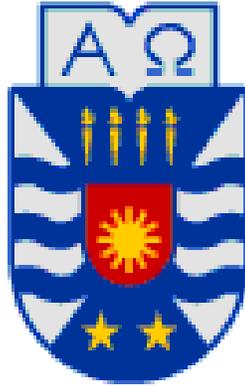


UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



**METODO DE VERIFICACION DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR EN
EL DISEÑO DE UN EDIFICIO O VIVIENDA**

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Patrocinador:
Sr. Luis Ariel Bobadilla Moreno
Profesor Guía:
Sr. Vicente Ariel Pita Vives

Víctor Mariano Aracena Pradena
CONCEPCION – CHILE
2012

Al esfuerzo de mis padres, Cecilia y Víctor, a mi querida Enid, a mis familiares Guillermo, Loreto, Natacha, Irene, Arturo, Teresa, Ester y a todos quienes me apoyaron durante mi período académico. Y sobre todo, a Dios por haberme dado la paciencia y la fuerza para terminar esta etapa de mi vida.

I. INTRODUCCIÓN	5
I. ORIGEN DEL TEMA.....	5
II. JUSTIFICACIÓN.....	5
III. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	6
IV. ALCANCE DE ESTE ESTUDIO.....	7
II. ESTADO DEL ARTE.	8
I. ESTADO DEL ARTE, SITUACIÓN INTERNACIONAL.....	9
II. ESTADO DEL ARTE, SITUACIÓN NACIONAL.....	11
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS DE VENTILACIÓN.	13
1.1 VENTILACIÓN NATURAL.	13
1.1.1. DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ENTRE EL AIRE INTERIOR Y EXTERIOR.	13
1.1.2. EFECTO DEL VIENTO.	15
1.1.3. EFECTO COMBINADO DEL VIENTO Y DIFERENCIA DE DENSIDADES.	18
1.2. VENTILACIÓN FORZADA O MECÁNICA.	19
1.2.1. VENTILACIÓN POR SOBREPRESIÓN.	20
1.2.2. VENTILACIÓN MECÁNICA POR DEPRESIÓN.	21
1.2.3. VENTILACIÓN MECÁNICA BALANCEADA “POR MEZCLA”.	23
1.2.4. VENTILACIÓN MECÁNICA BALANCEADA “POR DESPLAZAMIENTO”.	24
1.3. VENTILACIÓN HÍBRIDA.	26
1.4. FLUJO A TRAVÉS DE ABERTURAS.	27
1.4.1. ABERTURAS PEQUEÑAS (FISURAS O GRIETAS).	30
1.4.2. ABERTURAS GRANDES.	32
CAPÍTULO 2: MÉTODOS DE PREDICCIÓN	34
2.1 MODELOS EMPÍRICOS.	34
2.1.1 MÉTODO “BRITISH STANDARD”.	35
2.1.2 MÉTODO DE GIVONNI.	36
2.2 MODELOS DE MALLAS O REDES (“NETWORK”).	37
2.3 MODELOS DE ZONA.	43
2.4 MODELOS CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS).	47
CAPÍTULO 3: SOFTWARE DESIGN BUILDER	49
3.1 ENTORNO DE DESIGN BUILDER	49
3.1.1 MOTOR DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA ENERGYPLUS	49
3.1.2 MÓDULO CFD DE DESIGN BUILDER	50
3.1.3 RESULTADOS EN DESIGN BUILDER.	52
CAPÍTULO 4: MÉTODO DE VERIFICACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE.	54
4.1 ENFOQUE DEL MÉTODO A PROPONER.	54



4.2 INMUEBLE ESTUDIADO.....	54
4.3 CONSIDERACIONES PREVIAS.	57
4.3.1 PUERTAS Y VENTANAS.	57
4.3.2 INFILTRACIONES.	60
4.3.3 DATOS METEOROLÓGICOS	64
4.4 SIMULACIÓN INFILTRACIONES.....	67
4.5 DESEMPEÑO VENTILACIÓN VIVIENDA C60.	74
4.5.1 ANÁLISIS GRÁFICOS DE ZONA.	76
4.5.2 POTENCIAL DE VENTILACIÓN NATURAL VIVIENDA C60 VALLE NOBLE.	81
4.5.3 ANÁLISIS CFD VIVIENDA C60 VALLE NOBLE.	87
<u>CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.</u>	93
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO.	93
5.1.1 PENETRACIÓN DE VENTILACIÓN NATURAL.	95
5.2 RESPECTO DEL ENFOQUE DEL MÉTODO PROPUESTO.....	95
5.3 RESPECTO DE LA VIVIENDA ESTUDIADA.	97
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	100
<u>ANEXOS</u>	
ANEXO 1: PLANOS GENERALES VIVIENDA C60 VALLE NOBLE.	102
ANEXO 2: DESCRIPCIÓN GENERAL DE ENERGYPLUS	105
ANEXO 3: ROSAS DE VIENTO CONCEPCIÓN.....	109
ANEXO 4: GRÁFICOS SIMULACIÓN VIVIENDA C60 VALLE NOBLE (EXTRACTO).....	114

I. Introducción

i. Origen del tema.

En el año 2006, el Ministerio de Obras Públicas comenzó un proceso de incorporación de criterios de Eficiencia Energética y sustentabilidad en las obras públicas para diseñar y construir edificios térmicamente eficientes con mejorados estándares ambientales.

Bajo este contexto, se ha dado origen a diferentes proyectos que se han desarrollado entre la Universidad del Bío Bío, a través de su Centro de Investigación de la Construcción (CITEC) y otras instituciones asociadas a la construcción de edificios y viviendas. Uno de estos proyectos dio origen a la "Guía Técnica de Calidad del Aire Interior" que establece rangos, límites y exigencias básicas para diseño y obra que recintos y componentes involucrados deben cumplir para satisfacer condiciones de calidad de aire interior.

La idea de este estudio nace del propio CITEC, donde surge una necesidad de definir un método de verificación de estos valores de calidad de aire, para certificar que una instalación, en su fase de diseño, cumple con las exigencias establecidas en el documento mencionado u otras fuentes pertinentes.

ii. Justificación.

En la actualidad las necesidades energéticas de nuestro país han alcanzado un nivel tal, que la diversificación de la matriz energética es un aspecto que debería ocupar los mayores esfuerzos de la sociedad. Sin embargo, así como la generación de energía es algo primordial, también lo está el uso que le damos a este recurso. Un uso eficiente de la energía es clave para el desarrollo de un país, tanto así, que una de las características de los países desarrollados es que su crecimiento económico va desligado al crecimiento de su matriz energética.

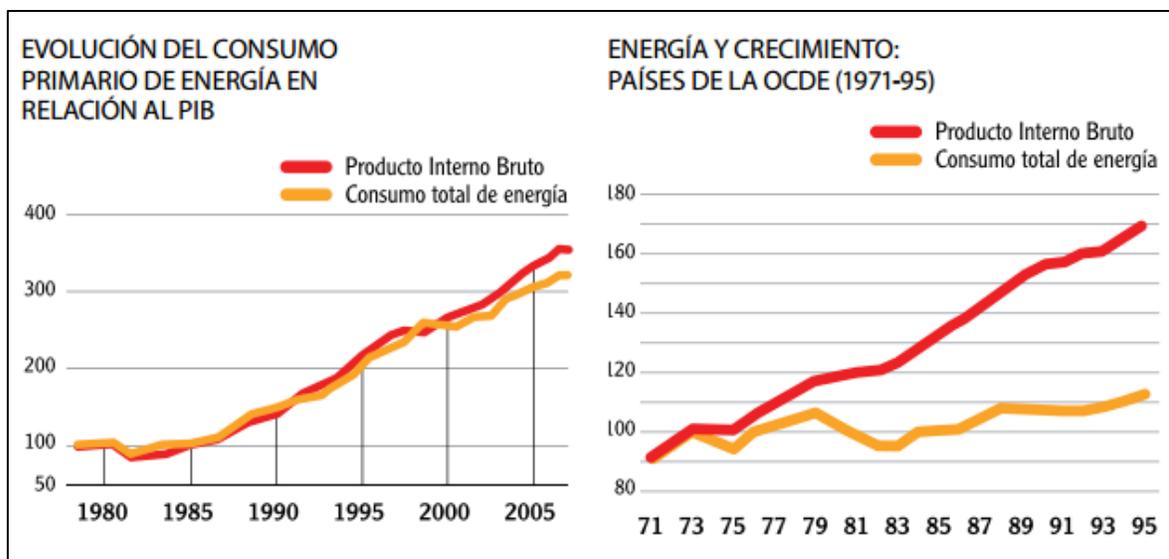


Figura 1. Evolución del consumo primario de energía en relación al PIB, comparación entre la situación chilena y los países de la OECD. Fuente: Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

Bajo esta perspectiva, el fomento y desarrollo de proyectos de este tipo es fundamental para la evolución de nuestro país.

iii. Objetivos del estudio.

- **Objetivo General:**

Desarrollar una propuesta de método de verificación de calidad de aire interior en la fase de diseño de un edificio o vivienda.

- **Objetivos Específicos:**

- ✓ Caracterizar el comportamiento general del aire en fenómenos de ventilación.
- ✓ Definir las variables más importantes en fenómenos de ventilación.
- ✓ Analizar métodos de verificación de ventilación.
- ✓ Seleccionar un método.
- ✓ Analizar Software(s) que pueda ser aplicado según el método seleccionado.

- ✓ Seleccionar Software, describirlo y definir su funcionamiento.
- ✓ Aplicar el programa seleccionado.
- ✓ Concluir efectividad y/o eficiencia de la propuesta y del software en base a resultados obtenidos.

iv. Alcance de este estudio.

Este estudio, realizado bajo el marco de Habilitación Profesional, tiene como objetivo proponer un método de verificación de calidad del aire interior en el diseño de un edificio o vivienda, desde la perspectiva de eficiencia energética. Bajo esta premisa, el alcance de este trabajo se establece en el cumplimiento de los objetivos descritos principalmente, y para ello, se establecen indicadores, gráficos y figuras que permiten evaluar y/o describir cuantitativa y/o cualitativamente el desempeño de una instalación, en su fase de diseño. Sin perjuicio de lo anterior, no se descarta establecer directrices que permitan, a futuro, desarrollar un método alternativo o mejorar el método propuesto en este documento.

II. Estado del Arte.

El proyecto del cual emerge este estudio, tiene por espíritu cambiar o actualizar los sistemas de construcción de edificios en Chile y que se definen bajo dos principales corrientes: sistema de construcción basado en criterios prescriptivos, que es el que opera mayormente en nuestro país, y sistema de construcción basado en desempeño, conocido también como sistema de construcción prestacional. Las diferencias y características de cada una se resumen en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Tabla comparativa entre sistemas de construcción basada en criterios prescriptivos y prestacionales.

Item	Construcción de Edificio basado en	
	Criterios Prescriptivos	Criterios de Desempeño
Rol Asesor Principal	Diseño del edificio y supervisión de la construcción	Ayuda al cliente a definir el comportamiento requerido y selecciona la propuesta más apropiada.
Proceso de diseño	Definición del asesor. Diseñador designado para preparar el diseño en función de intereses profesionales	Definición del cliente. Diseñador seleccionado en base a la necesidad del cliente.
Proceso de licitación	Sobre la base de planos de trabajo totalmente detallados e "itemizados". Sin necesidad de cambio.	Alcance de contratistas y subcttas. a proponer las mejores soluciones, usando sus conocimientos especializados.
Análisis financiero	Preferencia dada a la construcción de más bajo costo.	Preferencia dada al menor valor de los costos del ciclo de vida del edificio.
Proceso de aprobación	Sobre la base de cumplimiento de normas y códigos prescriptivos	Sobre la base de criterios de desempeño y utilizando las competencias y el juicio, en vez de métodos de verificación.
Proceso de construcción	Controlado en base a la adhesión a los planes aprobados. Sanciones financieras para variaciones.	Controlado en base a criterios de desempeño, incentivos para hacer las cosas de manera más eficiente.
Puesta en marcha, traspaso, operación y mantenimiento	Los propietarios y usuarios no se encuentran debidamente informados sobre el uso y mantenimiento del edificio	Cliente plenamente informado sobre uso y mantenimiento del edificio.
Relaciones	Litigios y relaciones de adversarios entre todas las partes. Solo durante la vida del proyecto.	Cooperación entre todas las partes a fin de garantizar que se cumplan las necesidades del cliente y que el edificio se comporte como se requiere. Deseo de construir relaciones a largo plazo.
Eficiencia Energética	Mínimo cumplimiento de la reglamentación vigente	Inversión óptima en conformidad con el plan de negocio del cliente.
Evaluación pos-ocupación	No es parte del contrato. <u>Lo que salió mal en este edificio, saldrá mal en el próximo.</u>	Herramienta de evaluación de desempeño importante. Información utilizada en proyectos futuros.

De acuerdo a estos conceptos tenemos un análisis de dos situaciones simultáneas, por una parte encontramos la situación actual a nivel internacional, y por otra la situación interna de Chile.

i. Estado del arte, situación internacional.

La experiencia internacional indica que el mejoramiento continuo de la calidad en la construcción y desempeño de un edificio requiere la implementación de sistemas de aseguramiento de la calidad en tres niveles: procesos constructivos; certificación de materiales, partes e instalaciones del edificio y la certificación de calidad del edificio. Esto, a su vez, obedece al hecho de que los usuarios, cada vez más informados en materia de calidad, pasan a ser más exigentes y decisivos a la hora de dar forma a los proyectos de construcción.

Una comparación a los Sistemas de Certificación como Qualitel (Francia), Energy Star y NAHB (USA), Construire Avec l'Energie en Bélgica, entre otros existentes, cada uno con énfasis propios distintos, permite visualizar qué aspectos (cultura, clima, etc.) son los preponderantes a la hora de definir un Sistema de Construcción Prestacional.

Tabla 2. Comparación sistemas constructivos internacionales y Proyecto CITEC.

Sistema	NAHB	Energy Star	Qualitel	Construire avec l'energie	Proyecto CITEC
País	USA		Francia	Bélgica	Chile
Estudio y Percepción de demandas de calidad de usuarios	Sí	No	No	No	Sí
Criterios de Observación	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Comportamiento térmico de elementos envolventes. ✓ Instalaciones energéticas eficientes. ✓ Impermeabilidad al aire. 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Confort verano y demanda energética calefacción. ✓ Control ruidos. ✓ Plomería y electricidad ✓ Costos mantención, fachadas y techumbres 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aislamiento térmico envolvente. ✓ Control ventilación. ✓ Caract. sist. Calefacción. ✓ Características sist. ACS 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Demanda energética calefacción y refrigeración. ✓ Estanqueidad agua y aire. ✓ Protección acústica. ✓ Instalaciones sanitarias y eléctricas.
Modelos de análisis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Evaluación energética global de la vivienda (método prestacional). ✓ Paquete tecnológico. 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Evaluación energética de la vivienda (prestacional). ✓ Paquete tecnológico (prescriptivo). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cálculos de comportamiento térmico de envolvente según normas belgas. ✓ Cálculos de ventilación (natural o forzada). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Evaluación energética global de la vivienda. ✓ Cálc. vent. natural o forzada. ✓ Paquete tecnco. térmico, acústico y estanqueidad de soluciones constructivas.
Verificación experimental soluciones constructivas del "Paquete tecnológico"	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conductividad y transmitancia térmica. ✓ Estanqueidad al agua (muros) ✓ Comportamiento acústico. ✓ Estanqueidad al aire (puertas y ventanas). 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conductividad y transmitancia térmica. ✓ Estanqueidad al agua. ✓ Comportamiento acústico. ✓ Estanqueidad al aire. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conductividad y transmitancia térmica. ✓ Estanqueidad al agua. ✓ Comportamiento acústico. ✓ Estanqueidad al aire. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conductividad y transmitancia térmica. ✓ Estanqueidad al agua. ✓ Comportamiento acústico. ✓ Estanqueidad al aire.
Instrumentos de análisis Producto Vivienda	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Software de simulación. ✓ Guía de diseño y construcción de viviendas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Software de simulación (prestacional). ✓ Guía de listado especificaciones técnicas de soluciones constructivas según clima (prescriptivo). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cálculos comportam. Térmico según normas locales (software o normas Th-K, Th-B, etc.) ✓ Uso valores prescriptivos para comportamiento acústico. ✓ Instalaciones sanitarias y eléctricas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cálculos de comportamiento térmico de la envolvente según normas belgas. ✓ Uso valores prescriptivos para comportamiento térmico envolvente. ✓ Verif. diseño sist. vent. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Software de simulación. ✓ Verif. diseño sistema vent. ✓ Guía listado de especific. técnicas de soluciones constructivas según clima (prescriptivo). ✓ Verif. experimental de comport. Acústico. ✓ Instalaciones sanitarias y eléctricas.
Etapas de observación y análisis	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisión proyecto. ✓ Inspección y verif. experimental obras. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Similar a sistema NAHB ✓ Obtención sello. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisión Proyecto. ✓ Inspección obras. ✓ Obtención sello. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisión Proyecto. ✓ Inspección obras. ✓ Obtención sello. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Revisión proyecto. ✓ Aplicación Softw. CCTE-CL. ✓ Inspección obras. ✓ Verif. experimental ✓ Obtención sello.

ii. Estado del arte, situación nacional.

En Chile, como se mencionó, el sistema constructivo actual se basa principalmente en criterios prescriptivos cuyo principal defecto es que los errores que se cometan en un proyecto de construcción se repitan en proyectos posteriores. Sin embargo, por una parte, se han desarrollado dos sistemas cuyo propósito es asegurar la calidad de un edificio basado en criterios de desempeño, y por otro lado, existen iniciativas a modo de proyectos que también apuntarían a desarrollar un sistema de construcción prestacional, pero cada uno con alcances y bases diferentes al proyecto impulsado por el CITEC.

A continuación se resumen las principales diferencias y enfoques de estas iniciativas:

Tabla 3. Comparación sistemas actuales, potenciales y proyecto CITEC.

Item	Sistema					
	CECC	IDIEM	DECON UC	Fundación Chile	MINVU	Proyecto CITEC
Recoge estudios de percepción y demandas de calidad de usuarios	SI	NO	SI	SI	NO	SI
Observación principal	Proceso Constructivo	Proceso Constructivo	Desempeño de partes y componentes de la vivienda	Percepción usuarios	Desempeño vivienda	Desempeño de vivienda, partes y componentes.
Métodos y técnicas de análisis	Inspección descriptiva. ✓ Verificación cumplimiento normas, especificaciones y certificados OGUC. ✓ Guías de calidad.	Inspección descriptiva. ✓ Verificación cumplimiento de normas, especificaciones y certificados según OGUC. ✓ Guías de calidad.	Inspección descriptiva. ✓ Verificación según estándares de soluciones para cada componente (base de observación). ✓ Guías de calidad.	Inspección descriptiva. ✓ Guías de calidad.	Inspección descriptiva. ✓ Guías de calidad.	Inspección descriptiva. ✓ Verificación normas y especificaciones. Inspección experimental. ✓ Tests termografía, estanqueidad fachada, presurización, termoflujometría y otros.
Componentes de observación	✓ Todas las exigidas por la OGUC.	✓ Todas las exigidas por la OGUC.	✓ Filtración envolvente. ✓ Humedad interior por condensación. ✓ Instalaciones sanitarias. ✓ Terminaciones.	✓ Percepción bienestar lumínico, térmico, acústico.	✓ Eficiencia energética vivienda	✓ Eficiencia energética vivienda. ✓ Calidad ventilación vivienda. ✓ Estanqueidad al agua. ✓ Protección acústica. ✓ Instalaciones sanitarias y eléctricas. ✓ Durabilidad ante humedad. ✓ Durabilidad y seguridad estructural. ✓ Seguridad ante fuego. ✓ Seguridad ante elementos no estructurales. ✓ Huella carbono.
ESTADO	EXISTE	EXISTE	POTENCIAL	POTENCIAL	POTENCIAL	SE PROPONE

Capítulo 1: Fundamentos de Ventilación.

A continuación se describe de manera introductoria, el terreno sobre el cual se mueve el presente estudio. Si bien, se presentan ecuaciones válidas, es importante destacar que son de carácter básico, y que se definen bajo suposiciones que implican situaciones que en la realidad difícilmente se presentan, sin embargo, permiten visualizar las variables que más influyen en los fenómenos de interés.

1.1 Ventilación natural.

Corresponde al flujo de aire a través de ventanas abiertas, puertas abiertas, rejillas de ventilación o cualquier otra abertura situada de forma premeditada e intencionada en la envolvente del local. El movimiento se debe a un conjunto de causas atmosféricas y que actúan simultáneamente superponiéndose.

Las modalidades más comunes en las que se manifiesta la ventilación natural son:

1.1.1. Diferencia de temperaturas entre el aire interior y exterior.

La diferencia de temperaturas causa también una diferencia de densidad entre el ambiente interior del edificio y el ambiente exterior atmosférico. Esta diferencia de temperaturas produce un desequilibrio en la vertical de las gradientes de presión, lo que resulta en el desarrollo de diferencias de presión vertical (ver *Figura 2*). Comúnmente, lo anterior se conoce como "*Efecto stack*" o "*Efecto chimenea*". Cuando la temperatura interior es mayor que la exterior, el aire fluye dentro del edificio a través de las aberturas inferiores, y se escapa a través de las aberturas superiores. Cuando la temperatura interior es menor a la exterior, el sentido de flujo anteriormente descrito se invierte. El nivel en

el cual ocurre la transición de flujo entrante a flujo saliente se conoce como plano neutro de presión.

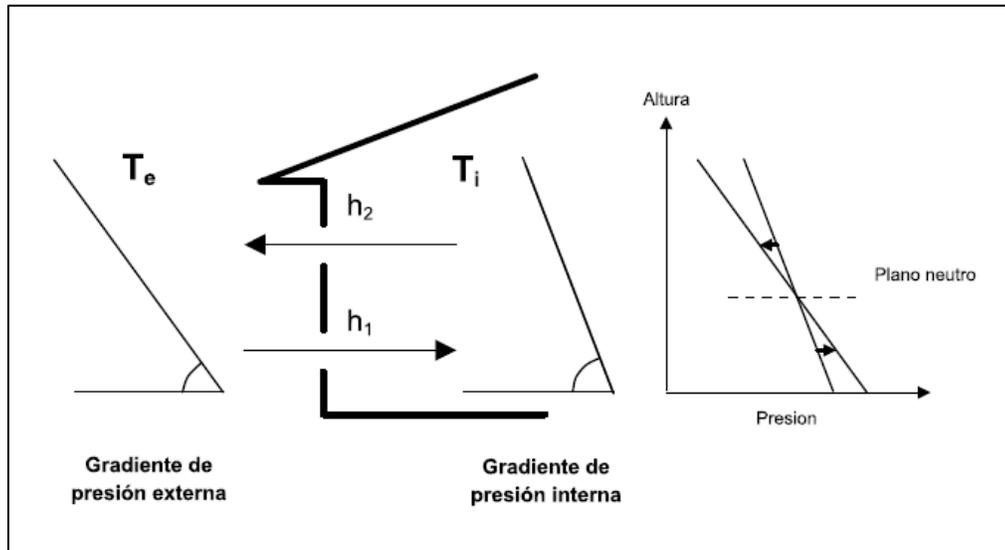


Figura 2 - Representación gráfica del "efecto chimenea" (o "efecto stack").

La presión debida a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, a una altura z se obtiene por la siguiente expresión:

$$P_s = P_0 - \rho_i \cdot g \cdot z \quad (Pa) \quad (1.1)$$

Donde:

P_0 Presión estática en la parte más baja de la zona estudiada (Pa).

ρ_i Densidad del aire a una temperatura T_i (kg/m^3).

g Aceleración de gravedad (m/s^2).

T_i Temperatura interior del aire [K].

Para el caso de dos zonas conectadas por una abertura como una puerta, ventana u otro; y en las cuales la temperatura no varía con la altura (zonas isotermas) la diferencia de presión debido al efecto stack se obtiene por la siguiente expresión:

$$\Delta P_s = P_{1,0} - P_{2,0} + (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot z \quad (Pa) \quad (1.2)$$

Donde:

$P_{1,0}, P_{2,0}$ Presión estática a la altura de referencia de la zona 1 y 2 respectivamente.

ρ_2, ρ_1 Densidad del aire en las zonas 1 y 2 respectivamente.

1.1.2. Efecto del viento.

El viento incidente sobre un objeto originará diversas zonas de turbulencia alrededor de las caras del mismo (ver *Figura 3*), en efecto, sobre cada superficie se originaran zonas de sobrepresión o depresión dependiendo de la inclinación y orientación entre cada una de las caras del cuerpo y la dirección de incidencia del viento sobre él.

Así y usando como referencia la presión estática del ambiente exterior, la presión debido al efecto del viento sobre la cualquier superficie se determina con la expresión:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_e \cdot v^2(z) \quad (Pa) \quad (1.3)$$

Donde:

C_p Coeficiente de presión de viento (s.d.)

$v(z)$ Velocidad local de viento a la altura z . (m/s)

ρ_e Densidad del aire a temperatura exterior (kg/m^3).

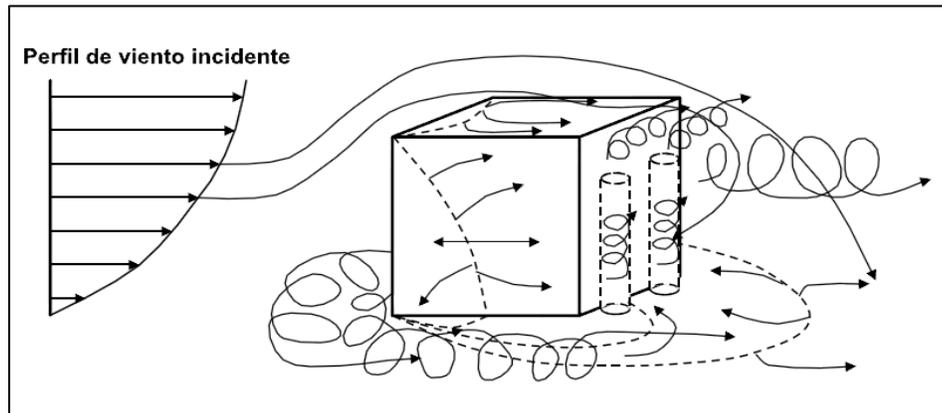


Figura 3 - Comportamiento del aire incidente en un cuerpo.

El coeficiente de presión C_p , es un parámetro empíricamente determinado, basado en resultados de estudios realizados en túneles de viento con modelos de edificios a escala. Se ha descubierto, y se asume, que este coeficiente es independiente de la velocidad del viento pero varía de acuerdo a la dirección del mismo y a la ubicación espacial en la superficie del edificio. Además, es muy sensible a las obstrucciones o condiciones del entorno del edificio en estudio, por lo que, para edificios similares en entornos distintos, es de esperar valores de C_p notablemente diferentes.

Para edificios de poca altura, generalmente hasta tres pisos, los coeficientes de presión son expresados como un valor promedio para cada cara del edificio y para sectores divididos en zonas de 45° o 30° en relación con la dirección del viento. Para edificios más altos, la dependencia espacial del coeficiente de presión del viento varía considerablemente de acuerdo a la altura de la estructura.

A modo de ejemplo, la Tabla 4 muestra algunos de los valores que el coeficiente de presión C_p puede tomar.

Por otro lado, es importante conocer la velocidad del viento, ya que, ésta influye notoriamente en la magnitud de la presión por efecto del viento que actúa sobre las caras del edificio. Para ello, se considera un nivel de referencia que, comúnmente, coincide con la altura de la estructura en estudio. A menudo, los datos de viento de la zona deben ser consultados a una estación meteorológica cercana. Dichos datos deben ser corregidos de acuerdo a la rugosidad del entorno del edificio y la altura del mismo; otra opción, también válida, es obtener datos eólicos de una zona climática y topográficamente similar a la del edificio.

En definitiva, la expresión que se utiliza para obtener la velocidad del viento a una altura dada tiene la forma,

$$\frac{v}{v'} = c \cdot H^a \quad (1.4)$$

Donde:

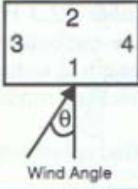
v Velocidad media del aire a la altura H desde el terreno (m/s).

v' Velocidad media del aire medida en una estación meteorológica, normalmente a la altura de 10 m sobre el terreno (m/s).

a, c Factores que dependen del terreno (s.d.)

Tabla 4.- Valores que puede tomar el coeficiente C_p .

Table A2.5 Wind Pressure Coefficient Data
 Low-rise buildings (up to 3 storeys)
 Length to width ratio: 2:1
 Shielding condition: Surrounded by obstructions equivalent to half the height of the building
 Wind speed reference level: Building height



Location		Wind Angle							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1		0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06
Face 2		-0.5	-0.6	-0.35	0.06	0.25	0.06	-0.35	-0.6
Face 3		-0.6	0.2	0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5
Face 4		-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.5	0.4	0.2
Roof (<10° pitch)	Front	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
	Rear	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
Average		-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
Roof (11-30° pitch)	Front	-0.6	-0.6	-0.55	-0.55	-0.45	-0.55	-0.55	-0.6
	Rear	-0.45	-0.55	-0.55	-0.6	-0.6	-0.6	-0.55	-0.55
Average		-0.5	-0.6	-0.55	-0.6	-0.5	-0.6	-0.55	-0.6
Roof (>30° pitch)	Front	0.15	-0.08	-0.4	-0.75	-0.6	-0.75	-0.4	-0.08
	Rear	-0.6	-0.75	-0.4	-0.08	0.15	-0.08	-0.4	-0.75
Average		-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4

Fuente: A Guide to Energy Efficient Ventilation, AIVC, University of Warwick Science Park, 1996.

1.1.3. Efecto combinado del viento y diferencia de densidades.

La diferencia total de presión depende principalmente de ambos factores (viento y diferencia de temperatura), por lo que, la superposición de cada agente nos dará el valor global de su efecto combinado. Así para aberturas en la envolvente del edificio, se define la presión "externa" total como sigue:

$$\Delta P_{ext} = P_0 + \frac{\rho_e \cdot C_p \cdot v^2}{2} + (\rho_i - \rho_e) \cdot g \cdot z \quad (Pa) \quad (1.5)$$

1.2. Ventilación forzada o mecánica.

Los sistemas de ventilación mecánica, independiente de las condiciones ambientales exteriores, son capaces de proveer una ventilación más controlada del recinto o edificio. Especialmente usada en edificios comerciales de gran envergadura, en locales donde la emanación de vapores y olores son consecuencia del itinerario del edificio (restaurants, laboratorios, bodegas, baños, cocinas etc.) y en viviendas o recintos pequeños ubicados en zonas climáticas donde la ventilación natural no es suficiente o apropiada.

Es común encontrar sistemas de ventilación mecánica que funcionan simultáneamente con sistemas de calefacción con recuperación de calor para disminuir las pérdidas.

Dentro de los componentes usados en un sistema de ventilación mecánica se incluyen:

- Impulsor: provee el movimiento para desplazar el aire a través de sus aspas.
- Conductos: vías de transporte del aire.
- Difusores: usados para descargar mecánicamente el aire en el espacio a ventilar (ventilación por sobre presión).
- Tomas de aire: aberturas por donde el aire exterior accede al sistema de ventilación.
- Entradas de aire: aberturas "pasivas" para aire de renovación.
- Rejillas de aire: aberturas para evacuar el aire viciado del local.
- Silenciadores: Atenuadores de ruido del sistema.

Por otro lado, los métodos de ventilación mecánica varían según dos tipos principales: *ventilación por sobrepresión* y *ventilación por depresión*, los que a su vez pueden ser mezclados con otros procesos como dilución y filtrado que no serán objeto de este estudio.

1.2.1. Ventilación por sobrepresión.

Consiste básicamente en introducir aire de renovación al recinto, el cual causa el desplazamiento del aire viciado del local hacia las aberturas de salida. Cabe mencionar que, al realizar esto, no se consigue necesariamente la puesta en sobrepresión de todos los puntos del local en relación al exterior. Lo que sí se puede asegurar, es que se rebaja el nivel del plano neutro, o dicho de otro modo, se "aumenta" el tamaño de las aberturas de salida en "detrimento" de las aberturas de entrada.

Ventajas de la ventilación por sobrepresión:

- El aire exterior puede ser filtrado y acondicionado térmicamente.
- Flujo de aire controlado.
- Se inhibe la entrada de contaminantes y polución del aire exterior.
- Se reduce la posibilidad de tener "ventilación revertida" por efecto del viento u otras condiciones.
- Si la envolvente es lo suficientemente impermeable al aire, la infiltración puede ser notablemente reducida.

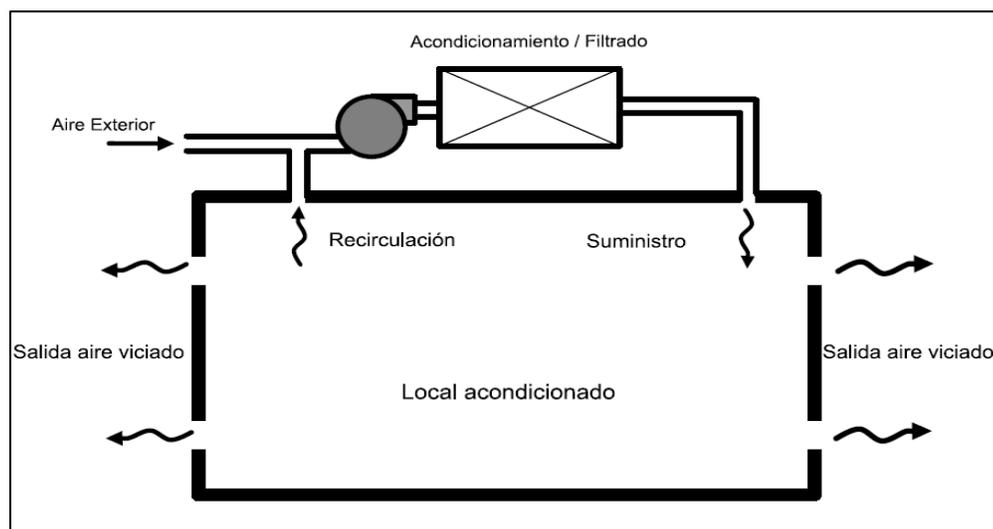


Figura 4. Esquema de ventilación mecánica por sobrepresión.

Desventajas de la ventilación por sobrepresión:

- Si las tomas de aire se ubican cercanas a fuentes de polución, se corre el riesgo de bloqueo o sellamiento.
- Los vapores generados en el interior pueden llegar a la estructura del edificio con riesgo de condensación.
- Procesos de recuperación de calor no son posibles con este método.
- Se tiene el riesgo de que el aire viciado se transfiera a otras zonas ocupadas.

1.2.2. Ventilación mecánica por depresión.

Consiste en extraer aire del local a ventilar mediante el accionamiento de un sistema mecánico. Análogo al caso de ventilación por sobrepresión, al extraer aire del local no se garantiza la puesta en depresión (respecto de la presión atmosférica) de todos los puntos del local, sino que, se aumenta el nivel en el que se encuentra el plano neutro.

Para llevar a cabo la ventilación por este medio, se debe cumplir que la depresión, causada por la extracción, debe ser mayor que la presión originada por el efecto conjunto del viento y la diferencia de temperaturas interior/exterior, de lo contrario, la ventilación sería dominada por las variables externas al edificio y el sistema se vuelve ineficaz y, por lo tanto, ineficiente.

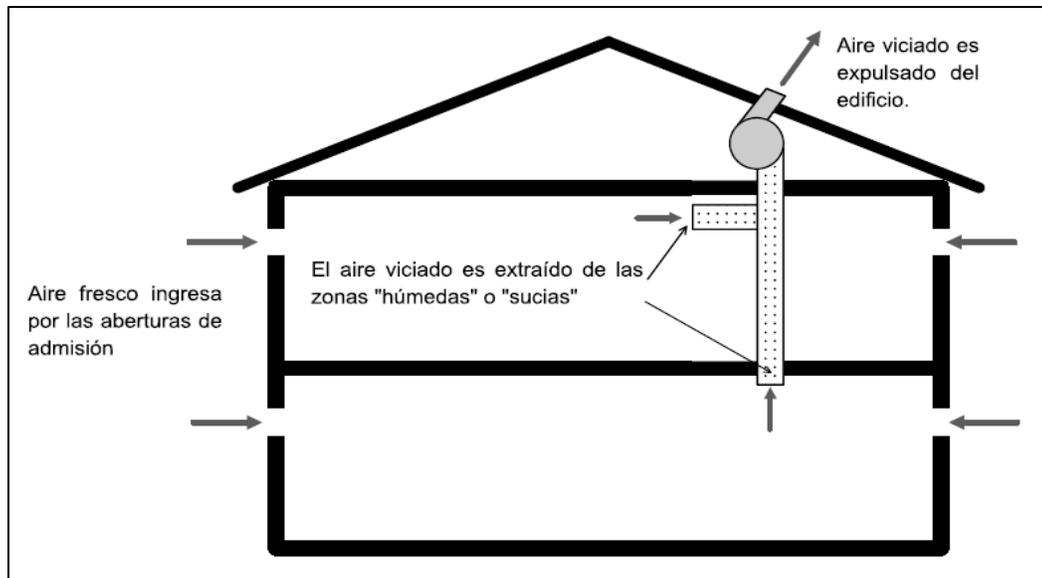


Figura 5. Esquema de ventilación mecánica por depresión.

Ventajas de la ventilación por depresión:

- Permite controlar la ventilación a diferentes tasas.
- Se reduce el riesgo de que el aire viciado se transfiera a zonas ocupadas.
- Se puede recuperar calor desde el flujo de aire viciado expulsado.

Desventajas de la ventilación por depresión:

- Costo de operación, en relación a la ventilación natural, es mayor.
- Se requiere disponibilidad de energía eléctrica.
- El sistema puede generar ruidos molestos.
- El sistema requiere mantenimiento y limpieza regular.
- La depresión causada por la extracción mecánica puede aumentar la presencia de gases del suelo en un edificio atrayéndolos a través de la capa del subsuelo.

1.2.3. Ventilación mecánica balanceada “por mezcla”.

Este sistema combina ambos tipos de ventilación mecánica en una red de conductos separados. Generalmente, el aire es introducido en las “zonas secas” (salas de estar, dormitorios, etc.) donde se mezcla con el aire ya existente en ese lugar. Luego, el aire ya semi-viciado se transfiere, a través de las aberturas o rejillas pre concebidas en los muros internos del edificio, a las “zonas húmedas” (cocinas, baños, bodegas, etc.) donde es capturado por el sistema de extracción. Finalmente, y antes de ser expulsado, el aire se introduce a un sistema de recuperación de calor, con el fin de pre calentar el aire de renovación que se dirige hacia las “zonas secas”.

Es, justamente, este último proceso de recuperación de calor, el que justifica el capital y costos de operación adicionales.

En ocasiones, se busca establecer un ligero desequilibrio en el sistema, con el objeto de poner el edificio en depresión (viviendas), o en sobrepresión (edificios comerciales).

Ventajas de la ventilación mecánica “por mezcla”:

- Es posible recuperar calor del aire viciado en extracción.
- La renovación de aire se focaliza en las zonas ocupadas generalmente limpias mientras que la extracción se focaliza en las zonas contaminadas.
- La ausencia de altas presiones de succión reduce el riesgo de ingreso de gases a través del subsuelo.

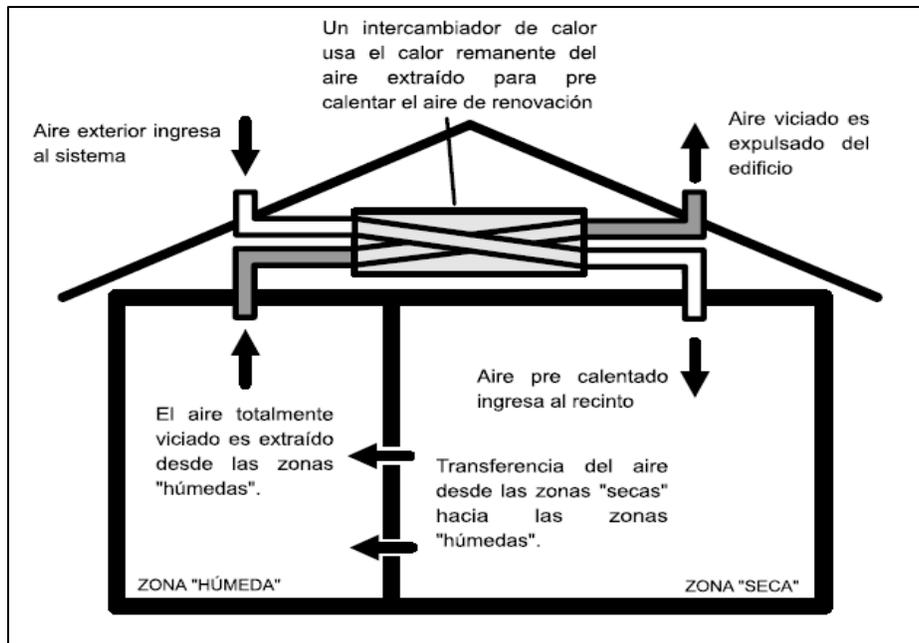


Figura 6 - Esquema de sistema de ventilación mecánica "por mezcla".

Desventajas de la ventilación mecánica "por mezcla":

- Se dobla la complejidad y el costo del sistema al requerir dos redes simultáneas para operar.
- Se requiere mantenimiento y limpieza periódicos.
- Para una correcta operación, los sistemas deben ser instalados en recintos con baja permeabilidad al aire.

1.2.4. Ventilación mecánica balanceada "por desplazamiento".

En éste método el aire introducido, a baja velocidad ($0,1$ a $0,3 \text{ m/s}$), es pre acondicionado a una temperatura menor que la temperatura del recinto a ventilar (2 a 3° C de diferencia) [1]. Al estar más frío que el aire ambiente ya existente en el local, el aire de renovación introducido a través de difusores ubicados cerca del suelo (o instalados en él), busca el nivel más bajo posible y desde ahí, al encontrar fuentes de calor como personas, equipos eléctricos, equipos de calefacción, etc. comienza a aumentar su temperatura para

finalmente ascender hasta los extractores ubicados en un nivel cercano al techo (o instalados en él). El efecto de desplazamiento se origina por el “empuje” que ejerce el aire de renovación sobre el aire ya existente en el recinto.

Ventajas del sistema de ventilación mecánica “por desplazamiento”:

- Sistema potencialmente adecuado pensando en estrategias energéticamente eficientes.
- Es posible mantener las áreas cercanas al suelo libres de humos.

Desventajas del sistema de ventilación mecánica “por desplazamiento”:

- Se reduce la disponibilidad del suelo del recinto, debido a que los ocupantes deben mantenerse a cierta distancia de los difusores y puntos de inserción del aire de renovación para evitar bloqueos u otros.
- Se necesita control preciso sobre las condiciones de operación y así obtener un funcionamiento correcto.
- La capacidad de calefacción o enfriamiento a través del aire distribuido es limitado. Por lo que, para esos propósitos, se requiere un sistema separado.

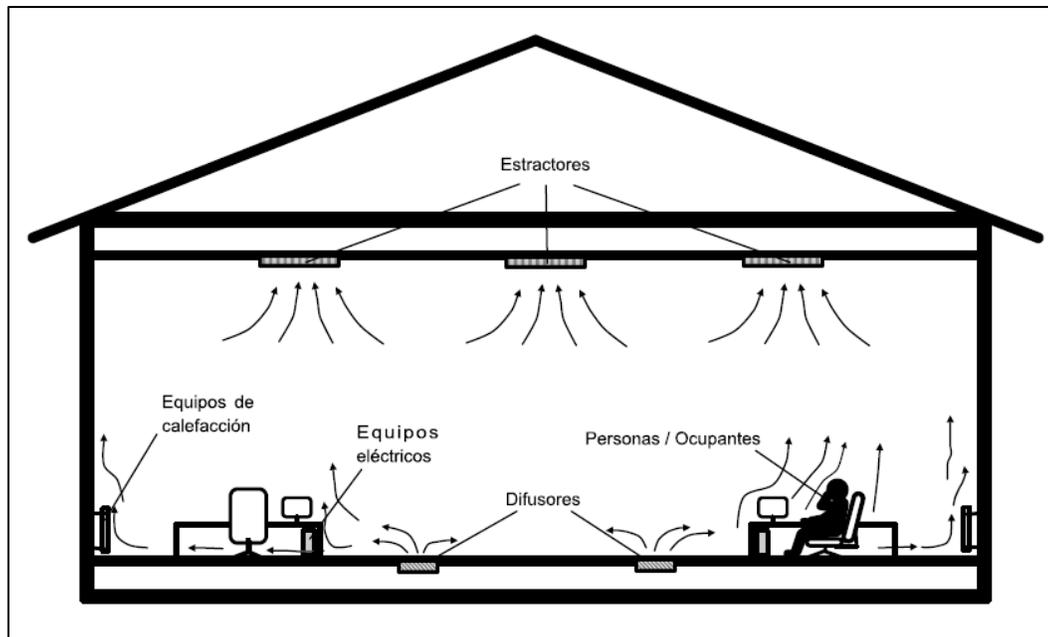


Figura 7 - Esquema de sistema de ventilación mecánica "por desplazamiento".

Todos los sistemas anteriormente descritos pueden operar de manera separada o en conjunto para conformar una estrategia de ventilación de diferentes edificios.

1.3. Ventilación híbrida.

La ventilación en un edificio o recinto, se realiza con la idea de proporcionar un determinado nivel de calidad de aire.

Por un lado, la ventilación mecánica posee la desventaja de requerir una no despreciable cantidad de energía eléctrica tanto para su operación como para su control, y, por otro lado, la ventilación natural, posee la desventaja de depender de las variables exteriores y sobre las cuales no se tiene mayor control, esto es, temperatura y viento (tanto magnitud como en dirección); por lo que, cabe la posibilidad de que en ciertos períodos de tiempo, la estrategia basada exclusivamente en ventilación natural, no sea suficiente para brindar los niveles deseados de calidad de aire interior.

Para mitigar este efecto, se aprovechan las ventajas que ofrece la ventilación mecánica instalando un sistema que funcione en paralelo a la red de ventilación natural y que opere cuando las condiciones exteriores (y en ocasiones interiores) así lo requieran. Las estrategias de ventilación que funcionan con ambos sistemas, mecánico y natural, se les conoce como sistemas de ventilación híbrida.

Los sistemas híbridos de ventilación son bimodales [2], así, dependiendo de las variables controladas (presión, temperatura, CO₂ presente en el aire o una combinación de éstas) el sistema entrará a ser de "régimen" natural o, en su defecto, "régimen" mecánico. La premisa bajo la cual funciona el control del sistema es ventilar con el mínimo consumo de energía posible utilizando al máximo el sistema de ventilación natural.

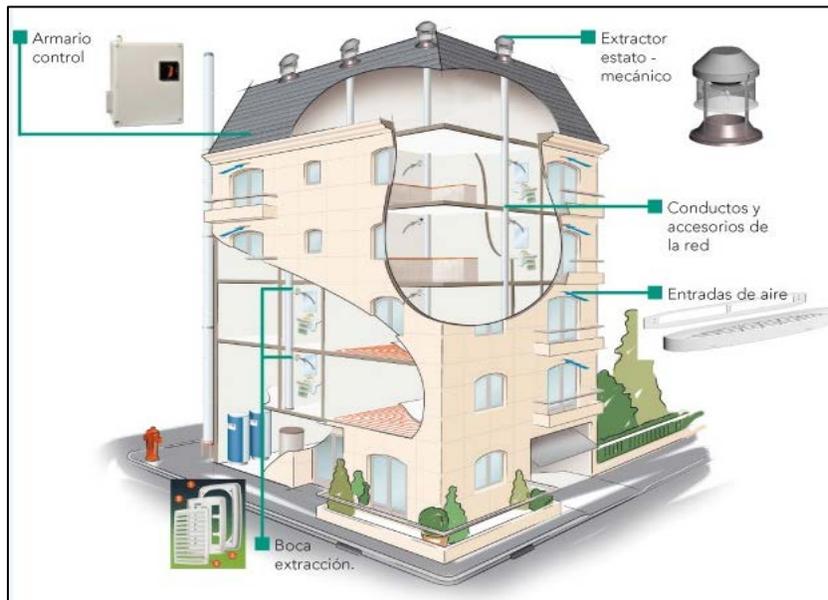


Figura 8 - Sistema de ventilación híbrida (ejemplo).

1.4. Flujo a través de aberturas.

El flujo de aire a través de componentes, forma parte de la estrategia de ventilación contemplada en el edificio o vivienda. Sin embargo, existen

aberturas que se originan tanto en el proceso de diseño como en la etapa de construcción del edificio y que no pertenecen al diseño propio del sistema de ventilación. Estas aberturas son, por lo general, pequeñas y a menudo se ocultan de la vista del usuario (o inspector). En la *Figura 9* se muestran los caminos más comunes por donde el aire puede abrirse paso desde o hacia el exterior.

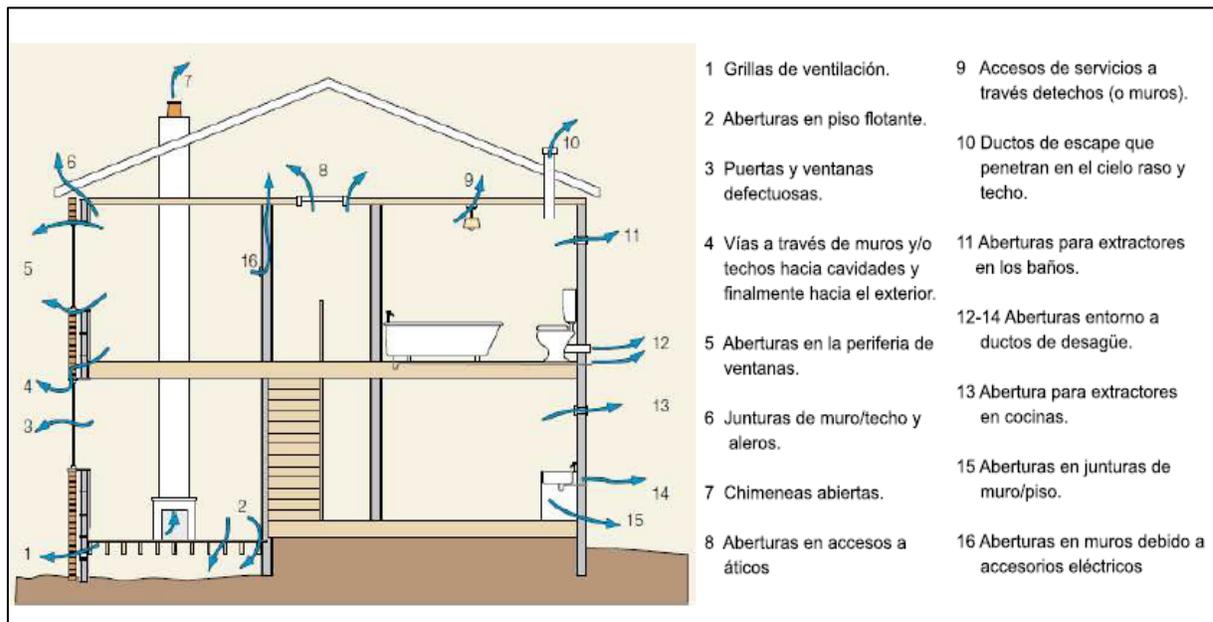


Figura 9 - Vías más comunes de infiltración/exfiltración en un edificio.

Se han realizado diferentes estudios para definir la distribución de las filtraciones de aire e indirectamente de las grietas, en los distintos componentes que erigen la envolvente del edificio [3].

- Paredes: Representan entre el 18% y el 30% del total de las fugas de aire que se producen a través de la envolvente. Se localizan básicamente en juntas con muros y pisos, enchufes y paso de tuberías.
- Techos: Representan entre el 3% y el 30% del total de fugas de aire. Se localizan en los accesorios de iluminaria, cableado, paso de tuberías.

- Sistemas de ventilación: Representan entre el 3% y el 28% de las fugas de aire. Sobre todo en sistemas donde se operan con diferencias de presión de hasta 10 veces la diferencia normal interior/exterior de presión en una vivienda.
- Puertas y ventanas: Dependiendo del tipo de ventana, representan entre el 6% y el 25% del total de fugas de aire.
- Chimeneas: De existir, dependen de los accesorios a utilizar para mitigar las fugas de aire, aun así, pueden llegar a suponer el 30% del total.
- Rejillas de extracción: Suponen entre el 2% y el 12% del total de fugas de aire. Debido a falta de trampillas o mal cierre de éstas.
- Difusión a través de paredes: En comparación al resto de las fugas, su influencia es despreciable, siendo menor al 1% del total de fugas de aire.

El comportamiento del flujo de aire a través de una abertura grande, como una puerta o una ventana es diferente al que ocurre en una fisura o grieta. Para establecer cuándo se habla de una grieta y cuando de una abertura de ventilación se definen dos categorías¹:

- Aberturas pequeñas, llamadas fisuras o grietas, cuyo tamaño es menor a 10 mm.
- Aberturas grandes con un tamaño mayor a 10 mm.

Por otro lado, las ecuaciones que describen el flujo a través de aberturas se definen bajo las siguientes suposiciones:

- El flujo de aire se considera como el de un fluido no viscoso e incompresible.
- La temperatura de la zona estudiada es uniforme.

¹ British Standard BS 5925:1991, Ventilation principles and designing for natural ventilation.

La ecuación que describe el flujo de aire a través de una abertura tiene la forma de ley exponencial y se escribe como:

$$Q = K \cdot (\Delta P)^n \quad (m^3/s) \quad (1.6)$$

Donde, K es el coeficiente de flujo que depende de la geometría de la abertura y el exponente n es función de las características del flujo tomando valores desde 0,5 para flujo turbulento, hasta 1 para flujo totalmente laminar.

1.4.1. Aberturas pequeñas (fisuras o grietas).

El flujo de aire a través de grietas depende de la forma de la misma y de las características del flujo que la atraviesa, en cualquier caso, puede describirse de manera simplificada usando la ecuación 1.6, que es la usada por la norma británica BS 5925:1991.

$$Q = k \cdot L \cdot (\Delta P)^n \quad (Pa) \quad (1.7)$$

Donde:

L Largo de la grieta (en dirección del flujo) (m).

ΔP Diferencia de presión a través de la grieta (Pa).

Por otro lado, el coeficiente k se relaciona con la forma y naturaleza de la grieta. Siendo 0,67 un valor apropiado para el exponente n , en la *Tabla 5* se muestran valores de k para grietas o fisuras presentes en diferentes tipos de ventanas.

Otra forma de obtener el flujo de aire a través de una grieta es usar la *ecuación 1.6* determinando los coeficientes K y n con las expresiones:

$$K = \frac{9,7 \cdot L_{cr} \cdot (0,0092)^n}{1000} \left(m^3/s \cdot Pa^{-n} \right) \quad (1.8)$$

$$n = 0,5 + 0,5 \cdot e^{-500 \cdot W_{cr}} \quad (1.9)$$

Donde:

L_{cr} Largo de la fisura (mm).

W_{cr} Ancho de la fisura (mm)

Tabla 5. - Valores del coeficiente k para diferentes tipos de ventanas.

Valores de k para ventanas (en L/s por metro de fisura para una presión aplicada de 1 Pa)		
Tipo de Ventana	k	
	Sin burlete promedio(rango)	Con burlete promedio(rango)
Madera		
Ventana con bisagra a un costado	0,23 (1,19 a 0,04)	0,03 (0,10 a 0,01)
Ventana con bisagra superior	1,08 (1,38 a 0,88)	0,42 (1,22 a 0,11)
Ventana pivoteada al centro	0,80 (1,25 a 0,04)	0,02
Metal		
Ventana con bisagra a un costado	0,31 (0,45 a 0,21)	0,27 (0,29 a 0,14)
Ventana con bisagra superior	0,32 (0,55 a 0,18)	-
Corredera vertical	0,45 (1,20 a 0,20)	0,18 (0,34 a 0,04)
Corredera horizontal	0,22 (0,43 a 0,12)	-

Fuente: Ventilation principles and designing for natural ventilation, British Standard BS 5925:1991.

1.4.2. Aberturas grandes.

Es de esperar que las puertas, ventanas y la mayoría de los componentes de ventilación entren en la categoría de grandes aberturas.

Asumiendo flujo en régimen (estable), no viscoso e incompresible (densidad ρ , constante) se aplica la ecuación de Bernoullí entre las secciones 1 y 2 de la *Figura 10* para obtener:

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 \quad (1.10)$$

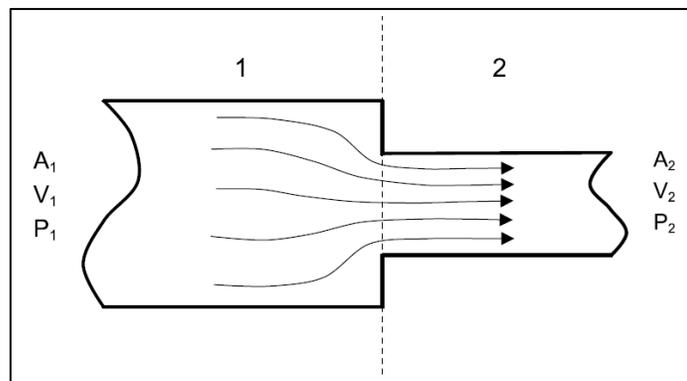


Figura 10 - Comportamiento del flujo ante la presencia de una abertura.

Además, asumiendo que el perfil de velocidades del flujo es uniforme en ambas secciones, por continuidad se tiene que:

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (m^3/s) \quad (1.11)$$

Combinando la ecuación 1.10 con la ecuación 1.9, y posteriormente tomando en cuenta que para el caso en estudio $A_1 \gg A_2$, se obtiene:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (\text{m/s}) \quad (1.12)$$

La ecuación 1.11 se obtiene considerando un caso ideal de flujo y cambio de sección, donde el efecto de la viscosidad es despreciado. En la realidad el área A_2 es incluso mucho menor de lo que se representa en la *Figura 10*, debido a un efecto de contracción en el flujo. Adicionalmente, el comportamiento turbulento en forma de torbellino en los alrededores de la abertura implica un efecto no lineal. Para aproximar la ecuación 1.11 al caso real se incorpora un factor llamado coeficiente de descarga, C_d , que depende de la diferencia de presión, velocidad del viento y geometría de la abertura. En consecuencia, se definen diversas formas de determinar el coeficiente de descarga (incluso valores estándar), una alternativa es usar la siguiente expresión [5]:

$$C_d = 0,4 + 0,0075 \cdot \Delta T \quad (1.13)$$

La ecuación 1.12 se recomienda para casos de aberturas internas donde el flujo de aire sea debido a diferencia de temperatura (efecto stack).

Por otro lado, existen estudios experimentales y recomendaciones que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Diferentes valores recomendados para el coeficiente de descarga.

Tipo Abertura / Recomendación	Valor
Aberturas internas pequeñas [6]	0,65
Aberturas internas grandes [6]	≈ 1
Valor recomendado [5]	0,78
Aberturas de altura H [7] $1,5 < H < 2$ (m)	$C_d = 0,21 \cdot H$
Aberturas de altura H [8] $0,9 < H < 2$ (m)	0,87
British Estándar BS 5925:1991 [4]	0,61

Fuente: Elaboración propia en base a diferentes referencias bibliográficas.

Capítulo 2: Métodos de predicción

En el capítulo anterior, junto con describir el funcionamiento general de los sistemas de ventilación, se explicó de manera superficial el aspecto físico que existe detrás de los fenómenos que dominan el movimiento del aire. Si bien, la matemática ya descrita ofrece las herramientas suficientes para predecir el comportamiento del aire (en términos de caudal, temperatura y/o presión), según datos iniciales del entorno del edificio o local, la virtud de su simpleza origina que sus resultados sean poco exactos, lo que se convierte en su principal defecto.

Sin embargo, existen métodos que permiten obtener resultados más exactos usando matemática más robusta. Además, dichos métodos consideran otras variables que afectan considerablemente los procesos físicos de la dinámica de fluidos.

En el presente capítulo, se presentan los modelos más conocidos de predicción, analizando más profundamente, eso sí, los más exactos con el objeto de llegar finalmente al método usado para alcanzar los objetivos de este estudio.

2.1 Modelos Empíricos.

Son expresiones simples que permiten obtener el caudal de aire o la velocidad de éste, en base a diferentes casos y configuraciones que se pueden presentar en el edificio.

Los métodos empíricos proporcionan una herramienta útil y recomendada cuando se quieren obtener estimaciones rápidas de la velocidad o caudal de aire en un local.

2.1.1 Método "British Standard".

La norma británica [4] propone fórmulas para determinar la infiltración y ventilación para diferentes configuraciones. El método asume que el flujo es bidireccional e ignora todas las particiones internas que puedan existir en el edificio. Las tablas muestran parte de las expresiones usadas para las condiciones mostradas esquemáticamente.

Tabla 7. Formulas de la "British Standard" para caudales de aire en ventilación natural.

Ventilacion debida al viento	$Q = 0,025 \cdot A \cdot V$ <p><i>A: superficie de la abertura</i> <i>V: velocidad del viento</i></p>	
	$Q_w = C_d \cdot A_w \cdot V \cdot \sqrt{\Delta C_p}$ $\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$ <p><i>C_d: coeficiente de descarga</i></p>	
Ventilacion debido a la diferencia de temperatura	$Q = C_d \cdot A \cdot \left[\frac{\epsilon \cdot \sqrt{2}}{(1 + \epsilon) \cdot (1 + \epsilon^2)^{0,5}} \right] \cdot \left(\frac{\Delta T \cdot g \cdot H_1}{T} \right)$ $\epsilon = A_1 / A_2 \quad A = A_1 + A_2$	
	$Q_b = C_d \cdot A_b \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta T \cdot g \cdot H_1}{T} \right)^{0,5}$ $\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$ $T = \frac{T_e + T_i}{2}$	
	$Q = C_d \cdot \frac{A}{3} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T \cdot g \cdot H_2}{T}}$	
Ventilacion por efecto combinado de viento y diferencia de temperatura	$Q = Q_b \text{ para } \frac{V}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \cdot \sqrt{\frac{A_b \cdot H_1}{A_w \cdot \Delta C_p}}$ $Q = Q_w \text{ para } \frac{V}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \cdot \sqrt{\frac{A_b \cdot H_1}{A_w \cdot \Delta C_p}}$ $\Delta T = T_i - T_e$	

Fuente: British Standard BS 5925:1991.

2.1.2 Método de Givonni.

Baruch Givonni [9] propone una expresión general obtenida en base a datos experimentales. Dicha expresión permite estimar la velocidad promedio del aire circulante dentro de un recinto de planta rectangular y con aberturas idénticas en muros opuestos orientados a favor y en contra del viento. Así, la velocidad promedio del aire circulante, V_i , dentro del recinto se determina como:

$$V_i = 0,45 \cdot (1 - e^{-3,48 \cdot x}) \cdot V_r \quad (2.1a)$$

$$x = A_{abertura} / A_{muro} \quad (2.1b)$$

Donde:

x Relación entre el área de abertura ($A_{abertura}$) y el área del muro donde se ubica la abertura (A_{muro}).

V_r Velocidad externa referencial de viento.

Existe también la posibilidad de usar el método ASHRAE [11] que también ofrece expresiones para estimar el caudal de aire circulante en un recinto, con la salvedad de que para aplicar este procedimiento es necesario conocer previamente el área efectiva de fuga de aire del edificio por medio de pruebas de presurización [10] u otros.

En definitiva, existen diversos métodos de carácter empírico que permiten obtener la velocidad y/o caudal de aire circulante dentro de un edificio o recinto de manera relativamente ágil.

2.2 Modelos de mallas o redes (“network”).

Este modelo establece que cada zona del edificio puede representarse como un nodo de presión mientras que los puntos de transferencia de aire entre recintos se representan como vías de flujo, así, la conexión e interacción de cada zona con otra y con el exterior conformarán una red de ventilación, tal y como muestra, de manera simplificada, la siguiente figura:

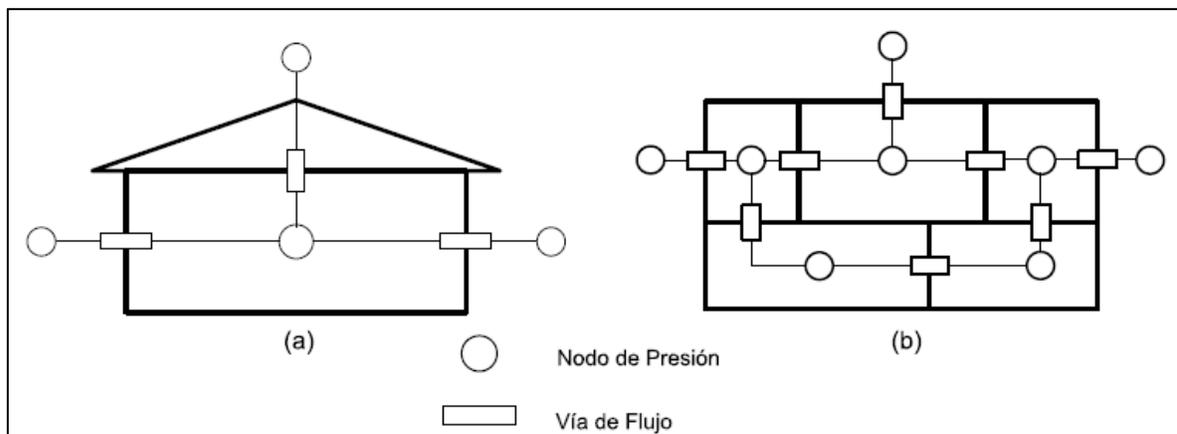


Figura 11 - Representación gráfica de modelado por nodos de una vivienda simple (a) y un edificio de zonas múltiples (b).

Consecuente al modelo, un edificio con N zonas será representado por una red de N nodos de presión. Algunos de éstos últimos representan la presión exterior conocida, mientras los demás representan la presión interna de cada recinto del edificio y que pasan a ser, en la mayoría de los casos, las incógnitas. Por otro lado, las vías de flujo pueden representar puertas, ventanas, rejillas e incluso fisuras en los muros. El cálculo de las presiones desconocidas comienza estableciendo balances de masa entre nodos conectados por vías de flujo.

Si la zona i se relaciona con la vía de flujo j entonces el balance de masa para dicha zona se define como:

$$\sum_{k=1}^j \rho_i \cdot Q_{ik} = 0 \quad (2.2)$$

Donde:

Q_{ik} Caudal de aire desde la zona i a la zona k (m^3/s).

ρ_i Densidad del aire en la dirección del flujo (kg/m^3).

Al aplicar este balance de masa a cada nodo interno de presión se genera un sistema de N ecuaciones no lineales cuyas soluciones, la presión interna de cada recinto, se obtienen de manera iterativa con el método de Newton-Raphson.

El tratamiento matemático para llegar a la solución de las N ecuaciones es laborioso [12]; incluye operaciones matriciales con derivadas parciales de las ecuaciones generadas por el balance de masa.

Sin embargo, este proceso de solución se simplifica y acelera gracias a programas como AIRNET, BREEZE, ESP, PASSPORT-AIR o COMIS. En un estudio realizado por BRE (Building Research Establishment, Inglaterra) se compararon datos experimentales con los resultados predictivos de cada programa [13]. El estudio arrojó los siguientes resultados:

Tabla 8. Tabla comparativa de resultados experimentales con predicciones de los programas de modelado tipo "network" (extracto).

Experimento n°	Flujo (m3/h)					
	Medido	ESP	PASSPORT-AIR	COMIS	AIRNET	BREEZE
1	198 ± 27	609	632	646	620	626
2	202 ± 39	454	467	463	459	438
3	245 ± 65	535	539	522	526	423
4	322 ± 62	733	762	766	766	689
5	123 ± 1	30	28	34	34	35
6	174 ± 4	240	193	229	229	242
7	193 ± 3	138	116	135	135	136
8	182 ± 1	205	171	211	205	209
9	216 ± 13	499	413	499	499	507
10	317 ± 10	354	296	360	360	364

Fuente: *Natural Ventilation in Buildings: a design handbook*, F. Allard, 1998.

El experimento fue realizado en el edificio del Observatorio Nacional de Grecia, Atenas cuya estrategia de ventilación es principalmente unilateral², bajo condiciones climáticas que fueron dominadas por velocidades de vientos importantes y diferencia de temperaturas interior/externa muy baja. La desviación entre las predicciones de los programas se origina por la diferencia que cada algoritmo tiene para resolver las ecuaciones simultáneas. Para aumentar la precisión de las predicciones, uno de los programas (PASSPORT-AIR) fue corregido incorporando un algoritmo que aproximaba los resultados de predicción a los datos experimentales por medio de una simulación [14]. Algunos de los resultados se muestran en la *Tabla 9*:

² Ventilación Natural Unilateral: Estrategia de ventilación que consiste en ubicar las aberturas de entrada y salida de aire en el mismo muro.

Tabla 9. Resultados de la simulación con algoritmo corregido (extracto).

Experimento n°	Flujo (m ³ /h)		
	Modelo Simple	Modelo Corregido	Datos Experimentales
1	632	354	123
2	467	297	174
3	539	391	193
4	762	318	182
5	28	227	216
6	193	208	316
7	116	449	482
8	171	366	279
9	413	413	431
10	296	226	336

Fuente: Natural ventilation in buildings: a design handbook, F. Allard, 1998.

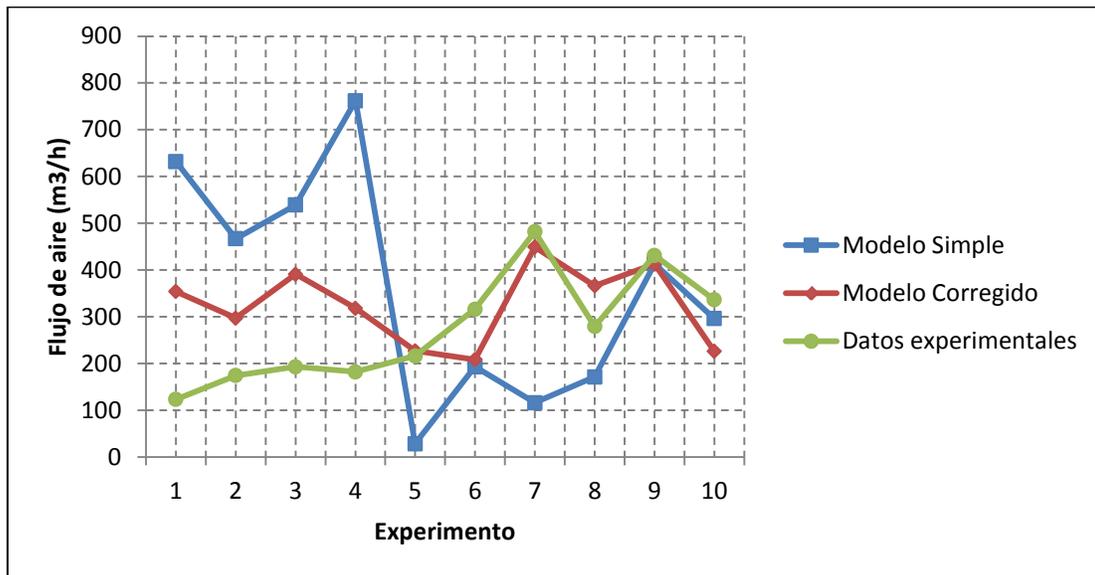


Figura 12 - Grafico de comparación entre datos experimentales y modelos (de Tabla 9).

Se han realizado otros estudios con configuraciones distintas en edificios que utilizan diferentes estrategias de ventilación y/o diferentes componentes.

La *Figura 13* muestra parte de los resultados obtenidos en un experimento similar realizado en el Laboratorio de Energía Solar, Suiza, el cual utiliza una estrategia de ventilación cruzada³. Mientras que la *Figura 14* muestra parte de los datos de un experimento con las mismas características salvo que en la estrategia de ventilación predomina principalmente el movimiento de aire originado por el efecto stack.

En definitiva, comparando la exactitud de las predicciones en relación con los datos experimentales, se observa que los flujos pronosticados en la estrategia de ventilación dominada por efecto stack poseen mayor exactitud que los pronosticados en las estrategias de ventilación dominadas por efecto del viento. Consecuentemente, podemos deducir que el modelo de redes no es recomendable para aplicarlo en edificios ubicados en climas donde los vientos son importantes.

Los modelos predictivos hasta ahora discutidos se fundan sobre la base de que los ambientes son uniformes, esto es, la temperatura (y densidad) en cada punto interior de la zona es constante. Sin embargo, esto en la realidad no es así, ya que, en los recintos existen cuerpos que perturban el aire ya sea en términos de temperatura o de velocidad. La naturaleza de estos objetos depende principalmente del uso del edificio y pueden ser equipos eléctricos, equipos de calefacción, muebles e, inclusive, los mismos ocupantes.

En los siguientes apartados se estudian métodos más sofisticados, que contemplan el uso de matemática más robusta para describir o modelar los fenómenos físicos inherentes a los procesos de ventilación.

³ Ventilación Natural Cruzada: Consiste en generar aberturas (interiores y exteriores) de salida de aire en las zonas de baja presión de viento y entradas en las zonas de alta presión de viento.

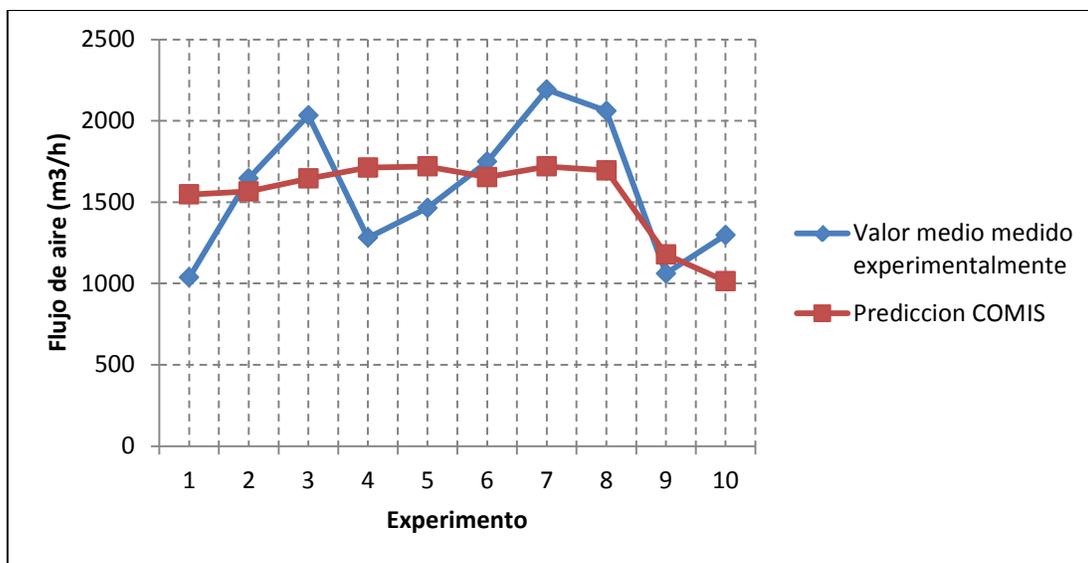


Figura 13 - Grafico comparativo datos experimentales en ventilación natural cruzada con predicción COMIS (extracto).

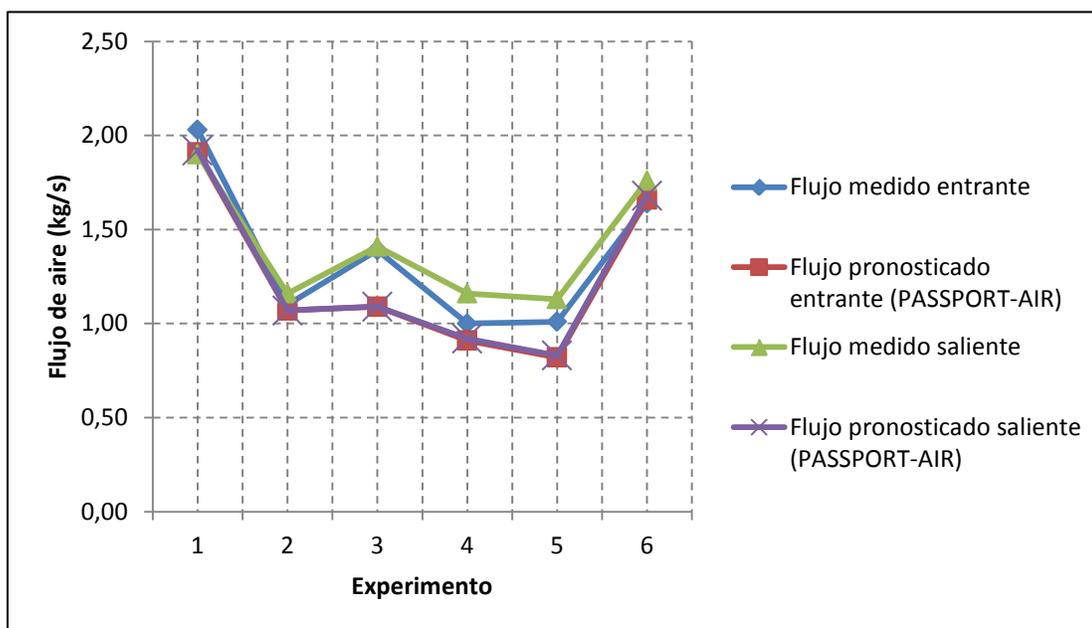


Figura 14 - Grafico comparativo datos experimentales en ventilación por efecto stack con predicción PASSPORT-AIR (extracto).

2.3 Modelos de zona.

Éste modelo es una aproximación intermedia entre el modelo tipo redes y el modelo CFD, que se discute en páginas posteriores. En esencia, el modelado por zona divide las zonas estudiadas en subvolúmenes paralelepípedicos más pequeños con bordes o límites horizontales y verticales. Los subvolúmenes pueden corresponder a:

- Zonas de flotación, que corresponden a zonas influenciadas por el efecto de empuje originado por una fuente termal interna. Y las demás zonas conocidas como,
- Zonas Normales

Las incógnitas del problema corresponden a:

- i. Los flujos normales o velocidades en cada borde rectangular entre subvolúmenes y para cada subvolumen,
- ii. Presión estática,
- iii. Temperatura.

La base del modelo radica en establecer balances de masa, entalpía y momentum, en cada uno de los ejes de coordenadas, bajo las siguientes suposiciones:

- Cada zona normal es asumida como estática, a temperatura normal T y a presión hidrostática P .
- Los límites entre zonas son consideradas como totalmente permeables.
- El flujo de aire entre zonas normales (i, j) es modelada por una ecuación con la forma de ley exponencial que relaciona, de manera no lineal, el

flujo diferencial con la diferencia de presión estática local entre ambos lados del límite que los separa.

$$dm = K_{ij} \cdot \rho_i \cdot \Delta P_{ij}^n \cdot dA \quad (2.3)$$

Donde:

K_{ij} Permeabilidad del borde (límite).

n Exponente de flujo.

Suponiendo un perfil de velocidades parabólico, el flujo ascendente en las zonas de flotación es modelado a través de una forma integral de las ecuaciones de momentum. El calor (q) que las zonas intercambian con las paredes de objetos a través de convección se determina con la expresión siguiente:

$$q = \alpha \cdot (T_i - T_s) \quad (2.4)$$

Donde:

α Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$).

T_i Temperatura interior del aire (K).

T_s Temperatura de la superficie "fuente" de calor (K).

El coeficiente α es calculado por medio de expresiones de convección natural para una placa plana en diferentes orientaciones.

El balance de masa establece que, para cada subvolumen, todos los flujos de calor en el mismo son iguales a cero. Lo anterior comprende:

- La entalpía por convección asociada al flujo de aire entrante en el subvolumen.
- Flujo de calor superficial debido a una pared (objeto) o a un subvolumen adyacente que se encuentra a diferente temperatura.
- El aporte por convección de fuentes de calor dentro del subvolumen.

Las ecuaciones de balance de momentum son aplicadas a lo largo de los tres ejes de coordenadas y contempla el balance de los siguientes términos:

- Flujo neto de momentum entrante en el subvolumen.
- Fuerzas que cuerpos ejercen sobre el subvolumen (principalmente gravitacionales).
- Fuerzas de presión normales a la superficie.
- Fuerzas de fricción* causada por velocidades diferentes en ambos lados de la cara del subvolumen.

** Estas fuerzas son modeladas como proporcionales a la energía cinética basada en la velocidad relativa entre los dos lados de la cara del subvolumen. La constante de proporcionalidad corresponde al coeficiente de fricción, el cual es obtenido de correlaciones estándar para placas planas a través del número de Reynolds que, a su vez, se calcula en base a la velocidad relativa ya mencionada.*

En el caso de la superficie de un muro, la velocidad absoluta de un subvolumen paralelo a la superficie, es usada para calcular el factor de fricción.

Finalmente, para acotar el problema, se establecen las condiciones de borde de acuerdo a los siguientes criterios:

- La presencia de muros implica velocidad normal nula.

- Las aberturas grandes, tienen predeterminadas las condiciones de superficie tanto para presión como para velocidad normal (dependiendo de la incógnita del problema).
- Las fisuras son consideradas expresando el flujo de aire en función de la diferencia de presión a través de la grieta. El efecto de ésta diferencia es considerada sólo en los balances de masa y entalpía, siendo despreciada en las ecuaciones de momentum.
- Las fuerzas de presión en la interface de dos subvolúmenes se incluyen en el balance de momentum (por ejemplo: ventiladores).

Si bien, el modelado por zona es notablemente más exacto que los métodos: empírico y por redes, la necesidad de resolver el mallado de manera breve implica el uso de programas computacionales especializados. En tal caso, se hace más conveniente utilizar el modelado CFD que se describe en el próximo apartado.

2.4 Modelos CFD (Computational Fluid Dynamics).

La dinámica de fluidos computacional se basa principalmente en encontrar la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S), conocidas como las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía que se resumen a continuación:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.5)$$

Ecuaciones de momentum:

$$\text{Componente } x: \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x \quad (2.6a)$$

$$\text{Componente } y: \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y \quad (2.6b)$$

$$\text{Componente } z: \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.6c)$$

Ecuación de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] = \rho \dot{q} - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \rho f \cdot V \quad (2.7)$$

Estas ecuaciones se resuelven en cada punto de una malla tridimensional (o bidimensional) que representa el local o edificio a analizar.

Las incógnitas de este modelo corresponden a las componentes de presión y velocidad, y dependen íntimamente de las condiciones de borde que se establezcan para el problema.

Para resolver las ecuaciones de conservación se utilizan herramientas matemáticas que consideran fenómenos de transporte y modelos de turbulencia. Estos últimos son especialmente importantes ya que constituyen el “cierre” que define y da forma definitiva al sistema de ecuaciones. Entre los modelos más sofisticados destaca el modelo $k - \varepsilon$ de turbulencia, que relaciona la energía cinética de turbulencia k con la tasa de disipación, ε , de dicha energía.

La mayor ventaja de los modelos CFD es que tienen el potencial para entregar patrones de flujo y distribuciones de temperatura detallada en todo el espacio estudiado. En principio, los cálculos incluyen los procesos físicos como transferencia de calor y comportamiento de tipo transiente, además, el modelo es capaz de lidiar con geometría compleja y objetos que influyen de manera importante en los patrones de flujo del aire.

Existen diversos programas para aplicar este método de predicción al diseño de una vivienda o edificio, sin embargo, gracias a la gestión del CITEC⁴ de la Universidad del Bío Bío, se dispone de la licencia de Design Builder, lo que nos permite usar todas sus herramientas para realizar los estudios pertinentes a este trabajo.

⁴ Centro de Investigación Tecnológica de la Construcción, Universidad del Bío Bío sede Concepción.

Capítulo 3: Software Design Builder

Para comprender el potencial de Design Builder, primero se debe conocer su naturaleza, esto es, describir sus recursos, modo de funcionamiento y lenguaje lógico.

Design Builder es un programa que, gracias a su interfaz gráfica, permite al usuario modelar edificios (o viviendas) de manera fácil; apuntando a realizar simulaciones térmicas dinámicas integrando en su entorno el motor de simulación EnergyPlus. Además, gracias a su módulo CFD, permite visualizar el comportamiento de la estrategia de ventilación de un edificio dado el entorno climático y topográfico de la estructura.

3.1 Entorno de Design Builder

A continuación se describe el entorno sobre el cual funciona Design Builder, se explica de manera general su funcionamiento lógico para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes

3.1.1 Motor de simulación energética EnergyPlus

EnergyPlus es el motor de simulación energética de edificios desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE, por sus siglas en inglés) para modelado y cálculo de calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y otros flujos energéticos. Más detalles en el [Anexo 2]

Si bien EnergyPlus no posee una interfaz gráfica amigable, Design Builder permite la simulación sin mayores complicaciones permitiendo, entre otras cosas, el ingreso de detalles constructivos, condiciones de contorno, actividades y rutina de uso del edificio (ocupación, apertura-cierre de puertas y ventanas, activación-apagado de sistemas HVAC e iluminación, etc); sombreado de ventanas, objetos exteriores y alerones en techos o muros e

incorporando bases de datos de materiales, cerramientos, vidrios, dispositivos de sombreado e iluminación.

Los resultados proporcionados por EnergyPlus, son obtenidos a partir de una combinación de métodos de predicción vistos en páginas anteriores, y éstos permiten visualizar diferentes aspectos energéticos del edificio: ventilación (cambios de aire por hora a nivel de zona o de edificio), ganancias térmicas solares, ganancias térmicas internas, comportamiento energético de acuerdo a ocupación y actividades, eficiencia de uso energético, iluminación y sombreado, cargas de calefacción y refrigeración, confort térmico, flujos de aire a través de puertas, ventanas, rejillas, agujeros e infiltración (ésta última calculada o determinada por el usuario). Además estos resultados pueden ser visualizados en una combinación de períodos de tiempo: Anual, mensual, diario, horario y sub horario.

3.1.2 Módulo CFD de Design Builder

El módulo CFD de Design Builder se ha diseñado pensando en una herramienta capaz predecir el flujo de aire y la distribución de temperaturas dentro y alrededor de los edificios.

Los paquetes de software CFD comúnmente requieren mucho tiempo y atención para definir de manera correcta la geometría y condiciones de contorno, sin embargo, Design Builder simplifica este proceso al proporcionar ambos aspectos de manera automática, al definir un número reducido de condiciones de borde. Es importante destacar también, que las temperaturas y flujos de calor y aire pre calculados por EnergyPlus pueden utilizarse de manera transparente para el análisis CFD.

El módulo CFD de Design Builder genera automáticamente las mallas 3D desde la geometría del modelo utilizando algoritmos internos que proporcionan soluciones de convergencia óptimas para posteriormente, por medio del

algoritmo SIMPLER, dar solución a las ecuaciones tridimensionales de conservación de masa, momentum y energía.

Cabe mencionar, que el módulo CFD de Design Builder tiene limitaciones en su funcionamiento:

- Los análisis CFD son separados en dos tipos:
 - ✓ Externos, donde se analiza el flujo de aire y comportamiento de éste de acuerdo a la geometría externa y entorno del edificio a partir de condiciones de viento determinadas por el usuario.
 - ✓ Internos, donde se analiza la dinámica de fluidos en el interior del edificio, con la posibilidad de visualizar los patrones de flujo en ventilas, puertas, ventanas agujeros o similares. [Anexo 2]
- Para el caso de estudios internos, el módulo CFD de Design Builder no permite incluir flujos derivados de infiltraciones. [Anexo 2]

3.1.2A Algoritmo SIMPLER

Para resolver las ecuaciones de conservación N-S se disponen de diversos métodos [15] entre los cuales destaca el método de iteración por Presión que consiste en calcular un campo de velocidades desde las ecuaciones de momentum a partir de un valor inicial de presión. Luego, utilizando ecuaciones para calcular residuales se corrige el valor inicial [15] y se repite el proceso nuevamente con el fin de obtener cierto grado definido de convergencia. SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) es, originalmente, el algoritmo desarrollado para efectuar estas iteraciones en arreglos donde las

variables tienen posiciones “compartidas” dentro de la celda⁵ y el régimen de flujo es, normalmente, de tipo estacionario. Debido al carácter anidado del arreglo de las variables, las soluciones basadas en este algoritmo tienden a presentar oscilaciones numéricas.

Finalmente, SIMPLER, corresponde a una versión corregida del algoritmo original; Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation – Revised.

3.1.3 Resultados en Design Builder.

La visualización de los resultados recolectados por Design Builder generados por la simulación realizada en EnergyPlus dependerá de:

- Carácter del estudio: Si se trata de obtener información respecto a cargas de calefacción y refrigeración, iluminación, comportamiento energético u otros.
- De las preferencias del usuario (Opciones del modelo y Preferencias): Donde, para los datos de entrada, el programa toma en cuenta las opciones establecidas en las preferencias, las cuales obedecen a si el usuario requiere un estudio a nivel de edificio o de zona, detalle de los resultados; donde generalmente en fases de diseño se requieren resultados de carácter global, entre otros. O, en el caso de datos de salida, la combinación de datos a visualizar (ver *Figura 15*), el nivel de detalle requerido en cuanto a los cálculos y resultados mostrados, donde por ejemplo se establece el número de “iteraciones” en menos de una hora de simulación (time steps). En general, la visualización de resultados obedece a una combinación de períodos de tiempo (dentro del periodo de simulación) e información requerida definida por el usuario.

⁵ Por ejemplo, en otros modelos, se establece que sólo la presión se define en el centro de la celda, mientras que las 3 componentes de la velocidad del fluido se encuentran desfasadas en una distancia equivalente a la mitad del ancho de la celda.

- Período de simulación: La simulación se realiza de acuerdo a un período por el usuario, definido por días y meses de comienzo y fin.

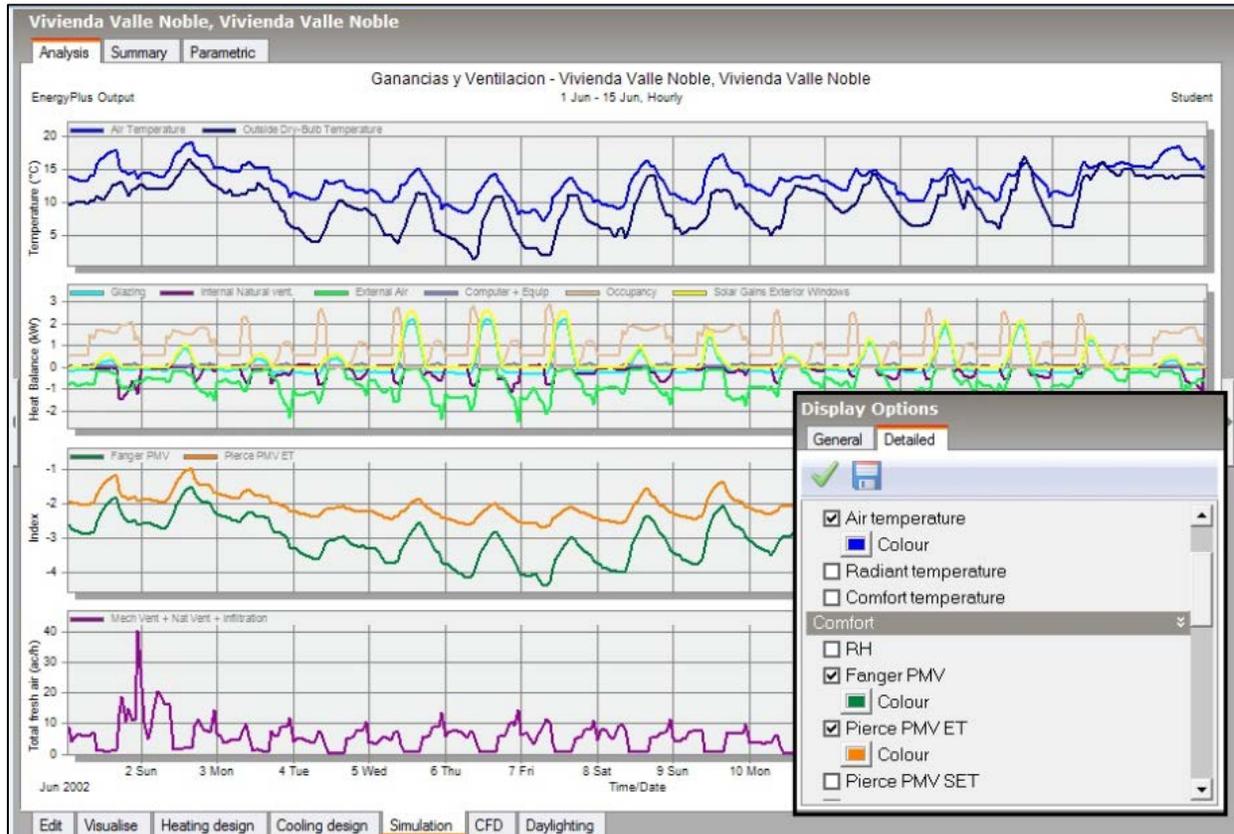


Figura 15 - Ejemplo de visualización de resultados de una simulación. Donde se muestra la temperatura ambiental del recinto, indicadores de confort, entre otros, como un resumen diario dentro del período de simulación.

Entre otras, son estas características del software Design Builder las que permitirán dar forma al método de verificación de calidad del aire que en las próximas páginas se formula a modo de propuesta.

Capítulo 4: Método de verificación de calidad del aire.

A continuación se formula la propuesta del método de verificación de calidad del aire, con el cual se evaluará un edificio desde el punto de vista de ventilación siempre bajo el marco de eficiencia energética y siempre también teniendo en cuenta el sistema de construcción prestacional al cual apunta el proyecto macro del cual éste estudio emerge.

4.1 Enfoque del método a proponer.

Al comienzo de este documento, se establece de manera clara el contexto general bajo el cual se desarrolla este estudio. En síntesis, el método propuesto intenta abarcar de la mejor manera las necesidades de desarrollo del sistema constructivo chileno, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Eficiencia energética.
- Sistema de construcción de edificios basado en criterios prestacionales.
- Aplicabilidad (la diferencia inherente entre uno y otro proyecto de construcción no debe provocar que el método no sea aplicable).
- Retroalimentación (las evaluaciones del método propuesto, deben permitir mejorar los proyectos posteriores en base experiencias adquiridas pasadas).
- Potencial de ventilación natural del inmueble. (Capítulo 5)

4.2 Inmueble estudiado.

En este estudio se ha establecido, indirectamente, el hecho de que un edificio es diferente a una vivienda. Para efectos de este trabajo, se entiende por vivienda, cualquier estructura, inmueble o edificación que se diseñe y/o construya con propósitos residenciales domésticos. Por otro lado, se entiende

por edificio, cualquier estructura diseñada y/o construida con propósitos no residenciales domésticos, esto es, talleres, hospitales, retenes, oficinas, universidades, etc.

Se dispone de información detallada de una vivienda ubicada en Valle Noble, a 10 minutos de la Universidad del Bío Bío, Concepción.

La vivienda es parte de un proyecto habitacional en desarrollo, denominada por la empresa diseñadora como vivienda C60. Los datos fueron proporcionados al CITEC con propósitos experimentales y corresponden a los planos generales, planos de detalles y especificaciones técnicas de la vivienda. Algunos planos disponibles en [Anexo 1]



Figura 16. Ubicación vivienda estudiada. (a) Plano detalle ubicación (b) Vista Google maps.

La vivienda, de un piso y medio, consta de 2 baños, 3 dormitorios, cocina, sala estar-comedor principalmente y habilitada para el diario vivir de 6 personas (según planos). Los materiales de construcción se constituyen de una combinación de muros de ferrocemento⁶ y Polietileno Expandido para la planta baja y paneles prefabricados de polietileno expandido para la planta alta. Techo

⁶ Paneles prefabricados de hormigón. Cementos Bío Bío.

prefabricado, puertas y ventanas según la especificación técnica, por otro lado, no se especifica mayormente ventilación natural, ni ventilación mecánica, ni sistema de calefacción.

De acuerdo a lo anterior, el modelado de la vivienda en Design Builder toma la forma que se muestra en la *Figura 17*, *Figura 18* y *Tabla 10*.

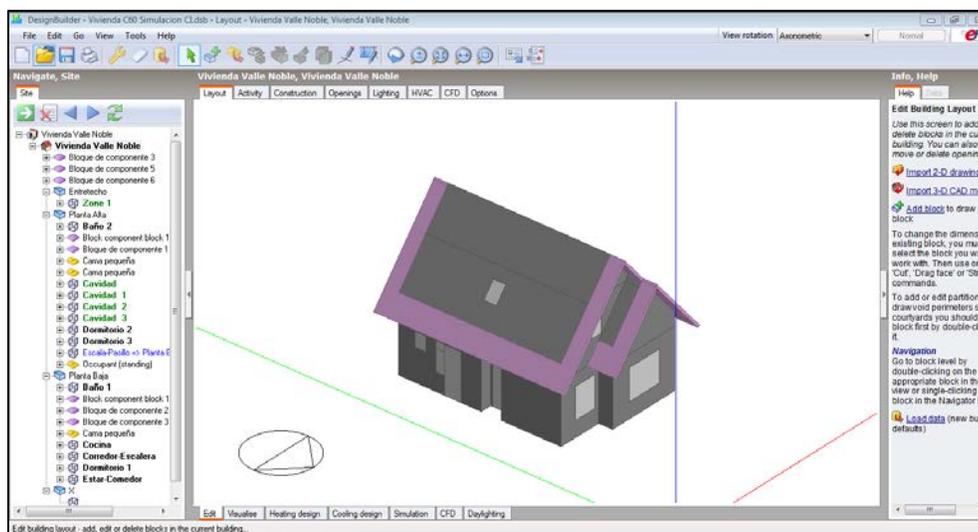


Figura 17. Vista previa modelado de vivienda C60 Valle noble. Vértice superior del triángulo indica Norte.

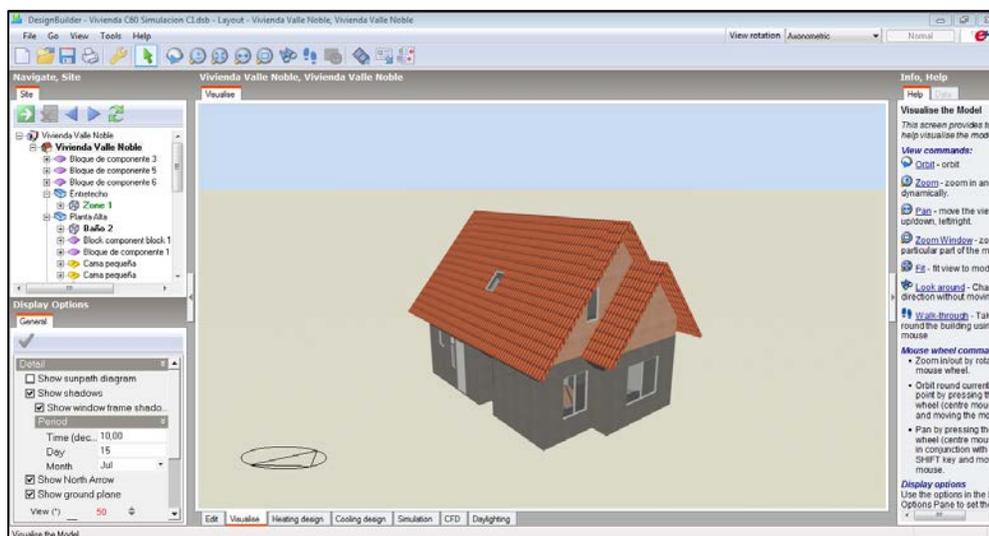


Figura 18. Vista renderizada vivienda C60 Valle Noble.

Tabla 10. Resumen vivienda Valle Noble.

Building Area	Area [m2]	Skylight-Roof		Total	
Total Building Area	84,26	Gross Roof Area [m2]		58,9	
Net Conditioned Building Area	0	Skylight Area [m2]		1,19	
Unconditioned Building Area	84,26	Skylight-Roof Ratio [%]		2,02	
ENVELOPE					
	Total	North (315° - 45°)	East (45° - 135°)	South (135° - 225°)	West (225° - 315°)
Gross Wall Area [m2]	97,32	24,67	23,99	24,67	23,99
Window Opening Area [m2]	9,11	4,07	0,65	4,39	0
Window-Wall Ratio [%]	9,36%	16,50%	2,71%	17,8%	0%
ZONE SUMMARY					
Planta Baja	Area [m2]	Volume [m3]	Gross Wall Area [m2]	Window Glass Area [m2]	People [m2 per person]
Baño 1	2,44	6,19	8,13	0,21	2,44
Dormitorio 1	8,69	22,06	14,48	2,85	4,17
Cocina	4,21	10,68	6,83	0,27	2,13
Corredor-Escalera	9,77	26,83	7,76	0	2
Estar-Comedor	13,47	34,22	28,98	3,1	2,22
Planta Alta					
Entretecho	16,25	11,14	3,15		
Cavidad 1	0,57	0,46	2,08		
Dormitorio 3	13,17	25,39	11,78	1,01	6,25
Cavidad 2	0,5	0,41	1,8		
Dormitorio 2	9,49	19,18	9,12	1,07	4,55
Baño 2	4,15	8,75	0	0,32	2,44
Cavidad 3	0,89	0,84	1,39		
Cavidad	0,47	0,37	1,81		
Total	84,26	166,53	97,32	8,83	3,84

4.3 Consideraciones previas.

Antes de realizar la simulación se deben establecer criterios y consideraciones que permitan obtener resultados sensatos y que estén en línea tanto con el enfoque anteriormente descrito, como con los objetivos del estudio. Estas consideraciones se refieren, entre otras cosas, a aspectos operacionales y ocupacionales en la rutina del edificio.

4.3.1 Puertas y Ventanas.

Como se mencionó anteriormente, la "Guía Técnica de Calidad del Aire Interior", define, entre otras cosas, la permeabilidad al aire de las ventanas según la zona climática a las que pertenezcan, tal y como muestra la *Tabla 11*.

No se tienen valores específicamente definidos para las puertas, sin embargo, se asume el valor de la clase mínima para la zona correspondiente.

Tabla 11. Permeabilidad al aire de ventanas.

CLASE	Caudal máximo de aire a 100 Pa por superficie de hoja. ($m^3/(h \cdot m)$)	Caudal máximo de aire a 100 Pa por longitud de junta. ($m^3/(h \cdot m)$)
60A	60	12
30A	30	6
10A	10	2
7A	7	1,4
Zona climática		Clase Aceptable
Norte Litoral, NL		Todas
Norte Desértica, ND Norte Valle Transversal, NVT Central Litoral, CL		7A, 10A, 30A
Central Interior, CI Sur Litoral, SL Sur Interior, SI		7A, 10A
Sur Extremo, SE Andina, An		7A

Fuente: Términos de referencia estandarizados, “Guía Técnica Calidad del Aire”. 2012.

Para la vivienda en estudio, las ventanas y su clasificación se muestran en la *Tabla 12*.

Tabla 12 . Clasificación ventanas de vivienda C60.

Ventana	Tipo	Ubicación	Clase permeabilidad al aire
Indalum Xelentia 69 marco monorriel-cámara de agua	Corredera	Dormitorio 1, Sala estar y Comedor	30A
Velux C02 55x78	Proyectante	Baño 2 (Techo)	30A
Velux M04 78x98	Proyectante	Dormitorio 3 (Techo)	30A
Indalum Al20	Corredera	Dormitorio 1	30A
Indalum Al42	Proyectante o Abatir	Dormitorio 3, Cocina, Baño 1	7A

Otro aspecto es la abertura y operación de las ventanas dentro de la simulación. En Design Builder, la abertura de las ventanas se establece como un porcentaje del total de la superficie de las ventanas, mientras que la operación se establece con rutinas o programaciones definidas en base a plantillas por defecto o plantillas definidas por el usuario, así, para efectos de este estudio se considera lo siguiente:

- Ventanas correderas: 50% Abertura.
- Ventanas abatientes: 90% Abertura.
- Ventanas proyectantes: 40% Abertura.
- Operación Ventanas: Siempre abierta al máximo de su capacidad.
- Puertas: 50% aberturas, 5% del tiempo abierto⁷.

⁷ Design Builder define un porcentaje de tiempo de apertura de puerta, ya que éstas, de acuerdo a la ocupación, no siempre se encuentran abiertas o cerradas.

- Operación puertas: Sujeto a programación correspondiente a la zona.

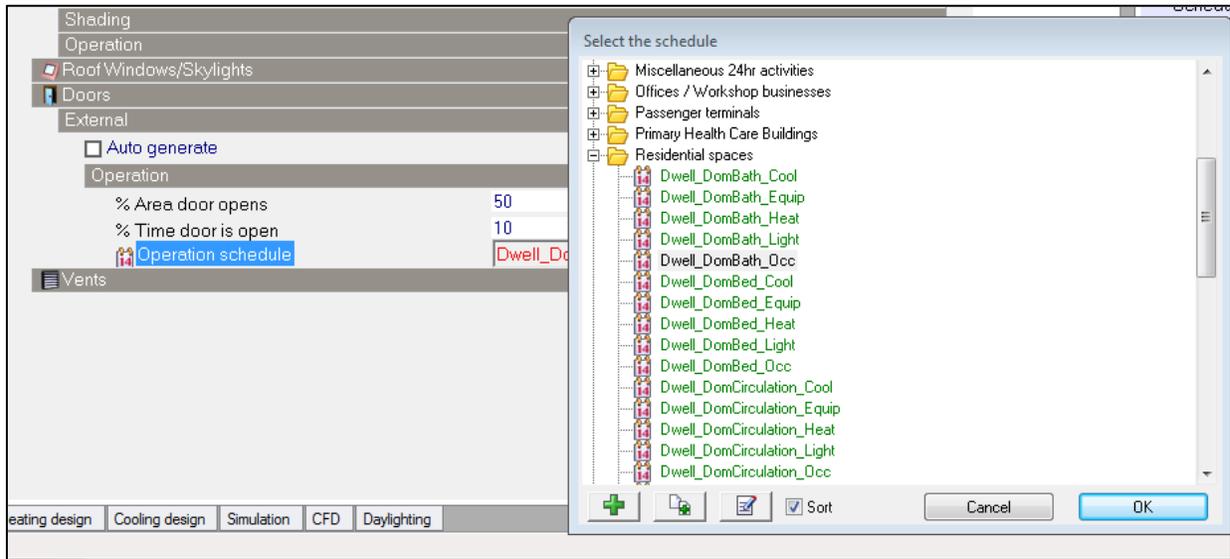


Figura 19. Valores y programación definida para el caso de la puerta del baño 2.

4.3.2 Infiltraciones.

Design Builder permite trabajar de dos maneras la permeabilidad de las partes y componentes de la estructura modelada. La primera es en base a plantillas definidas por el mismo programa (por defecto) que consisten en valores acordes con prácticas de permeabilidad (Excelente, Muy Buena, Media, Mala o Pobre), la segunda es en base a plantillas en las cuales el usuario define los valores de infiltración para los diferente componentes.

En ambos casos, las unidades en las que se definen los valores son las mismas, tal y como se muestra en la *Figura 20* y *Figura 21*.

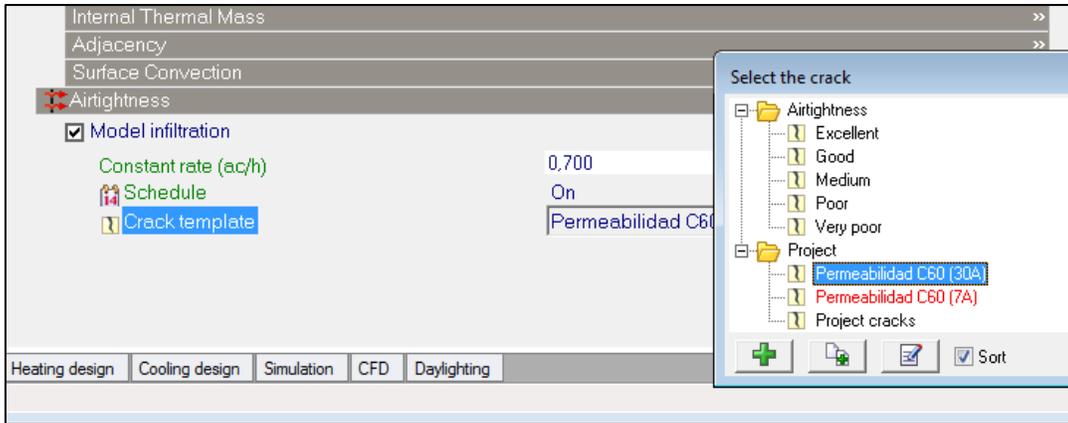


Figura 20. Ventana de diálogo donde se define la plantilla de infiltración.

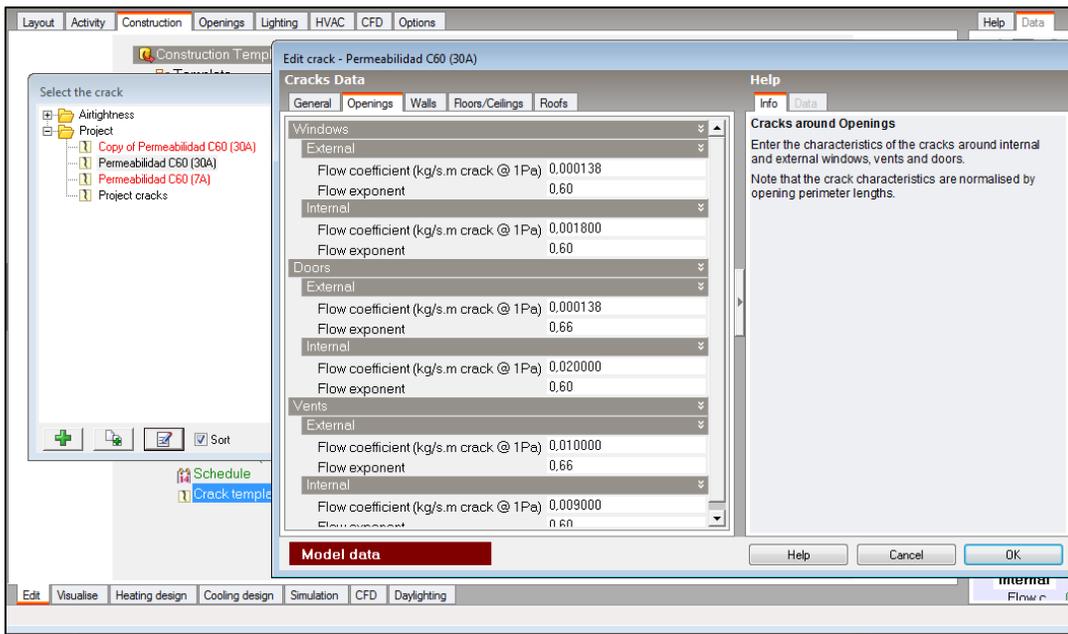


Figura 21. Ventana de diálogo donde se definen los valores de infiltración para la plantilla seleccionada.

Se observa que las unidades de infiltración corresponden al flujo de aire medido en kg/s a una diferencia de presión de 1 Pa mientras que los valores en la *Tabla 11* son indicados en m^3/h a una diferencia de presión de 100 Pa (ambos por longitud de junta, en metros).

Para abordar esta situación se recurre a la siguiente ecuación⁸:

$$Q = Q_{100} \cdot \left(\frac{P}{100}\right)^{2/3} \quad (4.1)$$

Donde:

Q_{100} Representa el caudal de aire a una diferencia de presión de 100 Pa.

Q Representa el caudal de aire a una diferencia de presión P .

Por otro lado, teniendo en cuenta la *Tabla 11* y asumiendo el valor de permeabilidad como el promedio entre el máximo de la clase y el máximo de la clase anterior, y además la densidad del aire con un valor de $1,2 \text{ kg/m}^3$ se tiene:

- Clase 30 A:

Valor asumido:

CLASE	Caudal máximo de aire a 100 Pa por longitud de junta. ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$)
60A	12
30A	6
Valor promedio	9

$$Q_1^{30A} = 9 \cdot \left(\frac{1}{100}\right)^{2/3} = 0,417 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}} \times 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0,000138 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

⁸ Norma UNE-EN 12207:1999

- Clase 7A:

Valor asumido:

CLASE	Caudal máximo de aire a 100 Pa por longitud de junta. ($m^3 / (h \cdot m)$)
10A	2
7A	1,4
Valor promedio	1,7

Análogamente: $Q_1^{7A} = 0,0000219 \frac{kg}{s \cdot m}$

Para los demás componentes se asumirán los valores de plantilla por defecto correspondiente a la plantilla de práctica "Pobre". Así los resultados llevados al modelo en DB se muestran en la *Figura 22*.

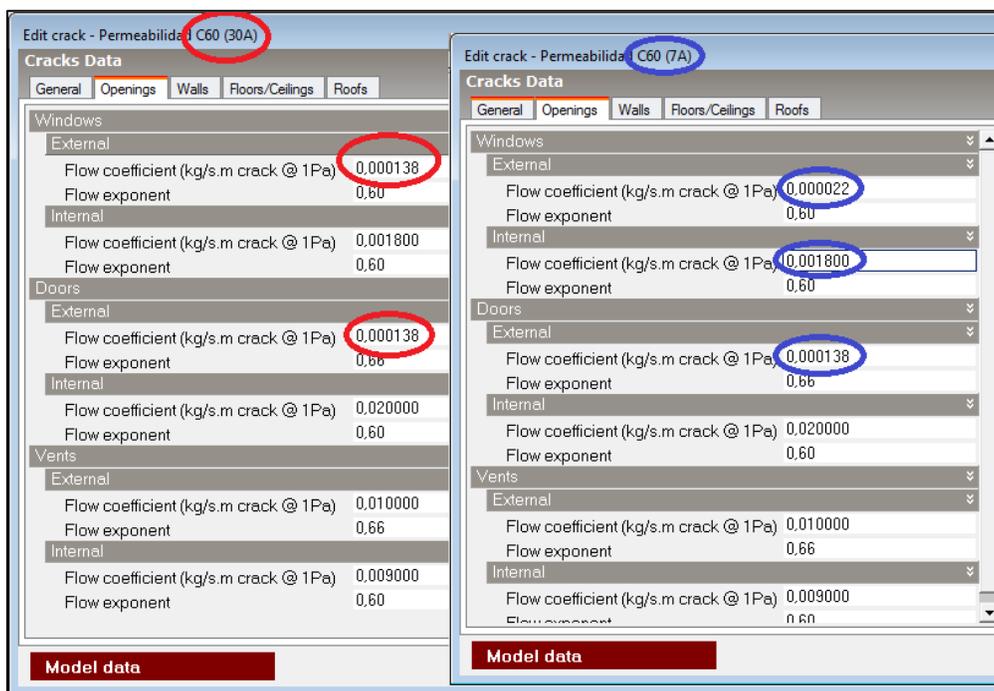


Figura 22. Datos de permeabilidad al aire ventanas y puertas exteriores en Design Builder.

4.3.3 Datos meteorológicos

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta son los datos meteorológicos y el clima de la zona de emplazamiento de la vivienda o estructura. Design Builder posee una base de datos de clima para diferentes localidades, para el caso en estudio, el programa dispone de datos climáticos del aeropuerto Carriel Sur en Concepción, correspondientes al año 2002. Si bien, esto parece algo limitado para determinar el comportamiento energético de la vivienda, el uso del programa se centra en obtener datos de comportamiento interno, dada una condición externa.

Por otro lado, se disponen de Anuarios Climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile, donde entre otras cosas, se ordenan estadísticamente la frecuencia de dirección y velocidad media de viento mensual tal y como se muestra en la *Figura 23*.

ESTACION: CONCEPCION CARRIEL SUR													Año: 2010					
MES	FRECUENCIA Y VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO (nudos)													DATOS				
	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW		CALMA	Válidos
	Nº	V	Nº	V	Nº	V	Nº	V	Nº	V	Nº	V	Nº	V	Nº	Nº	Nº	
ENERO	7	9	-	-	-	-	3	2	13	4	66	13	2	5	1	3	1	-
FEBRERO	18	11	4	4	-	-	3	2	11	5	34	11	3	7	1	7	5	5
MARZO	21	6	3	5	3	2	6	3	13	5	36	8	8	6	1	2	1	1
ABRIL	14	6	2	5	1	1	7	3	19	5	34	9	2	5	1	5	10	-
MAYO	10	6	2	4	3	2	17	4	35	4	18	6	3	5	1	2	4	-
JUNIO	36	12	1	6	6	4	13	4	13	5	7	6	6	8	5	9	3	-
JULIO	28	13	4	6	1	2	19	7	10	5	13	7	7	6	2	12	9	-
AGOSTO	24	13	3	9	4	3	12	7	21	5	17	6	3	6	6	9	2	1
SEPTIEMBRE	12	9	6	6	-	-	9	3	14	5	37	9	2	4	4	5	6	-
OCTUBRE	17	9	3	2	1	2	5	3	9	5	36	10	13	6	3	4	6	-
NOVIEMBRE	11	9	-	-	-	-	4	4	14	6	58	12	-	-	1	5	1	1
DICIEMBRE	16	8	3	3	1	2	1	2	13	6	42	11	9	6	4	11	3	1
ANUAL	214	10	31	5	20	3	99	4	185	5	398	10	58	6	30	7	51	9

Figura 23. Extracto Anuario climatológico 2010 de la Dirección Meteorológica de Chile. Estación Carriel sur, Concepción.

Para el caso en estudio, se recopiló información de los últimos 3 Anuarios disponibles, esto es, 2008 – 2009 y 2010. En base a ellos se elaboraron rosas de vientos anuales y mensuales disponibles en el [Anexo 3]. Dichos datos, mostrados en la *Tabla 13* muestran que el Sur-Oeste (SW), Norte (N) y Sur (S) son las direcciones predominantes durante el año abarcando el 72% del tiempo. Por lo que nos centraremos en el comportamiento de la vivienda en dichas direcciones de viento, tomando como convención las direcciones mostradas en la Figura 24.

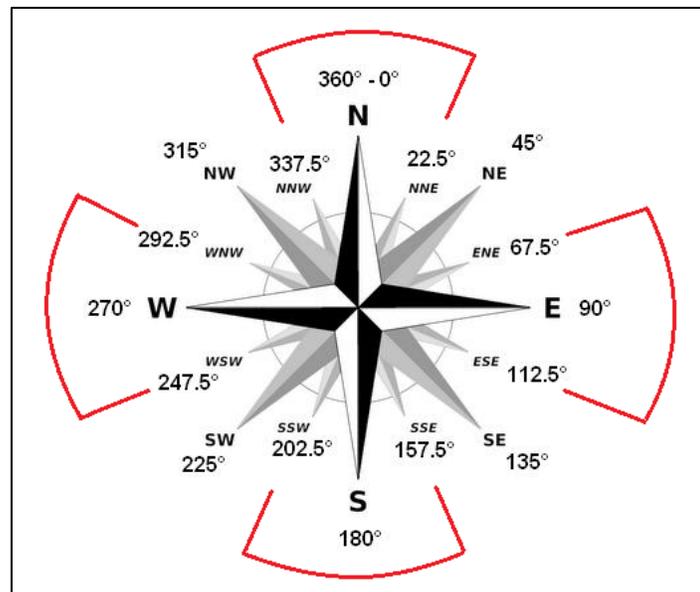


Figura 24. Convención rosa de los vientos. Ejemplo: todos los vientos soplando desde una dirección entre 67,5° y 112,5° son considerados vientos Este (E).

Tabla 13. Frecuencias de dirección de viento años 2008, 2009 y 2010. Estación Carriel Sur, Concepción.

Mes	Frecuencia relativa viento.								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calma
	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	
Enero	10%	2%	0%	1%	8%	69%	6%	2%	0,4%
Febrero	25%	4%	1%	2%	8%	45%	6%	5%	3,6%
Marzo	23%	5%	1%	5%	8%	45%	6%	1%	5,4%
Abril	16%	9%	3%	7%	13%	38%	1%	2%	11,9%
Mayo	24%	5%	7%	13%	21%	19%	1%	1%	9,3%
Junio	31%	3%	4%	20%	20%	9%	3%	3%	6,7%
Julio	32%	8%	2%	19%	13%	14%	4%	3%	6,8%
Agosto	33%	6%	4%	9%	14%	18%	4%	8%	3,2%
Septiembre	14%	4%	0%	7%	17%	41%	6%	6%	5,6%
Octubre	15%	1%	0%	5%	6%	52%	11%	5%	3,6%
Noviembre	12%	3%	0%	5%	7%	59%	9%	2%	3,0%
Diciembre	14%	1%	0%	1%	6%	59%	11%	4%	3,6%
AÑO 08-09-10	21%	4%	2%	8%	12%	39%	6%	4%	5,3%

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de la Dirección Meteorológica de Chile.

Por otro lado, de la *Tabla 14* podemos observar que el mes Julio 2002 es el que más se aproxima al resumen de los años 2008 a 2010. La importancia de esto radica en que la simulación debe entregar una cierta cantidad de datos que coincidan con la situación de interés, además, se deben evitar los períodos largos de simulación para evitar sobrecargar el modelo en el software, y así disminuir el tiempo de simulación (el tiempo que demora el programa en calcular y entregar los resultados).

Tabla 14. Frecuencia de dirección de viento año 2002. Estación Carriel Sur, Concepción.

Mes	Frecuencia de dirección del viento								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calma
	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	
Enero	16%	3%	0%	0%	10%	52%	10%	3%	6%
Febrero	24%	2%	0%	1%	12%	49%	7%	2%	1%
Marzo	15%	1%	4%	5%	11%	37%	5%	4%	17%
Abril	19%	3%	3%	7%	10%	28%	4%	0%	26%
Mayo	27%	6%	4%	10%	19%	13%	3%	2%	15%
Junio	16%	8%	6%	13%	29%	11%	2%	7%	9%
Julio	17%	5%	8%	14%	20%	18%	6%	4%	6%
Agosto	31%	5%	2%	5%	14%	23%	3%	5%	11%
Septiembre	18%	6%	1%	11%	9%	36%	3%	11%	6%
Octubre	39%	2%	0%	2%	12%	30%	6%	5%	3%
Noviembre	21%	1%	0%	0%	11%	54%	4%	8%	0%
Diciembre	10%	0%	0%	2%	8%	59%	11%	5%	5%
AÑO 2002	21%	4%	2%	6%	14%	34%	6%	5%	9%

Fuente: Elaboración propia en base a anuarios de la Dirección Meteorológica de Chile.

En consecuencia, el período de simulación en Design Builder, para la vivienda en estudio, abarcará desde el 1 de Julio hasta el 31 de Julio.

4.4 Simulación Infiltraciones.

Como hemos visto anteriormente, un aspecto clave del edificio es la hermeticidad al aire que éste posee. Zhivov [17] determinó que aumentar la hermeticidad de la envolvente del edificio se traduce en un 5 a 45% de ahorro de energía (ver *Figura 25*), dependiendo de la zona climática entre otros factores.

Es por ello que el método debe considerar, de algún modo, la simulación de infiltraciones. Sin embargo, se debe tomar en cuenta la limitación mencionada en capítulos anteriores respecto a las limitaciones del módulo CFD de Design Builder y los datos de infiltración.

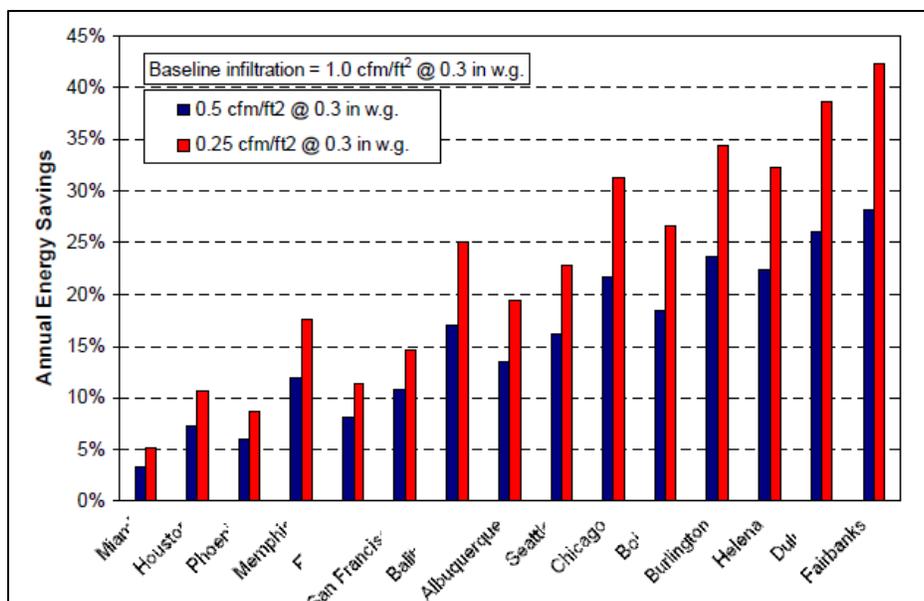


Figura 25. Ahorros anuales de energía para edificios similares en diferentes zonas climáticas de USA.

Para esto tendremos en cuenta diferentes valores de hermeticidad al aire de viviendas indicadas en la *Tabla 15*, la cual recopila cifras estándares en diferentes países, que ocuparemos como valores de referencia para efectos de comparación. Además, para estimar el nivel de infiltración a presiones “naturales” a partir de niveles de infiltración a 50 Pa, se tiene la siguiente ecuación [19]:

$$ACH_{Normal} \approx \frac{ACH_{50Pa}}{20} \tag{4.2}$$

Donde:

ACH_{Normal} Nivel de infiltración a presiones normales (ACH⁹).

ACH_{50Pa} Nivel de infiltración a una diferencia de presión de 50 Pa (ACH).

⁹ ACH. Air Changes per Hour, Cambios de aire por hora.

Tabla 15. Valores de referencia de hermeticidad de viviendas (Vol/h =ACH).

País	Clasificación	Estándar normalizado a 50 Pa (Vol/h)
Alemania	Viviendas con Ventilación Natural	3,0
	Viviendas con Ventilación Mecánica	1,5
Austria	Viviendas con Ventilación Natural	3,0
	Viviendas con Ventilación Mecánica	1,5
Bélgica	Valor por defecto para el cálculo de demanda	10,0
Bulgaria	Viviendas Unifamiliares de Alta Estanqueidad	2,0
	Viviendas Unifamiliares de Media Estanqueidad	Entre 2,0 y 5,0
	Viviendas Unifamiliares de Baja Estanqueidad	Mayor a 5,0
	Edificios de Alta Estanqueidad	4,0
	Edificios de Media Estanqueidad	Entre 4,0 y 10,0
Eslovenia	Viviendas con Ventilación Natural	3,0
	Viviendas con Ventilación Mecánica	2,0
Estonia	Viviendas Pequeñas	5,0
	Viviendas de Gran Tamaño	2,5
Francia	Viviendas Unifamiliares	3,5
	Otros tipos de Viviendas	5,3
Letonia	Viviendas en General	2,5
Lituania	Viviendas con Ventilación Natural	3,0
	Viviendas con Ventilación Mecánica	1,5
Noruega	Viviendas en General	3,0
Portugal	Viviendas en General	0,6
Reino Unido	Viviendas en General	10,0

Fuente: Revista de la Construcción, Vol. 11-1 2012.

Luego, para la verificación de infiltración se simula la vivienda con las plantillas correspondientes mostradas en el apartado 4.3.2. Sin embargo, para este paso, se consideran todas las puertas y ventanas exteriores cerradas durante todo el periodo de simulación, así, se asegura que la ventilación a nivel de edificio, se debe únicamente al aire infiltrado en la envolvente del mismo, la *Figura 26* muestra los resultados obtenidos de la simulación de la vivienda (a nivel de edificio).

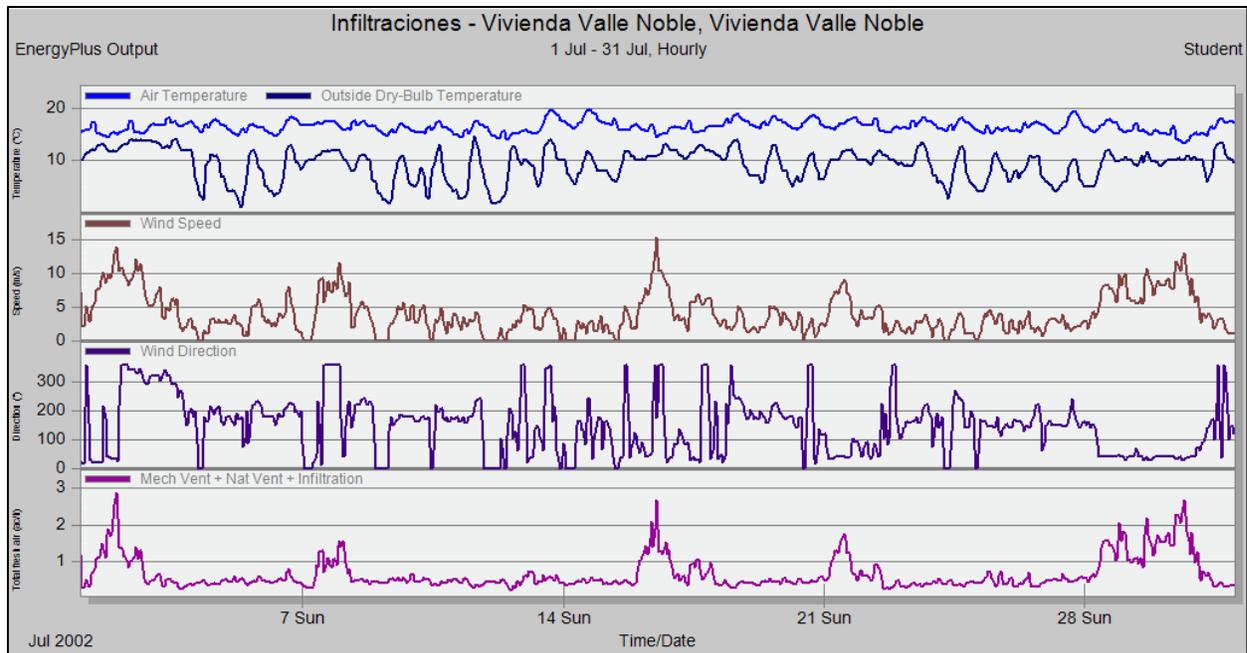


Figura 26. Resultados de simulación para verificación de infiltración vivienda estudiada. Visualización a nivel de edificio.

De la *Figura 26* se observa que la infiltración más alta es aproximadamente 3 ACH, el cual ocurre cuando la velocidad de viento alcanza los 13,9 m/s con dirección 30° (NE), con una diferencia de temperaturas entre el interior del edificio y el ambiente exterior de 3,18 °C. Sin embargo, esa situación es aislada ya que la velocidad de viento está lejos del promedio anual de velocidad de viento (3,4 m/s años 2008 a 2010) y la probabilidad de dirección NE es menor a 10%.

Procesando los resultados en planilla electrónica se obtienen los gráficos mostrados a continuación:

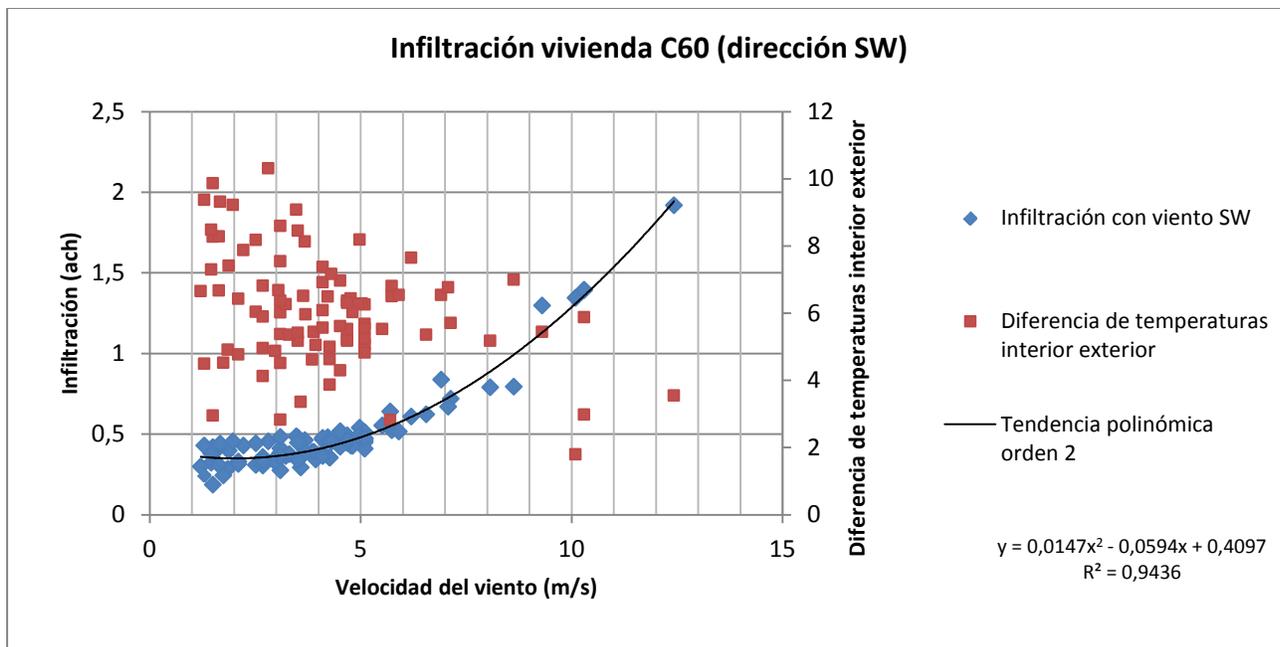


Gráfico 1. Infiltración vivienda C60 con dirección de viento Sur-Oeste (SW) .

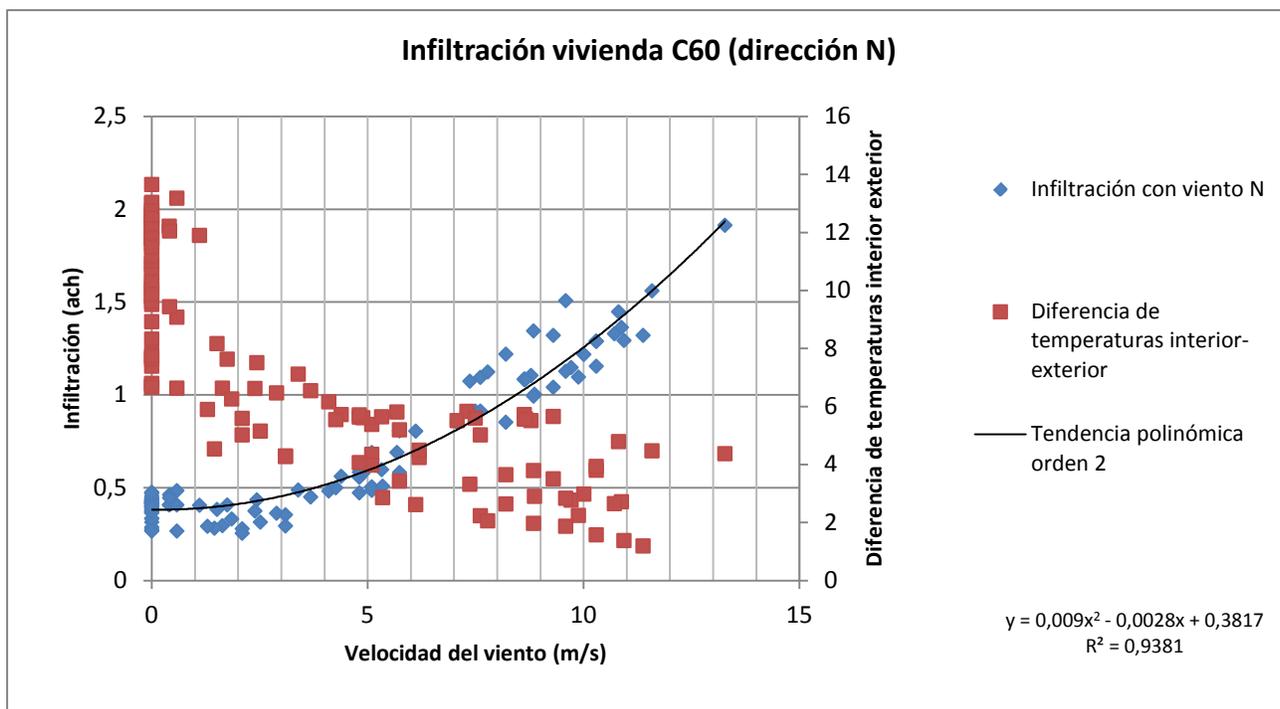


Gráfico 2. Infiltración vivienda C60 con dirección de viento Norte (N).

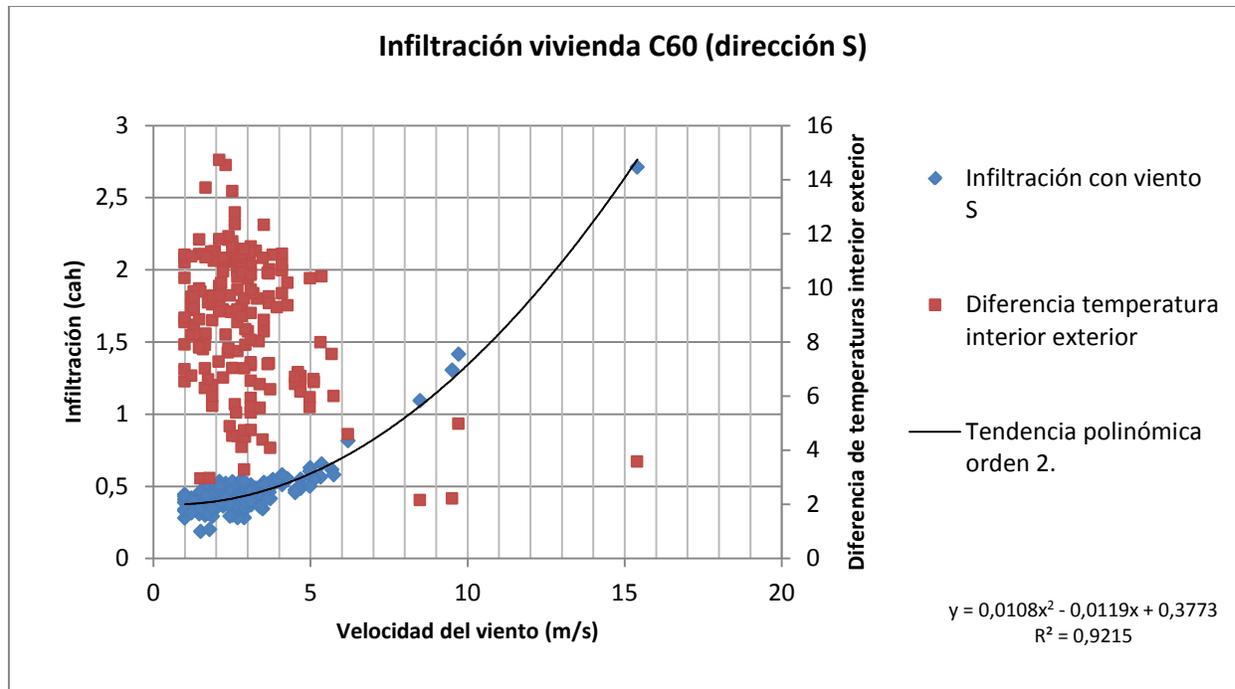


Gráfico 3. Infiltración vivienda C60 con dirección de viento Norte (S).

Los gráficos anteriores muestran los diferentes niveles de infiltración que se tienen dada cierta condición exterior (para los valores de hermeticidad establecidos en el apartado 4.3.2). Se observa que para velocidades bajas de viento (≤ 3 m/s) el ingreso de aire exterior al edificio es influenciado principalmente por la diferencia de temperatura entre el interior de la vivienda y el ambiente exterior, mientras que para velocidades más altas, la diferencia de temperaturas pierde importancia.

Por otro lado, de los datos meteorológicos estudiados se tiene la velocidad promedio para cada dirección de viento, lo que permite estimar el nivel de infiltración bajo presión "natural" tal y como muestra la *Tabla 16*, donde los valores de infiltración se obtienen reemplazando la velocidad de viento promedio en la curva de tendencia correspondiente a cada dirección. Además, los valores de la tercera fila se obtienen usando la ecuación (4.2). Comparando estos valores con los de la *Tabla 15* se observa que la vivienda estudiada estaría en un nivel medio-bajo para los requerimientos europeos, sin

embargo, juzgar el inmueble bajo estos estándares resulta inapropiado por diferentes razones: las soluciones constructivas, el clima, y las preferencias de las personas en cada país es diferente; la plantilla de hermeticidad establecida asume valores que pueden subestimar la calidad de la vivienda, por lo que, para efectos de este estudio, se considera lo siguiente:

Las infiltraciones de aire en la envolvente de la vivienda, no alteran significativamente el sentido de circulación del aire entre los locales del inmueble, ya que, el caudal de aire infiltrado obedece a las mismas variables que el caudal de aire buscado por estrategias de ventilación natural. Además, los estándares de los inmuebles con estrategias de ventilación por sistemas mecánicos tienden a ser más rigurosos, por lo tanto, la cantidad de aire infiltrado tiende aún menor.

Así, se establece el siguiente criterio, con el fin de llevar a cabo un análisis CFD.

Criterio N° 1:

El aire infiltrado no afecta significativamente la distribución de velocidad y temperatura en el ambiente del edificio. Por lo tanto, los resultados obtenidos de un análisis CFD a cualquier nivel dentro del edificio serán considerados válidos.

Tabla 16. Infiltración para las direcciones predominantes de viento, en (ACH).

Dirección de Viento	SW	N	S
Velocidad promedio (m/s)	4,08	4,08	2,55
Infiltración estimada (ACH)	0,412	0,52	0,417
Infiltración estimada (ACH_{50Pa})	8,24	10,4	8,34

4.5 Desempeño ventilación vivienda C60.

Para evaluar el desempeño de la vivienda, se analiza el potencial de ventilación natural de la misma, esto significa, evaluar qué capacidad tiene el inmueble para aprovechar las condiciones exteriores en beneficio de las renovaciones de aire interior.

Para esto se tienen, como referencia, los requerimientos mínimos de ventilación domiciliaria mostrados en la *Tabla 17* que se utilizan en este estudio para efectos de comparación.

Tabla 17. Valores de referencia para caudales mínimos de ventilación.

Local o Zona	Por ocupante	Por m ² útil	En función de otros parámetros
	l/s (m ³ /h)		
Dormitorios	5 (18)		
Salas de estar y comedores	3 (10,8)		
Aseos y cuartos de baño			15 (54) por local
Cocinas		2 (7,2)	50 (180) por local
Trasteros y sus zonas comunes		0,7 (2,52)	
Aparcamientos y garajes			120 (432) por plaza
Almacenes de residuos		10 (36)	

Fuente: Documento básico Salubridad DB:HS, Código Técnico de Edificación (CTE), España.

Además en la Guía Técnica de Calidad del Aire interior se define la siguiente condición de diseño:

- i. *"El aire debe circular desde los recintos secos o limpios a los húmedos o sucios. Recintos húmedos o sucios se entienden por baños, cocinas, talleres, laboratorios u otros donde existan emisiones contaminantes importantes adicionales a las típicas humanas."*

Esta condición establece implícitamente la existencia de “zonas de admisión” y “zonas de extracción” correspondientes a las zonas secas y zonas húmedas respectivamente. La importancia de lo anterior, radica en que los resultados de ventilación entregados por Design Builder, corresponden al aire exterior que ingresa al recinto, mientras que el aire que se traslada entre los recintos (ventilación o infiltración interna) se visualiza como ganancias o pérdidas de calor en kW.

De la simulación de la vivienda se obtienen los resultados “en bruto” como muestra la *Figura 27*. Estos resultados se exportaron, a nivel de zona (cocina, dormitorio 1, dormitorio 2, etc), para su análisis en planilla electrónica. Posteriormente, para cada zona, se filtraron y ordenaron los datos de acuerdo a las direcciones de viento de interés (SW, N, S), resultando un total de 24 gráficos (3 direcciones para cada zona “funcional”).

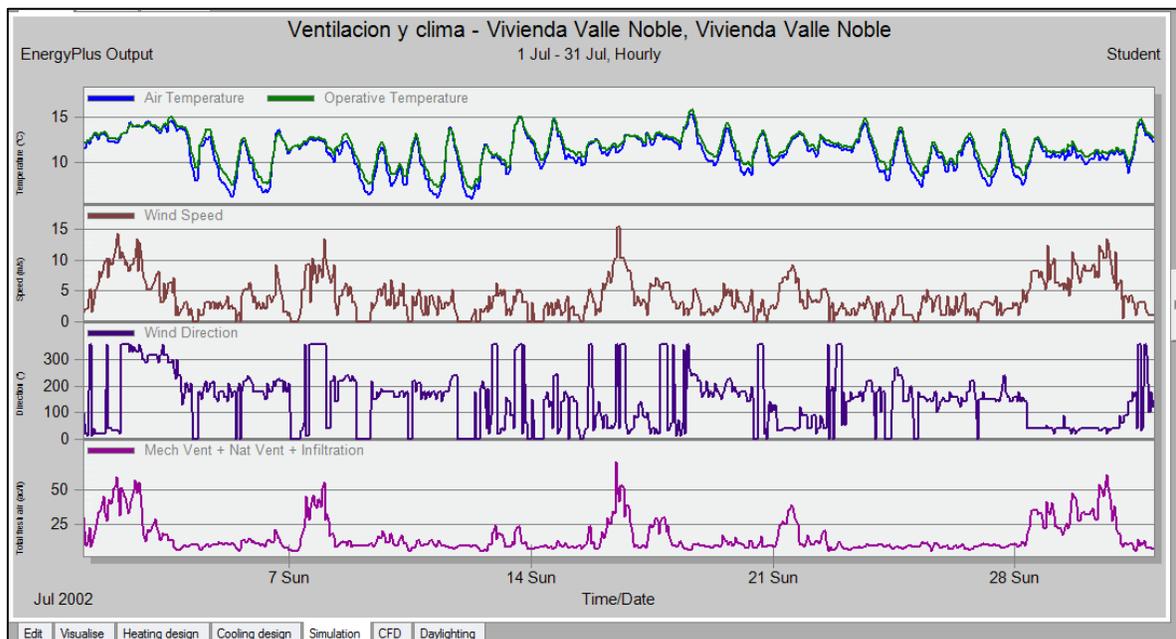


Figura 27. Resultados de simulación vivienda C60 Valle Noble. Modo gráfico.

Los gráficos mostrados en las próximas páginas no corresponden a la totalidad de ellos, sin embargo, se dan a conocer los gráficos de casos particulares y situaciones complejas para su correspondiente análisis.

4.5.1 Análisis gráficos de zona.

La *Figura 28*, a modo de ejemplo, muestra el comportamiento global de la ventilación del edificio con viento Sur-Oeste (SW). Donde se observa que la ventilación del edificio aumenta con la velocidad del viento a una tendencia cuadrática con una correlación de 93%.

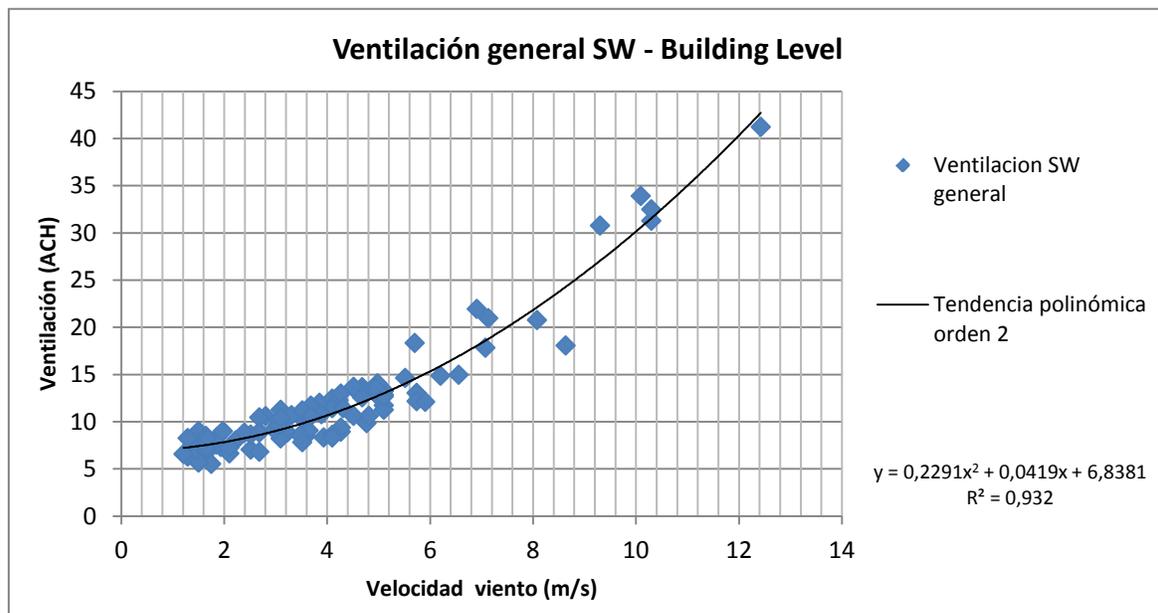


Figura 28. Gráfico ventilación general con viento en dirección Sur-Oeste (SW) a nivel de edificio.

El mismo comportamiento se obtiene en la mayoría de las zonas, sin embargo existen casos donde el gráfico toma la forma mostrada en la *Figura 29* y *Figura 30* donde se observa que la ventilación disminuye cuando la velocidad del viento aumenta, esta situación se explica utilizando la *Figura 31*, la cual muestra que para viento proveniente del norte, la cocina y el dormitorio 1, entre otros, tienden a situarse a sotavento lo que induce una baja de presión

en sus proximidades exteriores, provocando que se comporten como si fueran “zonas de extracción” (situación que se puede verificar usando análisis CFD). En principio, se podría pensar que la ventilación es insuficiente para estos recintos, sin embargo para el caso de cocinas y baños esta situación es favorable tomando en cuenta la condición de operación mencionada en páginas anteriores respecto del sentido de circulación de aire entre los recintos.

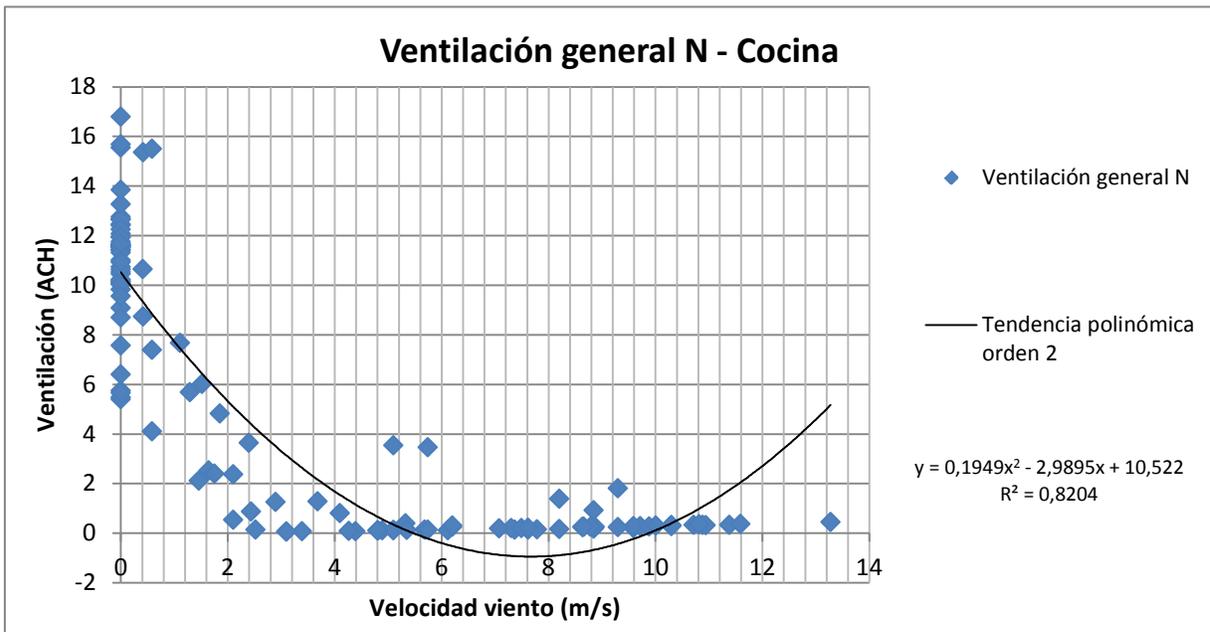


Figura 29. Gráfico ventilación general con viento en dirección Norte (N). Nivel de zona: Cocina.

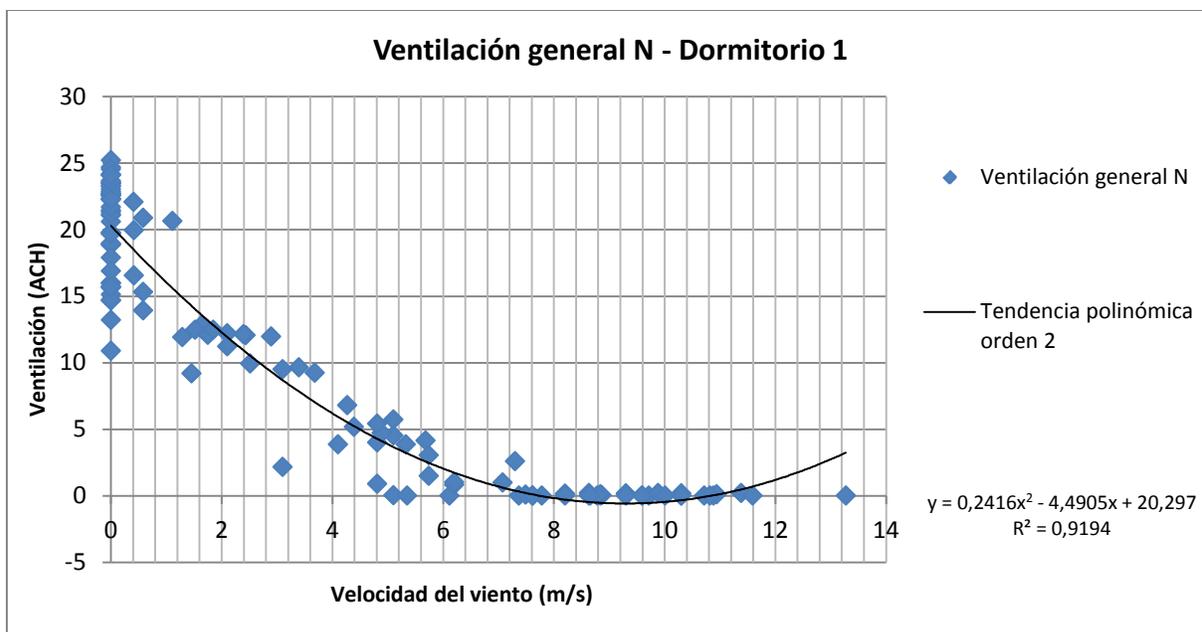


Figura 30. Gráfico ventilación general con viento en dirección Norte (N). Nivel de zona: Dormitorio 1.

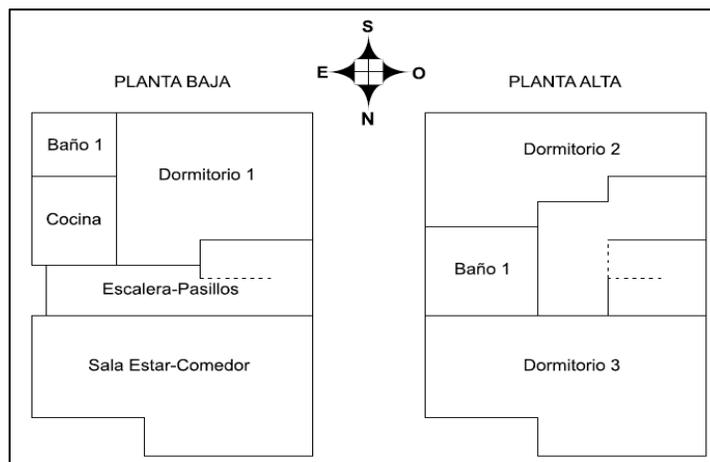
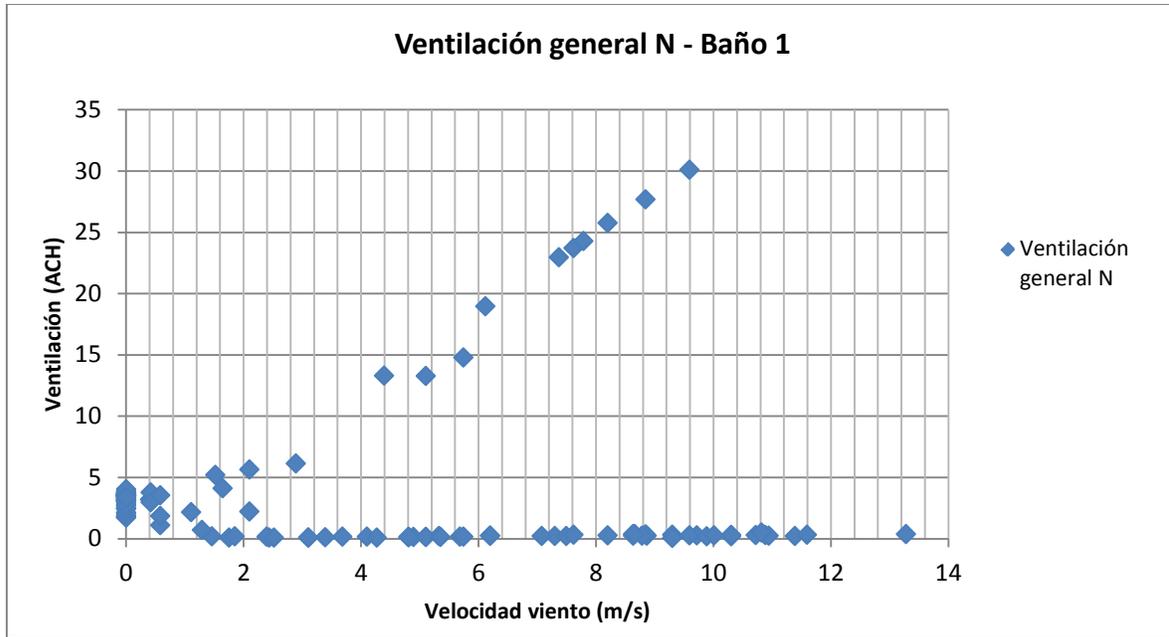


Figura 31. Esquema orientación de zonas ocupadas vivienda C60 Valle Noble.

Otro comportamiento se muestra en la *Figura 32* donde se advierten dos tendencias diferentes.



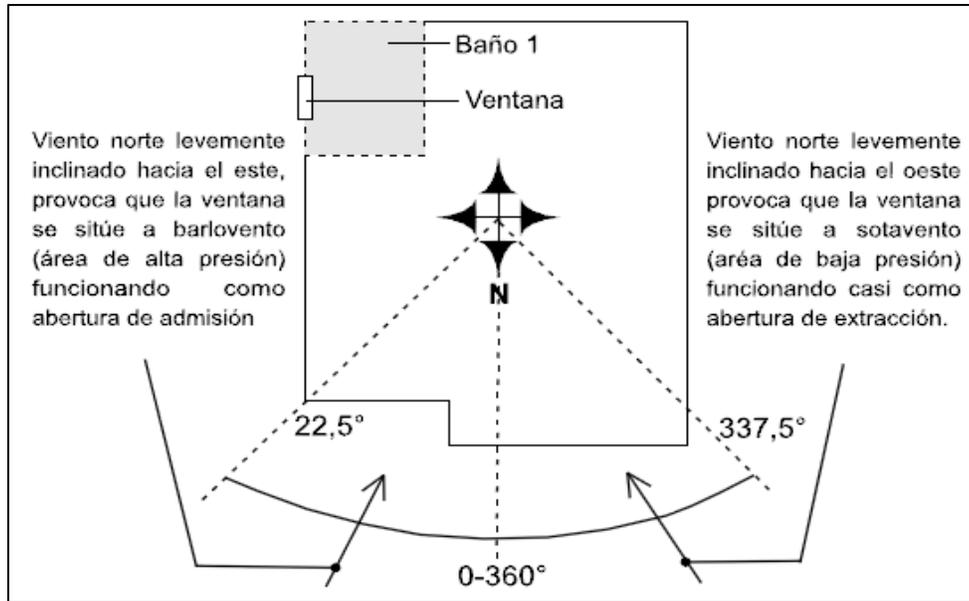


Figura 33. Análisis Baño 1. Variación de comportamiento de ventilación de acuerdo a inclinación de viento Norte.

En esta ocasión, la dirección del viento y la ubicación de la ventana del Baño 1, genera distintos comportamientos de ventilación dependiendo si ésta última, similar al caso anterior, se sitúa a barlovento o sotavento.

Es importante tener en cuenta que de los gráficos de cada zona se obtienen curvas de tendencia, las cuales son usadas para evaluar la ventilación en base a la velocidad promedio del mes en las direcciones correspondientes, proceso que se describe en páginas posteriores.

Para las zonas secas o limpias, la ventilación puede llevarse a cabo con la apertura de ventanas disponibles para así dejar que el aire fresco ingrese al recinto, mientras que, para las zonas húmedas, la apertura de ventanas y el consecuente ingreso de aire fresco haría que el aire tendiese a circular hacia el interior del inmueble arrastrando el aire viciado, en consecuencia, se discrimina la curva a utilizar de acuerdo al siguiente criterio:

Criterio N° 2:

En los casos de doble tendencia en las curvas de ventilación:

- *Para las zonas secas o limpias, se utilizará la curva que presente los valores más altos de ventilación.*
- *Para las zonas húmedas o sucias, se utilizará la curva que presente los menores valores de ventilación.*

Esta etapa de análisis, tal y como se acaba de mostrar, es importante para llevar a cabo un estudio predictivo de desempeño de un inmueble, ya que el comportamiento de la ventilación a nivel de zona, en su conjunto, forman el comportamiento de ventilación del edificio o vivienda.

4.5.2 Potencial de ventilación natural vivienda C60 Valle Noble.

De las líneas de tendencia obtenidas en los gráficos de ventilación para cada zona, en las respectivas direcciones de viento, se obtienen sus correspondientes ecuaciones, las cuales permiten estimar el nivel de ventilación natural de acuerdo a la velocidad de viento¹⁰ promedio en cada dirección dominante (*Tabla 18*).

¹⁰ Ecuaciones de tendencia obtenidas con un 60 a 99% de correlación entre los puntos o datos.

Tabla 18. Velocidades promedio de viento mensuales (m/s) en las direcciones dominantes.

Mes	Velocidad promedio viento (m/s)		
	SW	N	S
Enero	5,61	3,57	2,04
Febrero	5,10	4,08	2,55
Marzo	4,08	3,06	2,04
Abril	4,08	3,06	2,55
Mayo	2,55	5,10	2,04
Junio	3,06	5,10	2,04
Julio	3,57	6,12	2,55
Agosto	3,06	5,10	2,04
Septiembre	4,08	3,57	2,55
Octubre	4,08	4,59	2,55
Noviembre	5,10	4,08	3,06
Diciembre	4,59	3,57	3,06
AÑO 08-09-10	4,08	4,08	2,55

Por otro lado, la *Tabla 10* y *Tabla 17* permiten obtener los valores mostrados en la *Tabla 19*, los cuales, representan los requerimientos de ventilación para la vivienda en estudio. Cabe mencionar que, si bien, no se especifica un nivel de ventilación para áreas de circulación, se asumen: el valor correspondiente a salas de estar y comedores; y un promedio de 2 personas como número de ocupantes.

Tabla 19. Requerimientos de ventilación vivienda Valle Noble (ACH).

Zona	ocupantes	Area util (m2)	Otros	Volumen zona (m3)	Requerimiento Ventilación (ACH)
Dormitorio 1	2			22,06	1,63
Sala Estar-Comedor	2			34,22	0,63
Baño 1			54	6,19	54,00
Cocina		4,21		10,68	2,84
Escalera-Pasillos	2			26,83	0,81
Baño 2			54	8,75	54,00
Dormitorio 2	2			19,18	1,88
Dormitorio 3	2			25,39	1,42

Para obtener estados característicos de la vivienda se considera el mes de Julio para el caso invierno y Enero para el caso verano. En los cuales, para la dirección predominante de viento de cada mes, se determina el nivel de ventilación obtenida tanto para cada local, como para la vivienda a nivel global¹¹.

Tabla 20. Estados característicos de ventilación natural para los meses Julio (Invierno) y Enero (Verano).

Mes	Ventilación natural promedio (ACH)								
	Dormitorio 1	Sala Estar-Comedor	Baño 1	Cocina	Escalera-Pasillos	Baño 2	Dormitorio 2	Dormitorio 3	Vivienda (Global)
Julio	0,8	47,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	34,8	83,0
Enero	42,73	4,40	0,16	33,8	0,18	30,4	6,4	9,2	127,3
Requerimiento	1,6	0,6	54,0	2,8	0,8	54,0	1,9	1,4	117,2

Así, de la Tabla 20 se observa que, si bien, a nivel global la ventilación natural obtenida cumple los requerimientos de ventilación, existen zonas en las que paralelamente no se obtiene el caudal requerido de ventilación como es el caso del sector Escalera-Pasillos para el mes de Enero.

Otro aspecto a considerar, es que en la mayoría de los edificios, no es posible satisfacer a cabalidad los requerimientos de ventilación en base a ventilación natural, es decir, se requerirá en mayor o menor medida una estrategia de ventilación mecánica, con el fin de satisfacer las necesidades de renovación de aire. Así, si bien, los valores de la Tabla 20 entregan una imagen del comportamiento de la vivienda estos valores, no son representativos del desempeño de la vivienda en estudio¹², que es lo que se busca con el sistema prestacional de construcción mencionado en páginas anteriores. Es por ello

¹¹ Como en ambos casos, la velocidad de viento es mayor a 3 m/s, no se considera la temperatura promedio de los meses en estudio.

¹² En opinión del autor de este documento.

que, se debe definir un valor(es) que permita visualizar de manera más amplia el comportamiento; el desempeño del inmueble estudiado.

Para estimar el potencial de ventilación se define un indicador, el cual permite visualizar qué proporción de la ventilación requerida está siendo cubierta por la ventilación natural del inmueble¹³, como sigue:

$$P_{VN} = \frac{V_N}{V_R} \quad (4.5)$$

Donde:

P_{VN} Penetración ventilación natural (%).

V_N Ventilación natural obtenida de acuerdo a evaluación de recinto o inmueble (ACH).

V_R Ventilación requerida en el recinto o inmueble de acuerdo a estándares (ACH).

De acuerdo a lo anterior, la penetración de ventilación natural para cada recinto de la vivienda en cada dirección de viento se muestra en la *Figura 34*, *Figura 35* y *Figura 36*.

¹³ En proyectos o estudios de energía eólica, se define un indicador similar, conocido como Penetración de energía eólica.

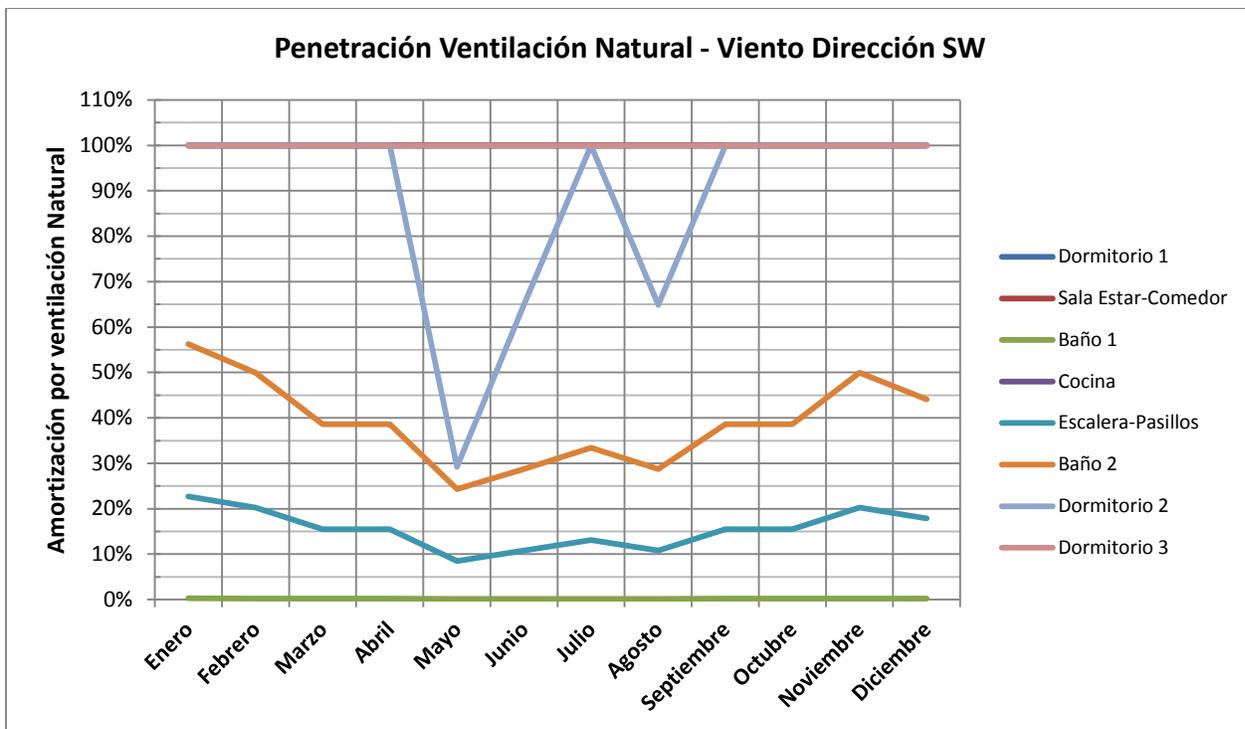


Figura 34. Penetración ventilación natural, viento en dirección Sur-Oeste.

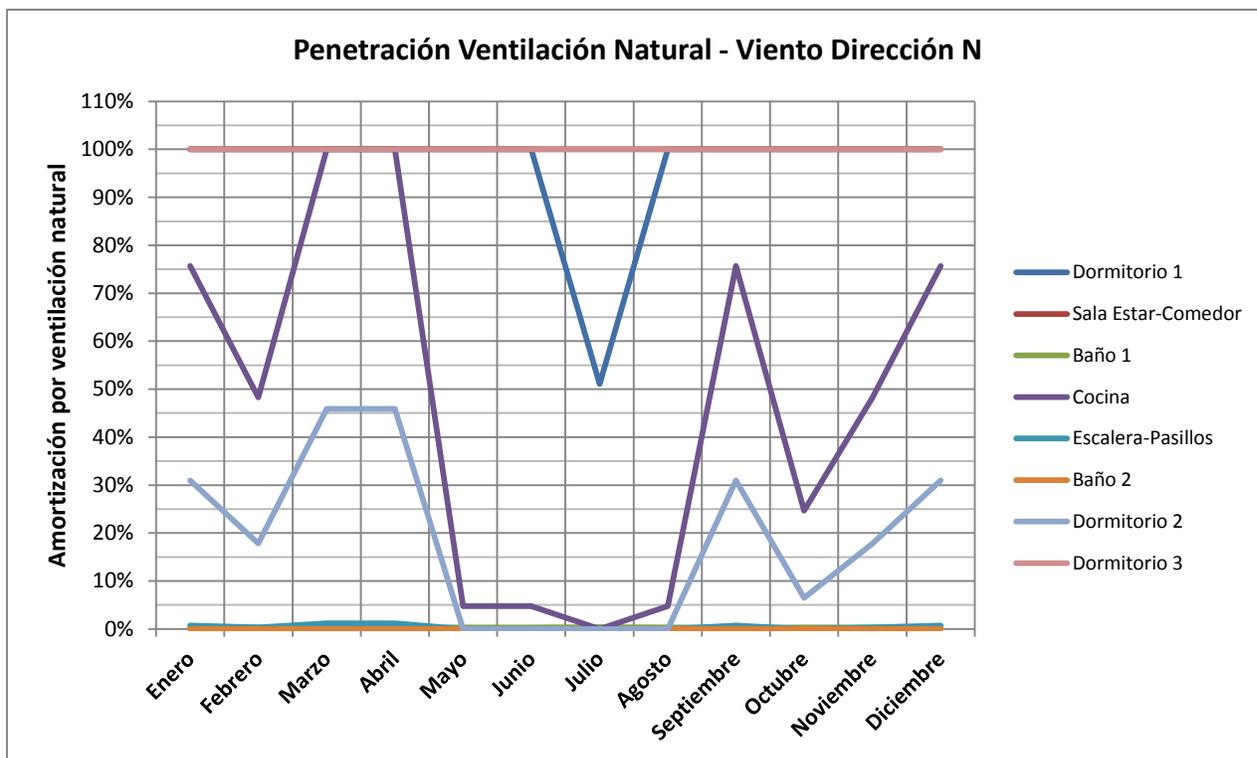


Figura 35. Penetración ventilación natural, viento en dirección Norte.

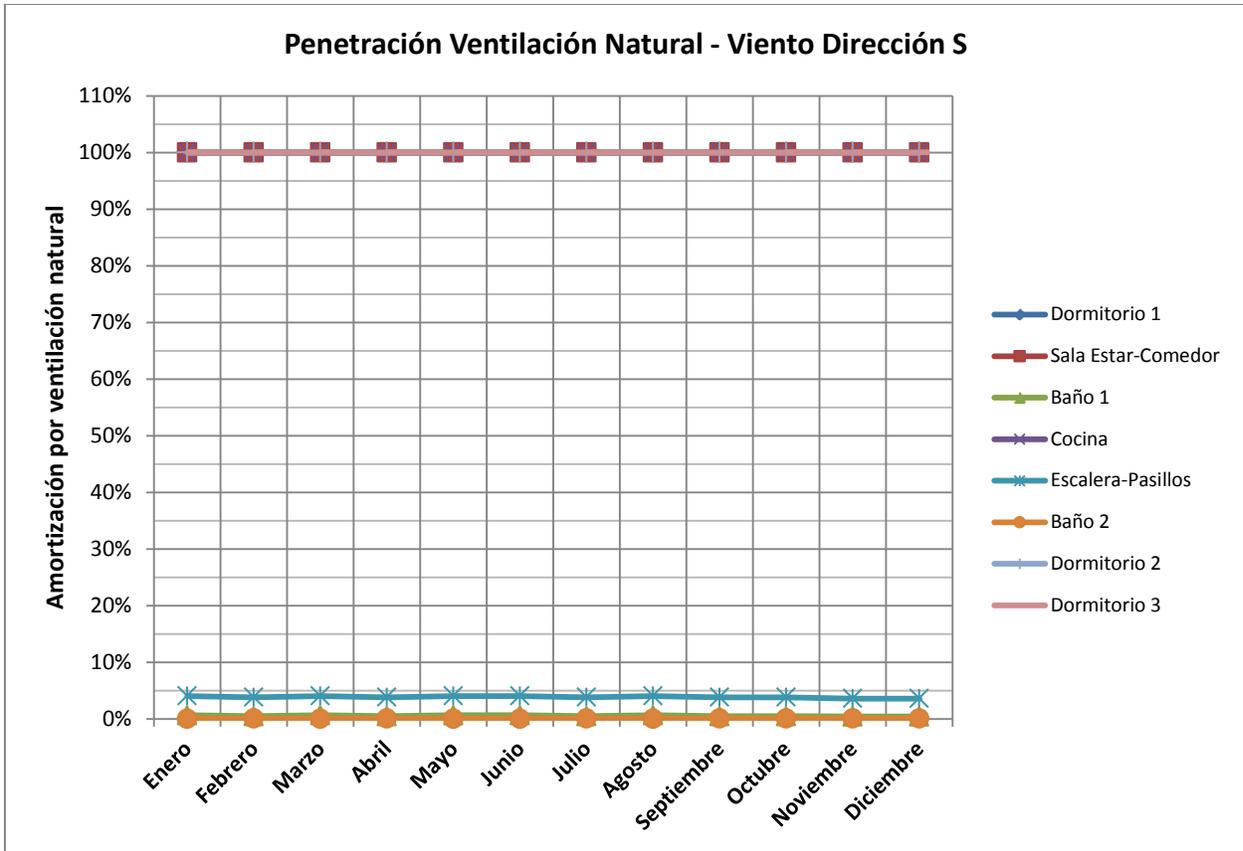


Figura 36. Penetración ventilación natural, viento en dirección Sur. (Dormitorio 1, Sala Estar-Comedor, Cocina, Dormitorio 2 y Dormitorio 3 siempre 100%).

Se observa de la *Figura 34*, que el nivel más bajo de ventilación natural se encuentra en el Baño 1 (planta baja), sin embargo, como se mencionó anteriormente, desde el punto de vista de circulación del aire, esta situación se torna ventajosa. Por otro lado, el Baño 2 (planta alta) y la cocina (planta baja) presentan mayores índices de ventilación natural, situación que entraría en conflicto con la condición de circulación de aire.

Las deducciones que se pueden realizar con estos gráficos e indicadores son diversas, sin embargo, la importancia de ellos radica en que, implícitamente, revelan el nivel de ventilación mecánica que se requiere para alcanzar los requerimientos mínimos.

4.5.3 Análisis CFD vivienda C60 Valle Noble.

La simulación realizada junto con sus resultados, permiten evaluar el nivel de ventilación natural que se puede obtener de acuerdo al diseño de la vivienda. Sin embargo, dicha evaluación se limita a comparaciones entre el desempeño del inmueble y los requerimientos del mismo, dejando a deducción el comportamiento interno del aire en términos de sentido de circulación.

Por ello, es necesario realizar un análisis cualitativo basado en una simulación CFD con el objeto de verificar que el sentido de circulación de la ventilación se comporte de acuerdo a la condición de diseño establecida en la Guía Técnica de Calidad del Aire (pág. 74).

Para tal efecto, se debe definir un momento de la simulación en Design Builder (día-mes-hora) que sea representativo del comportamiento de la vivienda. Esto permite importar los datos de flujo de aire a través de puertas, ventanas y elementos que sean parte de un sistema de ventilación natural¹⁴ a las condiciones de borde del mallado de CFD.

Así, de la *Tabla 18*, se tienen las velocidades promedio en cada dirección de viento estudiadas y por otro lado, de un análisis simple de los datos climáticos en Design Builder, se determinan los instantes representativos como muestra la *Tabla 21*.

Tabla 21. Instante más representativo para simulación CFD.

	Situación más representativa		
Simulación	1 - SW	2 - N	3 - S
Dirección Viento	225	360 ó 0	180
Velocidad	4,08	4,08	2,55
	Instante más aproximado (DB)		
Dirección Viento	220	360	180
Velocidad	4,1	4,1	2,51
Fecha (DB)	8 Jul 11:00	12 Jul 22:00	23 Jul 15:00

¹⁴ DesignBuilder también permite definir fancoils, ventiladores, radiadores etc. como parte de las condiciones de borde, sin embargo el diseño de la vivienda, al igual que como ocurre con el sistema de calefacción, no comprende este tipo de equipos o accesorios.

I. Simulación CFD SW:

La *Figura 37* muestra el comportamiento del aire en un instante promedio representativo de ventilación. En la imagen se observa que el aire tiende a escapar por el Baño 1, cumpliendo la condición de sentido de circulación del aire interior. Sin perjuicio de lo anterior, intuitivamente se deduce que, a partir de un viento en dirección SW, el aire debería tender a evacuar por las aperturas ubicadas a sotavento (fachada Norte, por ejemplo), sin embargo, la *Figura 38* muestra la tendencia de éste a entrar por la ventana situada en la fachada norte de la vivienda. Para analizar esta situación, se realiza una simulación CFD externa, mostrada en la *Figura 39* donde se observa que el diseño de la fachada norte provoca una zona de turbulencia, que explica la tendencia del aire a entrar por la ventana situada en ese sector.

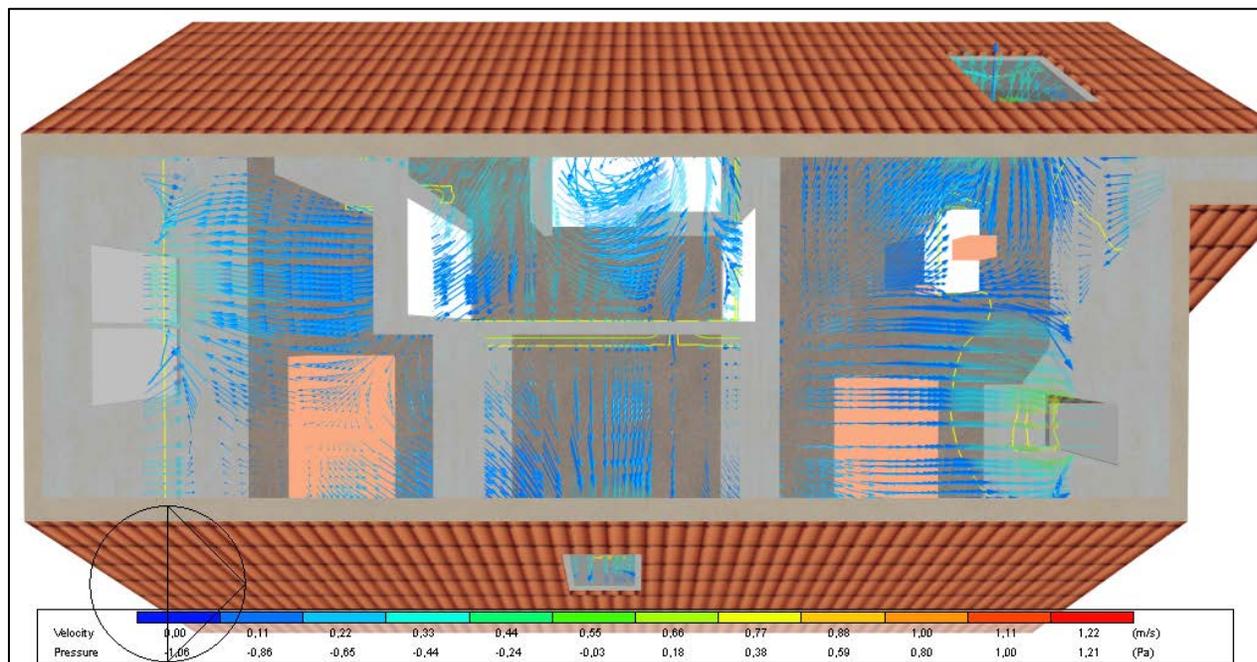


Figura 37. Corte CFD Planta alta, simulación dirección SW.

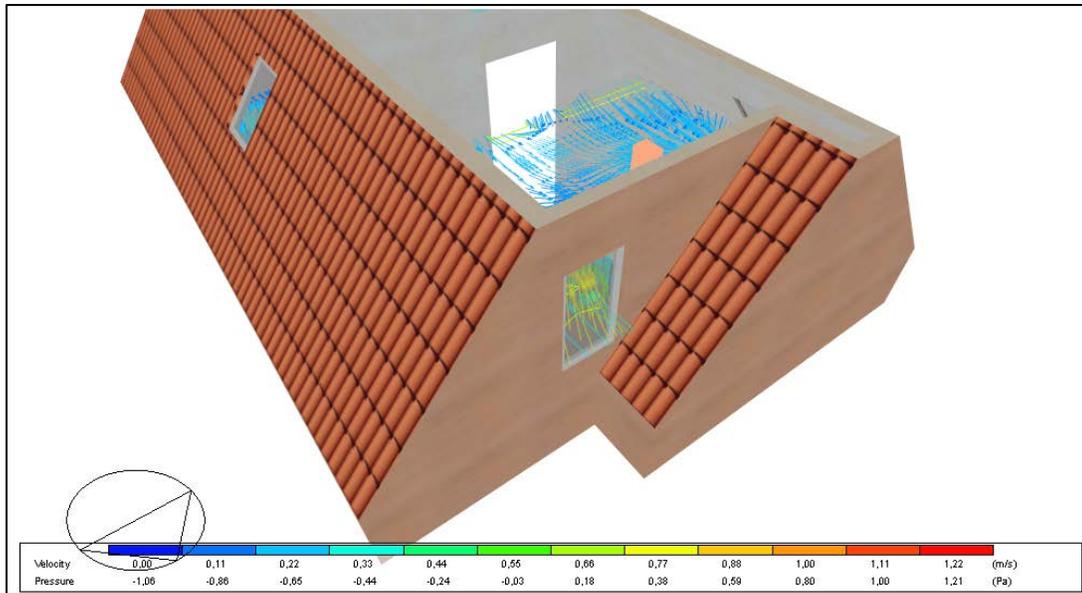


Figura 38. Corte CFD simulación SW, detalle fachada norte.

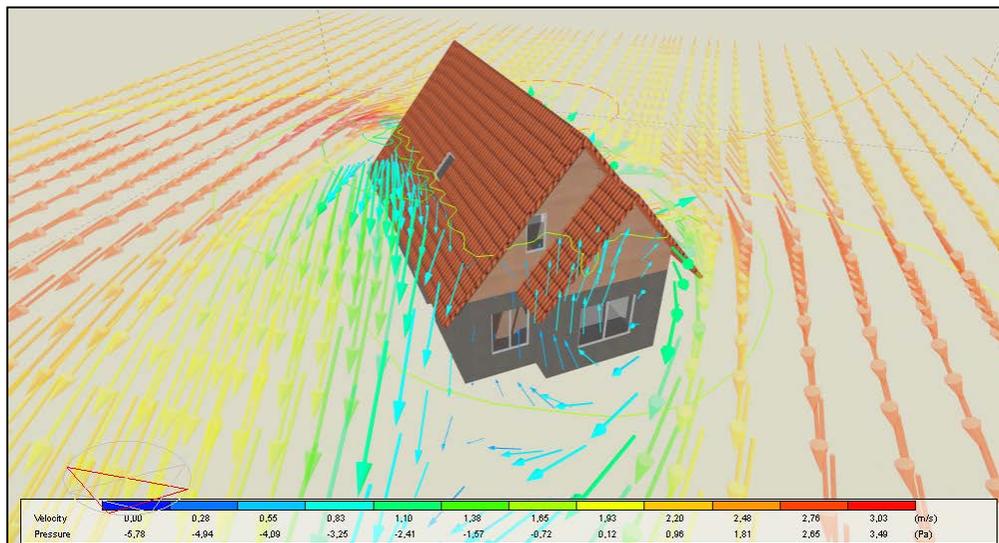


Figura 39. Captura de corte análisis CFD externo, dirección de viento SW.

II. Simulación CFD N:

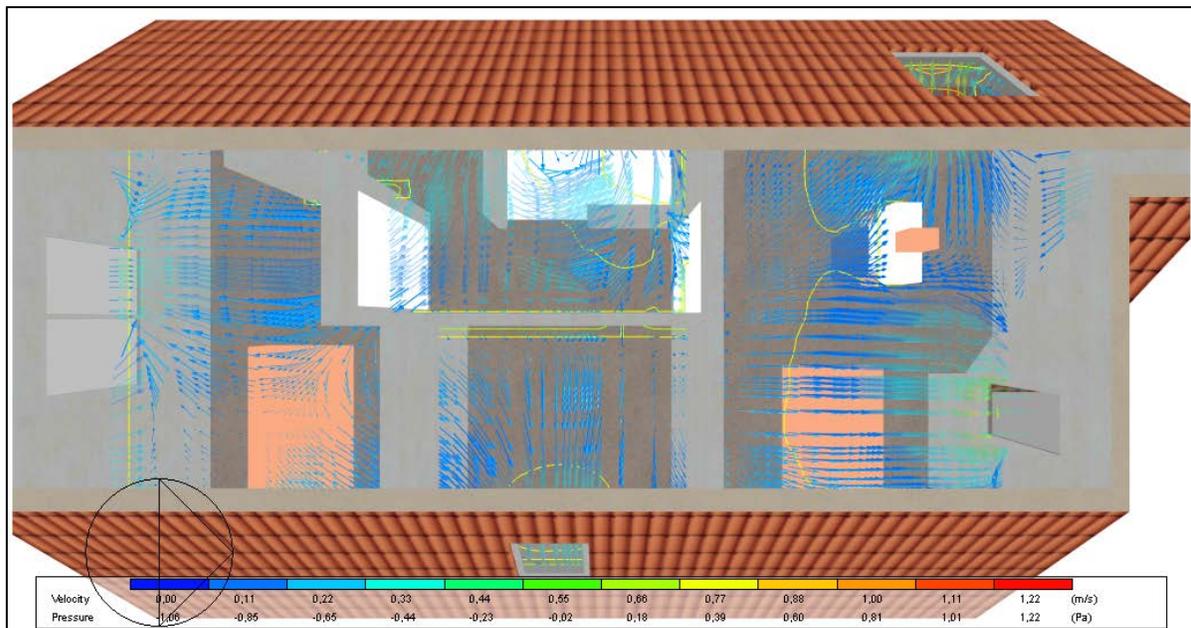


Figura 40. Corte simulación CFD dirección Norte, planta alta.

La *Figura 40* es una captura de la simulación CFD con dirección de viento Norte, mientras que la *Figura 41* muestra una captura de la planta baja para la misma simulación. De esta última, se rescata una situación particular, que se describe prestando atención a la *Figura 42*.

Las aberturas pueden ser usadas para evacuar o admitir aire en el recinto, sin embargo, dependiendo de su altura, pueden realizar ambas funciones debido al "efecto stack", explicado en los primeros capítulos. Esta situación es la que se presenta en la *Figura 42*, donde la ventana de la fachada Norte, permite el ingreso de aire en su parte inferior y, simultáneamente, permite la salida del aire desde el interior del recinto por su parte superior. Esta situación explica el por qué las ventanas situadas en baños son de altura menor a las situadas en fachadas principales y, además, son instaladas en la parte superior de los muros.

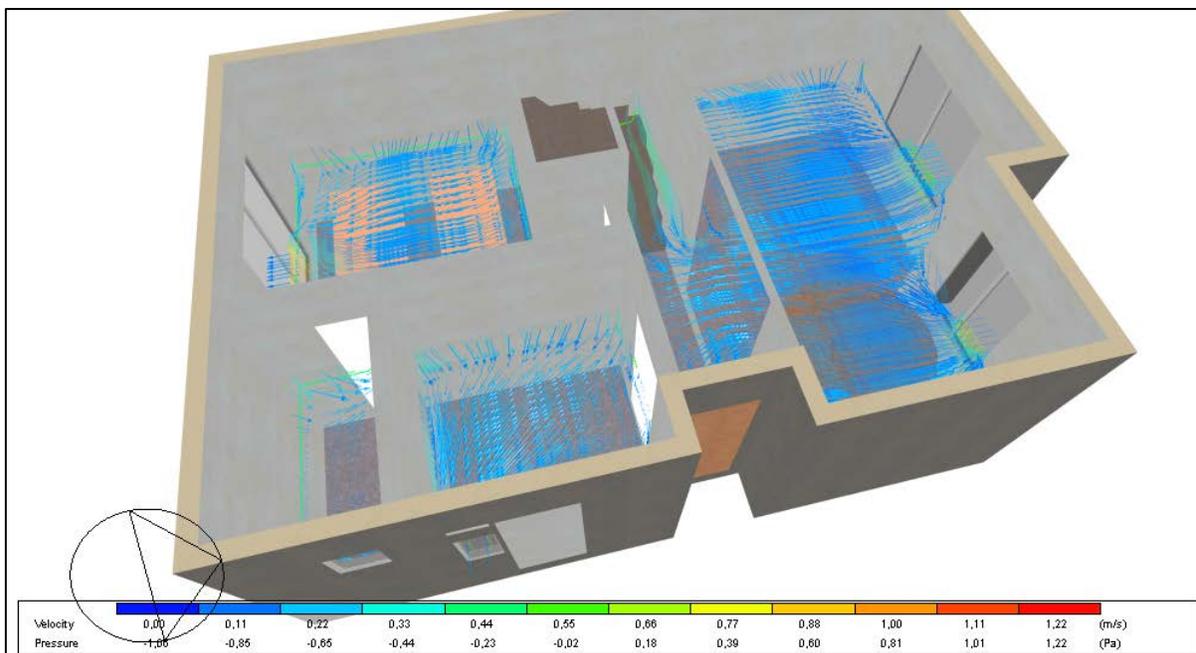


Figura 41. Corte simulación CFD dirección Norte, planta baja.

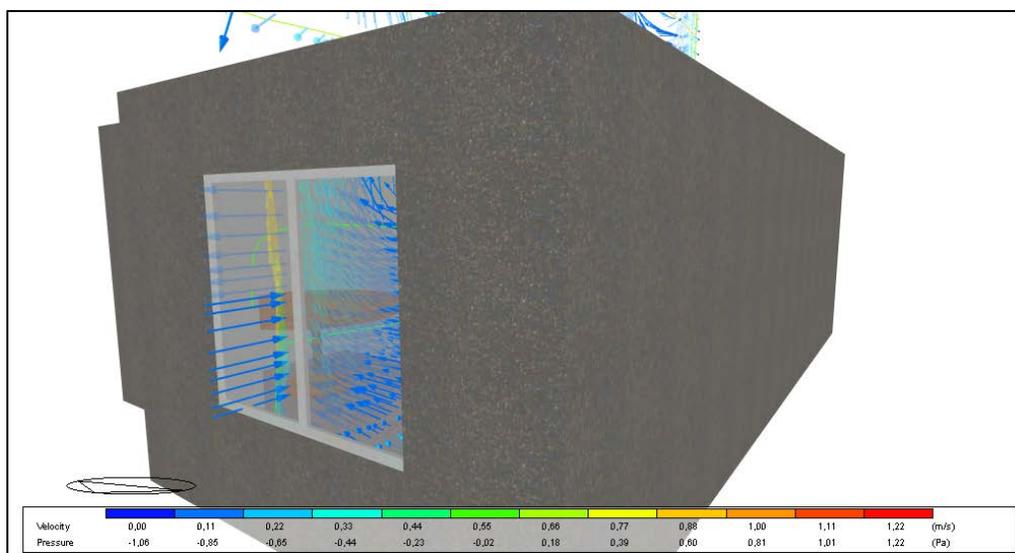


Figura 42. Detalle ventana fachada norte. Simulación CFD con viento dirección Norte.

I. Simulación CFD S:

Se realizaron tres intentos de simulación CFD con dirección de viento Sur. Sin embargo, no fue posible obtener convergencia en el proceso de solución del mallado 3D. Esta situación se da en diferentes casos, sin embargo, las más común es cuando se tienen velocidades de aire muy bajas en el interior del recinto. En efecto, la velocidad promedio en las simulaciones SW y N (4,1 m/s en DB) induce velocidades de aire interior entre 0,1 y 0,7 m/s, por lo tanto, es de esperar que para la situación de viento en dirección Sur (2,51 m/s) las velocidades de aire en el interior de la vivienda tiendan a ser nulas.

Capítulo 5: Discusión y Conclusiones.

5.1 Caracterización del método propuesto.

El método propuesto para la verificación de calidad de aire interior en el diseño de un edificio o vivienda, posee las siguientes características:

- Permite evaluar el potencial de ventilación natural de inmuebles, de manera cuantitativa (penetración de ventilación natural) y cualitativa (análisis CFD).
- El itinerario de uso del inmueble no es determinante en la aplicabilidad del método. Es posible modelar y estudiar un gran número de casos: hospitales, retenes, establecimientos educacionales, espacios residenciales, oficinas, etc.
- Incorpora datos de infiltración como primer criterio de evaluación.
- El método permite definir perfiles periódicos de ventilación (anuales, semanales, diarios, estacionales, etc.) en base a penetración de ventilación natural, esto es, que proporción de la ventilación requerida es cubierta por ventilación natural¹⁵.
- En casos de selección de proyectos (licitación, por ejemplo) el método no sólo verifica que se cumpla con lo mínimo requerido, sino que, permite descubrir la mejor alternativa desde la perspectiva de eficiencia energética.
- El método permite tomar decisiones sobre mejorar, corregir o sustituir aspectos de diseño en base a experiencias con proyectos anteriores o en base a los resultados generados por la aplicación del método propuesto.
- El método permite generar análisis CFD para visualizar el sentido de circulación del aire dentro del recinto, verificando así, que el aire no transite desde los espacios contaminados como cocinas, talleres, baños,

¹⁵ Ver apartado 5.1.1

etc. hacia espacios “limpios” como oficinas, salas de estar, espacios de circulación, dormitorios, etc.

Por otro lado, para la aplicación del método propuesto se requiere la siguiente información¹⁶:

- Planos Generales, Planos de Detalles y Especificaciones Técnicas (materiales, especificación de partes y componentes del inmueble, etc.) incluyendo tipo de ocupación de los locales interiores. En definitiva, todos los antecedentes que sean suficientes para modelar el inmueble en Design Builder, los cuales se obtienen de la empresa diseñadora o cliente demandante.
- Datos de permeabilidad al aire de equipos y componentes involucrados en el diseño de la vivienda, consultados de catálogos o solicitados directamente al fabricante.
- Datos meteorológicos de la localidad de emplazamiento, obtenidos mediante la página oficial¹⁷ de la Dirección Meteorológica de Chile, ó, de ser necesario, solicitados directamente a la institución.

En consecuencia, los resultados esperados de la aplicación del método propuesto son:

- Generación de gráficos de ventilación para cada local del inmueble, con su correspondiente curva característica.
- Generación de perfiles de penetración de ventilación periódicos (anual, mensual, estacional, semanal, etc.).
- Visualización de comportamiento interno de la circulación del aire derivado de un análisis CFD del inmueble estudiado.

¹⁶ Excluyendo versión profesional (licencia) de DesignBuilder.

¹⁷ www.meteochile.cl

5.1.1 Penetración de ventilación natural.

Para realizar una evaluación objetiva es necesario definir un indicador numérico, que permita visualizar cuantitativamente el comportamiento del inmueble estudiado. Además, el indicador en cuestión debe considerar el carácter y propósito del proyecto macro del cual nace este estudio, esto es, evitar las evaluaciones de tipo binómicas (aprobado-desaprobado) con un indicador aislado; propias del sistema prescriptivo de construcción.

Es así, como se define la Penetración de Ventilación Natural (P_{VN}), (ecuación (4.5)), la cual permite construir perfiles de ventilación cuya periodicidad quedará sujeto a la naturaleza del inmueble a evaluar (los itinerarios y períodos de ocupación de un establecimiento educacional son diferentes a los de un hospital, por ejemplo). Dichos perfiles tendrán formas similares a las mostradas en la *Figura 34*, *Figura 35* y *Figura 36*.

En los proyectos de construcción donde se debe decidir qué propuesta ejecutar, la variabilidad de P_{VN} en cada diseño indicará qué diseño arquitectónico y estructural aprovecha de mejor manera las condiciones climáticas exteriores en beneficio de la ventilación natural.

5.2 Respecto del enfoque del método propuesto.

En principio, las formas y caminos posibles para cumplir los objetivos generales y específicos son, en cierta manera, múltiples. Sin embargo, las alternativas se reducen tomando en cuenta el contexto dentro del que se desarrolla esta propuesta. Así, comparando lo realizado con el enfoque definido en capítulos anteriores se tiene:

a) Eficiencia energética y Sistema prestacional de construcción:

Considerar un indicador como la penetración de ventilación natural, permite visualizar la necesidad de ventilación mecánica para cumplir los requerimientos de ventilación.

Si el método propuesto considerara verificar sólo el cumplimiento de estándares por métodos bimodales como “aprobado-no aprobado”, cabe la posibilidad de estar avalando un edificio poco eficiente en términos de energía.

Por ejemplo, se tienen dos edificios sobre los cuales se debe decidir construir uno de ellos, se verifica que ambos cumplen los requerimientos de ventilación en base a ventilación mecánica, sin embargo, la diferencia crucial estará en cuál de ellos, gracias a su diseño arquitectónico y estructural, aprovecha mejor las condiciones exteriores para obtener ventilación natural, y así “utilizar menos” el sistema de ventilación mecánica.

b) Aplicabilidad:

Design Builder permite incorporar, además de diversos itinerarios de ocupación, diferentes sistemas de uso de energía (calefacción, refrigeración, sombreado, sistemas solares, etc.) al modelado del inmueble. Esto concede al usuario, la posibilidad de modelar edificios (y viviendas) con diferentes propósitos de uso, por lo que la aplicabilidad es prácticamente ilimitada.

Análogamente, el método propuesto depende básicamente de los datos obtenidos con el programa, por lo que su aplicabilidad queda sujeta a la del software.

c) Retroalimentación y potencial de ventilación del inmueble:

En general, todo edificio en algún momento requerirá de ventilación mecánica ante la ausencia de las condiciones exteriores (viento) para ventilar sus recintos de manera natural. Así, la evaluación que se propone, busca averiguar cuál es el máximo rendimiento que se puede obtener del edificio (o vivienda) en términos de ventilación natural, ya que, es la principal estrategia disponible para disminuir el consumo de energía externa inherente a los sistemas de ventilación mecánica.

Por lo tanto, ante un proceso selectivo se puede discriminar entre varios diseños propuestos para un mismo proyecto de construcción (licitación, por ejemplo). Dicha comparación, se puede extender incluso a través del tiempo.

Por ejemplo, en el caso estudiado, un proyecto posterior emplazado en la misma localidad (y por consecuencia, el mismo clima) puede presentar niveles inferiores de ventilación, así, ante la existencia de un proyecto previo con mejor comportamiento, es posible generar recomendaciones que permitan corregir, mejorar o sustituir aspectos de diseño.

5.3 Respecto de la vivienda estudiada.

Del análisis de los gráficos de ventilación por zona (recinto habitado), se observa que, en la mayoría de los casos, el comportamiento obedece a una tendencia de tipo cuadrática cuya correlación entre los datos será más (o menos) dispersa en función de la diferencia de temperatura entre el interior del recinto y el ambiente exterior. Por otro lado, se deduce que la posición u orientación de una ventana, puerta, tronera, etc. tendrá injerencia directa y no despreciable en el comportamiento de ventilación del recinto a la que ésta pertenece.

Además, la vivienda, si bien, no comprende un sistema específico de ventilación, la penetración de ventilación natural promedio alcanza un 100% en diversas zonas las cuales generalmente corresponden a las zonas secas.

Por otro lado, el periodo y la situación representativa estudiada indican que el Baño 2 y la Cocina tienden a comportarse como zona de extracción, lo que favorece el cumplimiento de las condiciones de diseño mencionadas en el documento.

Finalmente, el Baño 1 en ciertos periodos tiende a comportarse como zona de admisión, por lo que, en un principio, surgiría como recomendación natural instalar un dispositivo de extracción mecánica en esta zona, sin embargo, la ocupación de este recinto es menor a la del baño principal, y eso obedece a que, por su localización, su ocupación está sujeta a la ocupación del Dormitorio 1.

Es importante destacar que los valores de infiltración usados en el modelo, a excepción de las ventanas, son basados en supuestos y en experiencias internacionales. Sin embargo, Chile debe desarrollar una cultura constructiva de permeabilidad al aire propia, implementando valores de referencia, estándares, y prácticas de hermeticidad que sean pertinentes a las soluciones constructivas (equipos, tecnología, componentes, etc.) disponibles de nuestro país.

En resumen, la *Tabla 22* muestra una comparación entre las ventajas y desventajas del método propuesto, donde, respecto del tiempo de estudio, cabe mencionar que, si bien, el análisis gráfico realizado en el apartado 4.5.1 y la generación de curvas de penetración de ventilación natural requiere un proceso largo, éste tiende a ser repetitivo, por lo que, es posible generar un programa o subprograma (Excel, EES, Matlab, etc.) que facilite y agilice esa etapa del estudio.

Tabla 22. Cuadro comparativo ventajas y desventajas del método propuesto.

Método de verificación propuesto	
Ventajas	Desventajas
Aplicabilidad: La amplia gama de edificios que se puede modelar con Design Builder permite al programa ser aplicable en prácticamente todo proyecto de edificación.	Tiempo de estudio: El análisis gráfico zona a zona requiere un considerable tiempo adicional. Que aumenta a medida que el tamaño del edificio aumenta.
Retroalimentación: El programa permite mejorar proyectos futuros en base a experiencias de diseños anteriores.	Análisis CFD: Es posible que ciertas simulaciones no logren convergencia debido, entre otras cosas, a problemas de geometría del modelo, problemas de recursos del computador, o de bajas velocidades en el interior del recinto o inmueble.
Flexibilidad del método: La combinación de información climática y el procesamiento de datos puede ser diverso dependiendo de cuál es el propósito y aplicación del estudio (revisión de un diseño propio, comparación de propuestas, mejoramiento de soluciones constructivas, etc.)	Infiltraciones CFD: Debido a la limitación de Design Builder, el estudio de infiltraciones en una simulación CFD no es posible.

Finalmente, si bien, la propuesta no establece un proceso específico para la verificación de calidad de aire interior para estrategias de ventilación operando en “modo mecánico”, este aspecto consiste básicamente en comparar los requerimientos de ventilación con la capacidad de los equipos instalados en el inmueble y, luego, generar el correspondiente análisis CFD. Por lo tanto, en opinión del autor, se han cumplido los objetivos planteados para la presente Habilitación Profesional.

Bibliografía

- [1] **Liddament, M. W.** *A guide to energy efficient ventilation*. Coventry : University of Warwick, 1996.
- [2] **Szikra, Csaba.** *Hybrid ventilation systems*. Budapest : s.n., 2004.
- [3] **Odrizola, Moisés.** *Cálculo y medida de infiltraciones de aire en edificios*. s.l. : Universidad del País Vasco, 2008.
- [4] **British Standard.** *Ventilation principles and designing for natural ventilation BS 5925:1991*. 1991.
- [5] **Allard, Francis y et al.** *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. s.l. : James & James, 1998.
- [6] **Santamouris, Mat.** *Natural convection heat and mass transfer through large openings*. s.l. : European Comission DGX11, 1992.
- [7] **Pelletret, R, y otros, y otros.** *Modelling of large openings*. Ottawa, Canada : s.n., 1992.
- [8] **Mneime, Khodr.** *Transferts thermo-aerouliques entre pieces à travers les grandes ouverhires*. s.l. : Nice University, 1990.
- [9] **Givonni, Baruch.** *Man, climate and architechture*. Paris : s.n., 1969.
- [10] **International Standard Organization ISO.** *Thermal performance of buildings - determination of air permeability of buildings ISO 9772:2006*. 2006.
- [11] **American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers ASHRAE.** *Natural ventilation and infiltration, ASHRAE fundamental handbook*. 1985.
- [12] **Nitta, Katsumichi.** *Ventilation calculation by network model inducing bi-directional flows in openings*. Kyoto : Kyoto Institute of Technology, 1992.
- [13] **Building Research Establishment BRE.** *Manual of Breeze*. 1992.
- [14] **Dascalì, E y Santamouris M.** *Predicting single sided natural ventilation rates in buildings*. s.l. : International journal of solar energy, 1995.
- [15] **School of Civil & Environment Engineering, Georgia Tech.** *Graduate Course - Computational Fluid Dynamics*. 2007.
- [16] **Duarte Agudelo, Carlos A. y Niño Vicentes, José R.** *Introducción a la mecánica de fluidos*. Bogotá : Colección 145 años Universidad Nacional de Colombia.
- [17] **Zhivov, Alexander y Wagdl, Anis.** *Building airtightness and air barrier continuity requirements*. s.l. : USACE Research and development center.

- [18] *Exigencias europeas para infiltraciones de aire: Lecciones de Chile.* Ossio, F, de Herde, A y Veas, L. 1, Santiago : s.n., 2012, Revista de la Construcción, Vol. 11.
- [19] *Setting airtightness standards.* American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ASHRAE. 9, 2005, ASHRAE Journal, Vol. 47.
- [20] **Airflow, diseño y fabricación de equipos de difusión de aire.** *Manual de difusión de aire.* Madrid : s.n.
- [21] **International Standard Organization ISO.** *Ergonomics of the thermal environment ISO 7730:2005.* 2005.
- [22] **Ministerio de Industria, Energía y Turismo (España).** *RITE: Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios y sus instrucciones complementarias.* Madrid : s.n., 2007.

ANEXO 1: Planos generales vivienda C60 Valle Noble¹⁸.

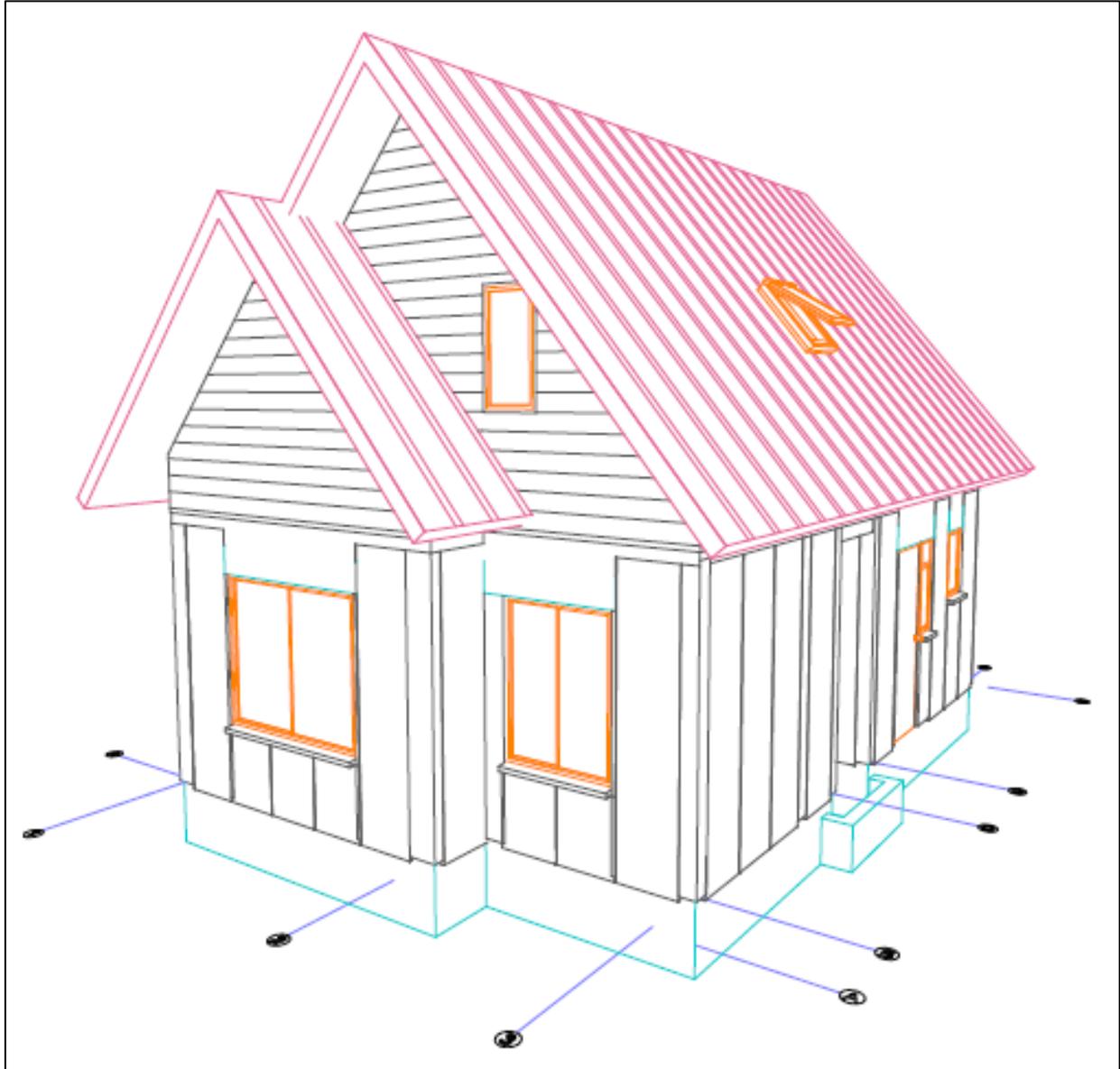


Figura A 1. Plano general vivienda C60, vista general.

¹⁸ El modelo en Design Builder corresponde a la versión especular de la vivienda mostrada en los planos. Variación realizada en base a información brindada por fuente interna del CITEC.

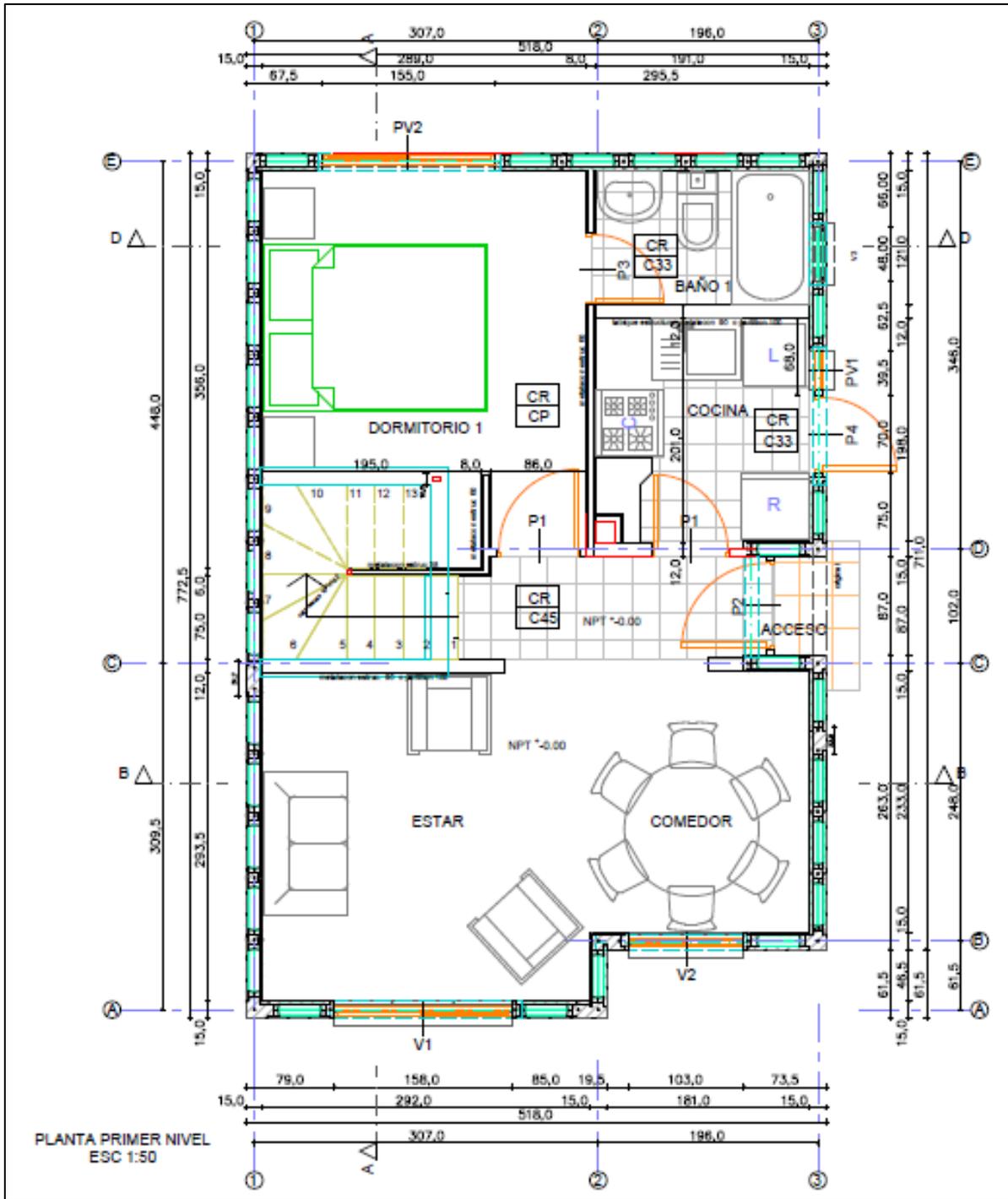


Figura A 2. Plano general Planta baja vivienda C60.

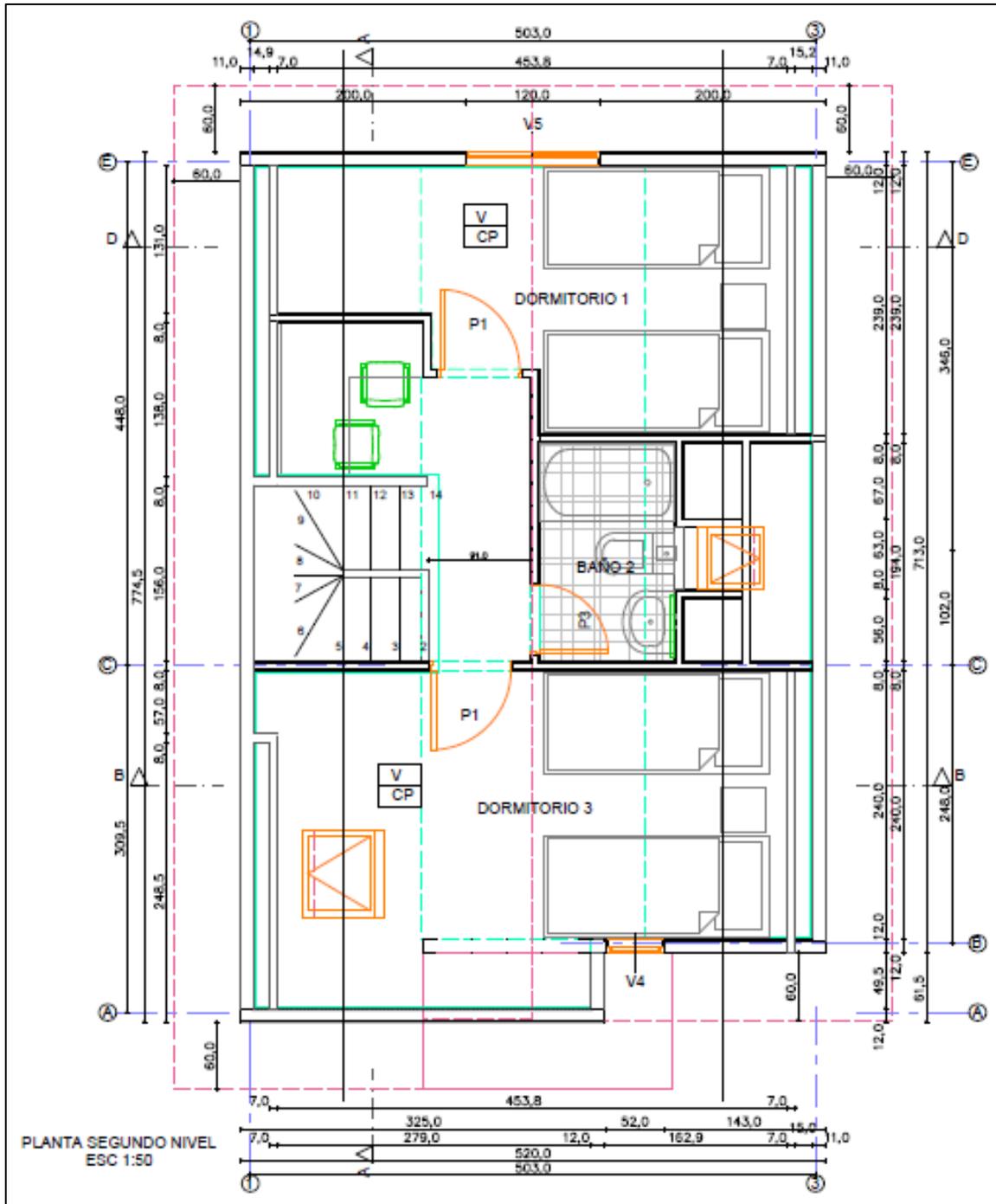


Figura A 3. Plano general vivienda C60 planta alta.

ANEXO 2: Descripción general de EnergyPlus

EnergyPlus (EP) es un programa de situación energética de edificios que permite en fases de diseño o en auditorías, obtener información acerca del comportamiento del edificio desde el punto de vista de eficiencia energética.

El programa modela sistemas de calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación, uso de agua y otros flujos energéticos.

En otras palabras, EnergyPlus es un programa que congrega a sub programas quienes en conjunto permiten calcular y visualizar el comportamiento energético del edificio a estudiar.

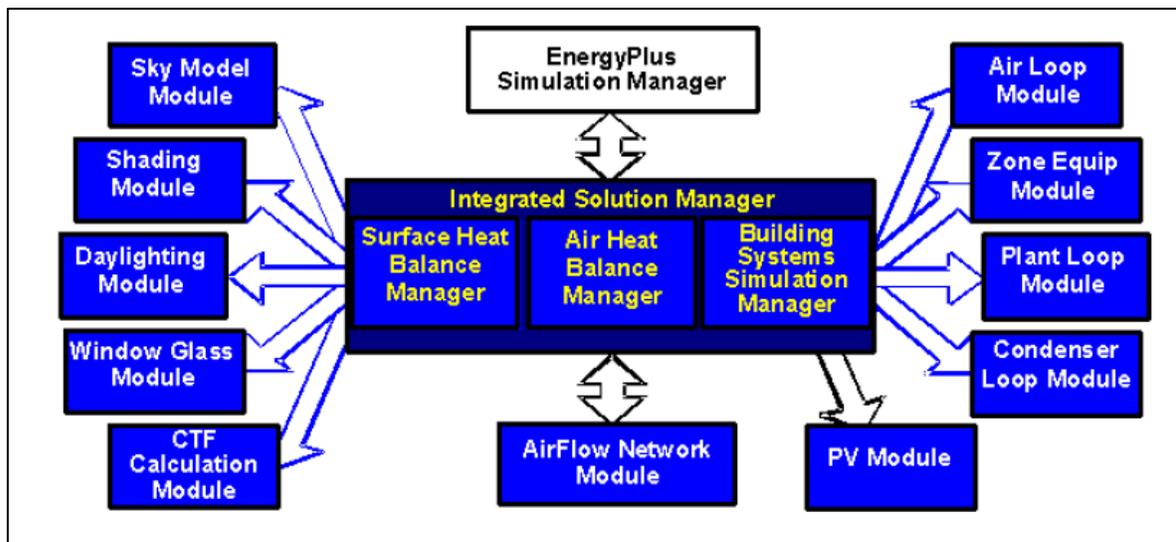


Figura A 4. Esquema que muestra las diferentes sub-rutinas que en conjunto forman las capacidades de EnergyPLUS.

La interfaz que usa EP es la principal dificultad que encuentra el usuario al momento de iniciar el proceso de modelado, ya que el método de manejo, inserción y modificación de variables, características, coeficientes, etc. es en base a lenguaje de programación, y tablas tal como se muestra en la figura A.2. El formato de archivos de datos de entrada de EnergyPlus tienen extensión

IDF (Input Data File) y la importancia de esto radica en que Design Builder y EnergyPlus interactúan por medio de estos archivos, es decir, los archivos creados únicamente con EP son visualizables en Design Builder y por el otro lado los archivos .IDF generados por Design Builder son editables en EP permitiendo incorporar o modificar datos adicionales en la simulación en caso de que el usuario conozca el lenguaje y Design Builder no permita realizarlo por sí solo.

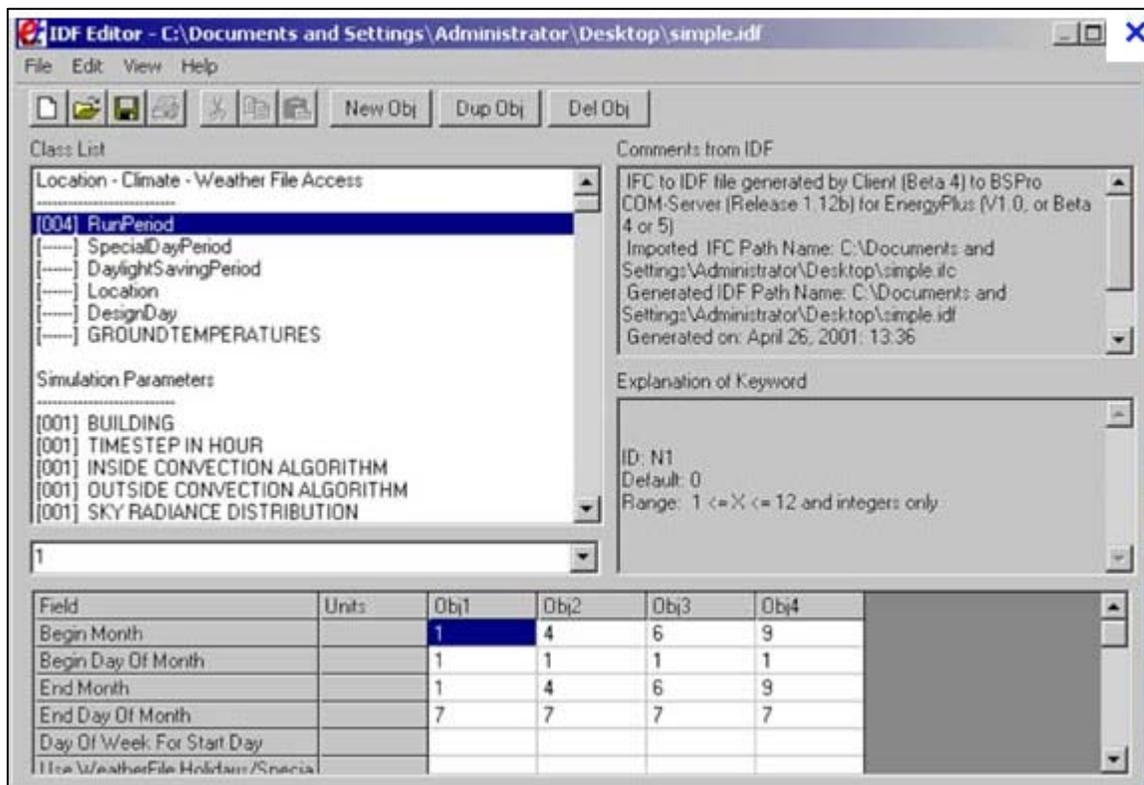


Figura A 5. Captura de pantalla del editor IDF de EnergyPlus.

Es importante destacar que EnergyPlus opera con datos reales de temperatura del aire, presión, radiación solar, altura sobre el nivel del mar, etc. de los sitios donde se localiza el edificio en estudio, y que éstos se pueden obtener de diferentes fuentes, ya que el programa posee un transcriptor de datos climáticos propio. Así, entre los datos de simulación que ofrece EP, se

encuentran los flujos de aire entrando y saliendo del edificio y que dan forma al comportamiento de ventilación natural calculada e infiltración, de acuerdo a las condiciones climáticas presentes en el período de simulación. Bajo ese mismo contexto, los resultados de temperaturas superficiales y caudales a través de puertas, ventilas, ventanas y accesorios propios de una estrategia de ventilación natural pueden ser usados en DB para establecerlos como condiciones de contorno de CFD, y así ver los patrones de flujo y temperatura que se generan a nivel de edificio o de zona, debido a cierta condición climática existente en un momento determinado por el usuario. *Sin perjuicio de lo anterior, y por defecto de programa, Design Builder no permite utilizar los flujos de aire infiltrado por la envolvente del edificio como condiciones de borde.*

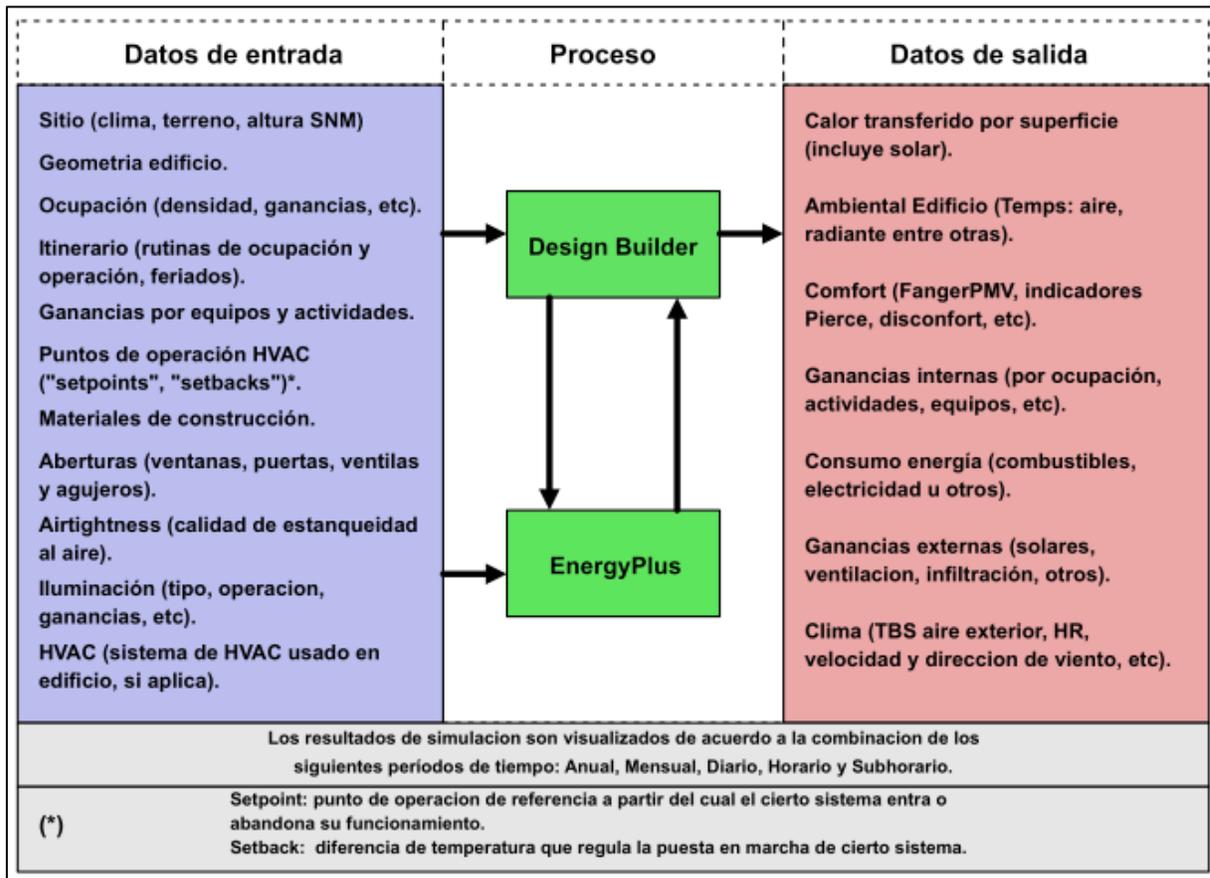


Figura A 6. Diagrama de entrada-salida del sistema de modelado Design Builder-EnergyPlus.

La *figura A.3* presenta un resumen del proceso de modelado utilizado en Design Builder y EnergyPlus, mientras que la *figura A.4* muestra el conflicto que se genera en el programa al intentar establecer datos de simulación, que incluyen infiltración, como condiciones de contorno CFD.

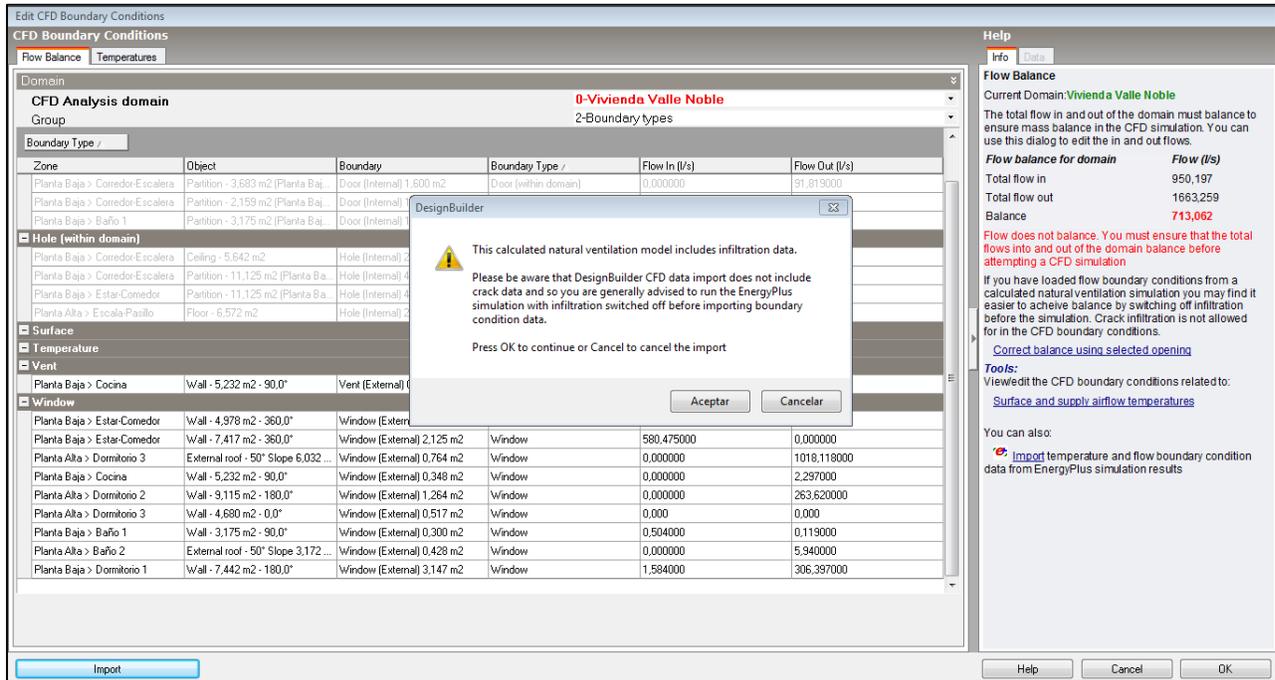


Figura A 7. Ventana de advertencia generada por datos de infiltración en condiciones de borde CFD.

ANEXO 3: Rosas de Viento Concepción.

- Resumen Mensual Periodos 2008 a 2010:

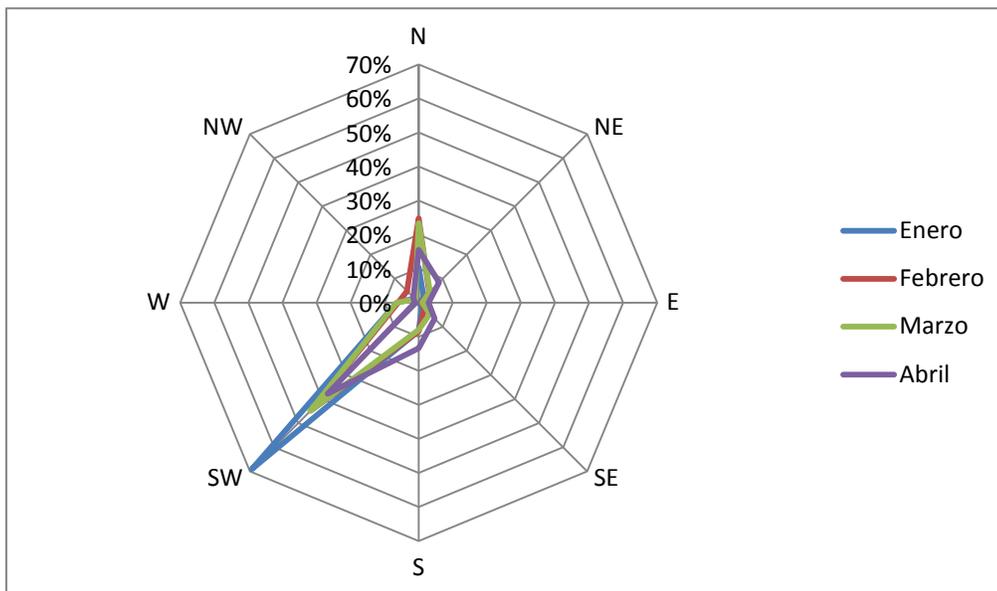


Figura A 8. Rosa de los vientos, resumen meses Enero a Abril 2008-2010.

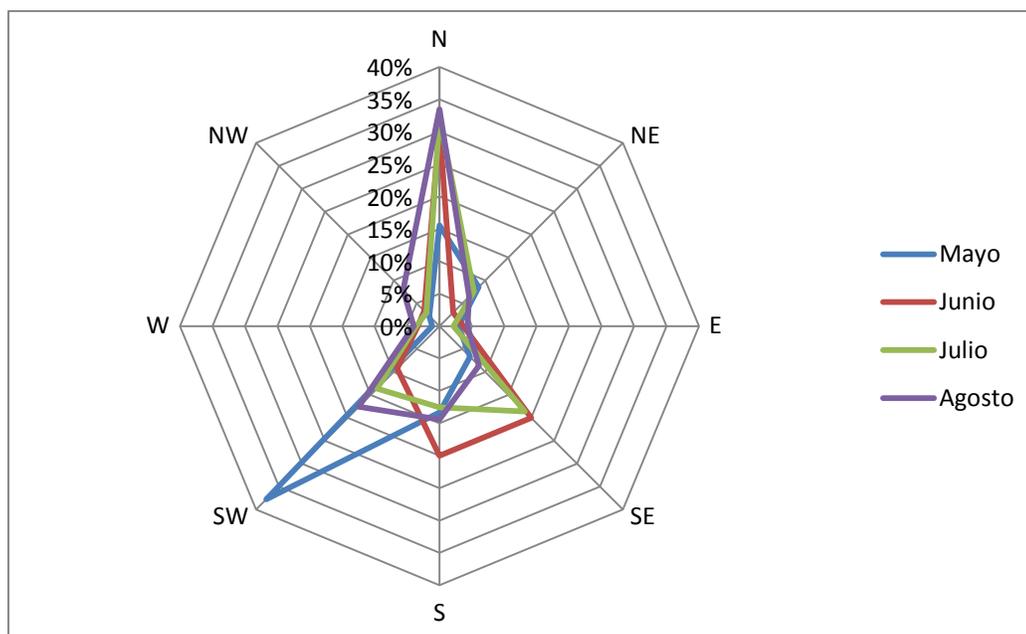


Figura A 9. Rosa de los vientos, resumen meses Mayo a Agosto 2008-2010.

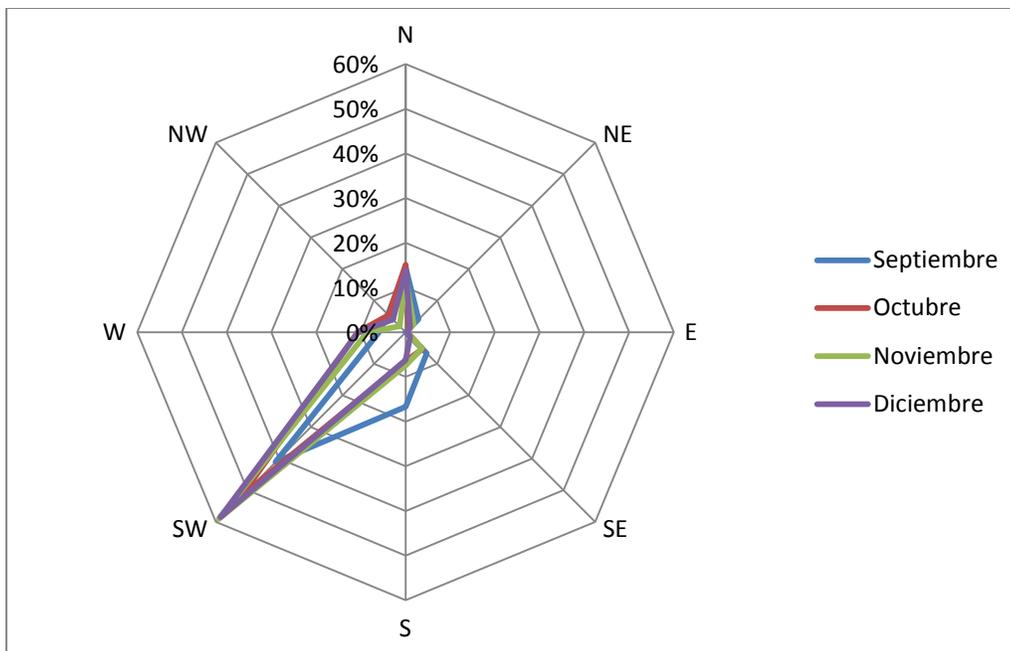


Figura A 10. Rosa de los vientos, resumen meses Septiembre a Diciembre 2008-2010.

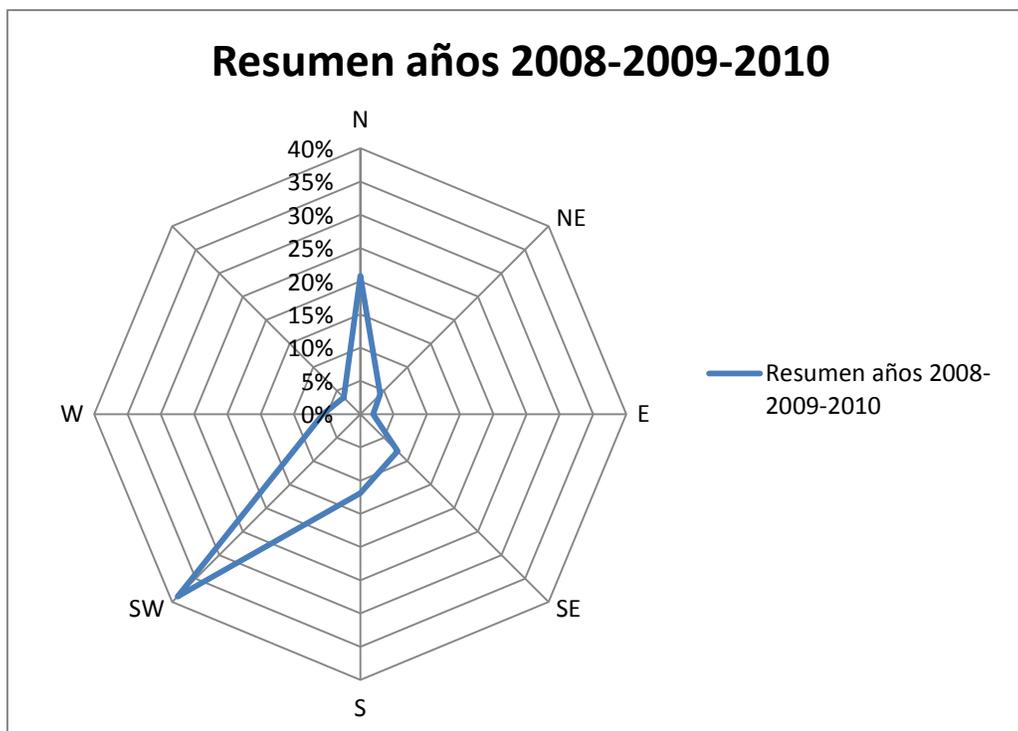


Figura A 11. Rosa de los vientos resumen anual 2008-2010.

Tabla A 1. Resumen mensual y anual de direcciones de viento período 2008 -2010.

Mes	Frecuencia relativa viento.								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calma
	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	
Enero	10%	2%	0%	1%	8%	69%	6%	2%	0,4%
Febrero	25%	4%	1%	2%	8%	45%	6%	5%	3,6%
Marzo	23%	5%	1%	5%	8%	45%	6%	1%	5,4%
Abril	16%	9%	3%	7%	13%	38%	1%	2%	11,9%
Mayo	24%	5%	7%	13%	21%	19%	1%	1%	9,3%
Junio	31%	3%	4%	20%	20%	9%	3%	3%	6,7%
Julio	32%	8%	2%	19%	13%	14%	4%	3%	6,8%
Agosto	33%	6%	4%	9%	14%	18%	4%	8%	3,2%
Septiembre	14%	4%	0%	7%	17%	41%	6%	6%	5,6%
Octubre	15%	1%	0%	5%	6%	52%	11%	5%	3,6%
Noviembre	12%	3%	0%	5%	7%	59%	9%	2%	3,0%
Diciembre	14%	1%	0%	1%	6%	59%	11%	4%	3,6%
AÑO 08-09-10	21%	4%	2%	8%	12%	39%	6%	4%	5,3%

- Resumen año 2002:

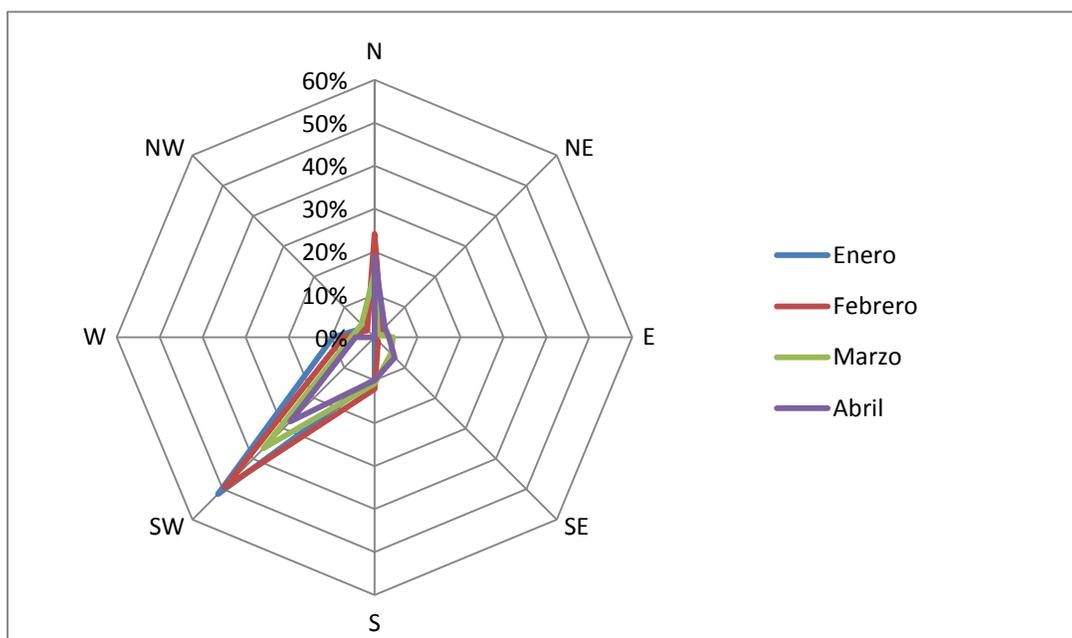


Figura A 12. Rosa de los vientos, resumen meses Enero a Abril 2002.

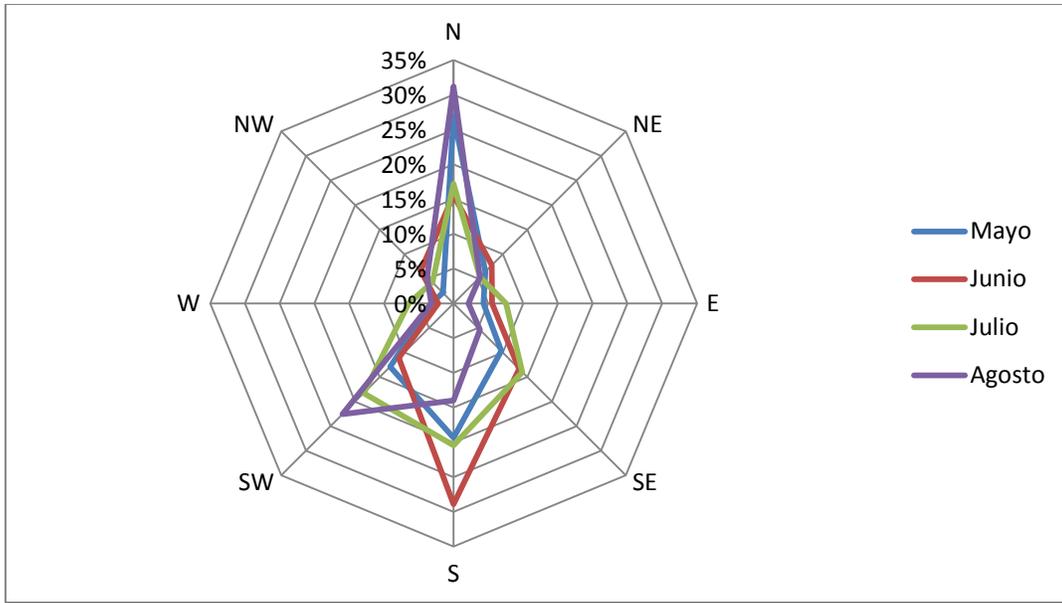


Figura A 13. Rosa de los vientos, resumen meses Mayo a Agosto 2002.

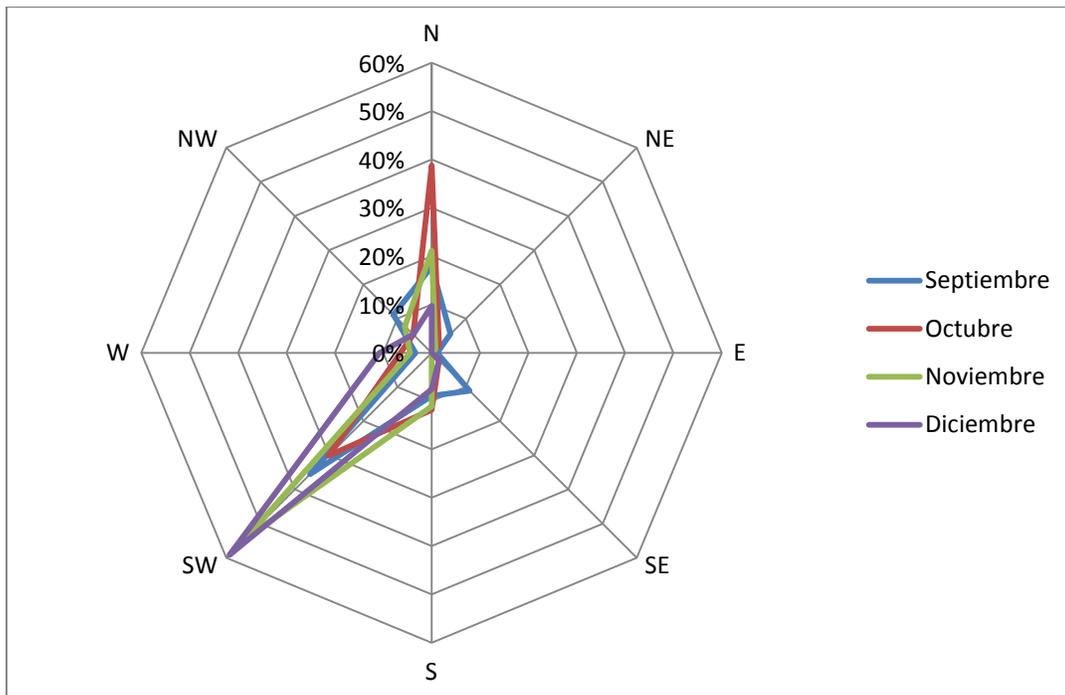


Figura A 14. Rosa de los vientos, resumen meses Septiembre a Diciembre 2002.

Tabla A 2. Resumen mensual y anual de direcciones de viento período 2002.

Mes	Frecuencia y velocidad media del viento (nudos)								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calma
	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	N°	
Enero	16%	3%	0%	0%	10%	52%	10%	3%	6%
Febrero	24%	2%	0%	1%	12%	49%	7%	2%	1%
Marzo	15%	1%	4%	5%	11%	37%	5%	4%	17%
Abril	19%	3%	3%	7%	10%	28%	4%	0%	26%
Mayo	27%	6%	4%	10%	19%	13%	3%	2%	15%
Junio	16%	8%	6%	13%	29%	11%	2%	7%	9%
Julio	17%	5%	8%	14%	20%	18%	6%	4%	6%
Agosto	31%	5%	2%	5%	14%	23%	3%	5%	11%
Septiembre	18%	6%	1%	11%	9%	36%	3%	11%	6%
Octubre	39%	2%	0%	2%	12%	30%	6%	5%	3%
Noviembre	21%	1%	0%	0%	11%	54%	4%	8%	0%
Diciembre	10%	0%	0%	2%	8%	59%	11%	5%	5%
AÑO 2002	21%	4%	2%	6%	14%	34%	6%	5%	9%

ANEXO 4: Gráficos Simulación Vivienda C60 Valle Noble (Extracto).

