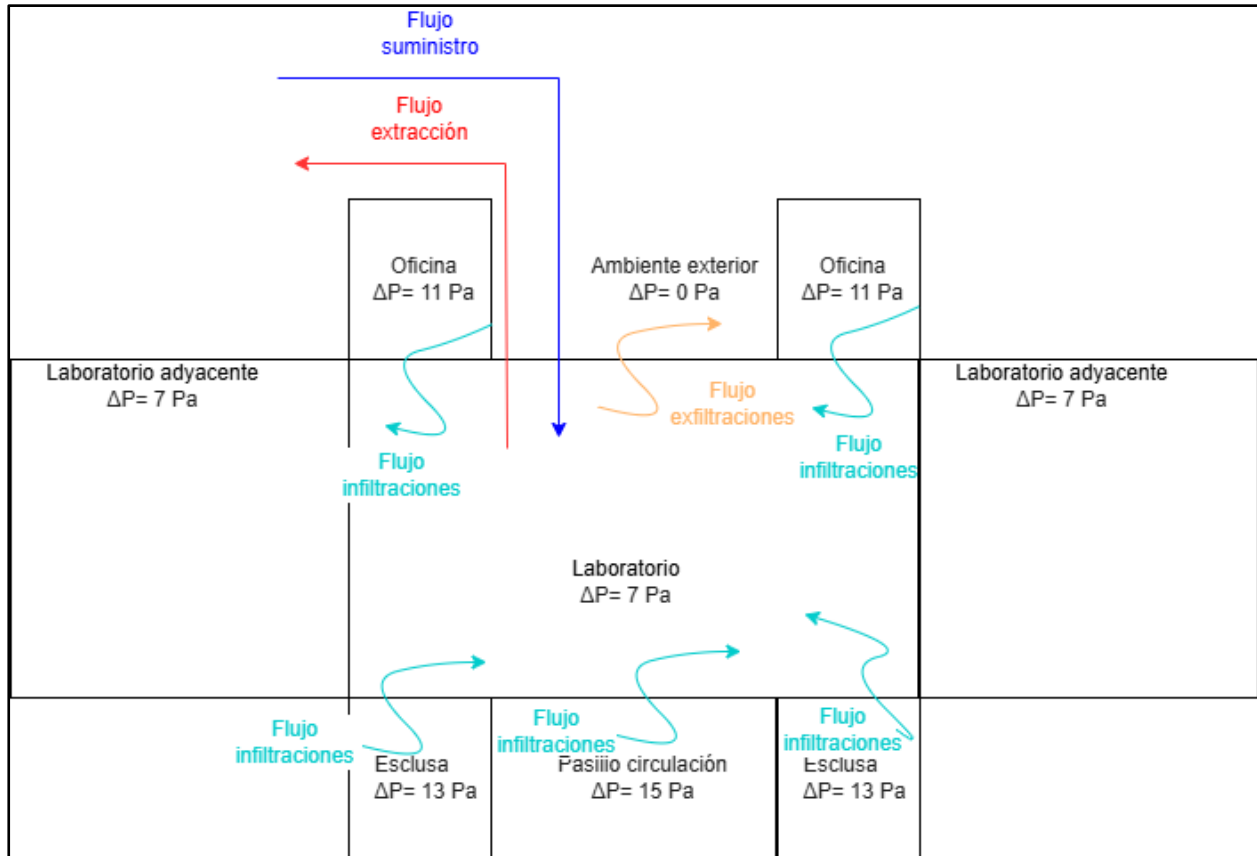
Áreas efectivas de fuga por diferentes fuentes

DESCRIPCIÓN	VALOR	UND
Pared de ladrillo hueco	0.68	cm ² /m ²
Puerta de hoja doble	8.0	cm ² /m ²
Puerta de hoja simple	12.0	cm ² /cada
Ventana	0.528	cm ² /lmc
Cielo raso general	1.8	cm ² /m ²
Penetraciones de tubería, plomería y cableado	6.0	cm ² /cada

Luego, considere la representación esquemática que relaciona el laboratorio analizado con su entorno en términos de flujo de fuga.

Figura 14

Diagrama de presurización



Con esto, se procede a realizar el cálculo total de infiltraciones y exfiltraciones y, de esa forma, la estimación del flujo requerido para mantener la presión deseada.

Tabla 6

Cálculo de flujo de presurización

DESCRIPCIÓN	Área unitaria de fuga (cm^2/m^2) o cm^2/cada	Área (m^2) o cantidad	Área de fuga [cm^2]	$\sqrt{\frac{2}{\rho}}$	ΔP [Pa]	$\Delta P^{0.5-n}$	Coefficiente del flujo [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa}^n)$]	Flujo de presurización [lps]
Pared de ladrillo hueco (esclusa)	0.68	9.83	6.69	1.35	6	0.764	0.000733	5.23
Puerta doble (esclusa)	8	1.00	8.00	1.35	6	0.764	0.000878	6.26
Pared de ladrillo hueco (completo) (oficina)	0.68	16.32	11.10	1.35	4	0.812	0.00122	10.47
Ventana (OFICINA)	0.528	6.00	3.17	1.35	4	0.812	0.000348	2.99
Puerta sencilla(oficina)	12	1.00	12.00	1.35	4	0.812	0.001317	11.32
Pared de ladrillo hueco (completo) (esclusa)	0.68	8.61	5.86	1.35	6	0.764	0.000643	4.58

DESCRIPCIÓN	Área unitaria de fuga (cm ² /m ²) o cm ² /cada	Área (m ²) o cantidad	Área de fuga [cm ²]	$\sqrt{\frac{2}{\rho}}$	ΔP [Pa]	$\Delta P^{0.5-n}$	Coefficiente del flujo [m ³ /(s*Pa ⁿ)]	Flujo de presurización [lps]
Puerta doble(esclusa)	8	1.00	8.00	1.35	6	0.764	0.000878	6.26
Pared de ladrillo hueco (completo) (oficina)	0.68	16.70	11.35	1.35	8	0.732	0.001246	10.71
Pared de ladrillo hueco (completo) (oficina)	0.68	17.65	12.00	1.35	8	0.732	0.001317	11.32
Ventana (oficina)	0.528	6.00	3.17	1.35	8	0.732	0.000348	2.99
Pared de ladrillo hueco (completo) (oficina)	0.68	18.39	12.50	1.35	8	0.732	0.001372	11.80
Ventana(oficina)	0.528	6.00	3.17	1.35	8	0.732	0.000348	2.99
Pared de ladrillo hueco (completo) (esclusa)	0.68	9.14	6.21	1.35	6	0.764	0.000682	4.86
Puerta doble(esclusa)	8	1.00	8.00	1.35	6	0.764	0.000878	6.26
Pared de ladrillo hueco (completo) (exterior)	0.68	70.75	48.11	1.35	7	0.747	0.005280	-41.61
Puerta sencilla(exterior)	12	1.00	12.00	1.35	7	0.747	0.002634	-20.76
Puerta doble(exterior)	8	1.00	8.00	1.35	7	0.747	0.001756	-13.84
Pared de ladrillo hueco (completo) (oficina)	0.68	74.96	50.97	1.35	4	0.812	0.005593	30.64
Ventana(oficina)	0.528	10.00	5.28	1.35	4	0.812	0.000579	3.17
Puerta sencilla(oficina)	12	1.00	12.00	1.35	4	0.812	0.001317	7.21
Puerta doble(oficina)	8	1.00	8.00	1.35	4	0.812	0.000878	4.81
Pared de ladrillo hueco (completo) (pasillo)	0.68	44.26	30.10	1.35	8	0.732	0.003303	18.09
Ventana(pasillo)	0.528	6.00	3.17	1.35	8	0.732	0.000348	1.90
Ceiling general (exterior)	1.8	457.77	823.99	1.35	7	0.747	0.090425	-712.69
Penetraciones tubería y cableado(exterior)	6	10.00	60.00	1.35	7	0.747	0.006584	-51.90
Penetraciones tubería y cableado(oficina)	6	6.00	36.00	1.35	4	0.812	0.003951	21.64
Penetraciones tubería y cableado(esclusa)	6	2.00	12.00	1.35	6	0.764	0.001317	9.39
Penetraciones tubería y cableado(pasillo)	6	3.00	18.00	1.35	8	0.732	0.001975	16.98
Penetraciones tubería y cableado(pasillo)	6	3.00	18.00	1.35	8	0.732	0.001975	16.98
Penetraciones tubería y cableado(pasillo)	6	3.00	18.00	1.35	8	0.732	0.001975	16.98
Penetraciones tubería y cableado(esclusa)	6	2.00	12.00	1.35	6	0.764	0.001317	9.39
Penetraciones tubería y cableado(pasillo)	6	3.00	18.00	1.35	4	0.812	0.001975	16.98
TOTAL [lps]								-569

De acuerdo con este resultado, el flujo de suministro requerido es:

$$Flujo_{suministro} = Flujo_{extracción} + Flujo_{offset} = 9221 + 569$$

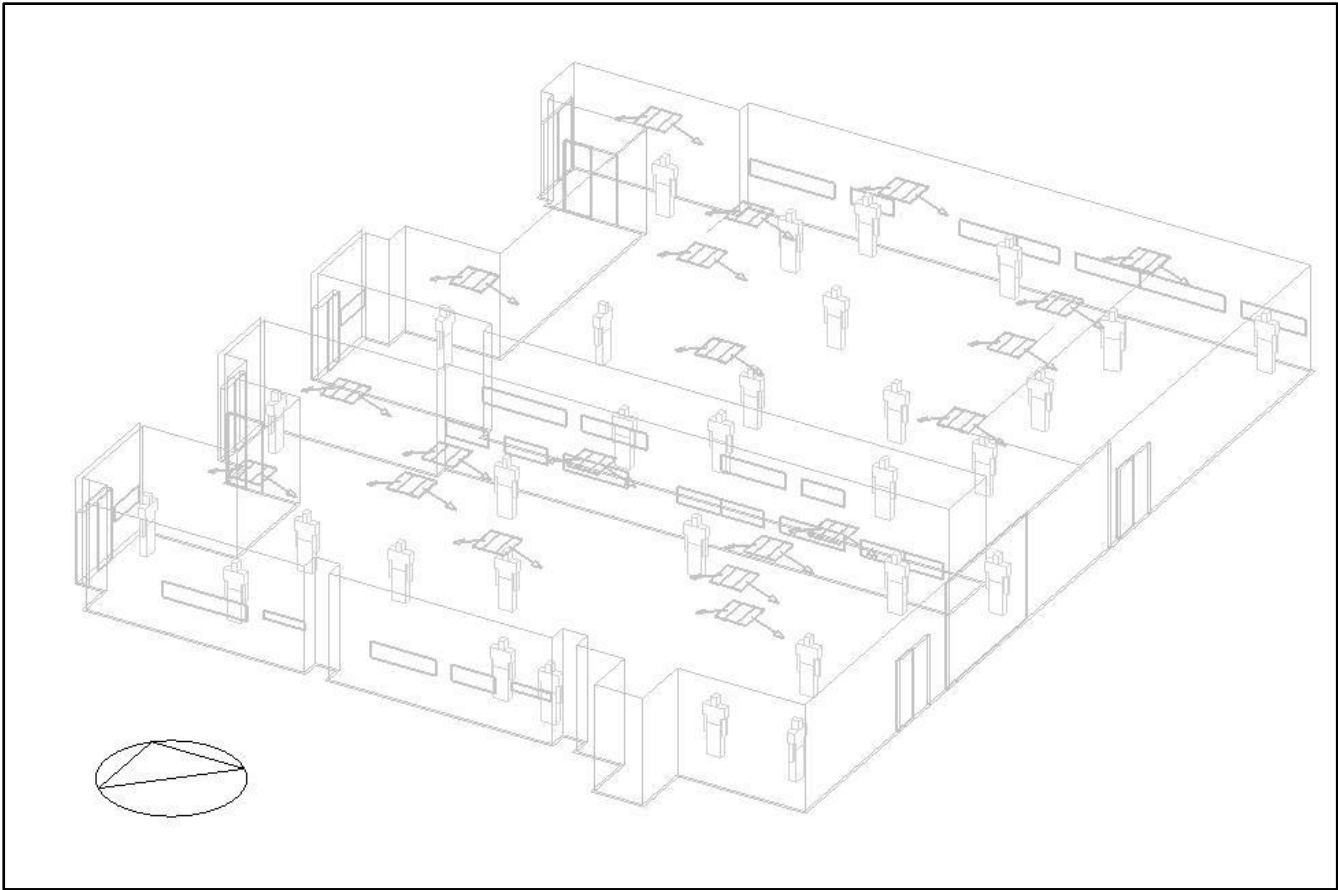
$$\rightarrow Flujo_{suministro} = 9790 [lps]$$

Así mismo, los flujos de infiltraciones y exfiltraciones son modelados en muros y puertas que comunican las diferentes áreas analizadas, con el fin de que el cálculo también se encuentre balanceado.

Luego, con esta información se realizó el proceso iterativo de dimensionamiento y disposición de difusores hasta llegar a la configuración y selección de difusores que cumple los requerimientos identificados. Se resalta también que las condiciones de contorno (temperaturas) de las superficies como muros, puertas, techo y demás fueron extraídas de la simulación corrida también en DesignBuilder las 3:00 p.m. del 1 de octubre, donde se encontró el pico de la carga térmica. Además, para la condición de contorno correspondiente a la temperatura de suministro de aire en difusores, se encontró que ésta no podría tener un valor usual de aplicaciones de aire acondicionado como 12°C, debido a que, como se mostró anteriormente, el flujo de suministro establecido es considerablemente superior al requerido por carga térmica, de manera que se concluye que para evitar subenfriamiento del área atendida se requiere de un re-calentamiento del aire antes de ser suministrado; específicamente, mediante termodinámica y psicrometría, se determinó que el aire debía suministrarse a alrededor de 15°C, de manera que se estableció esta temperatura como condición de contorno. El modelo CFD desarrollado se ilustra seguidamente:

Figura 15

Modelo construido para simulación CFD



Las condiciones de contorno establecidas se resumen seguidamente:

Tabla 7

Condiciones de contorno para cálculo CFD

SUPERFICIE / ELEMENTO	CONDICIÓN DE CONTORNO	
	TIPO	VALOR
Difusores x 20	Flujo	467 lps
Difusor x 1	Flujo	450 lps
Cabina CAB-01	Flujo	-547 lps
Cabina CAB-02	Flujo	-411 lps
Cabina CAB-03	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-04	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-05	Flujo	-274 lps

SUPERFICIE / ELEMENTO	CONDICIÓN DE CONTORNO	
	TIPO	VALOR
Cabina CAB-06	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-07	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-08	Flujo	-411 lps
Cabina CAB-09	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-10	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-11	Flujo	-411 lps
Cabina CAB-12	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-13	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-14	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-15	Flujo	-411 lps
Cabina CAB-16	Flujo	-547 lps
Cabina CAB-17	Flujo	-411 lps
Cabina CAB-18	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-19	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-20	Flujo	-547 lps
Cabina CAB-21	Flujo	-411 lps
Cabina CAB-22	Flujo	-274 lps
Cabina CAB-23	Flujo	-368 lps
Cabina CAB-24	Flujo	-368 lps
Cabina CAB-25	Flujo	-547 lps
Cabina CAB-26	Flujo	-274 lps
Puerta exterior doble	Flujo	-274.71 lps
Puerta exterior sencilla	Flujo	-140.1 lps
Puerta exterior doble	Flujo	-280.3 lps
Puerta exterior sencilla	Flujo	-140.1 lps
Puerta oficina	Flujo	41.640 lps
Puerta oficina	Flujo	45.840 lps
Puerta pasillo	Flujo	132.5 lps
Puerta pasillo	Flujo	26.115 lps
Puerta pasillo	Flujo	26.115 lps
Difusores x 21	Temperatura	15 °C
Agujeros (plano horizontal de aire sobre difusores)	Temperatura	30.71 °C
Partición interior 1 m ²	Temperatura	27.71 °C
Partición interior 1.4 m ²	Temperatura	27.74 °C
Partición interior 3.2 m ²	Temperatura	27.70 °C
Partición interior 1.70 m ²	Temperatura	26.32 °C
Partición interior 10.8 m ²	Temperatura	27.81 °C
Partición interior 11.1 m ²	Temperatura	26.02 °C
Puerta interior 3.0 m ²	Temperatura	27.74 °C
Partición interior 11.1 m ²	Temperatura	27.74 °C
Partición interior 11.86 m ²	Temperatura	27.82 °C
Partición interior 14.4 m ²	Temperatura	27.77 °C
Partición interior 18.765 m ²	Temperatura	28.06 °C
Partición interior 40 m ²	Temperatura	27.72 °C
Partición interior 8.4 m ²	Temperatura	27.82 °C

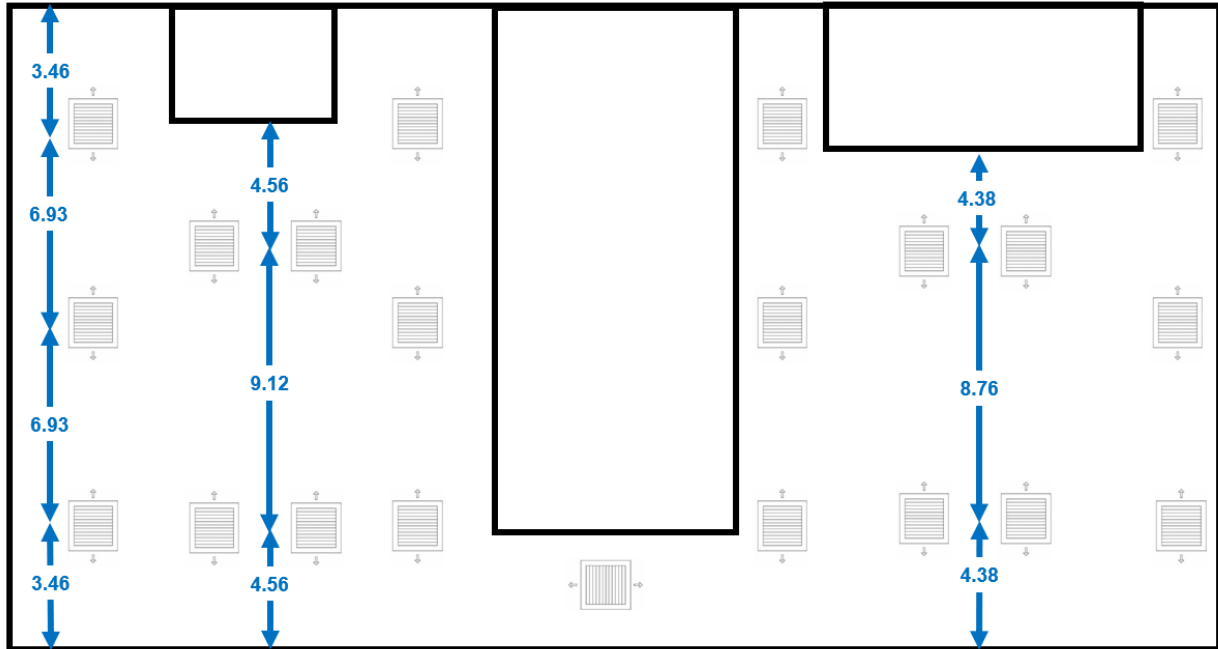
SUPERFICIE / ELEMENTO	CONDICIÓN DE CONTORNO	
	TIPO	VALOR
Partición interior 2.2 m ²	Temperatura	27.81 °C
Partición interior 2.2 m ²	Temperatura	27.77 °C
Partición interior 2.7 m ²	Temperatura	27.69 °C
Partición interior 25.3 m ²	Temperatura	27.81 °C
Partición interior 25.8 m ²	Temperatura	27.77 °C
Partición interior 27.9 m ²	Temperatura	27.71 °C
Partición interior 3.0 m ²	Temperatura	27.74 °C
Partición interior 3.0 m ²	Temperatura	27.77 °C
Partición interior 3.1 m ²	Temperatura	27.71 °C
Partición interior 3.64 m ²	Temperatura	27.66 °C
Partición interior 4.08 m ²	Temperatura	27.82 °C
Partición interior 5.4 m ²	Temperatura	27.81 °C
Partición interior 5.8 m ²	Temperatura	27.82 °C
Partición interior 56.9 m ²	Temperatura	27.82 °C
Partición interior 113.8 m ²	Temperatura	27.72 °C
Partición interior 6.0 m ²	Temperatura	27.77 °C
Partición interior 6.8 m ²	Temperatura	27.70 °C
Partición interior 6.82 m ²	Temperatura	27.82 °C
Partición interior 64.15 m ²	Temperatura	29.06 °C
Puerta interior 3.0 m ²	Temperatura	26.43 °C
Partición interior 7.1 m ²	Temperatura	28.02 °C
Partición interior 8.2 m ²	Temperatura	27.77 °C
Puerta interior 2.0 m ²	Temperatura	25.95 °C
Puerta interior 3.0 m ²	Temperatura	26.45 °C
Partición interior 99.8 m ²	Temperatura	28.03 °C
Partición interior 23.9 m ²	Temperatura	26.45 °C
Puerta interior 3.0 m ²	Temperatura	26.45 °C
Puerta exterior 2.85 m ²	Temperatura	34.62 °C
Muro exterior 12.41 m ²	Temperatura	27.82 °C
Muro exterior 8.2 m ²	Temperatura	29.50 °C
Puerta exterior 2.0 m ²	Temperatura	34.62 °C
Puerta exterior 2.0 m ²	Temperatura	34.62 °C
Muro exterior 9.8 m ²	Temperatura	29.50 °C

3.3 Selección de dispositivos de distribución de aire

Ahora, con el modelo completamente construido, esta sección se dedica a ilustrar los hallazgos finales en la selección de difusores para la distribución del aire en el recinto atendido. En primer lugar, para verificar el cumplimiento de la proyección de un ADPI mayor al 80%, a continuación se ilustra la configuración propuesta:

Figura 16

Definición de longitudes características para los difusores seleccionados



De acuerdo con la figura anterior, se tiene un total de 20 difusores de suministro de aire con 467 lps cada uno y 1 difusor (el que apunta en dirección perpendicular) con 450 lps, todos con una configuración de 2 vías a 180°, que pretende que el aire sea inyectado en dirección paralela a las caras de las cabinas de extracción y no perpendicular a ellas. Con este flujo, las longitudes características, la tabla de desempeño de la línea SMD/AMD del fabricante PRICE y partiendo del hecho de que el tiro de estas tablas debe reducirse en un 25% por tratarse de una aplicación sin cielo raso (PRICE INDUSTRIES, 2024), se procede a seleccionar las dimensiones para los difusores.

Tabla 8

Verificación de cumplimiento de ADPI con selección de difusores

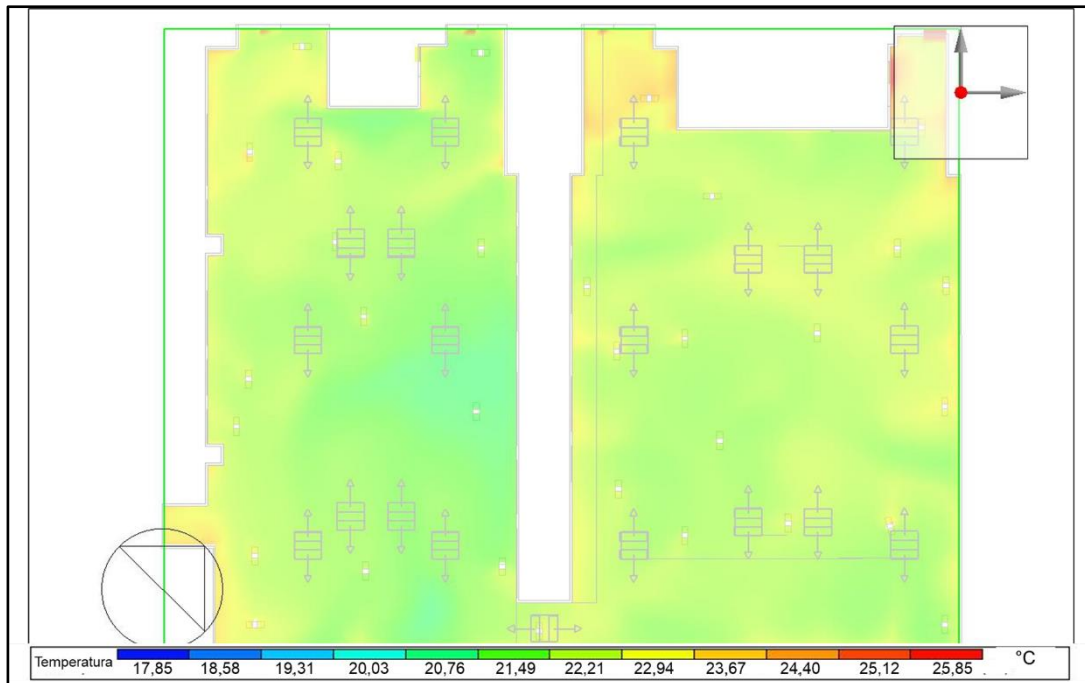
Sistema	Modelo	Tamaño nominal [mm]	Flujo [lps]	NC	Cantidad	Longitudes características L_c [m]	Tiro @ 0.25 m/s $T_{0.25}$ m]	$T_{0.25} / L_c$	ADPI
Suministro	SMD / AMD 2 vías	535 x 535	467	<23	12	3.46	7.55	2.18	>90%
Suministro	SMD / AMD 2 vías	535 x 535	467	<23	4	4.56	7.55	1.66	>90%
Suministro	SMD / AMD 2 vías	535 x 535	467	<23	4	4.38	7.55	1.72	>90%
Suministro	SMD / AMD 2 vías	535 x 535	450	<23	1	4.66	7.42	1.59	>90%

Luego, mediante la simulación del modelo CFD se continúa con la verificación del cumplimiento de los demás requerimientos establecidos. A continuación se ilustran los principales resultados de las simulaciones ejecutadas.

Primero, considere la evaluación de la temperatura a una altura media de la zona de ocupación.

Figura 17

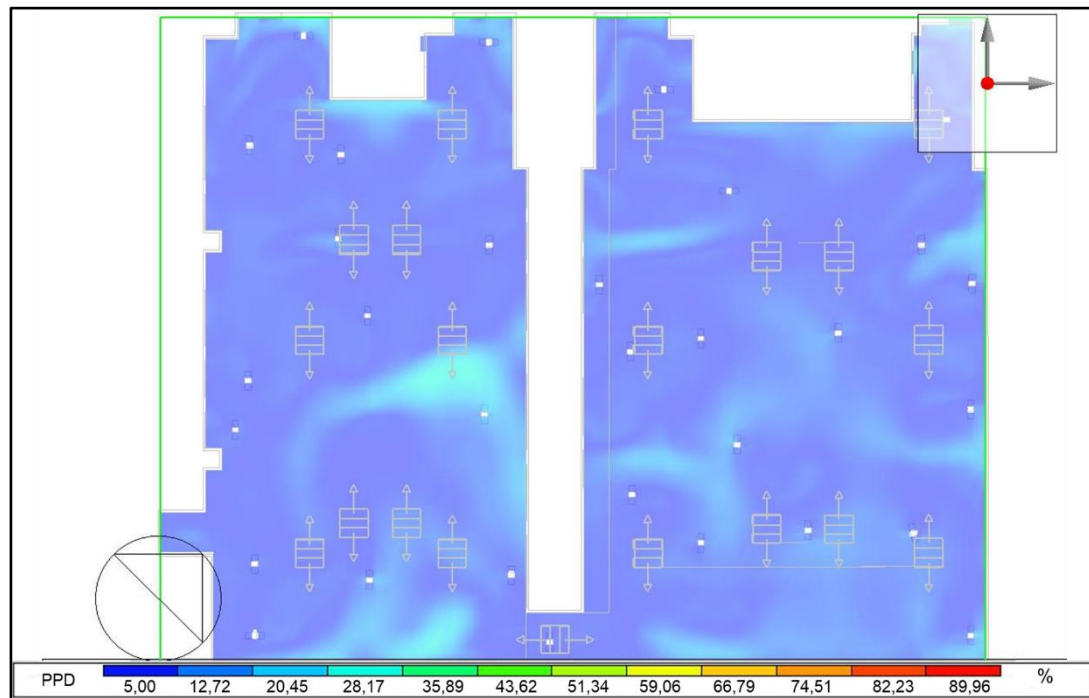
Distribución de temperatura a 1.55m de altura



La figura anterior muestra que con las condiciones de simulación establecidas se logran valores entre 21°C y 24°C, que se acercan a la temperatura deseada de 23°C para confort, a la par que se logra una alta homogeneidad de ésta a lo largo de toda el área atendida. Esto se confirma evaluando el PPD a una altura de 1.55m.

Figura 18

Distribución de PPD a 1.55m de altura



Esta figura muestra que el %PPD es menor al 10% en la mayor parte del área analizada, con lo que se valida el cumplimiento de los requisitos definidos por el estándar 55 de ASHRAE.

Por otro lado, se debe considerar también el requisito de velocidad máxima de 0.25 m/s para el aire suministrado a una altura de 2.1m sobre el nivel del suelo, para lo cual se evalúan los contornos de velocidad en la planta para una altura de 2.16m y 1.82m y en diferentes planos de corte longitudinales coincidentes con los difusores modelados según se aprecia seguidamente. En

estas figuras, se resaltan las ubicaciones de los difusores y de las cabinas en color negro para facilidad de la lectura.

Figura 19

Contorno de velocidad a una altura de 2.16m

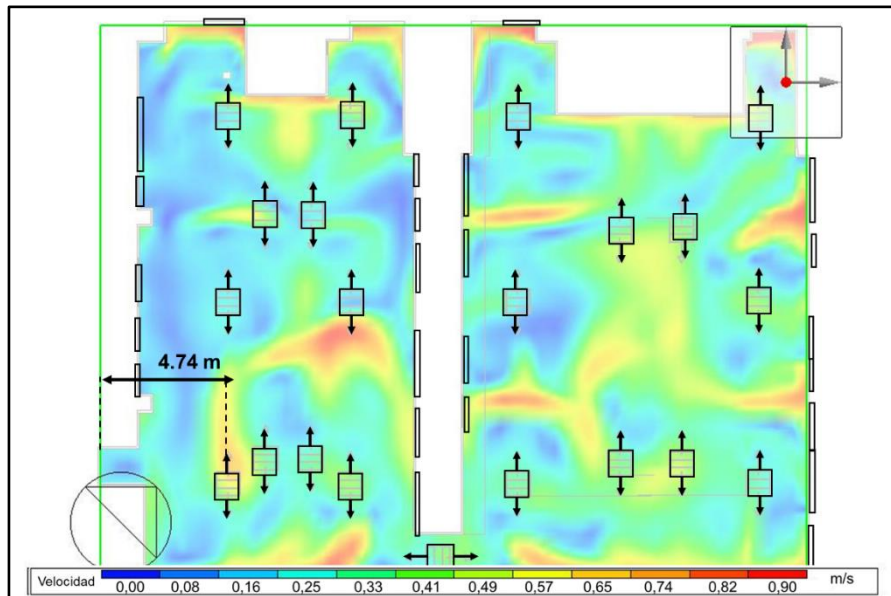
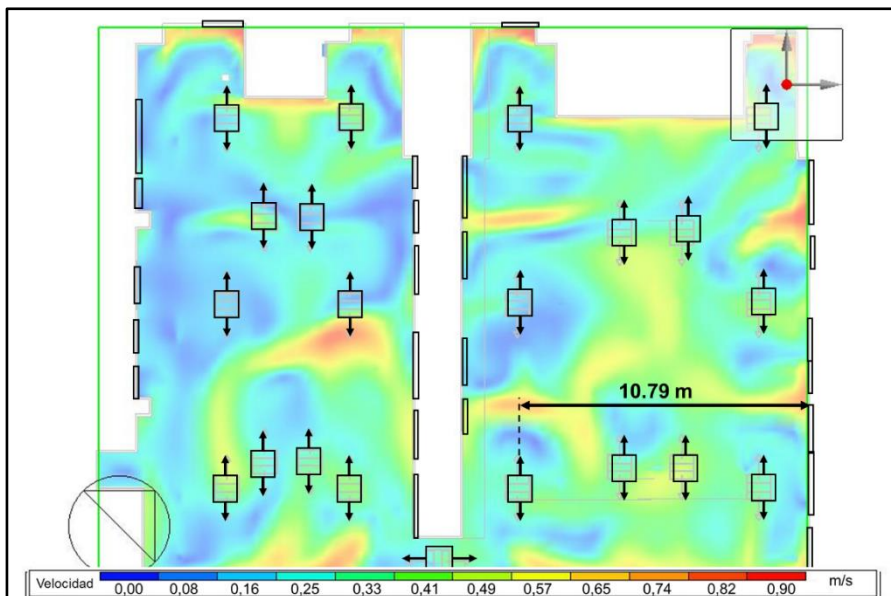


Figura 20

Contorno de velocidad a una altura de 1.82m



Estas figuras muestran que para las altura consideradas, las velocidades del aire de suministro alcanzan valores altos de hasta aproximadamente 0.57 m/s pero, en general, en la cercanía de la descarga del aire de suministro; mientras tanto, el aire circundante inducido por el aire de suministro se mantiene, en su mayoría, en el rango deseado (0.25 m/s como máximo). No obstante, se ve que en algunas cabinas del ala norte del laboratorio (lado derecho) la velocidad cerca de las cabinas aumenta, pero, como se verá en vista 3D y cómo se infiere del hecho de que esto se acentúe en el caso de altura 1.82m con respecto al de 2.16m, esto se debe a la inducción del aire generada por la alta velocidad en la cara de éstas.

Ahora, considere los contornos de velocidad en vista de corte en planos coincidentes con difusores de ambas alas del edificio (véanse cotas en los planos de planta de velocidad de contorno antes presentados).

Figura 21

Velocidad de contorno en corte a 4.74m de la pared suroeste (ala izquierda)

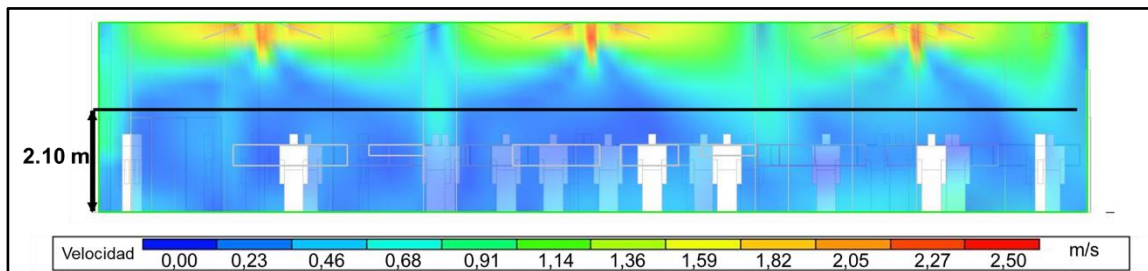
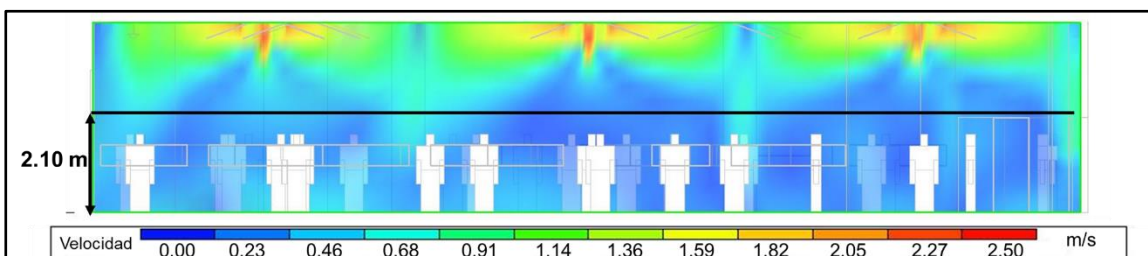


Figura 22

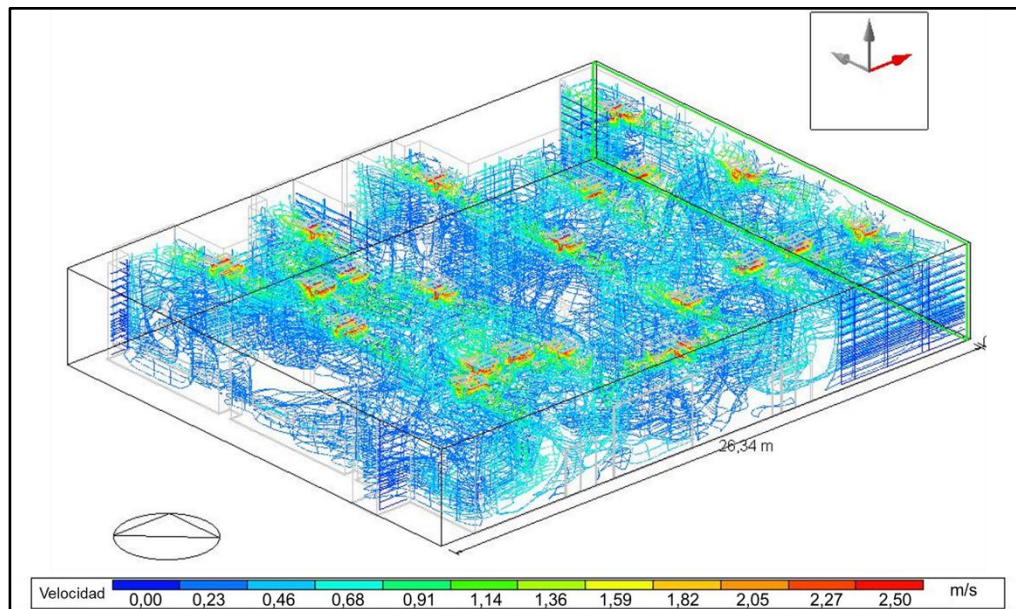
Velocidad de contorno en corte a 10.79m de la pared noreste (ala derecha)



En estas figuras, también se ilustra que el aire primario parte a una alta velocidad de alrededor de 2.5 m/s de la boca de los difusores e inicia a desacelerarse y caer por gravedad hasta alcanzar velocidades de entre 0 m/s y 0.5 m/s cuando ingresan a la zona entre 0.3 m y 2.1 m de altura. En concreto, se ven velocidades inferiores a los 0.25 m/s en la mayor parte del área estudiada y sólo se hallan puntos con temperaturas superiores en los sitios en que los chorros de aire se encuentran. Esta estratificación del aire se puede ilustrar también en la siguiente figura.

Figura 23

Vectores de velocidad a nivel tridimensional



A nivel tridimensional se aprecia que las velocidades del aire están claramente delimitadas, teniendo valores altos (colores verde a rojo) en los niveles más altos del laboratorio y, sobre todo, en las cercanías de los difusores de suministro, en tanto que para alturas de ocupación esta velocidad se reduce a valores entre 0 m/s y 0.25 m/s, excepto en aquellas zonas donde la inducción ejercida por el aire extraído en las cabinas hace que el aire se acelere hasta velocidades entre 0.46

m/s y 0.68 m/s, coincidente con el rango esperado dado el requerimiento de 0.5 m/s en la cara de cabinas.

En concordancia con todo lo anterior, a continuación se resume el cumplimiento de todos los requerimientos identificados:

Tabla 9

Evaluación del cumplimiento de los requisitos identificados

PARÁMETRO	REQUISITO	RESULTADO	EVALUACIÓN
Presurización	De 2.5 Pa a 12.5 Pa entre áreas de menor riesgo a mayor riesgo Presiones manométricas positivas para evitar infiltraciones	De 2 Pa a 8 Pa entre laboratorio y oficinas, pasillos y esclusas. Presión manométrica positiva.	CUMPLE
Ventilación (renovación de aire)	Entre 4 y 10 ACH	13.5 ACH	CUMPLE
Temperatura de bulbo seco del aire	23±2°C	21°C – 24°C	CUMPLE
Ruido	NC entre 35 y 55	<16	CUMPLE
ADPI	Mayor al 80%	Mayor al 90%	CUMPLE
Velocidad de suministro de aire	Máximo 0.25 m/s a una altura de 2.1 m con respecto al nivel del piso en el entorno de las cabinas	Máximo 0.25 m/s en el aire de suministro a una altura de 2.16 m y 1.82 m con respecto al nivel del piso en el entorno de las cabinas	CUMPLE

4. Conclusiones

El presente trabajo expuso la selección de dispositivos de suministro y extracción de aire acondicionado para la aplicación especial de un laboratorio hipotético de la industria del gas y del petróleo situado en el municipio de Barrancabermeja, Santander, mediante la revisión y recopilación de la literatura aplicable para la definición de los requisitos más relevantes en términos de distribución de aire desde la perspectiva del diseño, para luego pasar al modelado en el módulo de CFD del software DesignBuilder y así seleccionar los dispositivos adecuados para garantizar el cumplimiento de los requisitos previamente identificados.

Particularmente, se encontró que para laboratorios se tienen requisitos de: 1) presurización de áreas entre 2.5 Pa y 12.5 Pa para mantener los flujos indeseados de aire (infiltraciones y exfiltraciones) en una dirección que favorezca la seguridad de los ocupantes y mitigue las posibilidades de contaminación cruzada; 2) de ventilación de 4 a 10 ACH para dilución de contaminantes; 3) de temperatura, humedad y distribución del aire para producir un PPD menor al 10%; 4) de ruido con un NC entre 35 y 55; 5) de velocidad del aire suministrado de máximo 0.25 m/s en la zona de ocupación con el fin de no afectar el funcionamiento de dispositivos de extracción focalizada como cabinas.

Así mismo, fue posible desarrollar satisfactoriamente un modelo en software de simulación energética que consideró los aspectos más importantes desde el punto de vista térmico para el laboratorio analizado como cerramientos, clima, locación, actividad, entre otros, y que, además, permitió modelar el fenómeno de distribución de aire que tendría lugar en ese laboratorio al suministrar aire exterior acondicionado para cumplir con los requerimientos establecidos.

También, se halló que la selección de los dispositivos para suministro de aire juegan un papel fundamental en el cumplimiento de los requisitos de seguridad y comodidad del personal

que trabajaría en el laboratorio estudiado a tal punto que sólo mediante su selección adecuada se pudo llegar a resultados satisfactorios en la simulación construida. Y, de hecho, se pudieron utilizar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para establecer la selección óptima de estos dispositivos y para predecir, desde una etapa de diseño, cómo es el comportamiento esperable de la difusión de aire interior en el área atendida: se logró una temperatura uniforme entre 21°C y 24°C, un ADPI proyectado mayor al 90%, que fue verificado también mediante los resultados obtenidos con un PPD menor al 10% en la mayor parte del área atendida y con velocidades bajas de menos de 0.25 m/s en el aire primario circundante a las cabinas de extracción para alturas entre 1.82m y 2.16m.

De esta forma, el presente trabajo ilustra cómo los análisis de CFD pueden ser una herramienta útil a la hora de hacer la selección de dispositivos de suministro y extracción de aire y analizar a profundidad el desempeño de un sistema de aire acondicionado, cosa que, a nivel comercial e industrial no se hace en la actualidad y que, por la naturaleza y especificidad de determinadas aplicaciones como la estudiada, puede resultar indispensable.

A pesar de lo anterior, no obstante, resultará adecuado que futuros autores hagan un análisis concreto para determinar si la aplicación de su interés amerita la ejecución de cálculos y modelos de este tipo, debido a que su costo computacional es relativamente elevado y su tiempo de implementación también lo es.

Por último, como trabajo futuro se contempla la realización de ejercicios de modelado y posterior validación en escenarios reales con mediciones de temperatura y velocidad que permitan evaluar la exactitud de las simulaciones desarrolladas con la metodología propuesta en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Industrial Hygiene Association. (2012). *Laboratory Ventilation*. Virginia: AIHA.

ASHRAE. (2001). *Fundamentals*. ASHRAE.

ASHRAE. (2015). *Laboratory Design Guide. Planning and Operation of Laboratory HVAC Systems*. Atlanta: ASHRAE.

ASHRAE. (2019). *Heating, Ventilating, and Air-conditioning APPLICATIONS*. Atlanta: ASHRAE.

ASHRAE. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. Obtenido de https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2022

ASHRAE. (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Obtenido de ASHRAE: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_55_2023

Bhatia, A. (10 de julio de 2024). *HVAC Design for Oil and Gas Facilities*. Obtenido de <https://www.cedengineering.com/userfiles/M04-014%20-%20HVAC%20Design%20for%20Oil%20and%20Gas%20Facilities%20-%20US.pdf>

Caplan, K. J., & Knutson, G. W. (1982). Influence of room air supply on laboratory hoods. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 738-46.

Cengel, Y. A., & Cimbala, M. J. (2006). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México D.F.: McGraw Hill.

- DiBerardinis, L. J., Baum, J. S., First, M. W., Gatwood, G. T., & Seth, A. K. (2013). *Guidelines for laboratory design health, safety, and environmental considerations*. New Jersey: Wiley.
- Gupta, M. K. (2023). Simulating the Fluid Flow via Ceiling Diffuser Using OpenFOAM. *EVERGREEN*, 404-411.
- Howell, R. H., Coad, W. J., & Sauer, H. J. (2013). *Principles of Heating, Ventilating and Air Conditioning*. Atlanta: ASHRAE.
- ISO. (1994). *ISO 7730. Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. Genève: ISO.
- Khankari, K. (2023). Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis for Design Optimization of a Pharmaceutical Cleanroom. *ASHRAE Transactions*, 429-436.
- Lim, T., Cho, J., & Kim, B. S. (2010). The Influence of Ward Ventilation on Hospital Cross Infection by Varying the Location of Supply and Exhaust Air Diffuser Using CFD. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 259-266.
- Limane, A., Fellouah, H., & Galanis, N. (2018). Three-dimensional OpenFOAM simulation to evaluate the thermal comfort of occupants, indoor air quality and heat losses inside and indoor swimming pool. *Energy & Buildings*, 49-68.
- National Fire Protection Association. (2024). *Code 101 - Life Safety Code*. Quincy: NFPA.
- Norton, T., & Sun, D.-W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 600-620.
- Ordóñez García, A. (2017). *Manual de ayuda DesignBuilder en español*. Sol-Arq.

PRICE INDUSTRIES. (3 de julio de 2024). *Engineering Guide. Air Distribution*. Obtenido de <https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/engineering-guides/air-distribution-engineering-guide.pdf>

PRICE INDUSTRIES. (20 de 12 de 2024). *Performance data SMD/AMD Modular Louvered Face Diffuser*. Obtenido de <https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/catalogs/performance-data/section%20c/smdamd-modular-louvered-face-diffuser-performance-data-metric.pdf>

Wang, L., Li, G., Gao, J., Fang, X., Wang, C., & Xiong, C. (2023). Case Study: Impacts of Air-Conditioner Air Supply Strategy on Thermal Environment and Energy Consumption in Offices Using BES-CFD Co-Simulation. *Sensors*.