



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería – Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica.

**Evaluación del desempeño de sistemas de ventilación residencial controlados por
demanda mediante modelo de flujos de aire multizona**



Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica

NICOLÁS FELIPE RIQUELME ORELLANA

CONCEPCIÓN-CHILE

2019

Profesor Guía: Adelqui Fissore Schiappacasse

Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería

Universidad de Concepción

RESUMEN

El diseño de sistemas de ventilación debe atender objetivos contrapuestos, por una parte, tener un mínimo de funcionamiento para asegurar una calidad del aire adecuada para la salud de las personas y, por otra parte, limitar su funcionamiento para reducir la pérdida de energía térmica que se va con el aire saliente al ventilar. En ese contexto surge la ventilación controlada por demanda.

El objetivo de esta investigación es determinar la efectividad de dos sistemas de ventilación residencial por extracción controlados por demanda sobre una vivienda de características comunes en Chile. También determinar los ahorros energéticos al incluir las estrategias de control y comparar con el caso de funcionamiento continuo sin control.

Las conclusiones se realizan a partir de simulaciones del programa CONTAM. Para ello se modela una vivienda de tamaño y hermeticidad común en Chile, en la cual se simulan dos sistemas de ventilación, uno con extracciones principales en cocina y baños, y otro con extracciones principales en living y dormitorios. El control se basa en la medición de la concentración de dióxido de carbono y así establecer cuando los flujos de ventilación operan a capacidad completa y cuando a capacidad parcial. La exposición de los ocupantes al dióxido de carbono y la disminución en el gasto energético comparado a un funcionamiento continuo, son los parámetros utilizados para evaluar el desempeño de los sistemas de ventilación controlados bajo demanda.

Analizando los resultados es posible observar que, la condición de las puertas interiores (abiertas o cerradas) y la detección del contaminante fueron los factores más influyentes en la efectividad de los sistemas de ventilación. Las puertas interiores cerradas son una condición crítica ya que representan una barrera que rompe la distribución de flujos de aire impuesto por la ventilación, y además provocan un fraccionamiento en la calidad del aire de las distintas zonas. Esto a su vez, provoca que sea difícil realizar una detección representativa de la calidad del aire. Por otra parte, para ambos sistemas de ventilación con control, se registran casos con ahorros energéticos entre 30 y 70% dependiendo de la estrategia utilizada, y manteniendo la calidad de aire en rango aceptable.

Al comparar entre ambos sistemas de ventilación, las extracciones en cocina y baños resultan útiles para depurar contaminantes producidos localmente en esas zonas, sin embargo, su efectividad para depurar contaminantes producidos en otras zonas es muy dependiente de la condición de las puertas interiores, perdiendo efectividad cuando estas se encuentran cerradas. El sistema con extracciones en living y dormitorios resulta mucho más efectivo para depurar contaminantes producidos permanentemente por las personas, sin embargo, se corre el riesgo de dispersar contaminantes de cocina y baños por el resto de la vivienda. Por último, dado un sistema de ventilación, el valor de ajuste del sistema de control resulta un parámetro útil a variar, y así elegir entre una mejor calidad del aire o, por otro lado, lograr mayores ahorros energéticos.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	ii
TABLA DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contextualización.....	1
1.2 Estado del arte	1
1.3 Objetivos	3
1.4 Metodología	3
CAPÍTULO II	5
2 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Tipos de ventilación residencial.....	5
2.1.1 Ventilación residencial natural.....	5
2.1.2 Ventilación residencial forzada.....	9
2.2 Características de los modelos de flujos de aire y transporte de contaminantes multizona ..	12
2.2.1 Modelo de flujos de aire multizona.....	12
2.2.2 Modelo de transporte de contaminantes.....	13
CAPÍTULO III.....	15
3 MODELACIÓN.....	15
3.1 Modelo de la vivienda.....	15
3.1.1 Flujos de aire a través de aperturas no intencionales.....	16
3.1.2 Sistemas de ventilación.....	18
3.2 Condiciones climáticas.....	20
3.3 Escenarios de ocupación propuestos	22
3.4 Contaminantes simulados.....	24
3.5 Control bajo demanda	25
CAPÍTULO IV.....	27
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27

4.1	Infiltraciones de aire.....	28
4.2	Casos base de cada sistema de ventilación.....	29
4.2.1	Caso base Ventilación Convencional.....	29
4.2.2	Caso base Ventilación Alternativa.....	31
4.3	Sistema de Ventilación Convencional controlado por demanda.....	33
4.3.1	Puertas de interés abiertas	33
4.3.2	Puertas de interés cerradas	38
4.3.3	Ahorros energéticos	42
4.4	Sistema de Ventilación Alternativo controlado por demanda.....	42
4.4.1	Puertas de interés abiertas	43
4.4.2	Puertas de interés cerradas	45
4.4.3	Ahorros energéticos	48
CAPÍTULO V		51
5	CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA		52
Anexo A: Pasos de aire en la envolvente de la vivienda		55
Anexo B: Detalle de promedios de exposición al dióxido de carbono y humedad relativa		57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferencia de presión por efecto columna de aire entre ambientes interior-exterior con el interior a mayor temperatura. (ASHRAE, 2005)	6
Figura 2. (a) Distribución de presión simplificada para dirección de viento perpendicular a superficie (b) Distribución de presión simplificada para dirección de viento a 45° de la normal de superficie (Feustel, 1990).	7
Figura 3. a) Ventilación mediante una abertura en un lado de la fachada. b) Ventilación cruzada por dos aberturas en partes opuestas de la fachada. c) Ventilación por efecto chimenea por dos aberturas pequeñas a diferente altura y en el mismo lado de la fachada (MINVU, 2018).	9
Figura 4. Ejemplo de ventilación natural pasiva por efecto chimenea (Fenercom, 2014)	9
Figura 5. Ejemplos de sistemas de ventilación forzada. a) Sistema de flujo simple de extracción. b) Sistema de flujo simple de suministro. c) Sistema de doble flujo con recuperación de calor (Fenercom, 2014)	11
Figura 6. Diagrama de pasos de aire en una vivienda. (ASHRAE, 2005)	12
Figura 7. Vivienda utilizada como base de las simulaciones. (Inmobiliaria PY, 2018)	15
Figura 8. Vista en planta de la vivienda, sus zonas y el área basal de cada una. (Elaboración Propia)	16
Figura 9. Representación de la altura equivalente de las singularidades en componentes constructivos de la envolvente. (Elaboración Propia)	18
Figura 10. Distribución de flujos de extracción y entradas de aire en cada sistema de ventilación. a) sistema convencional; b) sistema alternativo. (Elaboración Propia)	19
Figura 11. Distribución de variables climáticas más importantes durante el periodo de simulación. a) temperatura; b) velocidad del viento; c) humedad específica (INIA, 2018)	21
Figura 12. Variación de coeficiente de presión promedio para edificaciones de pequeño tamaño. (ASHRAE, 2005)	22
Figura 13. Ocupación relativa por zonas durante un día de semana. (Elaboración Propia)	23
Figura 14. Ocupación relativa por zonas durante un día de fin de semana. (Elaboración Propia)	24
Figura 15. Exposiciones por ocupante considerando sólo infiltraciones. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas	28
Figura 16. Exposición al CO ₂ por ocupante [ppm] vs hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema convencional. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas	30
Figura 17. Humedad relativa por zona [%] vs hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema convencional. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas	31
Figura 18. Exposición al CO ₂ por ocupante [ppm] vs hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema alternativo. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas.	31
Figura 19. Humedad relativa por zona [%] vs Hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema alternativo. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas	32
Figura 20. Exposiciones por persona al CO ₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living	35
Figura 21. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila	

superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living	37
Figura 22. Exposiciones por persona al CO ₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living	39
Figura 23. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living	41
Figura 24. Exposiciones por persona al CO ₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para Sistema alternativo con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 Dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo	44
Figura 25. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema alternativo con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 Dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo	45
Figura 26. Exposiciones por persona al CO ₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para sistema alternativo con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo	46
Figura 27. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema alternativo con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de coeficiente empírico para cálculo de velocidad local. (<i>Fissore, 2017</i>)	8
Tabla 2. Valores de exponente empírico para cálculo de velocidad local. (<i>Fissore, 2017</i>)	8
Tabla 3. Tipología y permeabilidad de puerta y ventana considerados en la vivienda. (<i>CITEC, 2014</i>). 17	
Tabla 4. Fuentes de humedad al interior de la vivienda (<i>Trechsel, 1994</i>).	25
Tabla 5. Promedio de RAH de la vivienda durante todo el periodo de simulación para el sistema de ventilación convencional.....	42
Tabla 6. Promedio de RAH de la vivienda durante todo el periodo de simulación para el sistema de ventilación alternativo.....	48
Tabla 7. Detalle de pasos de aire en la envolvente de la vivienda.	55
Tabla 8. Detalle de pasos de aire en la envolvente de la vivienda (continuación).....	56
Tabla 9. Indicadores de exposición de todo el periodo de simulación para el sistema convencional. ...	57
Tabla 10. Indicadores de humedad relativa de todo el periodo de simulación para el sistema convencional.	58
Tabla 11. Indicadores de exposición de todo el periodo de simulación para el sistema alternativo.....	58
Tabla 12. Indicadores de humedad relativa de todo el periodo de simulación para el sistema alternativo.	58



NOMENCLATURA

Abreviaturas

B1	: Baño principal o número 1
B2	: Baño secundario o número 2
C	: Cocina
CAI	: Calidad del aire interior
CO ₂	: Dióxido de carbono
D1	: Dormitorio 1 o principal
D2	: Dormitorio número 2
D3	: Dormitorio número 3
L	: Living - comedor
P1	: Persona u ocupante número 1
P2	: Persona u ocupante número 2
P3	: Persona u ocupante número 3
P4	: Persona u ocupante número 4
VCD	: Ventilación controlada por demanda



Variables físicas

a	: Exponente empírico para determinar velocidad del viento local
A_w	: Coeficiente empírico para determinar velocidad del viento local
CF	: Coeficiente de flujo, $m^3/(h \cdot Pa^n)$
C	: Concentración, kg/kg
C_p	: Coeficiente de presión
F	: Flujo másico de aire, kg/h
g	: Aceleración de gravedad, m/s^2
HR	: Humedad relativa, %
m	: Masa, kg
n	: Exponente de flujo
P	: Presión, Pa
ΔP	: Variación de presión, Pa

Q	: Flujo volumétrico de aire, m ³ /h
R	: Tasa de remoción, kg/s
RAH	: Renovaciones de aire por hora, 1/h
v	: Velocidad del aire, m/s
V	: Volumen, m ³
z	: Altura, m

Letras griegas

α	: Contaminante alfa
β	: Contaminante beta
η	: Eficiencia de filtro
κ	: Coeficiente cinemático de reacción, 1/s
ρ	: Densidad, kg/m ³

Subíndices

0	: Valor de referencia
i	: Zona i
j	: Zona j
L	: Local
s	: Stack effect (efecto columna de aire)
w	: Wind (viento)



CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización

Las personas pasan gran parte de su tiempo en ambientes cerrados y más concretamente en sus viviendas (Klepeis et al., 2001). Por eso es importante mantener condiciones óptimas para su salud al interior, las cuales dependen en gran parte de la calidad del aire interior (CAI). El aire al interior es constantemente deteriorado debido a las distintas actividades y situaciones cotidianas en la vivienda como cocinar, bañarse, incluso respirar. Ambientes interiores contaminados favorecen la transmisión de enfermedades respiratorias, pueden afectar al rendimiento y productividad de las actividades y degradan la calidad del aire percibida (Seppanen & Fisk, 2014). La Organización Mundial de la Salud OMS (2014) cifra en más de 4 millones de muertos debido a problemas de contaminación residencial durante el año 2012.

Durante el proceso de ventilación entra a la vivienda aire exterior “fresco” de modo de diluir y evacuar los contaminantes producidos en ella manteniéndolos en concentraciones aceptables. Mientras mayor es el número de intercambios de aire provocados por la ventilación, mayor es la evacuación de contaminantes y con esto una mejor calidad del aire. Sin embargo, al ventilar se pierde energía térmica puesto que se expulsa aire del interior climatizado, incurriendo en un gasto energético al climatizar el aire entrante de exterior. En respuesta a esta disyuntiva surge la Ventilación Controlada por Demanda VCD, en la cual se controlan los flujos de ventilación disminuyendo o suspendiendo temporalmente la ventilación para producir un ahorro energético respecto a su funcionamiento permanente sin control.

Chile aún no cuenta con normativas que exijan una calidad mínima del aire interior de la vivienda ni propuestas de sistemas de ventilación residencial. Por eso como contribución de esta investigación es generar antecedentes sobre ventilación en viviendas de contexto nacional para su posible consideración en la generación de estándares u otros sobre ventilación en Chile.

1.2 Estado del arte

Recientemente Guyot, Sherman, & Walker (2018) realizan una revisión a la literatura sobre casos de ventilación “inteligente” en ambiente residencial, encontrando 38 casos entre revisiones a la literatura previas y su trabajo propio. De esta revisión sólo se presentan algunos casos más relevantes para esta investigación.

Nielsen (1992) estudia el rendimiento de un sistema VCD basado en la humedad instalado en una casa unifamiliar nueva en Dinamarca, ocupada por dos personas jubiladas durante aproximadamente 21 horas al día durante un mes. El sistema consiste en la impulsión de aire en cada habitación, incluyendo

la cocina y el baño, con extracciones en el baño y en una sala de lavado conectada a la cocina. Una compuerta de regulación en el ducto de entrada de cada habitación regula el flujo de aire en respuesta a las mediciones de temperatura y humedad relativa (HR). Los sensores se encuentran en cada habitación y en el ducto de entrada. Dos criterios controlan el funcionamiento del sistema de ventilación: en primer lugar, la humedad relativa debe permanecer por debajo del 45% para evitar el crecimiento de ácaros del polvo doméstico; y en segundo lugar, debe evitarse la condensación en las ventanas de vidrio de doble panel. Además, los autores fijaron el caudal de aire mínimo en 10 l/s y el caudal de aire máximo en 35 l/s. El controlador toma la decisión de cambiar el flujo de aire para mantener estos criterios cada 1 minuto. Como resultado, la tasa total de flujo de aire podría reducirse al 39% por debajo del requisito del código danés, con una HR que superaba el 45% sólo alrededor del 10% del tiempo, y de 47% sólo entre 1 a 5% del tiempo. Durante el tiempo de monitoreo no se observó condensación, o no se predijo en base a los resultados de la HR. Las concentraciones de CO₂ fueron inferiores a 1200 ppm el 98% del tiempo.

Afshari & Bergsøe (2003) presentan un proyecto de 5 años sobre la evaluación y el desarrollo de estrategias innovadoras de energía y ventilación. Calcularon un ahorro de energía del 20-30% de la energía relacionada con la ventilación, para un sistema de ventilación controlado por HR, confirmado por mediciones en un departamento de prueba. En este departamento, se simuló la ocupación de dos personas y las emisiones de materiales y mobiliario en la sala de estar. En primer lugar, instalaron un sistema estándar de ventilación sólo por extracción, con un caudal constante de 35 l/s (20 l/s en la cocina y 15 l/s en el baño). A continuación, instalaron extracciones controladas por HR y entradas pasivas controladas por HR. Los caudales base fueron de 10 l/s en zonas húmedas. Una humedad relativa del 45% activa un flujo alto de 50 l/s en la cocina y 20 l/s en el baño. Como resultado, incluso con un flujo de extracción más alto en la cocina algunas veces, la tasa de ventilación de la vivienda se redujo al 20-30% del caso de referencia. La concentración máxima de CO₂ en el salón se reduce en un 10% y la concentración de contaminantes emitidos por materiales y mobiliario en el salón se mantiene al mismo nivel cuando el edificio está ocupado y puede reducirse en un 50% el resto del tiempo. La concentración máxima de CO₂ en el dormitorio se duplica de 600 a 1200 ppm.

Pavlovas (2004) modeló un apartamento típico sueco equipado con cuatro tipos de ventilación de sólo extracción con el software IDA Climate and Energy. Los cuatro tipos de ventilación fueron: [1] Un sistema de referencia que proporciona un flujo de aire constante, [2] Un sistema VCD basado en CO₂ con sensores en cuartos húmedos (cocinas y baños), [3] Un sistema VCD basado en la humedad con sensores en cuartos húmedos, [4] Un sistema VCD basado en la ocupación. En todos los sistemas, el caudal de aire de extracción varía desde un caudal base de 10 l/s hasta 30 l/s cuando es necesario. Se probaron diferentes puntos de ajuste: 800, 1000 y 1200 ppm para el control basado en CO₂, y 60, 70 y 80% para el umbral máximo de humedad. También se probó la posición de las puertas interiores (cerradas o abiertas). Los autores juzgaron la calidad del aire a través de las concentraciones de CO₂ y los altos niveles de humedad. Tanto la VCD basada en el CO₂ como la VCD basada en la ocupación dieron lugar a similares concentraciones de CO₂, pero aumentaron el riesgo de altos niveles de humedad. La VCD basada en la HR aumentó las concentraciones de CO₂. Tanto las estrategias de CO₂ como las de HR resultaron en un ahorro anual de la demanda de calefacción de más del 50%, y el sistema basado en la ocupación, en un 20% de ahorro de energía. Los mayores ahorros de energía, sin comprometer la calidad del aire interior, se obtuvieron con los siguientes puntos de ajuste: 1200 ppm para la concentración de CO₂ y 80% para el alto umbral de humedad relativa.

Laverge et al. (2011) prueba el rendimiento de cuatro enfoques para DCV en una casa típica belga: 1) control de humedad en las habitaciones húmedas con una estrategia de "encendido y apagado" basada en la humedad relativa medida en el aire de escape con un punto de referencia del 70%, 2) control de ocupación, con una estrategia de "encendido y apagado" del ventilador en funcionamiento una vez que se detectan 20 minutos de ocupación, 3) control de CO₂ en las habitaciones secas (dormitorios y sala de estar) con entradas de aire reducidas a un 10% de apertura, si la concentración de CO₂ es menor de 1000 ppm en la habitación, y 4) los tres enfoques anteriores combinados. El modelado multizona se realizó con CONTAM y los resultados se compararon con la ventilación de caudal constante sólo de escape de referencia. Se utilizaron dos indicadores de calidad del aire interior: 1) El exceso medio de concentración de CO₂ por encima de 1000 ppm al que está expuesto un ocupante durante la temporada de calefacción y 2) la exposición a un gas trazador emitido en habitaciones con inodoro (eficiencia del escape para eliminar la humedad en la fuente). El total de la pérdida de calor a través de los ahorros de ventilación estuvo en el rango de 25% (sólo un parámetro de control) a 60% (tres combinados). La detección de CO₂ en habitaciones secas fue más robusta que en las otras habitaciones. La reducción del tamaño de la entrada hace que la responsabilidad de la gestión del sistema aerodinámico recaiga en el ventilador, más que en el viento o el efecto columna de aire. Análisis complementarios con diferentes niveles de permeabilidad de la envolvente confirmaron este análisis. Los resultados del indicador CO₂ fueron mejores con el control de CO₂ y de la ocupación. La exposición al gas trazador del baño bajo todas las estrategias fue similar.

Como se puede apreciar las estrategias de VCD se basan en parámetros y criterios similares, sin embargo, sus desempeños son muy variables dependiendo de las condiciones de simulación. Por eso es importante estudiar este tipo de estrategias de control, pero en entorno nacional.

1.3 Objetivos

En objetivo principal de esta investigación es determinar la efectividad de dos sistemas VCD basados en CO₂ para asegurar una aceptable calidad del aire interior de una vivienda con características comunes en Chile.

Otro objetivo principal es determinar los ahorros energéticos que es posible alcanzar con las estrategias de control por demanda para cada sistema de ventilación

Los objetivos específicos son determinar condiciones críticas para la efectividad de ambos sistemas de ventilación. También determinar con cuál sistema es posible obtener una mayor calidad del aire y con qué sistema mayores ahorros energéticos.

1.4 Metodología

Para determinar los objetivos propuestos se simulan las VCD sobre una vivienda de tamaño y hermeticidad común en Chile mediante un software basado en flujos de aire multizona. El aire al interior de la vivienda se modela como 8 zonas con distintas conectadas mediante las puertas interiores. Los flujos de aire a través de la estructura de la vivienda, se modelan principalmente mediante grietas

de aire a través de diferentes componentes constructivos. Los sistemas de ventilación se modelan como flujos de aire constantes ubicados en distintas partes de la vivienda, y regulados solamente por el sistema de control. Se utilizan condiciones climáticas de una estación meteorológica local y se simula durante los seis meses más fríos. El primer sistema de ventilación consiste en la convencional extracción en cocina y baños, el segundo sistema de extracción estudiado más alternativo con extracciones en living y dormitorios. El caso base de cada sistema de ventilación corresponde al caso de mayor gasto energético, esto es, funcionamiento continuo y a máxima capacidad durante todo el periodo de simulación. El control por demanda para ambos sistemas de extracción se basa en determinar cuando los flujos de extracción funcionan a capacidad completa y cuando en forma parcial, esto basado en la medición de concentración de dióxido de carbono. La exposición de cada ocupante de la vivienda al dióxido de carbono, y los ahorros energéticos comparados con el caso base, son los parámetros principales para evaluar el desempeño de los sistemas de ventilación. En cada sistema de ventilación se varían principales parámetros como la condición de puertas interiores (abiertas o cerradas), ubicación de sensores de dióxido de carbono, y valor de ajuste del sistema de control.



CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Tipos de ventilación residencial

Ventilar se refiere a la acción de renovar o reemplazar el aire viciado de un lugar por aire fresco con objetivo de proveer un ambiente interior confortable y mantener una buena calidad del aire interior. Usualmente el aire fresco es aire del exterior que se hace entrar por algún medio al interior de las viviendas. Este intercambio de aire se puede llevar a cabo por ventilación forzada (también llamada mecánica), natural o por infiltración. La ventilación incluye la introducción intencional de aire desde el exterior hacia una residencia, esta puede ser ventilación natural y/o ventilación forzada. La ventilación natural es el flujo de aire a través de ventanas abiertas, puertas, rejillas y otros orificios planificados que se encuentren en la envolvente de la vivienda, es impulsada por diferenciales de presión provocados en forma natural. Por otra parte, la ventilación forzada se refiere al movimiento intencional del aire que entra y/o sale de una vivienda, impulsado por una diferencia de presión impuesta entre el interior y exterior de la vivienda, mediante el uso de ventiladores mecánicos.

La infiltración es el flujo de aire desde el exterior hacia el interior de una edificación a través de grietas y otras aberturas no intencionales como grietas o rendijas. Sus mecanismos de impulsión son los mismos de la ventilación natural. Un parámetro importante relacionado con la infiltración es la hermeticidad al aire de los elementos constructivos en la envolvente de la vivienda, a menor hermeticidad mayores son las infiltraciones y viceversa.

Una medida globalmente usada en este ámbito para medir la velocidad de renovaciones de aire de un recinto, son las Renovaciones Aire por Hora (RAH), las cuales indican las veces que se cambia el volumen de aire de un recinto en una hora. Este índice se calcula como lo muestra la siguiente ecuación.

$$RAH = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

A continuación, se detallan los más comunes tipos de ventilación natural y forzados que se utilizan en ambiente residencial.

2.1.1 Ventilación residencial natural

La ventilación natural es toda aquella ventilación que aproveche las diferencias de presión generadas naturalmente para ventilar una vivienda, sin uso de aparatos electro-mecánicos como ventiladores. Este tipo de ventilación y al igual que las infiltraciones se producen por diferencias de presiones producidas naturalmente por dos formas.

Debido a efecto columna de aire

La presión por efecto chimenea o columna de aire es la presión causada por el peso de una columna de aire localizado dentro o fuera de la vivienda, la cual es función de la altura considerada y la densidad del aire.

Dada una temperatura y presión barométrica a la altura de interés, la presión columna de aire decrece linealmente conforme aumenta la altura con respecto a un punto de referencia. Para una sola columna de aire, la presión columna de aire se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$P_s = P_0 - \rho \cdot g \cdot z \quad (2)$$

Como usualmente el interior y exterior de la vivienda se encuentran a diferentes temperaturas, se generan diferencias en los gradientes de presión de las columnas de aire interior y exterior de la vivienda, estas diferencias son las que conducen a flujos de aire a través de ventanas, puertas o grietas en la envolvente. En la Figura 1 se esquematiza este efecto sobre una vivienda con ambiente interior a mayor temperatura que el exterior, y donde el nivel de presión neutra, que es la altura donde la diferencia de presión entre interior y exterior es nula, se ubica a mitad de la altura de la vivienda. Para esta situación, una abertura sobre el nivel de presión neutra produce un flujo de salida de la vivienda, mientras que una abertura bajo el nivel de presión neutra genera un flujo de entrada.

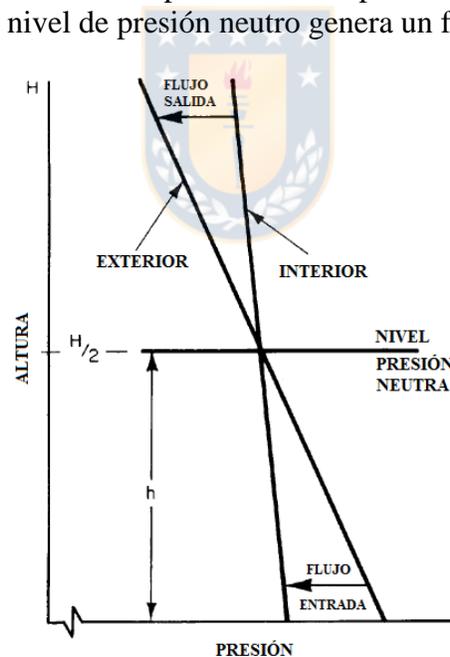


Figura 1. Diferencia de presión por efecto columna de aire entre ambientes interior-exterior con el interior a mayor temperatura. (ASHRAE, 2005)

Debido a efecto del viento

La llegada de viento a un edificio provoca una distribución de presión estática en las superficies exteriores del edificio. Esta presión de viento es afectada por diversos factores como su dirección, velocidad, densidad del aire, orientación de la superficie y condiciones de los alrededores del recinto

entre otras. La presión de viento es generalmente positiva con respecto a la presión estática de una corriente no perturbada sobre el lado barlovento de una edificación y negativa en su lado sotavento. Sin embargo, el signo de la diferencia de presión dependerá también de la dirección del viento y de la forma de la envolvente tal como lo muestra la Figura 2.

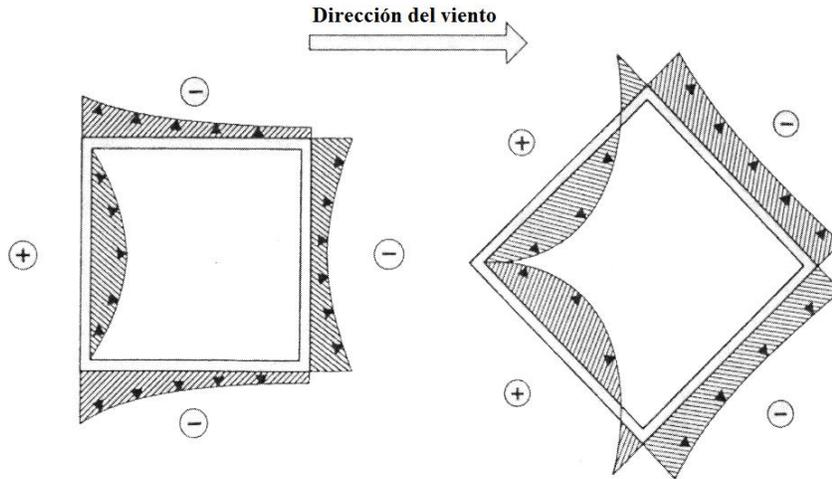


Figura 2. (a) Distribución de presión simplificada para dirección de viento perpendicular a superficie
(b) Distribución de presión simplificada para dirección de viento a 45° de la normal de superficie
(Feustel, 1990).

La expresión que permite calcular esta presión viene dada por la siguiente ecuación que se deriva de la ecuación de Bernoulli y que se presenta en la literatura (ASHRAE, 2005)

$$P_w = C_p \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

El coeficiente de presión C_p es adimensional. Su valor depende de la ubicación de la vivienda respecto a sus alrededores y de la dirección del viento, físicamente representa la razón entre la presión superficial y la presión dinámica de una corriente no perturbada.

Por otra parte, la velocidad que se utiliza en la Ecuación 3 es la que llega a la edificación (local), sin embargo, típicamente sólo se cuenta con mediciones de viento de las estaciones meteorológicas cuyo entorno de medición puede variar significativamente del entorno de la edificación. La velocidad local en el lugar de interés se puede obtener considerando un perfil de velocidad que se recomienda en la literatura (Fissore, 2017) según la siguiente ecuación:

$$v = A_w \cdot v_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^a \quad (4)$$

Donde z_0 se refiere a una altura de referencia del lugar de mediciones que comúnmente es un aeropuerto a una altura de 10 m. Además v_0 a la velocidad del lugar de medición. La ecuación anterior además supone que el flujo de viento es isotérmico, horizontal, y que el flujo no cambia de dirección por la rugosidad del terreno, es decir, que el viento que llega a la vivienda tiene la misma dirección que en el lugar de medición.

El coeficiente empírico A_w relaciona la velocidad del viento medida en una zona despejada y la existente en el lugar de interés. En la Tabla 1 se entregan valores típicos de este coeficiente entregados por la literatura.

Tabla 1. Valores de coeficiente empírico para cálculo de velocidad local. (Fissore, 2017)

Caso	A_w
Cuando el lugar del estudio se encuentra en un lugar muy despejado o cuando la velocidad de viento se mide justo en el lugar de interés	1
Cuando el sitio de interés se encuentra en una zona suburbana	0,6
Cuando el sitio de interés se encuentra en una zona urbana	0,35

Por otro lado, el exponente empírico a se define en función de la rugosidad del terreno, valores típicos son los mostrados en la Tabla 2

Tabla 2. Valores de exponente empírico para cálculo de velocidad local. (Fissore, 2017)

Caso	a
Construcciones aledañas de muy poca altura, pequeñas obstrucciones y zonas descubiertas.	0,12
Terreno ondulado con obstrucciones tales como árboles o pequeñas casas	0,26
Área urbana céntrica con grandes construcciones.	0,38

Ejemplos de sistemas de ventilación natural

La ventilación natural es habitual en las viviendas produciéndose por ejemplo al abrir las ventanas y/o puertas para que entre viento. En la Figura 3 se muestran los tipos de ventilación típicos mediante ventanas. En a) la ventilación por una gran abertura en un lado de la vivienda, en b) ventilación cruzada que es cuando se tienen grandes aberturas en partes opuestas de la vivienda y en c) ventilación por efecto columna de aire en dos aberturas menores a diferentes alturas en un lado de la fachada. Además, aparecen algunas recomendaciones de las dimensiones de alto y ancho del recinto para facilitar dichos tipos de ventilación.

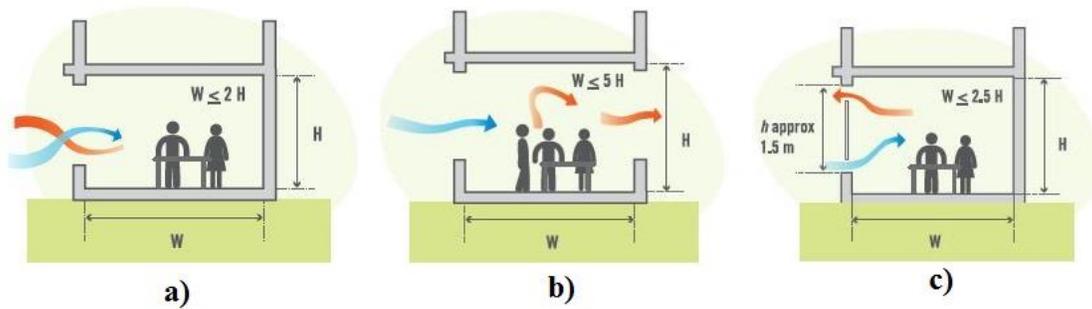


Figura 3. a) Ventilación mediante una abertura en un lado de la fachada. b) Ventilación cruzada por dos aberturas en partes opuestas de la fachada. c) Ventilación por efecto chimenea por dos aberturas pequeñas a diferente altura y en el mismo lado de la fachada (MINVU, 2018).

Otro ejemplo de ventilación natural, es uno autónomo por efecto chimenea como en mostrado en la Figura 4, donde se conectan mediante ductos verticales las zonas de extracción con el ambiente exterior. Por el efecto columna de aire se induce un flujo de salida por el conducto, creando zonas de subpresión en la vivienda e induciendo a la vez la entrada de aire desde el exterior por las aberturas de la envolvente como grietas o rejillas. Normalmente las zonas de extracción son las húmedas como baños y cocinas y las aberturas de admisión se ubican en las demás zonas. Además, se debe disponer de rejillas de paso de aire en las puertas interiores para asegurar el correcto desplazamiento del aire.

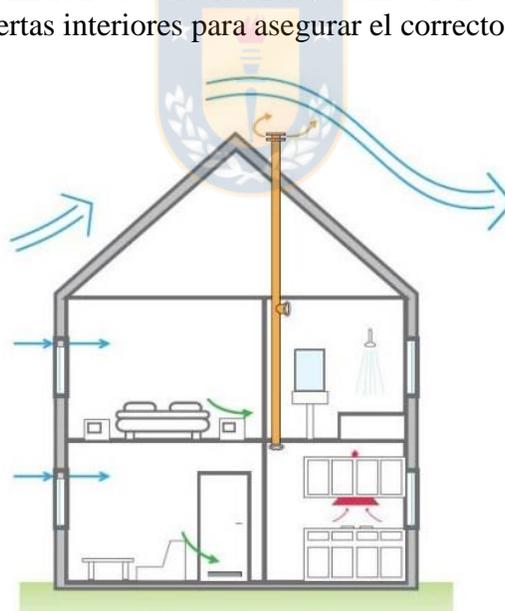


Figura 4. Ejemplo de ventilación natural pasiva por efecto chimenea (Fenercom, 2014)

2.1.2 Ventilación residencial forzada

La ventilación forzada o mecánica consiste en el suministro de aire exterior y/o en la extracción de aire interior mediante electro-máquinas como ventiladores o aspiradores.

El funcionamiento de los equipos mecánicos, como los sistemas de suministro o extracción, afecta las diferencias de presión en la envolvente del edificio. La presión estática interior se ajusta de tal manera que la suma de todos los flujos de aire a través de las aberturas en la envolvente de la vivienda más los flujos de aire inducidos por el equipo se equilibren a cero. Estos sistemas mecánicos provocan una interacción entre el sistema mecánico y la hermeticidad de la vivienda, por ejemplo, el aire expulsado de un edificio por un sistema de extracción de toda la vivienda debe equilibrarse aumentando el flujo de aire en la vivienda a través de otras aberturas. Como resultado, al ocupar un sistema forzado el flujo de aire en algunas ubicaciones cambia de flujo de salida a flujo de entrada. Para los ventiladores de suministro, la situación se invierte y los flujos de entrada se convierten en flujos de salida.

Ejemplos de ventilación forzada

En general los tipos de ventilación mecánica se clasifican dependiendo si son de flujo simple o de doble flujo. Los sistemas de flujo simple se ocupan de la extracción mecánica, o el suministro mecánico, pero no ambos juntos. Por el otro lado, el sistema de ventilación mecánica de doble flujo consiste en manipular tanto la extracción y el suministro mediante elementos mecánicos. En la Figura 5 se puede ver lo descrito. En a) se tiene un sistema de flujo simple de extracción, en este tipo de sistemas por efecto de la extracción se crea una sub-presión en la vivienda con respecto a la presión exterior, esto incentiva la entrada de aire por aberturas o grietas que se deben ubicar en los recintos donde no se extrae. En b) se tiene un sistema de flujo simple de suministro, en este caso la entrada de aire es la realizada por ventiladores, este hecho hace que en las distintas zonas se tenga una sobre-presión con respecto a la presión exterior incentivando la salida de aire por aberturas o grietas. En c) se tiene un sistema de doble flujo, y en este caso con recuperación de calor, en este tipo de sistema los flujos de entrada y salida intercambian calor para mejorar la eficiencia energética del proceso de ventilación. El sistema de doble flujo puede tener recuperación de calor o no dependiendo si los sistemas de extracción-impulsión son interconectados o no.

Para su correcto funcionamiento estos sistemas requieren rejillas de paso ubicadas en las puertas interiores de la vivienda, y aberturas de admisión o expulsión según sea el caso en la envolvente de la vivienda. Además, la ventilación puede ser de funcionamiento continuo durante la ocupación de la vivienda o de funcionamiento intermitente controlado por ocupación o algún sistema de control que cuente con sensores de presencia o de concentración de algún contaminante.

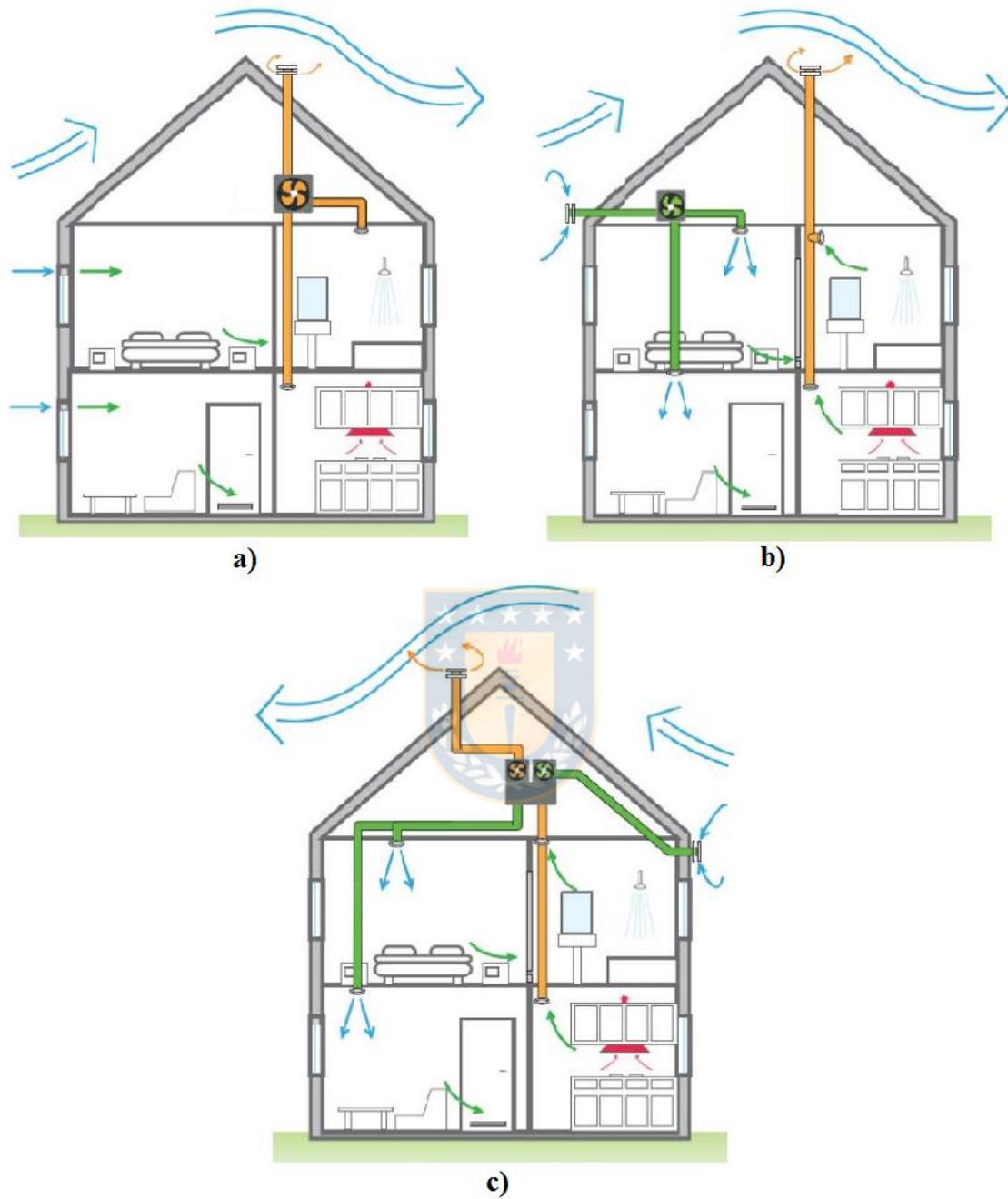


Figura 5. Ejemplos de sistemas de ventilación forzada. a) Sistema de flujo simple de extracción. b) Sistema de flujo simple de suministro. c) Sistema de doble flujo con recuperación de calor (*Fenercom, 2014*)

2.2 Características de los modelos de flujos de aire y transporte de contaminantes multizona

2.2.1 Modelo de flujos de aire multizona

Como se ha mencionado en esta investigación se utiliza un modelo multizona, a continuación, se presentan algunas características generales basadas en la literatura al respecto (ASHRAE, 2005).

Los modelos de flujos de aire multizona o de red de flujos idealizan una edificación como un conjunto de zonas, como dormitorios, pasillos, y ductos, unidos mediante pasos de aire representando puertas, ventanas, muros, ventiladores, etc. Así, el usuario ensambla la descripción de una edificación conectando las zonas mediante los pasos de aire adecuados.

Los modelos multizona predicen los flujos de aire zona a zona basados en la característica de presión que posea cada paso de aire y la diferencia de presión a través de este paso de aire. Tres tipos de fuerzas motivan los flujos mediante los pasos de aire: viento, diferencia de temperatura (efecto columna de aire), y aparatos mecánicos como extractores.

Como lo mostrado en la Figura 6, la red de flujos de aire se puede comparar con una red eléctrica. Los flujos de aire corresponden a la corriente eléctrica y la presión de cada zona actúa como el voltaje de un nodo eléctrico. Además, donde los pasos de aire corresponden a las resistencias y los extractores como una fuente de voltaje (batería).

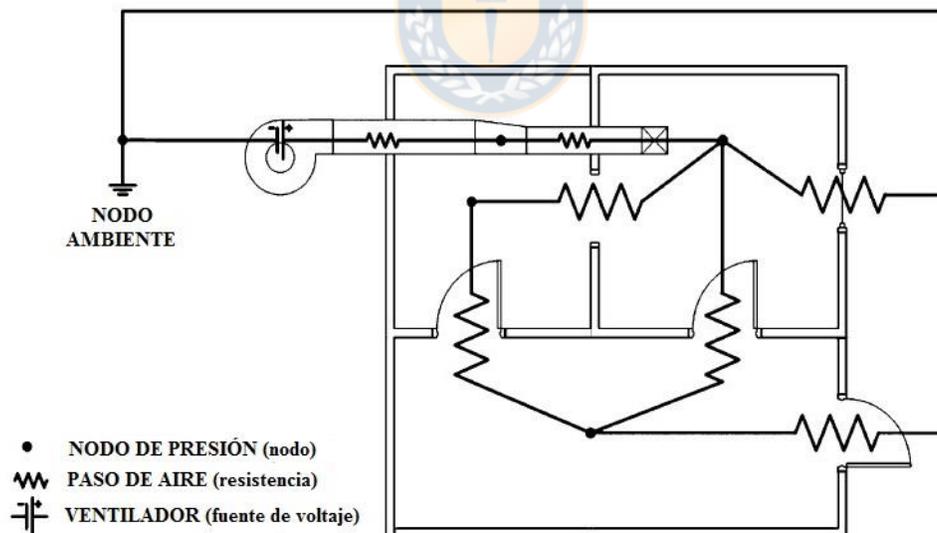


Figura 6. Diagrama de pasos de aire en una vivienda. (ASHRAE, 2005)

A diferencia de los modelos de dinámica de fluidos computacionales (CFD), los modelos multizona no prescriben detalles de flujos dentro de una zona. Así, para cualquier paso de tiempo, una zona perteneciente a la red de flujos es caracterizada por una única presión. La presión en la zona varía sólo según la altura, por ejemplo, usando la ecuación simple de la hidrostática. La densidad del aire es determinada por la ecuación de estado para gases ideales, basado en la presión de referencia de la zona,

temperatura y la constante de gas de la mezcla de aire. La temperatura de cada zona es dada ya sea directamente por el usuario, o mediante un modelo térmico independiente. La constante de gas del aire es típicamente asumida igual a la constante del aire seco.

En la modelación multizona, el modelo de los pasos de aire provee la mayoría del detalle de la modelación. Típicamente, la tasa del flujo de aire $F_{j,i}$ desde la zona j a la zona i , es dado por alguna función de la caída de presión $P_j - P_i$ a través del paso de aire:

$$F_{j,i} = f(P_j - P_i) \quad (5)$$

Varios modelos representan distintos tipos de pasos de aire, pero todos ellos típicamente no lineares. Por ejemplo, el modelo “power-law” es comúnmente implementado como:

$$Q = CF \cdot (\Delta P)^n \quad (6)$$

donde: $Q = F/\rho$ = tasa de flujo volumétrico de aire; ΔP = caída de presión a través del paso de aire, Pa; CF = coeficiente de flujo; n = exponente de flujo (típicamente entre 0,5 y 0,6); ρ = densidad del aire a través del paso de aire.

En la Ecuación 6 la diferencia de presión se asume gobernada por la ecuación de Bernoulli, lo que explica la presión estática en cada extremo del paso de aire y las diferencias de presión a través del paso de aire causado por cambios en la densidad y altura. En los pasos de aire que conectan con la fachada de la edificación, la presión también podría depender de la presión impuesta por el viento.

Los modelos multizona se desarrollan a través de la ecuación de conservación de la masa aplicada al aire para cada una de las zonas. Los flujos de aire son calculados típicamente para condiciones de equilibrio. Esto es razonable para la mayoría de los casos en que las fuerzas impulsoras cambian lentamente comparado al flujo de aire. Bajo esta suposición, la conservación de la masa para una zona i queda expresada simplemente por la siguiente ecuación:

$$\sum_j F_{j,i} = 0 \quad (7)$$

donde $F_{j,i}$ = tasa de flujo de aire entre zonas j e i (valor positivo indica flujo desde j hacia i , flujo negativo indica flujo desde i hacia j).

Este modelo se basaba en el supuesto de que para un instante los flujos de aire son estacionarios y que la resistencia de las zonas al flujo de aire es insignificante en relación con la resistencia impuesta por los pasos de flujo de aire que conectan las zonas.

2.2.2 Modelo de transporte de contaminantes

El modelo de transporte de contaminantes generalmente se enfoca en el transporte de contaminantes por advección mediante los flujos de aire entre las zonas y flujos de sistemas mecánicos. Los contaminantes se pueden ver afectados por: generación de contaminantes por varias fuentes o

reacciones químicas, remoción de contaminantes por filtración, reacción química, decaimiento radiactivo, decantación, o absorción.

A diferencia de los modelos CFD, el detalle de la distribución de contaminante dentro de una zona no es modelado: cada zona es considerada bien mezclada y caracterizada por una sola concentración a cada paso de tiempo.

Generalmente la resolución del modelo consiste en resolver un conjunto de ecuaciones de balance de masa para cada contaminante en cada zona.

La masa de contaminante α en la zona i se expresa como:

$$m_{\alpha,i} = m_i \cdot C_{\alpha,i} \quad (8)$$

donde m_i es la masa de aire en la zona i y $C_{\alpha,i}$ es la concentración en fracción de masa de alfa.

El contaminante es removido desde la zona i debido a:

- Flujos de aire hacia el exterior de la zona a una tasa de $\sum_j F_{i,j} \cdot C_{\alpha,i}$ donde $F_{i,j}$ es la tasa de flujo de aire desde la zona i hacia la zona j .
- Remoción a una tasa de $R_{\alpha,i} \cdot C_{\alpha,i}$ donde $R_{\alpha,i}$ es el coeficiente de remoción.
- Reacciones químicas de primer orden con otros contaminantes $C_{\beta,i}$ a una tasa de $m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha,\beta} \cdot C_{\beta,i}$ donde $\kappa_{\alpha,\beta}$ es el coeficiente cinético de reacción en la zona i entre las especies α y β .

El contaminante es añadido a la zona por:

- Flujos de aire entrantes a una tasa de $\sum_j F_{i,j} \cdot (1 - \eta_{\alpha,i}) \cdot C_{\alpha,j}$ donde $\eta_{\alpha,i}$ es la eficiencia del filtro en el paso de aire desde la zona j hacia la zona i .
- Generación a una tasa de $G_{\alpha,i}$
- Reacción de otros contaminantes.

La conservación de la masa de cada contaminante produce la siguiente ecuación básica de dispersión de un contaminante para una zona dada de la edificación:

$$\frac{dm_{\alpha,i}}{dt} = -R_{\alpha,i} \cdot C_{\alpha,i} - \sum_j F_{i,j} \cdot C_{\alpha,i} + \sum_j F_{i,j} \cdot (1 - \eta_{\alpha,i}) \cdot C_{\alpha,j} + m_i \cdot \sum_{\beta} \kappa_{\alpha,\beta} \cdot C_{\beta,i} + G_{\alpha,i} \quad (9)$$

Esta ecuación se debe determinar y resolver en cada paso de simulación para todas las zonas en forma simultánea, y así obtener la concentración de cada contaminante.

CAPÍTULO III

3 MODELACIÓN

El software usado para simular es CONTAM (Dols, 2001) creado por el National Institute of Standart and Technology, este software es de libre acceso y además posee experiencia comprobada empíricamente en este ámbito de estudio (Emmerich, 2001) (Emmerich, 2003). El programa se basa en un modelo de flujos de aire y transporte de contaminantes multizona con características como las presentadas anteriormente.

3.1 Modelo de la vivienda

La vivienda a modelar consiste en una vivienda aislada de tamaño estadísticamente promedio en Chile según estudio sobre viviendas realizado por el Centro de Desarrollo Tecnológico CDT (2010) en base a más de 3200 encuestas a nivel nacional. La vivienda elegida corresponde a una vivienda unifamiliar de 80 m² de área basal y de fachada mostrada en la Figura 7★



Figura 7. Vivienda utilizada como base de las simulaciones. (*Inmobiliaria PY, 2018*)

La forma y distribución interior mostrada en la Figura 8, se ha tomado desde la página web de “Inmobiliaria PY”. La vivienda está compuesta por tres dormitorios, living-comedor, cocina, dos baños y un pasillo. Cada uno de estos espacios es considerado como una zona independiente en las simulaciones, llegando a un total de 8 zonas.

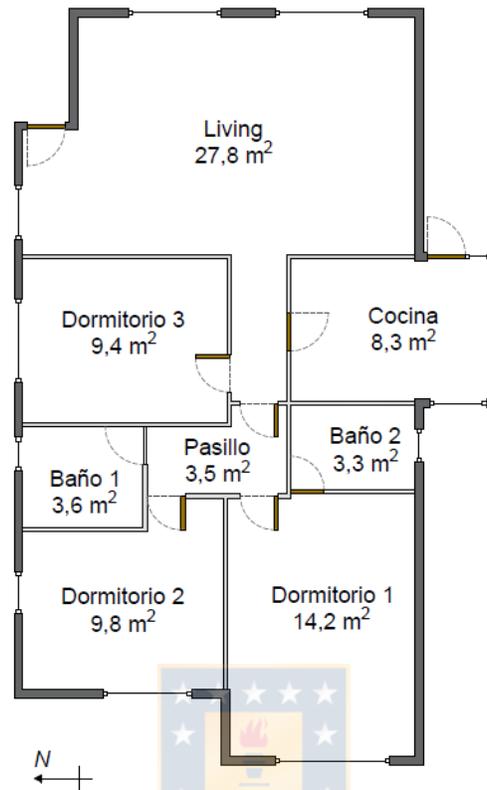


Figura 8. Vista en planta de la vivienda, sus zonas y el área basal de cada una. (*Elaboración Propia*)

3.1.1 Flujos de aire a través de aperturas no intencionales

Los flujos de aire no intencionales a través de componentes constructivos de la vivienda como muros, ventanas y puertas, ocurren a través de singularidades de en estos como grietas en uniones o paso de conductos a través de ellos. El flujo de aire a través de estas singularidades o grietas se supone gobernado por la ecuación “power law” presentada anteriormente en la Ecuación 5. Para estos se asume un exponente de flujo $n=0,65$ según lo que se recomienda en la literatura para pequeños orificios (ASHRAE, 2005). El coeficiente de flujo de cada paso de aire se puede determinar a partir de datos experimentales de permeabilidad al aire de estos elementos constructivos y conociendo su tamaño. Los datos experimentales de permeabilidad se adquieren de estudio mediante ensayos de presurización, al cuantificar el flujo de aire provocado al someter a distintos componentes constructivos, a diferencias de presión conocidas. Para este caso se utiliza como fuente el documento: “Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones” realizado por el Centro de Investigaciones Tecnológicas de la Construcción CITEC (2014) en base al parque residencial nacional. La tipología y permeabilidad de ventanas y puertas considerada para esta vivienda se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipología y permeabilidad de puerta y ventana considerados en la vivienda. (CITEC, 2014)

Componente constructivo	Permeabilidad [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$]
Ventana corredera con marcos de aluminio y dos hojas móviles	15,15 a 50Pa 24,04 a 100Pa
Puerta con revestimiento de fibras de madera prensada. Espacio inferior 5 mm	61,00 a 100Pa

El muro de la vivienda es comúnmente el elemento más abundante en la envolvente de la vivienda y por eso es influyente su valor de permeabilidad para la hermeticidad general de una vivienda. En el estudio mencionado anteriormente no se cuenta con una permeabilidad general para un tipo de muro, sino permeabilidades específicas para ciertas singularidades en la envolvente. Por eso, se decide proponer un valor de permeabilidad general para el muro de modo de resultar en una permeabilidad de la vivienda relativamente baja según el contexto nacional, es decir, un muro hermético como albañilería de ladrillo u hormigón. En este caso se ha definido una permeabilidad promedio para el muro de $6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ a 50 Pa. Con este valor se obtienen 10 RAH al simular un ensayo de presurización sobre la vivienda sometiendo a una diferencia de presión de 50 Pa entre interior y exterior. Con estos resultados, la vivienda es de baja permeabilidad comparadas con viviendas que posean otro tipo de muros como albañilería mezclado con madera o sólo madera, cuyas permeabilidades al ensayo de presurización (someterla a una diferencia de 50 Pa) pueden alcanzar valores de 15 RAH y 24 RAH respectivamente, esto según el mismo estudio de hermeticidades (CITEC, 2014).

Para lograr simular distintas zonas, estas se deben definir por separado, para ello los componentes constructivos en la envolvente se han seccionado y separado según su orientación y luego según la zona a la que pertenezca. Luego cada parte resultante se divide otra vez en dos, pero esta vez verticalmente tal como lo muestra la Figura 9. Donde “hm”, “hp”, y “hv”, representan las alturas del muro, puerta, y ventana, respectivamente.

Se pretende modelar todas las posibles grietas que posea un elemento constructivo cuya cantidad será proporcional al tamaño del componente constructivo. Para simplificación del modelo se supone una única grieta equivalente por cada sección de componente constructivo resultante. Esta grieta debe tener una altura definida al ingresarla al modelo. La división vertical mencionada antes es para minimizar los errores por efecto columna de aire que surgen al considerar un componente constructivo con una grieta y una sola altura equivalente.

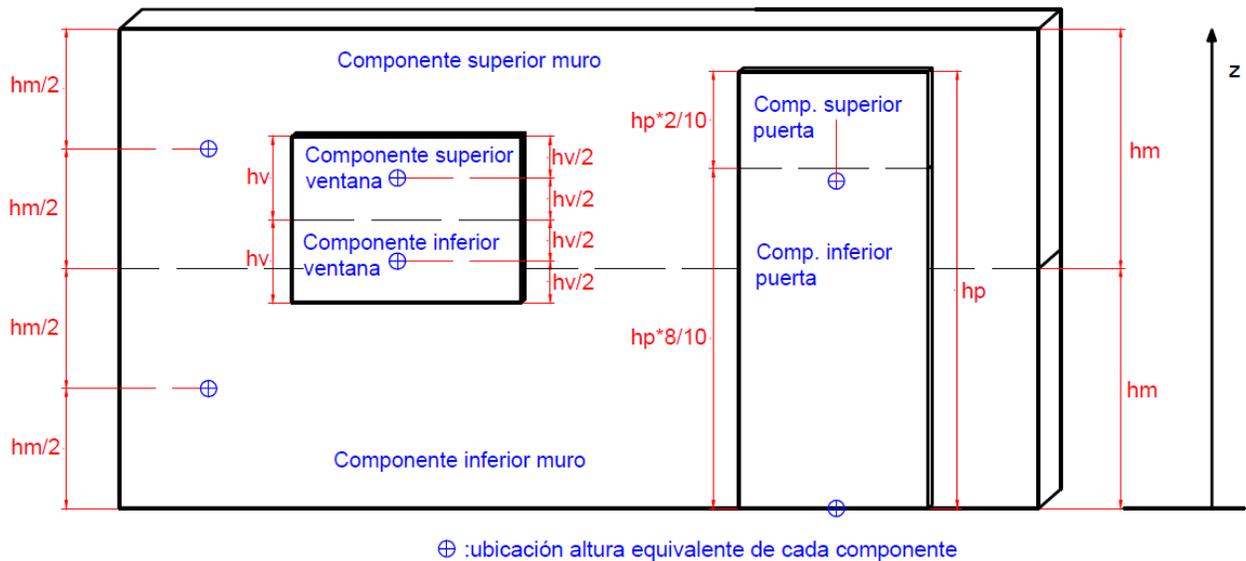


Figura 9. Representación de la altura equivalente de las singularidades en componentes constructivos de la envolvente. (*Elaboración Propia*)

Las ventanas y muros se consideran divididos justo en la mitad de su altura, repartiéndose así su área en partes iguales y ubicadas a una altura en medio de cada componente resultante. Las puertas se consideran con una ranura inferior de 5 mm por lo que el 80% del área de cada puerta se aproxima a una altura cero, ya que según la experiencia esta ranura es la responsable de la mayor cantidad de intercambios de aire. El 20% del área restante se asigna a una altura promedio entre las otras ranuras verticales y horizontal superior restantes.

Como no se posee datos de permeabilidad de tipos de techo, este se supone compuesto del mismo material del muro. Además, para simplificar el modelo el techo se considera sin inclinación (horizontal). Así, para ingresar a modelo, el techo también se divide según la zona a la que pertenezca, modelándose como otra grieta equivalente para cada zona, siendo ubicada a una altura igual al extremo superior del muro. Es así que el modelo la envolvente de la vivienda queda con un total de 59 pasos de aire simulados como grietas, el detalle de cada uno se puede ver en Anexo A.

3.1.2 Sistemas de ventilación

Los sistemas de ventilación considerados en esta investigación corresponden a dos sistemas forzados de extracción, diferenciándose entre ellos según las zonas en que ocurren las extracciones. El primer sistema se llama: “*convencional*” el cual extrae en zonas húmedas, es decir, en la cocina y en ambos baños. El segundo sistema llamado desde ahora “*alternativo*”, tiene sus extracciones principales en los tres dormitorios y living. Para que estos sistemas sean comparables, se establece que ambos sistemas funcionando a máxima capacidad, produzcan la misma cantidad de renovaciones de aire por hora. Los flujos de extracción se han dimensionado considerando extracción intermitente en zonas húmedas para lo cual según el estándar ASHRAE-Standard 62.2 (ASHRAE, 2013), implica 50 l/s y 25 l/s para cocina y cada baño respectivamente, resultando un flujo total de 100 l/s (1,875 RAH) para la vivienda en cuestión.

Los flujos de aire impuestos por el sistema convencional y el alternativo se pueden ver en la Figura 10. Tal como se puede ver en ambos casos los flujos suman 100 l/s. En el sistema alternativo los 100 l/s se redistribuyen considerando otros lugares de extracción, la distribución de caudal se realiza de tal modo que el flujo en cada lugar sea proporcional al máximo número de ocupantes de dichos lugares. Esto es dos personas para el dormitorio principal (dormitorio 1), 1 persona en dormitorio dos y tres, y finalmente 4 personas en el living. En CONTAM, estos flujos son modelados como extractores con caudal constante y con descarga directa al exterior.

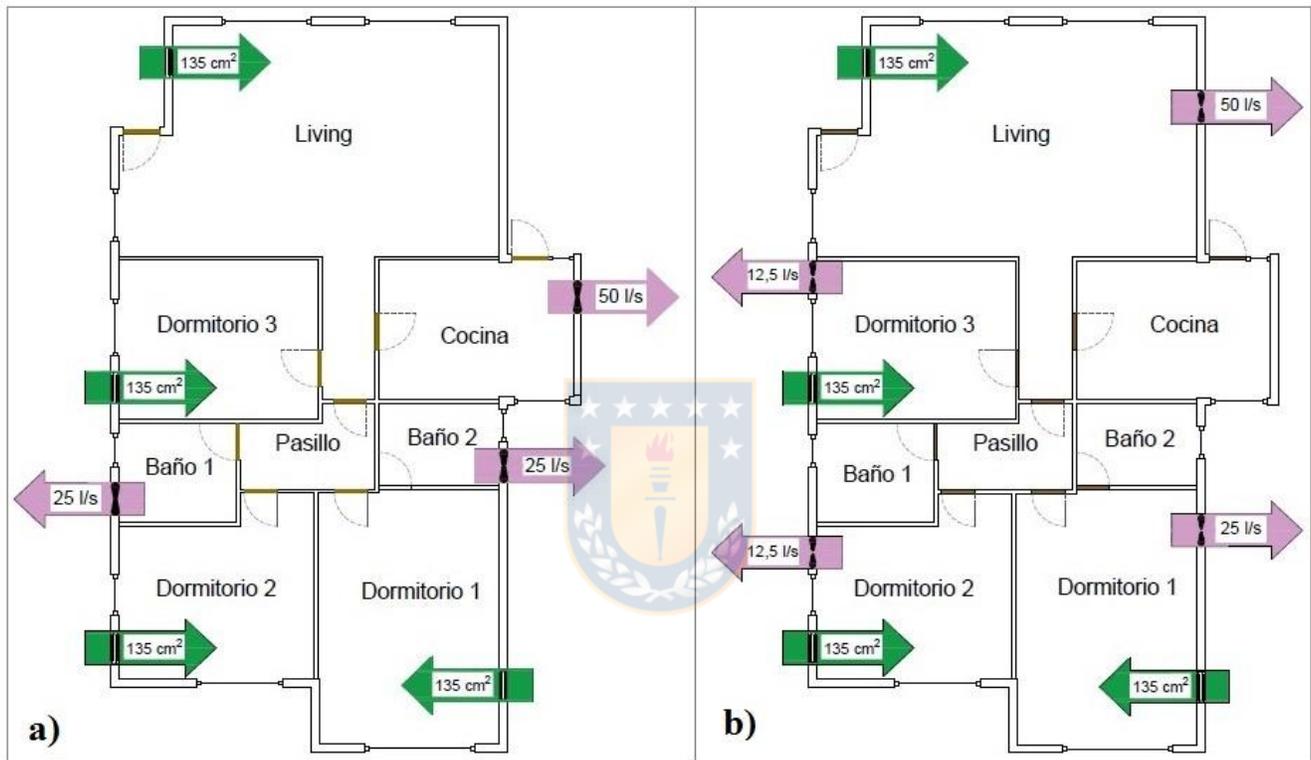


Figura 10. Distribución de flujos de extracción y entradas de aire en cada sistema de ventilación.
a) sistema convencional; b) sistema alternativo. (*Elaboración Propia*)

En la Figura 10 también se muestra que en ambos sistemas de ventilación las zonas de entrada de aire corresponden a los tres dormitorios y el living. En cada una de estos lugares se considera una rejilla de ventilación de área efectiva de $0,0135 \text{ m}^2$ que conecta interior con exterior, estas son ubicadas a una altura de 2 metros y con la orientación más alejada posible de la puerta interior de cada zona de modo de mejorar la homogenización del aire en la zona y con esto la efectividad de la ventilación. Las rejillas se dimensionan de modo que al someterse a una diferencia de presión de 10 Pa resulte un flujo igual al máximo total extraído por los ventiladores. Esta diferencia de presión se observa entre dichas zonas y el exterior al extraer en zonas húmedas el flujo total antes descrito. Los flujos de aire a través de estas aperturas también se modelan mediante la ecuación “power-law” deduciendo el coeficiente de flujo de la Ecuación 5 a partir la ecuación de Bernoulli conocida el área efectiva de apertura y suponiendo un coeficiente de descarga igual a 0,6, según lo recomendado en la literatura (ASHRAE, 2005).

En el interior de la vivienda se supone que los flujos de aire entre una zona y otra se producen sólo a través de puertas ya sea que estas estén abiertas o cerradas. Se ha encontrado evidencia de distintas condiciones del aire que es posible observar entre distintas zonas de una vivienda al considerar las puertas interiores cerradas (Shin et al., 2018). Por esto en esta investigación un factor a considerar es la posición de algunas puertas interiores (abiertas o cerradas). Las puertas de interés son las que conectan las zonas comúnmente habitadas estas son puertas interiores de los tres dormitorios y además la que conecta el living-comedor con el pasillo de distribución. Para eso se realizan las simulaciones durante todo el periodo de simulación en ambos casos, con estas puertas cerradas y abiertas. Es poco probable que las puertas interiores estén cerradas permanentemente, sin embargo, esta condición sirve para ilustrar la incidencia que puede llegar a tener en la efectividad de la ventilación. Las puertas interiores de las zonas húmedas se consideran cerradas durante todo el periodo de simulación.

El flujo de aire a través de puertas interiores cerradas se modela mediante dos grietas equivalentes al igual que las puertas de la envolvente, pero además para el caso de interior se modela una ranura inferior adicional en cada puerta. Estas ranuras, presentes en todas las puertas interiores se suponen de 1 cm de alto y 80 cm de ancho resultando en un área efectiva de 0,008 m². Para el modelo, estas ranuras son equivalentes a tener rejillas de transferencia de aire de la misma área efectiva en cada puerta. Las ranuras se modelan mediante la ecuación “power-law” al igual que las rejillas de suministro de aire descritas anteriormente.

Los flujos de aire a través de puertas interiores abiertas se modelan mediante un modelo de flujos de aire bidireccional que ofrece CONTAM (Dols & Walton, 2002). Este consiste en dividir la apertura justo por la mitad vertical estableciendo dos pasos de aire en direcciones opuestas. El modelo se basa en la generación de flujos debido al efecto columna de aire, donde se establece la línea de presión neutra a mitad de altura de la apertura. Para producir algún flujo mediante el efecto columna de aire debe existir una diferencia de densidades (y por lo tanto de temperaturas) entre las zonas conectadas. Cuando esto ocurre, se generan flujos de aire iguales, bajo y sobre la línea neutra, pero en distintas direcciones. Este modelo de apertura grande es muy sensible a la diferencia de temperatura entre las zonas que conecta, siendo casi nulo cuando no hay diferencia de temperatura y muy grande cuando hay al menos 1 °C de diferencia. Por eso en las simulaciones se consideran pequeñas variaciones entre las temperaturas de las distintas zonas (menores a 0,1 °C) entorno a los 21 °C, para asegurar un mínimo intercambio de aire entre las zonas involucradas y así acercarse a la realidad.

3.2 Condiciones climáticas

Los datos climáticos usados fueron: temperatura ambiente, velocidad de viento, dirección de viento, humedad relativa del aire ambiente y presión manométrica. Estos datos son obtenidos hora a hora desde una estación meteorológica del Instituto de Investigación Agropecuarias INIA ubicada en Chiguayante, provincia de Concepción. La distribución de las variables climáticas más importantes durante el periodo de simulación se muestra en la Figura 11.

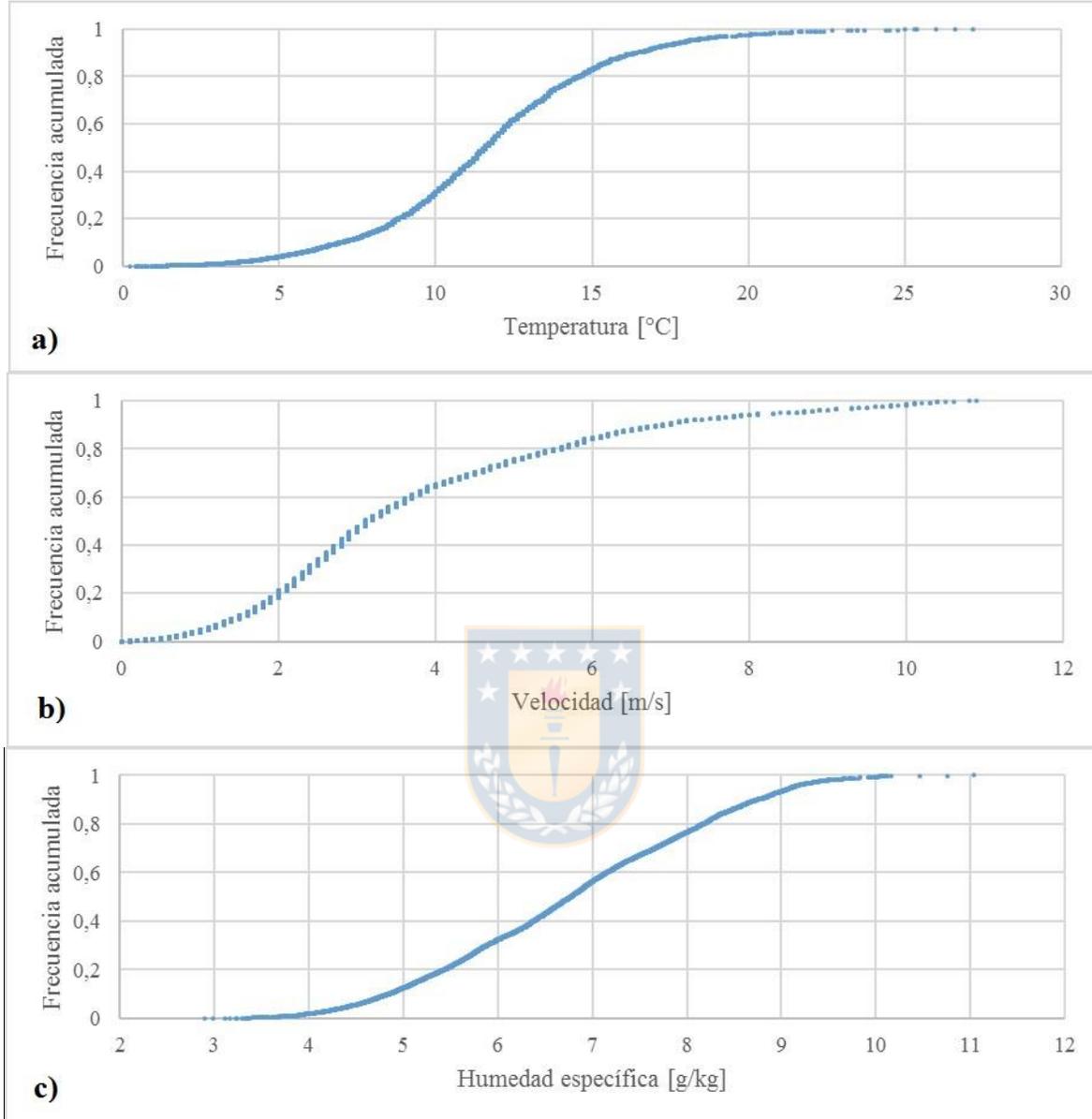


Figura 11. Distribución de variables climáticas más importantes durante el periodo de simulación. a) temperatura; b) velocidad del viento; c) humedad específica (INIA, 2018)

Debido a que CONTAM no es un simulador térmico no calcula la temperatura de cada zona, esta se debe ingresar por el usuario. Como en este estudio no se quiere estudiar el efecto de la variación de la temperatura del aire interior, ésta se establece alrededor de 21°C durante todo el periodo de simulación. El periodo de simulación corresponde a los seis meses más fríos del año en el hemisferio sur, es decir, desde abril a septiembre. Los otros meses no son de interés puesto que en la mayor parte de ese periodo no se ocupa calefacción y/o los ocupantes pueden usar métodos de ventilación natural como apertura de ventanas o puertas exteriores, restando importancia al sistema de ventilación forzado. El paso de tiempo de las simulaciones se establece en 5 minutos.

En la envolvente se considera una diferencia de presión variable por medios naturales por lo que se consideran los efectos del viento y el efecto columna de aire tal como se explica previamente. La presión en la envolvente de la vivienda debido al viento se presentó en la Ecuación 3. Donde la velocidad proviene de la estación meteorológica y el coeficiente de presión se define a partir de datos empíricos que se presentan en la literatura para un caso típico de una edificación con planta cuadrada (ASHRAE, 2005), este coeficiente se puede ver en la Figura 12, donde se ve que toma valores positivos y negativos dependiendo del ángulo entre la dirección de incidencia del viento y la normal a cada superficie.

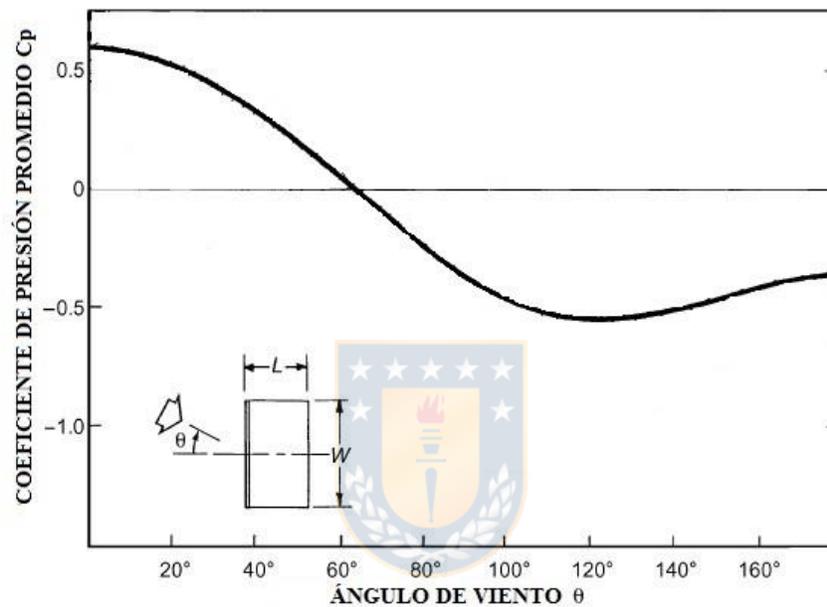


Figura 12. Variación de coeficiente de presión promedio para edificaciones de pequeño tamaño. (ASHRAE, 2005)

Por otra parte, se define una velocidad local a partir de la velocidad en la estación meteorológica según la Ecuación 4 puesto que la vivienda se considera inserta en un entorno distinto del de toma de datos. Este último se considera un lugar totalmente despejado y a una altura de 10 m. La vivienda se considera en un ambiente urbano y con un entorno ondulado con obstrucciones como árboles y casas pequeñas, así se obtienen los factores de la Tabla 1 y Tabla 2.

3.3 Escenarios de ocupación propuestos

La vivienda se considera habitada por una familia de cuatro integrantes adultos. Las personas 1 y 2 (P1 y P2) duermen en el dormitorio 1, mientras que las personas 3 y 4 (P3 y P4) duermen en los dormitorios 2 y 3 respectivamente. Para cada uno de los ocupantes se propone dos horarios de ocupación, uno para un día de semana (lunes a viernes) y otro para un día de fin de semana (sábado y domingo). Conformando así una semana de 5 días con un horario y 2 días con otro horario.

En un día de semana el ocupante P1 tiene una ausencia de la vivienda de 12 horas mientras los demás tienen una ausencia de 10 horas promedio cada uno, además, durante la tarde-noche todos se reúnen en el living-comedor alrededor de una hora. En los días de fin de semana los ocupantes pasan más tiempo al interior de su casa, estos se reúnen en el living-comedor alrededor de 4 horas por día, además, se consideran ausencias de promedio 4 horas por día y para cada uno de los ocupantes.

Dadas las ocupaciones por persona se obtienen también las ocupaciones por zonas, estas se pueden ver en los gráficos de la Figura 13 y Figura 14 correspondiente a un día de semana y fin de semana respectivamente. La ocupación mostrada es hora a hora y es relativa a la máxima ocupación posible en cada zona, esto es, una ocupación durante toda la hora y considerando: una persona por baño, una persona en dormitorios 2 y 3, dos personas en el dormitorio principal, dos personas en la cocina, y cuatro personas en el living-comedor.

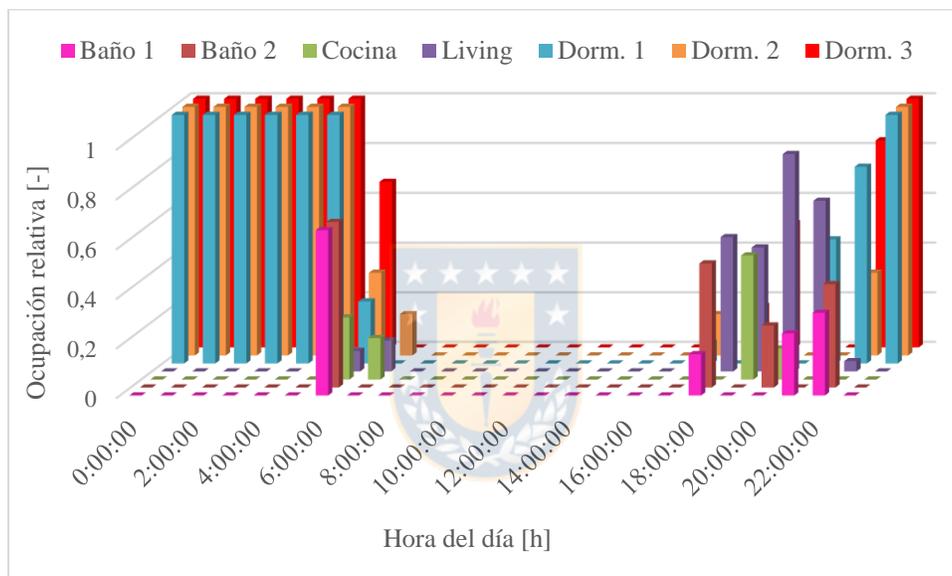


Figura 13. Ocupación relativa por zonas durante un día de semana. (*Elaboración Propia*)

En los días de semana se caracteriza por una mayor desocupación de la vivienda ya que se asume que los habitantes desalojan la vivienda durante importante parte del día. Es por esto que los ocupantes mayoritariamente están en la vivienda durante las últimas horas del día y en la noche. Por lo tanto, los dormitorios son los que poseen la mayor ocupación temporal, muy por sobre el resto de las zonas.

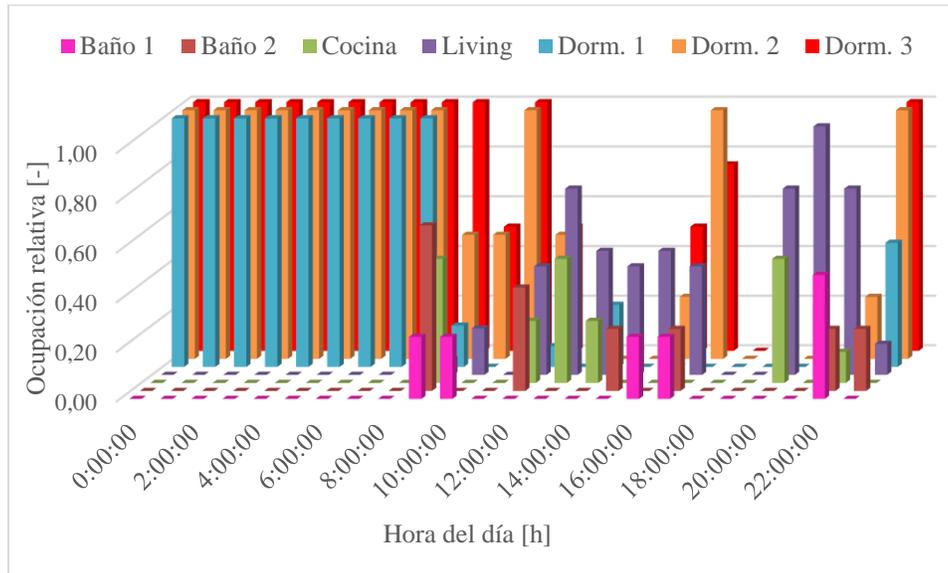


Figura 14. Ocupación relativa por zonas durante un día de fin de semana. (*Elaboración Propia*)

Como se puede ver durante los días de fin de semana el abandono de la vivienda en promedio es mucho menor, y durante el día los ocupantes hacen mayor uso del living-comedor y de las zonas húmedas (baños y cocina). En este caso, aunque los dormitorios siguen siendo las zonas con mayor ocupación, se registra una importante ocupación del living comedor por lo que esta zona también podría volverse crítica en esos días.

3.4 Contaminantes simulados

Como se expone anteriormente, un uso típico de la VCD es basado en la concentración de dióxido de carbono, este gas no es peligroso para la salud humana en concentraciones típicas de vivienda, sin embargo, es producido por las personas y por eso se puede relacionar con la ocupación de los lugares y su nivel de ventilación (Health Canada, 1989). El CO₂ se utiliza comúnmente en este tipo de control como indicador de calidad del aire referido a contaminantes emitidos normalmente por las personas estableciendo límites de concentración para conseguir conformidad con respecto a la percepción de la calidad del aire.

En este estudio las estrategias de VCD son basadas en el dióxido de carbono, a la vez la exposición a este gas es uno de los principales indicadores de la CAI alcanzada. También se simula la humedad dentro de la vivienda, pero sólo a modo de verificar que se encuentre en valores adecuados. Los contaminantes producidos por componentes de la vivienda como los compuestos orgánicos volátiles, son contaminantes cuya producción es permanente y se puede reducir controlando la fuente de emisión (Knudsen & Wargocki, 2010), por eso en este estudio este tipo de contaminantes no se consideran como indicador de calidad del aire interior.

El dióxido de carbono se considera proveniente del metabolismo de una persona adulta promedio con tasas de emisión constante por persona según ASHRAE-Standard 62.1 (ASHRAE, 2007). Durante el día (16 horas) se considera que las personas realizan actividades físicas de esfuerzo medio emitiendo 0,3 l/min y durante la noche (8 horas) se considera un estado de reposo equivalente a una emisión de 0,2 l/min de CO₂. Ambos valores en base a una persona. Para el aire exterior se supone una concentración constante de CO₂ igual a 400 ppm.

Por otra parte, la generación de vapor al interior se considera proveniente de la cocción de alimentos, duchas, lavar platos y de la respiración de los ocupantes, estos valores de producción que se pueden ver en la Tabla 4, se han basado en una investigación sobre la producción de vapor en una vivienda ocupada por 4 personas (Trechsel, 1994). La producción de humedad debido a la respiración se considera de tasa constante durante todo el periodo, para el resto de las fuentes se considera un escenario de producción dependiente de las actividades de los ocupantes.

Tabla 4. Fuentes de humedad al interior de la vivienda (Trechsel, 1994).

Actividad	Producción de humedad por día [l]	
	semana	fin de semana
Respiración	3,25	4,16
Duchas	1,00	1,00
Cocción alimentos	0,34	0,92
Lavar loza	0,10	0,26

El aire entrante también afecta a la humedad interior, éste se considera variable según los datos obtenidos de la estación meteorológica. No se considera en este estudio combustión a llama abierta dentro del hogar.

3.5 Control bajo demanda

El control se basa en comparar la medición de la concentración de CO₂ con un valor de ajuste predeterminado (set-point). Si la medición es mayor que el set-point el extractor funciona al 100% de su capacidad y se reduce al 10% cuando la concentración alcanza 300 ppm por debajo del set-point. Estos 300 ppm permiten establecer un rango para asegurar un mínimo de permanencia bajo el set-point y así evitar la excesiva intermitencia del accionamiento. El 10% del flujo total es para mantener un mínimo de ventilación destinada a evacuar los contaminantes producidos en forma permanente por los muebles y otros componentes de la vivienda.

Se prueban dos valores de set-point que abarcan rangos comúnmente usados para una aceptable calidad del aire interior según el Comité Europeo de Normalización CEN (2017). El set-point 1 más exigente se fija en 800 ppm (400 ppm sobre concentración exterior) y el set-point 2 menos exigente se fija en 1200 ppm (800 ppm sobre concentración exterior).

La ubicación de sensores de CO₂ y el tipo de accionamiento varía para cada sistema de ventilación. En el caso del sistema convencional las disposiciones de sensor que se estudian son: a) sensor sólo en living; b) sensor sólo en dormitorio principal, y c) sensores simultáneos en dormitorio principal y living. En los tres casos el control es centralizado actuando en forma simultánea sobre los tres extractores.

En el caso del sistema alternativo las disposiciones de sensor son dos: a) sensor sólo en el pasillo; b) sensores simultáneos en living y los tres dormitorios. En el caso de la disposición a) el accionamiento es centralizado actuando sobre los cuatros extractores en forma simultánea. Para la disposición b) el control es local permitiendo independencia entre el accionamiento de los distintos extractores.

Finalmente, además del accionamiento en base a medición de CO₂ se considera para ambos sistemas de ventilación un accionamiento adicional sobre los extractores de cocina y baños relacionado con su ocupación. Las extracciones resultantes de este accionamiento son para evacuar contaminantes típicos producidos en altas tasas en dichas zonas, como humedad y olores, evitando así su dispersión por el resto de la vivienda. En este estudio este tipo de contaminantes quedan representados por el nivel de humedad de estas zonas. Los periodos de accionamiento corresponden en el caso de los baños durante cualquier tipo de ocupación de estos. En el caso de la cocina, el periodo de accionamiento corresponde sólo a los instantes de producción de vapor (cocción de alimentos y lavado de loza). Este accionamiento significa para sistema convencional que las extracciones a máxima capacidad pueden ser activadas tanto por la medición de CO₂ o según el periodo de accionamiento descrito. Para el sistema alternativo este accionamiento implica un control encendido-apagado basado en periodo de accionamiento descrito, sobre extractores ubicados en las zonas húmedas. En ambos sistemas de ventilación este accionamiento es individual sobre el extractor de cada zona húmeda.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desempeño de los sistemas de ventilación simulados se evalúa según la exposición alcanzada por los ocupantes al CO₂, por la humedad relativa en las distintas zonas y por el ahorro energético alcanzado.

Se estudia la exposición de cada ocupante a la concentración del dióxido de carbono durante su estadía en las distintas partes de la vivienda. Para ello en cada estrategia estudiada se calcula el promedio de exposición de cada ocupante durante un periodo de tiempo representativo y se compara con el valor del set-point establecido, de este modo un sistema de ventilación efectivo en lo posible mantiene los promedios de exposición bajo o cercano al valor del set-point para todos los ocupantes. Relacionado con las altas exposiciones se establece un límite sobre el cual se tiene una CAI inaceptable, en este caso el límite se ha fijado en 1600 ppm tal como lo hace en España el Código Técnico de la Edificación CTE (2017). Así un sistema de ventilación con buen desempeño está relacionado con bajas o nulas exposiciones al CO₂ sobre los 1600 ppm.

Para evaluar la CAI también se estudia la humedad al interior de la vivienda, en este caso se hace el análisis por zona puesto que se considera que el mayor efecto negativo lo sufre la vivienda misma por el deterioro de sus componentes al estar expuestos a una humedad muy elevada. Para esto se establece un límite inferior y superior de humedad relativa igual a 30% y 70% respectivamente, para una aceptable calidad del aire. Este rango de humedad es común entre los estándares y recomendaciones sobre CAI. De este modo un buen sistema de ventilación es capaz de mantener las humedades relativas de todas las zonas entre estos valores. No se considera en este análisis la zona representada por el pasillo puesto que sólo es una zona de tránsito.

El gasto de energía de los casos simulados está en directa relación con la cantidad de renovaciones de aire que se efectúa en la vivienda, por eso para cuantificar los ahorros energéticos se calcula para cada estrategia simulada el promedio de renovaciones de aire por hora que genera el sistema durante todo el periodo de simulación, y se compara con el promedio de RAH de ese mismo sistema funcionando en forma continua sin control.

En cada gráfico de exposición al CO₂ y gráfico de humedad relativa aparece además entre paréntesis el valor medio de exposición o humedad relativa según corresponda, durante el periodo de muestra. Además, en los gráficos de exposición al CO₂ se expone el promedio de RAH durante el periodo de muestra.

Nota: Todos las figuras y tablas de resultados de esta investigación son de elaboración propia.

4.1 Infiltraciones de aire

Previo a simular alguna estrategia de ventilación se realizan simulaciones de la vivienda considerando sólo infiltraciones debido a las condiciones climáticas. Para esto se ha simulado durante todo el periodo de simulación considerando puertas interiores correspondientes como abiertas y cerradas para tener una primera idea del efecto de estas puertas cerradas. Los resultados de la exposición por persona al CO₂ se pueden ver en los gráficos de la Figura 15 para ambos casos.

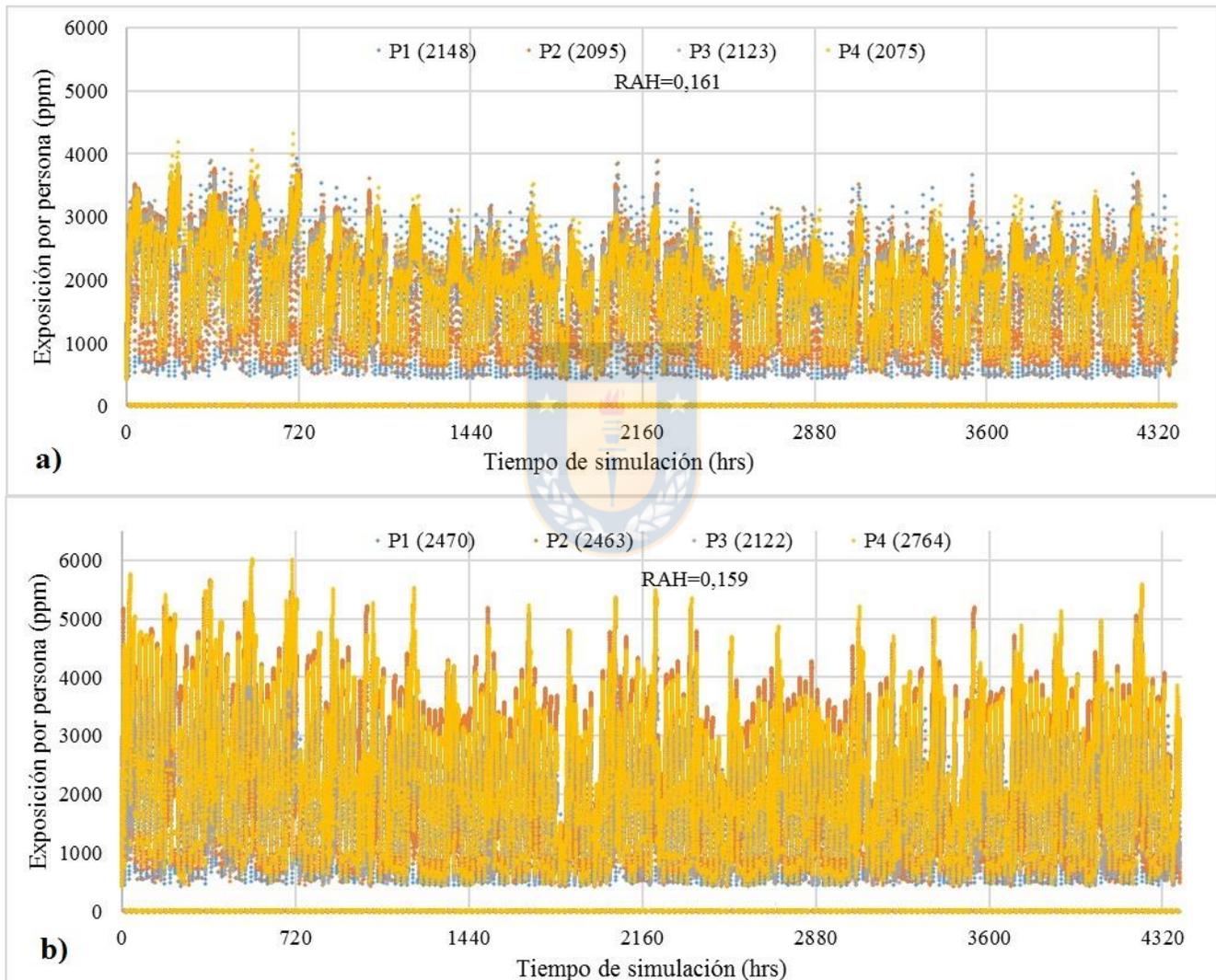


Figura 15. Exposiciones por ocupante considerando sólo infiltraciones. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas

Como se puede ver las exposiciones en ambos casos con valores medios entre 2000 y 3000 ppm muy por encima de los niveles permisibles de CAI aceptable dando cuenta del grado de deterioro del aire. La media de humedad relativa de todas las zonas fue superior al 50% sobrepasando el 90% en zonas

húmedas y hallándose entre el 60 y 70% para las habitaciones. Tanto con las puertas abiertas como cerradas el promedio de renovaciones de aire fue prácticamente el mismo de 0,16 RAH.

Con las puertas interiores abiertas las exposiciones fueron más constantes en el tiempo y similares entre los habitantes dando cuenta de cierta homogenización de CO₂ a través de la vivienda. Con las puertas cerradas en general subieron los promedios de exposición además estas fueron más variadas en el tiempo y entre los ocupantes siendo la persona P4 la más crítica, esto da cuenta de cierto estancamiento de los contaminantes en las zonas donde se producen aumentando más rápido su concentración y siendo esta situación de puertas cerradas más crítica. Estas simulaciones dejan al manifiesto una incidencia en la CAI según el estado de las puertas interiores al menos en el caso sin ventilación. Al analizar más en detalle respecto al tiempo, se ve que las situaciones de mayor exposición son las relacionadas a un mayor periodo de estadía en alguna zona, es por esto que las noches representan la situación de mayor exposición para cada ocupante y también los fines de semana en donde la vivienda es más ocupada no teniendo chance de bajar los niveles de CO₂ por ausencia de la fuente. Este comportamiento se ve que se reitera día a día y semana a semana teniendo leves variaciones respecto al clima local, dejando en evidencia la poca incidencia de este último según las condiciones de simulación. Esto permite afirmar que para estas condiciones de simulación la principal variable que determina las exposiciones al CO₂ es el comportamiento de la fuente de contaminante.

4.2 Casos base de cada sistema de ventilación

Como parte del estudio se ha simulado cada sistema de ventilación funcionando a máxima capacidad y sin control durante todo el periodo de simulación. Desde el punto de vista de CAI estos casos son los de mejor efectividad al que puede optar, desde el punto de vista de la energía, el de mayor gasto. También en este caso se ha distinguido entre las puertas interiores de dormitorios y living en condición abiertas y cerradas hallándose diferencias entre ambos casos, siendo el caso con puertas cerradas el más crítico. Para acompañar se muestran gráficos de exposición al CO₂ de cada ocupante y gráficos de humedad relativa de cada zona.

4.2.1 Caso base Ventilación Convencional

En el sistema convencional con funcionamiento continuo se obtiene en general exposiciones medias en el rango de CAI aceptable. En la Figura 16 se muestran las exposiciones de cada ocupante durante un mes. Tal como en el caso de infiltraciones al considerar las puertas abiertas se produjo una homogenización de los contaminantes entre las zonas conectadas y con esto en promedio una disminución de las concentraciones a la cual se exponen los habitantes, además las exposiciones fueron parecidas para los ocupantes manteniéndose entre los 650 y 720 ppm y siendo las exposiciones más altas para los ocupantes P1 y P2.

Al considerar las puertas interiores cerradas, se produjo un alza en la exposición general de los ocupantes. Las exposiciones promedio se ubican en este caso entre los 700 y 910 ppm evidenciándose una mayor distribución entre las exposiciones de los ocupantes, además los ocupantes más críticos en este caso son P3 y P4, llegando incluso este último a una exposición promedio sobre los 900 ppm superando el primer valor del set-point. Esto da una primera idea del panorama que se tiene al

incorporar los sistemas de control, las condiciones más críticas se dan para las puertas interiores cerradas y para los ocupantes P3 y P4.

Por otra parte, los promedios de renovaciones de aire que se muestran en cada gráfico de la Figura 16, se muestran no sensible a la condición de las puertas interiores dando en ambos casos un valor aproximado de 1,748 RAH. Este valor es un poco menor a las renovaciones sin considerar efectos climáticos (1,875 RAH) esta disminución puede ser explicada por los efectos climáticos los que en algunas ocasiones inducen un efecto de despresurización de la vivienda oponiéndose y entorpeciendo el flujo neto inducido por los extractores.

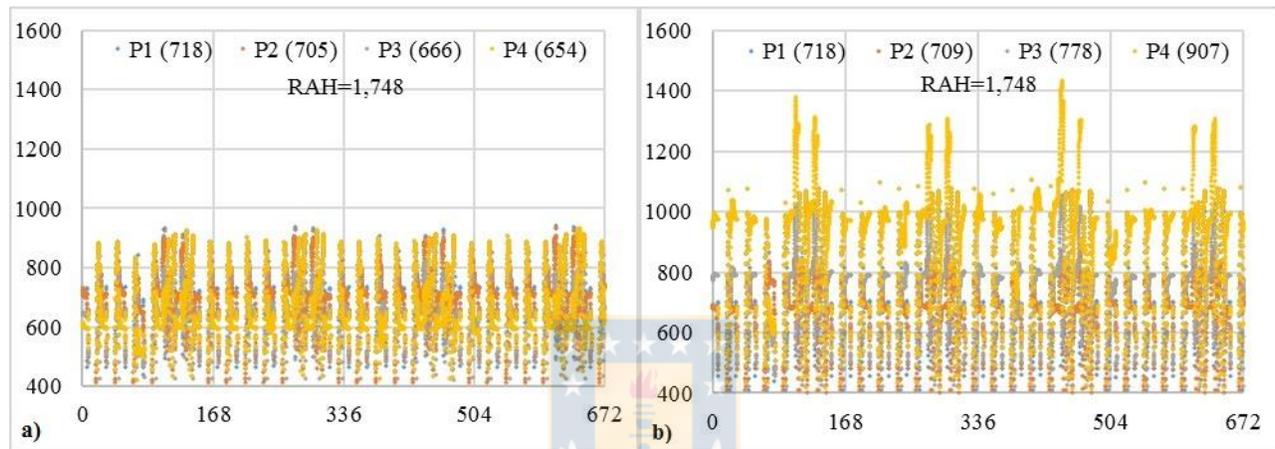


Figura 16. Exposición al CO₂ por ocupante [ppm] vs hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema convencional. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas

Durante el mes de referencia también se muestra el comportamiento de la humedad, para ello se expone en la Figura 17 la humedad relativa de cada zona para la condición de puertas interiores de interés abiertas y cerradas. Como se puede ver para el caso de las puertas abiertas las humedades relativas de todas las zonas son similares entre ellas llegando a promedio de esta variable en un rango muy acotado, entre 50 y 52% siendo el baño 2 la zona de mayor humedad. Al considerar las puertas de estudio cerradas los valores de promedio de humedad relativa se ubican entre 50 y 53% pasando a ser el dormitorio 3 la zona más crítica. La Figura 15 muestra además que las variaciones temporales de la humedad muestran que ésta es mayor durante la noche y algo más relevante, las mayores variaciones de la humedad no son por la ocupación sino por la condición de humedad del aire exterior entrante.

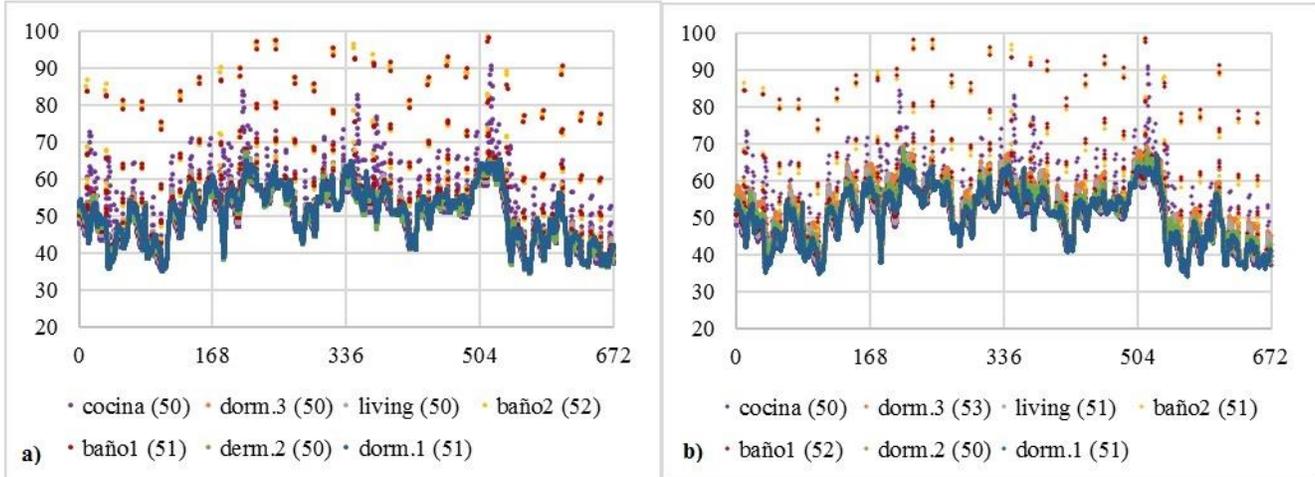


Figura 17. Humedad relativa por zona [%] vs hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema convencional. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas

4.2.2 Caso base Ventilación Alternativa

La ventilación alternativa demuestra ser más efectiva que la convencional en cuanto a la CAI alcanzada, esto ya que disminuyen las exposiciones medias de los ocupantes, además en general mantiene su desempeño en la condición de las puertas interiores cerradas esto se puede apreciar en la Figura 18 en que se muestran las exposiciones de los ocupantes en ambas condiciones de puertas interiores durante un mes.

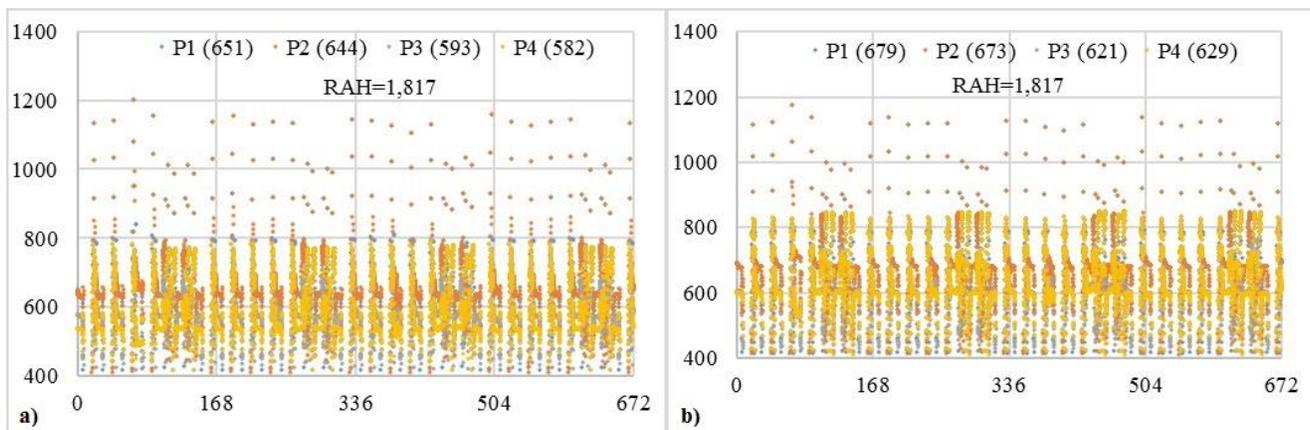


Figura 18. Exposición al CO₂ por ocupante [ppm] vs hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema alternativo. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas.

En el caso de las puertas interiores de interés abiertas, los promedios de exposición se mantienen entre los 580 y 660 ppm siendo al igual que en el sistema convencional, los ocupantes P1 y P2 los más expuestos. Al considerar estas puertas cerradas los promedios de exposición aumentaron levemente tal como se puede ver en la Figura 18, quedando en esta ocasión entre los 620 y 680 ppm siendo nuevamente los ocupantes P1 y P2 que comparten el dormitorio principal los más expuestos.

En cuanto a las renovaciones de aire estas nuevamente no se vieron afectadas por la condición de las puertas interiores, en este caso resultando en promedios de 1,817 RAH en ambos casos, como se ve, en este sistema las renovaciones son ligeramente mayores a las del sistema convencional acercándose al valor de renovaciones sin considerar efectos naturales, esto podría indicar que con el sistema alternativo, el flujo impuesto por el sistema mecánico es menos sensible a los efectos naturales que el sistema convencional.

En la Figura 19 se muestra el promedio de humedad relativa de cada zona al estar funcionando en forma continua el sistema de ventilación alternativo. En este se puede ver que la humedad relativa de las zonas se ve poco afectada por la condición de las puertas interiores, obteniendo en ambas condiciones de las puertas promedios de humedad relativa entre 50 y 53%. En estos casos la cocina es la zona con mayor humedad seguido por los baños, comparado con el sistema convencional, en estas tres zonas existen mayores humedades relativas máximas tal como se corrobora en la Figura 19. Finalmente, en la variación con respecto al tiempo hay una componente de ocupación y otro fuerte factor debido a la condición del aire exterior, teniendo al igual que en sistema convencional, las variaciones más significativas debido a este efecto, pudiendo registrarse grandes diferencias entre un día y otro al igual que entre las semanas expuestas.

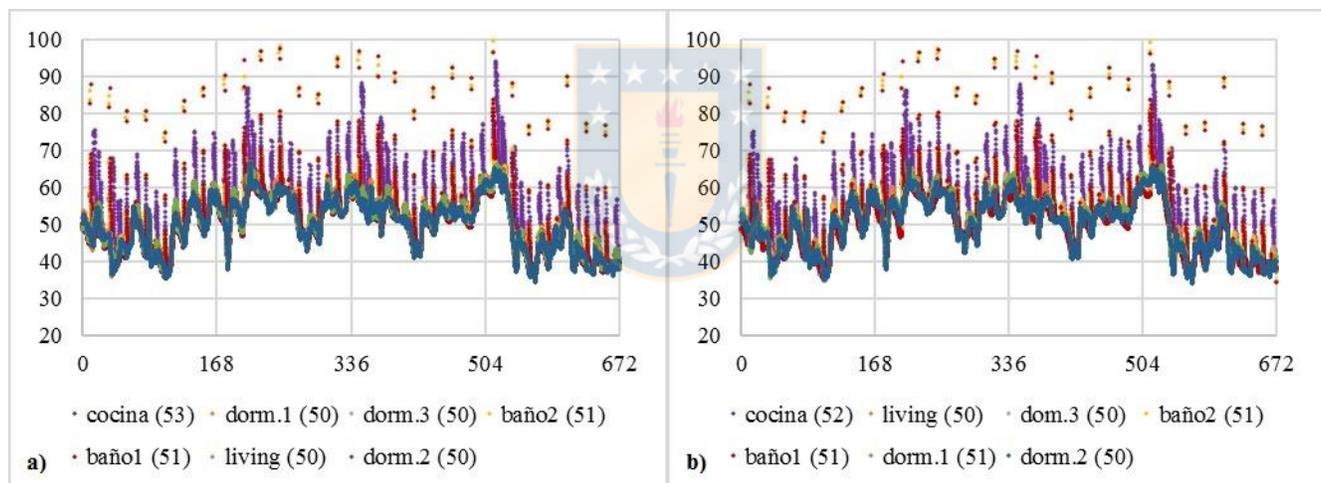


Figura 19. Humedad relativa por zona [%] vs Hora del mes [h] para el funcionamiento continuo del sistema alternativo. Gráficos: a) puertas interiores abiertas; b) puertas interiores cerradas

Estos resultados preliminares dan cuenta que desde el punto de vista de la exposición al CO_2 el sistema alternativo tiene mejor desempeño que el convencional, puesto que extrae en las zonas más ocupadas por los ocupantes teniendo más cercanía con la fuente de CO_2 .

El sistema convencional tiene menor efectividad en la evacuación de contaminantes producidos en zonas distintas de las de extracción, lo que demuestra que a pesar que el diseño de este tipo de ventilación se propone de modo que circule aire desde el resto de las zonas hacia las zonas de extracción, esto en la realidad no ocurre a cabalidad debido a la alta permeabilidad en la envolvente y que las puertas interiores cerradas representan una gran resistencia. Debido a estos factores el aire extraído en zonas húmedas proviene en gran parte desde conexiones con el exterior de estas mismas zonas. Este efecto negativo se ve particularmente acentuado en la cocina puesto que posee gran área de

ventana y una puerta exterior, los cuales son de alta permeabilidad al aire comparado con el material de los muros.

A continuación, se procede a describir los resultados de las simulaciones de ambos sistemas de ventilación bajo control. Para su mejor comprensión se muestra para cada estrategia de control, las exposiciones en cada instante de los ocupantes durante una misma semana. Este periodo de tiempo se considera representativo del periodo total de simulación ya que, se describe un ciclo entero del perfil de ocupación por lo que los promedios de exposición, humedad relativa y renovaciones de aire tienen una tendencia similar a los promedios considerando todo el periodo de simulación. Esto se puede corroborar en las tablas de resultados de simulación completa del Anexo B. En los gráficos de exposición al CO₂ se muestra también el promedio de exposición de cada ocupante y el promedio de RAH de la vivienda completa durante esa semana. En los gráficos de humedad relativa también se expone por zonas el promedio de HR de cada una de ellas durante la semana.

Por otra parte, para cada estrategia simulada también se expone en tablas, los promedios de renovaciones de aire de la vivienda durante el periodo de simulación completo para cada uno de los sistemas de ventilación y sus variantes. Luego se hace un análisis de los ahorros de cada una de estas estrategias.

4.3 Sistema de Ventilación Convencional controlado por demanda

El comportamiento del sistema convencional se muestra muy sensible a la posición de las puertas interiores de interés. Con las puertas cerradas disminuye la efectividad de esta estrategia. Como la condición de las puertas interiores es la más determinante, se procede a hacer un análisis general según esta condición.

4.3.1 Puertas de interés abiertas

Con las puertas interiores abiertas el CO₂ generado en alguna parte específica de la vivienda logra expandirse a otras zonas de la vivienda y en general se logran condiciones de calidad de aire relativamente homogéneas dentro de las zonas comunicadas por las puertas abiertas. Esto se debe a que en esta condición es fácil inducir un gran flujo entre una zona y otra favoreciendo el intercambio de aire entre ellas y con esto el transporte y homogenización de las condiciones del aire interior. Los resultados generales de exposición al CO₂ por persona durante una semana se muestran en la Figura 20.

Como se puede ver las mayores exposiciones se dan durante la noche y en los días de fin de semana, periodos que se consideran críticos para contaminantes producidos o emitidos directamente por la presencia de personas. En todos los casos los ocupantes P1 y P2 fueron los de mayor exposición, sin embargo, estas exposiciones no fueron tan distintas de la exposición de las demás personas.

Para el set-point 2 (1200 ppm) las tres disposiciones de sensor fueron capaces de mantener los promedios de exposición bajo este valor. Para el set-point 1 más exigente (800 ppm) sólo la disposición de sensor en el living + dormitorio principal logra mantener los promedios de exposición de los 4 ocupantes bajo el valor del set-point, en el caso de un sensor en el living las exposiciones promedio de todos los ocupantes son mayores que este set-point. Las exposiciones promedio en orden creciente según la disposición de sensores son: living + dormitorio principal, dormitorio principal y finalmente el

living. Este orden tiene sentido puesto que las menores exposiciones se logran con una rápida respuesta del sistema de ventilación lo que ocurre al medir en zonas de mayor producción de este contaminante (mayor ocupación). Al aumentar el valor del set-point también lo hacen las exposiciones promedio de los ocupantes, sin embargo, se mantienen en condiciones aceptables.

Sólo con el set-point 2 de los casos de un sensor se llega a exposiciones sobre 1600 ppm para los ocupantes P1 y P2 pero con tiempos menores al 2% del total de tiempo expuesto lo que se considera aceptable.



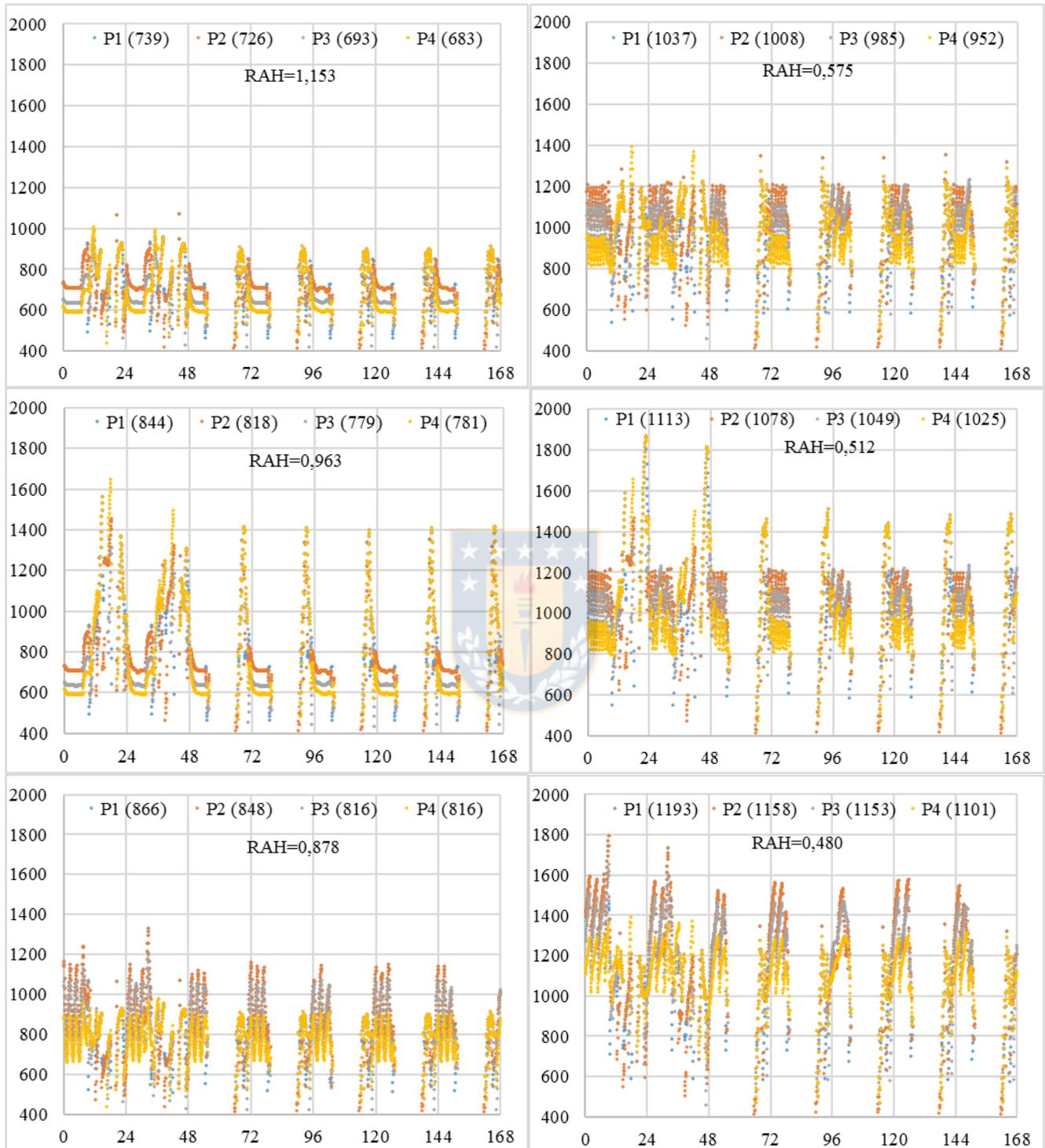


Figura 20. Exposiciones por persona al CO₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living

Los resultados de humedad relativa alcanzados en las distintas zonas durante una semana con el sistema convencional y las puertas interiores abiertas se muestran en la Figura 21. Como se puede ver los promedios de HR entre las zonas son similares y en general se ubican entre 47 y 53% para estos casos. La condición del aire interior analizando la humedad, es similar al caso del CO₂ ya que con las puertas abiertas se registra poca variación en la humedad relativa entre las zonas interiores reflejando nuevamente la facilidad para transportar aire entre zonas conectadas. Los aumentos de humedad relativa en las zonas húmedas y su condición de puertas interiores cerradas permanentemente hacen que estas sean las zonas más críticas desde el punto de vista de la humedad. Las zonas húmedas son más críticas debido a que se consideran con las puertas cerradas y a las grandes producciones de vapor en su interior. En cuanto a los dormitorios, si bien estos tienen un comportamiento similar, el dormitorio 1 muestra tener una humedad relativa levemente mayor, este hecho se relaciona con la mayor ocupación de esta zona.

Por otra parte, la humedad relativa se mantiene muy similar en los tres casos de disposición del sensor, dando cuenta al igual que en el análisis de exposición al CO₂, de la menor importancia en este caso de la ubicación de el o los sensores.

Al aumentar el valor del set-point se produce un leve aumento (alrededor del 3%) en la humedad relativa de las zonas, respecto del set-point menor. Por otra parte, según los resultados del periodo completo de simulación las zonas húmedas son las más críticas y acumulan el mayor porcentaje de tiempo con humedad relativa sobre el 70% sin embargo, para estos casos este tiempo es menor al 3% del tiempo total de simulación. El resto de las zonas si bien alcanza HR superiores al 70% lo hacen mayormente durante periodos de tiempo menores al 1% de la simulación. Estos antecedentes permiten decir que desde el punto de vista de la humedad se obtiene una aceptable CAI.

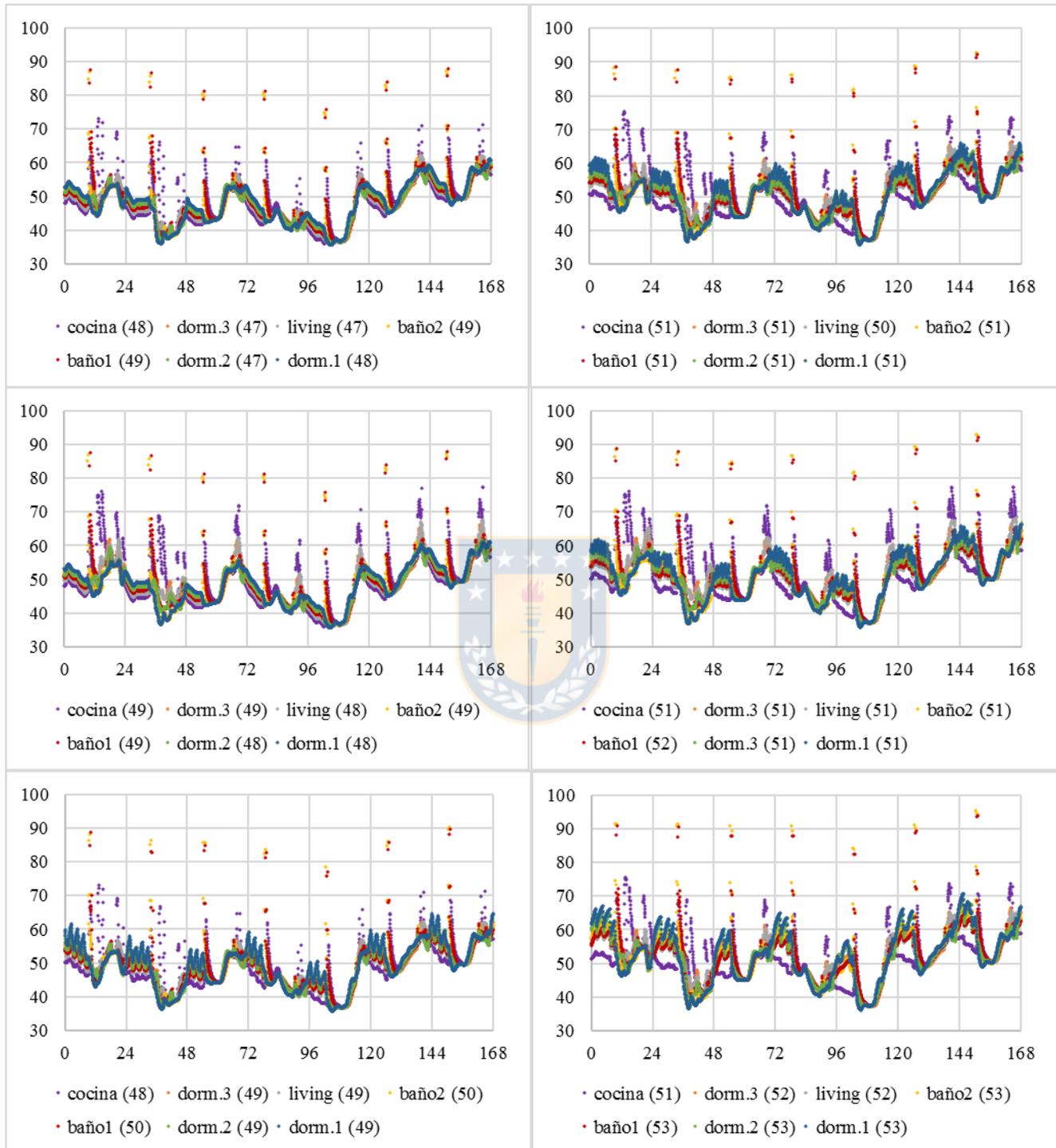


Figura 21. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living

4.3.2 Puertas de interés cerradas

Las puertas interiores cerradas significan una gran resistencia para el paso de aire entre las zonas que conectan, por lo que se registran distintas condiciones en la calidad del aire interior dependiendo de la zona, presentando problemas en la detección del contaminante. Los resultados generales de exposición de una semana se muestran en la Figura 22. En estos casos se produjo un aumento general de los promedios de exposición además de un mayor cambio en la exposición en el tiempo y entre un ocupante y otro comparado con los casos de puertas interiores abiertas. Al considerar las puertas interiores cerradas los habitantes más críticos pasan a ser P3 y P4 sobrepasando en todos los casos sus promedios de exposición el set-point impuesto y siendo el más crítico el P4 el cual sobrepasa considerablemente el valor del set-point. Los ocupantes P1 y P2 son los de menor exposición promedio y en todos los casos sus exposiciones son similares. Esto da cuenta de lo crítico que se vuelven los dormitorios 2 y sobretodo el dormitorio 3 al considerar cerradas las puertas interiores.

En esta condición es relevante la disposición de sensores al interior de la vivienda. La mejor disposición es la del sensor en el living + dormitorio principal puesto que está en dos zonas con alta ocupación lo que hace que la detección del CO₂ sea más representativa. Como se ve en los gráficos estos casos poseen los menores promedios de exposición siendo cercanos al valor del set-point impuesto siendo el ocupante P4 el de mayor exposición y por lo mismo su promedio más distante del set-point. Con esta disposición de sensor y con el set-point 2, el ocupante P4 alcanza un 20% de tiempo exposiciones sobre 1600 ppm lo cual es un tiempo considerable.

Al considerar un sensor en el dormitorio principal disminuye la efectividad de la ventilación por lo que los promedios de exposición de los ocupantes aumentan. Se registra un aumento de la exposición mayor por parte del ocupante P4 haciéndose con esta disposición de sensor aún más crítico. Con el set-point 1 todos los ocupantes se exponen alrededor de un 10% del tiempo a una concentración superior a los 1600 ppm. Al aumentar el set-point estos porcentajes de tiempo aumentan levemente para los ocupantes P1 P2 y P3 sin embargo el ocupante P4 alcanza más de la mitad del tiempo de exposición con concentraciones de CO₂ superiores a 1600 ppm. Esto da cuenta que con esta configuración se presentan deficientes condiciones del aire interior sobretodo en el dormitorio 3.

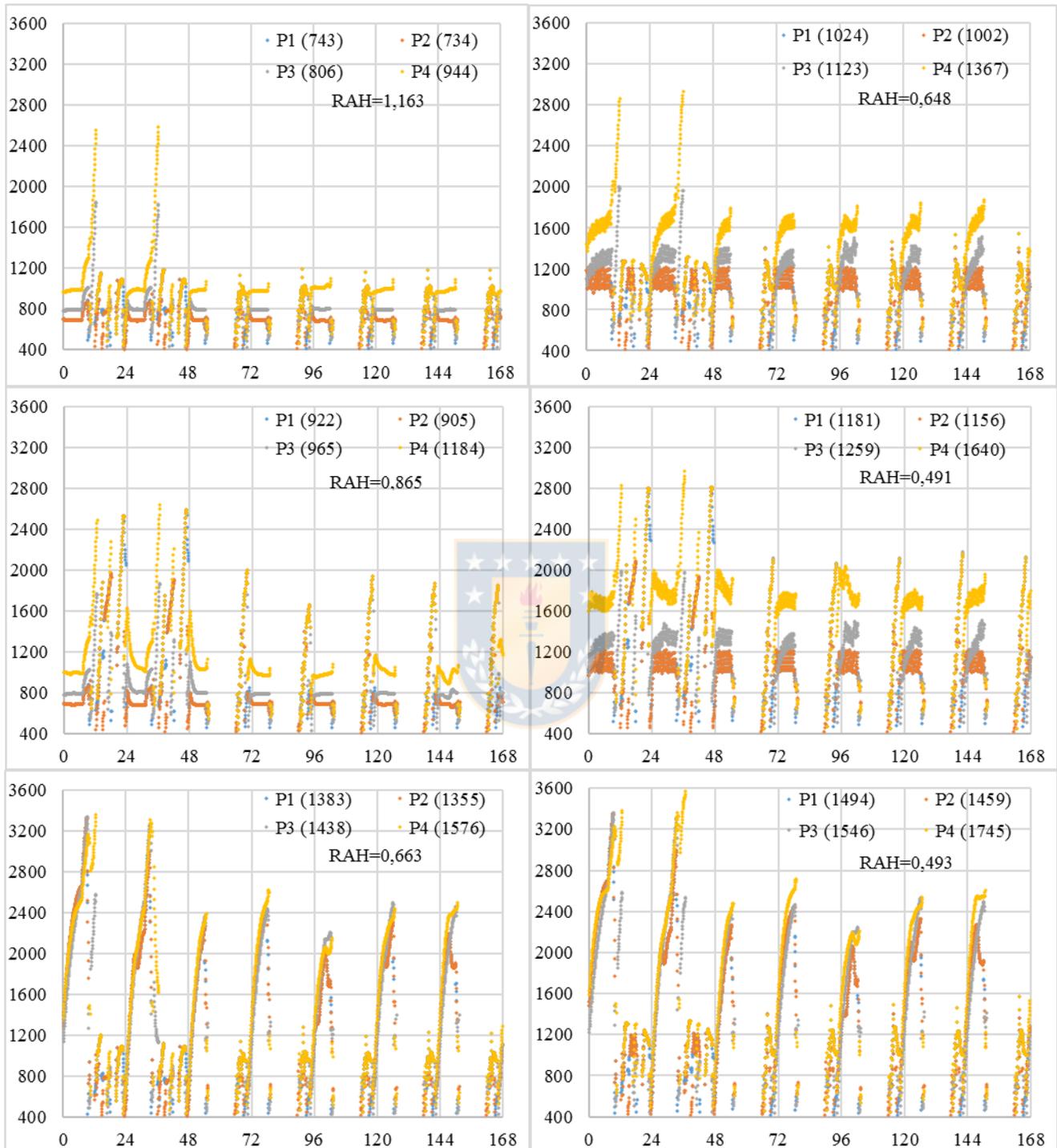


Figura 22. Exposiciones por persona al CO₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living

Con la disposición del sensor en el living los promedios de exposición son notoriamente más altos que los valores del set-point impuesto tal como se puede ver en la Figura 22. En este caso todos los ocupantes presentan exposiciones superiores a 1600 ppm sobre el 25 % del tiempo. Esto demuestra lo relevante que llega a ser la ubicación del sensor en este sistema cuando se mantienen las puertas interiores cerradas.

En la Figura 23 se puede ver el comportamiento en cada instante y el promedio de la HR de las distintas zonas durante esta semana de estudio. Como se muestra al considerar las puertas cerradas en general aumentan las humedades relativas registradas. Si bien el comportamiento en el tiempo de la humedad se asimila al caso de las puertas interiores abiertas, en este caso se nota una mayor diferencia entre la HR de las distintas zonas alcanzando valores entre 47 y 63%. En estas condiciones y al igual que con el CO₂ la mejor disposición de sensor es en living + dormitorio principal y el caso de un único sensor en el living la peor.

En los casos en que al menos hay un sensor en el dormitorio principal y con el set-point exigente la HR de los dormitorios se mantiene en valores aceptables, sin embargo, al aumentar el set-point hay un fuerte aumento en la HR del dormitorio 3. Al considerar un sensor en el living, la condición de los dormitorios queda desconectada de la zona de medición y los tres dormitorios alcanzan HR sobre el 70% más del 10% del tiempo incluso con el set-point más exigente.

Además, en esta condición los dormitorios 2 y 3 también pasan a ser zonas críticas incluso más críticas que las zonas húmedas para el set-point 2. La humedad relativa de las zonas húmedas no varía mucho con respecto al caso con las puertas abiertas, sin embargo, en este caso dejan de ser las zonas más críticas.

La deficiente CAI de los dormitorios 2 y 3 se puede explicar por la desconexión de estos dormitorios de las zonas de extracción, ya que debido la configuración de la vivienda hay al menos una zona entre estas y los locales de extracción, no así en el caso del dormitorio principal que se encuentra limitando con el baño 2 el cual es una zona de extracción. De estos dos más afectados, el ocupante P4 el más crítico, esto se debe a que entre su dormitorio y la cocina (zona de extracción más cercana) se encuentra el living-comedor el cual posee hartos componentes permeables al aire como la puerta principal y gran superficie de ventanas vías por las que entra el aire a extraer. Además, la cocina también posee puerta exterior y ventanas por lo cual también tiende a entrar aire directamente desde el exterior en vez de otras zonas como el dormitorio 3. Este efecto no es tan severo para el dormitorio 2 puesto que entre este y el baño 1 (zona de extracción más cercana) se encuentra el pasillo, esta zona tiene menor permeabilidad con el exterior.

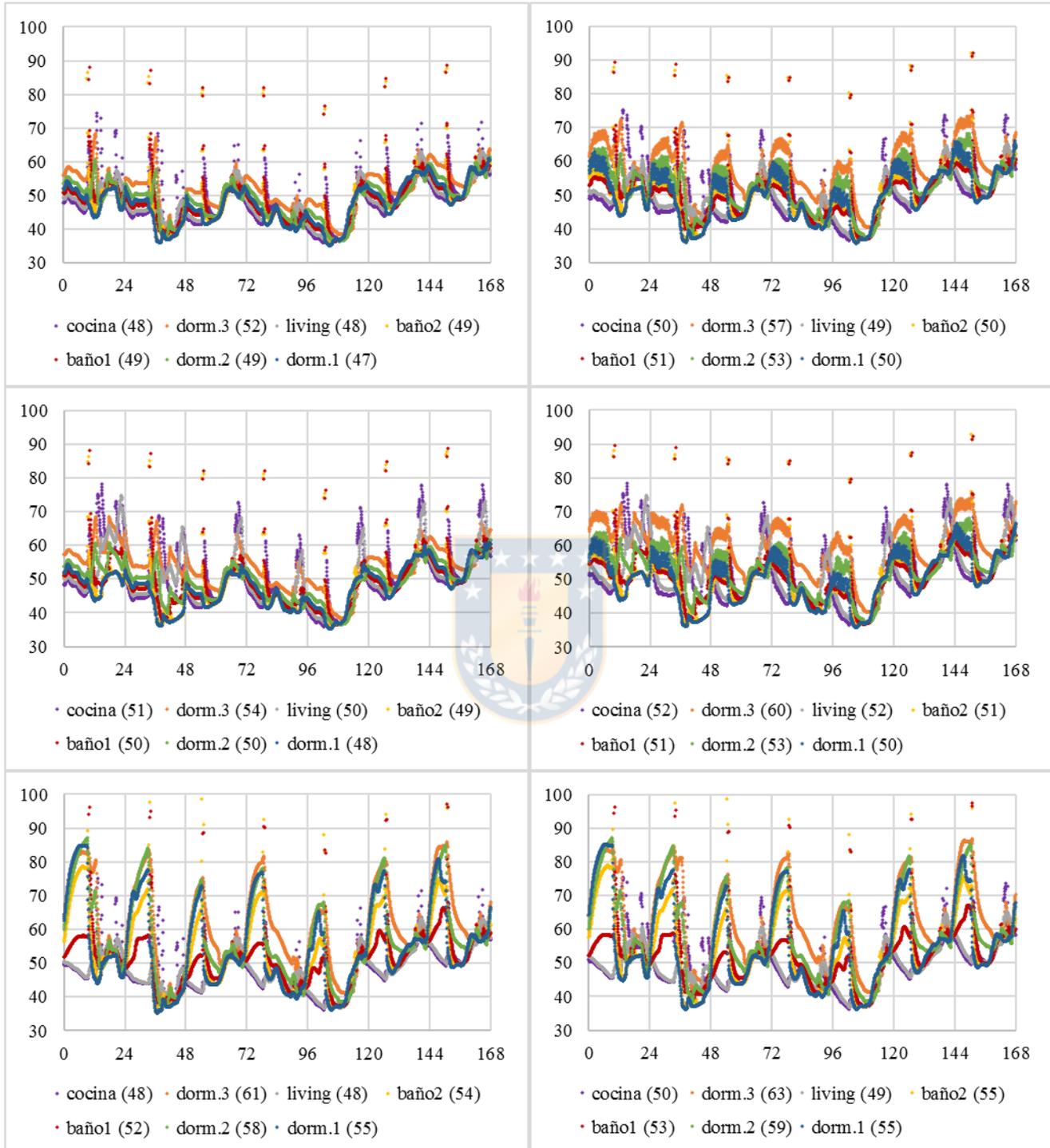


Figura 23. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema convencional con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + dormitorio principal. Fila central: sensor en dormitorio principal. Fila inferior: sensor en living

4.3.3 Ahorros energéticos

El promedio de renovaciones de aire durante todo el periodo de simulación y para todos los controles del sistema convencional se muestra en la Tabla 5. Cabe mencionar que mientras más bajos los promedios de RAH significa un ahorro más grande con respecto al funcionamiento continuo.

Tabla 5. Promedio de RAH de la vivienda durante todo el periodo de simulación para el sistema de ventilación convencional.

Disposición de sensor (es)	Condición puertas interiores		Set-point
	Abiertas	Cerradas	
living + dorm. principal	1,176	1,163	800
	0,612	0,674	1200
dormitorio principal	1,015	0,916	800
	0,566	0,545	1200
living	0,898	0,719	800
	0,540	0,543	1200
Funcionamiento continuo sin control: 1,760 RAH			

Tal como se espera, los casos de mayores de RAH (mayores gastos energéticos) son los casos de mayor CAI y los casos de menores RAH (menores gastos energéticos) los de menor CAI. En la Tabla 5 se puede ver que los promedios de RAH son considerablemente más bajos que el caso de funcionamiento continuo. No hay una variación significativa según la condición de las puertas interiores. Con el valor del set-point 1 se obtiene en promedio un ahorro del 45 % siendo los ahorros del caso de las puertas abiertas levemente mayores, esto basándose sólo en los promedios de RAH. Al aumentar el valor del set-point los ahorros aumentan y en promedio superan el 60% lo que da cuenta de la gran incidencia del valor del set-point en el gasto energético del sistema de ventilación y validándolo como estrategia para este propósito. El mayor ahorro logrado en condiciones de calidad del aire en rangos aceptables corresponde al caso del sensor en el living, con el set-point 2 y con las puertas abiertas, donde se alcanza un ahorro cercano al 70% con un promedio de 0,540 RAH. El caso de menor ahorro energético fue de un 34% para el caso de sensor en living + dormitorio principal con set-point 1 y con las puertas abiertas promediando 1,176 RAH.

4.4 Sistema de Ventilación Alternativo controlado por demanda

El sistema de ventilación alternativo logra con los sensores distribuidos hacer su efectividad independiente de la posición de las puertas interiores. Con la disposición de sólo un sensor, la CAI depende en gran medida de la condición de las puertas interiores.

4.4.1 Puertas de interés abiertas

Con las puertas abiertas este sistema logra mantener con ambas disposiciones de los sensores los promedios de exposición bajo el valor del set-point incluso para el set-point más exigente tal como se puede ver en los gráficos de la Figura 24 donde se muestran las exposiciones al CO₂ de los ocupantes durante una semana. Al igual que en el caso de puertas interiores abiertas del sistema convencional, se logra una homogenización en las exposiciones promedios de los ocupantes por lo que estas se mantienen en un rango relativamente acotado. Además, ambas disposiciones de sensor logran buenos resultados en las exposiciones puesto que durante las noches y en fin de semanas las exposiciones se logran mantener controladas y cercanas al valor del set-point. Con ambas disposiciones de sensores y en ambos set-point no hay registro durante el periodo de simulación de exposiciones sobre los 1600 ppm lo que significa desde el punto de vista del CO₂, que el sistema logra mantener una CAI aceptable el 100% del tiempo. Por otra parte, los promedios de exposición son menores que el valor del set-point para todos los ocupantes incluso con el set-point más exigente, la disposición de sensores distribuidos logra levemente menores exposiciones que el caso del sensor localizado. Los ocupantes más expuestos fueron en todos estos casos el P1 y P2, el ocupante con menor exposición promedio es el P4.



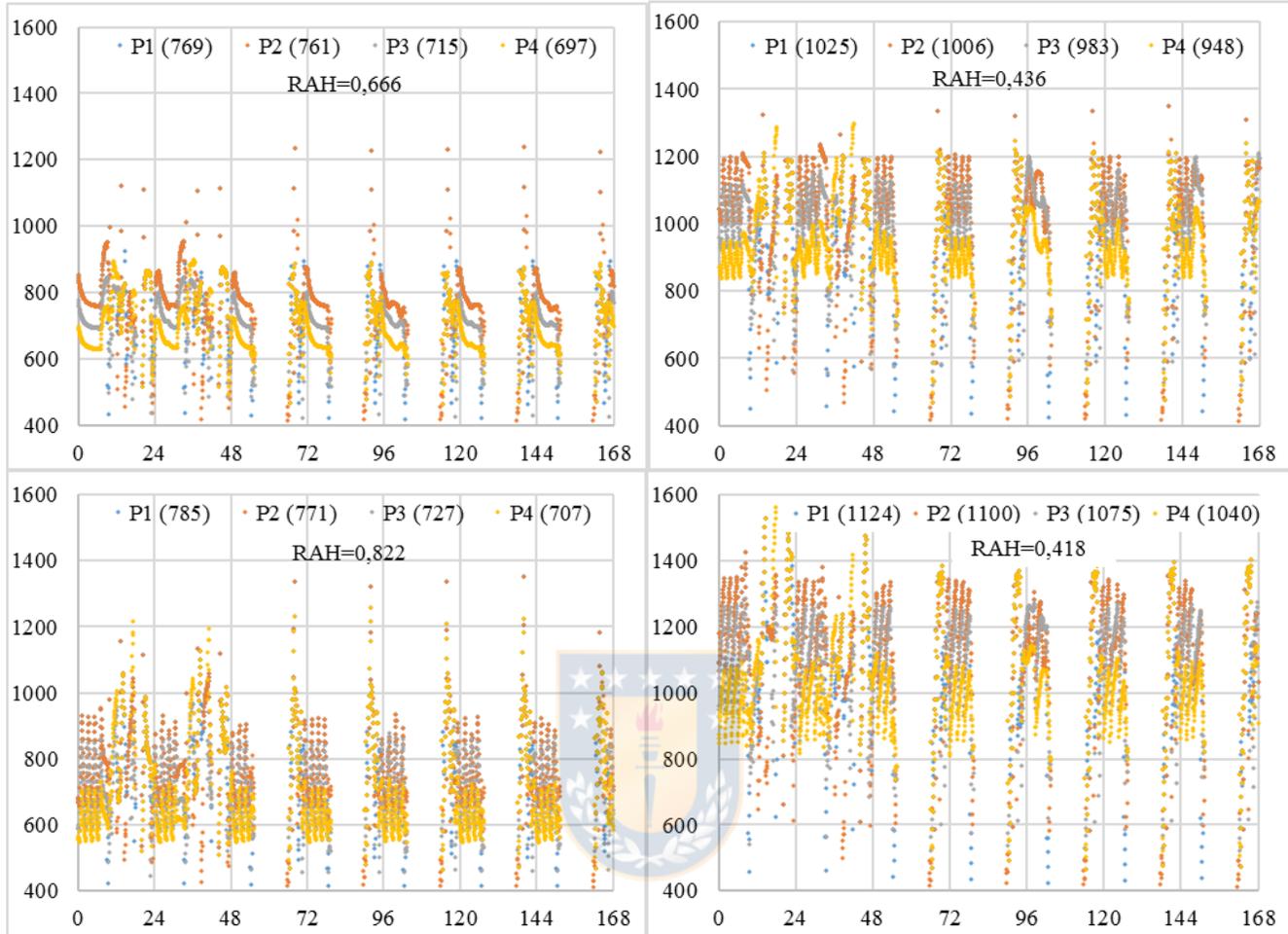


Figura 24. Exposiciones por persona al CO₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para Sistema alternativo con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 Dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo

En la Figura 25 se muestra en cada instante el promedio de HR de cada zona durante una semana para el sistema alternativo con puertas interiores de interés abiertas. Los promedios de humedades relativas de estos casos se posicionan en un rango relativamente acotado de humedad, esto es entre 48 y 54%. Cocina y baños son las zonas con mayor HR promedio siendo mayores que en el sistema convencional, especialmente la cocina que pasa a ser la zona más crítica en todos estos casos llegando a tener entre un 4 y 7% de su tiempo una HR sobre el 70%, en los baños también se registran HR sobre el 70% pero en tiempos menores a la mitad del tiempo que la cocina. En las demás zonas este porcentaje de tiempo es menor al 1% en todos los casos. El aumento de HR en las zonas húmedas puede indicar que el periodo de accionamiento propuesto para estas zonas es insuficiente.

Por otra parte, se registra un comportamiento de la humedad similar a los casos del sistema convencional, donde existe poca diferencia entre las humedades de las zonas conectadas por las puertas abiertas, la variación respecto al tiempo está relacionada con la ocupación de los distintos espacios y la condición de la humedad del aire exterior entrante. Además, también se cumple que con las puertas interiores abiertas hay pocas diferencias entre ambas opciones de sensor y control propuestas, donde

además hay poco aumento en la HR de las zonas al aumentar el valor del set-point justificando desde este punto de vista su aplicación para obtener un ahorro energético.

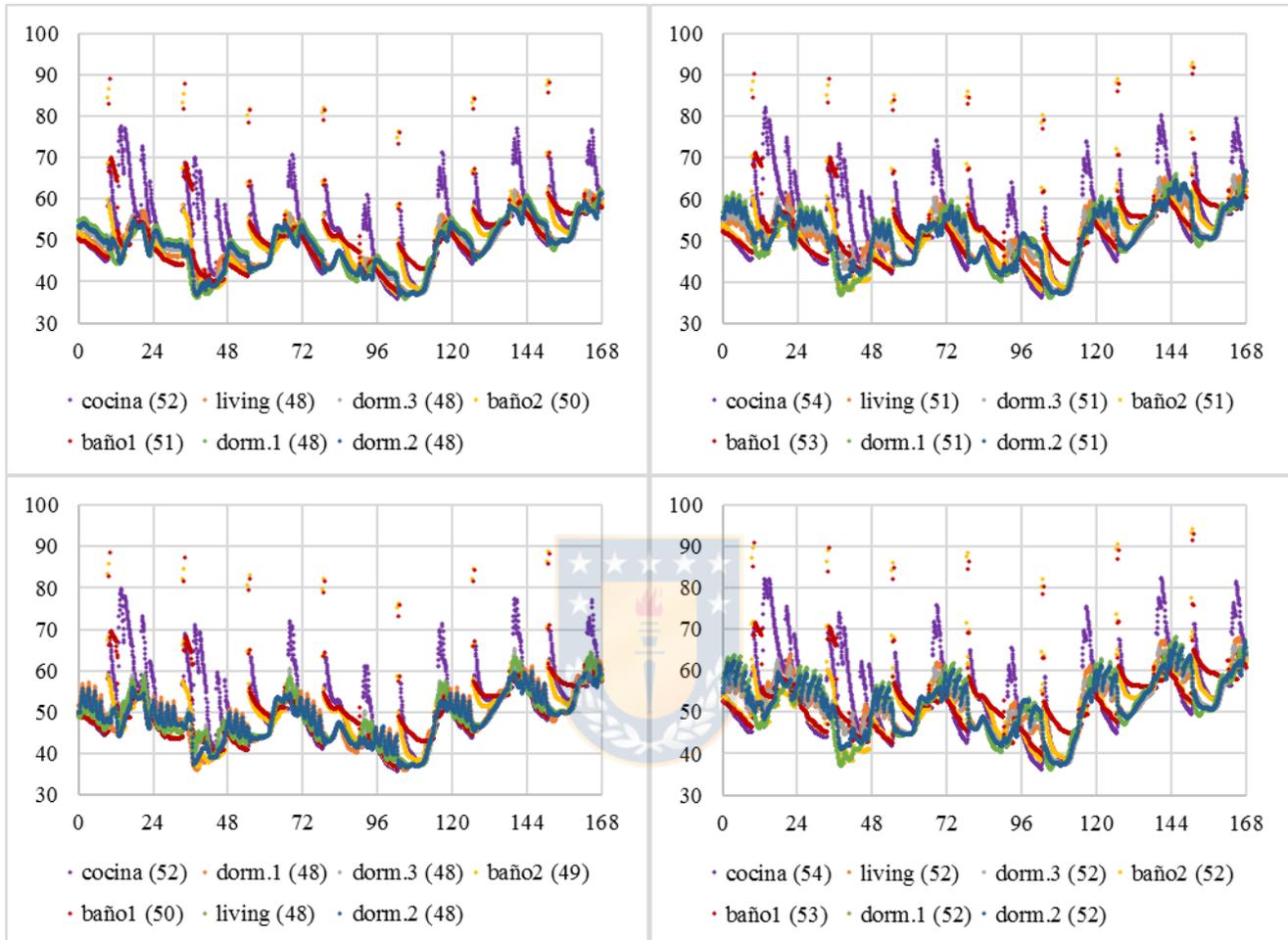


Figura 25. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema alternativo con puertas interiores abiertas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 Dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo

4.4.2 Puertas de interés cerradas

Cuando se consideran las puertas cerradas pasa a ser relevante la ubicación de los sensores ya que como se dice anteriormente las puertas se convierten en fuertes resistencias entre las distintas zonas lo que produce aumentos localizados de los contaminantes, por lo mismo, el caso de un sensor pierde efectividad. Esto se puede corroborar en los gráficos de exposición al dióxido de carbono de la Figura 26 donde se nota claramente el aumento en la exposición al CO_2 para la opción del sensor localizado respecto a la opción distribuida. Se muestra que el sensor y control distribuido mantienen las exposiciones de los ocupantes en niveles aceptables incluso similares al caso de la puerta abierta dando cuenta que esta disposición de sensor es poco sensible a la posición de las puertas interiores, esta disposición tampoco registra alguna exposición sobre los 1600 ppm. Es por esto que en este estudio el

sistema alternativo con esta disposición de sensores resulta ser la opción más efectiva para enfrentar la posición cerrada de las puertas interiores.

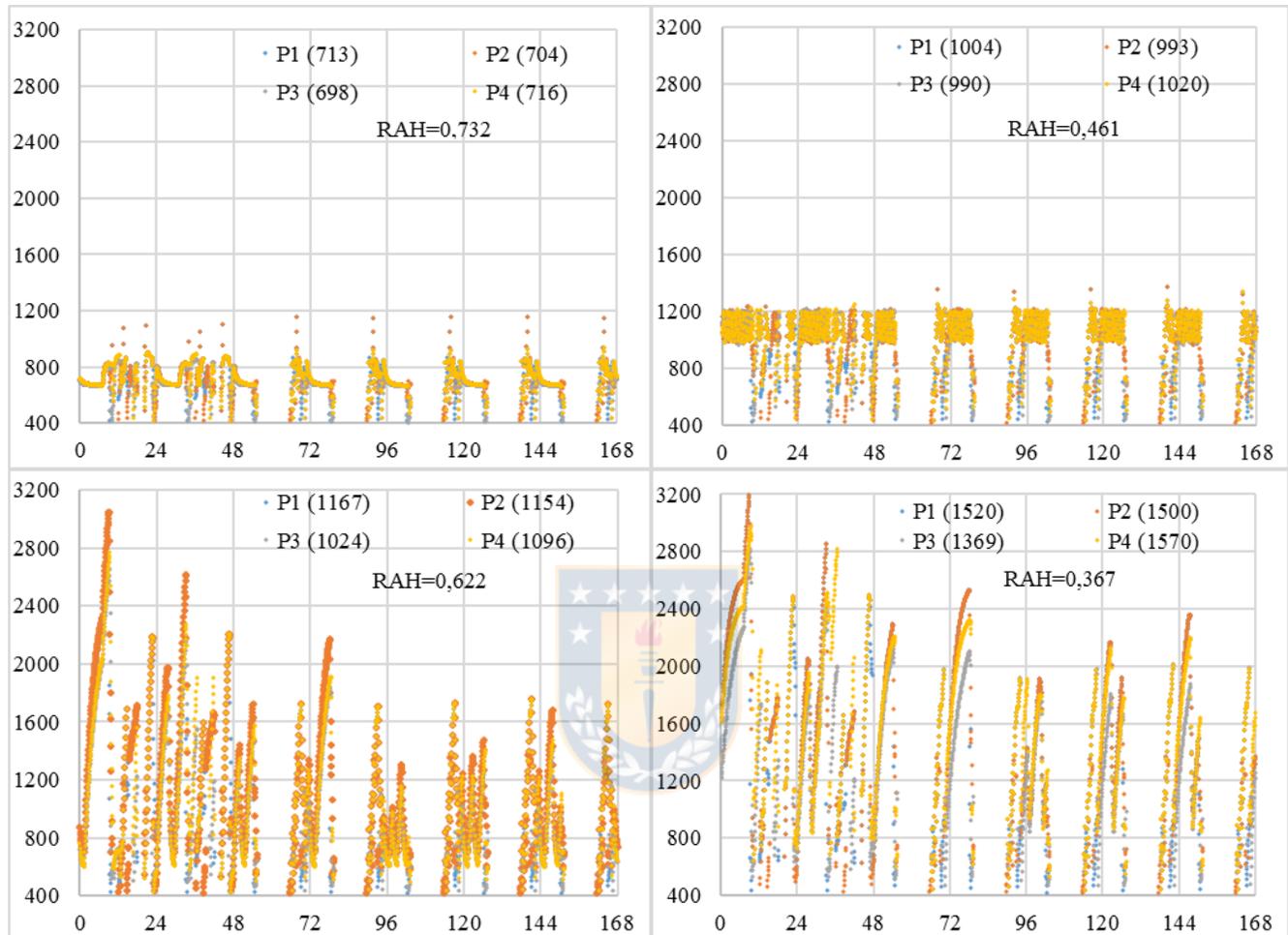


Figura 26. Exposiciones por persona al CO₂ [ppm] vs. Hora de la semana [h] para sistema alternativo con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo

Cuando se considera un sensor en el pasillo aumentan las exposiciones al CO₂ considerablemente puesto que el promedio de exposición de todos los ocupantes supera ampliamente ambos set-points tal como se puede ver en la Figura 29, además se registran tiempo con exposición sobre los 1600 ppm, en promedio 10 % y 25% del tiempo de exposición de los ocupantes para los set-points 1 y 2 respectivamente, dando cuenta del deterioro de esta estrategia al considerar las puertas interiores cerradas. Eso se puede explicar por la desconexión entre las distintas zonas no permitiendo el transporte de los contaminantes desde las zonas más contaminadas hasta la zona de detección (pasillo).

En la Figura 27 se pueden ver las humedades relativas para las distintas zonas durante una semana, además del promedio de humedad relativa durante este tiempo. Tal como en el caso de las exposiciones al CO₂, en el caso de la humedad también se hace muy relevante la disposición del sensor.

El caso del sensor distribuido es poco sensible a la condición de las puertas interiores obteniendo valores de HR similares al caso con las puertas abiertas manteniéndose para ambos set-points estos valores entre 47 y 53%. En estos casos las zonas más críticas siguen siendo las húmedas y específicamente la cocina la más crítica alcanzando una HR sobre el 70% alrededor del 3 y 5 % del tiempo de simulación, en los baños este porcentaje de tiempo se mantiene alrededor del 2% y en las demás zonas este tiempo se mantiene en periodos menores al 1% del tiempo de simulación.

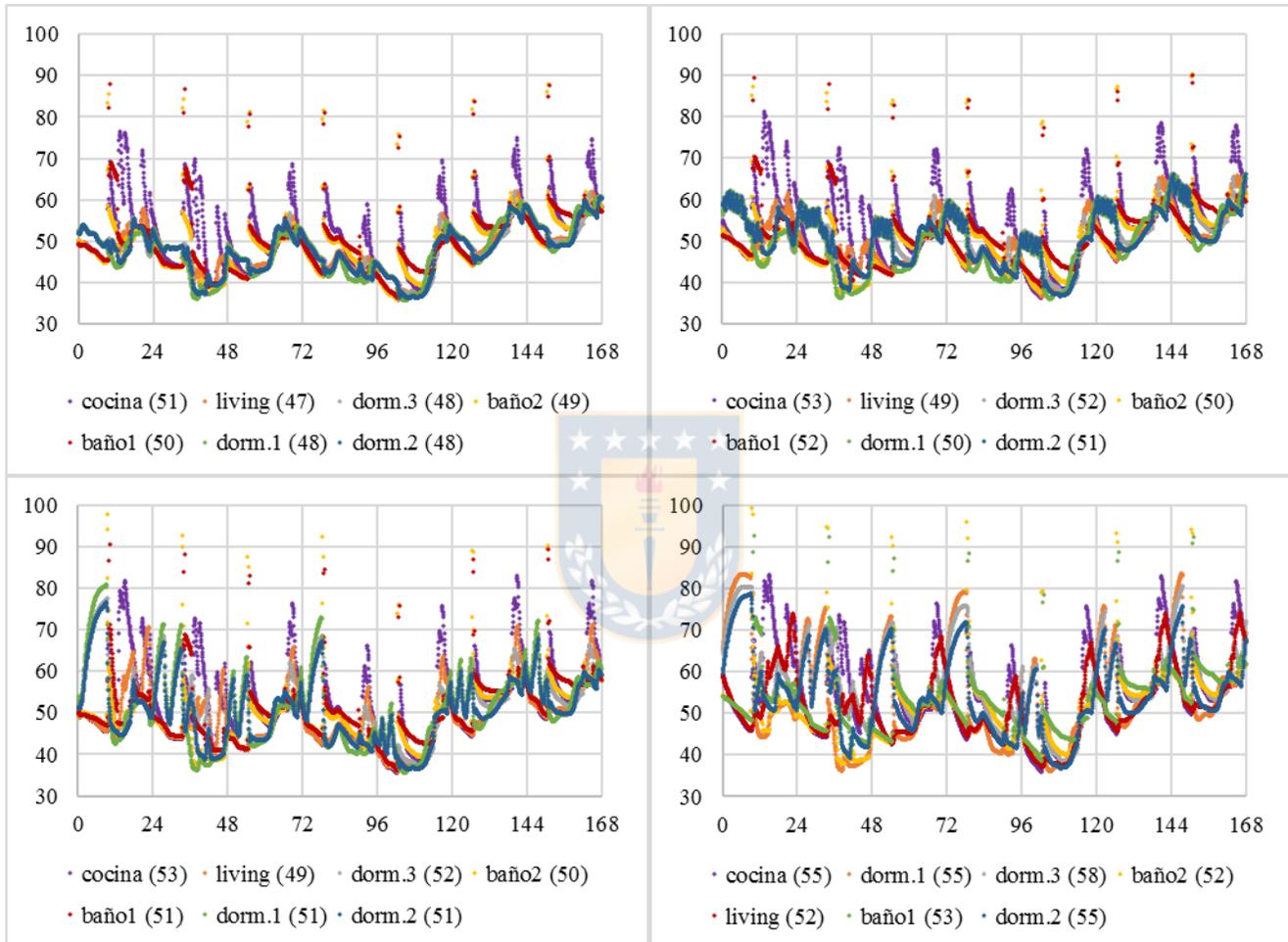


Figura 27. Humedad relativa por zona [%] vs. Hora de la semana [h] para sistema alternativo con puertas interiores cerradas. Gráficos: Columna izquierda: set-point 1. Columna derecha: set-point 2. Fila superior: sensor en living + 3 dormitorios. Fila inferior: sensor en pasillo.

El caso del sensor localizado como se decía en el análisis anterior, pierde efectividad por lo que el aire de los dormitorios se aísla y aumenta rápidamente los valores de CO_2 y humedad relativa lo que provoca un aumento en la diferencia entre los promedios de humedad. En esta disposición de sensor las humedades se mantienen en el rango de 49 y 58% de HR pasando a ser los dormitorios zonas críticas tal como se puede ver en la Figura 27. Para el set-point 1 la cocina y baños siguen siendo las zonas más críticas y se aumentan los periodos de tiempo en que su HR supera los 70%, en el caso de la cocina superando el 5% del tiempo y en el caso de los baños y dormitorios 1 y 3 alrededor del 2% de su

tiempo. Al aumentar el valor del set-point tanto la cocina con el dormitorio 1 y 3 pasan a tener las mayores HR alcanzando un 6% de su tiempo con HR sobre el 70%.

4.4.3 Ahorros energéticos

Los promedios de renovaciones de aire por hora durante todo el tiempo de simulación y para todos los controles del sistema de ventilación alternativo se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Promedio de RAH de la vivienda durante todo el periodo de simulación para el sistema de ventilación alternativo.

Disposición de sensor (es)	Condición puertas interiores		Set-point
	Abiertas	Cerradas	
dormitorios	0,662	0,722	800
+ living	0,451	0,451	1200
pasillo	0,815	0,674	800
	0,442	0,404	1200
Funcionamiento continuo sin control: 1,810 RAH			

Los sistemas de control probados en el sistema alternativo logran al igual que el sistema convencional, grandes ahorros de energía al compararlos con su funcionamiento continuo. Las variaciones entre las RAH al considerar las puertas interiores abiertas y cerradas son mayores para el set-point 1. Este sistema logra en general mayores ahorros que el sistema convencional sobretodo en el set-point 1, en el que en promedio se logra aproximadamente un 60% de ahorro basándose en la disminución de RAH, esto equivale a 50% más de ahorro comparado con el sistema convencional con el mismo set-point. Al aumentar el set-point los ahorros energéticos aumentan dando en promedio en este caso 75%. El caso de mayor ahorro en condiciones de aire aceptable es de 76% de ahorro y es para el caso del sensor en el pasillo, con el set-point 2 y con las puertas abiertas equivalentes a un promedio de renovaciones igual a 0,442 RAH. El caso de menor ahorro energético es también con el sensor en el pasillo para el set-point 1 y con las puertas abiertas consiguiendo un 55% de ahorro al tener 0,815 RAH promedio.

Por otra parte, cabe mencionar que como en este sistema la extracción en baños y cocina sólo se hace en forma encendido-apagado según un periodo de accionamiento propuesto, queda en evidencia si este horario es realmente adecuado para lograr depurar los contaminantes de esas zonas, los cuales en este estudio son representados por la humedad de aquellos lugares. Tal como se muestra anteriormente los promedios de humedad relativa de dichas zonas son las más altas de la vivienda en la mayoría de los casos, presentando en todos estos casos simulados humedades relativas mayores al 70% siendo la cocina en todos los casos la zona con mayor humedad. Esto demuestra que el horario de accionamiento de la extracción de estas zonas basado en su ocupación es insuficiente para depurar la humedad producida en dichas zonas y por lo tanto posiblemente también insuficiente para depurar otro tipo de contaminantes producidos junto a la humedad como olores. Este efecto se hace sentir mayormente en la cocina lo cual se puede explicar debido a que el horario de accionamiento de su extractor no

corresponde a la totalidad de su ocupación como en los baños sino sólo durante la producción de vapor, lo que representa menos de la mitad del tiempo en que la cocina es ocupada por alguna persona. Esta situación permite la acumulación de humedad producida por las personas en dicha zona, que, además es de tamaño menor comparada a otras zonas de la vivienda y por eso más fácil aumentar su concentración. Por otra parte, como se considera en las simulaciones las puertas interiores de estas zonas siempre cerradas, la humedad promedio aumenta mayormente pero sólo en estas zonas dando cuenta de la acumulación de humedad en estos lugares y no su esparcimiento por las otras zonas de la vivienda. Sin embargo, algún grado de apertura de estas puertas es lo que ocurre en la realidad, esto podría significar un esparcimiento de los contaminantes no extraídos hacia otras zonas de la vivienda lo que comprometería la CAI de zonas comúnmente habitadas. Para evitar esto se propone para este sistema aumentar los periodos de accionamiento propuestos. Esto se puede llevar a cabo por ejemplo mediante la utilización de un temporizador de apagado para alargar la extracción unos minutos después de la desocupación de estos espacios.

Haciendo un análisis general respecto a la ubicación de las extracciones, se puede ver que provocando la misma cantidad de RAH existen condiciones donde ciertas extracciones van a ser más favorables y otras menos favorables. El sistema convencional de extracción en cocina y baños es un tipo de ventilación común, tiene la ventaja de extraer en dichas zonas donde existen grandes fuentes de contaminantes evitando su dilución por el resto de las viviendas. Sin embargo, para viviendas con las características estudiadas en esta investigación se ve que este sistema tiene dificultades en generar los flujos necesarios en otras zonas distintas de las de extracción para evacuar otro tipo de contaminantes como los producidos por las personas comúnmente (bio-efluentes), este inconveniente se agudiza al mantener las puertas interiores cerradas. Este problema que tiene que ver con la incapacidad de generar la distribución de flujo de diseño, a pesar de que el sistema de ventilación impone hartos cambios de aire por hora (alrededor de 1,7 RAH). Esto se debe principalmente a la alta permeabilidad de algunos componentes constructivos en la envolvente y la alta resistencia al tránsito de aire que significan las ranuras modeladas bajo la puerta. Por otra parte, el sistema de ventilación alternativo permite enfrentar el problema de la alta permeabilidad en envolvente de la vivienda puesto que este sistema no busca imponer un flujo dado de una zona a otra, sino que impone directamente en cada zona cierto flujo de aire. Además, al estar en las mismas zonas de detección y producción del contaminante su evacuación es más eficaz y su accionamiento más rápido que el sistema convencional. Una desventaja de este sistema de ventilación es que, si el periodo de extracción en cocina y baños es insuficiente, se corre el riesgo de dispersar los contaminantes producidos en estas zonas por el resto de las zonas, tal como lo ocurrido principalmente en la cocina en el caso de esta investigación. Por otra parte, la opción de sensores y control distribuido de este sistema permite por una parte hacer su efectividad independiente de la condición de las puertas interiores. A la vez, permitir a las extracciones ser independientes entre una y otra por lo que se permite el funcionamiento parcial de la ventilación, logrando los mayores ahorros energéticos de este estudio.

Haciendo un análisis general con respecto al posición de las puertas interiores estudiadas se ve la gran incidencia en la condición del aire entre las distintas zonas. El modelo de las puertas interiores abiertas permite un gran flujo de aire entre las zonas conectadas es por esto que se consigue una CAI similar entre ellas puesto que se logra la dilución de los contaminantes producidos en alguna zona específica a los demás lugares de la vivienda homogenizando las condiciones del aire en la vivienda. Esto a la vez produce que las variaciones de concentración de contaminante sean más lentas. El modelo utilizado para las puertas de estudio cerradas significa una gran resistencia al paso de aire entre las zonas que

conecta por lo que se presentan diferencias en las condiciones del aire entre las zonas interiores. Esta desconexión hace que los contaminantes se diluyan en un volumen menor y por lo mismo las variaciones temporales de concentración son más rápidas pudiendo alcanzar altos valores en cortos intervalos de tiempo. Es por eso que al considerarse las puertas de los dormitorios cerradas durante las noches aumenta en estos la concentración de CO₂ y la humedad relativa. Un sistema de ventilación eficaz tiene capacidad de provocar en cada zona los flujos necesarios para mantener la concentración de contaminantes en niveles aceptables aún en esta condición desfavorable de puertas interiores cerradas. Según esto, una posible mejora para el sistema convencional es considerar rejillas más grandes en las puertas interiores.

Haciendo análisis general respecto a los sensores, resulta lógico que mientras más sensores se tenga en la vivienda es más efectiva la detección de contaminante, sin embargo, esto aumenta también el costo del sistema de ventilación. Para el sistema convencional la detección en el de dormitorio principal junto al living, es representativas de la condición de la calidad del aire interior. Esto porque estos lugares son comúnmente las zonas con mayor ocupación durante la noche y día respectivamente. Si se dispone de un solo sensor, la ubicación de este debería ser en la zona de la vivienda que pasó más tiempo ocupada, ya sea por el tiempo de ocupación o por el número de ocupantes. Por otra parte, en el sistema alternativo el caso de sensores en todos los dormitorios y el living resulta ser la opción de mejor detección ya que las extracciones se realizan en zonas con mayores fuentes de CO₂, y por otra parte, como los sensores están en esas mismas zonas permite una rápida y efectiva detección de los contaminantes y con ello una rápida respuesta de las extracciones manteniendo las exposiciones más controladas. Esta detección y actuación localizada permite también como se ve en los resultados anteriores ahorros energéticos considerables y mayores que los logrados por el sistema convencional, lo que representa otra ventaja de la detección y control distribuido del sistema alternativo.

Haciendo un análisis general con respecto a los set-points utilizados, los resultados demuestran que son realmente efectivos como estrategias para conseguir un mayor ahorro energético, esto debido a que aún con el set-point exigente se tienen ahorros energéticos de alrededor de 40%. Al aumentar el set-point de trabajo estos ahorros aumentaron significativamente y en esos casos se ahorra en promedio más de la mitad de la energía comparado al caso de extracción en forma continua. Sin embargo, no en todos los casos es favorable el aumento del set-point, puesto que hay casos en que se pierde la efectividad del sistema considerablemente. Estos casos más afectados son en los que se utiliza sólo un sensor y se mantiene las puertas interiores cerradas. Finalmente, se menciona que el valor del set-point representa un parámetro de control efectivo ya que, modificándolo se tiene gran influencia en la calidad del aire interior y los ahorros energéticos conseguidos por un sistema.

Finalmente, al comparar ambos sistemas controlados bajo demanda, el sistema alternativo con sensores y control distribuido, representa la ventilación controlada con mejor desempeño en este estudio. Esto por el gran control sobre las exposiciones al CO₂, por sus valores de humedad relativa aceptable, por su capacidad de enfrentar la posición interna de las puertas interiores y por sus grandes ahorros energéticos. Sin embargo, como se menciona anteriormente se deben aumentar los horarios de extracción en las zonas húmedas para eliminar completamente los contaminantes de dichas zonas y así no correr el riesgo que se dispersen por la vivienda.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de esta investigación son:

- La efectividad de los sistemas de ventilación controlados por demanda puede ser muy variable dependiendo de las condiciones de funcionamiento. La correcta detección del contaminante y correcta creación de los flujos de diseño son los aspectos más influyentes en la efectividad de la ventilación controlada por demanda.
- El alto nivel de permeabilidad en la envolvente de la vivienda y la gran resistencia que generó el modelo de puertas interiores cerradas, implica una gran dificultad para generar una red continua de flujos de aire a través de la vivienda. Es por esto que la ventilación convencional presenta más dificultades en generar los flujos impuestos y mantenerlos en las condiciones críticas. La ventilación alternativa posee la ventaja de basarse en redes de flujos independientes y por eso presenta mejor efectividad en la imposición de los flujos de diseño aún en las condiciones más desfavorables.
- Ambos sistemas de ventilación controlados, poseen un potencial de ahorro energético de más del 60% al compararse con el caso de funcionamiento sin control. Un accionamiento localizado (no centralizado) tiene mayor potencial de ahorro energético puesto que permite un funcionamiento parcial de la ventilación. Es por esto que el sistema alternativo con el control localizado presentó los mayores ahorros energéticos de esta investigación.
- Considerar una mayor área efectiva en el modelo de puerta cerrada (ranura bajo la puerta o rejilla de aire), puede disminuir la resistencia al paso de aire entre las zonas interiores haciendo más fácil la generación de la red de flujos del sistema convencional. Aumentar la hermeticidad de la vivienda en la envolvente y sobretodo en las zonas extracción también podría mejorar la efectividad de este sistema.
- En viviendas con densidad de personas como la de esta investigación (20 m²/persona), es muy relevante la correcta detección del contaminante, puesto que los aumentos de concentración son rápidos pudiendo llegar a valores muy altos en pocas horas. Por eso la ubicación de o los sensores debe ser en zonas representativas de ocupación.
- El set-point es un parámetro muy importante que puede variar el desempeño de un sistema de ventilación dado, eligiendo si se prefiere una mejor calidad del aire o altos ahorros energéticos.

BIBLIOGRAFÍA

- Afshari A., Bergsøe N.C. (2003). Humidity as a Control Parameter for Ventilation, *Indoor and Built Environment*, 12, 215–216.
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (2005). Chapter 16: Airflow around buildings. En *ASHRAE Handbook – Fundamentals* (SI Edition)
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (2005). Chapter 27: Ventilation and Infiltration. En *ASHRAE Handbook – Fundamentals* (SI Edition)
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (2005). Chapter 34: Indoor environmental modeling. En *ASHRAE Handbook – Fundamentals* (SI Edition)
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (2007). *ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*.
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (2013). *ASHRAE Standard 62.2-2013: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality in Low Rise Residential Buildings*.
- Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción, Universidad del Bío-Bío (2014). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*.
- Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2017). *Documento Básico HS, Salubridad*.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción (2010). *Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial*.
- Dols S.W. (2001). *A tool for modelling airflow & contaminant transport*. *ASHRAE Journal*, 43, 35-42.
- Dols S.W., Walton G.N (2002). *CONTAMW 2.0 User Manual* (No. NISTIR 6921). Washington, D.C.: National Institute of Standards and Technology.
- Emmerich SJ. (2001). Validation of multizone IAQ modelling of residential-scale buildings: a review. *ASHRAE transactions*, 107, 619-628.
- Emmerich SJ. (2003). Validation of contamw predictions for tracer gas in a townhouse. *8th international IBPSA conference*. Eindhoven: IBPSA. 299-306.
- European Committee for Standardization (2007). *EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.

- Feustel H.E. (1990) *COMIS Fundamentals*. California: Lawrence Berkeley Laboratory.
- Fissore, A. (2017) *Ventilación Natural*. (Apuntes de clases disponibles en Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile)
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2014) *Guía de renovación de aire eficiente en el sector residencial*.
- Guyot G., Sherman M., Walker I. (2018). Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review. *Energy and Buildings*, 165, 416–430.
- Health Canada, Minister of Supply and Services, Government of Canada (1989). *Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality*.
- Inmobiliaria PY (2018). Recuperado en <https://py.cl/proyectos/san-felipe/casas/v-san-felipe-terranoble/> [2018, 4 de abril]
- Jreijiry D., Husaunndee A., Inard C. (2007). Numerical study of a hybrid ventilation system for single family houses. *Solar Energy*, 8, 227–239
- Klepeis N.E., Nelson W.C., Ott W.R., Robinson J.P., Tsang A.M., Switzer P., Behar J.V., Hern S.C., Engelmann W.H. (2001). The National human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol*, 11, 231–252.
- Knudsen, H. N., & Wargocki, P. (2010). Strategy for good perceived air quality in sustainable buildings. In *Proceedings of Clima 2010: 10th REHVA World Congress 'Sustainable Energy Use in Buildings'*
- Laverge J., Van Den Bossche N., Heijmans N., Janssens A. (2011). Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies. *Building and Environment*, 46, 1497–1503.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Gobierno de Chile (2018). *Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile* (Edición 2°) (Tomo 1).
- Nielsen J. (1992). A new ventilation strategy for humidity control in dwellings, *Presented at the 13th AIVC Conference 'Ventilation for Energy Efficiency and Optimum Indoor Air Quality'*
- Organización Mundial de la Salud (2014). *Pautas de la OMS para la calidad del aire interior: combustión doméstica de combustible*.
- Pavlovos V. (2004). Demand controlled ventilation: A case study for existing Swedish multifamily buildings. *Energy and Buildings*, 36, 1029–1034.

Red Agrometeorológica de INIA (2018), [base de datos]. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. Recuperado en [http://agromet.inia.cl/temp/consulta_Chiguayante\(15742904456887\).xls](http://agromet.inia.cl/temp/consulta_Chiguayante(15742904456887).xls) [2018, 21 de marzo].

Seppanen OA, Fisk WJ. (2004). Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air*, 14, 102-118.

Shin MS., Rhee KN., Lee ET., Jung GJ. (2018). Performance evaluation of CO₂-based ventilation control to reduce CO₂ concentration and condensation risk in residential buildings. *Building and Environment*, 142, 451-463.

Trechsel H. R. (1994). *Moisture Control in Buildings*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials



Anexo A: Pasos de aire en la envolvente de la vivienda

Se presenta la Tabla 7 y Tabla 8 con los elementos de pasos de aire considerados en cada zona en la envolvente de la vivienda.

Tabla 7. Detalle de pasos de aire en la envolvente de la vivienda.

Zona	Orientación	Elemento	Altura [m]	Área [m ²]
Living comedor	norte	ventana inferior	1,185	0,610
		ventana superior	1,862	0,610
		muro inferior	0,600	4,594
		muro superior	1,800	4,011
	este	puerta inferior	0,000	1,443
		puerta superior	2,000	0,361
		ventana inferior	1,055	2,331
		ventana superior	1,818	2,331
		muro inferior	0,600	5,220
		muro superior	1,800	4,136
	sur	muro inferior	0,600	4,913
		muro superior	1,800	4,913
	horizontal	techo	2,400	31,333
	Dormitorio 1	norte	muro inferior	0,600
muro superior			1,800	1,332
oeste		ventana inferior	1,159	1,300
		ventana superior	1,853	1,300
		muro inferior	0,600	3,104
		muro superior	1,800	1,957
sur		muro inferior	0,600	5,329
		muro superior	1,800	5,329
horizontal		techo	2,400	14,176
Dormitorio 2		norte	ventana inferior	1,159
	ventana superior		1,853	0,482
	muro inferior		0,600	2,978
	muro superior		1,800	2,554
	oeste	ventana inferior	1,159	1,011
		ventana superior	1,853	1,011
		muro inferior	0,600	3,515
		muro superior	1,800	2,623
	horizontal	techo	2,400	9,809

Tabla 8. Detalle de pasos de aire en la envolvente de la vivienda (continuación)

Zona	Orientación	Elemento	Altura [m]	Área [m ²]
Dormitorio 3	norte	ventana inferior	1,159	0,963
		ventana superior	1,853	0,963
		muro inferior	0,600	2,793
		muro superior	1,800	1,943
	horizontal	techo	2,400	9,438
Cocina	este	puerta inferior	0,000	1,221
		puerta superior	2,000	0,305
		ventana inferior	1,159	0,289
		ventana superior	1,853	0,289
		muro inferior	0,600	0,338
		muro superior	1,800	0,389
	sur	muro inferior	0,600	2,831
		muro superior	1,800	2,831
	oeste	ventana inferior	1,159	0,819
		ventana superior	1,853	0,819
		muro inferior	0,600	0,958
		muro superior	1,800	0,236
	horizontal	techo	2,400	8,350
Baño 1	norte	ventana inferior	1,575	0,231
		ventana superior	1,992	0,231
		muro inferior	0,600	2,082
		muro superior	1,800	1,619
	horizontal	techo	2,400	3,611
Baño 2	sur	ventana inferior	1,575	0,231
		ventana superior	1,992	0,231
		muro inferior	0,600	1,832
		muro superior	1,800	1,370
	horizontal	techo	2,400	3,284

Anexo B: Detalle de promedios de exposición al dióxido de carbono y humedad relativa

A continuación, en las Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, se exponen los resultados de exposición al dióxido de carbono y humedades relativas de todo el periodo de simulación. Los resultados se presentan para cada caso en el siguiente formato:

carácter 1 / carácter 2 (carácter 3)

donde:

carácter 1: Para exposiciones al CO₂ representa el promedio simple entre los promedios de exposición (ppm) de los ocupantes durante el periodo de simulación. Para las humedades relativas, este carácter representa el promedio simple entre los promedios de humedades relativas (%) de todas las zonas durante el periodo de simulación.

carácter 2: Para exposiciones al CO₂ representa el mayor promedio de exposición (ppm) de alguno de los ocupantes. Para las humedades relativas, este carácter representa la mayor humedad relativa (%) promedio de alguna zona durante todo el periodo de simulación.

carácter 3: Para las exposiciones al CO₂ representa a qué ocupante equivale la mayor exposición promedio. Para la humedad relativa equivale a la zona de mayor promedio de humedad relativa.

Tabla 9. Indicadores de exposición de todo el periodo de simulación para el sistema convencional.

Sistema de control	Condición puertas interiores		Set-point
	Abiertas	Cerradas	
Sensor dorm. y living	705 / 737 (P1)	807 / 944(P4)	800
	963 / 1003 (P1)	1086 / 1266 (P4)	1200
Sensor dormitorio	781 / 819 (P1)	963 / 1123 (P4)	800
	1014 / 1056 (P1)	1218 / 1461(P4)	1200
Sensor living	812 / 853 (P1)	1291 / 1397(P4)	800
	1070 / 1109 (P1)	1390 / 1520(P4)	1200
Caso base	683 / 716 (P1)	775 / 897 (P4)	
Infiltración	2110 / 2148 (P1)	2455 / 2764 (P4)	

Tabla 10. Indicadores de humedad relativa de todo el periodo de simulación para el sistema convencional.

Sistema de control	Condición puertas interiores		Set-point
	Abiertas	Cerradas	
Sensor dorm. y living	43,9 / 44,8 (B2)	44,5 / 47,1 (D3)	800
	46,5 / 47,1 (B1)	46,8 / 51,5 (D3)	1200
Sensor dormitorio	44,5 / 45,2 (C)	45,4 / 48,5 (D3)	800
	46,8 / 47,4 (B1)	47,6 / 52,9 (D3)	1200
Sensor living	45,0 / 45,8 (B2)	48,2 / 53,8 (D3)	800
	47,5 / 48,2 (B1)	49,0 / 55,0 (D3)	1200
Caso base	43,6 / 44,5 (B2)	44,1 / 46 (D3)	
Infiltración	73,2 / 111,7 (B2)	73,8 / 114,5 (B2)	

Tabla 11. Indicadores de exposición de todo el periodo de simulación para el sistema alternativo.

Sistema de control	Condición puertas interiores		Set-point
	Abiertas	Cerradas	
Sensores distribuidos	731 / 767 (P1)	708 / 717 (P1)	800
	956 / 991 (P1)	983 / 997 (P1)	1200
Sensor localizado	741 / 780 (P1)	1018 / 1076 (P1)	800
	1025 / 1065 (P1)	1294 / 1341 (P4)	1200
Caso base	618 / 652 (P1)	651 / 681 (P1)	

Tabla 12. Indicadores de humedad relativa de todo el periodo de simulación para el sistema alternativo.

Sistema de control	Condición puertas interiores		Set-point
	Abiertas	Cerradas	
Sensores distribuidos	45,0 / 48,0 (C)	44,4 / 47,1 (C)	800
	47,1 / 49,2 (C)	46,5 / 48,6 (C)	1200
Sensor localizado	45,0 / 47,6 (C)	45,9 / 48,1 (C)	800
	47,6 / 49,4 (C)	48,2 / 51,0 (C)	1200