

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

1

REDUCCION CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

Autor(es): GERMAN MAURICIO SANCHEZ CARVAJAL
YECIHT ROBERT PALMA PACHECO

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

Director:

Ing. Julián Jaramillo

Doctor en Ingeniería Mecánica

Magister en Ingeniería Termoenergética

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Ingeniería de Refrigeración y Climatización Bucaramanga

2025

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

2

Agradecimientos

Agradecemos a Dios todo poderoso que nos ha dado la fortaleza necesaria para culminar este proyecto monográfico. A nuestros padres hijos y familiares quienes les debemos nuestra vida, subsistencia y todo su apoyo. Agradecemos especialmente a la Universidad Industrial de Santander y a la valiosa orientación, sabiduría y compromiso de sus docentes quienes abrieron sus puertas para ampliar nuestro conocimiento en el área de la refrigeración y climatización

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

3

Tabla de contenido

Introducción.....	13
1 Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 Estado del arte.....	16
2.1 Uso de cortinas de aire en edificios comerciales	16
2.2 Principios físicos y fundamentos de sellado aerodinámico	20
2.3 Modelado CFD y evaluación experimental de eficiencia energética.....	24
3 Marco teórico.....	30
3.1 Coeficiente de Contracción C_c	33
3.2 Coeficiente de descarga C_d	35
3.3 Número de Euler Eu	38
3.4 Número de Froude Fr	39
3.5 Infiltración de aire a través de puertas exteriores	40
3.6 Cortinas de aire	47
3.6.1 Características de desempeño	48
3.6.2 Cálculo de la energía sensible.....	54

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

4

3.6.3	Transferencia de calor.....	55
3.6.4	Eficiencia dinámica E	56
3.6.5	Criterio de eficiencia energética η	57
3.6.6	Eficiencia de confort térmico ocupacional θ	59
3.6.7	Módulo de deflexión.....	60
3.6.8	Coefficiente de Desempeño de Cortina de Aire (COP_c).....	61
3.6.9	Evaluación y Cálculo del Ahorro Energético	63
3.7	Métodos de ensayo y normas.....	67
4	Metodología y resultados.....	69
4.1	Modelización numérica y procedimiento de solución	73
4.2	Condiciones de frontera e iniciales	77
4.3	Discretización	79
4.4	Mallado	80
4.5	Simulación Computacional del Comportamiento del Flujo de Aire.....	81
4.5.1	Caracterización del Flujo de Infiltración en las Puertas de Acceso.....	81
4.5.2	Modelado CFD.....	83
4.6	Evaluación del ahorro energético.....	94
4.6.1	Carga térmica sensible con cortina activa.....	95
4.6.2	Eficiencia y efectividad de sellado	99

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

5

4.6.3	Consumo energético relativo	100
4.6.4	Coefficiente de Desempeño de la Cortina de Aire (COP _{at}).....	101
4.7	Análisis termográfico.....	103
4.8	Análisis de niveles de ruido.....	108
5	Conclusiones:.....	111
6	Recomendaciones:	114
	Referencias Bibliográficas	116

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores del coeficiente de contracción para características de contorno indicadas de manera.....	35
Tabla 2. Características técnicas cortinas de aire.....	101
Tabla 3. Niveles de presión sonora registrados según ubicación dentro del recinto evaluado ...	109

Lista de Ilustraciones

	Pág.
Ilustración 1. Parámetros de contorno para un flujo bidimensional de salida que ilustran la definición del coeficiente de contracción	34
Ilustración 2. Coeficientes de flujo de aire para puertas automáticas.....	43
Ilustración 3. Factores de presión para puertas automáticas.....	44

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

6

Ilustración 4. Efecto chimenea – cortinas de aire instaladas en un espacio sellado refrigerado (verano).....	50
Ilustración 5. Distribución de presión y algunos otros elementos que influyen en el comportamiento de la cortina de aire.....	51
Ilustración 6. Características de un chorro de cortina de aire bajo diferentes diferencias de presión.....	53
Ilustración 7. Modelo Revit oficina Bancaria.....	70
Ilustración 8. Modelo 3D de oficina bancaria.....	71
Ilustración 9. Condiciones de frontera de modelo 3D.	72
Ilustración 10. Solver de AUTODESK – CFD.....	74
Ilustración 11. Advection Scheme	76
Ilustración 12. Escenario 1 puertas abiertas – cortinas de aire en funcionamiento	85
Ilustración 13. Puerta 2 – cortinas de aire en funcionamiento	86
Ilustración 14. Escenario 2 puertas abiertas – sin cortinas de aire en funcionamiento.....	89
Ilustración 15. Escenario 2 puertas abiertas – análisis segunda puerta.....	91
Ilustración 16. Escenario 3 puertas cerradas – sin cortinas de aire.....	92
Ilustración 17. Escenario 3 puertas cerradas.....	93
Ilustración 18. Distribución térmica general del acceso principal	104
Ilustración 19. Identificación de cargas térmicas internas por ocupantes.....	105
Ilustración 20. Trayectoria estable y vertical del chorro de aire frío	106
Ilustración 21. Medición de nivel de presión sonora en zona de trabajo con sonómetro digital	109

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

7

GLOSARIO

Aire acondicionado: Proceso del aire en un local cerrado donde se controlan los parámetros de temperatura, humedad, velocidad y pureza dentro de los límites establecidos.

Calor latente: Calor agregado o eliminado a una sustancia que provoca el cambio de estado de sólido a líquido, de líquido a gaseoso o viceversa; sin cambiar su temperatura.

Calor sensible: Calor agregado o eliminado de una sustancia que se puede cuantificar a través de termómetros.

Carga térmica: Cantidad de calor por remover (enfriamiento), adicionar (calefacción) o ambas.

Cortina de Aire: Dispositivo que utiliza un flujo de aire para crear una barrera entre el interior y el exterior, ayudando a mantener la temperatura y evitar la entrada de polvo y contaminantes.

Flujo de Aire: Movimiento de aire que es impulsado por ventiladores en las cortinas de aire para proporcionar una barrera efectiva.

Eficiencia Energética: es la capacidad de realizar una tarea o proceso utilizando la menor cantidad de energía posible, obteniendo el mismo resultado o beneficio. Esto implica optimizar el uso de recursos energéticos para reducir el desperdicio y minimizar el impacto ambiental, buscando un futuro más sostenible y económicamente viable.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

8

Temperatura de Proyecto: Temperatura específica que se desea mantener en el espacio protegido por la cortina de aire.

Aire de Infiltración: Es el aire exterior que ingresa inadvertidamente a un edificio a través de filtraciones no controladas en la envoltura del edificio. Estas infiltraciones pueden ocurrir a través de grietas, aberturas alrededor de ventanas y puertas, y otros puntos de acceso, especialmente en condiciones de viento. El aire de infiltración puede afectar la eficiencia energética del edificio, ya que introduce aire exterior que puede estar más frío o caliente que el aire interior, lo que a su vez puede alterar la carga de calefacción o refrigeración requerida. Además, puede llevar a problemas de confort y calidad del aire interior. Controlar la infiltración es clave para optimizar el rendimiento de los sistemas de aire acondicionado.

Control de Velocidad: Función en algunos modelos de cortinas de aire que permite ajustar la fuerza del flujo de aire para optimizar el rendimiento y el confort.

Filtros: Elementos que ayudan a captar partículas y contaminantes del aire antes de que ingresen al espacio protegido.

Consumo de Energía: Cantidad de energía utilizada por las cortinas de aire, que puede variar según el modelo y la configuración.

Ruido Operacional: Nivel de sonido producido por el funcionamiento de la cortina de aire, que es un factor para considerar en su instalación en entornos sensibles.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

9

Resumen

Título: REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

Autores: GERMAN MAURICIO SANCHEZ CARVAJAL

YECIHT ROBERT PALMA PACHECO

Descripción:

Nuestro cliente el cual pertenece al sector bancario, debido a los cambios en su nueva imagen corporativa (imagen tipo I'AM) se vio en la necesidad de modificar la arquitectura de sus fachadas en la zona de autoservicio para las nuevas oficinas, como es el caso de la oficina Centro Comercial Mall Plaza Cali. La nueva distribución arquitectónica permite el ingreso de aire exterior no controlado hacia el interior de la oficina, generando esto un aumento aproximado de 3 grados Celsius en la temperatura ambiente al interior de esta. Para contrarrestar lo planteado, se ha hecho necesario aumentar la capacidad y cantidad de los equipos de aire acondicionado instalados en la mayoría de las nuevas oficinas implementadas con la arquitectónica corporativa mencionada.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

10

Con el fin de disminuir los costos del consumo eléctrico de los sistemas hvac que serán implementados en las nuevas oficinas I'AM, propusimos a nuestro cliente la inclusión de equipos de ventilación mecánica tipo **cortina**, los cuales podrán ser instalados sobre los vanos de la entrada principal y dinteles existentes en las zonas de acceso del hall de cajeros de clientes pretendiendo disminuir el ingreso de aire exterior no controlado hacia el interior de la oficina y así poder demostrarle al cliente, la disminución en el consumo eléctrico del sistema hvac instalado en este tipo de oficinas.

Una vez nuestro cliente dio la autorización, procedimos a incluir en nuestro diseño hvac (oficina Centro Comercial Mall Plaza Cali) las cortinas de aire propuestas la cuales debíamos calcular y dimensionar respecto a la altura permitida y medidas de las puertas de ingreso existentes.

El principal resultado que arrojó este estudio, fue poder demostrarle a nuestro cliente que podrá obtener un ahorro anual de **\$ 3.401.800** en el pago del servicio de energía lo podría garantizarle también, un retorno de la inversión a un menor tiempo de lo planeado. Aun cuando este trabajo no se basó fundamentalmente en demostrarle al cliente la disminución de los costos de inversión respecto a la posibilidad de disminuir las capacidades de los equipos de aire a implementar en futuros proyectos, fue claro para nuestro usuario que aparte del ahorro en dinero referente a la disminución del consumo eléctrico, también estaría entre su seguimiento interno demostrar que su costo de inversión en infraestructura disminuiría al momento de implementar en sus instalaciones hvac, equipos tipo cortinas de aire.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

11

Abstract

Title: THERMAL LOAD REDUCTION BY INSTALLING AIR CURTAINS

Author(s): GERMAN MAURICIO SANCHEZ CARVAJAL

YECIHT ROBERT PALMA PACHECO

Description:

Our client, who belongs to the banking sector, due to the changes in its new corporate image, found it necessary to modify the architecture of its facades in the self-service area for the new offices, as is the case of the Shopping Center office. Mall Plaza Cali. The new architectural distribution allows the entry of uncontrolled outside air into the office, generating an approximate increase of 3 degrees Celsius in the ambient temperature inside it.

To counteract the above, it has become necessary to increase the capacity and quantity of air conditioning equipment installed in the majority of the new offices implemented with the aforementioned corporate architecture.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

12

The main result of this study was to demonstrate to our client that they could achieve annual savings of \$3,401,800 in energy service payments, which would also guarantee a return on investment in less time than planned.

Even though our work was not primarily based on demonstrating to the client the reduction in investment costs with respect to the possibility of reducing the capacity of the air conditioning equipment to be implemented in future projects, it was clear to our user that, apart from the monetary savings related to the reduction in electricity consumption, it would also be part of their internal monitoring to demonstrate that their investment cost in infrastructure would decrease when implementing air curtain-type equipment in their HVAC facilities.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

13

Introducción

Nuestro cliente podría disminuir los costos de energía que le genera la implementación e instalación de sistemas de aire acondicionado en sus nuevas oficinas a nivel nacional, mediante la adaptación de cortinas de aire las cuales se podrán ubicar en los dinteles de las zonas de acceso a los cajeros automáticos ya que este tipo de equipos se desarrolló con el fin de impedir el ingreso de aire exterior no controlado hacia el interior de los recintos cerrados.

Un menor ingreso de aire exterior hacia el interior de la oficina reduciría el requerimiento de capacidad de enfriamiento de las zonas para asegurar un confort térmico, por lo que la capacidad de los equipos HVAC seleccionados podría disminuir garantizando así, un ahorro de energía, disminución en el capital de la inversión inicial y costo operativo de los sistemas de climatización por parte de nuestro cliente.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

14

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Disminuir la infiltración de aire exterior no controlado hacia el interior de la oficina bancaria ubicada en el centro comercial Mall Plaza Cali, mediante la implementación de cortinas de aire para garantizar un rango de temperatura de confort entre los 22 ± 1 ° C con el fin de evitar un sobredimensionamiento de las capacidades de los equipos de aire acondicionado a diseñar.

1.2 Objetivos Específicos

Objetivo específico 1: Revisar los cálculos de carga térmica con el fin de determinar si el diseño HVAC planteado por el cliente, cumple la capacidad de enfriamiento requerido en la oficina bancaria ubicada en el centro comercial Mall Plaza Cali utilizando el software de diseño:

- a) Obtener los planos arquitectónicos de la oficina bancaria a revisar
- b) Conocer las condiciones ambientales de la ciudad de Cali durante los últimos 3 meses.
- c) Calcular las cargas latentes y sensibles que este incidiendo en el recinto.
- d) Calcular la carga térmica requerida.
- e) Validar si el sistema de aire propuesto por el diseñador HVAC, es el sistema más apropiado para el acondicionamiento y confort al interior de la oficina bancaria.
- f) Revisar si el tipo de control propuesto por el diseñador HVAC cumple con los requerimientos y necesidades de operación de la oficina.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

15

Objetivo específico 2: Implementar la instalación de cortinas de aire en los dinteles de ingreso a la oficina para conseguir una disminución de la capacidad de carga térmica requerida:

- a) Estimar el flujo de aire exterior que ingresa a la oficina con el fin de seleccionar el tipo de cortina de aire a implementar.
- b) Supervisar la instalación de las cortinas de aire por parte del cliente
- c) Realizar en sitio mediciones termográficas del aire caliente que puedan estar ingresando al interior de la oficina, utilizando para esto, cámaras termográficas de última generación Flir Edge Pro.
- d) Cuantificar la disminución en toneladas de refrigeración que el diseñador HVAC pudo haberse ahorrado con la implementación de las cortinas de aire.
- e) **Objetivo específico 3:** Utilizando el programa de modelación CFD de Autodesk, se desea simular el comportamiento del flujo del aire, distribución de temperaturas interiores y el desempeño energético del recinto cuando se tiene la incidencia de infiltración de corrientes exteriores no controladas. Los siguientes fueron los escenarios de operación real elegidos para validar dicho comportamiento:
 - a) Puertas abiertas con cortinas de aire en operación
 - b) Puertas abiertas sin cortinas de aire en operación
 - c) Puertas cerradas sin cortinas de aire en operación

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

16

Objetivo específico 4: Verificar que los niveles de ruido producidos por las cortinas de aire estén dentro los rangos permitidos de acuerdo con la resolución 0627 del 2006:

- a) Medir los niveles de ruido utilizando para esto un sonómetro como instrumento de medición, con el fin de validar si las condiciones laborales cumplen con la resolución indicada.
- b) Presentar al cliente un informe de resultados de niveles de ruido.

2 Estado del arte

2.1 Uso de cortinas de aire en edificios comerciales

La infiltración de aire a través de puertas en edificaciones de todo tipo es una gran fuente de pérdida de energía. Esto se agudiza en oficinas y edificios comerciales, ya que el flujo continuo de personas mantiene las puertas abiertas y permite el intercambio de aire entre el interior y el exterior.

El uso de cortinas de aire en locales comerciales integra criterios normativos, modelos matemáticos y pruebas experimentales para evidenciar su eficacia ante esta situación. Estas tecnologías son una solución alternativa verificada en lugar de los vestíbulos obligatorios según ASHRAE 90.1. La idea es que la cortina de aire crea una barrera aerodinámica con un chorro de aire a velocidad y ángulos controlados. Este proceso se modela usando las ecuaciones de continuidad y conservación de momento, en donde la capacidad de sellado es función de la razón entre el flujo inducido por la cortina y el de infiltración creado por diferencias de presión externas e internas. La verificación de este principio demuestra que el ahorro energético es

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

17

comparable o superior al que se logra con vestíbulos, pero con menor coste y mayor flexibilidad arquitectónica. (BERNER I. C., 2021)

Como complemento a los métodos convencionales de evaluación de la eficacia de las cortinas de aire en condiciones estacionarias o mediciones puntuales de infiltración, se han propuesto marcos analíticos donde se hace uso de simulaciones anuales detalladas con el software EnergyPlus y datos de modelado CFD. Se presenta una métrica llamada η_B para cuantificar la eficiencia de las cortinas de aire, teniendo en cuenta tanto la disminución de la carga térmica por infiltración como el consumo eléctrico anual del ventilador. (Goubran et al., 2016)

Esta métrica se define matemáticamente mediante la ecuación:

$$\eta_{B^{AC/SD}} = 1 - \frac{E_{AC}}{E_{SD}}$$

Donde E_{AC} hace referencia a la energía que consume el edificio al usar una cortina de aire en la entrada, lo cual incluye el gasto energético del ventilador; y E_{SD} indica el consumo energético del mismo edificio que cuenta solamente con una puerta sencilla, la cual se emplea como escenario de referencia. Esta formulación permite obtener una medida neta del rendimiento energético anual que se puede atribuir a la puesta en marcha de la cortina, incluyendo las consecuencias dinámicas del clima, la periodicidad con que se usan las puertas y el estado operativo del equipo. Usando esta formulación se evidenció, que las cortinas de aire tienen un rendimiento superior a los vestíbulos tradicionales en edificaciones con una gran rotación de

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

18

usuarios y situadas en áreas climáticas donde las temperaturas exteriores son cambiantes. Efectivamente, su análisis reveló que $\eta_{B^{AC}/SD}$ tuvo valores positivos en casi todos los climas simulados, siendo especialmente notoria en construcciones con varios accesos expuestos a la infiltración directa. Esta ventaja se debe a la habilidad de las cortinas de aire para disminuir, de forma constante y controlada, las pérdidas de energía por infiltración. Esto lo hacen sin crear barreras físicas ni limitaciones en el tránsito de personas, lo que es particularmente importante para edificios administrativos, oficinas, instituciones bancarias y otras instalaciones comerciales con un alto flujo. (Goubran et al., 2017)

Las cortinas de aire tienen la capacidad de conservar condiciones térmicas distintas en un mismo espacio interior, lo que facilita que el acondicionamiento térmico se limite únicamente a las áreas ocupadas. Este principio se basa en ecuaciones de transferencia térmica por convección, como $q = hA\Delta T$. En esta fórmula, A representa el área, ΔT es la diferencia de temperatura y h es el coeficiente de convección. Con esta formulación, se puede calcular el flujo de calor en zonas concretas, lo que posibilita la climatización de solo las áreas críticas sin afectar todo el espacio interno. Se utilizó CFD para examinar la correlación entre perfiles de velocidad del chorro y gradientes térmicos internos, encontrando que la cortina de aire tiene el potencial de crear ambientes no homogéneos que permiten el control selectivo de cargas. (Shen et al., 2017)

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

19

Investigaciones de revisión acerca de los modelos de cortinas de aire para la conservación energética indican que se pueden describir con fórmulas matemáticas estas aplicaciones, las cuales posibilitan hacer predicciones sobre su funcionamiento. Se han creado métodos experimentales y analíticos que hacen uso de la ecuación $Q = C_d A \sqrt{2\Delta P/\rho}$, en donde el coeficiente de descarga es C_d , el área de apertura es A , la diferencia de presión es ΔP y la densidad del aire se representa como ρ . La validación de este modelo en ensayos de campo demuestra que las cortinas de aire disminuyen notablemente el flujo de aire exterior en los accesos comerciales, lo cual se traduce directamente en una reducción de las cargas térmicas en los sistemas HVAC. (Shen et al., 2017). Se puede calcular la disminución del consumo energético ligada a la reducción de infiltraciones de aire por medio de un balance térmico simplificado, empleando la expresión $\Delta E = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$. En esta ecuación, \dot{m} representa el caudal másico de aire infiltrado, que se calcula multiplicando la densidad del aire por el caudal volumétrico Q ; C_p es la capacidad calorífica específica del aire; y ΔT es la variación de temperatura entre el interior y el exterior del edificio. Para determinar el valor de Q , se emplea el modelo físico basado en la relación $Q = C_A \cdot A \cdot R_p$, donde C_A es el coeficiente de flujo (dependiente del tipo de puerta y de la presencia o no de dispositivos de sellado), A es el área de

apertura de la puerta, y R_p es un parámetro que representa la raíz cuadrada de la diferencia de presión a través de la abertura, generada por los efectos del viento y de la flotación térmica. (Yuill, 1996).

Esta combinación de expresiones posibilita medir directamente la energía necesaria para acondicionar el aire que entra al recinto a través de las puertas abiertas y, en consecuencia, comparar el efecto energético de diferentes estrategias de control de infiltración, como los vestíbulos o las cortinas de aire. Los resultados de estas comparaciones indican que, si se diseñan apropiadamente, los dos sistemas tienen el potencial de producir reducciones energéticas similares. Sin embargo, las cortinas de aire tienen más beneficios, como la flexibilidad para instalarlas, el ahorro de espacio y una inversión menor en construcción. Por eso son una alternativa especialmente interesante para oficinas y edificios comerciales localizados en áreas urbanas donde no es factible desde el punto de vista normativo o arquitectónico implementar vestíbulos (Cho H, 2010)

2.2 Principios físicos y fundamentos de sellado aerodinámico

Las cortinas de aire tienen como principio el sellado aerodinámico, que consiste en producir un chorro de aire capaz de contrarrestar el flujo natural a través de aberturas tales como las puertas. Este flujo no deseado se origina por diferencias en la temperatura y densidad entre el interior climatizado y el exterior; esto provoca un flujo bidireccional donde el aire caliente sale por arriba y el frío ingresa por abajo, lo cual aumenta las cargas térmicas del sistema HVAC. Para medir este fenómeno, se puede estimar el caudal de aire infiltrado utilizando la fórmula

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

21

$Q = C_d A \sqrt{2\Delta P/\rho}$; de igual manera, cuando existe estratificación térmica, la diferencia de presión puede expresarse como $\Delta P = \int_0^H g \cdot \Delta\rho(z) dz$, donde H es la altura de la abertura, g la aceleración gravitacional y $\Delta\rho(z)$ la diferencia de densidad entre el aire interior y exterior en a partir de la altura z ; La carga térmica relacionada con esta infiltración se puede calcular de la siguiente manera $Q_{infiltración} = \rho \cdot Q \cdot C_p \cdot \Delta T$, donde C_p es la capacidad calorífica específica del aire y ΔT es la diferencia entre las temperaturas interior y el exterior, Esto permite medir de forma cuantitativa el efecto que tienen las cortinas de aire en la disminución del flujo de infiltración y en el ahorro energético del edificio.(van der Maas J, 1992)

La geometría del vano, la velocidad de apertura y cierre y la diferencia de presión entre el interior y el exterior son factores que influyen significativamente en la tasa de infiltración de aire en las puertas automáticas. Estos elementos concuerdan con los criterios establecidos en estudios anteriores, en los cuales se utilizó el coeficiente de descarga para expresar la infiltración donde

$C_d = Q / \frac{A\sqrt{2\Delta P}}{\rho}$; también se establecieron correlaciones entre el uso de la puerta y el caudal

infiltrado, como: $P_u = 0.0098P_h + 1.7541$ y $T_h = 1 - e^{-0.002233P_h}$. Estas relaciones

demuestran que el número de personas por hora aumenta tanto la duración durante la cual la puerta permanece abierta como el flujo de aire no deseado que entra. Simultáneamente, se

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

22

muestran las restricciones de los cierres mecánicos ante flujos transitorios y turbulentos, lo que pone en relieve la relevancia de soluciones como las cortinas de aire. Estas son capaces de disminuir el coeficiente efectivo de flujo y, por ende, la cantidad de infiltración a través del establecimiento de una barrera aerodinámica continua. (Yuill, 1996).

Una cortina de aire será efectiva si el chorro llega al suelo sin ser desviado por las fuerzas de flotación que se generan a partir del gradiente térmico y su diferencial de presión entre ambientes. Para analizar dicha circunstancia, se define el módulo de deflexión (Dm), que establece una relación entre la fuerza de flotación opuesta y el impulso del chorro

$Dm = \frac{\rho_i b V_j^2}{g H_d^2 |\rho_o - \rho_i|}$, Por lo general, tener valores de Dm por encima de 0.6 es suficiente para

garantizar la estabilidad del chorro en el plano vertical y su continuidad. Según este criterio, la transferencia de calor por medio del vano puede estudiarse a partir de la suma de dos componentes fundamentales: una difusiva, que incluye la difusión turbulenta y la conducción térmica; y otra advectiva, vinculada al movimiento del aire que transporta energía.

$\dot{q} = \dot{q}_{adv} + \dot{q}_{dif}$. Estas pérdidas térmicas se contrastan con un caso de referencia en el que no se

usa cortina de aire (\dot{q}_0) a través de dos indicadores principales. La efectividad del sellado, que se

define como $EQ = \dot{q}_0 / \dot{q}$, señala cuántas veces disminuye la fuga de calor a causa del aparato.

Por otro lado $\eta Q = 1 - \dot{q} / \dot{q}_0$ indica la eficacia del sellado y representa el porcentaje de ahorro

de energía alcanzado. Este marco de análisis posibilita la evaluación y cuantificación del

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

23

rendimiento de las cortinas de aire como barreras activas contra la infiltración, lo cual depende directamente de factores físicos como la velocidad del chorro, la altura del vano y las diferencias en densidad. (Costa J. J, 2006)

El sellado aerodinámico producido por cortinas de aire lentas puede llegar a niveles de rendimiento útiles si se regulan correctamente las variables del chorro, el ángulo de inclinación y el grosor de la boquilla de descarga. Se ha comprobado que la operación de estos sistemas en edificios comerciales, el flujo descendente producido por la cortina y una extracción controlada del aire en el recinto contribuyen a limitar la transferencia de contaminantes entre áreas vecinas. Es factible disminuir la infiltración de aire sin acondicionar del exterior si se mantiene el flujo de entrada en rangos mínimos, que aseguran la barrera de aire sin requerir estructuras físicas relacionadas con beneficios no deseados debido a puertas abiertas en oficinas y establecimientos comerciales.

Esta estrategia no solo optimiza la calidad del ambiente interior, sino que además afecta directamente la eficiencia energética del sistema HVAC al reducir las cargas térmicas relacionadas con ganancias no deseadas en locales comerciales y oficinas debido a puertas abiertas. (Viegas, 2021)

El rendimiento de diversas configuraciones de cortinas de aire en orientación horizontal y vertical, analizado a través de simulaciones CFD tridimensionales, ha demostrado que la posición del chorro y su dirección con respecto al área climatizada tienen un impacto significativo en la eficacia del sellado aerodinámico. En particular, los chorros verticales que descienden exhibieron trayectorias más estables y una continuidad más eficaz durante todo el

vano, lo cual ayuda a disminuir el intercambio de calor entre áreas con temperaturas diferentes. En cambio, los chorros horizontales se deformaron a causa de la estratificación térmica, lo cual redujo notablemente su capacidad aislante. (Gonçalves et al., 2012a)

El cálculo técnico de las cortinas de aire con flujo ascendente se puede abordar a través de un modelo que combina la evaluación de los efectos térmicos con el análisis del comportamiento fluido-mecánico del chorro, empleando para ello técnicas matemáticas y físicas. Con el fin de asegurar que el chorro mantenga su trayectoria y actúe como una barrera efectiva contra las presiones transversales, se deben considerar elementos como la altura del vano, el ángulo de descarga y el nivel de presión neutra del edificio para poder determinar el comportamiento producido por el flujo generado. Las pérdidas de calor a través del vano pueden ser calculadas térmicamente con perfiles analíticos de temperatura y velocidad, lo que posibilita determinar un coeficiente de pérdida térmica y definir una medida de eficiencia energética. Este enfoque holístico ofrece una base técnica robusta para la creación y evaluación de cortinas de aire en inmuebles comerciales, lo que simplifica su implementación como dispositivos de sellado aerodinámico y ayuda a optimizar el rendimiento energético en sistemas de climatización. (Sirén, 2002b)

2.3 Modelado CFD y evaluación experimental de eficiencia energética

La simulación numérica posibilita una evaluación exacta del desempeño térmico de una cortina de aire, particularmente al examinar su habilidad para disminuir las pérdidas de energía entre zonas con temperaturas diferentes.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

25

Este estudio identifica dos elementos esenciales en el traspaso de calor a través del vano: uno es difusivo, que tiene que ver con la mezcla turbulenta y la conducción; el otro es adyectivo, vinculado con el flujo de masa de aire. La suma de ambas se expresa como:

$$\dot{q} = \dot{q}_{adv} + \dot{q}_{dif}$$

Donde

$$\dot{q}_{adv} = \rho c_p \int_0^{H_d} u(T - T_{ref}) dy, \dot{q}_{dif} = - \int_0^{H_d} k_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dy$$

Dos métricas que se derivan de los resultados CFD son empleadas para medir el impacto del dispositivo. La eficacia del sellado contrasta las pérdidas de calor con la cortina activa y sin ella, o sea, muestra cuántas veces se ha disminuido la fuga térmica al utilizar el aparato. Una elevada efectividad significa que la barrera de aire está desempeñando su función eficientemente. Adicionalmente, la eficacia del sellado refleja qué porcentaje de energía se logra mantener gracias a la operación de la cortina. Si la eficiencia es del 70%, se ha logrado retener el 70% del calor que de otro modo se habría perdido sin protección. (Costa J. J, 2006)

El concepto de módulo de deflexión (Dm) se incluye, por otra parte, en el análisis. Este es fundamental para garantizar la estabilidad del chorro. Esta cantidad adimensional se entiende como la relación entre el empuje del chorro de aire y las fuerzas de flotación que lo contrarrestan, a causa del gradiente térmico que existe entre los dos espacios. Se ha determinado mediante simulaciones que el chorro mantiene su rumbo hasta el suelo cuando el diferencial de presión llega a una cifra mínima de 0.6, cumpliendo así con su función de sellado. Si no se llega

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

26

a este límite, la cortina se desvía y pierde su efectividad, lo que provoca que el aire exterior pueda pasar. (Costa J. J, 2006)

Estas métricas son útiles en la simulación porque posibilitan prever cómo se comportará térmicamente el sistema, mejorar los parámetros de funcionamiento como son la velocidad del chorro y la forma del dispositivo, y extender los resultados a situaciones reales de operación en edificios con climatización.

Un enfoque integrado une simulaciones CFD en 3D con modelado energético en EnergyPlus para medir el efecto que tiene el empleo de cortinas de aire sobre la energía consumida por edificios comerciales. El método se basa en un modelado aerodinámico minucioso del chorro producido por la cortina, teniendo en cuenta cambios en el ángulo de descarga, la velocidad y la geometría del aparato, con el objetivo de medir su capacidad para sellar en diferentes situaciones de presión. A partir de estos resultados se calcula el caudal infiltrado en cada configuración utilizando la expresión: $Q = C_d \cdot A \cdot \frac{\sqrt{2\Delta P}}{\rho}$; donde C_d es el coeficiente de descarga que se obtiene

por medio de simulaciones CFD, A representa el área de la abertura y ΔP es la diferencia entre la presión exterior e interior. Posteriormente, a través de la relación $\dot{q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})$, el caudal resultante se convierte en carga térmica. (Goubran et al., 2017)

Teniendo a $\dot{m} = \rho \cdot Q$, se posibilita el hecho de incluir los impactos de la infiltración de manera directa en el modelo energético de EnergyPlus. Asimismo, se incorporan perfiles de uso reales

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

27

extraídos de investigaciones de campo acerca del comportamiento de las puertas automáticas. Esto posibilita la modificación dinámica de los períodos de apertura y, por consiguiente, de los flujos de aire relacionados. Los hallazgos de las simulaciones sugieren que, si se emplean correctamente cortinas de aire, es posible disminuir considerablemente las pérdidas térmicas por infiltración. Esto permitiría obtener ahorros relevantes en los sistemas HVAC, sobre todo cuando las puertas son abiertas con frecuencia. (Goubran, 2016)

Se ha comprobado, gracias a las simulaciones CFD tridimensionales que se han utilizado para investigar la conducta de cortinas de aire compuestas, que el sentido del chorro afecta significativamente tanto a la estabilidad del flujo como a la eficiencia del sellado aerodinámico en aberturas verticales. Al mantener estables variables como el grosor del chorro de aire, la separación entre boquillas de descarga y la velocidad de inyección (15 m/s a una altura promedio de 3m) y cambiar solamente los ángulos de descarga de los jets, se puede apreciar cómo cambios mínimos en la dirección del flujo alteran notablemente las rutas internas del aire, creando patrones circulatorios que inciden en la capacidad de la cortina para resistir la infiltración. El modelo de turbulencia realizable $k-\epsilon$ se utilizó para identificar que algunas combinaciones angulares, en particular las que tienen chorros en direcciones contrarias, crean discontinuidades en forma de "X" y alteran la continuidad del flujo descendente, lo que facilita el ingreso de aire desde el exterior. Por otro lado, las configuraciones en las que ambos chorros apuntan hacia el exterior tienen líneas de corriente más coherentes, una distribución de presión en la zona de impacto más beneficiosa y un espacio mejor protegido, disminuyendo el consumo energético del sistema HVAC; esto se aplica mayormente en oficinas y otros lugares de comercio. Estos

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

28

hallazgos, aunque derivados de un contexto de control de humo, resultan directamente aplicables a la reducción de carga térmica en edificaciones climatizadas, ya que permiten optimizar la capacidad de la cortina de aire para actuar como barrera contra la infiltración, lo que contribuye a mejorar la eficiencia. (Zhou et al., 2021)

Se observan diferencias significativas en la capacidad de las cortinas de aire que están instaladas horizontalmente y las que están dispuestas en dirección vertical descendente para restringir el intercambio de aire entre espacios con temperaturas diferentes. Los modelos numéricos tridimensionales demuestran que los chorros verticales, al moverse de arriba hacia abajo y beneficiarse del efecto de la gravedad, suelen seguir una trayectoria más constante y cubrir continuamente el vano de la puerta. Esto se traduce en una mejor eficacia para controlar el flujo de aire. La estabilidad del chorro posibilita la creación de una barrera aerodinámica más homogénea, lo que disminuye de manera importante el volumen de aire que pasa a través de la abertura mientras está abierta. (Gonçalves et al., 2012a)

Lo anterior provoca que el chorro se curve y se vuelva menos efectivo, particularmente en la parte media del vano. Este fenómeno, también llamado estratificación o efecto de flotación térmica, obstaculiza la continuidad del flujo e impide que se genere una barrera duradera, lo que permite el paso de aire frío o caliente dependiendo de la dirección del gradiente térmico. Por lo tanto, el rendimiento de las cortinas horizontales se ve restringido y su habilidad para disminuir las cargas térmicas relacionadas con la infiltración se reduce significativamente en comparación con las configuraciones verticales. Esta diferencia cobra especial relevancia en edificios de uso comercial u oficinas con accesos de alto tránsito, donde el control del intercambio de aire es

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

29

esencial para garantizar la eficiencia energética del sistema de climatización. (Gonçalves et al., 2012a)

La evaluación del impacto energético de las cortinas de aire puede abordarse de manera más precisa mediante un enfoque dinámico que considere el comportamiento real del edificio a lo largo de un año completo. Para ello, se ha definido un índice de eficiencia energética global, representado por la expresión $\eta_B = 1 - \frac{E_{AC}}{E_{SD}}$ corresponde al consumo total de energía del edificio

cuando se utiliza una cortina de aire, incluyendo el gasto eléctrico de su ventilador, y E_{SD} representa el consumo del mismo edificio operando con una puerta simple sin ningún dispositivo de control de infiltración. Esta formulación permite cuantificar con mayor realismo la efectividad neta del sistema, al integrar simultáneamente la energía térmica que se deja de consumir gracias a la reducción de infiltración y la energía eléctrica adicional requerida para operar el equipo (Goubran et al., 2017)

El análisis se lleva a cabo mediante simulaciones horarias de energía que emplean un modelo integral del edificio en EnergyPlus. Esto posibilita capturar el efecto combinado de variables como la temperatura exterior, la frecuencia con que se abren las puertas, el número de accesos expuestos al clima y los términos para activar el sistema. Este método, a diferencia de otros que solo tienen en cuenta la disminución del caudal de infiltración bajo circunstancias estáticas, muestra el funcionamiento real del sistema en situaciones climáticas cambiantes y con patrones de uso dinámico.

Cuando este indicador se utiliza en construcciones con diferentes grados de exposición a la infiltración, se demuestra que las cortinas de aire no solo reducen considerablemente las pérdidas térmicas, sino que su efecto beneficioso sobre el consumo anual puede ser mayor que el de otras soluciones como los vestíbulos, especialmente en edificios con acceso múltiple y elevada rotación de personas. Esta metodología posibilita determinar criterios de comparación precisos para elegir estrategias activas o pasivas de control en proyectos cuyo objetivo es optimizar la eficiencia energética del sector terciario. (Goubran et al., 2017).

3 Marco teórico

Para comprender mejor esta situación el estudio del flujo de aire a través de aberturas grandes, como las puertas en los edificios, se suele estudiar con modelos simplificados tomados de los fundamentos de la mecánica de fluidos. En estos análisis se considera al aire como un fluido incompresible, con densidad constante y sin efectos de viscosidad, además de que se asume que el sistema opera en un régimen estable. Estas condiciones permiten aplicar de forma directa la ecuación de continuidad y el teorema de Bernoulli a los dos lados de la abertura; esto permite representar cómo el movimiento del aire se genera principalmente por las diferencias de presión que existen entre el interior y el exterior del edificio.

En este contexto, se considera que el flujo entre áreas es resultado directo de las diferencias de presión a cada lado de la abertura. La relación hidrostática es el punto de partida, y establece que la densidad y la gravedad son los factores que determinan cómo varía la presión con respecto a la altura. (van der Maas J, 1992) Esto se expresa como:

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

31

$$\frac{dz}{dp} = -\rho g$$

Al integrar esta expresión se obtiene que la presión a una altura z se calcula como:

$$p = p_0 - g \int_0^z \rho dz$$

Esto significa que el equilibrio solo se logra cuando la presión y la densidad cambian de forma coherente en cada plano horizontal. (Goubran, 2016) La ecuación de continuidad, además, garantiza que el equilibrio de masas permanezca constante en todo momento. (van der Maas J, 1992) Se puede expresar en su forma más sencilla como:

$$\nabla \cdot u = 0$$

En estas condiciones, se pueden establecer las ecuaciones de movimiento que determinan la conducta del fluido. La dinámica se representa por medio de la segunda ley de Newton al movimiento de una partícula fluida cuando la gravedad está en acción. Así, se logra la expresión:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \rho g + F(\mu)$$

En la cual el primer término es el gradiente de presión, el segundo la fuerza de la gravedad y el tercero los efectos de la viscosidad (van der Maas J, 1992)

En situaciones donde las fuerzas viscosas pueden despreciarse, la ecuación se simplifica a la forma conocida como ecuaciones de Euler:

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

32

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \rho g$$

Para poder diferenciar entre las perturbaciones dinámicas y las contribuciones de equilibrio, se dividen la presión y la densidad en componentes de referencia y desviaciones: $p = p_0 + p'$ y

$\rho = \rho_0 + \rho'$. Al descomponer de esta manera y utilizar la aproximación de Boussinesq, se

mantienen las fluctuaciones en la densidad únicamente en el término de flotación. Por lo tanto, la ecuación queda como sigue:

$$\frac{Dt}{Du} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p' + \frac{\rho'}{\rho_0} g$$

Esta formulación posibilita que, en la mayor parte de los términos, se considere constante la densidad, a excepción del término relacionado con la fuerza de flotación. Esto es fundamental para caracterizar fenómenos como las transferencias bidireccionales debido a diferencias de temperatura en una puerta abierta. (van der Maas J, 1992)

El principio de Bernoulli, que vincula la energía cinética, la de presión y la potencial, se obtiene al integrar la ecuación de Euler a lo largo de una línea de corriente:

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho u^2 = cte$$

Comparando dos puntos dentro del mismo flujo, la relación se expresa como:

$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho u_2^2$$

Cuando las pérdidas de energía por fricción no son despreciables, se incorpora un término adicional Δp_f , dando lugar a la forma más general: (Goubran, 2016)

$$p_2 - p_1 + \frac{1}{2}\rho(u_2^2 - u_1^2) + \rho g(z_2 - z_1) + \Delta p_f = 0$$

3.1 Coeficiente de Contracción C_c

Cuando un fluido pasa a través de un orificio, se genera un chorro que, en la realidad, no conserva las mismas dimensiones que la apertura inicial. El chorro, en cambio, se contrae, lo que hace que alcance una superficie menor a la del orificio. Se define el coeficiente de contracción (C_c) para medir cuantitativamente este fenómeno, que relaciona el área geométrica del orificio con la mínima área efectiva del chorro, según la siguiente fórmula:

$$C_c = A_{\text{orificio}} / A_{\text{chorro}}$$

La magnitud de C_c depende de la geometría de la abertura, en particular del ángulo β de los bordes y de la relación entre diámetros b/B , siendo b el diámetro del orificio y B el diámetro del conducto. Un resultado clásico, atribuido a Kirchhoff, señala que para un orificio plano con ángulo recto ($\beta = 90^\circ$) el valor teórico de este coeficiente es:

$$C_c = \frac{\pi}{\pi + 2\pi} \approx 0.611$$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

34

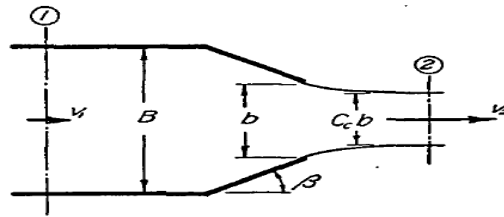


Ilustración 1. Parámetros de contorno para un flujo bidimensional de salida que ilustran la definición del coeficiente de contracción

Nota: tomado de AIR FLOW THROUGH LARGE OPENINGS IN BUILDINGS – editado por J. van der Maas LESO-PB, EPFL, CH 1015 Lausanne, Suiza – 1992

Este valor se usa como un parámetro de referencia para el análisis. Los resultados experimentales que corroboran esta tendencia se muestran en la Tabla 2: si el borde tiene un ángulo inferior a 90° , el coeficiente crece, lo cual quiere decir que la contracción es menos acentuada; por otro lado, para ángulos superiores a 90° , el valor de C_c baja, lo que señala una contracción más intensa del chorro. Asimismo, cuando la relación $\frac{b}{B}$ se aproxima a 1, el coeficiente también tiende a 1, lo que significa que no hay más contracción porque el orificio ocupa toda la sección. (van der Maas J, 1992)

b/B	$\beta=45^\circ$	$\beta=90^\circ$	$\beta=135^\circ$	$\beta=180^\circ$
0.0	0.746	0.611	0.537	0.500
0.5	0.752	0.644	0.599	0.586
0.7	0.768	0.687	0.652	0.646
0.9	0.829	0.781	0.761	0.760
1	1	1	1	1

Tabla 1. Valores del coeficiente de contracción para características de contorno indicadas de manera

Nota: tomado de AIR FLOW THROUGH LARGE OPENINGS IN BUILDINGS – editado por J. van der Maas LESO-PB, EPFL, CH 1015 Lausanne, Suiza – 1992

3.2 Coeficiente de descarga C_d

Facilita la comparación entre el caudal ideal que se espera teóricamente y el caudal real que fluye a través de un orificio. La relación se logra usando al mismo tiempo la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad.

Primero, se toma en cuenta el balance energético entre dos partes del flujo. Utilizando Bernoulli, la diferencia de presiones entre el ingreso y la salida se relaciona con la fluctuación de la energía cinética:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2)$$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

36

Donde ρ es la densidad del fluido, u_1 se refiere a la velocidad de entrada y u_2 a la velocidad de salida. Esta expresión ilustra que la disminución de presión resulta directamente en un incremento de la velocidad del chorro que emerge del orificio.

Además, está la ecuación de continuidad, que garantiza que el flujo entrante y el flujo saliente se mantienen. El caudal puede expresarse como:

$$Q = u_1 B = u_2 C_c b$$

donde B representa la dimensión de entrada, b la dimensión del orificio y C_c el coeficiente de contracción, que corrige el área efectiva de salida considerando que el chorro se disminuye al pasar por el borde. El caudal está vinculado con la geometría de la apertura y las velocidades del fluido. (van der Maas J, 1992)

Se define el coeficiente de descarga como la relación que existe entre el caudal real y el ideal (que se obtendría sin pérdidas de energía).

$$C_d = \frac{Q/b}{\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}}$$

Esta forma muestra que C_d está determinada por el cociente entre el caudal medido y la raíz

cuadrada de la diferencia de presión normalizada por la densidad. Basándose en esta definición, se puede desarrollar una expresión que vincula el coeficiente de contracción con el coeficiente de descarga y la relación entre el orificio y el conducto desde un punto de vista geométrico.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

37

$$C_d = \frac{C_e}{\sqrt{1 - C_e^2 \left(\frac{b}{B}\right)^2}}$$

Esta ecuación demuestra que, a medida que la contracción del chorro es más grande (menor C_e), mayor será la diferencia entre el caudal real y el ideal, por ende la corrección introducida por C_d resulta más importante.

Un enfoque distinto para determinar el coeficiente de descarga propone que este se puede estimar mediante un promedio ponderado basado en el tiempo, tomando en cuenta las diferentes fases operativas de una abertura dinámica, como una puerta automática. En lugar de asumir un valor constante de C_D para todo el ciclo, se propone calcular un valor medio efectivo que refleje los cambios en las condiciones de flujo durante las fases de apertura, cruce, cierre e inactividad. (Song L, 2023)

Este procedimiento es representado por la expresión:

$$C_{D,ave} = \frac{C_{D,a}a + C_{D,b}b + C_{D,c}c + C_{D,d}d}{a + b + c + d}$$

$C_{D,a}$, $C_{D,b}$, $C_{D,c}$, $C_{D,d}$, son coeficientes de descarga del orificio en cada fase del ciclo:

a: apertura,

b: cruce de personas (puerta abierta),

c: cierre,

d: fase de puerta cerrada (aunque puede haber fugas).

a, b, c, d duración de cada fase (factores de denominador)

3.3 Número de Euler *Eu*

Es un parámetro adimensional que permite describir la relación entre las fuerzas de presión y las fuerzas inerciales dentro de un flujo. Se considera el caso específico de un flujo estacionario e irrotacional, donde la única fuerza responsable de la aceleración del fluido es el gradiente de presión. Es posible examinar cómo otros factores, por ejemplo la viscosidad o la gravedad, afectan el cambio del patrón de flujo a través de esta situación.

El parámetro central de este análisis es la razón adimensional entre la energía cinética del flujo por unidad de volumen y la diferencia de presión es el parámetro principal de este estudio, que se expresa como:

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho u^2}$$

Δp es la diferencia de presión entre dos puntos del sistema, ρ es la densidad del fluido y u es una velocidad característica. Esta relación puede ser entendida como la proporción de una fuerza típica aceleradora, $\Delta p/L$, y una fuerza inercial típica, $\rho u^2/2L$, siendo L una longitud de referencia. Este cociente se mantiene constante siempre que el flujo esté controlado solo por las presiones. Sin embargo, cuando otras fuerzas entran en juego —como la gravedad que introduce

flotación, o la viscosidad que genera disipación—, esta constancia se pierde y se hace necesario definir un parámetro generalizado. (Goubran, 2016).

A partir de estas definiciones, el número de Euler se expresa en términos matemáticos como:

$$Eu = \frac{u}{\sqrt{2\Delta p/\rho}}$$

3.4 Número de Froude Fr

Es una relación adimensional que sirve para comparar dos efectos principales en el movimiento de los fluidos; la inercia asociada con la velocidad de desplazamiento del fluido y la acción de la gravedad que tiende a afectar cómo las superficies libres se comportan. (Munson & Rothmayer, 2013)

Matemáticamente, se define de la siguiente forma:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Siendo V es la velocidad del flujo, g la aceleración de la gravedad y L una longitud representativa del problema, como la profundidad de un canal o del diámetro de un orificio. Cuando $Fr < 1$, la gravedad domina; cuando $Fr > 1$, la inercia es mayor; cuando $Fr = 1$, ambas fuerzas están equilibradas. Para flujos en los que hay diferencia de densidades (como en la ventilación por flotación), se utiliza una gravedad reducida:

$$g' = g \cdot \frac{\rho'}{\rho_0}$$

y se redefine el número de Froude como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g'L}}$$

3.5 Infiltración de aire a través de puertas exteriores

La infiltración de aire por medio de las puertas exteriores en los edificios comerciales y de servicios constituye una vía importante de intercambio no deseado entre el interior del edificio y el entorno exterior, lo que tiene un impacto directo sobre el consumo energético y las condiciones internas. La clase de puerta, la frecuencia con que se usa, el tipo de recinto al que da acceso, la velocidad del aire y la presión diferencial entre el exterior y el interior son los factores que determinan en mayor medida cuánta cantidad de aire se filtra. En casas o construcciones pequeñas en las que las puertas se abren de manera esporádica, el escape de aire puede calcularse según la presencia de fisuras entre la hoja y el marco de la puerta, pues esas rendijas permiten que el aire fluya constantemente, aun cuando la puerta está cerrada. El volumen de aire infiltrado aumenta, no obstante, conforme la puerta se abre y cierra con mayor frecuencia, particularmente en entradas donde no hay barreras físicas o aerodinámicas. Para estos casos de uso habitual, es aconsejable poner vestíbulos o puertas giratorias, que funcionan como elementos intermedios para reducir la entrada directa de aire del exterior. (ASHRAE, 2009)

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

41

Particularmente críticas son las fugas de aire que ocurren a través de puertas automáticas, ya sean basculantes, abatibles, corredizas o giratorias. Estas se emplean frecuentemente en lugares con un gran tránsito de personas o en zonas de carga y descarga ya sea en centros comerciales, hospitales o almacenes. Debido a sus características de operación, este tipo de puertas se mantienen abiertas por intervalos de tiempo más largos que las puertas manuales. Además, si se utilizan en pares (una en el interior y otra en el exterior), como es de común uso en vestíbulos, pueden surgir coincidencias en los ciclos de apertura que disminuyen la efectividad del aislamiento entre el ambiente interior y el exterior. Incluso es posible que, aunque solo una persona pase a la vez, puede existir un lapso de tiempo en el que ambas puertas permanecen abiertas simultáneamente, permitiendo la libre entrada de aire. Por este motivo, es fundamental que durante el diseño del sistema de climatización se tenga en cuenta de manera explícita el efecto de estas fugas, puesto que pueden representar una carga térmica importante en las áreas cercanas al acceso. (ASHRAE, 2009)

Para cuantificar esta infiltración, se utiliza un modelo propuesto por ASHRAE a partir del proyecto RP-763, que define un coeficiente de flujo global para puertas automáticas. Este coeficiente considera tanto el área de apertura como la fracción de tiempo en la que la puerta está abierta, la frecuencia de uso medida como el número de personas que atraviesan la puerta por hora, y la diferencia de presión entre el interior y el exterior. (Yuill, 1996)

Para medir estas infiltraciones, se utiliza un modelo que propone un coeficiente de flujo global para puertas automáticas. Este coeficiente tiene en cuenta la sección de apertura y el tiempo que

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

42

permanece abierta la puerta, es decir, la frecuencia de uso, que se mide por la cantidad de personas que pasan a través de ella cada hora; así como también la diferencia de presión entre el interior y el exterior. La diferencia de presión Δp al igual que el desempeño de las cortinas dependen de varios factores que inciden tales como: el viento que incide sobre la fachada, el efecto chimenea causado por diferencias de temperatura entre el aire interior y el aire exterior al igual que las condiciones de operación del sistema de ventilación del edificio (por ejemplo, si está presurizado o no). Por lo tanto, este modelo incluye elementos operativos y climáticos, lo que posibilita calcular de manera más realista la cantidad de aire que pasa por las puertas automáticas. Este caudal, en la práctica, debe incluirse en el balance térmico del edificio porque supone una carga directa para el sistema HVAC, sobre todo en construcciones con accesos principales muy frecuentados. (Yuill, 1996)

Para determinar el caudal medio de aire que pasa por una puerta automática, deben tenerse en cuenta el área de apertura de la puerta, la diferencia de presión entre el interior y el exterior del edificio, el coeficiente de descarga cuando la puerta está abierta y cuánto tiempo está abierta. La dificultad para determinar este coeficiente radica en que su valor cambia de manera continua mientras dura el ciclo de apertura y cierre de la puerta. (ASHRAE, 2009).

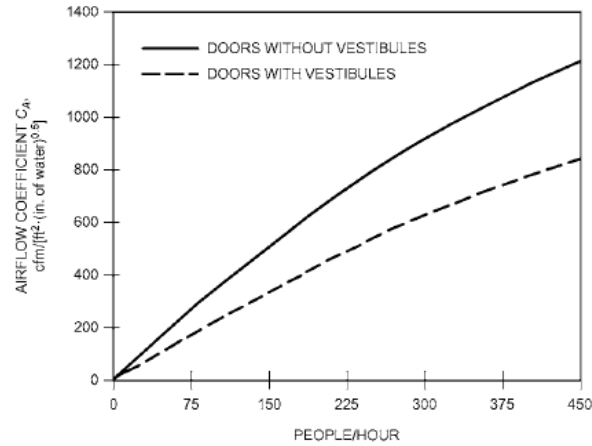


Ilustración 2. Coeficientes de flujo de aire para puertas automáticas

Nota: tomado de ASHRAE HANDBOOK OF FUNDAMENTALS – Atlanta 2009

Con el fin de facilitar el cálculo del flujo de aire a través de puertas automáticas, se desarrolló un enfoque gráfico representado en la Ilustración 2, el cual permite simplificar el cálculo del flujo de aire por medio de puertas automáticas. Este método permite vincular directamente la cantidad de personas que cruzan la puerta cada hora con un coeficiente global del flujo de aire.. Esta figura unifica el comportamiento dinámico de las puertas automáticas en un solo valor funcional, lo que facilita el análisis para diferentes grados de uso. Este coeficiente debe ser multiplicado por el área de apertura efectiva de la puerta y por la raíz cuadrada de la diferencia de presión entre el interior y el exterior en el lugar del acceso para poder calcular el caudal medio de aire que atraviesa la puerta.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

44

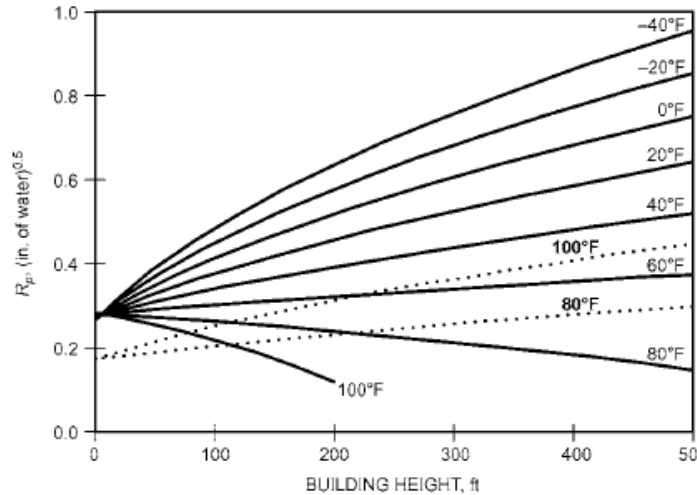


Ilustración 3. Factores de presión para puertas automáticas

Nota: tomado de ASHRAE HANDBOOK OF FUNDAMENTALS – Atlanta 2009

La Ilustración 3 muestra la variación del factor de presión R_p en relación con la altura del edificio a diferentes temperaturas exteriores. Este factor R_p es la raíz cuadrada de la diferencia de presión total que mueve el flujo de aire a través de una puerta automática, expresado como $(in. of water)^{0.5}$. El eje horizontal tiene la altura del edificio (en pies), y el valor de R_p el eje vertical; cada curva se relaciona con una temperatura exterior específica, desde $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ hasta $100\text{ }^{\circ}\text{F}$. Las líneas punteadas indican temperaturas cálidas ($80\text{ }^{\circ}\text{F}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{F}$), en las que el flujo de aire tiende a salir del edificio (flujo hacia el exterior). Estas curvas están ubicadas en la parte inferior del gráfico porque, bajo estas condiciones, los coeficientes de presión del viento en la

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

45

fachada opuesta al viento (por donde escapa el aire) son inferiores que en la cara frontal, lo que reduce el valor neto de presión impulsora. (ASHRAE, 2007)

De acuerdo con esto se han planteado dos métodos prácticos para estimar el volumen de aire que pasa por una puerta automática. El primero se basa en un método simplificado que permite conseguir directamente un valor de diseño para el parámetro R_p , el cual representa la raíz cuadrada de la diferencia de presión entre el interior y el exterior en la zona de la puerta, este valor puede seleccionarse a partir de la Figura 4. El segundo método, en cambio, exige un análisis más detallado, ya que implica calcular de forma explícita las presiones que actúan sobre la envolvente del edificio para luego determinar la presión neta responsable del flujo de aire a través del acceso. (ASHRAE, 2009).

Método 1.

$$Q = C_A A R_p$$

donde:

- Q = caudal de aire, en pies cúbicos por minuto (cfm)
- C_A = coeficiente de flujo de aire tomado de la Figura 3, en $cfm/[ft^2 \cdot (in. \text{ of water})^{0.5}]$
- A = área de apertura de la puerta, en pies cuadrados (ft²)
- R_p = factor de presión tomado de la Figura 4, en $(in. \text{ of water})^{0.5}$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

46

Método 2.

$$Q = C_A A \sqrt{\Delta p}$$

donde:

- Q = caudal de aire, en cfm
- C_A = coeficiente de flujo de aire tomado de la Figura 3, en en $cfm/[ft^2 \cdot (in. \text{ of water})^{0.5}]$
- A = área de apertura de la puerta, en pies cuadrados (ft^2)
- Δp = diferencia de presión a través de la puerta, en pulgadas de columna de agua

Para calcular Δp , es necesario de manera independiente calcular por separado la presión que se debe al efecto chimenea y la presión que genera el viento. Se supone que no hay interacción entre estos dos efectos naturales para lograr el mayor valor posible de la diferencia de presión a través de la puerta. (ASHRAE, 2009)

Por lo tanto, la diferencia de presión se determina como:

$$\Delta p = p_w - \Delta p_s$$

donde:

- p_w = presión inducida por el viento en la superficie, respecto a la presión estática, en pulgadas de columna de agua
- Δp_s = presión ocasionada por el efecto chimenea, en pulgadas de columna de agua

Nota: El signo - / + en la formula, depende del nivel de presión neutra.

3.6 Cortinas de aire

Una cortina de aire consiste en un flujo de aire en movimiento que se dirige hacia abajo a través de una puerta abierta o una abertura semejante. Este flujo se produce mediante uno o varios ventiladores que generalmente se ubican en la parte alta de la entrada, sin embargo, a veces pueden instalarse en la parte lateral, en ambos lados o en otra zona de la abertura. Este tipo de configuración posibilita que la salida de aire climatizado del interior del edificio se reduzca al mínimo, funcionando de manera similar a una puerta física. Además, actúa como una barrera que evita el ingreso de insectos, lluvia y polvo del exterior, incluso en condiciones de viento que intenten atravesar la entrada abierta. (Bleier P. Frank, 1997)

La elección correcta de una cortina de aire no puede basarse únicamente en las especificaciones de los catálogos comerciales. Es necesario llevar a cabo un análisis económico sólido y una investigación técnica detallada que apoyen la decisión. Esto es especialmente relevante cuando se trata de aplicaciones no convencionales, como aperturas a gran escala o procesos industriales específicos, donde hay poca información validada en el campo o respaldada por normas. En este

sentido, sucede que los fabricantes no suelen ofrecer parámetros cuantitativos suficientes para un diseño adecuado, lo que puede llevar en instalaciones mal dimensionadas que no garantizan la protección efectiva de las aberturas. (Zhivov & Strongin, 2024)

En este contexto, se presentan una serie de criterios de eficiencia adimensionales que posibilitan la descripción precisa y matemática del comportamiento de las cortinas de aire. (Zhivov & Strongin, 2024)

1. Eficiencia dinámica (E)
2. Criterio de eficiencia energética (η)
3. Eficiencia de confort térmico ocupacional (θ)

3.6.1 Características de desempeño

El análisis de dos elementos principales permite estudiar el rendimiento eficaz de una cortina de aire. Por un lado, la desviación del chorro de aire que emite la cortina cuando se enfrenta a corrientes externas (viento cruzado) y, por otro lado, la profundidad con que ese chorro es capaz de penetrar en aquel flujo externo. Además, se tiene que calcular cuánto aire del exterior es capaz de infiltrarse al interior del edificio. El análisis de estas variables se basa en diversos elementos, como el nivel de hermeticidad del recubrimiento del edificio y las condiciones climáticas, tanto interiores como exteriores. (Alamdari, 1997)

El funcionamiento isotérmico de las cortinas de aire se refiere a condiciones donde no existe diferencia de temperatura entre el aire interior, el aire ambiente exterior y el aire suministrado

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

49

por el dispositivo. En condiciones operativas isotérmicas, aunque el chorro de una cortina de aire bien diseñada sin retorno de piso alcanza el piso cuando el recinto está sellado, permite que algo de aire exterior entre en el espacio. En situaciones prácticas, las condiciones operativas no son isotérmicas (es decir, existe una diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio). Figura 5, en tales situaciones, además de la diferencia de presión generada por el impulso del chorro de la cortina de aire a través de la abertura, también existe una diferencia de presión debida al efecto chimenea. El efecto chimenea resulta de las diferencias de densidad del aire a ambos lados de la cortina de aire, lo cual da lugar a una variación lineal de la presión desde la parte inferior hasta la parte superior de la puerta. (Alamdari, 1997)

La presión neta a través de la cortina de aire puede, por lo tanto, expresarse como:

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_s$$

Donde:

- ΔP = diferencia de presión neta a través de la cortina de aire
- ΔP_a = diferencia de presión generada por el propio chorro de la cortina de aire
- ΔP_s = diferencia de presión debida al efecto chimenea

El flujo de aire a través de aberturas grandes, como puertas, suele ser irregular a lo largo de su altura, con diferencias marcadas entre la parte superior y la inferior. Este patrón bidireccional se

produce dos causas principales: unas generan flujos estables, mientras otras causan cambios debido a las fluctuaciones en el entorno. (Allard F & Utsumi Y, 1985)

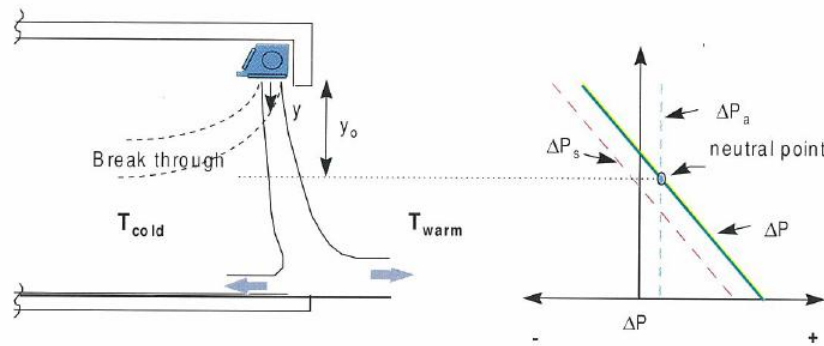


Ilustración 4. Efecto chimenea – cortinas de aire instaladas en un espacio sellado refrigerado (verano)

Nota: tomado de Air Curtains Commercial Applications – Alamdari F – BSIRA 1997

Las diferencias de densidad del aire, la velocidad media del viento, los sistemas de calefacción o ventilación y las capas límite en cavidades son ejemplos de factores que generan flujos estables. Por otro lado, los flujos variables surgen por alteraciones de presión causadas por la turbulencia del viento exterior o por la geometría del edificio. Cuando la diferencia de presión media es baja, estas oscilaciones pueden aumentar significativamente el intercambio de aire, incluso por encima del esperado condiciones estacionarias. (Allard F & Utsumi Y, 1985)

Para dimensionar y seleccionar una cortina de aire es necesario conocer la diferencia de presión con la puerta cerrada. Esta se debe a tres factores: la diferencia de densidad entre el aire interior y exterior, la presión del viento en las fachadas y los efectos de la ventilación. Aunque suelen

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

51

considerarse por separado, si no se incluyen las fugas de la envolvente, los resultados son inexactos y generan incertidumbre en el diseño.

En la Ilustración 4 se muestra que, si se ignora la variación de la temperatura interior en sentido vertical, la diferencia de presión en el exterior del edificio es lineal con respecto a la altura. Esta “presión aerostática” se describe mediante:

$$\Delta p_s(z) = p_i(z) - p_o(z) = (\rho_o - \rho_i)gz + (p_{ig} - p_{og})$$

Donde ρ_o y ρ_i son las densidades del aire exterior e interior, g es la aceleración de la gravedad, z la altura sobre el nivel del suelo, p_{og} la presión exterior (que incluye el efecto del viento) y p_{ig} la presión interior (con influencia de la ventilación). La pendiente depende únicamente de la diferencia de densidades, la cual se puede calcular a partir de las temperaturas del aire en ambos lados. (Sirén, 2002a).

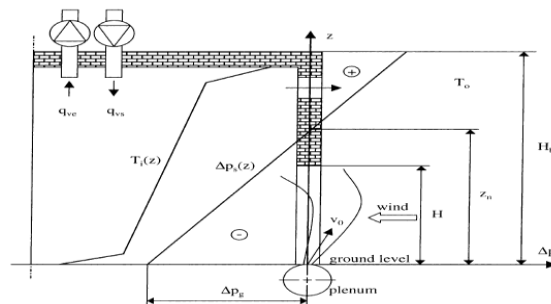


Ilustración 5. Distribución de presión y algunos otros elementos que influyen en el comportamiento de la cortina de aire.

Nota: tomado de Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain—part I—Siren Kai – Energy and Buildings 2002

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

52

Puesto que el desempeño de una cortina de aire instalada en una entrada de edificio depende principalmente de la diferencia de presión entre el exterior (P_o) y el interior (P_i). Esta diferencia,

$\Delta P_{oi} = P_o - P_i$, define las condiciones aerodinámicas bajo las cuales opera el chorro de aire. Con

base en estudios previos, el comportamiento del flujo puede clasificarse en tres estados dinámicos distintos. (Wang & Zhong, 2014) Se clasifica el comportamiento del chorro en tres escenarios Figura 6.

(a) Condición óptima: La diferencia de presión se encuentra dentro de un rango aceptable delimitado por una diferencia de presión crítica superior (ΔP_{uc}) y una inferior (ΔP_{lc}), es decir:

$$\Delta P_{lc} < \Delta P_{oi} < \Delta P_{uc}$$

En este caso, el chorro alcanza el piso y bloquea adecuadamente el paso del aire, aunque puede seguir existiendo una ligera salida de aire desde el interior hacia el exterior a través de la cortina.

(b) Ruptura por entrada: Se presenta cuando $\Delta P_{oi} > \Delta P_{uc}$, en este escenario la presión exterior es significativamente mayor que la interior. Bajo estas condiciones, el aire del exterior logra penetrar el chorro, causando infiltración.

(c) Ruptura por salida: Ocurre cuando $\Delta P_{oi} < \Delta P_{lc}$, es decir, la presión interior supera en exceso a la exterior, forzando la salida de aire al ambiente. El chorro no logra bloquear completamente esta exfiltración.

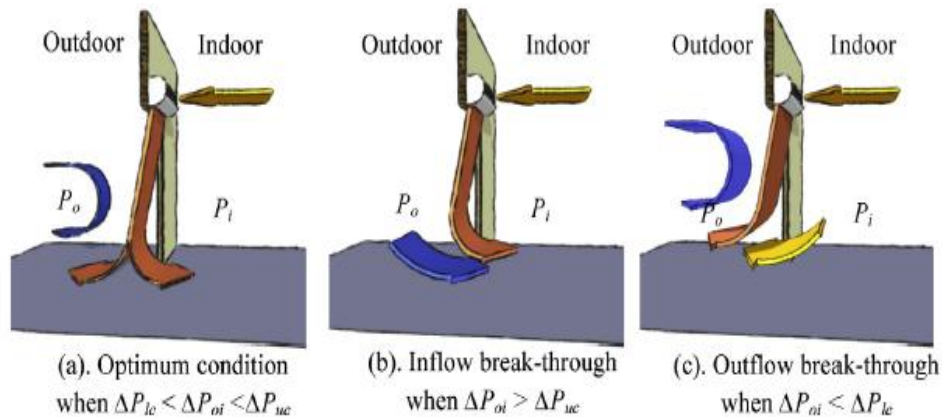


Ilustración 6. Características de un chorro de cortina de aire bajo diferentes diferencias de presión

Nota: tomado de An approach to determine infiltration characteristics of building entrance equipped with air curtains – Wang Liangzhu – Energy and Buildings 2014

La menor pérdida de calor ocurre cuando no existe flujo neto a través del vano, lo cual implica que la mezcla inducida por el chorro de la cortina de aire es mínima. Este flujo neto está determinado por el punto en el que el chorro impacta contra el suelo, el cual, a su vez, está condicionado por diversos factores analizados previamente en la literatura (Sirén, 2002b). El nivel de mezcla generado depende directamente de la calidad del flujo a la salida de la boquilla, lo cual está influenciado tanto por la turbulencia inicial como por la velocidad de expulsión del chorro.

Desde el enfoque del balance energético en el recinto, la demanda total de calefacción o refrigeración atribuible al uso de la cortina de aire se expresa mediante la siguiente ecuación:

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

54

$$Q_{ta} = \dot{H}_{ent} - \dot{H}_{jet} - \dot{H}_{env}$$

De lo cual se tiene:

\dot{H}_{ent} representa el flujo de entalpía asociado al aire interior que es succionado o arrastrado por el chorro (producto del flujo másico y la entalpía específica del aire);

\dot{H}_{jet} corresponde a la entalpía transportada por la porción del chorro que se introduce al espacio acondicionado;

H_{env} es la entalpía adicional aportada a través de la envolvente del edificio, la cual compensa los efectos del flujo neto a través de la abertura.

3.6.2 Cálculo de la energía sensible

En el análisis térmico de edificaciones con aperturas expuestas, como puertas industriales, es esencial cuantificar las pérdidas o ganancias de energía asociadas a la infiltración de aire.

La energía sensible acumulada en el volumen de aire del recinto, la cual depende de la variación de temperatura producida por el intercambio con el exterior, se calcula para analizar su impacto sobre el comportamiento térmico interior. (Raphe et al., 2024)

La energía sensible ganada o perdida por el volumen de aire interior del edificio se puede representar por la integral:

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

55

$$q = \int_V \rho c_p (T - T_{ini}) dV$$

Para lo cual:

q : Energía sensible total (J).

ρ : Densidad del aire (kg/m^3).

c_p : Calor específico del aire a presión constante ($J/kg \cdot ^\circ C$).

T : Temperatura local del aire en el dominio.

T_{ini} : Temperatura de referencia interior ($22^\circ C$).

V : Volumen del dominio interior evaluado.

3.6.3 Transferencia de calor

La potencia térmica transferida \dot{Q} a través de la cortina de aire, que es el calor perdido, está formada por dos elementos principales: la parte inyectiva \dot{Q}_{adv} , que se refiere a la energía que lleva el aire al pasar por la abertura de la puerta; y la parte difusiva \dot{Q}_{dif} , la cual incluye los mecanismos de difusión molecular y turbulenta. Este proceso corresponde a un fenómeno de transporte convectivo y se expresa en vatios por metro de ancho de la puerta. (Van Belleghem et al., 2012)

$$\dot{q} = \dot{q}_{dif} + \dot{q}_{adv}$$

De lo cual:

$$\dot{q}_{adv} = \rho c_p \int_0^{H_d} [u(T - T_{ref})] l_{xd} dy$$

$$\dot{q}_{dif} = - \int_0^{H_d} (k_{eff} \partial x \partial T) l_{xd} dy$$

Siendo $k_{eff} = \rho c_p (\alpha + \alpha_t)$.

Por tanto, si \dot{q} se expresa a partir del coeficiente de transferencia de calor h y de la diferencia de temperatura interior–exterior, $\Delta T = |T_i - T_o|$:

$$\dot{q} = h(H_d W) \Delta T$$

Definiendo el número de Nusselt como $Nu = \frac{hH_d}{\lambda}$

3.6.4 Eficiencia dinámica E

La eficiencia dinámica de una cortina de aire es la relación entre la presión que impulsa el aire del exterior a través de una abertura y la capacidad del chorro generado por el sistema para oponerse a ella. En términos simples, señala qué tan efectivo es el chorro de aire cuando actúa como una barrera frente al flujo que la diferencia de presión entre el interior y el exterior del

edificio genera. Matemáticamente, se expresa como el cociente entre el producto de la diferencia de presión estática y el área del vano, dividido por el doble del impulso inicial del chorro. (Zhivov & Strongin, 2024)

$$E = \frac{\Delta P \cdot (H \cdot B)}{2J_0}$$

Donde

- ΔP : diferencia de presión estática entre el interior y el exterior [Pa],
- H, B : altura y ancho de la abertura [m],
- J_0 : impulso inicial del chorro de la cortina de aire [N]

3.6.5 Criterio de eficiencia energética η

Calcula la cantidad de energía térmica que una cortina de aire logra disminuir, en comparación con las pérdidas que normalmente se producirían a través de una abertura sin protección. Es una relación adimensional que compara directamente la pérdida de calor con y sin el uso de la cortina. En otras palabras, permite cuantificar cuánto ahorro energético genera el sistema respecto a una situación inicial. (Strongin & Zhivov, 2021)

$$\eta = 1 - \frac{q_{AC}}{q_{WO}}$$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

58

Donde:

Q_{AC} : es la pérdida de calor a través de la abertura cuando está protegida por la cortina de aire
[kW],

- Q_{WO} : pérdida de calor a través de la misma abertura sin cortina de aire llamada también estado base [kW].

Si $\eta = 1$, la cortina de aire es ideal elimina por completo la pérdida de calor a través de la abertura, si $\eta = 0$, la cortina no influye sobre las pérdidas térmicas; si $\eta < 0$, significa que el sistema está mal diseñado o seleccionado, puesto que está generando más pérdidas de las que habría si no hubiera cortina alguna. Esto puede ser debido a: exceso de intercambio térmico no deseado (por ejemplo, a causa de una turbulencia excesiva que genera el chorro), un consumo energético desmedido del sistema auxiliar de calefacción vinculado con la cortina. (Zhivov & Strongin, 2024)

Esta se define también como eficiencia de sellado de la cortina, siendo esta la relación entre la reducción de la energía obtenida con la cortina de aire en funcionamiento ($q_0 - q$) y la ganancia de energía q_0 con la puerta abierta (y la cortina de aire apagada). (Gonçalves et al., 2012b).

3.6.6 Eficiencia de confort térmico ocupacional θ

Evalúa la efectividad del sistema para mantener una temperatura adecuada del aire aceptable en la mezcla que pasa por la abertura hacia el interior del edificio, específicamente en la zona donde hay presencia humana o actividades sensibles al clima. (Strongin & Zhivov, 2021)

$$\theta = 1 - \frac{t_{in} - t_{mix}}{t_{in} - t_{out}}$$

Donde:

- t_{int} : temperatura del aire interior [$^{\circ}C$],
- t_{out} : temperatura del aire exterior [$^{\circ}C$],
- t_{mix} : temperatura del aire mezclado que entra por la abertura [$^{\circ}C$].

Cuando $t_{mix} = t_{in}$, el aire que ingresa por la abertura tiene la misma temperatura que el aire del interior; en este caso, $\theta = 1$, lo cual representa la situación ideal: confort térmico total garantizado por la cortina de aire. Si $t_{mix} = t_{out}$, significa que el sistema no modifica en lo más mínimo la temperatura del aire que ingresa (como si no hubiera cortina). En este caso, $\theta = 0$, lo cual indica falta total de protección térmica. Los valores intermedios de θ muestran

diferentes niveles de efectividad. El nivel de confort térmico logrado por la acción del chorro de aire aumentará conforme el valor se aproxime más a 1. (Zhivov & Strongin, 2024)

3.6.7 Módulo de deflexión

En ausencia de perturbaciones externas adicionales, como presiones inducidas por el viento o efectos de una ventilación desequilibrada, la estabilidad de una cortina de aire depende del balance entre el flujo de cantidad de movimiento del chorro y las fuerzas de flotación que actúan en sentido contrario. El módulo de deflexión (D_m), un parámetro adimensional, describe esta relación. (Ruiz Alanis, 2021)

Para un chorro vertical que mueve aire recirculado desde el interior, este parámetro se calcula mediante la expresión:

$$D_m = \frac{\rho_i b v_j^2}{g H_d^2 |\rho_o - \rho_i|}$$

Siendo:

D_m = módulo de deflexión

u_o = velocidad inicial del chorro (m/s)

ρ_o = densidad del aire de suministro (kg/m³)

b_o = ancho del chorro (m)

Esta expresión ayuda a calcular cuál es la cantidad mínima de momento del chorro necesaria para mantener una cortina de aire ininterrumpida a través de la abertura de un edificio cerrado. (Ruiz Alanis, 2021)

3.6.8 Coeficiente de Desempeño de Cortina de Aire (COP_c)

Para evaluar el impacto del consumo eléctrico de las cortinas de aire y su efecto sobre la reducción de la carga térmica de refrigeración, se utiliza el indicador llamado Coeficiente de Desempeño de la Cortina de Aire COP_c , el cual permite cuantificar el rendimiento económico del sistema. (Shen et al., 2017), (Song L, 2023)

Este parámetro se define mediante la siguiente expresión:

$$COP_c = \frac{q_m - q_{a,m}}{N}$$

Donde:

q_m : transferencia de calor entre regiones sin el uso de cortinas de aire.

$q_{a,m}$: transferencia de calor entre regiones cuando las cortinas están en funcionamiento.

N : potencia eléctrica consumida por los ventiladores.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

62

Un valor positivo de COP_c indica que la cortina contribuye a la reducción de carga térmica; en cambio, si $q_{a,m} > q_m$, es decir, si la cortina incrementa el intercambio de calor no deseado, el valor de COP_c será negativo.

La potencia total requerida por los ventiladores se calcula con:

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{V_i P_i}{\eta_i}$$

Teniendo:

n : número de cortinas de aire en operación.

V_i : caudal volumétrico del aire a través de la cortina i .

P_i : presión generada por el ventilador correspondiente.

η_i : eficiencia del ventilador para cada unidad.

En escenarios donde las condiciones de operación son homogéneas en todas las cortinas y el recinto posee geometría regular (por ejemplo, cuadrada), la ecuación anterior puede simplificarse

a:

$$N = \frac{nVP}{\eta}$$

Donde V , P y η son valores representativos (iguales para todas las unidades) del caudal de aire, presión y eficiencia respectivamente.

3.6.9 Evaluación y Cálculo del Ahorro Energético

Estudios realizados han evaluado el impacto del uso de cortinas de aire en la mejora del desempeño energético de espacios comerciales que operan con puertas abiertas. Mediante ensayos controlados que incorporan técnicas como el uso de gases trazadores y termografía infrarroja, se ha logrado cuantificar la pérdida de calor tanto en condiciones con como sin el dispositivo de barrera aerodinámica. A partir de estos resultados, es posible establecer indicadores de eficiencia de sellado y efectividad del sistema, los cuales permiten calcular la reducción en la carga térmica por infiltración. A partir de esto, se pueden estimar los ahorros energéticos y económicos asociados a una configuración adecuada de la cortina de aire, lo que proporciona criterios técnicos para su implementación eficiente y rentable.

3.6.9.1 Eficiencia y efectividad de sellado

La cantidad de veces por unidad de tiempo que el volumen de aire en un espacio cerrado es reemplazado por aire del exterior se define como la tasa de intercambio de aire. La tasa de intercambio cuando la cortina de aire está en funcionamiento con una velocidad inicial del chorro U_j , se define como n_j , y cuando la cortina está apagada en este caso (*por ejemplo, $U_0 = 0$*) el

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

64

valor correspondiente sería n_0 , con estos valores se pueden calcular dos indicadores de desempeño: Eficiencia de Sellado (η_v) y la Efectividad del Proceso de Sellado (E_v). (Neto & Gameiro Da Silva, 2008)

Las fórmulas que definen estos indicadores son las siguientes:

$$\eta_v = \frac{n_0 - n_j}{n_0}$$

η_v Eficiencia de sellado, indica qué fracción del intercambio de aire fue eliminada por la cortina respecto del caso base sin cortina.

n_j tasa de renovación de aire con cortina activa.

n_0 tasa de renovación sin cortina (puerta abierta).

$$E_v = \frac{1}{1 - \eta_v}$$

E_v Efectividad de la cortina como barrera; se puede definir también como la inversa del escape residual; de ahí que si $\eta_v = 0.75$, entonces $E_v = 4$ es decir, el recambio de aire se ha dividido por cuatro.

3.6.9.2 Consumo energético relativo

Una forma de evaluar el rendimiento asociado a las diferentes condiciones operativas de una cortina de aire es estimar la cantidad de energía térmica que se transfiere a través de la puerta con dicha cortina instalada y compararla con la energía que se transferiría si la puerta no contara con ninguna protección (Neto & Gameiro Da Silva, 2008),

El resultado es un porcentaje que muestra cuánta energía total (térmica + eléctrica) se está consumiendo respecto al caso sin cortina.

$$\text{energy cost ratio} = \frac{\dot{q}_j + \dot{q}_{AirCurtain}}{\dot{q}_0} \times 100$$

\dot{q}_j pérdida de calor con la cortina de aire activa.

\dot{q}_0 pérdida de calor sin cortina.

$\dot{q}_{AirCurtain}$ potencia eléctrica consumida por la cortina de aire.

3.6.9.3 Carga térmica por infiltración sin cortina

Las pérdidas de energía resultantes de las fugas de aire a través de puertas pueden ser estimadas de una manera razonable tomando solamente la componente de calor sensible. (Neto & Gameiro Da Silva, 2008)

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

66

$$\dot{q}_0 = C_D \cdot A_D \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \cdot \rho_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_{out}}{\rho_{in}}\right)^{0.5} \cdot \sqrt{g \cdot H_p} \cdot \left(\frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_{in}}{\rho_{out}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)^{1.5}$$

C_D coeficiente de descarga (≈ 0.221)

A_D área del vano de puerta (m^2)

H_p altura del vano

c_p calor específico del aire

ρ densidades del aire interior y exterior

g gravedad

T_{out}, T_{in} temperaturas exteriores e interiores

3.6.9.4 Carga térmica sensible con cortina activa

Cuando la puerta cuenta con una cortina de aire instalada, la fuga de calor sensible puede ser estimada utilizando una expresión matemática que considere el volumen de aire renovado en el recinto, así como la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, permitiendo cuantificar la transferencia térmica aún presente a pesar de la protección aerodinámica. (Neto & Gameiro Da Silva, 2008.)

$$\dot{q}_j = \frac{\rho \cdot n \cdot V_{room} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{3600}$$

Siendo:

n cambios aire hora (ACH)

V_{room} volumen interior del recinto (m^3)

3.6.9.5 Estimación alternativa de E_v

$$\dot{q}_j = \frac{\dot{q}_0}{E_v}$$

3.6.9.6 Cálculo económico

Permite cuantificar el ahorro energético logrado al reducir la pérdida de calor sensible mediante el uso de una cortina de aire. Al comparar la energía transferida sin protección con la obtenida con el sistema activo, es posible estimar el beneficio económico considerando el COP del equipo de climatización y el costo eléctrico.

$$Ahorro = \frac{\dot{q}_0 - \dot{q}_j}{COP} \cdot \text{costo } kW/h$$

3.7 Métodos de ensayo y normas

En el marco de las normas técnicas que regulan el desempeño de las cortinas de aire, los documentos de la AMCA constituyen la base más reconocida para la caracterización de estos equipos.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

68

AMCA 222-08 es un manual de aplicación que se centra en proporcionar un marco conceptual y práctico para comprender el funcionamiento de las cortinas de aire. Desde el punto de vista técnico, este documento describe de forma detallada las definiciones de variables de desempeño, como caudal volumétrico de aire, velocidad promedio en la descarga, uniformidad de velocidad en la tobera, eficiencia de la unidad y potencia consumida. Expone los principios de operación basados en el vector de velocidad y la presión, diferenciando entre unidades recirculantes y no recirculantes. También analiza la influencia de parámetros como el ángulo de descarga y el diseño de la tobera en la capacidad del chorro de aire para minimizar infiltraciones. En cuanto a construcción, aborda la selección de ventiladores (centrífugos, axiales o de flujo transversal), motores (monofásicos o trifásicos, con diferentes tipos de carcasa), sistemas de control (manuales, automáticos o integrados a sistemas BMS), y opciones de calefacción o enfriamiento incorporadas en el flujo de aire. Así, AMCA 222-08 funciona como una guía de diseño y aplicación, proporcionando los criterios de selección y ajuste necesarios para garantizar que la cortina de aire cumpla con su función en términos de eficiencia energética, confort y control de contaminantes.

Por su parte, la norma AMCA 220-05 establece de manera sistemática los métodos de ensayo en laboratorio que permiten determinar variables críticas de desempeño aerodinámico. Dichos ensayos incluyen la evaluación de la uniformidad del flujo, las velocidades promedio, la determinación de velocidades núcleo y el cálculo preciso del caudal de aire. A través de estas pruebas normalizadas, se asegura la generación de datos comparables y verificables, que posteriormente son integrados en las hojas técnicas de los fabricantes. La revisión y aplicación

de estas normas resultan esenciales para la selección adecuada de cortinas de aire, garantizando que las especificaciones declaradas se basen en mediciones reproducibles y consistentes, lo que facilita su correcta interpretación en proyectos de climatización y control ambiental.

4 Metodología y resultados

Como se indicó previamente, uno de nuestros objetivos específicos es el demostrar mediante el programa de modelación CFD de Autodesk, simular el comportamiento del flujo del aire, distribución de temperaturas interiores y el desempeño energético del recinto cuando se tiene la incidencia de infiltración de corrientes exteriores.

Este análisis se llevó a cabo en la oficina bancaria Centro Comercial Mall Plaza Cali, considerando los tres escenarios de operación propuestos en nuestro plan de trabajo metodológico:

Escenario # 1: Puertas abiertas con cortinas de aire en operación

Escenario # 2: Puertas abiertas sin cortinas de aire en operación

Escenario # 3: Puertas abiertas sin cortinas de aire en operación

Estos tres casos se definieron para evaluar comparativamente el impacto de la cortina de aire y del estado de la puerta sobre la infiltración, la distribución de temperaturas interiores y el desempeño energético del recinto.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

70

La geometría de la oficina bancaria se desarrolló a partir de los archivos CAD proporcionados por el cliente. Para la simulación, solamente se consideró el vestíbulo y el área de cajas, por ser las zonas más expuestas y afectadas por las corrientes de aire que provienen de las puertas. La geometría CAD fue modelada en Autodesk Revit y luego se exportó al software Autodesk CFD.

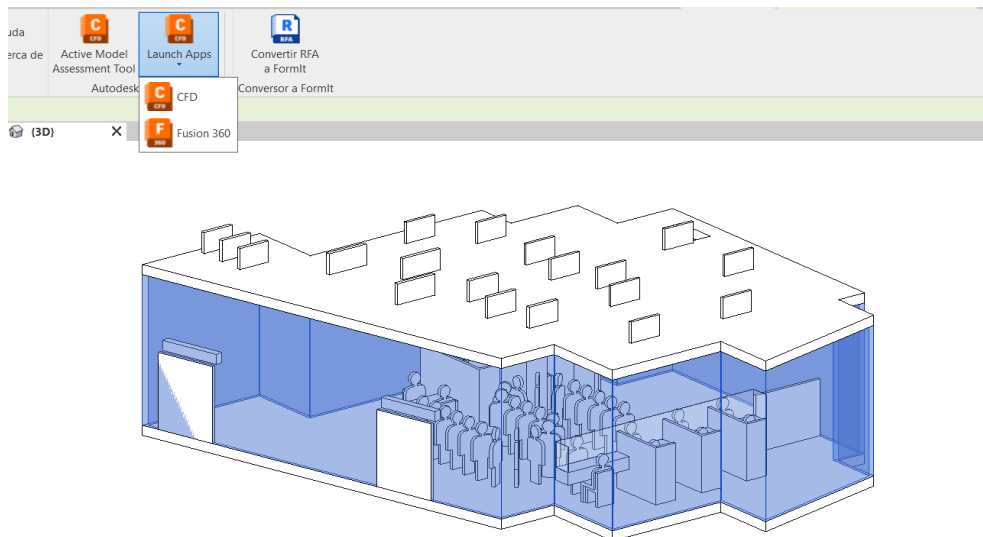


Ilustración 7. Modelo Revit oficina Bancaria

Nota: Geometría de oficina bancaria, modelada en AUTODESK REVIT, preparada para ser exportada a software AUTODESK CFD, a través de un complemento

En los archivos CAD se constató que el sistema de climatización fue diseñado con difusores lineales instalados en el techo. Estas entradas de aire se incorporaron en el modelo, siguiendo la recomendación técnica de Autodesk; la cual sugiere extender la geometría de los difusores para

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

71

que el flujo se estabilice antes de entrar al dominio principal, reduciendo con esto perturbaciones que podrían afectar la exactitud del análisis.

La geometría exportada desde Revit generó un espacio vacío delimitado por muros, piso y cubierta. Mediante la herramienta Void Fill fue posible transformar dicho espacio en un dominio fluido, creando superficies y volúmenes internos que representan el aire circulante dentro de la oficina bancaria.

Para ello se definió una superficie a partir de los bordes de una abertura en la losa, correspondiente al retorno proyectado en los planos de climatización. A partir de esta superficie se creó una nueva parte dentro del modelo, incorporada posteriormente al análisis CFD.

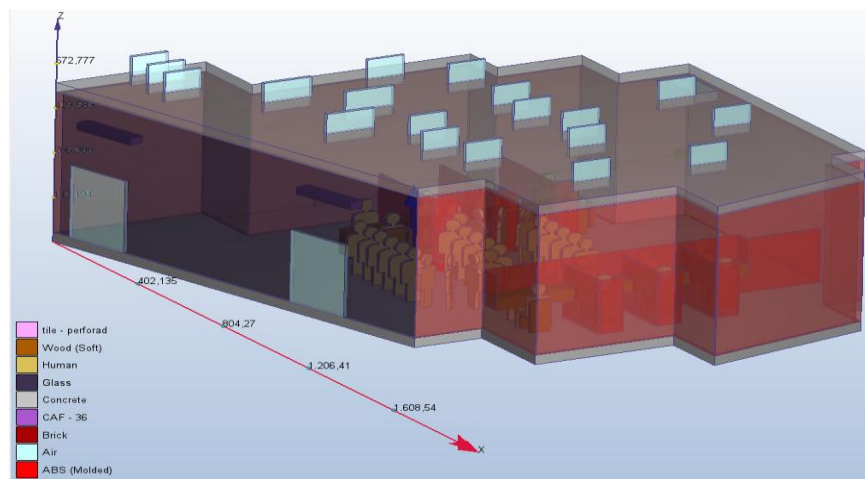


Ilustración 8. Modelo 3D de oficina bancaria

Nota: La imagen muestra las partes que componen el modelo con materiales asignados.

La metodología aplicada en los tres escenarios parte de un planteamiento integral de simulación CFD orientado a reproducir con precisión el comportamiento del aire en recintos de uso real, manteniendo al mismo tiempo un nivel de detalle suficiente que permita realizar comparaciones

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

72

confiables entre distintas configuraciones. El modelo tridimensional que se elaboró se parametrizó en cuanto a materiales para considerar la envolvente de concreto y ladrillo, superficies acristaladas, mobiliario madera, particiones de oficina, equipos y ocupantes modelados como volúmenes con generación de calor. Este planteamiento se fundamenta en un principio teórico: ciertos edificios pueden modelarse como recintos prácticamente sellados salvo en la abertura principal donde se instala la cortina de aire. Este marco metodológico descarta el análisis de microfugas difusas y se centra en evaluar el efecto de la cortina de aire frente a las condiciones de puerta abierta o cerrada.

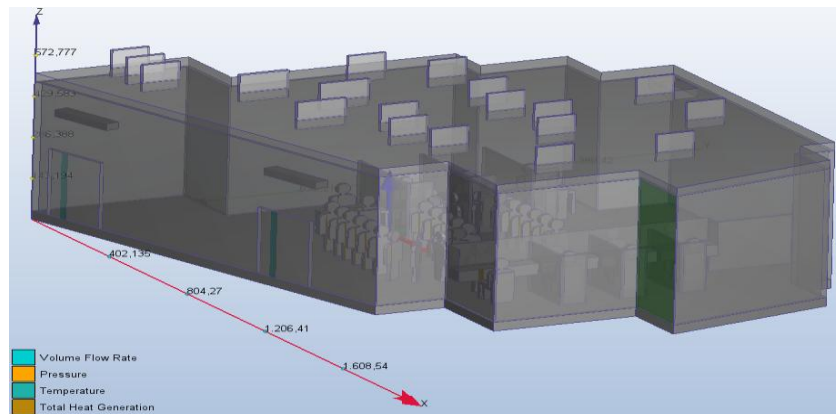


Ilustración 9. Condiciones de frontera de modelo 3D.

Nota: La imagen muestra las partes que componen el modelo con las condiciones de frontera asignadas.

La secuencia de trabajo incluyó la definición de materiales y propiedades termofísicas (densidad, calor específico, conductividad), se establecieron las condiciones de frontera térmicas y de flujo, la fijación de condiciones iniciales uniformes con aire interior a 29 °C, la generación de un

mallado automático con capas límite para representar gradientes cercanos a superficies y, finalmente, la resolución de las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas (RANS) junto con la ecuación de energía. Así se asegura que cada escenario tenga una base metodológica homogénea y que el análisis comparativo conserve un alto rigor técnico.

4.1 Modelización numérica y procedimiento de solución

En los tres escenarios se aplicó un mismo enfoque de modelización numérica dentro del software CFD, lo que permitió garantizar que las diferencias observadas en los resultados fueran producto de la física del problema y no de variaciones en la configuración del solver. Se asumió la hipótesis de flujo incompresible con transferencia de calor activa, habilitando también la función Auto Forced Convection, la cual ajusta de manera automática los coeficientes de convección de acuerdo con el régimen de flujo.

Adicionalmente, se incluyó el efecto de la gravedad mediante el método Earth, con una dirección definida como $0;0;-1$, lo que representa la acción gravitatoria en el eje vertical descendente y permite capturar fenómenos de flotabilidad y estratificación térmica, fundamentales en espacios climatizados donde el aire frío tiende a descender mientras el aire caliente asciende

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

74

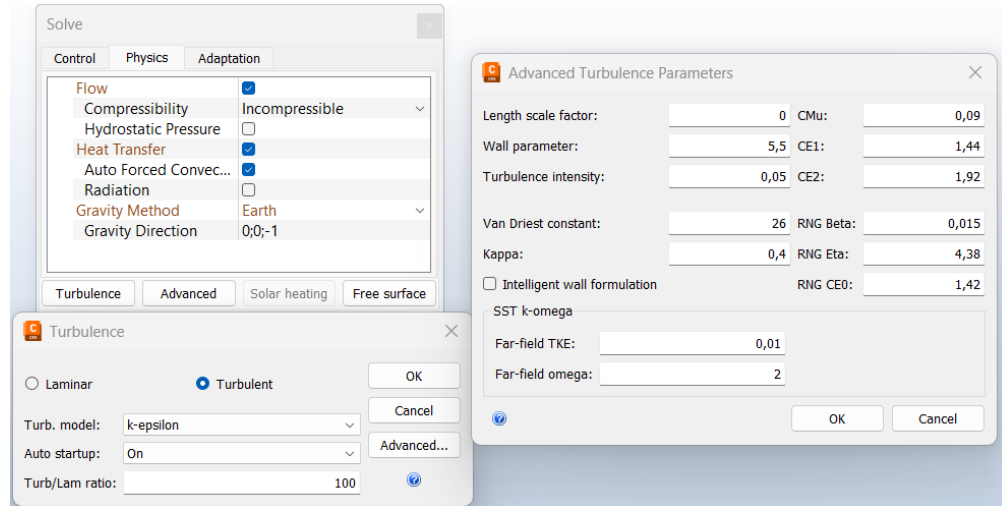


Ilustración 10. Solver de AUTODESK – CFD

Nota: Se muestran las configuraciones asignadas al SOLVER del software

En lo relativo al tratamiento de la turbulencia, se implementó el modelo $k-\epsilon$ estándar, activado en régimen turbulento con la opción Auto Startup: On, lo que permite al solver generar automáticamente condiciones iniciales consistentes para el transporte de energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ϵ). Este modelo, de carácter empírico y semi-analítico, es ampliamente utilizado en simulaciones de HVAC debido a su capacidad para representar flujos completamente desarrollados con recirculaciones, jets y mezclado forzado en recintos cerrados. Para mejorar la precisión, se aplicaron parámetros avanzados recomendados en la guía de Autodesk CFD: una intensidad de turbulencia inicial del 0,05 (5 %), adecuada para representar ambientes interiores con flujos inducidos por difusores y aperturas; un Wall parameter = 5,5, valor que controla la relación entre las funciones de pared y el régimen turbulento resuelto; y los

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

75

coeficientes clásicos del modelo, $C_\mu = 0,09$, $CE1 = 1,44$ y $CE2 = 1,92$, que gobiernan el equilibrio entre la producción y disipación de turbulencia en el transporte de energía cinética.

Adicionalmente, se incorporaron constantes auxiliares como el Van Driest constant = 26, empleado en la formulación logarítmica de la ley de la pared para atenuar el efecto viscoso en regiones cercanas a la superficie, y κ (Kappa) = 0,4, constante de Von Kármán que define la pendiente de la ley logarítmica en la capa límite turbulenta. Estas configuraciones fueron complementadas con la activación de la opción Intelligent Wall Formulation, un algoritmo híbrido que selecciona automáticamente entre una función de pared tradicional y una resolución de capa viscosa en función del tamaño de celda y el valor de y^+ , permitiendo representar con mayor fidelidad el intercambio térmico y de momento en superficies complejas como difusores, puertas y ventanas.

La configuración se reforzó con parámetros asociados a la variante RNG (Re-Normalization Group) del modelo $k-\varepsilon$, que mejora el tratamiento de flujos con fuerte curvatura, alta recirculación o tensiones de corte pronunciadas, características frecuentes en recintos con cortinas de aire. Los valores definidos fueron RNG Beta = 0,015, RNG Eta = 4,38 y RNG CE0 = 1,42, que ajustan las ecuaciones de transporte de ε y modifican la viscosidad turbulenta en función de la escala local de movimiento, incrementando la precisión en zonas de alta deformación del flujo. De acuerdo con Autodesk CFD 2024, esta formulación RNG permite capturar mejor los efectos de mezcla y la disipación en chorros turbulentos, ofreciendo un desempeño superior en aplicaciones de climatización donde la interacción entre difusores, cortinas de aire y flujos de infiltración requiere un modelado robusto y estable.

Un aspecto adicional y crucial en el procedimiento fue la elección del esquema de advección (Advection Scheme), que determina cómo se resuelven los términos convectivos en las ecuaciones de transporte. Se seleccionó el esquema el esquema ADV 1 (Monotone Streamline Upwind) es el más robusto, ya que prioriza la estabilidad en dominios con geometrías complejas y recirculaciones, aunque introduce mayor difusión numérica. El ADV 2 (Petrov–Galerkin) y el ADV 5 (Modified Petrov–Galerkin) reducen la difusión, ofreciendo mayor precisión en la captura de gradientes, pero pueden ser menos estables en flujos internos con múltiples entradas y salidas como los típicos de oficinas climatizadas. El ADV 3 (Flux based scheme) busca un balance entre precisión y estabilidad, adecuado para problemas de transferencia de calor con flujos moderados. En el contexto de HVAC, donde el interés principal es lograr soluciones estables y comparables en distintos escenarios de operación, la elección de ADV 1 resulta la más adecuada, ya que asegura convergencia confiable incluso en condiciones con fuertes gradientes térmicos y corrientes inducidas por cortinas de aire o infiltraciones.

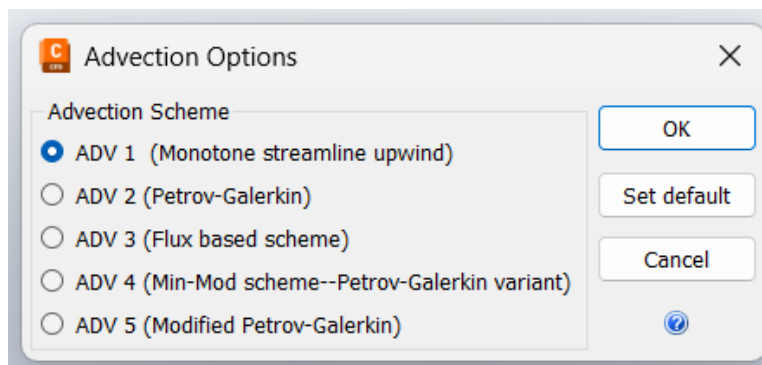


Ilustración 11. Advection Scheme

En términos de desempeño computacional, las simulaciones alcanzaron convergencia estable entre 211 y 249 iteraciones, con balances de masa y energía cerrados en todos los escenarios. Desde el punto de vista energético, los resultados reflejan coherencia en el comportamiento físico: en el escenario con cortina de aire, el flujo energético transportado por el aire de salida fue de 16.135 W, mientras que la transferencia térmica desde las superficies hacia el aire alcanzó 6.931 W, valores que se equilibraron con las cargas internas de 5.360 W y con el aporte del aire climatizado. Este procedimiento metodológico asegura que los resultados CFD se ajusten a la física de cada escenario y validen el análisis comparativo con un nivel de rigor técnico acorde a las buenas prácticas de la simulación numérica.

4.2 Condiciones de frontera e iniciales

En todos los casos, el volumen de aire inicial se fijó en 29 °C, condición uniforme que sirve como punto de referencia para el análisis transitorio del balance energético. Se añadieron cargas internas asociadas a la ocupación y al uso de equipos, representadas como fuentes térmicas de 100 W por persona y 170 W por equipo, modeladas en bloques sólidos que transfieren calor al aire circundante. Estas fuentes actúan como boundary conditions de tipo Heat Source, lo que en Autodesk CFD permite introducir generación térmica volumétrica que se acopla directamente a la ecuación de energía.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

78

El sistema de climatización fue modelado a través de múltiples entradas de aire frío a 12 °C, con caudales volumétricos en el rango de 150–500 cfm, definidos como condiciones de frontera de tipo Velocity Inlet. Esta asignación prescribe tanto la velocidad como la temperatura del aire de suministro, simulando el funcionamiento de los difusores reales del recinto y garantizando que el aire ingrese al dominio con propiedades controladas. La extracción del aire se configuró como Outlet Pressure = 0 Pa (presión de referencia), lo cual es equivalente a fijar un nivel de presión estática nula en el plano de salida. Según la guía de Autodesk CFD, este tipo de frontera permite que el solver ajuste automáticamente el flujo másico de salida en función de los diferenciales de presión internos, asegurando un comportamiento realista del balance de masa.

La diferencia central entre los escenarios se estableció en la condición aplicada al acceso principal. En el caso con cortina de aire, se definieron superficies de entrada adicionales con caudales elevados y orientación vertical descendente, representadas como Velocity Inlet con magnitud especificada. Estas entradas formaron una barrera aerodinámica, cuya interacción con el gradiente térmico del ambiente permitió reducir la mezcla entre aire exterior e interior. En el escenario de puerta cerrada, la abertura se modeló como Wall Boundary, es decir, una superficie sólida adiabática que elimina por completo cualquier intercambio de masa, representando la condición más hermética y eficiente desde el punto de vista energético. Finalmente, en el escenario de puerta abierta sin cortina, la abertura se representó mediante una Pressure Boundary conectada al exterior, lo que en Autodesk CFD se interpreta como una superficie de presión flotante que permite tanto entradas como salidas de aire según los diferenciales de presión.

Esta condición generó fenómenos de infiltración y exfiltración masiva, alcanzando caudales de salida cercanos a 4093 g/s, valor coherente con la literatura sobre flujos a través de aberturas grandes en climas contrastados.

4.3 Discretización

La discretización del dominio de cálculo se llevó a cabo mediante un mallado tridimensional uniforme para los tres escenarios, lo que garantizó consistencia en los resultados numéricos y eliminó sesgos derivados de la geometría computacional. Se empleó un mallado automático híbrido, conformado por elementos tetraédricos en el volumen principal y capas prismáticas en la proximidad de paredes, ventanas y superficies de inyección o retorno, siguiendo las recomendaciones de Autodesk CFD para modelar flujos internos con gradientes térmicos marcados. El refinamiento en la capa límite se implementó mediante tres capas prismáticas con un factor de crecimiento de 0,45, condición diseñada para capturar con mayor precisión los gradientes de velocidad y temperatura que se desarrollan en regiones cercanas a muros, acristalamientos y difusores.

El crecimiento global de los elementos se fijó en 1,1, mientras que la relación de aspecto superficial se limitó a un valor máximo de 20, garantizando una adecuada calidad numérica sin incrementar de manera innecesaria el número de celdas y manteniendo un equilibrio entre precisión y costo computacional.

4.4 Mallado

El mallado constituye un aspecto crítico dentro del análisis CFD, ya que de su calidad depende la capacidad del modelo para reproducir con fidelidad fenómenos de recirculación, jets libres, infiltración y gradientes térmicos en el interior de la oficina bancaria. En este estudio se aplicó un procedimiento de mallado automático con la opción de *mesh enhancement*, lo que permitió generar refinamientos adicionales en regiones próximas a superficies sólidas y definir capas límite en las zonas donde se esperaba un mayor gradiente de velocidad y temperatura. Esta configuración es consistente con las recomendaciones de Autodesk CFD, donde se enfatiza que la precisión de los resultados está directamente ligada a la correcta resolución de las capas límite y a la calidad global de la malla.

El resultado fue un mallado híbrido, compuesto por elementos tetraédricos en el volumen principal, adecuados para representar geometrías arquitectónicas complejas como muros, mobiliario y particiones de la oficina, y capas prismáticas en paredes, ventanas y superficies de inyección, utilizadas para capturar de forma precisa la distribución de velocidades y temperaturas en la capa límite. En el escenario con cortina de aire se prestó especial atención a las superficies de inyección, donde los caudales de 500 cfm generaron chorros con números de Reynolds superiores a 42.000. Este valor, propio de un régimen turbulento plenamente desarrollado, exigió un mallado suficientemente denso en dichas regiones para capturar la estructura del chorro y su interacción con el aire interior.

En las superficies de salida y en las paredes, la malla se distribuyó de manera que se pudieran representar adecuadamente los fenómenos de transferencia de calor por convección, fundamentales en la evaluación del balance térmico del recinto. En el caso de la puerta abierta sin cortina, aunque no se aplicaron refinamientos locales específicos en la abertura, el esquema de mallado adoptado permitió representar de manera estable los flujos de infiltración y exfiltración, garantizando un comportamiento numérico confiable y evitando oscilaciones artificiales en el campo de presión.

En cuanto a su tamaño global, el mallado se mantuvo consistente en los tres escenarios, con un total aproximado de 89.814 nodos y 319.802 elementos, valores que representan una resolución suficiente para reproducir fenómenos de estratificación térmica, recirculación local y transporte de energía en recintos de mediana escala como la oficina bancaria. Este nivel de discretización responde a un criterio de compromiso entre precisión numérica y costo computacional, ya que un mayor refinamiento habría aumentado de forma significativa los tiempos de cálculo sin mejorar sustancialmente la exactitud de los resultados.

4.5 Simulación Computacional del Comportamiento del Flujo de Aire

4.5.1 Caracterización del Flujo de Infiltración en las Puertas de Acceso

Para tener una parametrización adecuada de la simulación CFD del espacio, se lleva a cabo una estimación del caudal de infiltración de aire a través de las puertas exteriores utilizando el modelo propuesto por Yuill, (Yuill, 1996). Esto a partir de la ecuación de orificio, partiendo de considerar que las dos puertas exteriores son automáticas sin vestíbulo.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

82

$$Q = C_D \cdot \sqrt{2gH \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}}$$

$C_D = 0.65$ (valor de coeficiente de descarga típico para puertas)

$A = 2.1m^2$ (Área efectiva de la puerta)

$g = 9.81 m/s^2$

$H = 2.4m$ (altura de la puerta)

Se usan valores aproximados de densidad del aire seco a **1 atm**

$\rho_{exterior} (29^\circ C) \approx 1.165 kg/m^3$

$\rho_{interior} (25^\circ C) \approx 1.184 kg/m^3$

$\Delta\rho = 1.184 - 1.165 = 0.019 kg/m^3$

$\rho = 1.174kg/m^3$ (promedio entre interior y exterior)

Sustituyendo valores en la ecuación

$$Q = 0.65 \cdot 2.1 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 2.4 \cdot \frac{0.019}{1.174}}$$

$$Q \approx 0.65 \cdot 2.1 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 2.4 \cdot 0.01618}$$

$$Q \approx 0.65 \cdot 2.1 \cdot \sqrt{0.761}$$

$$Q \approx 1.19 \frac{m^3}{s} \rightarrow 2521 \text{ cfm por puerta}$$

Este valor es para puertas permanentemente abiertas (flujo continuo), en una oficina bancaria las puertas no están abiertas todo el tiempo, se hará la suposición de 10% de tiempo abierta, por tanto:

$$Q_{ajustado} = 0.10 \cdot 2521 \approx 252 \text{ cfm}$$

4.5.2 Modelado CFD

Se realizaron simulaciones CFD para tres escenarios en estado estacionario

Puertas abiertas con cortinas de aire en operación

Puertas abiertas sin cortinas de en operación

Puertas cerradas escenario ideal (cortinas de aire apagadas)

4.5.2.1 Escenario 1 - Puertas abiertas con cortinas de aire en operación

En la Ilustración 12, se observa un dominio térmico interior caracterizado por una temperatura de referencia en torno a los 29 °C y condiciones exteriores que, por contraste de gradientes, pueden estimarse en torno a los 35 °C. La variable visualizada combina campo escalar de temperatura (escala de 12–35 °C) con vectores de velocidad del aire, permitiendo una lectura integrada del comportamiento térmico y dinámico del flujo. El plano de corte incluye una parte de la zona de

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

84

ocupación, mobiliario, salidas de aire acondicionado en techo y dos puertas en extremos laterales completamente abiertas.

Desde el punto de vista térmico, se mantiene una temperatura homogénea en la zona de ocupación, mayoritariamente en el rango de confort entre 21 y 25 °C. Se observa una columna fría bien definida detrás del chorro, con contención efectiva de la carga térmica exterior. La parte derecha del recinto mantiene una estratificación térmica positiva sin signos de cambios de temperatura anormales. Esto sugiere que el sistema de suministro de aire y la organización interna de flujos ayudan a estabilizar la masa de aire en el interior.

El flujo exterior se ve contenido en la zona limítrofe a la cortina de aire, sin generar infiltración dominante hacia el núcleo del espacio. No se detectan variaciones en el flujo de aire entre los suministros y retornos, ni patrones de exfiltración entre las entradas superiores y las aberturas laterales. Se puede deducir que la existencia de un régimen de operación con flujo neto mínimo, se relaciona con una condición de equilibrio termodinámico favorable para la función de sellado.

La Ilustración 12, muestra un dominio térmico interior que se ve afectado por una diferencia entre una temperatura de fondo estimada en 29 °C y un ambiente exterior más cálido.

El plano de corte atraviesa toda la zona de ocupación permite ver claramente el funcionamiento simultáneo de las dos cortinas de aire.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

85

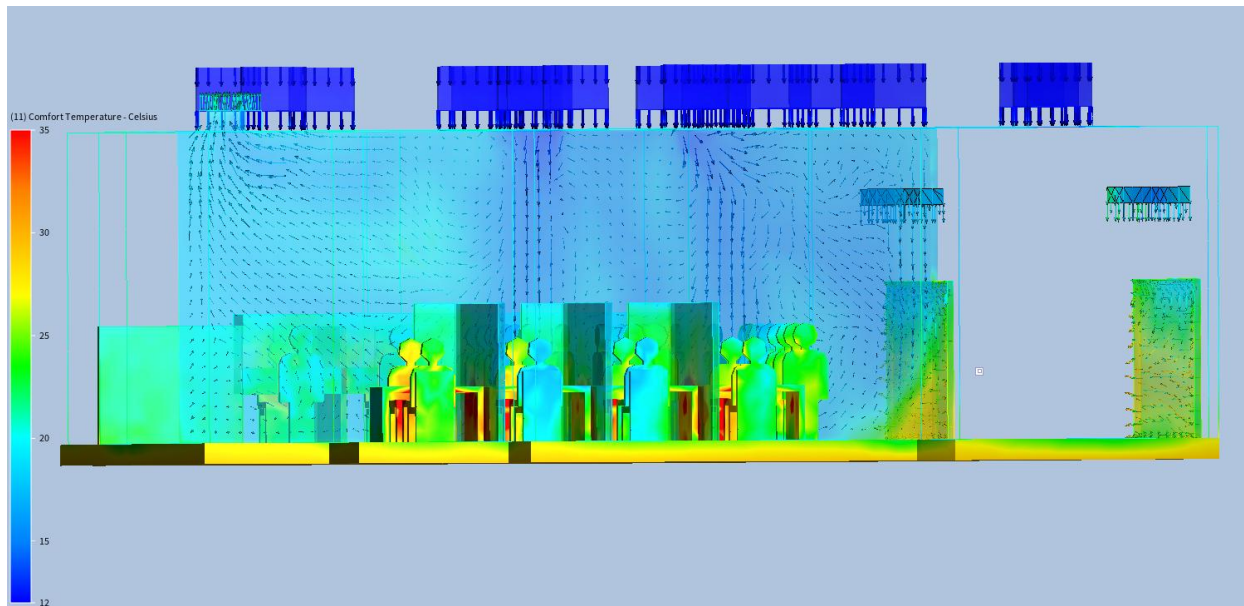


Ilustración 12. Escenario 1 puertas abiertas – cortinas de aire en funcionamiento

Nota: Se realiza el análisis para una de las puertas, mediante la inclusión de un plano se evidencia los patrones de flujo de aire

La trayectoria del chorro descendente de la cortina situada en el lado derecho muestra una desviación significativa hacia el interior del recinto, lo cual sugiere una interacción significativa con las condiciones externas de temperatura y presión. Este desvío disminuye la capacidad de aislamiento puesto que el chorro no mantiene una línea vertical directa hacia el suelo.

En contraste, el chorro izquierdo mantiene una dirección recta y una columna de aire frío más estable, aunque su influencia térmica se ve limitada por la dinámica global del flujo inducido por la apertura opuesta.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

86

La presencia de líneas de corriente curvadas entre las dos aberturas indica que existe un intercambio de masas de aire a través del volumen interior, lo cual evidencia una ruptura parcial de la función de sellado aerodinámico.

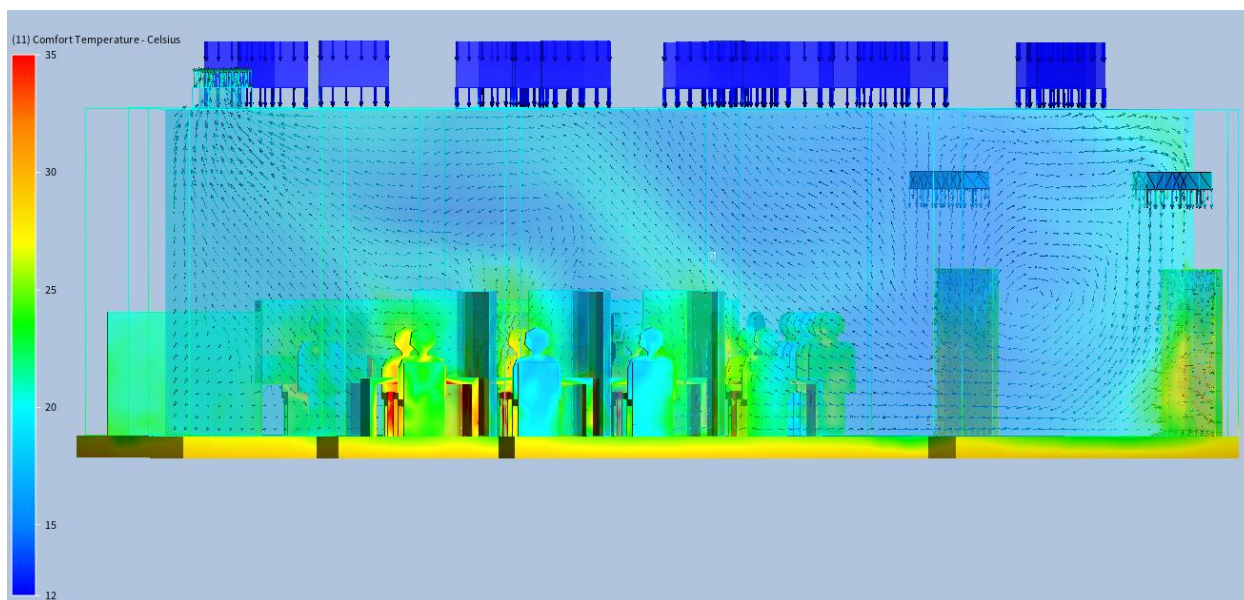


Ilustración 13. Puerta 2 – cortinas de aire en funcionamiento

El análisis térmico revela una asimetría en el comportamiento térmico interior. En el lado izquierdo, se mantiene una zona de confort térmico con temperaturas entre 20 y 25 °C, protegida por el chorro descendente.

Sin embargo, en el sector derecho, se identifica una zona más cálida, con gradientes térmicos horizontales que superan los 26 °C, indicando que el aire caliente exterior está penetrando hacia la zona ocupada. Esta pérdida de aislamiento es consistente con una eficiencia térmica reducida del sistema de cortinas debido a que las dos puertas están expuestas a la vez.

La dirección de los vectores de velocidad que cruzan la zona ocupada hasta el centro del recinto indican un régimen de infiltración activa desde el lado derecho. Aunque no se manifiesta un flujo caótico, se detecta una entrada constante de masa de aire exterior, lo cual sugiere que el sistema está funcionando en un rango de diferencial de presión que supera el umbral para un flujo neto no deseado.

En conjunto, el sistema HVAC muestra un comportamiento funcional que varía dependiendo de cómo estén configurados los accesos. Cuando las cortinas de aire están activas y se combinan de manera apropiada con el suministro de aire desde el techo, se logra mantener el confort térmico en la zona ocupada, con un chorro de aire estructuralmente estable y sin signos de recalentamiento, sobrecarga térmica o estancamiento. Sin embargo, para la configuración estacionaria de la simulación al mantenerse ambas puertas abiertas el aislamiento lateral se ve comprometido, especialmente en el costado derecho del recinto. Aunque el centro del espacio mantiene condiciones satisfactorias, la presencia de gradientes térmicos y la desviación del flujo indican una disminución en la eficacia del sellado aerodinámico. Las cortinas de aire no alcanzan a contrarrestar totalmente la ganancia térmica producida por la apertura doble, lo que produce una reducción parcial en la capacidad del sistema para preservar el equilibrio térmico y proteger la envolvente del ingreso de calor exterior.

4.5.2.2 Escenario 2 – Puertas abiertas sin cortinas de aire en operación

La Ilustración 14 representa el escenario con ambas puertas abiertas y sin presencia de cortinas de aire, bajo condiciones térmicas que reflejan un contraste entre un ambiente interior

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

88

moderadamente acondicionado (en torno a los 28–30 °C) y un entorno exterior más cálido. La variable mostrada combina campo escalar de temperatura con vectores de velocidad, lo que permite evaluar simultáneamente la transferencia térmica y el comportamiento del flujo de aire en el recinto. El plano colocado incluye igualmente toda la zona de ocupación, lo que posibilita observar cómo el aire exterior penetra e interactúa con el espacio interior.

En ausencia de cortinas de aire, no se observa ningún chorro de sellado sobre las puertas. En cambio, los vectores de velocidad indican flujos libres que cruzan sin restricción desde el exterior hacia el interior, particularmente desde el lado derecho, donde se evidencia un patrón convectivo ascendente que penetra hasta el núcleo del espacio. La difusión de gradientes térmicos hacia las áreas centrales se facilita debido a que no existen mecanismos que contengan o disipen ese flujo de aire caliente. El flujo en la zona superior muestra trayectorias semicirculares y recirculaciones suaves que no contribuyen a la contención del aire exterior.

Térmicamente, la distribución es heterogénea y desfavorable. Las zonas próximas a las aberturas laterales presentan temperaturas superiores a 30 °C, mientras que la zona de ocupación está parcialmente comprometida, con cuerpos expuestos a condiciones más allá del límite de confort.

Desde el centro hacia las puertas se nota un aumento en el gradiente horizontal, lo que demuestra una infiltración activa que provoca una sobrecarga térmica en los límites del espacio. A diferencia de lo que pasaba en situaciones previas, no hay zonas frías o un efecto de barrera térmica relacionados con el chorro de aire.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

89

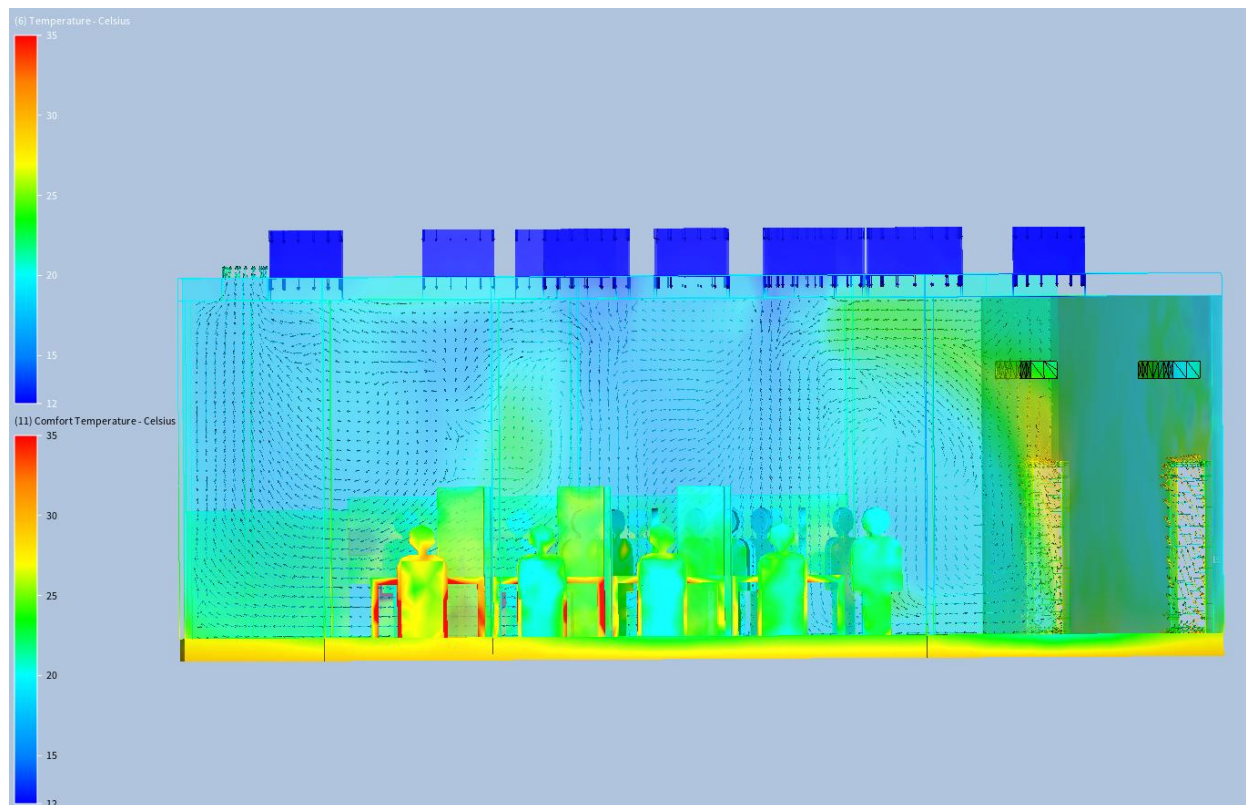


Ilustración 14. Escenario 2 puertas abiertas – sin cortinas de aire en funcionamiento

La dirección y magnitud de los vectores de velocidad confirman la existencia de un régimen de infiltración dominante, con flujo de aire exterior entrando libremente por ambas puertas, a causa de la diferencia de presión entre el exterior y el interior acondicionado; todo lo anterior se traduce en un ingreso continuo de calor y la perturbación de las condiciones interiores.

La temperatura del aire en grados Celsius, que varía entre 12 y 35 °C, se aprecia en la ilustración 14 con una variable escalar. También se incluyen vectores de velocidad para analizar el patrón de movimiento del aire dentro del espacio considerado.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

90

El plano atraviesa la zona de ocupación y muestra a plena vista el impacto térmico y dinámico de operar sin ningún dispositivo de sellado activo.

Térmicamente, el recinto presenta un gradiente horizontal y vertical pronunciado. Se detectan zonas con temperaturas superiores a 30 °C en los extremos laterales, que avanzan hacia el centro ocupacional. Las estaciones de trabajo ubicadas cerca de las puertas se encuentran completamente expuestas a aire caliente, mientras que en el centro del recinto aún persisten algunas áreas con temperaturas moderadas (22–26 °C), aunque cada vez más afectadas por el calor entrante. Se forman bolsas térmicas en la parte superior y regiones de acumulación calórica en las zonas frontales de los ocupantes, lo que indica una pérdida significativa de confort.

El análisis de los vectores confirma un régimen de infiltración activa y descontrolada, con múltiples trayectorias convergentes de aire exterior, sin evidencia de equilibrio de presión ni de zonas neutras. El sistema opera en condiciones que favorecen la transferencia continua de carga térmica hacia el interior, lo que implica un aumento sustancial en la demanda de refrigeración y un deterioro del control ambiental.

En términos de desempeño global del sistema HVAC, el escenario analizado representa una condición crítica marcada por la pérdida de control pasivo sobre el intercambio térmico con el exterior. La infiltración descontrolada genera una carga térmica adicional que no se logran contrarrestar eficazmente mediante el suministro de aire frío por los difusores de techo. El resultado es que, se presentan zonas recalentadas, gradientes térmicos desbalanceados y una distribución de aire ineficiente, sin patrones adecuados de mezcla ni dilución. Esta combinación de factores compromete el confort térmico de los ocupantes, incrementa el consumo energético y

muestra la disminución de la calidad ambiental interior. En conjunto, el sistema opera de forma ineficiente y sobrecargada, lo que refuerza la necesidad de implementar dispositivos activos de control de infiltración para mantener condiciones térmicas estables y sostenibles.

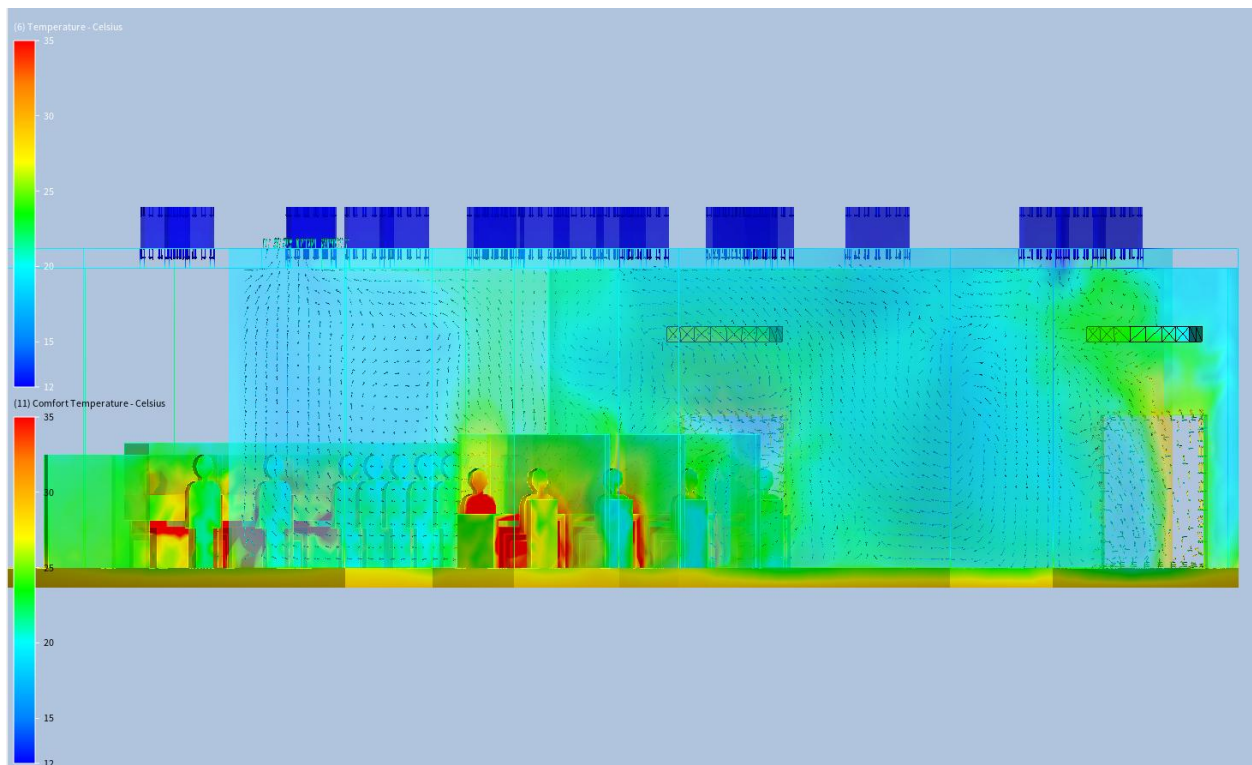


Ilustración 15. Escenario 2 puertas abiertas – análisis segunda puerta

4.5.2.3 Escenario 3 – Puertas cerradas (cortinas de aire apagadas)

Dado que no hay flujo exterior cruzando las puertas, ni cortinas de aire generando barreras, el movimiento del aire se debe exclusivamente al suministro por parte de los difusores de techo y la convección interna. Los vectores de velocidad evidencian un patrón de recirculación estable

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

92

inducido por las unidades de suministro ubicadas en el techo, con flujos descendentes que alcanzan la zona ocupada y retornos ascendentes que completan bucles de circulación cerrada. No se observa interferencia de flujos externos ni zonas de alta turbulencia cerca de los accesos.

Desde el punto de vista térmico, el ambiente interior se mantiene en condiciones aceptables, aunque se observan ligeros incrementos de temperatura en la zona de ocupación, donde algunos cuerpos alcanzan valores entre 28 y 30 °C, superando marginalmente el umbral superior de confort. No obstante, las zonas periféricas y el volumen superior del recinto se mantienen entre 22 y 26 °C, indicando que el sistema HVAC logra compensar parcialmente las cargas internas, aunque con menor eficiencia que en escenarios anteriores con barreras activas. Se identifican focos de temperatura elevada en torno a los ocupantes, especialmente en la parte izquierda, posiblemente vinculados a la acumulación de carga térmica sin disipación localizada.

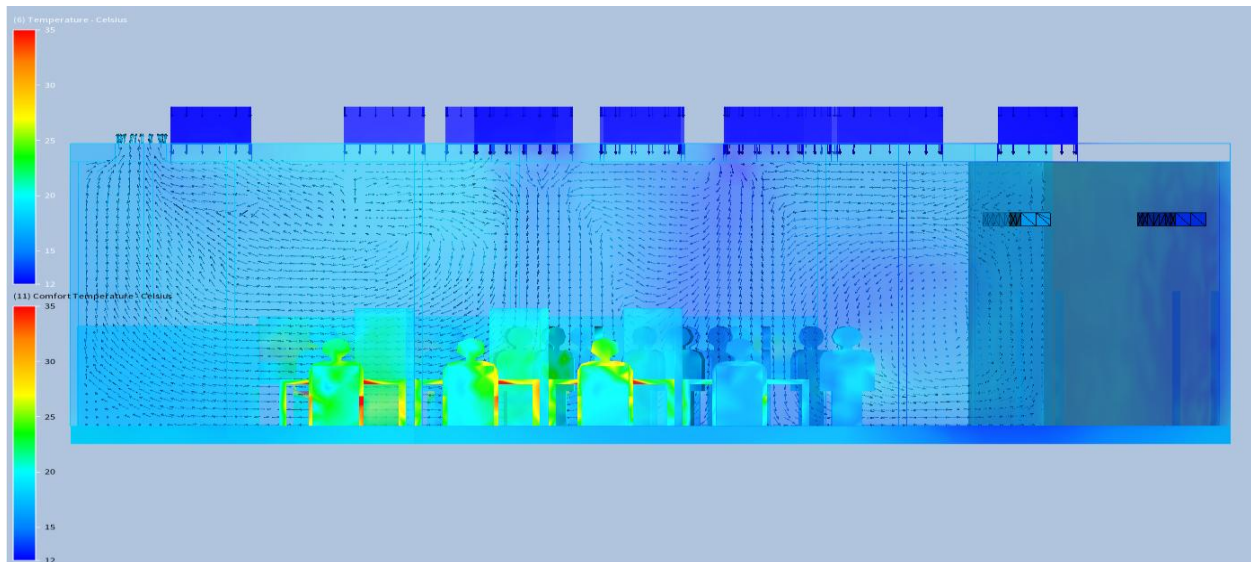


Ilustración 16. Escenario 3 puertas cerradas – sin cortinas de aire

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

93

El régimen de flujo corresponde a una condición de equilibrio aerodinámico completo, sin evidencias de infiltración o exfiltración. Las puertas cerradas actúan como barreras físicas efectivas, manteniendo el volumen de aire interior contenido, sin intercambio significativo con el ambiente exterior. Este comportamiento se traduce en una eficiencia pasiva elevada en términos de control térmico.

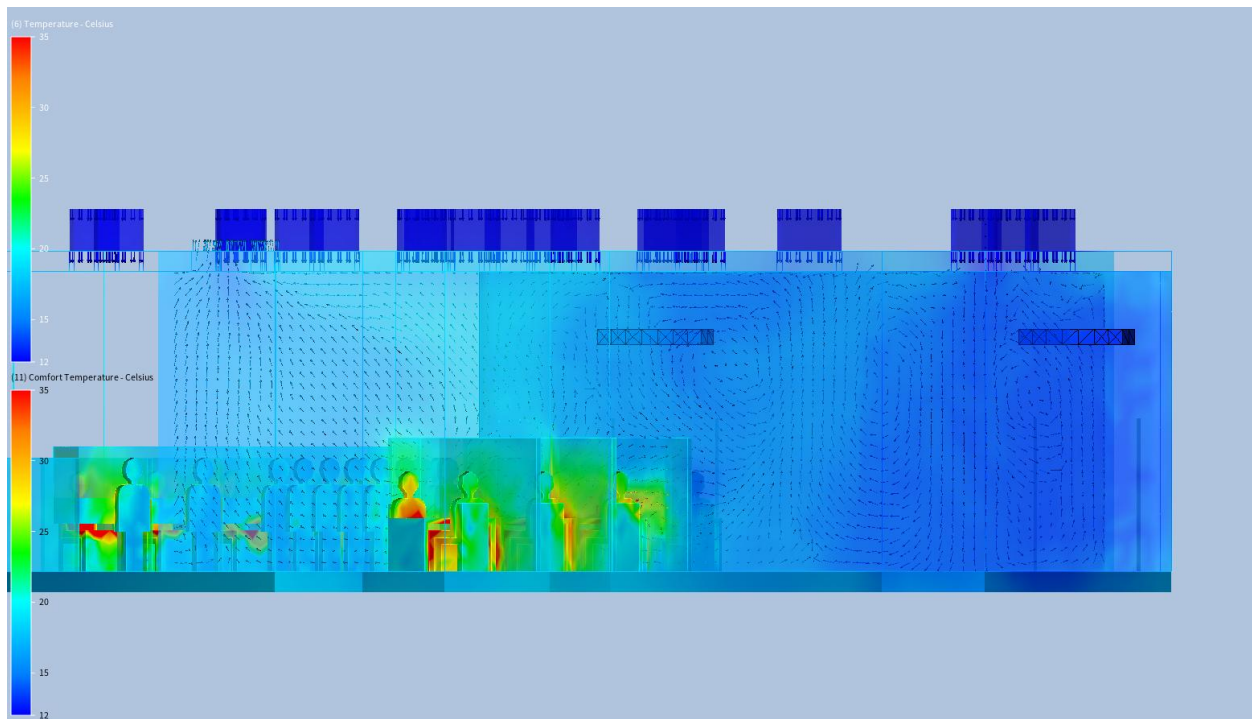


Ilustración 17. Escenario 3 puertas cerradas

En términos de desempeño global del sistema HVAC, este escenario ofrece una operación funcional, pero con márgenes de eficiencia térmica reducidos. Si bien se mantiene el aislamiento respecto al exterior gracias al cerramiento de puertas, la ausencia de cortinas de aire operativas

limita la capacidad del sistema para controlar microclimas locales. La calidad del aire y el confort térmico pueden degradarse en zonas específicas por falta de renovación puntual, lo que evidencia que, aún con puertas cerradas, las cortinas de aire pueden aportar beneficios en términos de distribución dinámica y modulación térmica del espacio interior.

4.6 Evaluación del ahorro energético

Con el fin de extender este análisis a condiciones específicas del caso de estudio, se tomarán como referencia los resultados obtenidos mediante simulaciones CFD desarrolladas para la oficina bancaria (recinto comercial climatizado). Estas simulaciones permiten estimar variables clave como la tasa de intercambio de aire, las distribuciones de temperatura y velocidad en el plano de la puerta, así como la posición del impacto del chorro. A partir de estos datos numéricos, se aplicarán las ecuaciones presentadas en el marco teórico de referencia, con el objetivo de cuantificar el ahorro energético en condiciones de operación del sistema y validar la efectividad del sistema de cortina de aire en el entorno simulado. Se realizarán los siguientes cálculos:

- Carga térmica sensible con cortina activa
- Carga térmica por infiltración sin cortina
- Eficiencia y efectividad de sellado
- Consumo energético relativo
- Coeficiente de Desempeño de la Cortina de Aire (COP_{at})
- Cálculo económico

4.6.1 Carga térmica sensible con cortina activa

Se calcula a partir de la fórmula

$$\dot{q}_j = \frac{\rho \cdot n \cdot V_{room} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{3600}$$

Siendo:

n cambios aire hora (ACH)

V_{room} volumen interior del recinto (m^3)

\dot{q}_j : carga térmica sensible (W)

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

n : tasa de cambios de aire por hora (ACH)

V_{room} : volumen del recinto (m^3)

c_p : calor específico del aire ($J/kg \cdot ^\circ C$)

T_{out} : temperatura del aire exterior ($^\circ C$)

T_{in} : temperatura interior deseada ($^\circ C$)

3600: conversión de horas a segundos

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

96

Datos de entrada:

- $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$
- $c_p = 1005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- $T_{\text{out}} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{\text{in}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

A partir de los valores tomados para la construcción del modelo en REVIT, se realiza un cálculo estimado del volumen del cuarto:

$$V_{\text{room}} = 16 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} = 1008 \text{ m}^3$$

Cálculo de los cambios hora:

Donde:

- $Q = 0.8616 \text{ m}^3/\text{s}$ (tomado de la simulación CFD, Outlet Flow Rate)
- $V = 1008 \text{ m}^3$

$$ACH = \frac{0.8616 \cdot 3600}{1008} = \frac{3101.76}{1008} \approx 3.08 \text{ ACH}$$

Con estos valores reemplazamos en la fórmula:

$$\dot{q}_j = \frac{14,943,974.4}{3600} \approx 4151.10 \text{ W}$$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

97

$$\dot{q}_j \approx 4.15 \text{ kW}$$

Nota: Donde \dot{q}_j es la carga sensible instantánea

Las pérdidas de energía resultantes de las fugas de aire a través de puertas pueden ser estimadas de una manera razonable tomando solamente la componente de calor sensible. (Neto & Gameiro Da Silva, 2008)

$$\dot{q}_0 = C_D \cdot A_D \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \cdot \rho_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_{out}}{\rho_{in}}\right)^{0.5} \cdot \sqrt{g \cdot H_p} \cdot \left(\frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_{in}}{\rho_{out}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)^{1.5}$$

C_D coeficiente de descarga (≈ 0.221)

A_D área del vano de puerta (m^2)

H_p altura del vano

c_p calor específico del aire

ρ densidades del aire interior y exterior

g gravedad

T_{out}, T_{in} temperaturas exteriores e interiores

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

98

Se tomas los datos:

- $C_D = 0.65$
- $A_D = 4.08 \text{ m}^2$
- $c_p = 1005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- $T_{\text{out}} - T_{\text{in}} = 4^\circ\text{C}$
- $\rho_{\text{in}} = 1.184 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_{\text{out}} = 1.165 \text{ kg/m}^3$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $H = 2.4 \text{ m}$

Cálculo término de densidades $\left(1 - \frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_{\text{in}}}\right)$

$$\left(1 - \frac{1.165}{1.184}\right)^{0.5} = (0.0160)^{0.5} \approx 0.126$$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

99

Raíz de gravedad por altura

$$\sqrt{9.81 \cdot 2.4} = \sqrt{23.544} \approx 4.85$$

Término de fracción cúbica de densidades:

$$\left(\frac{2}{1 + \left(\frac{1.184}{1.165} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)^{1.5} = \left(\frac{2}{1 + 1.0054} \right)^{1.5} = \left(\frac{2}{2.0054} \right)^{1.5} \approx (0.9973)^{1.5} \approx 0.996$$

Sustitución completa:

$$\dot{q}_0 = 0.65 \cdot 4.08 \cdot 1005 \cdot 4 \cdot 1.184 \cdot 0.126 \cdot 4.85 \cdot 0.996$$

$$\dot{q}_0 \approx 0.65 \cdot 4.08 \cdot 1005 \cdot 4 \cdot 1.184 \cdot 0.126 \cdot 4.85 \cdot 0.996 \approx 8082.2 \text{ W}$$

$$\dot{q}_0 \approx 8.08 \text{ kW}$$

4.6.2 Eficiencia y efectividad de sellado

$$\eta_v = \frac{n_0 - n_j}{n_0}$$

η_v Eficiencia de sellado, indica qué fracción del intercambio de aire fue eliminada por la cortina

respecto del caso base sin cortina.

n_j tasa de renovación de aire con cortina activa.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

100

n_0 tasa de renovación sin cortina (puerta abierta).

Se calculan los cambios hora de aire para el escenario sin cortina a partir del CFD

Caudal de salida desde el CFD: $Q_0 = 1.444 \text{ m}^3/\text{s}$

Cálculo:

$$n_0 = \frac{1.446 \cdot 3600}{1008} = \frac{5205.6}{1008} \approx 5.16 \text{ ACH}$$

$$\eta v = \frac{5.16 - 3.08}{5.16} = 5.162.08 \approx 0.4031$$

$$\eta v = 40.31\%$$

4.6.3 Consumo energético relativo

$$\text{energy cost ratio} = \frac{\dot{q}_j + \dot{q}_{AirCurtain}}{\dot{q}_0} \times 100$$

\dot{q}_j pérdida de calor con la cortina de aire activa.

\dot{q}_0 pérdida de calor sin cortina.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

101

Datos:

- $\dot{q}_j = 4.15 \text{ kW}$ (pérdida térmica con cortina)
- $\dot{q}_0 = 8.08 \text{ kW}$ (pérdida térmica sin cortina)
- $\dot{q}_{\text{AirCurtain}} = 177 \text{ W} = 0.177 \text{ kW}$ potencia eléctrica de la cortina se toma del catálogo de

las cortinas de aire. Tabla 2

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

Modelo	Velocidad	Potencia W	Tensión Volts	Frecuencia Hz	Intensidad A	Caudal a descarga libre m³/hr / CFM	Potencia sonora LwA	Uniformidad@ 2mts	Peso neto aprox. Kg
CAF 36	Baja	177	127	60	2.54	781 / 460	69	79%	17
	Alta	413	127		3.30	1,036 / 610	75		
CAF 48	Baja	236	127	60	3.10	1,152 / 678	69	91%	20.6
	Alta	559	127		4.60	1,536 / 904	75		
CAF 60	Baja	271	127	60	4.23	1,505 / 886	63	90%	26.2
	Alta	692	127		5.70	2,057 / 1,211	76		

Tabla 2. Características técnicas cortinas de aire

Nota: Se toman valores para una cortina CAF 36 de la marca S&P, para un caudal de 460 cfm, correspondiente con 177 W

$$\text{energy cost ratio} = \left(\frac{4.15 + 0.177}{8.08} \right) \times 100 = \left(\frac{4.327}{8.08} \right) \times 100 \approx 53.54\%$$

4.6.4 Coeficiente de Desempeño de la Cortina de Aire (COP_{at})

$$COP_c = \frac{q_m - q_{a,m}}{N}$$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

102

Donde:

q_m : transferencia de calor entre regiones sin el uso de cortinas de aire.

$q_{a,m}$: transferencia de calor entre regiones cuando las cortinas están en funcionamiento.

$q_m = 8.08 \text{ kW}$ → pérdida térmica sin cortina

$q_{a,m} = 4.15 \text{ kW}$ → pérdida térmica con cortina

$N = 0.177 \text{ kW}$ → potencia eléctrica de la cortina (dos cortinas de aire)

$N = 2 \times 0.177 \text{ kW} = 0.354 \text{ kW}$

$$COP_e = \frac{8.08 - 4.15}{0.354} = \frac{3.93}{0.354} \approx 11.1$$

Cálculo económico

$$Ahorro = \frac{\dot{q}_0 - \dot{q}_j}{COP} \cdot \text{costo kW/h}$$

- $\dot{q}_j = 4.15 \text{ kW}$
- $COP = 3.5$
- $\text{Costo}_{kW/h} = \$ 830 \text{ COP}$

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

103

$$\text{Ahorro} = \frac{8.08 - 4.15}{3.5} \cdot 830 = \frac{3.93}{3.5} \cdot 830 \approx 1.123 \cdot 830 \approx \$ 932 \text{ COP/h}$$

Ahorro horario: \$ 932 COP/h

Tiempo de operación: 10 horas/día

Días operativos al año: 365

$$\text{Ahorro anual} = (932 \text{ COP/h}) \cdot (10 \text{ h/día}) \cdot (365 \text{ días/año})$$

$$\text{Ahorro anual} = 932 \cdot 3650 = \$ 3.401.800$$

4.7 Análisis termográfico

Al realizar un análisis de las imágenes de termografía recopiladas en sitio utilizando para esta exploración, la cámara termográfica marca Flir Edge Pro, se observa claramente un punto de acceso de vidrio con estructura metálica, la cual es la puerta de ingreso a un recinto climatizado. En la parte superior de la Figura 20 en la abertura se aprecia un patrón térmico característico de un chorro de aire frío descendente. Este chorro aparece como una zona oscura (indicando temperaturas más bajas) con registros que oscilan entre 21.7 °C y 22.6 °C, mientras que la temperatura general del fondo de la imagen y del entorno inmediato se mantiene en el rango de 26.4 °C a 27.1 °C, en lo que podría interpretarse como una condición térmica interna estable.



Ilustración 18. Distribución térmica general del acceso principal

En el área inferior de la Ilustración 18, correspondiente a la zona de ocupación cercana al suelo, se identifican fuentes de calor localizadas —cuerpos humanos— con temperaturas de superficie que alcanzan hasta 33.9 °C, generando un contraste térmico marcado respecto al chorro frío. El gradiente de temperatura entre el aire inyectado y los cuerpos calientes supera los 11 °C, lo que sugiere una diferenciación clara de masas de aire y una baja mezcla convectiva en esa región.

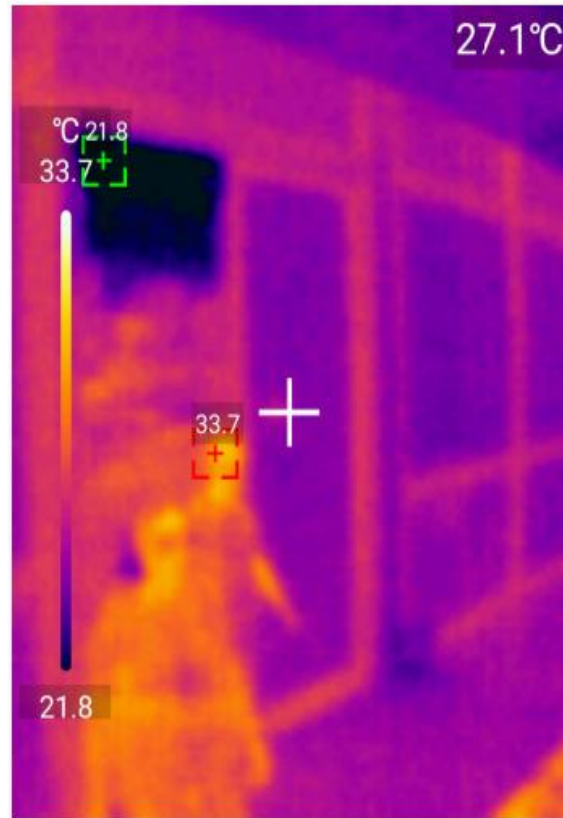


Ilustración 19. Identificación de cargas térmicas internas por ocupantes

La trayectoria del chorro frío es bien definida y vertical como se muestra en la Ilustración 19, sin desviaciones laterales visibles, lo que implica que la cortina de aire está funcionando con un nivel de estabilidad y simetría adecuado. Este patrón indica que la descarga desde la tobera posee suficiente impulso para llegar al nivel bajo sin romperse antes del impacto con el piso, cumpliendo con su función de separar físicamente el aire interior del aire exterior.

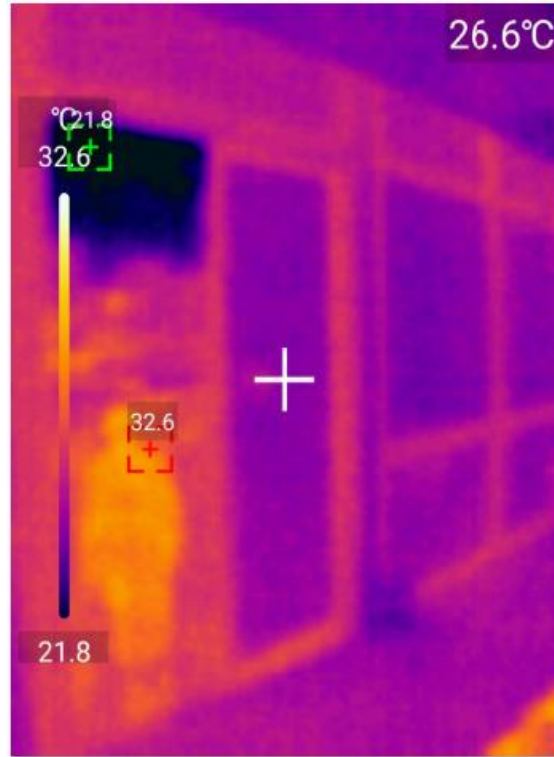


Ilustración 20. Trayectoria estable y vertical del chorro de aire frío

No se observan indicios de infiltración térmica lateral ni de entrada de aire caliente desde el exterior en la franja media del vano. Adicionalmente, la estabilidad del color térmico en los cristales adyacentes y en el marco indica que la envolvente mantiene una buena estanqueidad local sin fugas térmicas relevantes.

Al interpretar estos resultados térmicos en conjunto con los datos obtenidos en las simulaciones CFD para el escenario con cortina de aire activa (Escenario 1), se confirma la concordancia en el comportamiento aerotérmico del sistema. En la simulación, la velocidad máxima del flujo

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

107

vertical descendente alcanzó valores cercanos a 5,593 m/s, lo cual coincide con la evidencia de un chorro bien formado en las imágenes. Asimismo, el diferencial de masa entre el flujo entrante (3,442.2 g/s) y saliente (4,102.3 g/s) fue menor que en los escenarios sin cortina, lo que sugiere un control más eficiente de la exfiltración.

Los resultados de transferencia de calor por convección desde las superficies al aire (7,407.9 W) también reflejan un mejor rendimiento del sistema de climatización, al reducir la energía necesaria para compensar las pérdidas térmicas provocadas por el intercambio con el exterior. Este dato se complementa con una temperatura de salida del fluido de 18.1 °C, que concuerda con el patrón de aire frío observado térmicamente en el borde superior de la abertura.

Además, la temperatura promedio del volumen interior en CFD fue de 18.46 °C, un valor que, si bien no aparece explícitamente en la termografía por limitación de profundidad, es coherente con la estabilidad térmica percibida en el recinto. La baja dispersión del chorro en las imágenes indica un campo de velocidades uniforme, compatible con el modelo de turbulencia k- ϵ empleado en la simulación y con los valores moderados de energía cinética turbulenta registrados.

Finalmente, la validación cruzada entre la evidencia térmica real y los resultados numéricos permite confirmar que el sistema de cortinas de aire implementado contribuye de manera significativa a minimizar la transferencia térmica entre el interior y el exterior, restringiendo la infiltración de aire cálido, estabilizando la zona de ocupación y mejorando el desempeño global

del sistema HVAC. Esto refuerza la efectividad del diseño simulado y respalda la elección del escenario con cortina activa como el de mejor desempeño energético y confort térmico entre los tres estudiados.

4.8 Análisis de niveles de ruido

Las mediciones se realizaron empleando un sonómetro digital portátil modelo UNI-T UT353, calibrado para registrar valores en decibelios con ponderación A [dB(A)], bajo el modo de respuesta rápida (FAST). Cada lectura corresponde a una captura puntual del nivel de presión sonora en posiciones estáticas, con el equipo ubicado sobre superficies horizontales representativas del nivel de escucha de los ocupantes (mesas, escritorios o mostradores). No se consideró la variabilidad temporal, por lo tanto, los resultados no constituyen un nivel equivalente continuo (Leq), sino valores instantáneos de referencia.

Las mediciones fueron realizadas en condiciones normales de ocupación, sin interrupciones a las actividades cotidianas del espacio evaluado. El sonómetro fue sostenido en posición vertical con el micrófono orientado hacia la fuente de ruido predominante, a una distancia aproximada de 1.2 metros desde el suelo, replicando la altura promedio del oído humano en posición sentada. Las condiciones ambientales fueron estables, sin presencia de lluvias, vientos fuertes o alteraciones externas que pudieran distorsionar los registros. No se aplicó ningún tipo de corrección ni ponderación adicional, y cada valor reportado corresponde a una lectura directa mostrada en pantalla



Ilustración 21. Medición de nivel de presión sonora en zona de trabajo con sonómetro digital

Nota. Lectura puntual de nivel de ruido equivalente en modo FAST con el equipo UNI-T UT353, obtenida en zona de escritorio administrativo. Se registra un valor de 63.7 dB(A), dentro del rango aceptable según la Resolución 627 de 2006 para horario diurno en zonas de actividad mixta.

En Tabla 3 se presentan los valores obtenidos en las cuatro posiciones analizadas. Se incluye una estimación del tipo de zona, así como observaciones contextuales relevantes:

Nivel de ruido [db(A)]	Ubicación estimada	Observaciones
65.6	Escritorio	Nivel moderado, posible influencia HVAC
63.7	Escritorio	Descenso leve, ambiente estable
67.2	Zona común	Nivel máximo, posible presencia de múltiples fuentes
67.1	Mostrador de atención/coworking	Conversaciones cercanas o equipos activos

Tabla 3. Niveles de presión sonora registrados según ubicación dentro del recinto evaluado

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE
CORTINAS DE AIRE

110

Nota. Valores instantáneos capturados con sonómetro UNI-T UT353 en modo FAST, expresados en dB(A). Las mediciones fueron realizadas bajo condiciones normales de ocupación y operación durante horario diurno.

Los valores registrados se encuentran en un rango de 63.7 a 67.2 dB(A), con un promedio simple de 65.9 dB(A). Este promedio ofrece una referencia general del comportamiento acústico del espacio en condiciones normales de ocupación.

Según la Resolución 627 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, la cual establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido ambiental según la zonificación de usos del suelo. En el caso de zonas de actividad mixta, que incluyen usos comerciales, administrativos y de servicios, los valores límite aplicables son:

- 70 dB(A) para el periodo diurno (07:00 a 21:00 horas)
- 60 dB(A) para el periodo nocturno (21:01 a 06:59 horas)

Ninguno de los valores registrados supera el límite de 70 dB(A) para el periodo diurno, lo cual indica cumplimiento normativo en este rango horario. No obstante, si las mediciones hubiesen sido realizadas durante el periodo nocturno, los valores más altos (67.1 y 67.2 dB(A)) excederían el límite permitido, por lo cual es necesario tener claridad sobre el horario efectivo de toma de datos.

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

111

Es importante señalar que el cumplimiento con los valores límite no garantiza necesariamente un ambiente acústicamente confortable, ya que las normas establecen umbrales máximos de exposición, pero no condiciones óptimas para actividades específicas. Por ejemplo, tareas que requieren alta concentración, comunicación constante o privacidad pueden verse afectadas negativamente incluso en ambientes que cumplen con los límites legales.

Conclusiones:

-Recibir los planos arquitectónicos de la oficina bancaria por parte del cliente fue crucial para la construcción del modelo tridimensional en Revit, permitiendo identificar zonas críticas expuestas a infiltración y definir adecuadamente el dominio de simulación CFD. Con base en esta información se pudo modelar las entradas y suministros de aire, ubicación de equipos, distribución del mobiliario y zonas de ocupación.

-La caracterización de las condiciones ambientales de Cali en el último trimestre permitió establecer un rango térmico representativo para las simulaciones, con temperaturas exteriores promedio entre 32 °C y 35 °C. Esta información fue clave para definir las condiciones de frontera en el modelo CFD y calcular con precisión la carga térmica externa por infiltración.

-El cálculo de las cargas térmicas sensibles y latentes, basado en la ocupación, equipos y condiciones internas del recinto, evidenció que la carga sensible representa el componente

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

112

dominante en el balance térmico de la oficina bancaria. La modelación en CFD, que integró fuentes térmicas de 100 W/persona y 170 W/equipo, confirmó que la interacción entre estas cargas internas y la infiltración exterior incrementa significativamente la carga total cuando no hay dispositivos de sellado aerodinámico.

Este resultado valida que las condiciones reales de operación exceden la capacidad térmica proyectada por el sistema HVAC si no se controlan las fuentes de calor internas y el ingreso de aire exterior.

-La validación mediante simulación CFD demostró que el sistema de aire propuesto por el diseñador HVAC no es suficiente para mantener condiciones térmicas de confort en escenarios con puertas abiertas sin cortinas de aire. Aunque el sistema logra un desempeño aceptable en condiciones ideales (puertas cerradas), presenta sobrecarga térmica y pérdida de eficiencia en presencia de infiltración no controlada. El sistema carece de mecanismos de compensación dinámica ante variaciones de presión y apertura, lo que compromete la estabilidad térmica del recinto.

-La estimación del flujo de aire exterior mediante el modelo de Yuill permitió cuantificar un flujo másico de infiltración cercano a 4093 g/s en el escenario sin cortinas, validado por la simulación CFD. Este valor, correspondiente a condiciones de puertas abiertas sin control,

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

113

representa una carga térmica significativa que impacta directamente la capacidad de enfriamiento requerida. La magnitud del flujo confirma la necesidad de una barrera aerodinámica activa capaz de contener ese volumen de aire, especialmente en un entorno con alta frecuencia de apertura de puertas automáticas

-Las mediciones termográficas realizadas permitieron visualizar con precisión la trayectoria y comportamiento térmico del chorro frío generado por la cortina de aire en funcionamiento. Las imágenes mostraron una columna de aire descendente bien definida, sin desviaciones laterales ni ruptura del chorro, con temperaturas entre 21.7 °C y 22.6 °C, contrastando claramente con los cuerpos calientes en la zona ocupada (hasta 33.9 °C). No se observaron signos de infiltración térmica lateral ni ingreso de aire caliente, lo que confirma un adecuado sellado aerodinámico. Además, los resultados coincidieron plenamente con los valores obtenidos por simulación CFD, validando el comportamiento físico del sistema bajo operación real

-Las mediciones realizadas con el sonómetro indicaron que los niveles de presión sonora en la oficina bancaria se mantienen por debajo del límite diurno de 70 dB(A) establecido por la Resolución 627 de 2006. El valor promedio fue 65.9 dB(A), lo que indica ausencia de sobreexposición. Sin embargo, dos puntos alcanzaron valores cercanos al umbral (67.1 dB(A) y 67.2 dB(A)), lo que sugiere potencial incomodidad acústica si estas condiciones persisten o

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

114

se intensifican. Estos niveles se atribuyen a fuentes combinadas como equipos HVAC, actividad humana y posibles ruidos externos

-Se logro que nuestro cliente implementara la utilización de las cortinas de aire de aire en su oficina bancaria ubicada en Mall Plaza Cali para el análisis de este estudio, las cuales garantizaron una disminución de las temperaturas de confort al interior del hall bancario.

-Se puede concluir que la eficiencia de una cortina de aire depende de una correcta instalación, selección del caudal de aire adecuado, un flujo uniforme, elección del tipo de ventilador y un ángulo de descarga optimizado para la altura y ancho de la puerta.

-Finalmente en esta oficina bancaria, nuestro cliente podría lograr un ahorro anual estimado de \$ 3'401.800 los cuales se verán reflejados en los costos de facturación que le emitirá su operador energético.

5 Recomendaciones:

-Realizar una validación del sistema HVAC para establecer claramente cargas sensibles y latentes, incorporando parámetros reales de ocupación y uso de equipos, para integrar esto como fuentes activas en simulaciones CFD. Esto permite evaluar con mayor precisión el

REDUCCION DE LA CARGA TERMICA MEDIANTE LA INSTALACION DE CORTINAS DE AIRE

115

comportamiento térmico del recinto y seleccionar estrategias complementarias (como cortinas de aire) que reduzcan la carga sensible total.

-Se recomienda seleccionar cortinas de aire con una capacidad mínima de 500 cfm por unidad y un número de Reynolds superior a 40.000, lo cual garantiza un chorro bien definido con penetración suficiente hasta el suelo. La presión del entorno, el diferencial de temperatura entre el interior y el exterior, así como la altura del vano, deben ser tenidos en cuenta para este dimensionamiento. Adicionalmente, debe validarse en simulación CDF la trayectoria del flujo de aire para validar desviaciones laterales y poder asegurar un sellado aerodinámico efectivo.

-La implementación de cortinas de aire en la oficina bancaria permitió una reducción significativa de la carga térmica sensible, pasando de 8.08 kW (sin cortina) a 4.15 kW (con cortina), lo que representa un ahorro térmico superior al 48.6 %. Al comparar esta reducción con el consumo eléctrico de dos cortinas CAF-36 (total 354 W), se obtuvo un COPc de 11.1, confirmando un desempeño energético favorable. El análisis económico proyectado mostró que este ahorro térmico se traduce en reducciones anuales considerables en consumo eléctrico y costos operativos, validando la efectividad de las cortinas como estrategia de eficiencia energética.

Referencias Bibliográficas:

- Alamdari, F. (1997). *Air-Curtains-Commercial-Applications*.
- Alanis Ruiz, C., van Hooff, T., Blocken, B., & van Heijst, G. J. (2021). Air curtain performance: Introducing the adapted separation efficiency. *Building and Environment*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107468>
- Allard F, & Utsumi Y. (n.d.). *AIRFLOW THROUGH LARGE OPENINGS*.
- ASHRAE. (2007). *2007 ASHRAE handbook: heating, ventilating, and air-conditioning applications*. ASHRAE.
- ASHRAE. (2009). *2009 Ashrae Handbook: fundamentals*. ASHRAE.
- BERNER I. C. (2021). *Air Curtains: a Proven Alternative to Vestibule Design*. <http://ars.usda.gov/is/AR/archive/apr07/>
- Bleier P. Frank. (1997). *Fan Handbook, Selection, Application and Design*.
- Cho H, G. K. L. B. (2010). *Energy Saving Impact of ASHRAE 90.1 Vestibule Requirements: Modeling of Air Infiltration through Door Openings*.
- Costa J. J, O. L. A. S. M. C. G. (2006). Energy savings by aerodynamic sealing with a downward-blowing plane air curtain-A numerical approach. *Energy and Buildings*, 38(10), 1182–1193. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.02.003>
- Gonçalves, J. C., Costa, J. J., Figueiredo, A. R., & Lopes, A. M. G. (2012a). CFD modelling of aerodynamic sealing by vertical and horizontal air curtains. *Energy and Buildings*, 52, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.007>

- Gonçalves, J. C., Costa, J. J., Figueiredo, A. R., & Lopes, A. M. G. (2012b). Study of the aerodynamic sealing of a cold store - Experimental and numerical approaches. *Energy and Buildings*, 55, 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.021>
- Goubran, S. (2016). *Energy Saving Impact of Air Curtains in Commercial Buildings*.
- Goubran, S., Qi, D., Saleh, W. F., Wang, L. L., & Zmeureanu, R. (2016). Experimental study on the flow characteristics of air curtains at building entrances. *Building and Environment*, 105, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.037>
- Goubran, S., Qi, D., & Wang, L. L. (2017). Assessing dynamic efficiency of air curtain in reducing whole building annual energy usage. *Building Simulation*, 10(4), 497–507. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0349-0>
- Munson, O., & Rothmayer, H. (2013). *Fluid Mechanics*.
- Neto, L. P. C., & Gameiro Da Silva, M. (n.d.). *Use of air curtains on acclimatized commercial establishments-critical analysis*.
- Raphe, P., Lateb, M., Denaclara, J. Y., Fellouah, H., & Ameer, M. (2024). Numerical investigation of the thermal efficiency of a multi-nozzle air curtain doorway under different wind conditions. *Journal of Building Engineering*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109073>
- Shen, C., Shao, X., & Li, X. (2017). Potential of an air curtain system orientated to create non-uniform indoor thermal environment and save energy. *Indoor and Built Environment*, 26(2), 152–165. <https://doi.org/10.1177/1420326X16659329>
- Sirén, K. (2002a). *Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain-part I*.

- Sirén, K. (2002b). *Technical dimensioning of a vertically upwards-blowing air curtain-part II*.
- Song L, L. K. (2023). Differentiated Control of Large Spatial Environments: Air Curtain Grid System. *Sustainability (Switzerland)*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/su15065489>
- Strongin, A. S., & Zhivov, A. M. (2021). Energy Efficient Air Curtains for Industrial Gates in Cold Climates. *E3S Web of Conferences*, 246. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124608005>
- Van Belleghem, M., Verhaeghe, G., T'Joel, C., Huisseune, H., De Jaeger, P., & De Paepe, M. (2012). Heat transfer through vertically downward-blowing single-jet air curtains for cold rooms. *Heat Transfer Engineering*, 33(14), 1196–1206. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.677724>
- van der Maas J. (1992). *AIR FLOW THROUGH LARGE OPENINGS IN BUILDINGS*.
- Viegas, J. C. G. (2021). Full-size experimental assessment of the aerodynamic sealing of low velocity air curtains. *Fluids*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/fluids6100359>
- Wang, L. L., & Zhong, Z. (2014). An approach to determine infiltration characteristics of building entrance equipped with air curtains. *Energy and Buildings*, 75, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.020>
- Yuill, G. K. (1996). *Air Leakage Through Automatic Doors*.
- Zhivov, A., & Strongin, A. (2024). *Air Curtains for Buildings and Industrial Processes*.
- Zhou, Z., Lu, Y., & Cui, Y. (2021). Study on the effect of jet direction of compound air curtain on smoke control. *Energies*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/en14216983>