

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Diseño de un sistema de ventilación mediante el uso de CFD

Carlos Alberto Marín Tovar

Andrés Proaño, Ing., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención
del título de Ingeniero Mecánico

Quito, Mayo de 2013

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Diseño de un sistema de ventilación mediante el uso de CFD

Carlos Alberto Marín Tovar

Andres Proaño, Ing.
Director de la Tesis y Miembro del Comité de Tesis

Jesús Portilla, PhD.
Asesor de la Tesis y Miembro del Comité de Tesis

Víctor Hidalgo, Msc.
Asesor de la Tesis y Miembro del Comité de Tesis

Alfredo Valarezo, PhD.
Director del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ximena Córdova, PhD.
Decana de la Escuela de Ingeniería
Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, Mayo de 2013

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Carlos Alberto Marín Tovar

C.I.: 1717822496

Fecha: Mayo de 2013

Dedicatoria

A Dios y a mi familia.

Sin ellos hubiera sido imposible cumplir esta meta.

Resumen

La presente tesis consiste en el diseño de un sistema de ventilación mecánica, para extracción de gases de los parqueaderos subterráneos del proyecto “Elit Centro de Negocios”, a construirse en la ciudad de Quito. Se utilizó un sistema alternativo al tradicional, el cual basa su funcionamiento en conductos de ventilación, ventiladores axiales y ventiladores por impulsión (*Jet fans*). El aire ingresa del exterior por los conductos de inyección, los *jet fans*, ubicados en el techo de los subsuelos, conducen el aire por el interior del parqueadero y, los conductos de extracción lo expulsan al exterior.

Para realizar el diseño se consideraron normas como la ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineer), las que brindan recomendaciones para garantizar el buen funcionamiento del sistema. Fue necesario calcular la tasa de flujo volumétrico requerida por el parqueadero, el fabricante, el modelo y la cantidad de ventiladores, así como los componentes adicionales del sistema. Para optimizar la ubicación de los *jet fans*, se realizó una simulación CFD (dinámica de fluidos computacional) del comportamiento del aire en el interior del parqueadero.

Finalmente, se realizó un presupuesto referencial del costo de los equipos, al que deberán sumarse los costos de instalación.

Abstract

This project report shows the design of a mechanical ventilating system for gas extraction from the underground parking lot at the "Elit Centro de Negocios" building in Quito-Ecuador.

The designed system is based on the functionality of ventilation ducts, axial fans and jet fans. The process starts with air, entering from outside through injection ducts, then jet fans located on the ceiling of the parking garages move the air around and inside of the underground parking. Finally, the extraction ducts expel the air to the outside.

In order to develop this design, standards such as the ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineer) were utilized. These standards provide recommendations that guarantee the ideal functionality of this system. The volumetric flow rate needed for the underground parking, number of fans and additional components of the system were calculated. Manufacturers, and models for all components were also selected. In order to optimize the location of the jet fans, a CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation of the air inside of the underground parking was carried out.

Finally, a referential budget of the cost of the equipment was determined, along with additional costs regarding imported materials and labor.

Índice General

Dedicatoria.....	5
Resumen.....	6
Abstract.....	7
1. Información Preliminar y Metodología del Proyecto.....	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Antecedentes.....	14
1.3 Objetivos del Proyecto.....	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 Descripción del Problema.....	17
1.4.1 Gases Contaminantes.....	17
1.4.2 Ventilación Mecánica.....	18
1.4.2.1 Ventiladores.....	18
1.4.2.1.1 Ventiladores Axiales.....	19
1.4.2.1.2 Ventiladores de Impulso (<i>Jet fans</i>).....	20
1.4.2.2 Sistema de detección de CO.....	22
1.4.2.3 Filtros para suministro de aire.....	23
1.4.2.4 Reguladores motorizados (<i>Dampers</i>).....	24
1.4.2.5 Paneles de control.....	25
1.4.2.6 Rejillas de inyección y descarga exteriores (<i>Louvers</i>).....	25
1.4.2.7 Selección de fabricante.....	26
1.5 Metodología.....	27
1.5.1 Requerimientos de Aire.....	27
1.5.2 Concentración.....	28
1.5.3 Flujo volumétrico y flujo másico.....	28
1.5.4 Cálculo de pérdidas en el conducto.....	29
1.5.4.1 Número de Reynolds.....	29
1.5.4.2 Cálculo del factor de fricción para un flujo turbulento.....	30
1.5.5 Normas para el diseño.....	30
1.6 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	31
1.6.1 Mallado.....	31
1.6.2 Método de volúmenes finitos.....	32
1.6.3 Condiciones de Contorno.....	32
1.6.4 Selección del Software.....	32
2. Diseño del Sistema de Ventilación.....	34
2.1 Sistema de Extracción.....	34
2.1.1 Áreas de conductos (Torres).....	34
2.1.2 Tasa de flujo volumétrico por torre extracción.....	36
2.1.3 Ventiladores Axiales.....	37
2.1.3.1 Selección utilizando curvas de rendimiento.....	39

2.1.3.2	Selección utilizando “ <i>Novenco AirBox</i> ”.....	40
2.1.4	Reguladores o <i>Dampers</i> motorizados y Rejillas internas.....	41
2.1.5	Rejillas exteriores o <i>louvers</i> de descarga.....	43
2.1.5.1	<i>Louver</i> de descarga E1.....	44
2.1.5.2	<i>Louvers</i> de descarga restantes.....	45
2.2	Sistema de Inyección.....	46
2.2.1	Ingreso de aire por las rampas exteriores.....	46
2.2.2	Suministro de aire por los conductos de inyección.....	47
2.2.3	Áreas de conductos (Torres).....	48
2.2.4	Tasa de flujo volumétrico por torre inyección.....	49
2.2.5	Ventiladores Axiales.....	50
2.2.6	Reguladores o <i>Dampers</i> motorizados y Rejillas internas.....	51
2.2.7	Rejillas exteriores o <i>louvers</i> de toma de aire.....	51
2.2.8	Filtros de Aire.....	52
2.3	Sistemas Adicionales.....	53
2.3.1	Ventiladores tipo Jet fan.....	53
2.3.2	Sistema de detección de CO.....	54
3.	Simulación y modelos mediante CFD.....	55
3.1	Velocidades de aire en el parqueadero.....	55
3.1.1	Condiciones de borde.....	59
3.1.2	Resultados.....	65
3.2	Análisis con <i>Jet fans</i>	68
3.2.1	Convergencia del resultado mediante gráfico de residuales.....	80
3.2.2	Cálculo de renovaciones de aire y total de <i>Jet fans</i> requeridos.....	81
4.	Presupuesto para la implementación del proyecto.....	82
4.1	Ventiladores Axiales tipo ACN.....	82
4.2	Ventiladores de Impulso JetFans.....	82
4.3	Reguladores Motorizados y Rejillas de Extracción e Inyección.....	83
4.4	<i>Louvers</i> de Carga y Descarga.....	84
4.5	Detectores de CO.....	84
4.6	Panel de Control para Monitoreo.....	84
4.7	Filtros para Torres de Inyección.....	85
4.8	Presupuesto Total Requerido.....	85
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	87
5.1	Conclusiones.....	87
5.2	Recomendaciones.....	88
	Bibliografía.....	89
	Anexos.....	90
A.	Planos del Proyecto.....	91
B.	Condiciones de Borde.....	92

Índice de Figuras

1.1	Representación 3D del proyecto “Elit Centro de Negocios”	14
1.2	Vista en planta de la plaza del proyecto y ubicación de conductos de ventilación	15
1.3	Ilustración de un ventilador axial	20
1.4	Ubicación de un <i>Jet fan</i> entre las vigas	20
1.5	Especificaciones de los <i>Jet fans</i> marca Novenco	21
1.6	Esquema de un AUT-400	21
1.7	Ilustración de un <i>Jet fan</i> AUT-400	22
1.8	Sistema de detección de CO	23
1.9	Tamaño, flujo volumétrico y SP de filtros Flanders FCP	24
1.10	Accesorios de ventilación mecánica	25
1.11	Ilustración de un <i>Louver</i>	26
1.12	Área de descarga y toma de aire	31
1.13	Simulación CFD realizada por COLT	33
2.1	Corte de un conducto de extracción	36
2.2	Curvas de rendimiento, ACN-1470 RPM	40
2.3	Vista en planta de la descarga de del conducto E1	44
2.4	Corte A-A’ de la figura 2.3	44
2.5	Área disponible para descarga	44
3.1	Nivel -12.6 y área útil	55
3.2	Geometría extruida	56
3.3	Mallado sobre el modelo	57
3.4	Ubicación de condiciones de borde en el N -12.6	58
3.5	Ubicación del plano y líneas de corriente	58
3.6	Ubicación de condiciones de borde (N 0.0)	59
3.7	Ubicación de condiciones de borde (N -3.6)	60
3.8	Ubicación de condiciones de borde (N -9.0)	61
3.9	Ubicación de condiciones de borde (N -12.6 y N -16.20)	62
3.10	Ubicación de condiciones de borde (N -19.8)	64
3.11	Resultado de la Simulación (N 0.0)	65
3.12	Resultado de la Simulación (N -3.6)	65
3.13	Resultado de la Simulación (N -9.0)	66
3.14	Resultado de la Simulación (N -12.6)	66
3.15	Resultado de la Simulación (N -16.2)	67
3.16	Resultado de la Simulación (N -19.8)	67
3.17	Representación en el modelo de los ventiladores por impulso	68
3.18	Análisis con <i>Jet fans</i> (N 0.0)	69
3.19	Análisis con <i>Jet fans</i> (N -3.6)	70
3.20	Análisis de renovaciones en zona crítica (N -3.6)	71
3.21	Análisis con <i>Jet fans</i> (N -9.0)	72
3.22	Análisis de renovaciones en zona crítica (N -9.0)	73
3.23	Análisis con <i>Jet fans</i> (N -12.6)	74

3.24	Análisis de renovaciones en zona crítica (N -12.6).....	75
3.25	Análisis con <i>Jet fans</i> (N -16.2).....	76
3.26	Análisis de renovaciones en zona crítica (N -16.2).....	77
3.27	Análisis con <i>Jet fans</i> (N -19.8).....	78
3.28	Análisis de renovaciones en zona crítica (N -19.8).....	79
3.29	Residuales de masa y momento.....	81
4.1	Ventilador axial ACN Novenco.....	82

Índice de Tablas

1.1	Dimensiones de un <i>Jet fan</i> AUT-400.....	22
1.2	Selección de fabricantes para todos los componentes.....	27
2.1	Caudal requerido por niveles.....	34
2.2	Áreas de torres de Extracción en m^2	35
2.3	Primera aproximación de los caudales en cada eje de extracción.....	37
2.4	Caudales en cada eje de extracción.....	37
2.5	Numero de Reynolds, factor de fricción y factor de pérdidas por conducto.....	38
2.6	Pérdidas por accesorio.....	38
2.7	Cantidad de Ventiladores por Conducto de extracción y cargas eléctricas.....	39
2.8	Dimensiones de Reguladores de Aire y Rejillas de Extracción.....	43
2.9	<i>Louvers</i> de Descarga sobre la Plaza.....	45
2.10	Velocidad de aire por las rampas.....	47
2.11	Inyección de aire por subsuelo.....	48
2.12	Áreas de las torres de Inyección en m^2	48
2.13	Primera aproximación de los caudales en cada eje de inyección.....	49
2.14	Caudales en cada eje de inyección.....	49
2.15	Cantidad de Ventiladores por Conducto de inyección y cargas eléctricas.....	50
2.16	Numero de Reynolds, factor de fricción y factor de pérdidas por conducto.....	50
2.17	Dimensiones de Reguladores de Aire y Rejillas de Inyección.....	51
2.18	<i>Louvers</i> de Toma de aire sobre la Plaza.....	52
2.19	Cantidad de filtros por Torres de Inyección.....	52
2.20	Cantidad de <i>Jet fans</i> por nivel.....	53
2.21	Resumen Sensores de CO.....	54
3.1	Definición de Condiciones de borde N 0.0.....	60
3.2	Definición de Condiciones de borde N -3.6.....	61
3.3	Definición de Condiciones de borde N -9.0.....	62
3.4	Definición de Condiciones de borde N -12.6.....	63
3.5	Definición de Condiciones de borde N -16.2.....	63
3.6	Definición de Condiciones de borde N -19.8.....	64
3.7	Características de la malla.....	68
3.8	Velocidades promedio (N -3.6).....	72
3.9	Velocidades promedio (N -9.0).....	74
3.10	Velocidades promedio (N -12.6).....	76
3.11	Velocidades promedio (N -16.2).....	78
3.12	Velocidades promedio (N -19.8).....	80
4.1	Ventilador axial ACN Novenco.....	83
4.2	Presupuesto de equipos en dólares.....	86

1. Información Preliminar y Metodología del Proyecto

1.1 Introducción

En el presente proyecto se desarrollará el diseño de un sistema de ventilación mecánica, cuyo objetivo es extraer gases de parqueaderos subterráneos de grandes dimensiones. El sistema más conocido y aplicado en el mercado nacional, es el de ductos y rejillas. Sin embargo, por la experiencia adquirida en una empresa de climatización, en el área de diseño e instalación de sistemas de ventilación mecánica en varios proyectos, se puede señalar que el sistema de ductos y rejillas, no es el más eficiente debido a factores como los siguientes:

- Se requiere un largo período de tiempo para el diseño, construcción e instalación de las redes ductos.
- Alto costo de la mano de obra necesaria para la instalación del sistema.
- Dificultad en el mantenimiento y operación del sistema.
- Pérdida de presión a lo largo de los ductos, debido al recorrido necesario para cubrir las áreas que requieren ventilación.
- Disminución del espacio útil en altura entre el piso y techo, especialmente en los sectores de vigas descolgadas.
- Excesivo consumo de energía eléctrica, debido a la falta de regulación del sistema, que opera a su máxima capacidad.

Por factores como los señalados, se plantea un sistema de ventilación mecánica alternativo al tradicional, que permitirá ventilar adecuadamente ambientes cerrados de grandes dimensiones. Este sistema se basa en la utilización de ventiladores para extracción e inyección de aire, ubicados en ductos diseñados para este efecto, los que con la ayuda de

ventiladores de menor magnitud, distribuidos en el ambiente a ventilar, transportarán el aire desde los puntos de inyección hacia los de extracción. Los ventiladores son de velocidad variable, lo que permite ventilar el ambiente en función de la necesidad en un momento determinado y no siempre a su máxima potencia.

El presente trabajo consiste en el diseño de un sistema de ventilación mecánica, para los parqueaderos de un edificio, utilizando la alternativa antes indicada y, con la ayuda de una simulación CFD (dinámica de fluidos computacional), se podrá comprobar la eficiencia del sistema, previo a la instalación.

1.2 Antecedentes

En la ciudad de Quito, desde el año 2012, se proyecta uno de los primeros edificios de altura (40 pisos), denominado ELIT CENTRO DE NEGOCIOS, con 6 subsuelos de grandes dimensiones (alrededor de 20 000 m^2 cada uno), los que requieren un apropiado sistema de ventilación. El sistema tradicional de ventilación mecánica (ductos de tol galvanizado y rejillas) no es la mejor solución, por lo que se ha propuesto utilizar el sistema de ventilación alternativo.



Figura 1.1. Representación artística del proyecto “Elit Centro de Negocios” [1]

Este sistema requiere de varios conductos verticales destinados a la inyección y extracción de aire. En un costado del edificio se ubicarán los conductos correspondientes a la extracción de aire y en el otro extremo, los de inyección de aire. En los conductos verticales de ventilación es necesario instalar ventiladores axiales (ver sección 1.4.2.1.1). En cada subsuelo se colocarán reguladores motorizados (ver sección 1.4.2.4), que permitan forzar el aire exterior hacia el interior de cada estacionamiento o, evacuar el aire contaminado hacia el exterior, dependiendo si el conducto está destinado a inyección o extracción respectivamente. En la figura 1.2 se presenta una vista en planta de la Plaza del proyecto, en la que con color verde se indican las torres de inyección y con color rojo las de extracción.

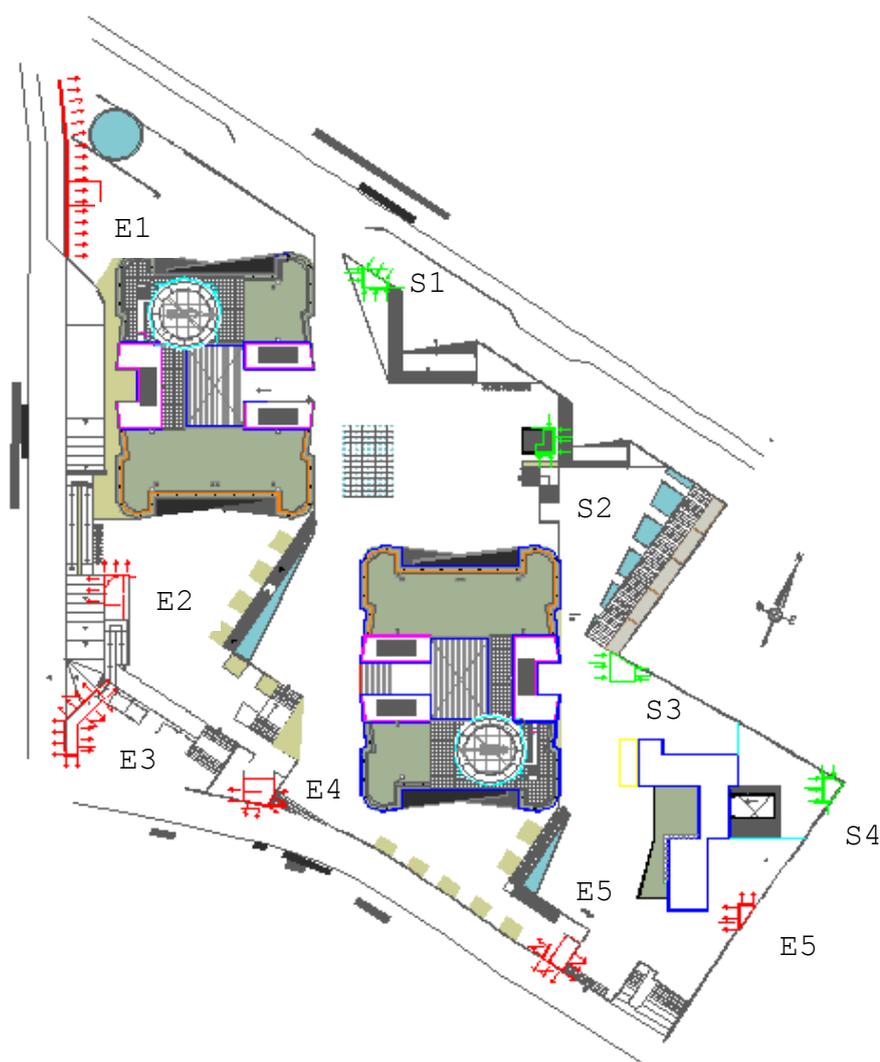


Figura 1.2 Vista en planta de la plaza del Proyecto y ubicación de conductos de ventilación [1]

El sistema incluye la instalación de ventiladores por impulso conocidos como *Jet Fans*, en el techo del subsuelo (ver sección 1.4.2.1.2), que permiten trasladar el aire contaminado desde las áreas de inyección hacia las áreas de extracción.

Se puede garantizar el funcionamiento de este sistema mediante una simulación CFD, la que permite comprobar la correcta ubicación de los *Jet Fans*, de acuerdo a la velocidad de circulación del aire. Existen varios paquetes informáticos con los que se puede realizar este análisis, por lo que, se deberá elegir el programa indicado tomando en cuenta la aplicación que se requiere, su exactitud y su facilidad de uso.

1.3 Objetivos del Proyecto

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de ventilación mecánica para la extracción de gases, de los parqueaderos subterráneos del Edificio ELIT CENTRO DE NEGOCIOS, mediante la utilización de ventiladores tipo Jet, comprobando el funcionamiento de la red con un análisis CFD, con el fin de optimizar recursos y espacio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una investigación en el mercado, para conocer qué productos se ofrecen y determinar el proveedor adecuado para los ventiladores.
- Establecer los parámetros que intervienen en el cálculo de la tasa de flujo volumétrico, aplicando recomendaciones de la ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineer), para definir las características de los componentes del sistema.

- Determinar la ubicación óptima de los *Jet fans* en los subsuelos, mediante simulaciones CFD, para conocer el comportamiento del aire.
- Elaborar el presupuesto referencial de los equipos a utilizar para la implementación del proyecto, con el fin de conocer la magnitud de la inversión requerida.

1.4 Descripción del Problema

Un parqueadero subterráneo es un ambiente cerrado, en el que existe un alto grado de contaminación debido a los gases que emiten los automotores, por lo que, es necesaria una correcta renovación de aire. Un ambiente cerrado no permite un flujo adecuado de aire fresco hacia su interior, y es necesario implementar un sistema de ventilación forzada.

1.4.1 Gases Contaminantes

Los gases desprendidos por los automotores están formados por:

- Monóxido de Carbono.
- Dióxido de Carbono.
- Óxido de Nitrógeno.
- Dióxido de Azufre.

Los gases mencionados, en su mayoría son tóxicos, pero no afectan la salud porque se diluyen rápidamente en el aire y bajan su concentración a límites no peligrosos. El gas más perjudicial de los señalados es el Monóxido de Carbono (CO) y es el que interesa diluir a una concentración inferior a 120 p.p.m.¹ [2] de acuerdo a la ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineer). El CO tiene afinidad con la

¹ Partículas por millón (p.p.m.): Unidad con la cual se mide la concentración. Se refiere a la concentración de una sustancia en otra.

hemoglobina y forma carboximoglobina, lo que impide a la sangre el transporte y entrega de oxígeno a los tejidos [3].

1.4.2 Ventilación Mecánica

Se refiere a la inyección o extracción de aire a un ambiente, mediante la ayuda de ventiladores y puede ser mediante tres sistemas:

- Sistema de Extracción: Es usado para controlar la contaminación y se basa en expulsar el aire contaminado del interior del ambiente cerrado. Este es un sistema muy utilizado en parqueaderos de pequeñas dimensiones.
- Sistema de Inyección: Como su nombre lo indica, es aquel que inyecta aire fresco a un ambiente. Es utilizado con dos propósitos, para crear un contorno cómodo en el ambiente o para reemplazar el aire contaminado que haya sido extraído.
- Sistema Extracción/Inyección: Comúnmente ambos sistemas son combinados. En el caso de parqueaderos subterráneos, la tasa de flujo volumétrico de extracción es mayor a la de inyección, de esta forma se genera una presión negativa que fuerza el ingreso de aire por las rampas, permitiendo así un ahorro de recursos.

En el presente proyecto se utilizó un **Sistema Extracción/Inyección**, para el cual se requiere un diseño de ventilación, que puede ser de dos tipos: la forma tradicional, que se basa en la implementación de redes de ductos y rejillas ubicadas a lo largo de los subsuelos; o, mediante torres de ventilación y barrido, utilizando *Jet Fans*. Este último, requiere de varios equipos para completar su implementación.

1.4.2.1 Ventiladores

Se puede describir como una turbomáquina (máquina de fluido), la cual es usada para producir una corriente de flujo de aire. Los ventiladores son utilizados comúnmente para

hacer circular el aire, con el fin de renovarlo y dar oxígeno a los usuarios del local, también es muy común su uso para la eliminación de olores. Los ventiladores son usados para mover o desplazar un gas de un lugar hacia otro; esta turbomáquina absorbe energía mecánica la cual es transferida a un gas, en este caso aire [4], estos pueden ser centrífugos o axiales.

En los ventiladores axiales, el flujo de aire se desplaza a través del rotor, consta de alabes, aletas o palas de diferentes formas. Son normalmente utilizados para mover aire en grandes cantidades en espacios abiertos. Su aplicación principal se desarrolla en el campo de la ventilación general, por esto se los conoce como inyectores o extractores de aire [5].

1.4.2.1.1 Ventiladores Axiales para conductos verticales.

Estos ventiladores deberán colocarse dentro de las torres de ventilación, el flujo a la salida de la boquilla ayuda a vencer la caída de presión dentro del conducto.

El fabricante de ventiladores axiales que se seleccionó para realizar el diseño y futura implementación, fue Novenco (sección 1.4.2.7). Esta empresa brinda tres tipos de equipos:

- ACN, para instalación dentro de ducto.
- ACP, entrada libre con conexión a ducto.
- ACG, succión y extracción libre, para montaje en paredes.

En el presente proyecto se tendrán varias torres de ventilación (ver sección 2.1.1), los ventiladores deberán colocarse en su interior, por lo que interesa el modelo ACN. El rango de los ventiladores axiales tipo ACN está comprendido en 14 tamaños de instalación con un diámetro de rotor que va desde 250 a 1600 milímetros, la tasa de flujo volumétrico varía entre 0.1 a 65 m^3/s con una presión de hasta 2000 Pascales [6]. Estos ventiladores son de velocidad variable y trabajan de acuerdo a los requerimientos del sistema, no siempre a su máxima capacidad.

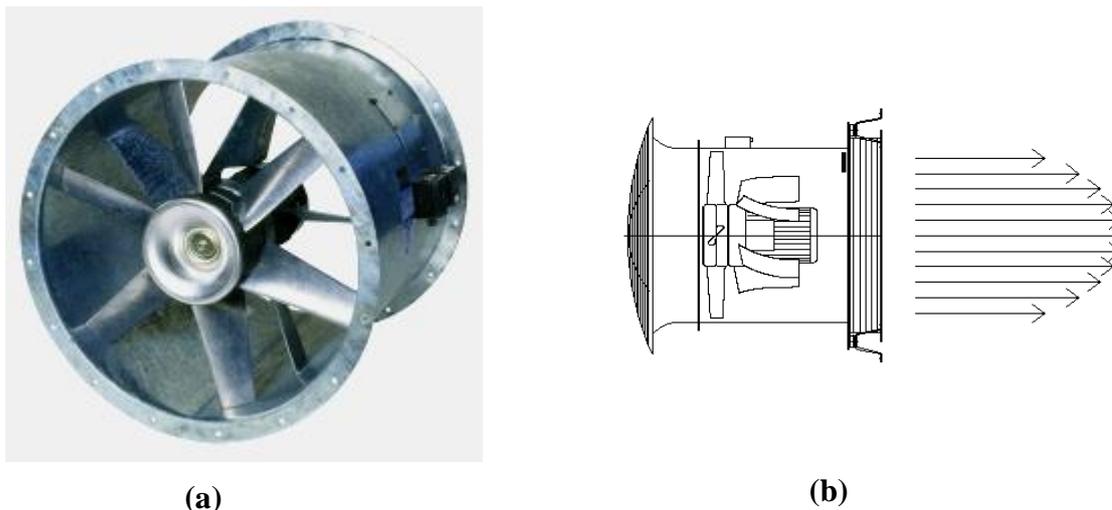


Figura 1.3 Ventiladores axiales a) Ventilador Axial tipo ACN (tomado del catálogo “Novanco Axial Flow Fans”) b) Tipo de flujo

1.4.2.1.2 Ventiladores tipo *Jet fan*

Estos se colocarán en el techo de cada uno de los subsuelos, aprovechando el espacio que se forma entre las vigas (figura 1.4).

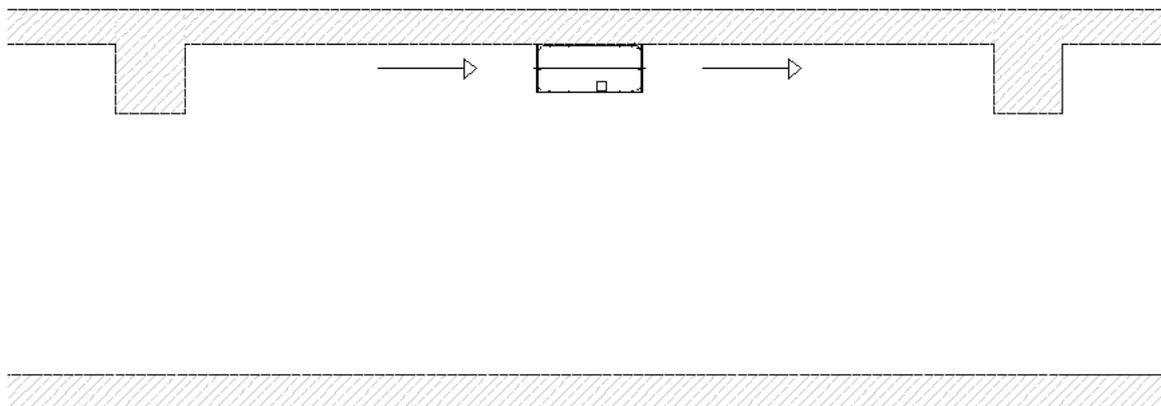


Figura 1.4 Ubicación de *Jet fans* entre vigas.

Su correcta ubicación, dentro del área de los subsuelos, se presentará en el capítulo 3 con la ayuda de una simulación CFD. El tipo de flujo a la salida de la boquilla tiene un alto empuje, de esta manera se logra arrastrar el flujo una mayor distancia en área abierta.

Los *Jet Fans* funcionan de una forma tal que impulsan el aire fresco desde las torres de inyección hacia las de extracción. Mediante detectores del nivel de CO (ver sección 1.4.2.2),

se mide la cantidad de contaminación y, de haber un estancamiento en alguna zona, los ventiladores ubicados en sus alrededores incrementan su velocidad de funcionamiento, esto debido a que los *Jet Fans* son de velocidad variable y trabajan de acuerdo a los requerimientos. El fabricante que se seleccionó como proveedor es Novenco y presenta varios modelos, resumidos en la figura 1.5.

	Sizes 400		Sizes 290		Sizes 380		Sizes 500		
	AUT	ART ¹	AUO	ARO ¹	AUO	ARO ¹	AUO	ARO ¹	CGF
Volume flow [m ³ /s]	1.1 / 2.3	1.0 / 2.2	0.5 / 1	0.5 / 0.9	1.0 / 2.0	1.0 / 1.9	2.2 / 4.3	2.2 / 4.3	0.8 / 1.6
Air speed [m/s]	9 / 18	8 / 18	9 / 18	9 / 17	11 / 22	11 / 22	11 / 22	11 / 22	14 / 27
Thrust [N] ²	14 / 53	13 / 50	5 / 21	4 / 15	15 / 57	15 / 52	27 / 105	28 / 111	12 / 48
Number of poles	2 / 4								8 / 4
Voltage	3x400 V, 50 Hz								
Motor consumption [kW]	0.25 / 1.1	0.3 / 1.3	0.1 / 0.5	0.1 / 0.5	0.25 / 1.1	0.3 / 1.3	0.5 / 2.2	0.5 / 2.2	0.39 / 0.98
Sound pressure [dB(A)] ³	54 / 72	56 / 75	35 / 46	35 / 47	39 / 52	42 / 56	45 / 59	49 / 64	61 / 75

Figura 1.5 Especificaciones de los JetFans marca Novenco (tomado del Catálogo Novenco Group, *Novenco jet fans*)

Para el diseño se consideró el modelo AUT-400, el cual es unidireccional y como se puede apreciar su caudal va desde 1.1 m³/s hasta 2.3 m³/s, tiene un consumo bajo de energía en relación al flujo volumétrico que brinda y sus dimensiones son menores a los modelos AUO y ARO [7]. El esquema con las dimensiones del AUT-400 se presenta en la figura 1.6.

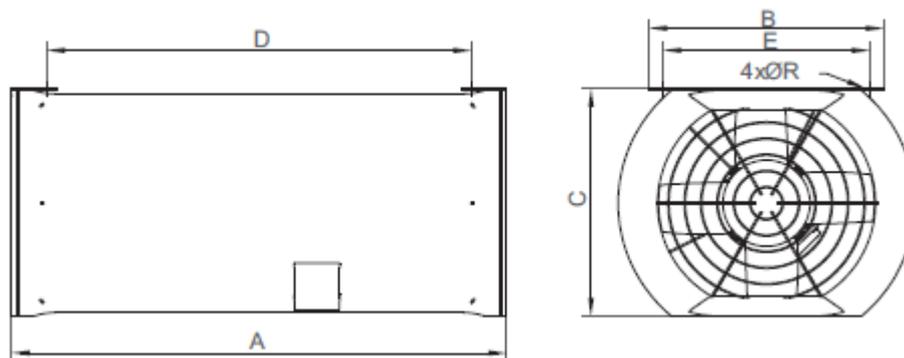


Figura 1.6 Esquema de un AUT-400 (tomado del Catálogo Novenco Group, *Novenco jet fans*)

AUT-400	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	ØR	Peso (kg)
Dimensiones	854	522	423	779	470	14	63

Tabla 1.1 Dimensiones *Jet Fan* AUT-400 [7]

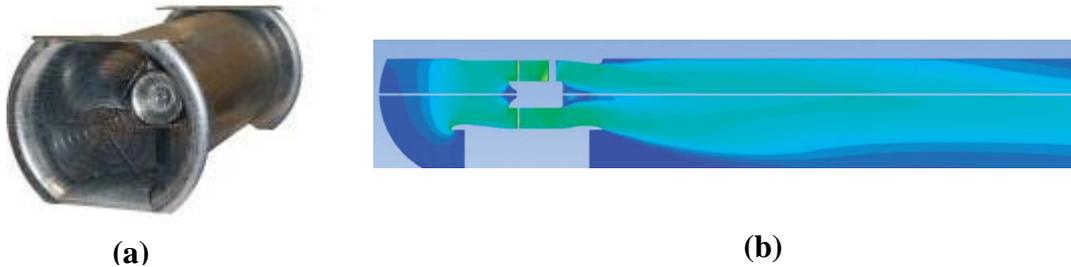


Figura 1.7 *Jet Fan* AUT-400 a) Ventilador tipo *Jet Fan* b) Tipo de flujo (tomado del catálogo “*Next Generation Jet Fans*”)

1.4.2.2 Sistema de Detección de CO

El objetivo de la instalación de detectores de CO es reducir el consumo eléctrico del sistema de ventilación mecánica en parqueaderos subterráneos. La marca que se eligió para suplir la instalación de estos detectores es Kimessa la cual tiene una línea de productos llamada “CANline Gas alarm and Control system”. Esta consta de sensores de nivel de CO y deberán ser conectados a un Monitor el que estará ubicado en el cuarto de control. En caso de existir altas concentraciones de CO, éstas se indicarán mediante la activación de una alarma, en el panel se señalará qué sensor se activó y el nivel de contaminación. Si son dos o más los sensores los que se activan, el monitor denunciará las anomalías, una a una cada 4 segundos. Hasta 32 sensores pueden conectarse en un monitor CANline y ese recomendable instalarlos entre los *Jet Fans*, además cada sensor tiene un radio de cobertura de 11.5 metros [8].



Figura 1.8 Sistema de detección de CO a) Sensor de CO b) Monitor CANline (tomado del catálogo Kimessa AG “CANline Instruction manual”)

1.4.2.3 Filtros para Suministro de Aire

Con el fin de garantizar un adecuado funcionamiento del sistema, es necesario instalar en cada una de las tomas de aire, filtros que permitan al aire que ingresa estar libre de partículas u objetos que puedan dañar los equipos instalados. Para el proyecto se ha considerado la instalación de filtros marca Flanders, modelo “FCP Carbon Pleat (Activated carbón absorbers)”. Son filtros diseñados con carbono activo, con pliegues en forma de V. Es un filtro medio, que está compuesto de poliéster con una malla fina de carbono activo. El carbono está térmicamente enlazado con las fibras de poliéster que optimizan su eficiencia. En la figura 1.10a se presenta el filtro FCP; este producto brinda dos gamas, la de capacidad estándar y la de capacidad alta. Los filtros de la serie FCP se presentan con carbono activo, para tres tipos de contaminantes [9].

- Remover VOC (compuestos orgánicos volátiles)
- Remover Gases Ácidos
- Remover Gases Alcalinos.

VOC (Compuestos Orgánicos Volátiles): Son sustancias que contienen carbono, que se convierten en vapores o gases. Contienen además de carbono, ciertos elementos como

hidrógeno, oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Los compuestos orgánico volátiles son producidos cuando existe la quema de combustibles tales como, gasolina, madera, carbón o gas natural [10].

De todos estos nos interesa el primero en mención, el que corresponde a los modelos 201 o 301. Los filtros pueden ser de 24"x24"x2" o 12"x24"x2" nominalmente, pero su dimensión actual es de 23-3/8"x23-3/8"x1-3/4 y 11-3/8"x23-3/8"x1-3/4 respectivamente.

Model Number	Nominal Size (inches)	Actual Size (inches)	Media Area (sq. ft.)	Rated Flow (cfm)	Initial Resistance (in. w.g.)
FCP201-24242	24 x 24 x 2	23-3/8 x 23-3/8 x 1-3/4	20	2000	.55
FCP201-12242	12 x 24 x 2	11-3/8 x 23-3/8 x 1-3/4	10	1000	.55
FCP301-24242	24 x 24 x 2	23-3/8 x 23-3/8 x 1-3/4	20	2000	.65
FCP301-12242	12 x 24 x 2	11-3/8 x 23-3/8 x 1-3/4	10	1000	.65
FCP201-24244	24 x 24 x 4	23-3/8 x 23-3/8 x 3-3/4	44	2000	.40
FCP201-12244	12 x 24 x 4	11-3/8 x 23-3/8 x 3-3/4	21	1000	.40
FCP301-24244	24 x 24 x 4	23-3/8 x 23-3/8 x 3-3/4	44	2000	.50
FCP301-12244	12 x 24 x 4	11-3/8 x 23-3/8 x 3-3/4	21	1000	.50

Figura 1.9 Tamaños, flujo volumétrico y SP de Filtros Flanders FCP (Tomado del catálogo Flanders PrecisionAir. “Comercial Filter Supply”)

1.4.2.4 Reguladores Motorizados

Se conoce como reguladores o *dampers* a los elementos encargados de controlar la entrada y salida de aire en cada uno de los subsuelos. En cada una de las entradas o salidas de aire se deberá colocar reguladores motorizados, cuyas aletas, mediante un panel de control, se abren o cierran con el fin de distribuir la cantidad de aire de acorde a la contaminación presente en los niveles del parqueadero. En la figura 1.10b se presenta un regulador motorizado. Vale mencionar que, en conjunto con los reguladores motorizados, deberán colocarse rejillas de iguales dimensiones.



Figura 1.10 Accesorios de Ventilación Mecánica a) Filtro FCP (Tomado del catálogo Flanders PrecisionAir. “*Comercial Filter Supply*”) b) Regulador Motorizado

1.4.2.5 Paneles de Control

Estos paneles serán colocados en cada nivel del parqueadero, en un cuarto de control destinado para el monitoreo, todos los equipos (ventiladores axiales, *Jet Fans*, reguladores motorizados y sistema de detección de CO), deberán tener conexión con los paneles de control. Los paneles y el software serán distribuidos por Novenco.

1.4.2.6 Rejillas de Inyección y Descarga exteriores

Son también conocidas como *Louvers*, se ubicarán en las torres de ventilación (paredes verticales) sobre la Plaza del edificio, son las encargadas de la toma y descarga de aire al exterior y, estas pueden ser de fabricación local o importadas. Debido a la importancia del proyecto y a la estética requerida, se seleccionó la empresa Greenheck como fabricantes de estos accesorios, quienes presentan una gama amplia de modelos, de los que interesa el ESU-130, debido a que su área efectiva (69 %) es mayor que el resto y esto permite la optimización en la altura de las torres [11]. En el caso de las torres de inyección, se deberán colocar en conjunto con los filtros FCP.

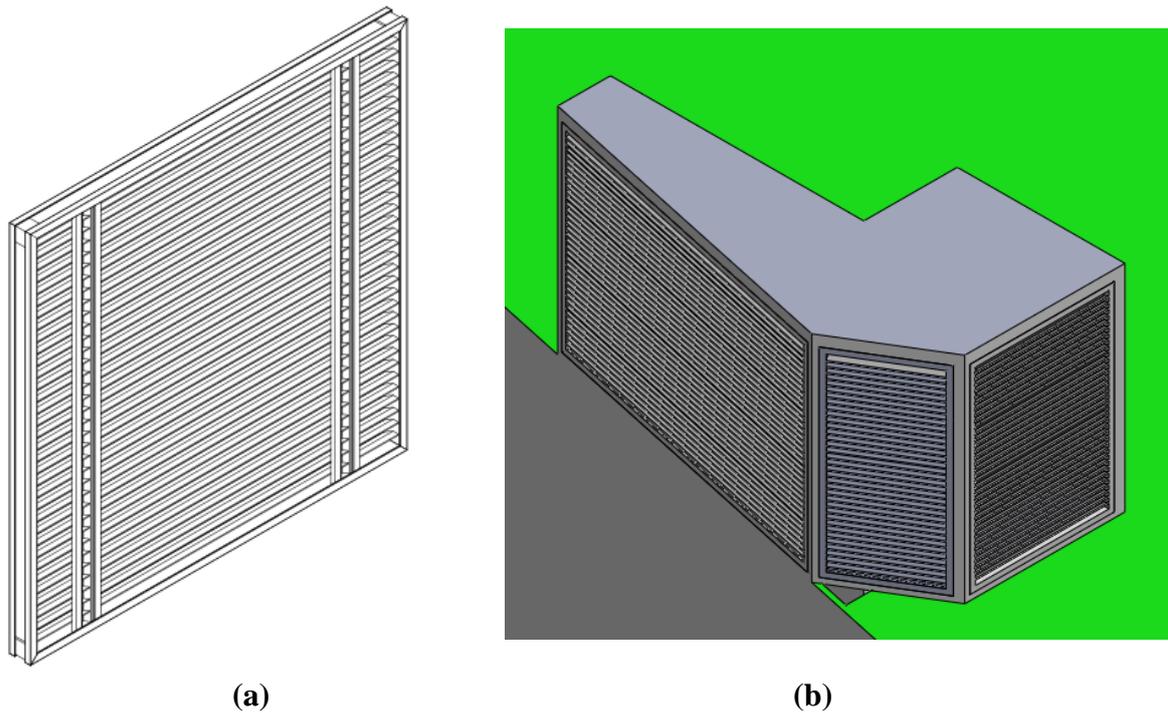


Figura 1.11 *Louvers* a) ESU-130 (Tomado de Software de selección de Greenheck “Caps”) b) Distribución de *Louvers* en las torres de ventilación sobre la Plaza.

1.4.2.7 Selección de fabricante

Este tipo de sistemas tiene mayor tiempo de desarrollo en Europa, por lo que, se han investigado posibles proveedores de ese continente. Se consideraron dos empresas (por tiempo en el mercado y experiencia laboral).

- La Empresa Inglesa COLT
- La Empresa Danesa NOVENCO

Se eligió la segunda en mención, porque se obtuvo mayor apoyo de consulta para el desarrollo del sistema. Se presenta en la tabla 1.2 un resumen de los componentes por empresa fabricante.

Componente	Fabricante	País de Origen
Ventiladores Axiales	Novenco	Holanda
Ventiladores tipo <i>Jet fan</i>	Novenco	Holanda
Reguladores Motorizados	Novenco	Holanda
<i>Louvers</i> de Toma y Descarga	Greenheck	Estados Unidos
Sistema de Detección de CO	Kimessa	Suiza
Paneles de Control	Novenco	Holanda
Filtros de Aire	Flanders	Estados Unidos

Tabla 1.2 Selección de fabricantes para todos los componentes del sistema

1.5 Metodología

1.5.1 Requerimientos de Aire

Se refiere a la renovación de aire en un espacio cerrado, su medición está dada en ACH ya que en inglés se traduce a “*air changes per hour*” o cambios de aire por hora. En el manual de la ASHRAE “*Handbook HVAC Applications*” se menciona que para parqueaderos cerrados es recomendable una tasa de 1.5 cfm/ft^2 o 6 ACH². La NFPA (National Fire Protection Association) recomienda un mínimo de 4 ACH [2], cabe recalcar que mientras mayor sea el número de renovaciones, mejor será la calidad de aire en el ambiente cerrado. Por otro lado la Norma Británica determina en su editorial 7346-7 que para subsuelos o parqueaderos cerrados, la ventilación mecánica deberá proveer por lo menos 6 ACH [12]. Por todo lo mencionado, se tomará el mayor de estos valores para el diseño (6 ACH). El número de renovaciones de aire por hora, puede ser calculado por la fórmula:

$$ACH = \frac{3600 Q}{Vol} = \frac{3600 VA_{trans}}{Vol} \quad (1.1)$$

² *cfm*: Pie cúbico por minuto y es una unidad de medición de tasa de flujo volumétrico.

Donde Q representa la tasa de flujo volumétrico, Vol el volumen del ambiente cerrado, V la velocidad con la que se desplaza el fluido y A_{trans} el área transversal.

1.5.2 Concentración

Concentración de una sustancia en otra, en este caso la concentración de CO en el aire. Se mide en partículas por millón, p.p.m., cantidad de unidades de CO que hay por cada millón de unidades en conjunto. La norma Británica en el documento BS 7346-7, en la sección 6.5 señala que la concentración de CO no deberá exceder las 30 p.p.m. en el promedio de 8 horas y 90 p.p.m. en lugares de altas concentraciones, por un período máximo de 15 minutos [12]. Cabe recalcar que la ASHRAE menciona que, la concentración de CO deberá ser como máximo de 25 p.p.m y 120 p.p.m. en lugares de alta concentración [2].

1.5.3 Flujo Volumétrico y Flujo Másico

La cantidad de masa que atraviesa una sección de área por unidad de tiempo se conoce como tasa de flujo másico (\dot{m}). El fluido normalmente fluye hacia el interior o hacia el exterior de un volumen de control, mediante ductos o tuberías. La tasa de flujo másico del fluido a través de una sección de área A_C , depende de la densidad del fluido (ρ) y de la velocidad V_n con la cual el fluido atraviesa la sección transversal A_C .

$$\dot{m} = \rho V_{av} A_C \quad (1.2)$$

El volumen de fluido el cual fluye por una sección transversal, por unidad de tiempo se conoce como tasa de flujo volumétrico (Q). El cual está dado por:

$$Q = V_{av} A_C \quad (1.3)$$

La tasa de flujo másico se relaciona con la tasa de flujo volumétrico mediante

$$\dot{m} = \rho Q = \frac{Q}{v} \quad (1.4)$$

Donde v es el volumen específico [13].

1.5.4 Cálculo de pérdidas en el conducto

Si se aplica la ecuación de Bernoulli para dos puntos en una tubería

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (1.5)$$

Donde P representa la presión, v la velocidad, ρ la densidad, g la gravedad y h_f el factor de pérdidas por fricción, en la tubería o conducto y, es calculado mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1.6)$$

Donde L es la longitud de la tubería, D el diámetro de la tubería y f el factor de fricción [14].

1.5.4.1 Número de Reynolds.

(Re) es un número adimensional y se lo utiliza en la mecánica de fluidos, fenómenos de transporte y diseño de reactores, con el fin de determinar el movimiento del fluido. Este relaciona densidad, viscosidad y velocidad. Se presenta en muchas ocasiones con el propósito de determinar si un flujo es laminar o turbulento. El número de Reynolds para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta, está dado por:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1.7)$$

Donde μ representa la viscosidad del fluido.

- Si $Re < 2\,100$ el flujo es laminar
- Si $2\,040 < Re < 4\,000$ el flujo se encuentra en estado transitorio

- Si $Re > 4\,000$ el flujo es Turbulento. El movimiento del fluido en este caso es caótico, sus partículas se mueven de forma desordenada y en su trayectoria forman pequeños remolinos. Es típico en flujos con velocidades altas o de baja viscosidad [14].

Se espera que en los conductos de ventilación exista flujo turbulento.

1.5.4.2 Cálculo del factor de fricción (f) para un flujo turbulento

Se lo puede calcular utilizando el diagrama de Moody o mediante la ecuación de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (1.8)$$

Donde ε representa el coeficiente de rugosidad y este valor para el concreto rugoso (material con el que están fabricados los conductos) es 2 (para milímetros) [14].

1.5.5 Normas para el diseño

Existen varias normas, las cuales sugieren valores para la velocidad por conductos verticales o la velocidad de descarga en las rejillas. Estas son la ASHRAE, la norma británica, la NFPA, etc. Se utilizará la primera en mención para definir varios factores importantes para el diseño [15].

- La velocidad por los conductos verticales, para ventilación de parqueaderos subterráneos, debe estar en un rango de $5\text{ m/s} - 8\text{ m/s}$.
- La velocidad de descarga e inyección, por los reguladores motorizados y rejillas internas, no debe exceder 3 m/s .
- La velocidad de descarga por los *Louvers*, no deberá ser mayor a 2.5 m/s y 2 m/s para inyección de aire. Esto se lo pudo definir de la figura 1.12.

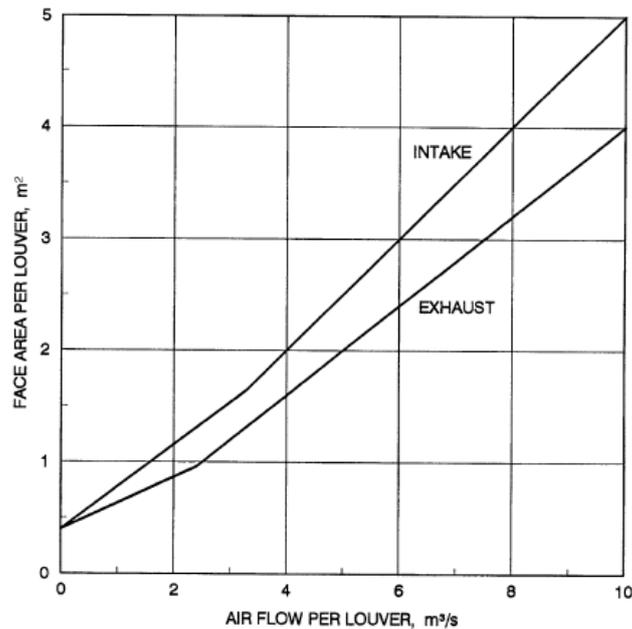


Figura 1.12 Área de descarga y toma de aire (Tomado de ASHRAE. Principles of heating ventilating and air-conditioning, “*Duct Design*”)

1.6 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver casos que envuelven fluidos. Mediante el uso de un computador se realizan cálculos requeridos para simular la interacción de los gases dentro de un espacio físico, después de haber determinado las condiciones de borde.

1.6.1 Mallado

Consiste en discretizar un volumen, la malla puede ser estructurada o no estructurada. Los elementos que conforman la primera son cuadriláteros (2D) y hexaedros en (3D), la segunda está conformada por cuadriláteros y triángulos en 2D y, tetraedros y hexágonos en 3D. Este último brinda mayor flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas. Los parámetros al generar la malla son importantes y, para este proyecto, es necesario tener un mallado fino, ya que, de esto dependerá la exactitud de la simulación [16].

1.6.2 Método de Volúmenes finitos

Este método permite resolver numéricamente ecuaciones diferenciales y es un método alternativo al de las diferencias finitas y elementos finitos. Se considera un volumen al que se ha realizado un mallado, en cada punto de esta malla se construye un volumen de control, lo que implica que el volumen total es la sumatoria de los volúmenes de control considerados. Las ecuaciones diferenciales a resolverse, se integran sobre cada volumen de control. Este método permite la utilización de un mallado no estructurado [17].

1.6.3 Condiciones de Contorno o de Borde

En este caso se utilizaron condiciones de entrada y salida de aire. En un área determinada se estableció la velocidad con la que el fluido la atravesará, ya sean éstas rampas de ingreso o de salida de aire o, reguladores de extracción o de inyección. El resto de paredes del modelo serán determinadas como paredes sin “deslizamiento” (no slip walls). Todas las condiciones de borde aplicadas en la simulación se determinan en el capítulo 3.

1.6.4 Selección del Software

Se presentan dos opciones, las cuales están a nuestro alcance para la resolución de la simulación CFD

- Comsol (Método de Elementos Finitos)
- Ansys CFX (Método de Volúmenes Finitos)

Dado que Ansys CFX maneja el método de volúmenes finitos se podrá obtener mayor flexibilidad, por lo tanto este será el software elegido. Este programa se utilizó en colaboración con la Escuela Politécnica Nacional, bajo gerencia y supervisión del Profesor Víctor Hidalgo, asesor y miembro del comité de esta tesis. Este proyecto se realizó dentro de

las instalaciones de la carrera de Ingeniería mecánica, quienes poseen la licencia de uso del software. El conjunto de ecuaciones utilizado para la resolución, son las de Navier-Stokes en forma diferencial. Las ecuaciones de masa, momentum y conservación de energía son :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1.9)$$

Donde \mathbf{U} es el vector velocidad.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (1.10)$$

Donde P representa la presión, \mathbf{S}_M el vector momentum y, $\boldsymbol{\tau}$ el esfuerzo cortante y está dado por

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad (1.11)$$

Donde T representa la temperatura y δ la matriz identidad.

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (1.12)$$

Donde h_{tot} es la entalpía total, λ la conductividad térmica y \mathbf{S}_E la fuente de energía [18].

La empresa Colt entre sus servicios, ofrece un análisis CFD para la optimización del sistema, este es realizado en ANSYS (software a utilizar). En la figura 1.13 se presenta los resultados obtenidos por Colt en la simulación del proyecto “The observatory Apartments” proyecto ubicado en Walsall, Inglaterra [19].

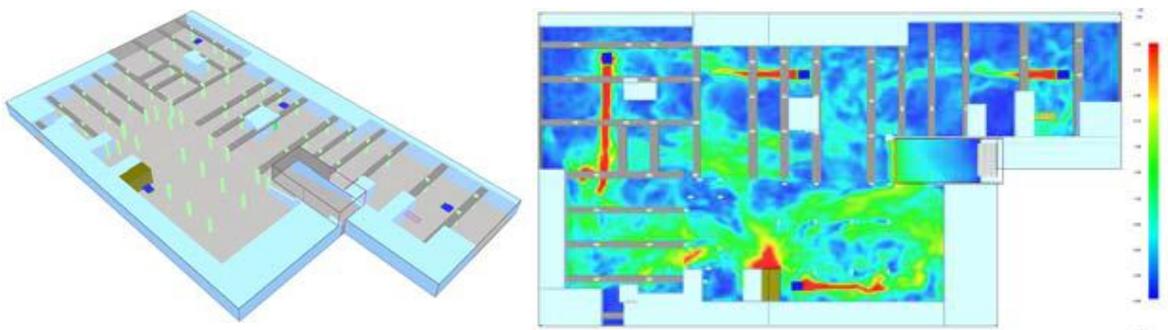


Figura 1.13 a) Vista isométrica, b) Dispersión de velocidad en el parqueadero, rojo representa 3 m/s y azul oscuro 0 m/s (Tomado del catálogo “Colt ventilation systems for car parks and service areas”)

2. Diseño del Sistema de Ventilación

2.1 Sistema de Extracción

Se deberá definir el área útil A_{util} , en cada subsuelo (descontado bodegas, locales y columnas). Será importante establecer la tasa de flujo volumétrico requerida, para cubrir la totalidad del parqueadero subterráneo.

$$Q_{Ext} = Vol \times ACH \quad (2.1)$$

Donde $Vol = A_{util} \times h$ (h representa la altura de cada subsuelo) y, 6 ACH es el número de renovaciones de aire que se utilizarán. En la tabla 2.1 se presenta la tasa de flujo volumétrico requerida.

Niveles	Area(m ²)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /h)	Caudal (m ³ /s)
N 0.0	4 600	2.88	13 248	79 488	22.08
N -3.6	16 500	2.88	47 520	285 120	79.20
N -9.0	25 000	4.68	117 000	702 000	195
N -12.6	25 000	2.88	72 000	432 000	120
N -16.2	25 000	2.88	72 000	432 000	120
N -19.8	19 500	2.88	56 160	336 960	93.60
Total			382 180	2 270 568	629.88

Tabla 2.1 Caudal requerido por niveles (Anexo A.1)

2.1.1 Área de Conductos (Torres)

Una vez obtenido el flujo de aire que se necesita para cumplir los requerimientos del sistema, se calculará el área transversal para los conductos de extracción A_{ext} . Para lo cual se aplica la ecuación 1.3, de donde se despeja A .

$$A_{ext} = \frac{Q_{Ext}}{v} \quad (2.2)$$

Donde v representa la velocidad con la que fluyen los gases dentro de las torres y Q_{Ext} , el caudal total requerido ($629.88 \text{ m}^3/s$). Se toma una velocidad promedio de 6.5 m/s (ver sección 1.5.5). Reemplazando valores en la ecuación 2.2, se obtiene un área total de 96.9 m^2 .

Las torres de extracción deberán estar ubicadas en un costado del edificio y es prudente dividir el área total en varias torres, de esta forma se obtienen más puntos de salida y una mejor dispersión de aire. Se solicitó a la empresa encargada del diseño arquitectónico CVA, la distribución del área en 6 conductos de igual o similar dimensión cada uno.

En el Anexo A.2 se presenta el plano arquitectónico del Nivel -16.20, en el que se señaló el lado del edificio que se utilizará para la extracción. La respuesta obtenida por parte de CVA fue la distribución presentada en la tabla 2.2

Torres de Extracción	
Torre #1 (E1)	20.81
Torre #2 (E2)	14.25
Torre #3 (E3)	23.75
Torre #4 (E4)	14.49
Torre #5 (E5)	22.11
Torre #6 (E6)	12.58
Total	108

Tabla 2.2 Áreas de torres de Extracción en m^2 (Anexo A.1)

El área total disponible es 108 m^2 y la tasa de flujo volumétrico $629.88 \text{ m}^3/s$, lo que indica que la velocidad promedio es 5.83 m/s (se encuentra dentro del rango de velocidades recomendadas por la ASHRAE). En la figura 2.1 se presenta un corte de una de las torres de extracción, el cual sirve de ayuda para comprender el funcionamiento del sistema. En la figura 1.2 se puede apreciar su ubicación.

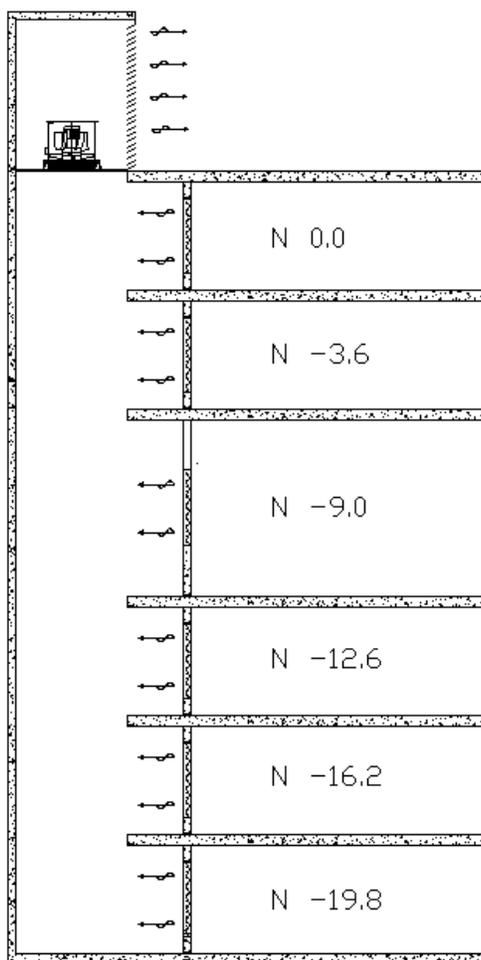


Figura 2.1 Corte de Conducto de Extracción

2.1.2 Tasa de Flujo Volumétrico por Torre de Extracción

Se realizó una distribución del caudal requerido por subsuelo en el número de torres disponibles en cada uno. Debido a la arquitectura del edificio, no es factible utilizar las 6 torres en todos los niveles, por ejemplo en el N 0.0, sólo se puede disponer de E1 y E3 (se podría utilizar también E2, pero no es recomendable por su ubicación cercana a las rampas). En la tabla 2.3 se presenta la primera distribución, donde se realizó una división del Caudal para los conductos disponibles en cada nivel.

Nivel/Ejes	E1 (m^3/s)	E2 (m^3/s)	E3 (m^3/s)	E4 (m^3/s)	E5 (m^3/s)	E6 (m^3/s)	TOTAL (m^3/s)
N 0.0	11.04		11.04				22.08
N-3.6	26.40	26.40	26.40				79.20
N-9	39	39	39	39	39		195
N-12.6	20	20	20	20	20	20	120
N-16.2	20	20	20	20	20	20	120
N-19.8	23.40	23.40	23.40	23.40			93.60
TOTAL (m^3/s)	139.84	128.80	139.84	102.4	79	40	629.88
Area (m^2)	20.81	14.25	23.75	14.49	22.11	12.58	108
Velocidad (m^2/s)	6.72	9.04	5.89	7.06	3.57	3.18	

Tabla 2.3 Primera aproximación de los caudales en cada eje de extracción

Los valores resaltados son aquellos que exceden o no alcanzan el rango de velocidades adecuadas, por lo que, se deberá redistribuir el caudal en los ejes, para lograr una velocidad apropiada como se presenta en la tabla 2.4

Nivel/Ejes	E1 (m^3/s)	E2 (m^3/s)	E3 (m^3/s)	E4 (m^3/s)	E5 (m^3/s)	E6 (m^3/s)	TOTAL (m^3/s)
N 0.0	11.04		11.04				22.08
N-3.6	26.40	26.40	26.40				79.20
N-9	36.22	27.89	34.83	34.84	61.22		195
N-12.6	18.61	13.05	18.61	13.05	25.14	31.53	120
N-16.2	18.61	13.05	18.61	13.05	25.14	31.53	120
N-19.8	23.40	23.40	23.40	23.40			93.60
TOTAL (m^3/s)	134.28	103.80	132.89	84.34	111.5	63.06	629.88
Area (m^2)	20.81	14.25	23.75	14.49	22.11	12.58	108
Velocidad (m^2/s)	6.45	7.28	5.59	5.82	5.04	5.01	

Tabla 2.4 Caudales en cada eje de extracción (Anexo A.1)

2.1.3 Ventiladores Axiales

Se deberán calcular las pérdidas por recorrido de tubería y accesorios, esto se lo realizó utilizando las fórmulas 1.6, la 1.7 para el cálculo de Reynolds y la 1.8 para el factor de fricción, se recuerda que el coeficiente de rugosidad para concreto rugoso ε equivale a 2 en milímetros (ver sección 1.5.4). Dado que las torres no son circulares, se calcula un diámetro equivalente (D_{eq})

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A_{torr}}{\pi}} \quad (2.3)$$

Donde A_{torr} representa el área transversal de cada torre de extracción, también se considera la velocidad con la que fluye el flujo en el interior de los conductos (tabla 2.4), la densidad ρ del aire a 2800 metros de altura es 0.9355 kg/m^3 y la viscosidad es $1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$ [16]. Se presenta un resumen con la pérdida por longitud de conducto en la tabla 2.5

Torre	L m	A_{torr} m^2	v m/s	D_{eq} m	Re	ε/D	f	h_f m	SP
E1	30	20.82	6.45	5.15	1.7.E+06	0.00039	0.0161	0.199	1.826
E2		14.25	7.28	4.26	1.6.E+06	0.00047	0.0167	0.318	2.915
E3		23.76	5.59	5.50	1.6.E+06	0.00036	0.0158	0.137	1.260
E4		14.49	5.82	4.30	1.3.E+06	0.00047	0.0168	0.203	1.859
E5		22.11	5.04	5.31	1.4.E+06	0.00038	0.0161	0.118	1.082
E6		12.58	5.01	4.00	1.0.E+06	0.00050	0.0171	0.164	1.505

Tabla 2.5 Numero de Reynolds, factor de fricción y factor de pérdidas por conducto

Debido a que h_f se mide en metros, se multiplica el valor por la gravedad y densidad del fluido, para obtener las pérdidas en pascales. De acuerdo al número de Reynolds, se dice que el flujo en todas las torres de extracción es turbulento. Para determinar la pérdida por accesorios se consultó a la empresa fabricante de los equipos, quienes confirmaron valores obtenidos de la experiencia en proyectos anteriores, los que se encuentran en la tabla 2.6

Accesorio	Presión Estática por Accesorio
Toma de Aire	30 Pa
Louver de Toma de Aire	20 Pa
Regulador de Aire	20 Pa
Silenciador de Succión	50 Pa
Regulador de Ventilador	50 Pa
Silenciador de Descarga	70 Pa
Louver de Descarga de Aire	30 Pa
Descarga de Aire	40 Pa

Tabla 2.6 Pérdidas por accesorios

Sumando las pérdidas de los accesorios se obtiene una presión estática (SP) de $310 Pa$, para ventiladores de extracción, en pérdidas por fricción y debido a cualquier factor extra durante la construcción (por experiencia en proyectos previos se recomienda un 10% del SP parcial), se tomará una SP adicional de $34 Pa$. Esto implica una presión estática total de $344 Pa$. La selección de los ventiladores axiales se puede realizar utilizando dos métodos, mediante el catálogo proporcionado por la empresa fabricante, utilizando las curvas de rendimiento o con el software de selección “Novenco AirBox”

2.1.3.1 Selección utilizando curvas de rendimiento

En el catálogo “Novenco Axial Flow Fans”, se presentan curvas de selección para los ventiladores axiales ACN, esta se muestra en la figura 2.2. Están dadas en función de la tasa de flujo volumétrico (q_v), medida en m^3/s y, de la presión total de ventilador (P_t), medida en Pa .

$$P_t = SP + P_d \quad (2.4)$$

Donde SP es la presión estática y P_d la presión dinámica, esta puede ser calculada

$$P_d = 0.5(\rho) \times v^2 \quad (2.5)$$

Si se aplica la ecuación 2.5 para la torre de extracción E1, se obtiene:

$$P_d = 0.5(0.9355) \times 6.45^2 = 19.46 Pa$$

Se requiere de $P_t \approx 364 Pa$ y un caudal de $134.28 m^3/s$. De acuerdo a la figura 2.2 para cubrir el q_v total se requieren 4 o más ventiladores.

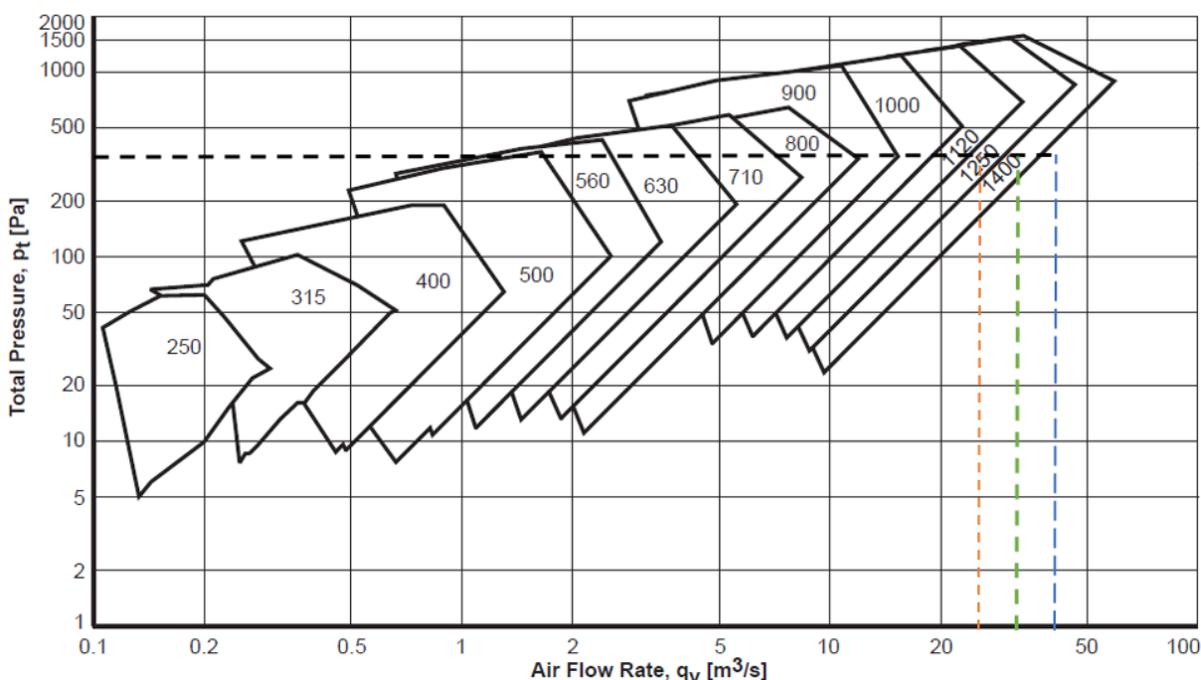


Figura 2.2 Curvas de Rendimiento, ACN – 1470 RPM (tomado de Novenco Axial Flow Fans)

- 3 ACN o menos, $44.76 \text{ m}^3/\text{s}$, no existe ventilador para estas características (marcado de color azul en la figura 2.2)
- 4 ACN, $33.57 \text{ m}^3/\text{s}$, ACN – 1400 (marcado de color verde en la figura 2.2)
- 5 ACN, $26.86 \text{ m}^3/\text{s}$, ACN – 1250 (marcado de color rojo en la figura 2.2)

En base a esta selección se utilizarán **5 ventiladores ACN-1250**. Para el resto de torres de extracción, se desea utilizar el mismo modelo, por razones de mantenimiento y facilidad de repuestos.

2.1.3.2 Selección utilizando “Novenco AirBox”

Con la ayuda del software de selección, se calculan factores como los niveles de ruido o consumo de energía. Se calculará el modelo requerido para la torre E1, cada ventilador de $26.86 \text{ m}^3/\text{s}$, una

SP de 346 Pa, además se ingresa la altura a nivel del mar del lugar de instalación y la humedad relativa. El modelo seleccionado por el software es el **ACN-1250/403-6**, con lo que queda demostrado el funcionamiento de Novenco AirBox. Se usará este método para la selección de ventiladores en el resto de torres de extracción, los modelos se resumen en la

tabla 2.7.

Modelo	Torre de Ventilación	Diámetro del Rotor	Caudal m^3/s	Cantidad de V. Axiales	Total KW 440/3/60
ACN-1250/403-6	E1	1250 mm	26.86	5	105.0
	E2	1250 mm	25.95	4	84.0
	E3	1250 mm	26.58	5	105.0
	E4	1250 mm	28.08	3	63.0
	E5	1250 mm	27.88	4	84.0
	E6	1250 mm	21.02	3	37.5

Tabla 2.7 Cantidad de Ventiladores por Conducto de extracción y cargas eléctricas

La tabla 2.7 deberá ser entregada a la empresa encargada del suministro de energía eléctrica para el proyecto. En el anexo A.3 se presenta la ubicación de los ventiladores axiales, en el interior de las torres de extracción.

2.1.4 Reguladores o *Dampers* motorizados y Rejillas Internas

No todos los conductos de extracción pueden ser utilizados en cada subsuelo, debido a la arquitectura del proyecto, en la tabla 2.4 se señala cuáles se encuentran disponibles para cada nivel. La velocidad máxima (v) del aire a través de los reguladores, no debe exceder 3 m/s (ver sección 1.5.5). Para determinar el área requerida para los reguladores de cada conducto de

extracción en cada nivel, se aplicará la fórmula 1.3 de donde se despeja el área, a esta se la denominará A_{dam} y Q_{torr} será la tasa de flujo volumétrico de cada torre de extracción por nivel:

$$A_{dam} = \frac{Q_{torr}}{v} \quad (2.6)$$

Por ejemplo, para el nivel 0.0 se presentan varias condiciones:

- Dos torres de extracción disponibles (E1 y E3).
- La tasa de flujo volumétrico Q_{torr} es $11.04 \text{ m}^3/\text{s}$, por conducto de extracción.
- Al aplicar la ecuación 2.6, se obtiene $A_{dam} = 3.68 \text{ m}^2$.
- Para el nivel 0.0, se deberá cubrir un área de 3.68 m^2 por conducto de extracción.
- Se necesita un total de dos *dampers* y rejillas de $2 \text{ m} \times 1.85 \text{ m}$ en este nivel, uno por torre disponible.

El procedimiento planteado se realizó para cada Subsuelo y se lo resume en la tabla 2.8, donde se propone una distribución utilizando productos de la empresa Novenco. La dimensión máxima de fabricación es $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$, el área calculada deberá distribuirse en varios *dampers* y rejillas, de acuerdo a la limitación mencionada y al espacio físico disponible, en el anexo A.1 se presenta su ubicación en los subsuelos.

Nivel	Torres	Q_{torr} (m^3/s)	A_{dam} (m^2)	# Dampers	Dimensiones
N 0.0	E1, E3	11.04	3.68	1	2 m × 1.85 m
N -3.6	E1, E2, E3	26.4	8.80	3	2 m × 1.5 m
N -9.0	E1	36.22	12.07	4	2 m × 1.55 m
	E2	27.89	9.30	3	2 m × 1.55 m
	E3	34.83	11.61	4	2 m × 1.5 m
	E4	34.84	11.61	6	2 m × 1 m
	E5	61.22	20.41	4	2.25 m × 2.3 m
N -12.6	E1, E3	18.61	6.20	2	2 m × 1.6 m
	E2, E4	13.05	4.35	2	2 m × 1.1 m
N -16.2	E5	25.14	8.38	3	2 m × 1.4 m
	E6	31.53	10.51	3	2 m × 1.8 m
N -19.8	E1, E2, E3	23.4	7.80	2	2 m × 2 m
	E4	23.4	7.80	3	2 m × 1.3 m

Tabla 2.8 Dimensiones de Reguladores de Aire y Rejillas de Extracción (Anexo A.1)

2.1.5 Rejillas Exteriores o *Louvers* de Descarga

La selección de *louvers* se realiza utilizando la ecuación 1.3 nuevamente, de donde se despeja el área, en este caso se la llamará área efectiva A_{efec} , la tasa de flujo volumétrico es la que conduce cada torre de extracción Q_{T_torr} hacia el exterior y, la velocidad v , no deberá exceder 2.5 m/s (ver sección 1.5.5).

$$A_{efec} = \frac{Q_{T_torr}}{v} \quad (2.7)$$

2.1.5.1 Louver de descarga E1

En la descarga de este conducto se presenta un inconveniente a resolver:

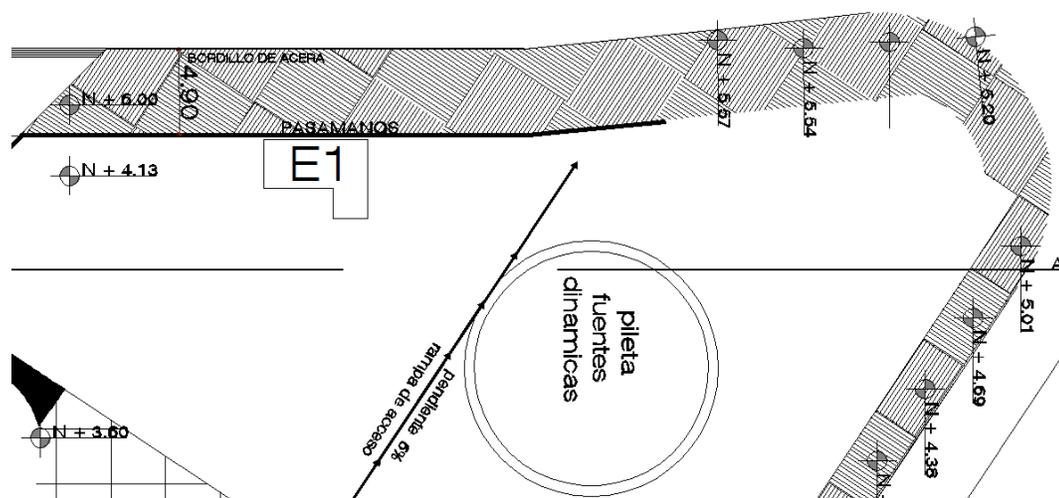


Figura 2.3 Vista en planta de la descarga del conducto E1

No es posible colocar una descarga de aire en el sector marcado con E1 en la figura 2.3, por lo que se utilizará la altura del desnivel que existe entre la acera y la plaza.



Figura 2.4 Corte A-A'

El desnivel genera un muro en forma triangular, el que podría ser utilizado para la descarga. La geometría y el área requerida disponible se presentan en la figura 2.5.



Figura 2.5 Área disponible para descarga

De acuerdo a la tabla 2.4, Q_{T_torr} para la torre E1 es $134.28 \text{ m}^3/\text{s}$. Al aplicar la ecuación 2.6 se obtiene un área efectiva requerida de 53.71 m^2 . El área real que se dispone es 42.09 m^2 (figura 2.5) y es la única solución factible para la descarga de este conducto, por lo que, la velocidad de salida se incrementará a 3.19 m/s .

2.1.5.2 Louvers de descarga restantes

Esta selección depende de la arquitectura de las torres y del espacio disponible para la descarga. Las dimensiones máximas de un *louver* modelo ESU-130 son $240.250" \times 48.250"$, es por esto que el área efectiva deberá ser cubierta con varios *louvers*. La empresa Greenheck presenta un software de selección llamado “Caps”, en función del tamaño requerido y del área efectiva A_{efec} , la que se calcula con la ecuación 2.6. En la tabla 2.9 se presenta un resumen de la selección de *louvers* y de la altura de cada torre sobre la plaza, requerida para la descarga.

LOUVERS DE DESCARGA SOBRE PLAZA							
Torre	Q_{T_torr}	Área m^2	Cantidad Unidad	Dimensiones Pulgadas	Área Efectiva		Altura de Torres m
					ft^2	m^2	
E1	134.28	53.71	Ver sección 2.1.5.1				
E2	103.8	41.52	8	122 x 42.06	206.88	19.22	4.3
			8	141 x 42.06	240.08	22.30	
E3	132.8	53.12	2	122 x 33	40.22	3.74	1.7
			4	222 x 33	147.96	13.75	
			4	196 x 33	131.12	12.18	
			4	175 x 33	117.48	10.91	
			4	147 x 33	97.84	9.09	
			2	114 x 33	37.22	3.46	
E4	84.34	33.73	3	106 x 46.95	75.54	7.02	3.6
			3	226 x 46.95	163.44	15.18	
			3	133 x 46.95	94.56	8.78	
			3	43 x 46.95	29.58	2.75	
E5	111.5	44.60	4	153 x 38.32	119.52	11.10	3.9
			8	122 x 38.32	187.92	17.46	
			4	220 x 38.32	172.64	16.04	
E6	63.06	25.22	3	236 x 38.77	140.97	13.10	3
			3	165 x 38.77	130.48	12.12	

Tabla 2.9 Louvers de Descarga sobre la Plaza (Ver anexo A.3)

2.2 Sistema de Inyección

2.2.1 Ingreso de aire por las rampas exteriores

Para obtener el ingreso de aire por las rampas del edificio, se necesita que los conductos de inyección suministren menor cantidad de aire que los de extracción. Mientras menor sea el porcentaje de suministro, mayor será la velocidad con la que el aire ingresa por las rampas ubicadas en los Niveles 0.0, -3.6 y -9.0, cuyas áreas son 64.40, 38.36 y 61.43 m^2 respectivamente. No existe ninguna norma que indique el porcentaje del caudal total requerido para la inyección, es por esto que, se realizará un análisis de la velocidad del aire por las rampas, en función del porcentaje de inyección (% *Iny*).

La tasa de flujo volumétrico para la extracción de todos los niveles es 607.8 m^3/s , excluyendo el nivel 0.0, se la llamará $Q_{ext3.6}$. El nivel 0.0 no se lo tomará como parte del cálculo del porcentaje de inyección ya que, este no presenta conductos disponibles para suministro, dicho nivel requiere una tasa de flujo volumétrico ($Q_{ext0.0}$) de 22.08 m^3/s , la que deberá ser cubierta por las rampas exteriores. El caudal de ingreso por las rampas exteriores (Q_{ramp}), en función del porcentaje de inyección puede calcularse con la ecuación 2.8.

$$Q_{ramp} = Q_{ext3.6} - (\% Iny \times Q_{ext3.6}) + Q_{ext0.0} \quad (2.8)$$

Las rampas exteriores tienen un área total (A_{ramp}) de 164.19 m^2 y la velocidad de ingreso del aire (v_{ramp}), puede calcularse con la ecuación 2.9.

$$v_{ramp} = \frac{Q_{ramp}}{A_{ramp}} \quad (2.9)$$

Donde el único valor que se mantiene constante es A_{ramp} . En la tabla 2.10 se presenta un resumen de la velocidad del aire que ingresa por las rampas, en función del porcentaje de inyección.

$Q_{ext3.6}$ (m^3/s)	$Q_{ext0.0}$ (m^3/s)	A_{ramp} (m^2)	% Iny	Q_{ramp} (m^3/s)	v_{ramp} (m/s)
607.8	22.08	164.19	95	52.47	0.32
			90	82.86	0.50
			85	113.25	0.69
			80	143.64	0.87
			75	174.03	1.06
			70	204.42	1.24
			65	234.81	1.43
			60	265.2	1.61
			55	295.59	1.80
50	325.98	1.98			

Tabla 2.10 Velocidad de aire por las rampas

De acuerdo a la tabla 2.10 se eligió un 75% de inyección, lo que significa que la velocidad por las rampas de ingreso es máximo 1.06 m/s . Es importante dejar señalado que el porcentaje de inyección propuesto, corresponde al recomendado por la empresa Novenco.

2.2.2 Suministro de aire por los conductos de inyección

En la sección 2.1 se calculó la tasa de flujo volumétrico, requerido para la extracción de gases, por nivel del parqueadero. Para el cálculo de suministro de aire, se deberá aplicar la ecuación 2.10, cuyos resultados se presentan en la tabla 2.11.

$$Q_{ext} = Q_{iny} \times 0.75 \quad (2.10)$$

Nivel	Q_{ext} (m^3/s)	Q_{iny} (m^3/s)
N -3.6	79.20	59.40
N -9.0	195	146.25
N -12.6	120	90
N -16.2	120	90
N -19.8	93.60	70.2
Total		455.85

Tabla 2.11 Inyección de aire por subsuelo (Anexo A.1)

2.2.3 Área de Conductos (Torres)

En la sección 2.1.1 se determinó un área total de $96.9 m^2$ para extracción, el área transversal requerida para los conductos de inyección A_{iny} está dada por:

$$A_{iny} = A_{Ext} \times 0.75 \quad (2.11)$$

Al reemplazar valores, se obtiene un área de $72.675 m^2$. Las torres de inyección deberán estar ubicadas al costado opuesto de las de extracción y se dividirá el área total en varias torres. En el Anexo A.2 se presenta el plano arquitectónico del Nivel -16.20, en donde se señaló el lado del edificio que se utilizará para la inyección. En este caso, CVA otorgó la distribución presentada en la tabla 2.12. En la figura 1.2 se puede apreciar su ubicación.

Torres de Inyección	
Torre #1 (S1)	16.73
Torre #2 (S2)	19.65
Torre #3 (S3)	19.62
Torre #4 (S4)	23.17
Total	79.17

Tabla 2.12 Áreas de las torres de Inyección en m^2 (Anexo A.1)

El A_{iny} disponible es 79.17 m^2 y el Q_{iny} es $455.85 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que indica que la velocidad del aire por los conductos es 5.75 m/s , lo que satisface la recomendación de la norma.

2.2.4 Tasa de Flujo Volumétrico por Torre de Inyección

El procedimiento será el señalado en la sección 2.1.2, la tasa de flujo volumétrico de inyección se presentó en la tabla 2.2. En base a esta, se realizó la primera distribución de caudal en función a los conductos disponibles por nivel.

Nivel/Ejes	S1 (m^3/s)	S2 (m^3/s)	S3 (m^3/s)	S4 (m^3/s)	TOTAL
N-3.6	29.70	29.70			59.40
N-9	36.5625	36.5625	36.5625	36.5625	146.25
N-12.6	22.50	22.50	22.50	22.50	90
N-16.2	22.50	22.50	22.50	22.50	90
N-19.8	35.10	35.10			70.2
TOTAL (m^3/s)	146.3625	146.3625	81.5625	81.5625	455.85
Area (m^2)	16.73	19.65	19.62	23.17	79.17
Velocidad (m^2/s)	8.75	7.45	4.16	3.52	

Tabla 2.13 Primera aproximación de los caudales en cada eje de inyección

En la tabla 2.14 se presenta una redistribución de caudales, ya que las torres S1 y S4 exceden la velocidad o es menor a la recomendada (ver sección 1.5.5).

Nivel/Ejes	S1 (m^3/s)	S2 (m^3/s)	S3 (m^3/s)	S4 (m^3/s)	TOTAL (m^3/s)
N-3.6	29.70	29.70			59.40
N-9	27.81	27.81	42.12	48.51	146.25
N-12.6	14.17	14.17	28.06	33.61	90.00
N-16.2	14.17	14.17	28.06	33.61	90.00
N-19.8	35.10	35.10			70.20
TOTAL (m^3/s)	120.95	120.95	98.23	115.73	455.85
Area (m^2)	16.73	19.65	19.62	23.17	79.17
Velocidad (m^2/s)	7.23	6.16	5.01	5.00	

Tabla 2.14 Caudales en cada eje de inyección (Anexo A.1)

2.2.5 Ventiladores Axiales

Se determinó la SP debido a pérdidas por longitud de conducto, el procedimiento que se utilizó es el señalado en la sección 2.1.3, donde v es la velocidad señalada en la tabla 2.14. Se presenta un resumen con la pérdida por longitud de conducto en la tabla 2.15.

Torre	L m	A_{torr} m^2	v m/s	D_{eq} m	Re	ϵ/D	f	h_f m	SP
S1	30	16.73	7.23	4.62	1.7.E+06	0.00043	0.0164	0.284	2.606
S2		19.66	6.16	5.00	1.6.E+06	0.00040	0.0162	0.188	1.724
S3		19.62	5.01	5.00	1.3.E+06	0.00040	0.0163	0.125	1.149
S4		23.56	5.00	5.48	1.4.E+06	0.00037	0.0160	0.112	1.025

Tabla 2.15 Cantidad de Ventiladores por Conducto de inyección y cargas eléctricas

Las pérdidas por accesorios son iguales a las de la tabla 2.6, sin embargo, se deberá adicionar la SP originada por los filtros, figura 1.9 la cual equivale a 162 Pa. La SP parcial para los ventiladores axiales de inyección es de 475 Pa, pero debido a cualquier factor adicional (por experiencia en proyectos previos se recomienda un 10% del SP parcial) se estimó 47.5 Pa, es decir, la SP será de 523 Pa. La selección se realizará utilizando el software “Novenco AirBox”. Al igual que los ventiladores axiales de extracción, se desea utilizar un solo modelo para todos los conductos de inyección.

Modelo	Torre de Ventilación	Diámetro del Rotor	Caudal m^3/s	Cantidad de V. Axiales	Total KW 440/3/60
ACN-1400/578-10	S1	1400 mm	30.24	4	120
	S2	1400 mm	30.24	4	120
	S3	1400 mm	32.74	3	90
	S4	1400 mm	28.93	4	120

Tabla 2.16 Numero de Reynolds, factor de fricción y factor de pérdidas por conducto

Para los ventiladores axiales de inyección, se requieren 450 KW. En el anexo A.3 se presenta la ubicación de los ventiladores axiales en el interior de las torres de inyección.

2.2.6 Reguladores o *Dampers* motorizados y Rejillas Internas

El procedimiento que se utilizó es el señalado en la sección 2.1.4 y los resultados se muestran en la tabla 2.17

Nivel	Torres	Q_{torr} (m^3/s)	A_{dam} (m^2)	# Dampers	Dimensiones
N -3.6	S1, S2	29.70	9.9	3	2 m × 1.7 m
N -9.0	S1	27.81	9.27	3	2 m × 1.6 m
	S2	27.81	9.27	3	2 m × 1.6 m
	S3	42.12	14.04	4	2 m × 1.8 m
	S4	48.51	16.17	4	2 m × 2.1 m
N -12.6	S1	14.17	4.72	2	2 m × 1.2 m
	S2	14.17	4.72	3	2 m × 0.8 m
N -16.2	S3	28.06	9.35	4	2 m × 1.2 m
	S4	33.61	11.20	3	2 m × 1.9 m
N -19.8	S1, S2	35.10	11.7	4	2 m × 1.5 m

Tabla 2.17 Dimensiones de Reguladores de Aire y Rejillas de Inyección (Anexo A.1)

2.2.7 Rejillas Exteriores o *Louvers* de toma de Aire

La selección de los *louvers* de toma de aire, se realizará de igual forma que en la sección 2.1.5.2. En la tabla 2.17 se resume la cantidad de *louvers* y rejillas por torre de inyección.

Torre	Q_{T_torr} (m^3/s)	Área m^2	Cantidad Unidad	Dimensiones Pulgadas	Área Efectiva		Altura de las Torre m
					ft^2	m^2	
S1	120.95	60.47	4	205 x 40.82	170.56	15.85	4.2
			8	147.5 x 40.82	245.36	22.79	
			8	124 x 40.82	204.72	19.02	
			4	39 x 40.82	30.36	2.82	
S2	120.95	60.47	5	118 x 45.5	135.35	12.57	5.8
			10	124 x 45.5	286.4	26.61	
			5	196 x 45.5	229.2	21.29	
S3	98.23	49.11	10	159.25 x 42.5	344.5	32.01	5.40
			5	169 x 42.5	184.1	17.10	
S4	115.73	57.86	14	118 x 41.32	342.3	31.80	7.40
			7	110 x 41.32	160.79	14.94	
			7	82.5 x 41.32	119.84	11.13	

Tabla 2.18 Louvers de Toma de aire sobre la Plaza (Ver anexo A.3)

2.2.8 Filtros de Aire

En la figura 1.9 se presentan varios modelos, se utilizarán los FCP301-24242 y FCP301-12242, los cuales representan un SP de 0.55 in w.g. lo que equivalente a 162 Pa y es utilizado para selección de los ventiladores axiales de inyección. La selección de estos dependerá del área calculada para la toma de aire en las torres. Se presenta en la tabla 2.10 la cantidad de filtros que se utilizarán en cada uno de los *louvers* de las torres de inyección.

Filtros por Torres de Inyección										
	S1		S2		S3		S4		Todos	
Tipos de Filtro	24242	12242	24242	12242	24242	12242	24242	12242	24242	12242
Cantidad Unitaria	186	24	207	32	180	9	216	12	789	139

Tabla 2.19 Cantidad de filtros por Torres de Inyección

2.3 Sistemas adicionales

2.3.1 Ventiladores tipo *Jet Fan*

Estos ventiladores son los encargados de impulsar el aire desde los puntos de suministro hacia los de extracción. Cada *Jet fan* puede impulsar una tasa de flujo volumétrico de máximo $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver sección 1.4.2.1.2).

$$N_F = \frac{Q_{max}}{2.3 \text{ m}^3/\text{s}} \quad (2.9)$$

Donde N_F es el número de *Jet Fans* requeridos para garantizar una mezcla correcta y dispersión de aire por todo el subsuelo.

Para el primer subsuelo (N 0.0), se requiere un caudal máximo de $22.08 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir un total de:

$$N_F = \frac{22.08 \text{ m}^3/\text{s}}{2.3 \text{ m}^3/\text{s}} \rightarrow 9.6 \approx 10 \text{ Jet Fans}$$

Según lo realizado, este nivel requiere un total de 10 ventiladores modelo AUT-400. En la tabla 2.20 se resume cuántos *jet fans* se necesitan por nivel.

Nivel	$Q_{max} (\text{m}^3/\text{s})$	$Q_F (\text{m}^3/\text{s})$	N_F
N 0.0	22.08	2.3	10
N -3.6	79.20		35
N -9.0	195		85
N -12.6	120		52
N -16.2	120		52
N -19.8	93.60		41

Tabla 2.20 Cantidad de *Jet fans* por nivel

Deberán ubicarse en mayor cantidad en la zona de circulación de automotores, ya que es ahí en donde existe mayor concentración de CO. Mediante una simulación CFD en el capítulo 3, se ubicarán los *jet fans* en lugares estratégicos y se comprobará la cantidad calculada; si fuese el caso (por limitaciones de arquitectura de los niveles), este número deberá aumentar.

2.4.1 Sistema de detección de CO

En la sección 1.4.2.2 se menciona que cada sensor de CO tiene un radio de cobertura de 11.5 metros y, su cobertura deberá cubrir la totalidad del parqueadero subterráneo, cabe recalcar que cada 32 sensores se requerirá un monitor, el cual estará ubicado en un cuarto de control destinado por la constructora. En el anexo A.1 se presenta la ubicación de cada uno de los sensores, el resumen se tabula en la tabla 2.21.

Nivel	Sensores de CO	Monitores de CO	Sensores por Monitor
N 0.0	8	1	8
N -3.6	42	2	21
N -9.0	64	2	32
N -12.6	64	2	32
N -16.2	64	2	32
N -19.8	48	2	24

Tabla 2.21 Resumen Sensores de CO

3. Simulación y Modelo mediante CFD:

Con el fin de comprobar el diseño planteado se desarrolló una simulación, la cual será de gran utilidad para determinar la correcta ubicación de cada uno de los Jet Fans y la funcionalidad del diseño. Se realizó varias pruebas con la ayuda del software en cada subsuelo:

- Velocidades del aire a lo largo del subsuelo y líneas de corriente, mediante esta prueba se podrá apreciar dónde existe estancamiento de aire.
- Ubicación de *Jet fans* a lo largo de los subsuelos y, optimización de la localización de éstos.
- Cálculo de renovaciones de aire para lugares críticos.

3.1 Velocidades de aire en el parqueadero

- Con la ayuda de un software, como Autocad, se tomó el área útil (área descontada bodegas y columnas) del subsuelo N. -12.6, como se muestra en la figura 3.1.

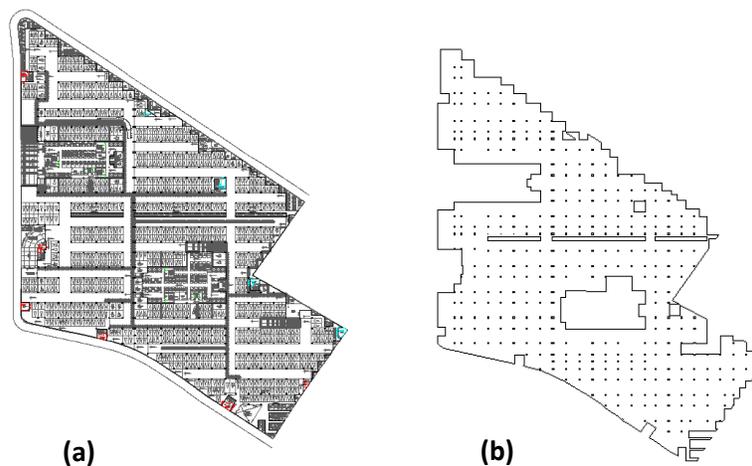


Figura 3.1 a) N -12.6 b) Área útil N. -12.6

- La geometría obtenida figura 3.1 b, se ingresó a un programa de dibujo mecánico, en este caso se utilizó SolidWorks en el cual se extrudió la geometría de acuerdo a altura de cada subsuelo, en este caso 2.88 metros. Debido al gran volumen del parqueadero, se trabajó en escala 1:1000, es decir en lugar de extrudir la altura mencionada, se extrudió 2.88 milímetros. Además en las salidas y entradas de aire de cada conducto (*dampers* y rejillas) se realizaron cortes de 0.05 mm, con las dimensiones de los reguladores de aire (ver sección 2.1.4 y 2.2.5). La figura se deberá guardar en formato IGES:

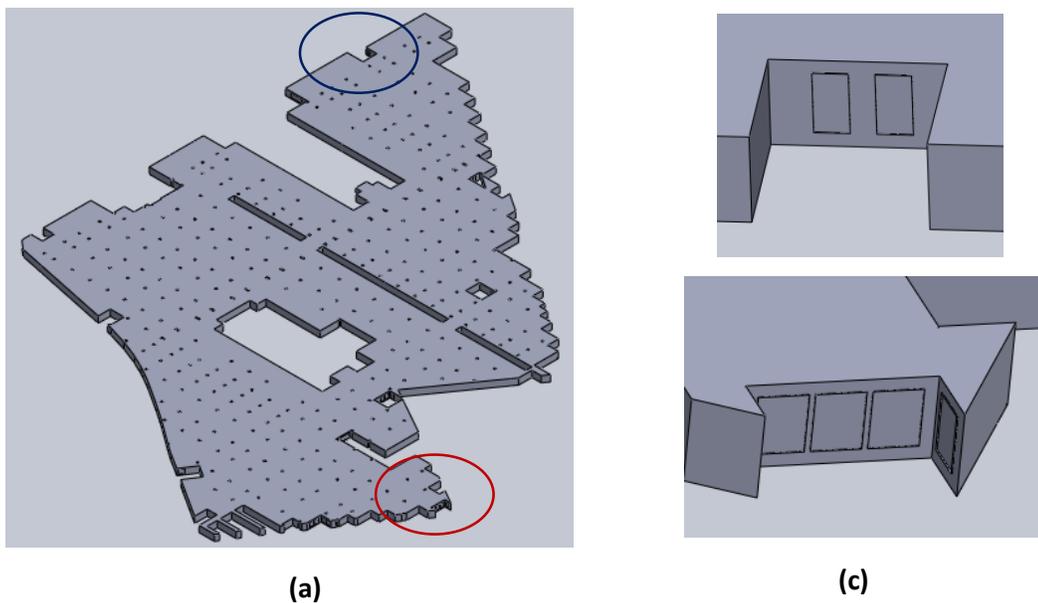


Figura 3.2 a) Geometría extruida b) Reguladores de extracción de aire E3 (azul) c) Reguladores de inyección de aire S1 (rojo)

- Se importó la geometría, se realizó un mallado fino y, se definió la ubicación de los reguladores de inyección y extracción, los que deberán ser identificados con diferentes nombres, para su futura utilización en las condiciones de contorno.

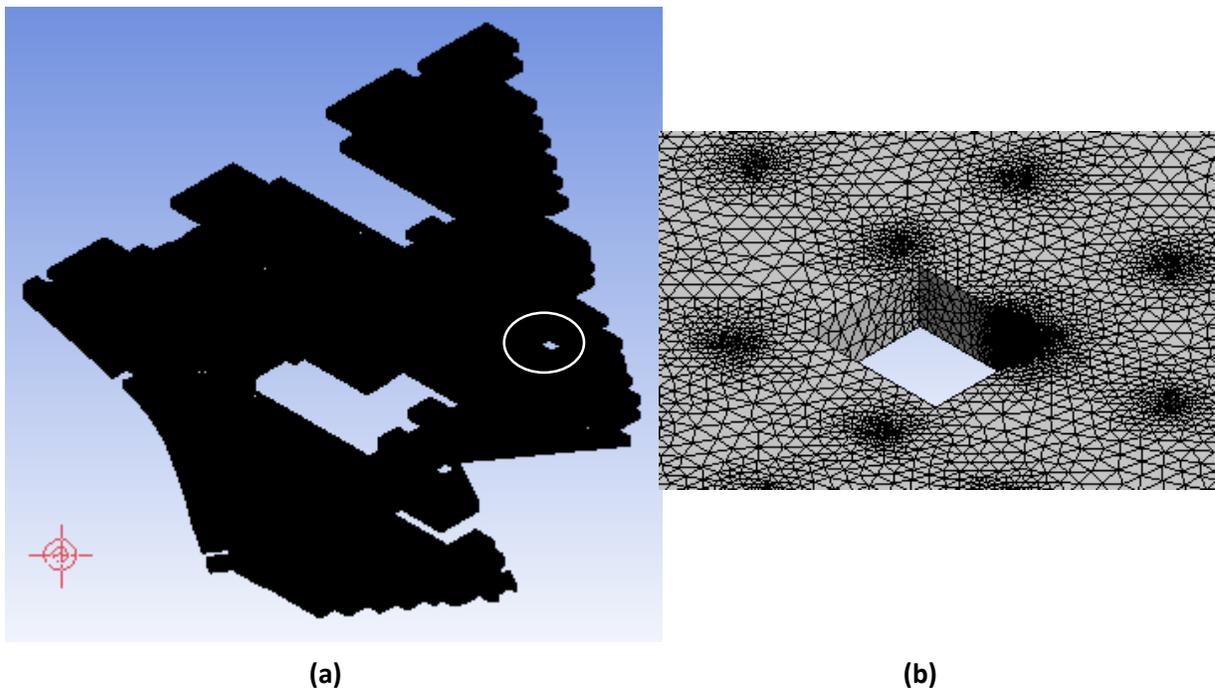


Figura 3.3 a) Mallado sobre el modelo b) Detalle de mallado

- Se deberá definir el material del modelo, el cual es aire a 25°C, y las condiciones de borde en cada cara señalada en la figura 3.4.
- La velocidad por los reguladores de inyección y extracción es de 3 m/s (ver sección 1.5.5), las dimensiones de éstos se encuentran en la tabla 2.8 y 2.17 respectivamente.
- La velocidad por las rampas se definirán en las condiciones de contorno en cada subsuelo.
- El programa proseguirá a la solución del modelo y, una vez obtenidos los resultados, se creó un plano ficticio a una altura media del parqueadero, es decir 1.44 metros, en el cual se simuló la dispersión de velocidades a lo largo del plano. Además se puede obtener líneas de corriente, las cuales parten desde los reguladores de inyección hacia la descarga de aire.

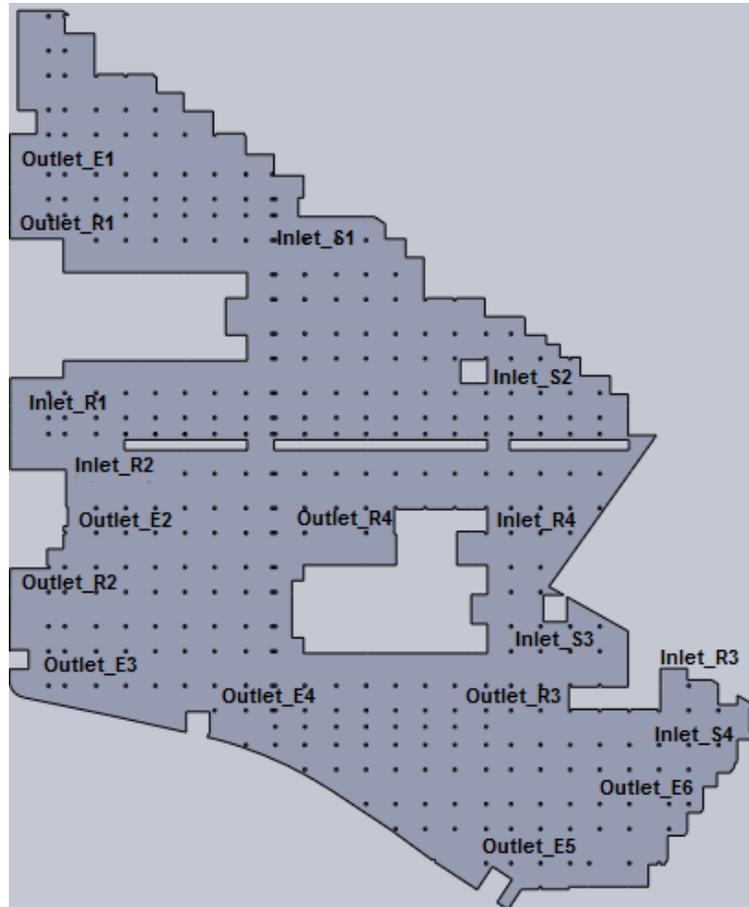
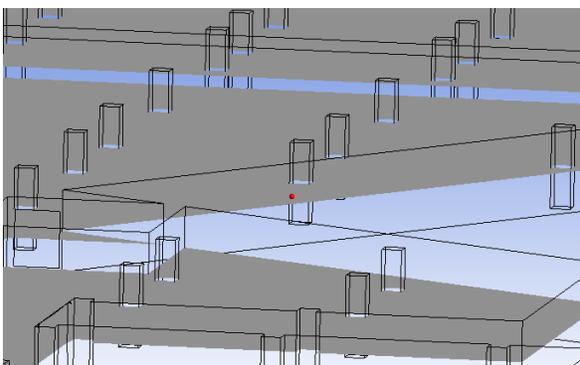
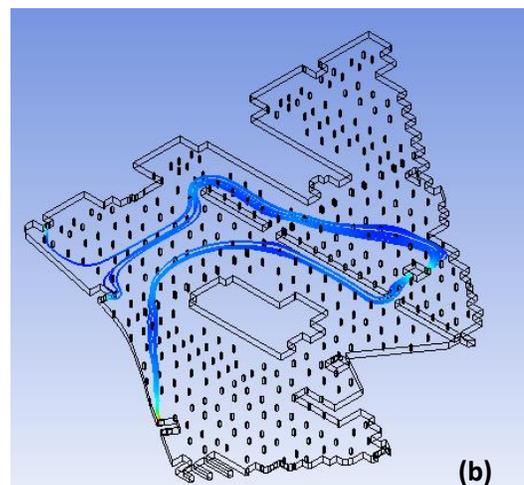


Tabla 3.4 Ubicación de condiciones de borde en el N -12.6



(a)



(b)

Figura 3.5 a) Ubicación de Plano (1.4 metros de altura) b) Líneas de Corriente desde S2

3.1.1 Condiciones de borde

En función de un área conocida por la que atraviesa el flujo, se deberá ingresar en el Software una velocidad determinada (el área es una constante de la construcción, la tasa de flujo volumétrico y la velocidad son dependientes del % de Inyección, ver sección 2.2.1). En el anexo B se presenta el cálculo detallado de las condiciones de borde en las rampas internas.

Nivel 0.0:

En este nivel existe una rampa (Rext1) por la que ingresa aire desde el exterior a una velocidad de 1.06 m/s (ver sección 2.2.1), además tiene un área de 64.40 m^2 lo que implica que la tasa de flujo volumétrico por Rext1 es $68.264 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal requerido para este nivel es $22.08 \text{ m}^3/\text{s}$, entonces los restantes $46.184 \text{ m}^3/\text{s}$ serán trasladados al N -3.6 por la rampa R1. En la figura 3.6 se señalan las condiciones de contorno para este ambiente y en la tabla 3.1 se las resume.

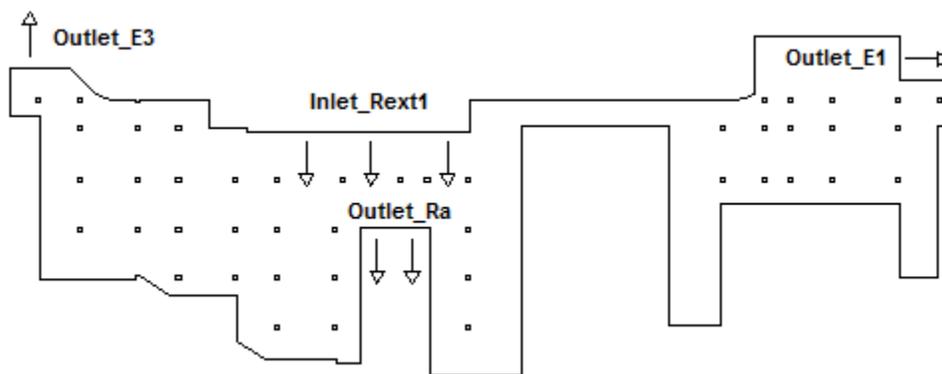


Figura 3.6 Ubicación de condiciones de borde (0.0)

Ingreso de aire				Salida de aire			
Ubicación	Área (m^2)	Q (m^3/s)	V (m/s)	Ubicación	Área (m^2)	Q (m^3/s)	V (m/s)
Inlet_Rext1	64.40	68.26	1.06	Outlet_E1	3.68	11.04	3.00
				Outlet_E3	3.68		
				Outlet_Ra	29.12	46.18	1.59

Tabla 3.1 Definición de Condiciones de borde N 0.0.

Nivel -3.60

La rampa (Rext2) localizada en este nivel, tiene un área de $38.36 m^2$ e ingresará un caudal de $40.6616 m^3/s$. En el cuadro 3.1 se señala que por Ra se distribuirá $46.184 m^3/s$, la ubicación de las condiciones de borde se presentan en la figura 3.7 y en la tabla 3.2 se las resume.

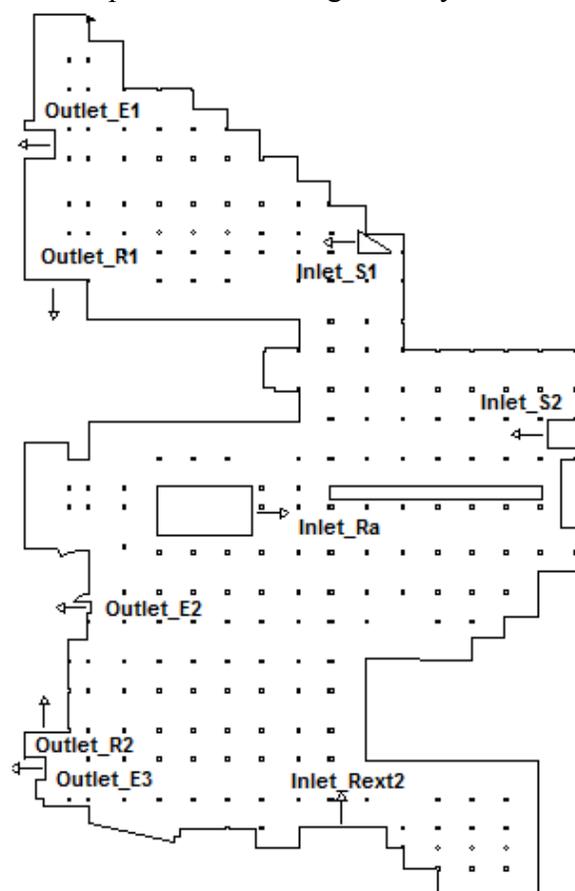


Figura 3.7 Ubicación de condiciones de borde (-3.60)

Ingreso de aire				Salida de aire			
Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
Inlet_S1	9.90	29.70	3.00	Outlet_E1	8.80	26.40	3.00
Inlet_S2	9.90	29.70		Outlet_E2	8.80	26.40	
Inlet_Rext2	38.36	40.66	1.06	Outlet_E3	8.80	26.40	
Inlet_Ra	30.80	46.18	1.50	Outlet_R1	27.44	33.37	1.22
				Outlet_R2	28.00	33.05	

Tabla 3.2 Definición de Condiciones de borde N -3.60

Nivel -9.00

En este subsuelo se encuentra la última rampa (Rext3), que permite ingreso de aire del exterior del edificio, tiene un área de 38.36 m² y permite un caudal de 65.1158 m³/s.

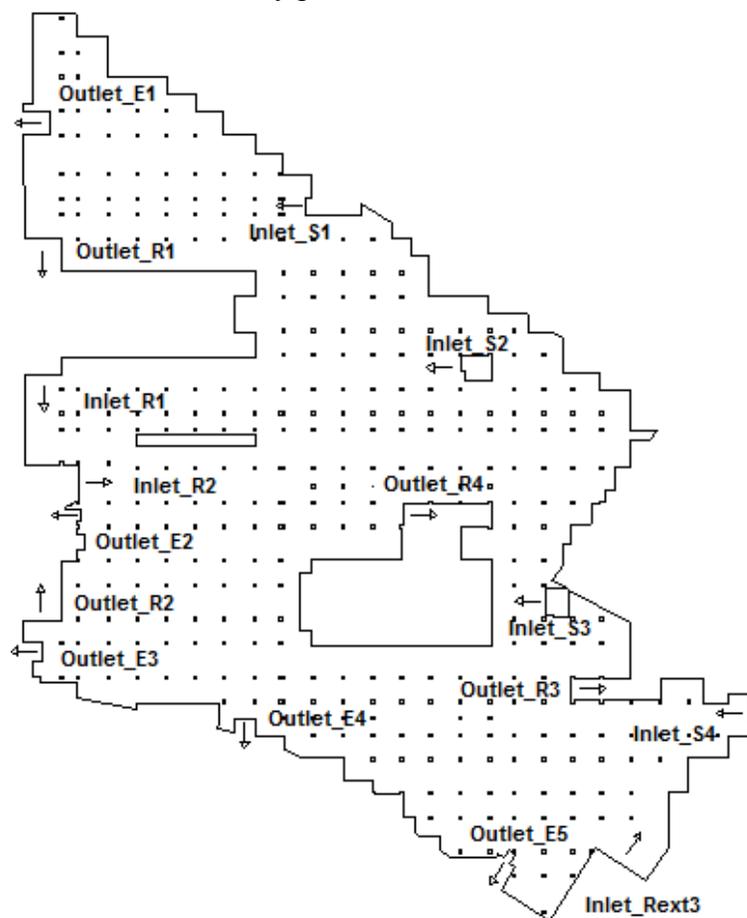


Figura 3.8 Ubicación de condiciones de borde (-9.0)

Ingreso de aire				Salida de aire			
Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
Inlet_S1	9.27	27.81	3.00	Outlet_E1	12.07	36.21	3.00
Inlet_S2	9.27	27.81		Outlet_E2	9.30	27.90	
Inlet_S3	14.04	42.12		Outlet_E3	11.61	34.83	
Inlet_S4	16.17	48.51		Outlet_E4	11.61	34.83	
			Outlet_E5	20.41	61.23		
Inlet_R1	45.54	33.37	0.73	Outlet_R1	45.54	26.27	0.58
Inlet_R2	42.78	34.05	0.80	Outlet_R2	46.00	26.55	
Inlet_Rext3	61.43	65.12	1.06	Outlet_R3	27.00	15.58	
				Outlet_R4	26.68	15.39	

Tabla 3.3 Definición de Condiciones de borde N -9.0

Nivel -12.60 y Nivel -16.20

En ambos niveles varía solo la velocidad de aire por las rampas.

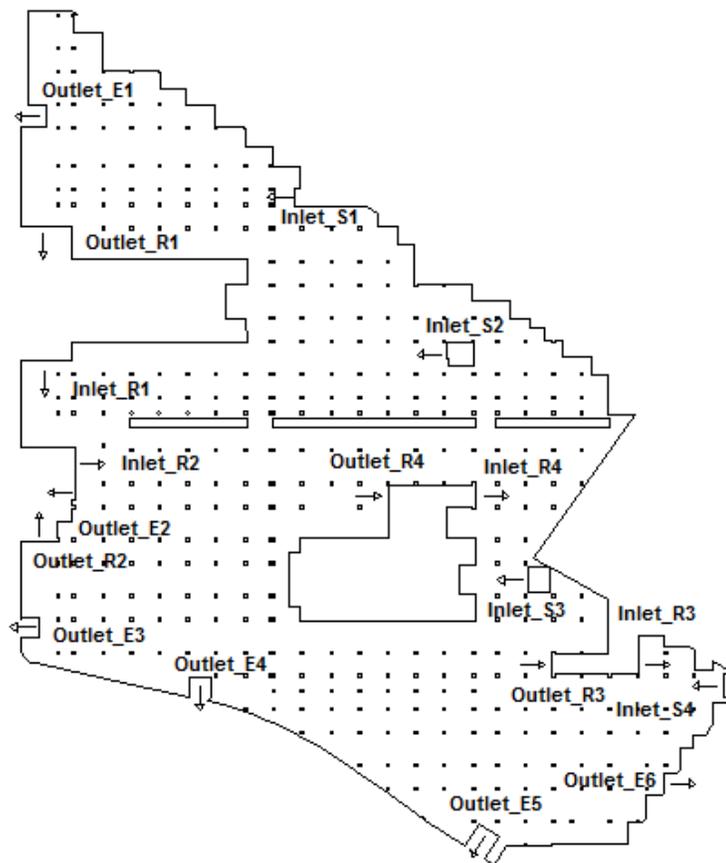


Figura 3.9 Ubicación de condiciones de borde (-12.6 y -16.20)

Ingreso de aire				Salida de aire			
Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
Inlet_S1	4.72	14.16	3.00	Outlet_E1	6.20	18.60	3.00
Inlet_S2	4.72	14.16		Outlet_E2	4.35	13.05	
Inlet_S3	9.35	28.05		Outlet_E3	6.20	18.60	
Inlet_S4	11.20	33.60		Outlet_E4	4.35	13.05	
				Outlet_E5	8.38	25.14	
			Outlet_E6	10.51	31.53		
Inlet_R1	27.44	26.27	0.96	Outlet_R1	27.44	16.89	0.62
Inlet_R2	26.04	26.54	1.01	Outlet_R2	27.44	16.89	
Inlet_R3	16.24	15.58	0.96	Outlet_R3	16.24	10.00	
Inlet_R4	16.24	15.39	0.95	Outlet_R4	16.24	10.00	

Tabla 3.4 Definición de Condiciones de borde N -12.6

Ingreso de aire				Salida de aire			
Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Ubicación	Área (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
Inlet_S1	4.72	14.16	3.00	Outlet_E1	6.20	18.60	3.00
Inlet_S2	4.72	14.16		Outlet_E2	4.35	13.05	
Inlet_S3	9.35	28.05		Outlet_E3	6.20	18.60	
Inlet_S4	11.20	33.60		Outlet_E4	4.35	13.05	
				Outlet_E5	8.38	25.14	
			Outlet_E6	10.51	31.53		
Inlet_R1	27.44	16.89	0.62	Outlet_R1	27.44	7.47	0.27
Inlet_R2	26.04	16.89	0.65	Outlet_R2	27.44	7.47	
Inlet_R3	16.24	10.00	0.62	Outlet_R3	16.24	4.42	
Inlet_R4	16.24	10.00	0.62	Outlet_R4	16.24	4.42	

Tabla 3.5 Definición de Condiciones de borde N -16.2

Nivel -19.8

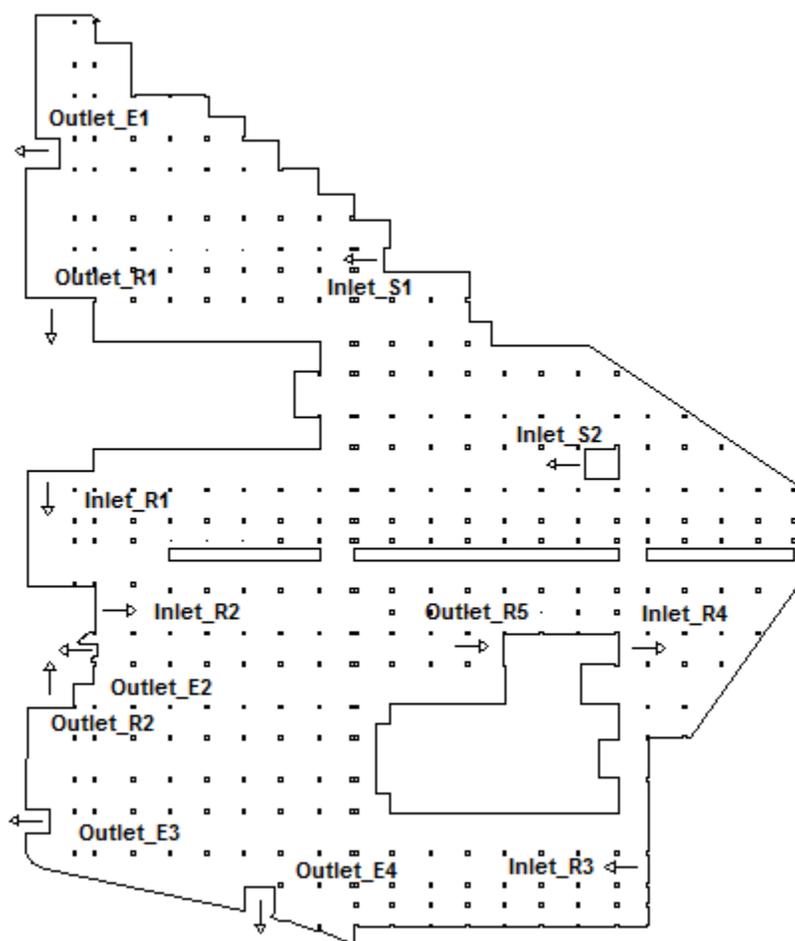


Figura 3.10 Ubicación de condiciones de borde (-19.8)

Ingreso de aire				Salida de aire			
Ubicación	Área (m^2)	Q (m^3/s)	V (m/s)	Ubicación	Área (m^2)	Q (m^3/s)	V (m/s)
Inlet_S1	11.70	14.16	3.00	Outlet_E1	6.20	18.60	3.00
Inlet_S2	11.70	14.16		Outlet_E2	4.35	13.05	
Inlet_R1	27.44	7.47	0.27	Outlet_E3	6.20	18.60	
Inlet_R2	26.04	7.47	0.29	Outlet_E4	4.35	13.05	
Inlet_R3	16.24	4.42	0.27				
Inlet_R4	16.24	4.42	0.27				

Tabla 3.6 Definición de Condiciones de borde N -19.8

3.1.2 Resultados

En el gráfico de resultados, se representa en color rojo la velocidad de aire igual o mayor que 1 m/s y en color azul los lugares de estancamiento, en los que no existe mayor movimiento de aire.

Nivel 0.0

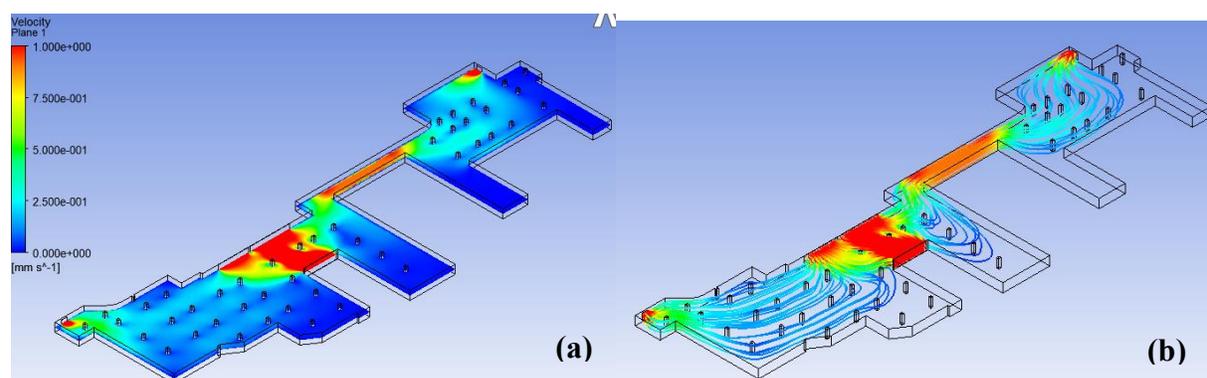


Figura 3.11 Resultados N 0.0 a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Nivel -3.6

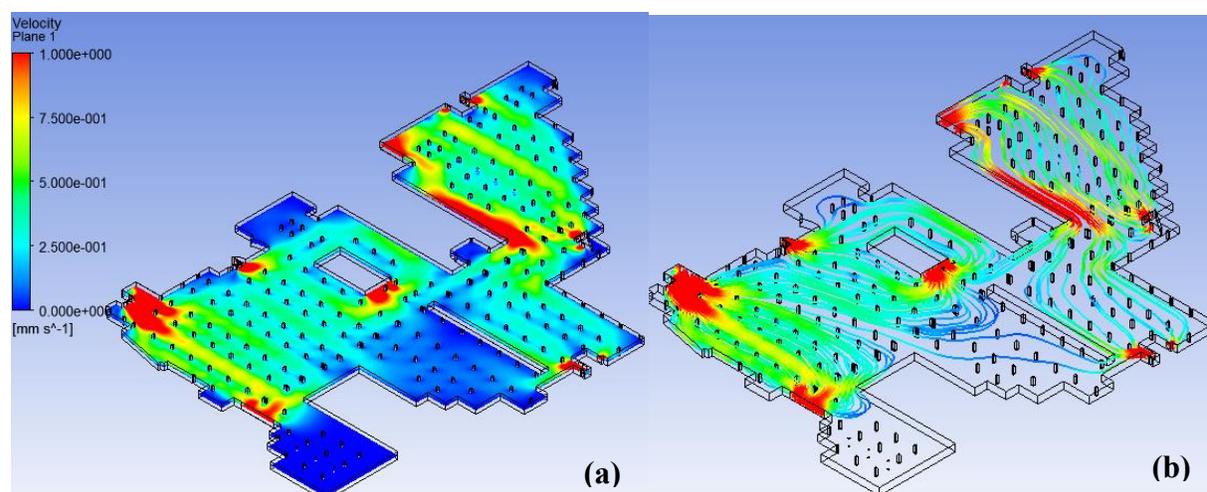


Figura 3.12 Resultados N -3.6 a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Nivel -9.0

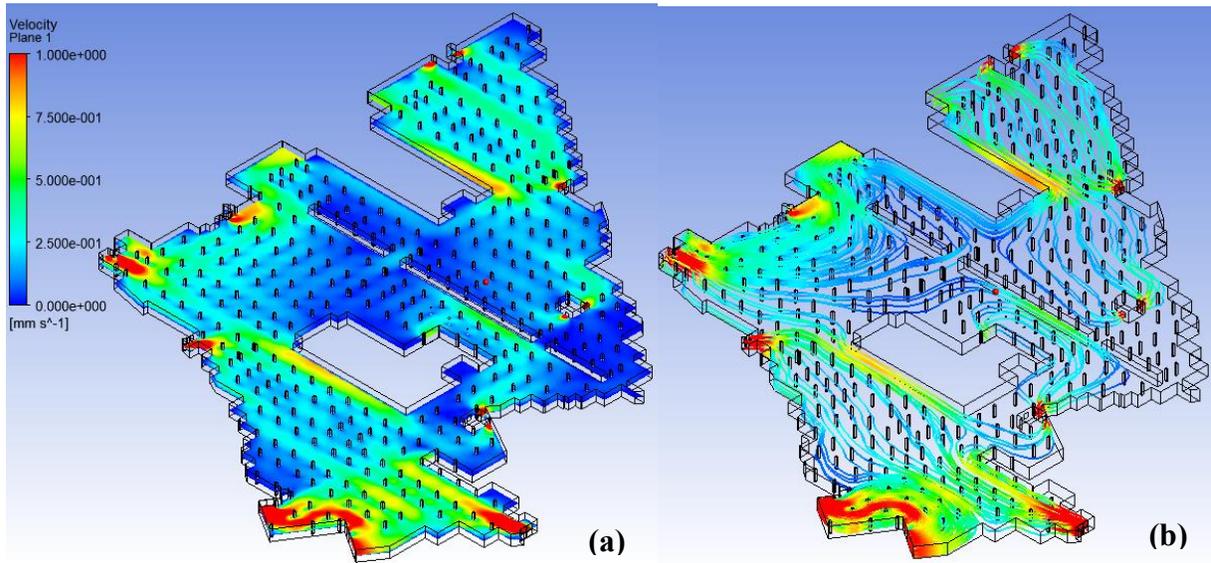


Figura 3.13 Resultados N -9.0 a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Nivel -12.6

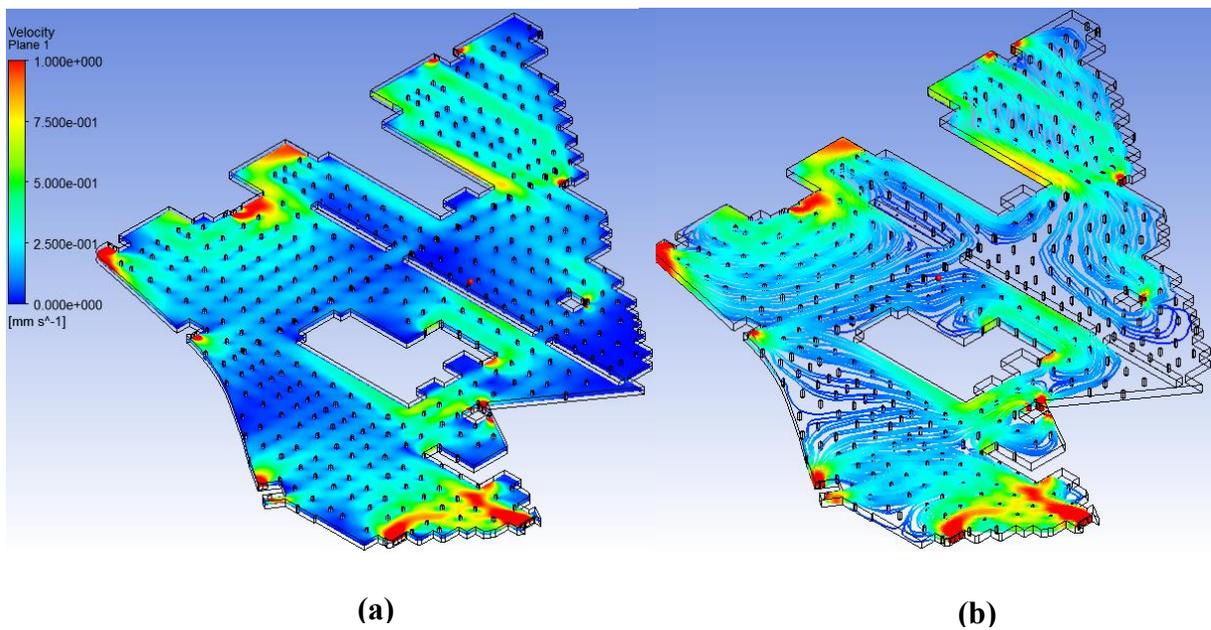


Figura 3.14 Resultados N -12.6 a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Nivel -16.2

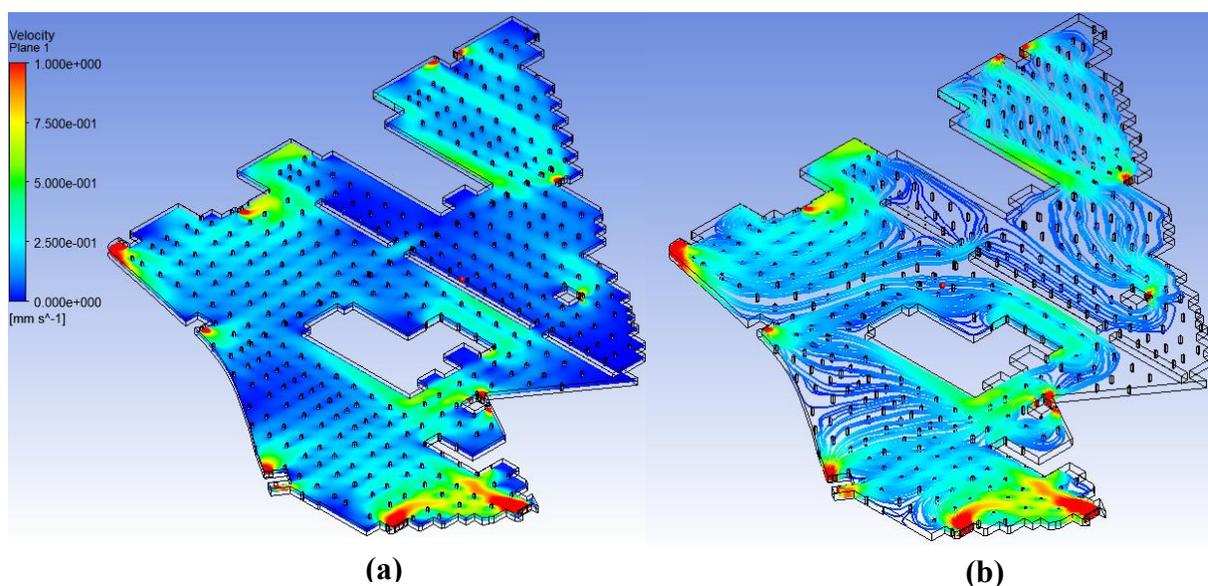


Figura 3.15 Resultados N -16.2 a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Nivel -19.8

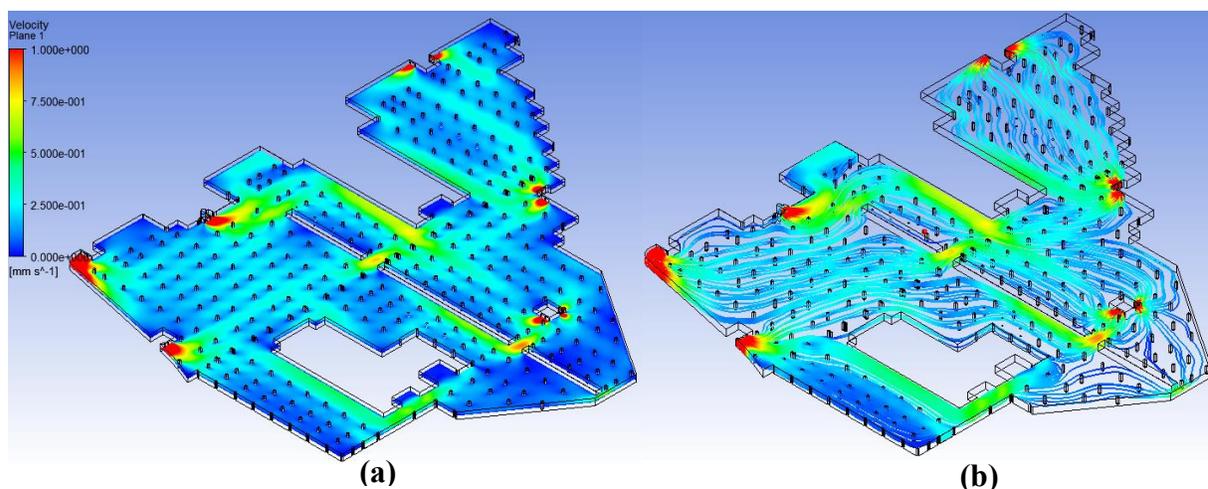


Figura 3.16 Resultados N -19.8 a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

La malla generada para la simulación de los subsuelos tiene las características resumidas en la tabla 3.7.

Nivel	# Nodos	# Elementos
0.0	347 168	1 775 995
-3.6	1 033 104	5 333 198
-9.0	1 841 314	9 779 499
-12.6	1 360 051	7 029 532
-16.2		
-19.8	1 228 711	6 352 597

Tabla 3.7 Características de la malla

3.2 Análisis con *Jet fans*

En esta sección se determinará la correcta ubicación de los *Jet fans*, para obtener una distribución óptima, se realizó un proceso iterativo hasta obtener una dispersión uniforme. El procedimiento para modelar los ventiladores fue el siguiente:

- Los resultados obtenidos en la sección 3.1.2 sirven como guía para la ubicación de los *Jet fans*, se dibujaron rectángulos de 0.854 milímetros por 0.5220 milímetros, estas son las dimensiones de los ventiladores por impulso, sobre la superficie de la geometría extruida. Se realizó un corte con una profundidad de 0.423 milímetros como se muestra en la figura 3.17.

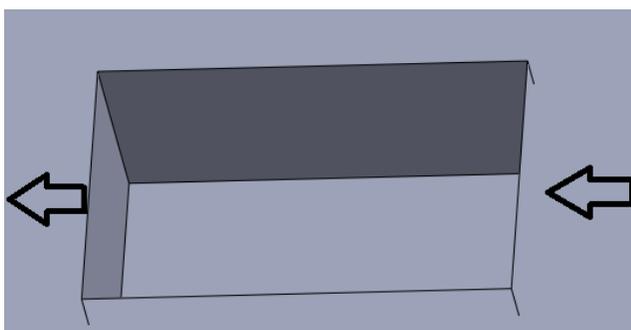
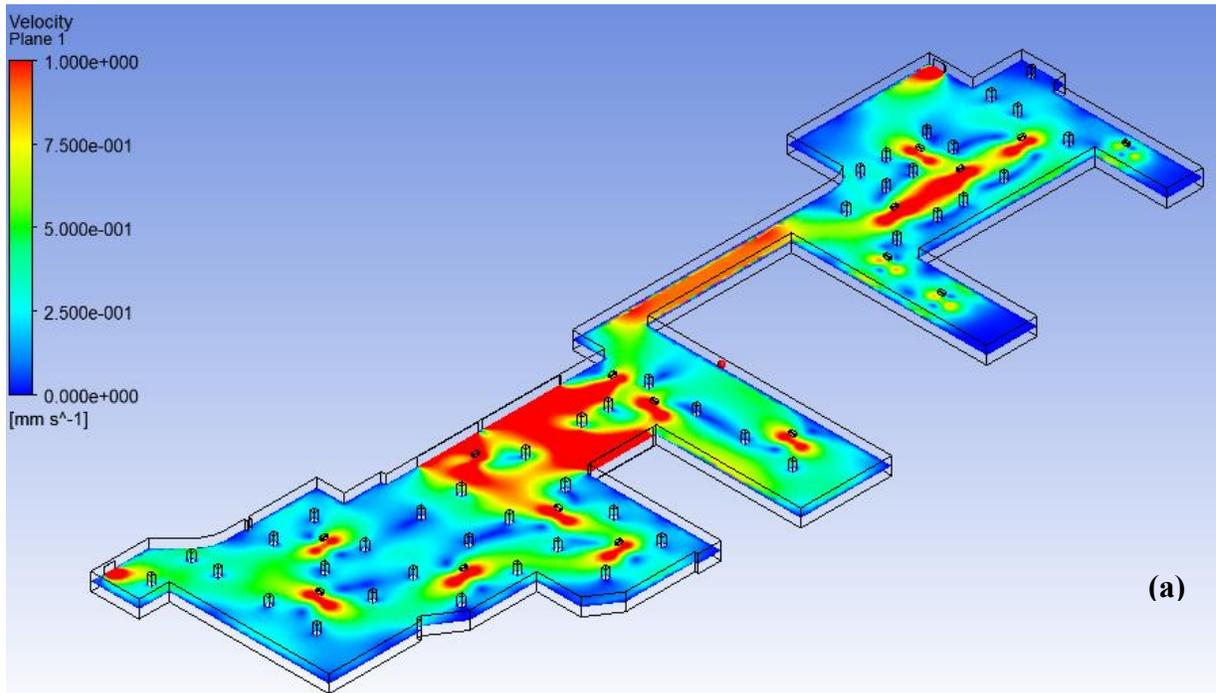


Figura 3.17 Representación en el modelo de los ventiladores por impulso

- Dentro de la sección mallado, se deberá elegir las caras de los *Jet fans*, por donde se realiza la toma de aire y por donde la expulsión, a estos se los denominó como Outlet_V e Inlet_V, respectivamente. Finalmente en las condiciones de borde se determinó un caudal de ingreso y de salida de $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada ventilador por impulso.
- Se presentan los resultados finales obtenidos después de realizar varias distribuciones para cada nivel.

Nivel 0.0



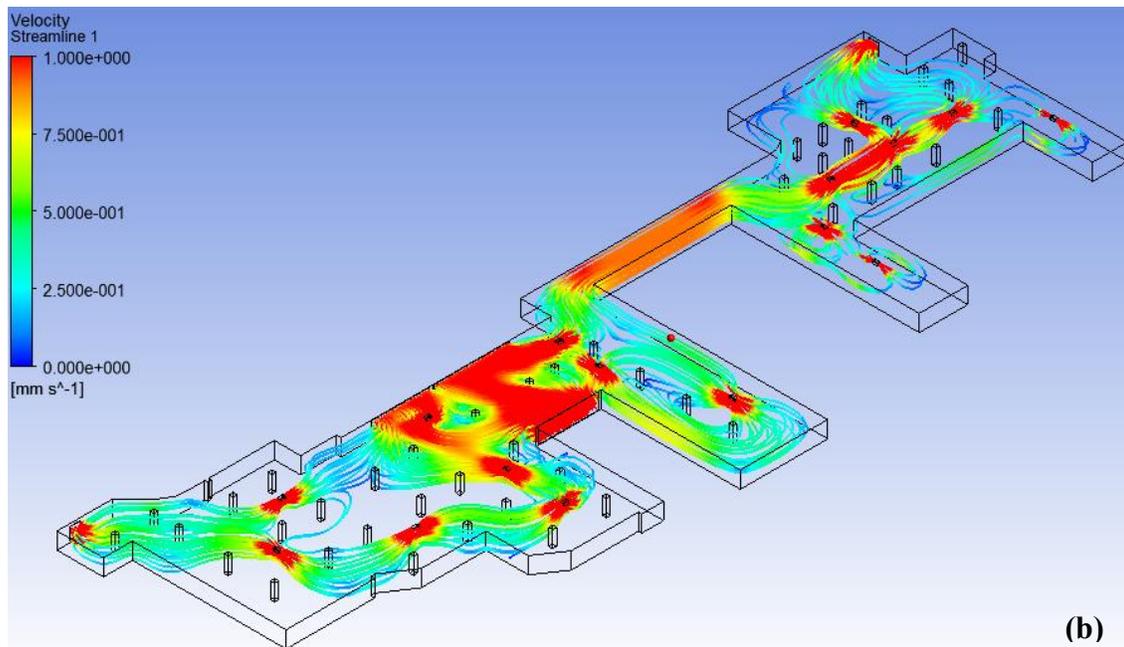
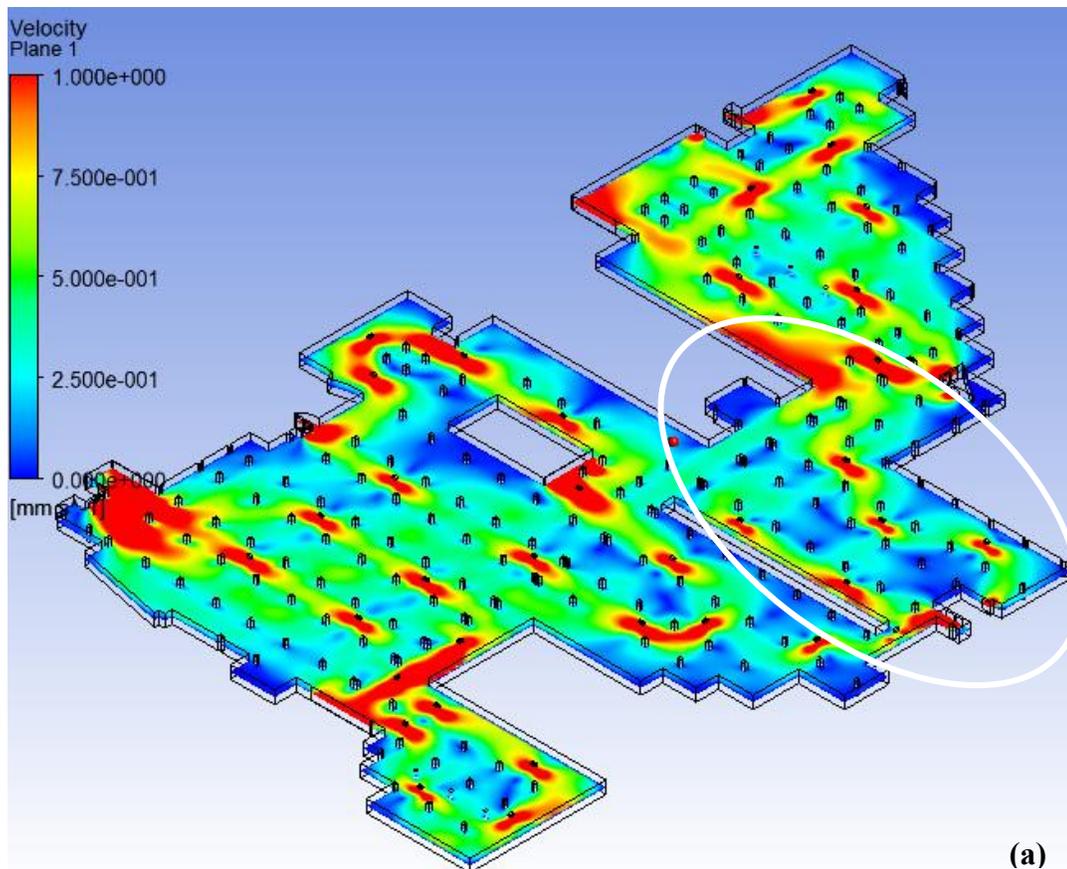


Figura 3.18 Análisis con *Jet fans* a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Nivel -3.6



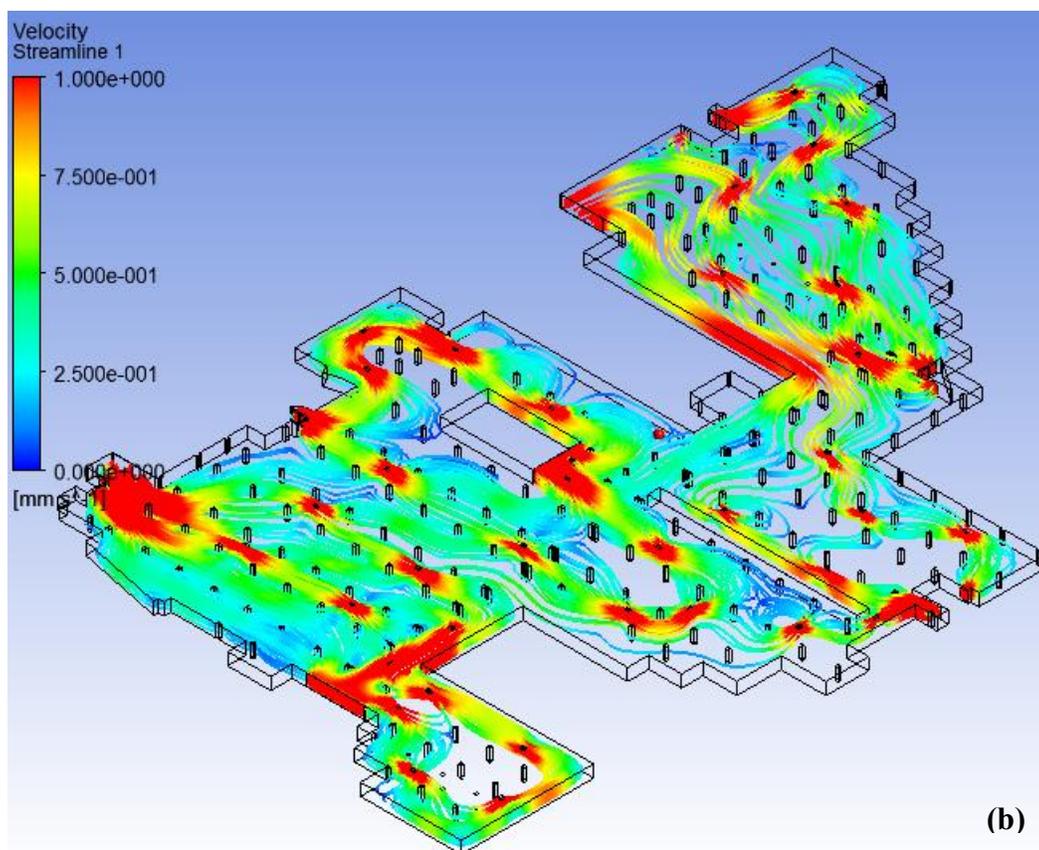


Figura 3.19 Análisis con *Jet fans* a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Se tomará un sector crítico del parqueadero, mediante el promedio de velocidades se podrá determinar los ACH (ecuación 1.1), el área analizada se encuentra marcada con un círculo color de blanco en la figura 3.19 a. Se trazaron líneas longitudinales (figura 3.20 b) y, con la ayuda de CFX se determinó las velocidades en diferentes puntos.

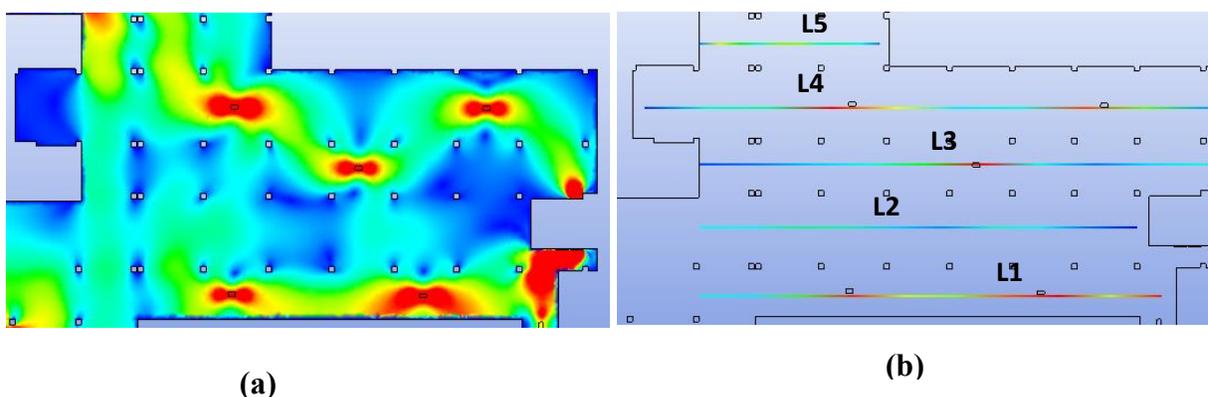


Figura 3.20 a) Área para análisis b) Líneas longitudinales para velocidad de aire

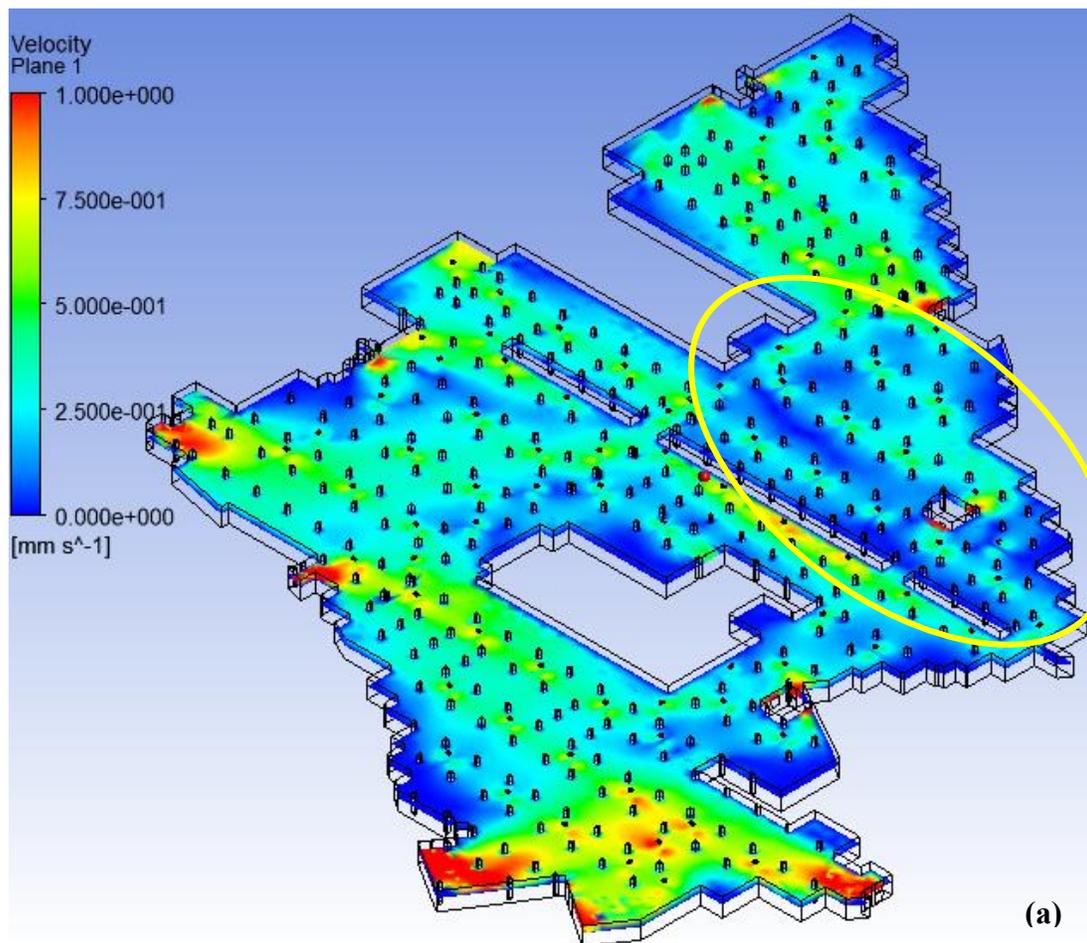
Cada línea fue dividida en 10 partes iguales, donde fue medida la velocidad, ya que para los cálculos nos interesa la velocidad promedio del área crítica y, se resumen en la tabla 3.8.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
L1	0.30	0.23	0.53	0.96	0.66	0.59	0.93	1.21	0.66	0.98	0.70
L2	0.26	0.25	0.41	0.38	0.20	0.12	0.32	0.25	0.09	0.01	0.23
L3	0.36	0.09	0.19	0.29	0.50	1.09	0.28	0.09	0.21	0.29	0.34
L4	0.04	0.33	0.40	1.09	0.73	0.23	0.31	0.94	0.55	0.14	0.48
L5	0.66	0.69	0.50	0.34	0.56	0.58	0.36	0.38	0.30	0.10	0.45
Total											0.44

Tabla 3.8 Velocidades promedio en m/s

Al final de esta sección se presenta la tabla 3.12, con el resumen de resultados de las renovaciones de aire por hora y la cantidad final de *Jet fans* requeridos.

Nivel -9.0



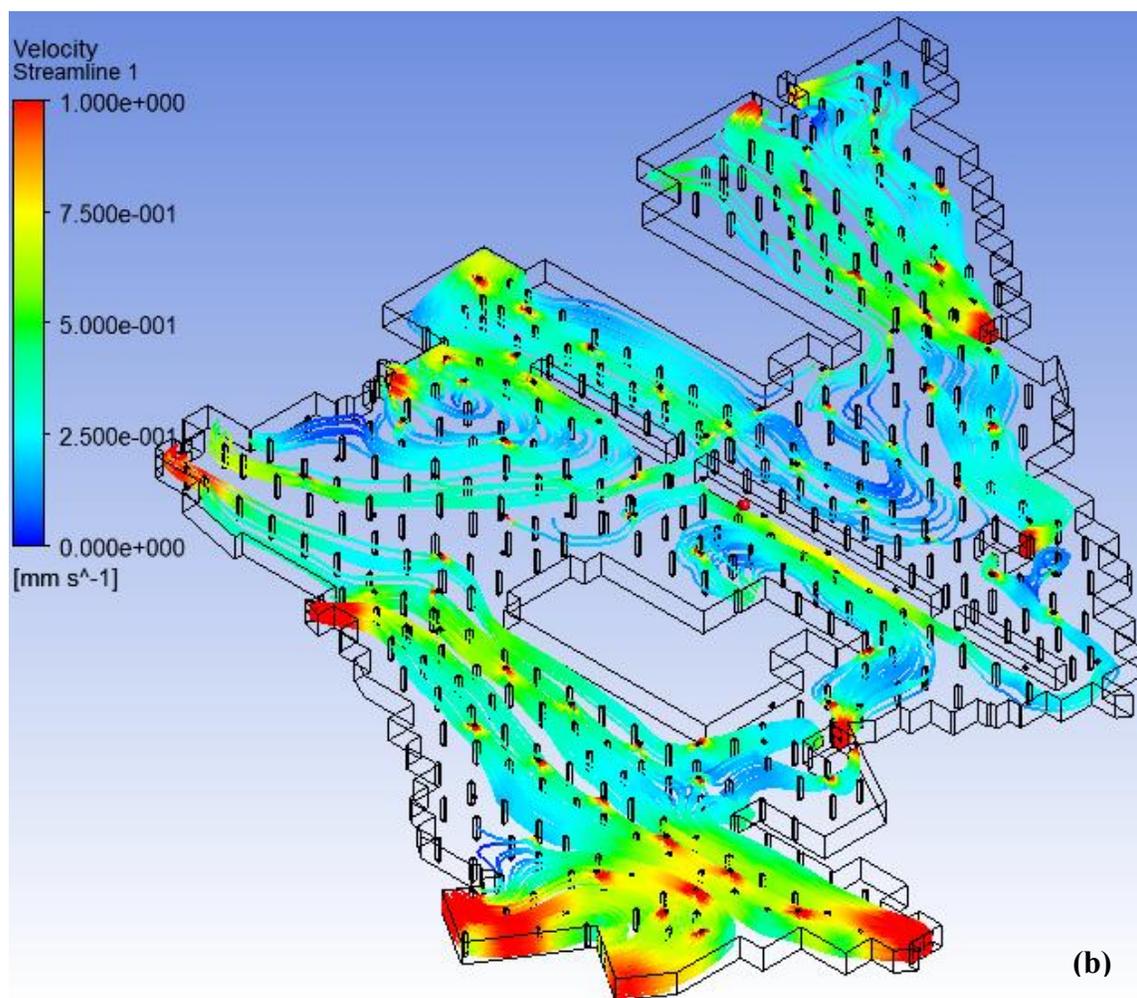


Figura 3.21 Análisis con *Jet fans* a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Se seleccionó el sector marcado con color amarillo, en la figura 3.21 a, para realizar el análisis de renovaciones de aire.

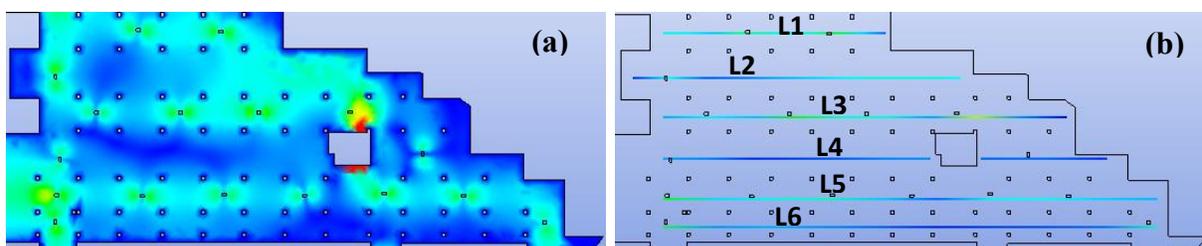


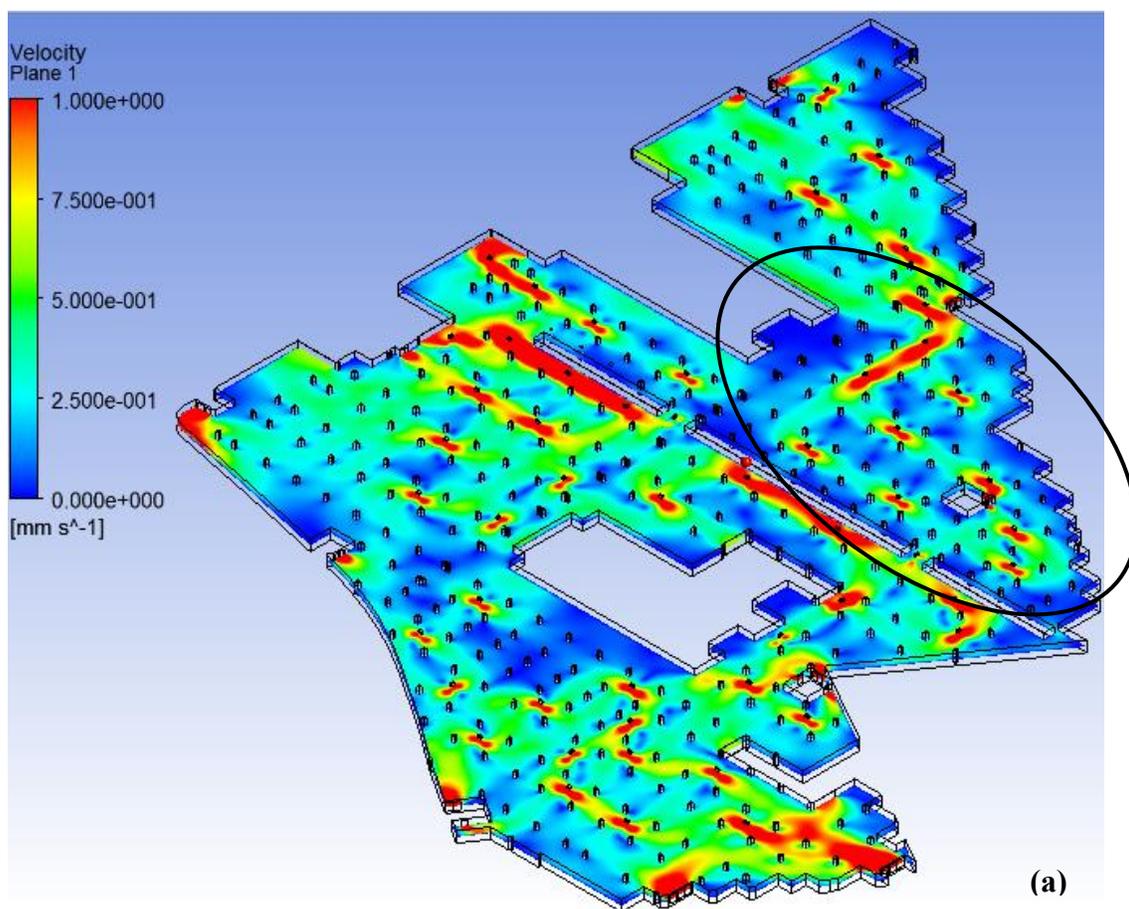
Figura 3.22 a) Área para análisis b) Líneas longitudinales para velocidad de aire

En la tabla 3.9 se resume el promedio de la velocidad en el área crítica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
L1	0.29	0.24	0.19	0.40	0.37	0.25	0.34	0.48	0.22	0.10	0.29
L2	0.03	0.27	0.07	0.10	0.16	0.21	0.27	0.32	0.35	0.35	0.21
L3	0.16	0.24	0.19	0.48	0.31	0.31	0.15	0.63	0.12	0.01	0.26
L4	0.14	0.11	0.03	0.05	0.07	0.11	0.11	0.06	0.08	0.06	0.08
L5	0.49	0.21	0.29	0.36	0.19	0.08	0.27	0.25	0.20	0.17	0.25
L6	0.46	0.13	0.16	0.12	0.08	0.03	0.05	0.06	0.08	0.34	0.15
Total											0.21

Tabla 3.9 Velocidades promedio en m/s

Nivel -12.6



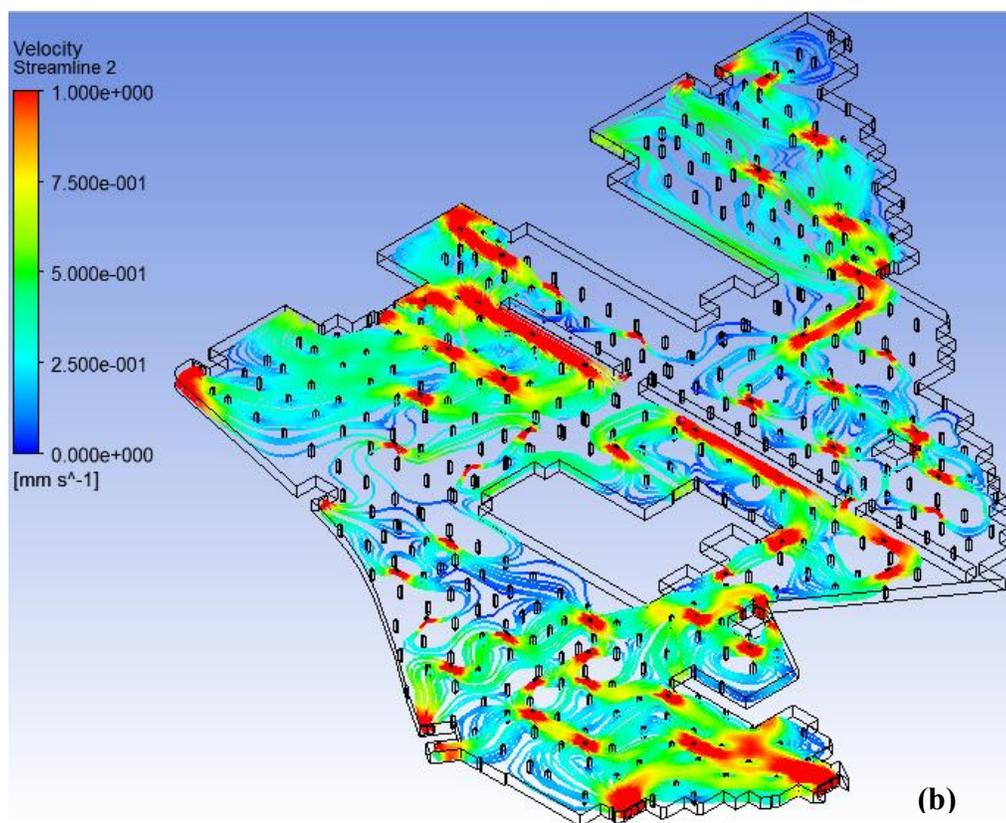
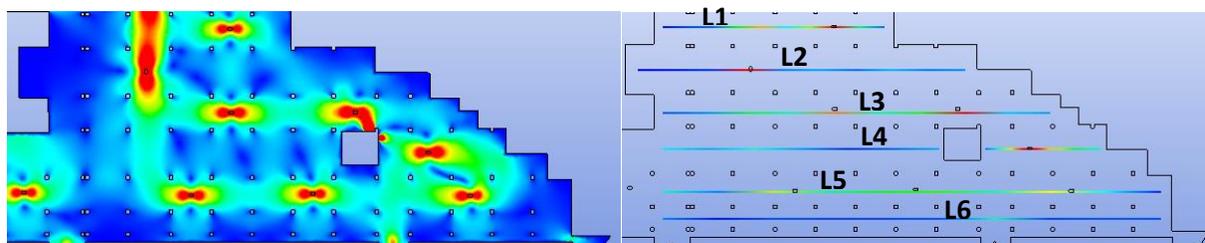


Figura 3.23 Análisis con *Jet fans* a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Se seleccionó el sector marcado con color negro, en la figura 3.23 a, en el que se realizó el análisis de renovaciones.



(a)

(b)

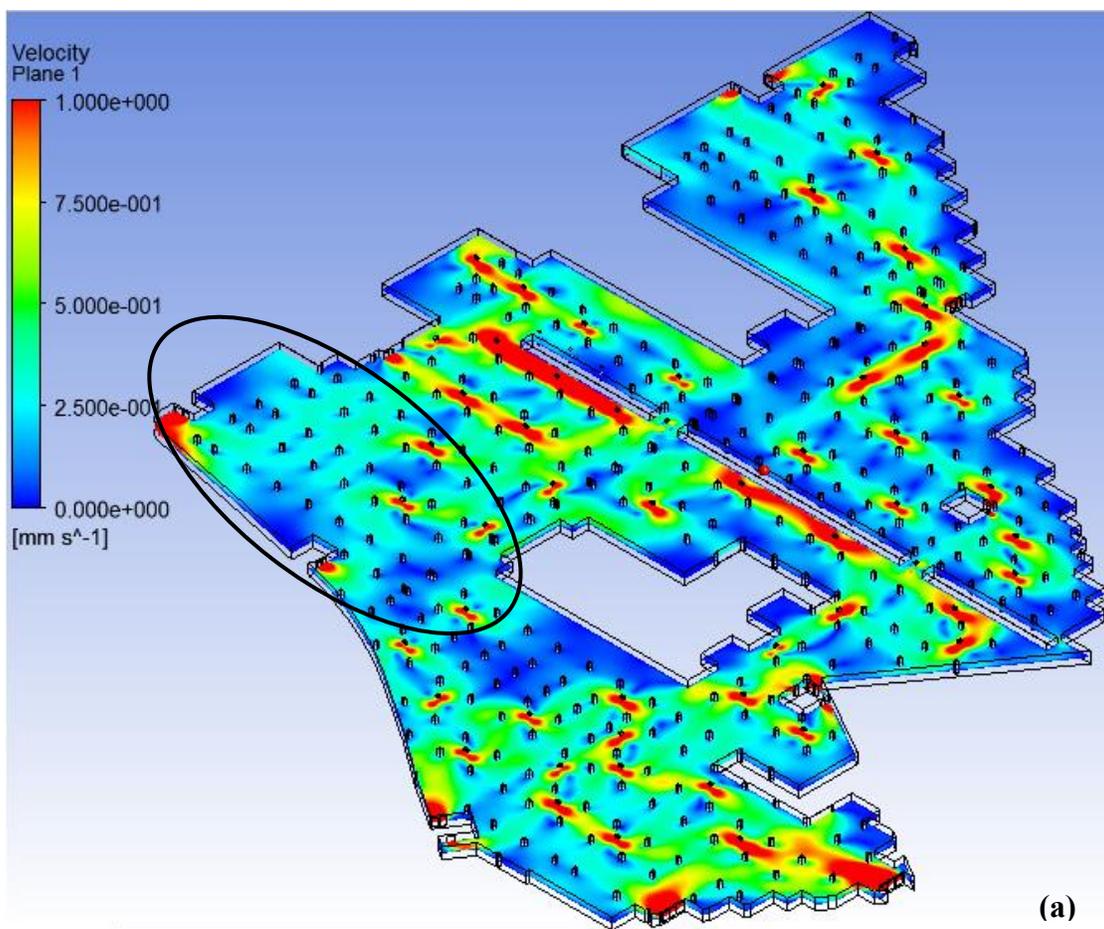
Figura 3.24 a) Área para análisis b) Líneas longitudinales para velocidad de aire

En la tabla 3.10 se resume el cálculo del promedio de la velocidad.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
L1	0.01	0.06	0.08	0.49	0.85	0.24	0.59	1.01	0.44	0.08	0.39
L2	0.01	0.02	0.04	1.15	0.10	0.15	0.09	0.17	0.10	0.12	0.19
L3	0.07	0.12	0.48	0.37	0.90	0.38	0.51	1.28	0.20	0.14	0.44
L4	0.23	0.15	0.30	0.14	0.04	0.08	0.16	0.33	1.08	0.09	0.26
L5	0.33	0.10	0.65	0.43	0.49	0.52	0.38	0.74	0.25	0.02	0.39
L6	0.11	0.02	0.07	0.06	0.06	0.07	0.34	0.05	0.07	0.06	0.09
Total											0.29

Tabla 3.10 Velocidades promedio en m/s

Nivel -16.2



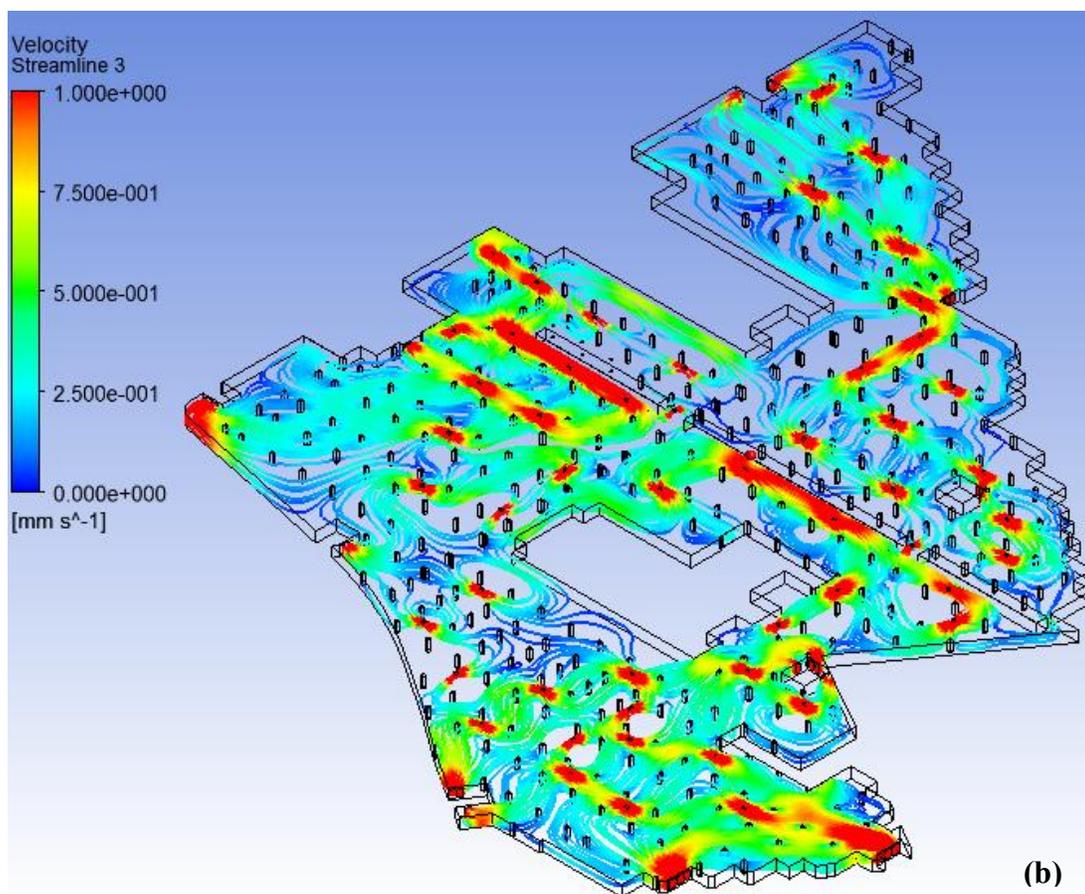


Figura 3.25 Análisis con *Jet fans* a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Para el análisis de ACH se seleccionó el área marcada con color negro en la figura 3.25 a

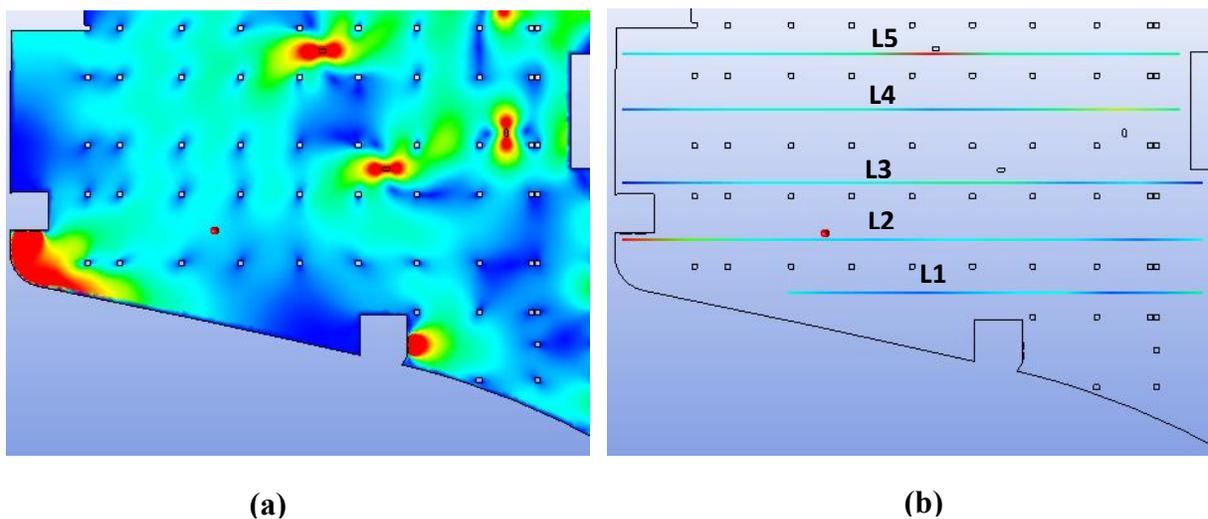


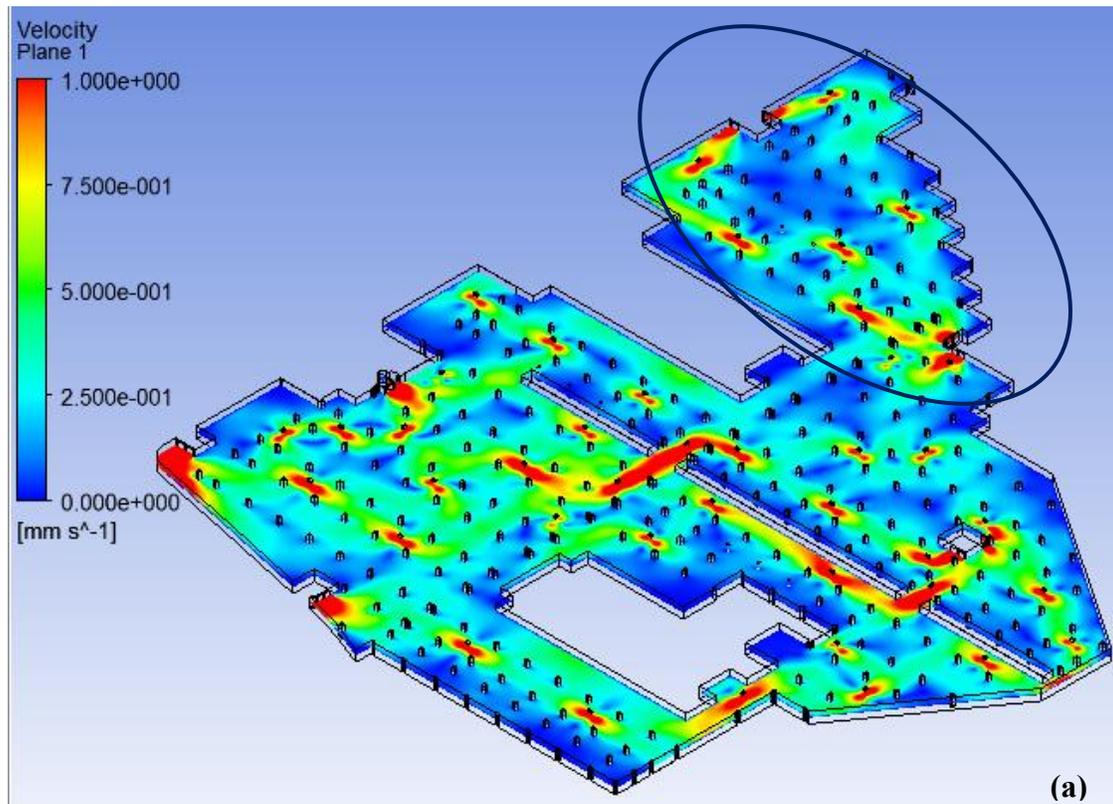
Figura 3.26 a) Área para análisis b) Líneas longitudinales para velocidad de aire

El promedio de velocidades de la figura 3.26 b, se presenta en la tabla 3.11.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
L1	0.30	0.16	0.12	0.08	0.17	0.24	0.27	0.07	0.13	0.40	0.19
L2	1.92	0.54	0.30	0.22	0.19	0.25	0.32	0.22	0.09	0.25	0.43
L3	0.01	0.15	0.26	0.26	0.29	0.43	0.41	0.13	0.23	0.02	0.22
L4	0.07	0.22	0.31	0.33	0.35	0.14	0.17	0.44	0.65	0.43	0.31
L5	0.22	0.25	0.29	0.32	0.44	1.00	0.42	0.35	0.28	0.42	0.40
Total											0.31

Tabla 3.11 Velocidades promedio en *m/s*

Nivel -19.8



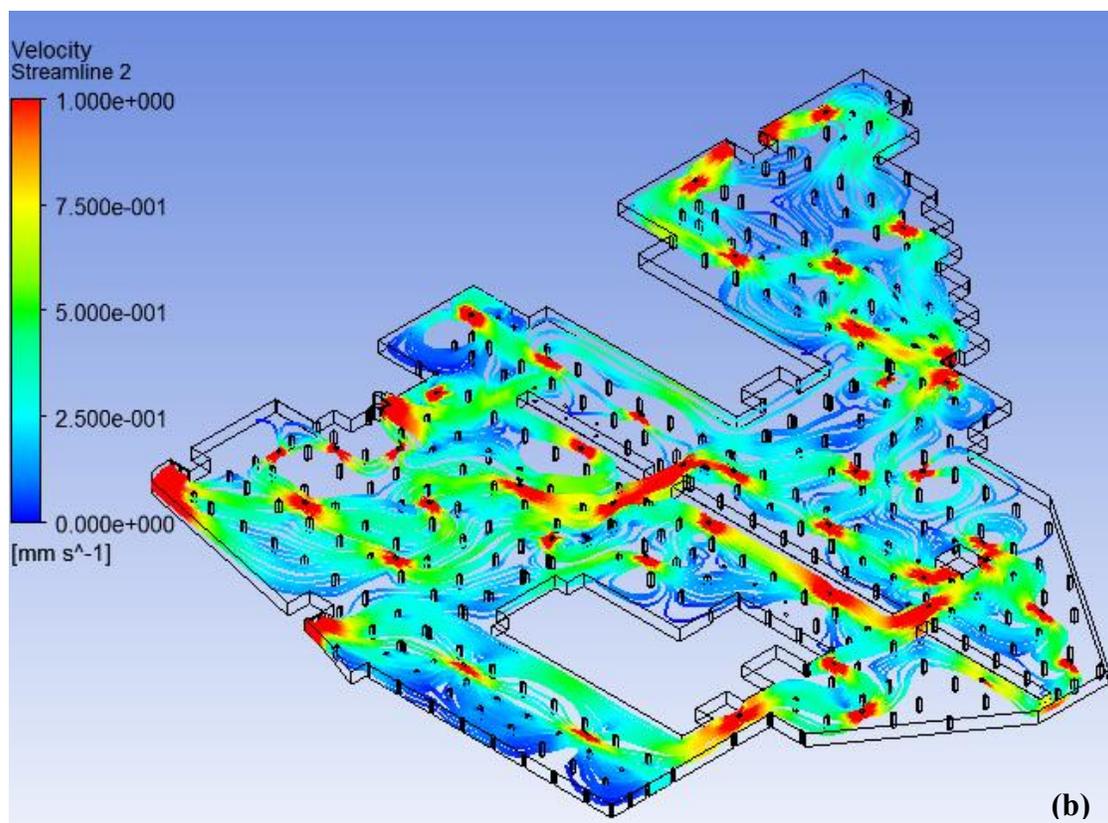


Figura 3.27 Análisis con *Jet fans* a) Dispersión de velocidades b) Líneas de corriente.

Finalmente se seleccionó como área crítica, el sector marcado de color azul en la figura 3.27a.

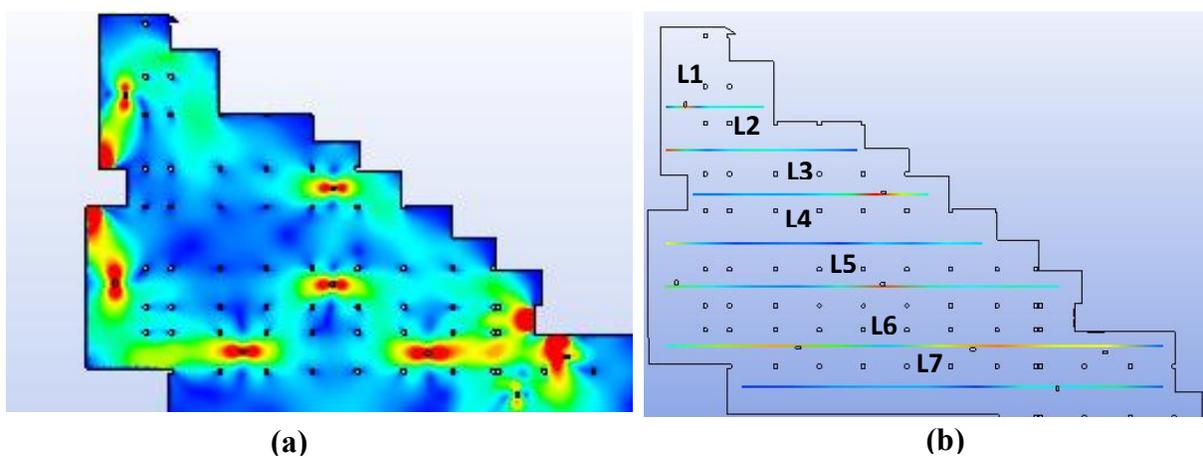


Figura 3.28 a) Área para análisis b) Líneas longitudinales para velocidad de aire

El promedio de velocidad de la figura 3.28 b, se presenta en la tabla 3.12.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
L1	0.72	0.31	0.08	0.17	0.26	0.24	0.17	0.13	0.09	0.04	0.22
L2	0.06	0.30	0.67	0.09	0.20	0.23	0.22	0.25	0.27	0.26	0.25
L3	0.08	0.08	0.12	0.11	0.12	0.17	0.33	0.81	0.50	0.23	0.25
L4	0.74	0.18	0.04	0.07	0.10	0.03	0.20	0.11	0.24	0.18	0.19
L5	0.56	0.14	0.03	0.05	0.08	0.02	0.15	0.08	0.18	0.14	0.14
L6	0.41	0.22	0.11	0.08	0.26	0.71	0.29	0.19	0.28	0.21	0.27
L7	0.23	0.44	0.65	0.41	0.14	0.50	0.68	0.53	0.56	0.05	0.42
Total											0.24

Tabla 3.12 Velocidades promedio en *m/s*

3.2.1 Convergencia del resultado mediante grafico de residuales

Los residuales son una medida de la diferencia entre dos iteraciones. Mientras el modelo se acerca a la solución que satisface la ecuación, la diferencia entre cada iteración se reduce cada vez más mientras estas transcurren. Es por esto que se dice que una simulación se estabiliza o converge cuando la diferencia entre los residuales es muy pequeña. Para la simulación del Nivel 12.6, se presenta la figura 3.29 donde se aprecia la convergencia o estabilización de las curvas. Un cuadro muy similar a este se obtuvo para cada una de las simulaciones presentadas en las secciones anteriores.

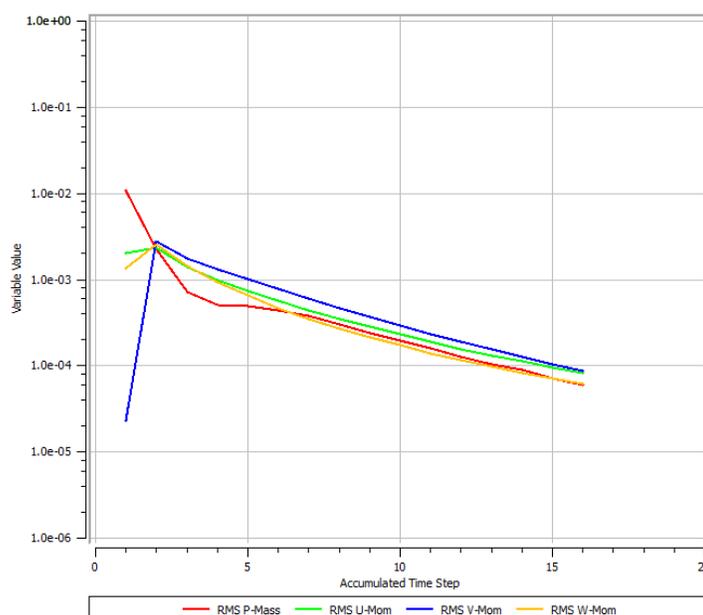


Figura 3.29 Residuales de Masa y Momento

3.2.2 Cálculo de renovaciones de aire y total de *Jet fans* requeridos

En función del promedio de velocidad en los sectores críticos, se utiliza la ecuación 1.1, en la que el volumen es el del espacio en análisis y, el área transversal es la que atraviesa el flujo de aire. En la tabla 3.13 se presenta los resultados del cálculo.

Nivel	Vol m^3	A_{trans} m^2	v_{prom} m/s	Renovaciones ACH
-3.6	6523.20	43.11	0.44	10.47
-9.0	16653.17	158.56	0.21	7.20
-12.6	10248.11	79.49	0.29	8.09
-16.2	8432.64	53.19	0.31	7.04
-19.8	13499.22	98.95	0.24	6.33

Tabla 3.13 Renovaciones de aire en áreas críticas

Se obtuvo como resultado de las simulaciones que, sólo en el nivel 0.0 se requiere 6 *Jet fans* adicionales (ver tabla 2.20), es decir se necesita un total de 281 ventiladores AUT-400.

4. Presupuesto para la implementación del proyecto

Después de realizar el diseño del sistema de ventilación mecánica y la simulación CFD, se podrá determinar el costo de la implementación de este proyecto. Dadas las dimensiones del parqueadero subterráneo, se espera un costo significativo, ya que son varios los equipos que se deberán implementar para cubrir los requerimientos del diseño.

4.1 Ventiladores Axiales tipo ACN

De acuerdo al fabricante (Novenco), el valor de los ventiladores axiales tipo ACN-1250/403-60, incluido accesorios (Reguladores para vibración, base para anclaje y silenciador), es de 8,000 euros cada uno. Mientras que, los ventiladores tipo ACN-1400/403-60 tienen un costo unitario de 10,000 euros. En la figura 4.1 se presenta un diagrama del ventilador y la forma cómo deberá ser colocado dentro de los conductos. Cabe recalcar que, en los costos mencionados no está incluida la importación de los equipos, mano de obra y costos indirectos.

4.2 Ventiladores de Impulso JetFans

El tipo de ventiladores que se utilizará es AUT-400 marca Novenco, cada uno incluye la base para anclaje, el costo unitario de estos ventiladores es 1,070 euros.

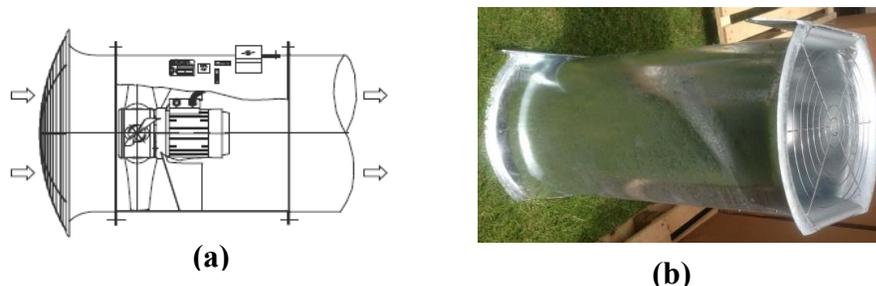


Figura 4.1 Ventiladores a) Axial ACN Novenco b) Jet fan AUT-400

4.3 Reguladores Motorizados y Rejillas de Extracción e Inyección

Estos serán distribuidos por la empresa Novenco, y el costo es el siguiente:

N	Torres	Area	# Dampers	Dimensiones	Costo Damp	Costo Rej	Total
N 0.0	E1, E3	2.45	1	2 m × 1.85 m	322.50	161.25	483.75
N -3.6	E1, E2, E3	8.8	3	2 m × 1.5 m	1161	580.50	1741.50
N -9.0	E1	12.07	4	2 m × 1.55 m	533.20	266.60	799.80
	E2	9.3	3	2 m × 1.55 m	399.90	199.95	599.85
	E3	11.61	4	2 m × 1.5 m	516	258	774
	E4	11.61	6	2 m × 1 m	516	258	774
	E5	20.41	4	2.25 m × 2.3 m	890.10	445.05	1335.15
N -12.6	E1	6.20	2	2 m × 1.6 m	275.20	137.60	412.80
	E2	4.35	2	2 m × 1.1 m	189.20	94.60	283.80
	E3	6.20	2	2 m × 1.6 m	275.20	137.60	412.80
	E4	4.35	2	2 m × 1.1 m	189.20	94.60	283.80
	E5	8.38	3	2 m × 1.4 m	361.20	180.60	541.80
	E6	10.51	3	2 m × 1.8 m	464.40	232.20	696.60
N -16.2	E1	6.20	2	2 m × 1.6 m	275.20	137.60	412.80
	E2	4.35	2	2 m × 1.1 m	189.20	94.60	283.80
	E3	6.20	2	2 m × 1.6 m	275.20	137.60	412.80
	E4	4.35	2	2 m × 1.1 m	189.20	94.60	283.80
	E5	8.38	3	2 m × 1.4 m	361.20	180.60	541.80
	E6	10.51	3	2 m × 1.8 m	464.40	232.20	696.60
N -19.8	E1,E2,E3	7.8	2	2 m × 2 m	344	172	516
	E4	7.8	3	2 m × 1.3 m	335.40	167.70	503.10
N -3.6	S1, S2	9.9	3	2 m × 1.7 m	877.20	438.60	1315.80
N -9.0	S1	9.27	3	2 m × 1.6 m	412.80	206.40	619.20
	S2	9.27	3	2 m × 1.6m	412.80	206.40	619.20
	S3	14.04	4	2 m × 1.8 m	619.20	309.60	928.80
	S4	16.17	4	2 m × 2.1 m	722.40	361.20	1083.60
N -12.6	S1	4.72	2	2 m × 1.2 m	206.40	103.20	309.60
	S2	4.72	3	2 m × 0.8 m	206.40	103.20	309.60
	S3	9.35	4	2 m × 1.2 m	412.80	206.40	619.20
	S4	11.20	3	2 m × 1.9 m	490.20	245.10	735.30
N -16.2	S1	4.72	2	2 m × 1.2 m	206.40	103.20	309.60
	S2	4.72	3	2 m × 0.8 m	206.40	103.20	309.60
	S3	9.35	4	2 m × 1.2 m	412.80	206.40	619.20
	S4	11.20	3	2 m × 1.9 m	490.20	245.10	735.30
N -19.8	S1, S2	11.7	4	2 m × 1.5 m	1032	516	1548

Tabla 4.1 Costo de Reguladores motorizados y rejillas en Euros

La sumatoria de los valores unitarios presentados en la tabla 4.1, representa un total de 22,852 euros.

4.4 Louvers de Carga y Descarga

La marca que se utilizará en este caso es Greenheck, la cual ofrece varios modelos de *louvers*, por el modelo ESU-130 se solicitó un presupuesto de la lista mencionada en la secciones 2.1.5 y 2.2.5. Además para la torre E1 se requiere un *louver* de fabricación local, debido a su configuración. El presupuesto enviado por Greenheck es de 110,000 dólares y el *louver* de fabricación local 5,000 dólares, dando un total de 115,000 dólares.

4.5 Detectores de CO

Para la detección del CO del parqueadero subterráneo, en la sección 2.4.1 se presenta el resumen de detectores y monitores. La consulta de su presupuesto se realizó a la empresa Kimessa, en la que se determinó que un sensor de CO modelo KSEC 504 tiene un costo de 150 euros, pero al adquirir más de 20 sensores su costo unitario se reduce a 135 euros. Además los monitores para los sensores de CO tienen un costo unitario de 410 euros.

4.6 Panel de Control para Monitoreo

Los paneles de Control serán distribuidos y programados por la empresa Novenco, cabe recalcar que todos los sistemas deberán ser conectados a los paneles de control. El presupuesto calculado por la empresa fue de 345,000 dólares.

4.7 Filtros para Torres de Inyección

Como se mencionó en el Capítulo 1, la marca que se utilizará es Flanders modelo FCP. Después de realizar la consulta con la empresa fabricante, se determinó que el costo unitario del modelo FCP301-24242 es 25 dólares y del modelo FCP301-12242 es 18 dólares. Adicionalmente se requieren porta filtros, los que serán de fabricación local, el costo de estos se incluirá en el costo de los filtros, de modo que, el modelo FCP301-24242 tendrá un costo total de 105 dólares y el modelo FCP301-12242 un costo total de 78 dólares, montos que tienen como referencia proyectos previos.

4.8 Presupuesto Total Requerido

En la tabla 4.2, se presenta la totalidad de accesorios y equipos requeridos y, el costo total de cada uno de ellos. A este costo se añade lo que demanda el transporte, impuestos y aranceles, con lo que se incrementa un 48% sobre el costo de equipos. El presupuesto no incluye mano de obra para instalación.

	ITEM	PAIS	UNIDAD	CANTIDAD	V. UNITARIO	TOTAL
VENTILADOR AXIAL DE EXTRACCION Mc. NOVENCO MODELO: ACN-1250/403-60, CAPACIDAD: 94 100 - 101 205 m3/h, 400/3/50	VEN-AX1	Holanda	U	24	\$ 10,443.20	\$ 250,637.00
VENTILADOR AXIAL DE SUMINISTRO Mc. NOVENCO MODELO: ACN-1400/403-60, CAPACIDAD: 104 160 - 117 875 m3/h, 400/3/50	VEN-AX2	Holanda	U	15	\$ 13,054.00	\$ 195,810.00
VENTILADOR DE IMPULSO TIPO JETFAN Mc. NOVENCO MODELO: AUT-400, CAPACIDAD: 1.1 - 2.3 m3/h, 400/3/50	VEN-JET	Holanda	U	281	\$ 1,396.80	\$ 406,468.80
REGULADORES MOTORIZADOS DE EXTRACCION E INYECCION, ENLISTADO SECCION 4.3	DAM-1	Holanda	GLOB	1	\$ 19,887.60	\$ 19,887.60
REJILLAS DE EXTRACCION E INYECCION, ENLISTADO SECCION 4.3	REJ-1	Holanda	GLOB	1	\$ 9,943.80	\$ 9,943.80
LOUVERS DE CARGA Y DESCARGA	LOUV-1	USA	GLOB	1	\$ 150,000.00	\$ 115,000.00
SENSORES DE CO	SEN-1	Suiza	U	290	\$ 176.25	\$ 51,112.50
MONITORES PARA DETECCION DE CO	MON-1	Suiza	U	11	\$ 535.25	\$ 5,887.75
PANELES DE CONTROL PARA MONITOREO	MON-2	Holanda	GLOB	1	\$ 345,000.00	\$ 345,000.00
FILTROS PARA VENTILADORES DE INYECCION Y PORTAFILTROS FCP301- 24242	FILT-1	Local	U	789	\$ 105.00	\$ 82,845.00
FILTROS PARA VENTILADORES DE INYECCION Y PORTAFILTROS FCP301- 12242	FILT-2	Local	U	139	\$ 78.00	\$ 10,842.00
SUBTOTAL						\$ 1,493,434.45
COSTO DE TRANSPORTE, IMPUESTOS Y ARANCELES (48 % DEL SUBTOTAL)						\$ 716,848.54
TOTAL						\$ 2,210,282.99

Tabla 4.2 Presupuesto de equipos para implementar el diseño en dólares

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se realizó el diseño de un sistema de ventilación mecánica, para los parqueaderos subterráneos del Edificio “Elit Centro de Negocios”, a construirse en la ciudad de Quito, mediante el uso de un sistema que se basa en *Jet fans* y que requiere de una simulación CFD para garantizar su funcionamiento.
- El sistema de ventilación mecánica fue diseñado con las recomendaciones de ASHRAE, que sugiere una renovación de aire de 6 ACH, así como mantener siempre una variación entre la cantidad de aire extraído y la cantidad de aire suministrado por el sistema de inyección, cuya diferencia debe ser cubierta por las rampas exteriores del parqueadero.
- Debe existir una interacción entre la empresa de arquitectura diseñadora del proyecto y el consultor ingeniero mecánico, la cual es fundamental para determinar los requerimientos de espacio de las torres de ventilación dentro del edificio.
- Después de haber realizado una investigación en el mercado, se escogió a Novenco como el fabricante de los ventiladores axiales y *Jet fans* que se requieren para el proyecto Elit, debido a su gran experiencia en este campo así como, a la amplia información que presenta en sus catálogos; y, al interés mostrados por sus ingenieros consultores y de producto al solicitarles precios y recomendaciones de instalación de sus equipos.
- La ubicación y distribución adecuada de los *Jet fans* se realizó mediante varias simulaciones CFD, de esta forma se pudo conocer el movimiento del aire en el interior

de los subsuelos, y así evitar posibles concentraciones de CO o recirculación de este gas, además dicha distribución sería muy difícil especificar mediante cálculos manuales.

- El costo de la implementación de este sistema es relativamente bajo y representa menos del 1% del costo total del proyecto (se requiere una inversión de US\$ 2.2M frente a US\$ 300M costo total del proyecto), esto significa un costo de US\$ 6 por metro cuadrado de construcción.
- Una ventaja adicional del diseño planteado es que los ventiladores son de velocidad variable, lo que permite, en conjunto con los detectores de CO, regular los flujos de acuerdo con las necesidades. Vale recalcar que el sistema de detección de CO no puede ser modelado en la simulación CFD.
- El diseño planteado presenta una ventaja en comparación con el sistema de ductos, ya que la estratégica ubicación de *Jet fans*, descolgados de la losa, deja libre el espacio entre el nivel de piso y la parte inferior de las vigas.

5.2 Recomendaciones

Existen aspectos interesantes en este tipo de implementaciones, que debido al alcance del presente estudio, no se pudieron realizar.

- En el estudio desarrollado se consideran condiciones de flujo estable, sería recomendable desarrollar un análisis en estados no transitorios, en el que se considere la variación temporal de autos en los diferentes espacios. Por ejemplo, áreas de mayor uso (cerca de ascensores y gradas), horas pico y poca ocupación de los estacionamientos.

- Para el desarrollo del presente diseño se han parametrizado algunas variables que pueden afectar el funcionamiento del sistema de ventilación mecánica como:
 - Número de renovaciones de aire (6 ACH)
 - Porcentaje de inyección de aire (75% del total de extracción)
 - Velocidad de ingreso del aire por las rampas.
 - Velocidad del aire por los conductos verticales de ventilación.

Se podría realizar un análisis de sensibilidad sobre las variables señaladas, lo que permitiría incluir eventuales ajustes al diseño propuesto.

Bibliografía

- [1] Constructora Villacreces Andrade, Documentación entregada para el diseño del proyecto “ELIT CENTRO DE NEGOCIOS”, Agosto 2012.
- [2] ASHRAE. HVAC Applications, *Enclosed vehicular facilities*. Edición 2007
- [3] Manuel Vicente. *Análisis y solución del problema de estacionamiento en el centro de las ciudades*. Madrid, 1983.
- [4] Wikipedia, la enciclopedia libre. Ventilador. Recuperado Enero 26, 2013 de <<http://es.wikipedia.org/wiki/Ventilador>>, 2013.
- [5] Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, Ventiladores. Recuperado Enero 29, 2013, <http://www.fi.uba.ar/archivos/posgrados_apuntes_CAPITULO_VENTILADORES>, 2013
- [6] Novenco Group, *Novenco axial flow fans*, Naestved, Enero 2010
- [7] Novenco Group, *Novenco jet fans*, Naestved, Enero 2010
- [8] Kimessa AG. *CANline Instruction manual*. Zurich, 2007
- [9] Flanders PrecisionAir. *Comercial Filter Supply*, FL, 2005
- [10] EPA. Volatile Organic Compounds. Recuperado Febrero, 2013 de <<http://www.epa.gov/iaq/voc.html>>, 2013.
- [11] *Louvers* , Software de selección Caps de Greenheck
- [12] British Standard, *Components for smoke and heat control systems*, BS 7346-7:2006
- [13] Yanus A. Cengel y Michael A. Boles. *Thermodynamics: An engineering approach*. Mc Graw Hill, 5ta edición, 2006.
- [14] Frank White, “*Fluid Mechanics*”. Mc Graw Hill, 6ta edición, Rhode Island, 2008
- [15] ASHRAE. Principles of heating ventilating and air-conditioning, *Duct Design*. Edición 2005
- [16] Jesús Sánchez Vásquez. *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida*. Universidad de Sevilla, Septiembre 2004.
- [17] Niño, Y. “*Métodos de los volúmenes finitos*”, Universidad de Chile, 2002.
- [18] Ansys, “*Ansys CFX-Solver Theory Guide*”, Canonsbug, Diciembre 2006.

- [19] Colt, "*Colt ventilation systems for car parks and service areas*", New Lane Havant, Marzo 2011.

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO B

Condiciones de Borde para las Rampas

Existen 3 rampas que comunican el exterior con los parqueaderos y están ubicadas en los niveles 0.0, -3.6 y -9.0. A estos se los denominará Rext1, Rext2 y Rext3, respectivamente. En la tabla 2.10 se explica que la velocidad de ingreso de aire por las rampas es 1.06 m/s .

En la tabla B.1, se señala la diferencia de tasa volumétrica que deberá ser cubierta para el suministro de aire por las rampas, en cada nivel del parqueadero.

Nivel	Q_{ext}	Q_{iny}	Q_{ramp} Caudal requerido (rampas internas)
0.0	22.08	0.00	22.08
-3.6	79.20	59.40	19.80
-9.0	195	146.25	48.75
-12.6	120	90	30.00
-16.8	120	90	30.00
-19.8	93.60	70.20	23.40

Tabla B.1 Tasa de flujo volumétrico por las rampas requerido por nivel en m^3/s

Nivel 0.0

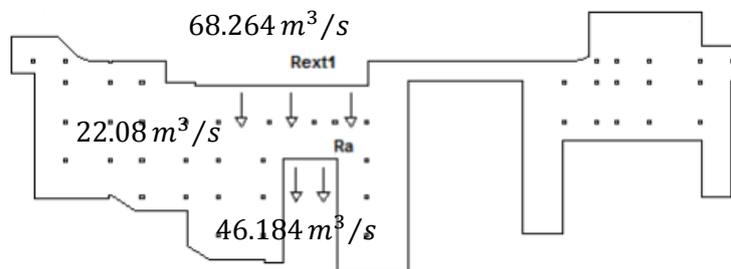


Figura B.1 Condiciones de borde por las rampas (0.0)

Este nivel tiene una entrada de aire por la rampa Rext1 y una salida de aire a los niveles inferiores por la rampa Ra.

- Inlet – Rext1:
 - $A_{Rext1} = 64.4 \text{ m}^2$
 - $v_{Rext1} = 1.06 \text{ m/s}$
 - $Q_{Rext1} = 68.264 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – Ra:
 - $A_{Ra} = 29.12 \text{ m}^2$
 - $Q_{Rext1} = 68.264 - 22.08 = 46.184 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{Rext1} = 1.59 \text{ m/s}$

Nivel -3.6

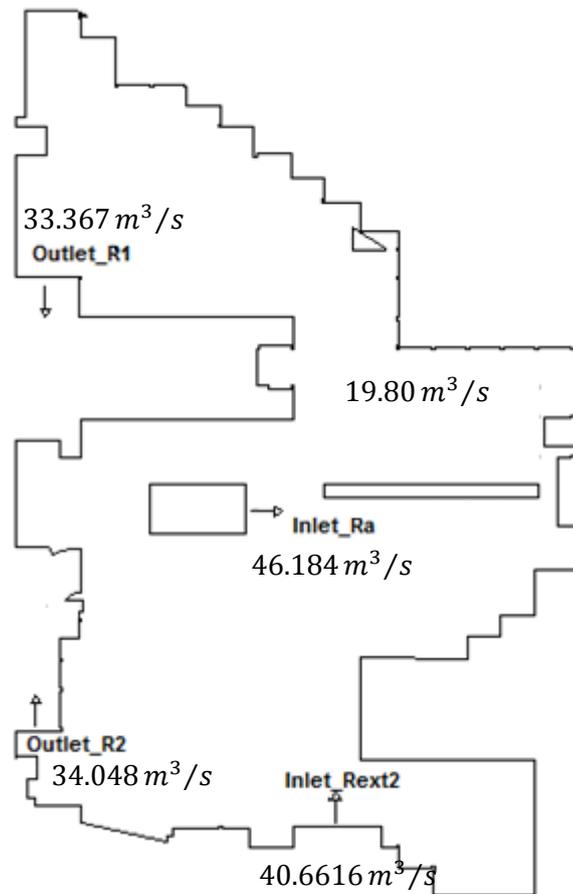


Figura B.2 Condiciones de borde por las rampas (-3.6)

- Inlet – Ra:
 - $A_{Ra} = 30.8 \text{ m}^2$
 - $Q_{Ra} = 46.184 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{Rext1} = 1.5 \text{ m/s}$
- Inlet – Rext2:
 - $A_{Rext2} = 38.36 \text{ m}^2$
 - $v_{Rext2} = 1.06 \text{ m/s}$
 - $Q_{Rext2} = 40.6616 \text{ m}^3/\text{s}$

La tasa de flujo volumétrico total (Q_{inT}) que ingresa a este nivel es $86.8456 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que el caudal que debe ser trasladado a los niveles inferiores, está dado por:

$$Q_{outT} = Q_{inT} - Q_{ramp} \quad (\text{B.1})$$

Donde Q_{ramp} es el caudal que requiere cada nivel. Remplazando valores se obtiene $Q_{outT} = 67.0456 \text{ m}^3/\text{s}$, que deberá ser dividido en 2 rampas (R1 y R2), con un área total $A_{ramp} = 55.44$. La velocidad con la que el aire se traslada por las rampas a los niveles inferiores, está dado por:

$$v_{ramp} = \frac{Q_{outT}}{A_{ramp}} \quad (\text{B.2})$$

Resolviendo la ecuación B.2, se obtiene que $v_{ramp} = 1.21 \text{ m/s}$. Este método deberá realizarse para todos los niveles.

- Outlet – R1:
 - $A_{R1} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $v_{R1} = 1.216 \text{ m/s}$
 - $Q_{R1} = 33.367 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R2:
 - $A_{R2} = 28 \text{ m}^2$
 - $v_{R2} = 1.216 \text{ m/s}$
 - $Q_{R2} = 34.048 \text{ m}^3/\text{s}$

Nivel -9.0

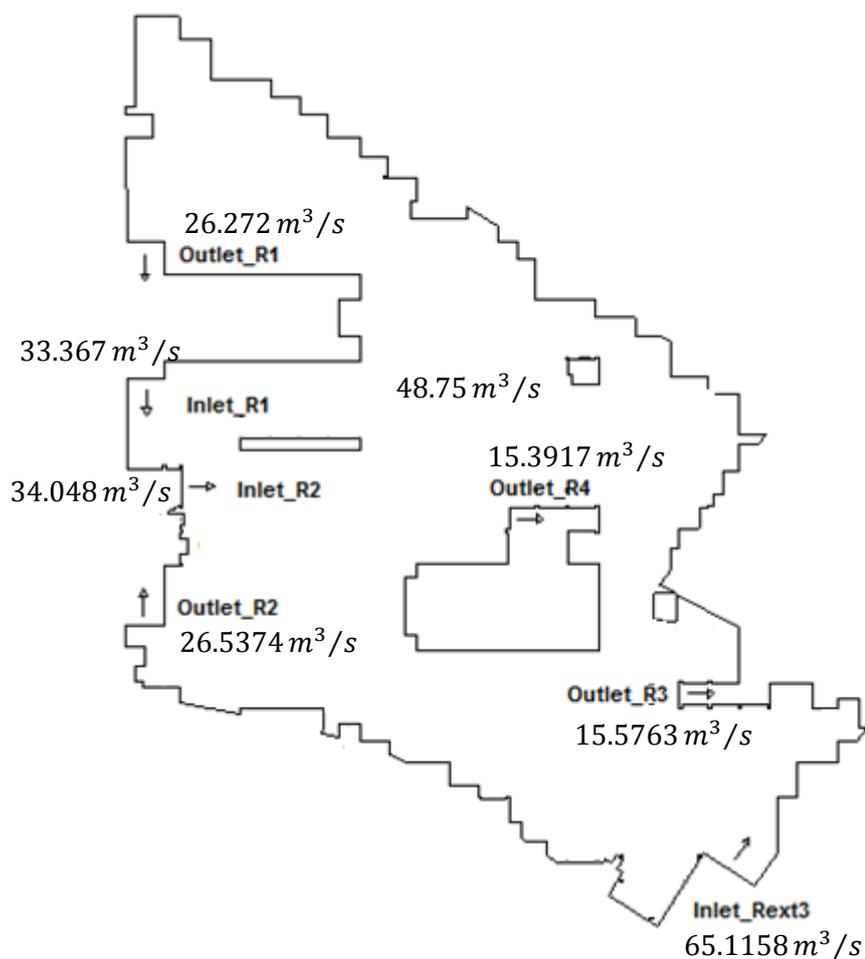


Figura B.3 Condiciones de borde por las rampas (-9.0)

- Inlet – Rext3:
 - $A_{Rext3} = 61.43 \text{ m}^2$
 - $v_{Rext3} = 1.06 \text{ m/s}$
 - $Q_{Rext3} = 65.1158 \text{ m}^3/\text{s}$
- Inlet – R1:
 - $A_{R1} = 45.54 \text{ m}^2$
 - $Q_{R1} = 33.367 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R1} = 0.733 \text{ m/s}$
- Inlet – R2:
 - $A_{R2} = 42.78 \text{ m}^2$
 - $Q_{R2} = 34.048 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R2} = 0.796 \text{ m/s}$

$$Q_{inT} = 34.048 + 33.367 + 65.1158 = 132.531 \text{ m}^3/\text{s}$$

Aplicando la ecuación B.1 se obtiene que $Q_{outT} = 83.7808 \text{ m}^3/\text{s}$. La sumatoria del área de las rampas que conducen al nivel inferior (R1, R2, R3 y R4), es $A_{ramp} = 145.22 \text{ m}^2$, por lo que, aplicando la ecuación B.2 se determina que $v_{ramp} = 0.5769 \text{ m/s}$.

- Outlet – R1:
 - $A_{R1} = 45.54 \text{ m}^2$
 - $v_{R1} = 0.5769 \text{ m/s}$
 - $Q_{R1} = 26.272 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R2:
 - $A_{R2} = 46 \text{ m}^2$
 - $v_{R2} = 0.5769 \text{ m/s}$
 - $Q_{R2} = 26.5374 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R3:
 - $A_{R1} = 27 \text{ m}^2$
 - $v_{R1} = 0.5769 \text{ m/s}$
 - $Q_{R1} = 15.5763 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R4:
 - $A_{R2} = 26.68 \text{ m}^2$
 - $v_{R2} = 0.5769 \text{ m/s}$
 - $Q_{R2} = 15.3917 \text{ m}^3/\text{s}$

Nivel -12.6

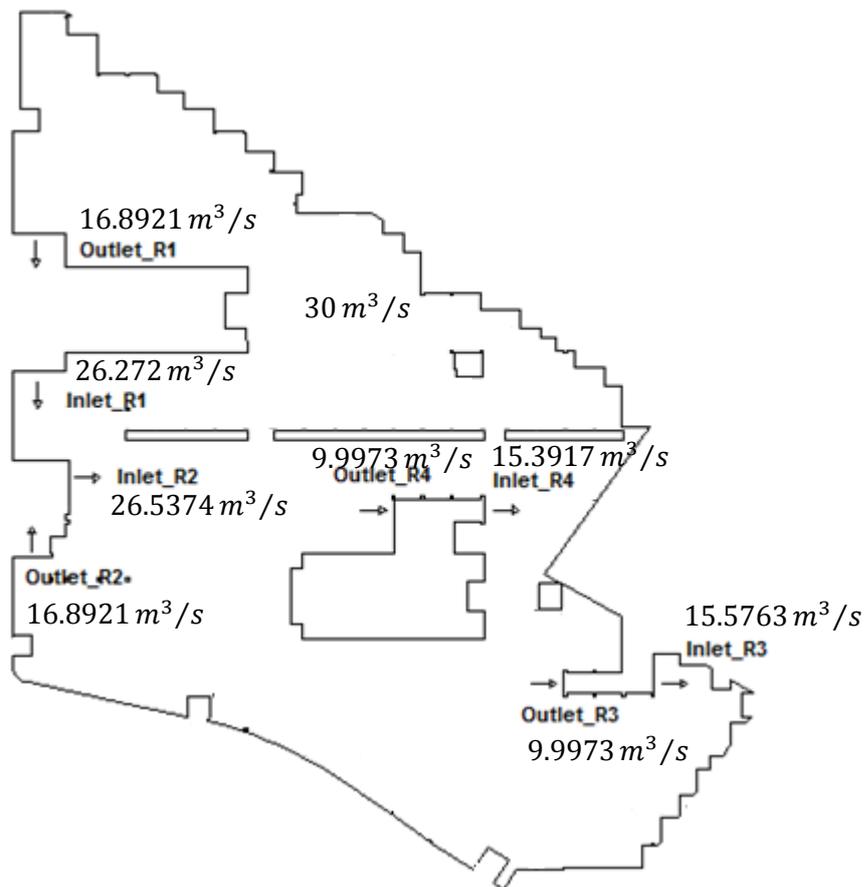


Figura B.4 Condiciones de borde por las rampas (-12.6)

- Inlet – R1:
 - $A_{R1} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $Q_{R1} = 26.272 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R1} = 0.957 \text{ m/s}$
- Inlet – R2:
 - $A_{R2} = 26.04 \text{ m}^2$
 - $Q_{R2} = 26.5374 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R2} = 1.01 \text{ m/s}$
- Inlet – R3:
 - $A_{R3} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $Q_{R3} = 15.5763 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R3} = 0.959 \text{ m/s}$
- Inlet – R4:
 - $A_{R4} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $Q_{R4} = 15.3917 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R4} = 0.9477 \text{ m/s}$

- $Q_{inT} = 26.272 + 26.5374 + 15.5763 + 15.9317 = 83.7774 \text{ m}^3/\text{s}$

Aplicando la ecuación B.1 se obtiene que $Q_{outT} = 53.7808 \text{ m}^3/\text{s}$, dividido en $A_{ramp} = 87.36 \text{ m}^2$ (R1, R2, R3 y R4). Mediante la ecuación B.2 se llega a que la velocidad $v_{ramp} = 0.6156 \text{ m/s}$.

- Outlet – R1:
 - $A_{R1} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $v_{R1} = 0.6156 \text{ m/s}$
 - $Q_{R1} = 16.8921 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R2:
 - $A_{R2} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $v_{R2} = 0.6156 \text{ m/s}$
 - $Q_{R2} = 16.8921 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R3:
 - $A_{R3} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $v_{R3} = 0.6156 \text{ m/s}$
 - $Q_{R3} = 9.9973 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R4:
 - $A_{R4} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $v_{R4} = 0.6156 \text{ m/s}$
 - $Q_{R4} = 9.9973 \text{ m}^3/\text{s}$

Nivel -16.8

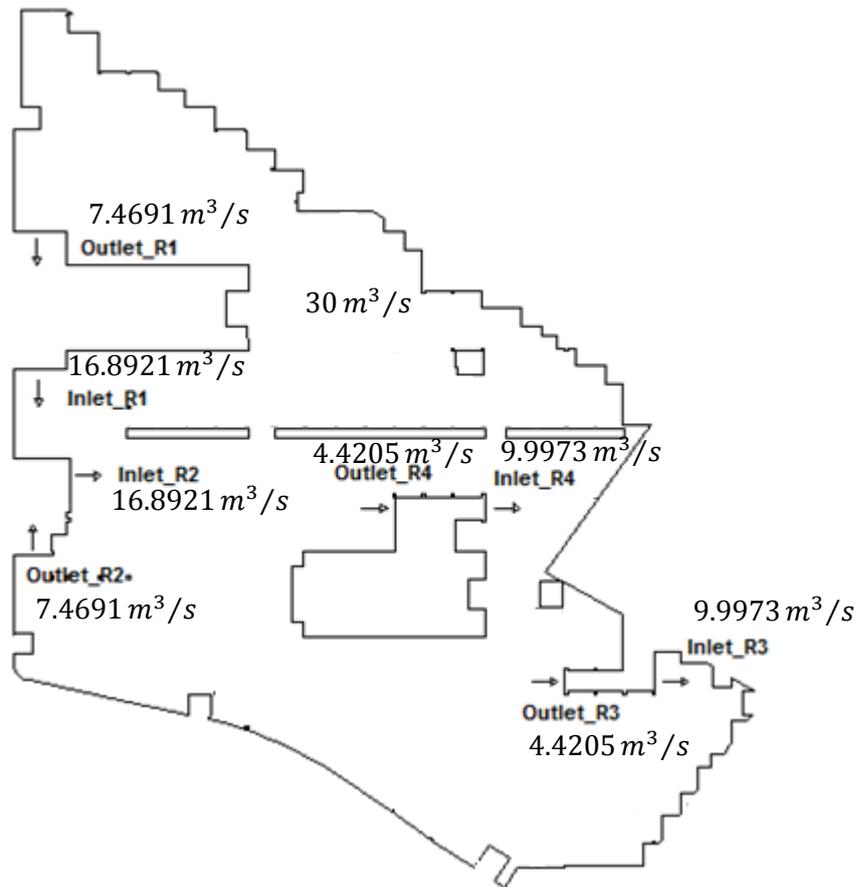


Figura B.5 Condiciones de borde por las rampas (-16.8)

- Inlet – R1:
 - $A_{R1} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $Q_{R1} = 16.8921 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R1} = 0.6156 \text{ m/s}$
- Inlet – R2:
 - $A_{R2} = 26.04 \text{ m}^2$
 - $Q_{R2} = 16.8921 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R2} = 0.6487 \text{ m/s}$
- Inlet – R3:
 - $A_{R3} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $Q_{R3} = 9.9973 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R3} = 0.6156 \text{ m/s}$
- Inlet – R4:
 - $A_{R4} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $Q_{R4} = 9.9973 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R4} = 0.6156 \text{ m/s}$

- $Q_{inT} = 16.8921 + 16.8921 + 9.9973 + 9.9973 = 53.7788 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{outT} = 23.7788 \text{ m}^3/\text{s}$, dividido en $A_{ramp} = 87.36 \text{ m}^2$ (R1, R2, R3 y R4), velocidad $v_{ramp} = 0.2722 \text{ m/s}$.

- Outlet – R1:
 - $A_{R1} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $v_{R1} = 0.2722 \text{ m/s}$
 - $Q_{R1} = 7.4691 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R2:
 - $A_{R2} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $v_{R2} = 0.2722 \text{ m/s}$
 - $Q_{R2} = 7.4691 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R3:
 - $A_{R3} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $v_{R3} = 0.2722 \text{ m/s}$
 - $Q_{R3} = 4.4205 \text{ m}^3/\text{s}$
- Outlet – R4:
 - $A_{R4} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $v_{R4} = 0.2722 \text{ m/s}$
 - $Q_{R4} = 4.4205 \text{ m}^3/\text{s}$

Nivel -19.8

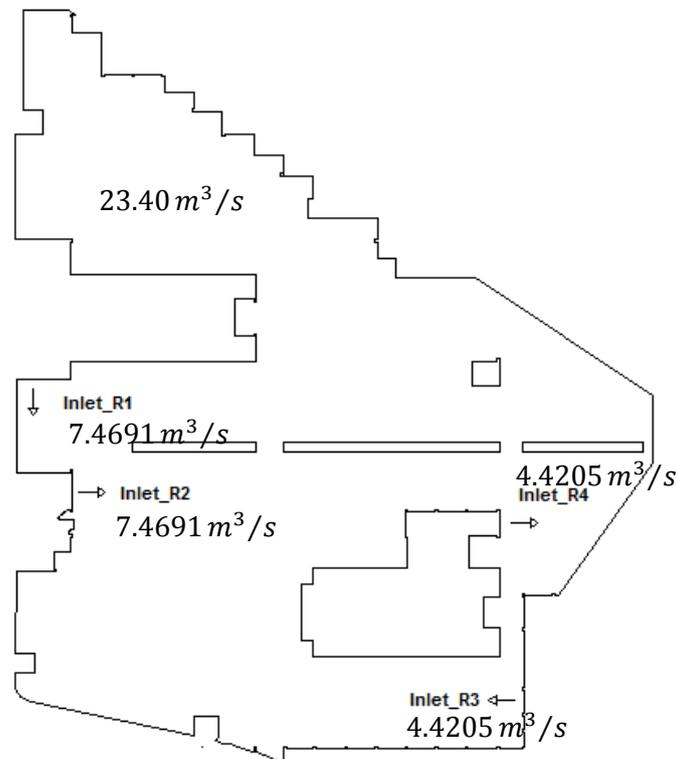


Figura B.6 Condiciones de borde por las rampas (-19.8)

- Inlet – R1:
 - $A_{R1} = 27.44 \text{ m}^2$
 - $Q_{R1} = 7.4651 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R1} = 0.272 \text{ m/s}$
- Inlet – R2:
 - $A_{R2} = 26.04 \text{ m}^2$
 - $Q_{R2} = 7.4651 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R2} = 0.2866 \text{ m/s}$
- Inlet – R3:
 - $A_{R3} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $Q_{R3} = 4.4205 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R3} = 0.2721 \text{ m/s}$
- Inlet – R4:
 - $A_{R4} = 16.24 \text{ m}^2$
 - $Q_{R4} = 4.4205 \text{ m}^3/\text{s}$
 - $v_{R4} = 0.2721 \text{ m/s}$