



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**FACTIBILIDAD DE UNA NUEVA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL
CÁLCULO DE INFILTRACIONES EN UNA ENVOLVENTE TÉRMICA, ALTERNATIVA
AL MÉTODO DE PRESURIZACIÓN DEL VENTILADOR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GONZALO JOSÉ MOLINA CANCINO

**PROFESOR GUÍA:
ESTEBAN RUEDLINGER STANDEN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GABRIEL RODRIGUEZ JAQUE
MIGUEL PÉREZ ARIAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2016**

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Estructuras, Construcción y Geotecnia.

POR: Gonzalo José Molina Cancino.

FECHA: 13/07/2016

PROFESOR GUÍA: Esteban Ruedlinger Standen.

FACTIBILIDAD DE UNA NUEVA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL CÁLCULO DE INFILTRACIONES EN UNA ENVOLVENTE TÉRMICA, ALTERNATIVA AL MÉTODO DE PRESURIZACIÓN DEL VENTILADOR

La finalidad del presente documento es investigar la factibilidad de implementar una nueva metodología para el cálculo de las infiltraciones de un edificio, basada en la medición del cambio de la humedad absoluta del aire en un recinto. La metodología actual aplicada en el país corresponde al ensayo “blower door”, basado en la norma nacional NCh3295, el cual necesita condiciones ambientales muy específicas (tales como que no haya mucho viento o carga solar) y es difícil de implementar en estructuras muy grandes.

En primera instancia se identificaron de forma rigurosa las deficiencias de la norma NCh3295 y se ideó un procedimiento de cálculo de las infiltraciones de aire basado en la relación entre la variación de la humedad absoluta presente y la tasa de renovación del aire interior de acuerdo a: $ACH = - \left[\ln(HA_{in} - HA_{out}(\Delta t)) - \ln(HA_{in} - HA_{out}(0)) \right] / \Delta t$. Y otro procedimiento de cálculo para caracterizar la humedad absoluta en función de la temperatura y la humedad relativa como sigue: $HA = \frac{13,25304}{(273,15+T)} \cdot 10^{\frac{7,591386 \cdot T}{T+240,7263}} \cdot HR$. Se idearon dos metodologías de cálculo para compararlas con el ensayo del ventilador (blower door). Con los resultados de las nuevas metodologías de cálculo se realizó un montaje experimental que utilizó vapor de agua como indicador de la renovación de aire que se alcanza en un recinto para un tiempo determinado.

Para que la metodología del vapor de agua sea factible, es necesario obtener una desviación menor del 10% con respecto al resultado del método del ventilador. La curva que describe la disminución de la humedad absoluta interior debió ser asintótica con respecto a la del exterior.

Dentro del análisis de los resultados se obtuvo que efectivamente ambas curvas fueron asintóticas, pero que este fenómeno fue difícil de apreciar cuando la curva de humedad absoluta exterior era muy variable. El método del blower door entregó un valor de 3,21 $\left[\frac{1}{h} \right]$, la primera metodología de cálculo un valor promedio de 0,17 $\left[\frac{1}{h} \right]$ y la segunda 3,11 $\left[\frac{1}{h} \right]$, obteniéndose un aceptable error aproximado del 3,1% (asociada a esta última).

Luego de analizar los resultados resulta correcto considerar a la metodología del vapor de agua como factible para calcular infiltraciones de aire, pero para esto es necesario considerar lo siguiente: El ensayo debe ser realizado bajo las condiciones exteriores lo más invariables posibles y además, el recinto donde se realiza éste debe tener dimensiones acotadas para evitar el uso de artefactos que permitan distribuir de forma homogénea el vapor de agua en la envolvente.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, mi profundo agradecimiento a mis padres, que siempre estuvieron conmigo y me motivaron para seguir adelante en mi carrera en los momentos más difíciles. Sin su apoyo no hubiese podido avanzar, por mi cuenta, a esta otra etapa de mi vida.

Gracias a mis hermanos Pablo y Víctor que me preguntaron constantemente sobre los detalles de mi tesis y me motivaron a seguir progresando.

Debo decir que llegar hasta el final de esta etapa no fue fácil, a lo largo de ella formé nuevos amigos, algunos se quedaron atrás y otros perduraron. Quiero agradecer a estos últimos que de alguna forma me dieron la confianza necesaria para terminar este proyecto que parecía interminable, aunque me consideraran llorón por mi falta de optimismo.

A mis amigos de la infancia: al Yankel, a Italo y al Pajarito que manifestaron ese inmenso apoyo y me acompañaron cuando más lo necesitaba. Ellos fueron un pilar indispensable en llegar a este punto de inflexión, dándole felicidad y sabor a la vida. Quiero decir que los valoro y que siempre podrán contar conmigo en todo lo que necesiten.

Por último, quisiera agradecer a las personas que me ayudaron directamente a realizar el trabajo, a mi profesor Esteban Ruedlinger, por sus sabios consejos, la paciencia y las facilidades para dotarme de todo lo necesario para desarrollar la parte experimental de la tesis. Gracias a Joaquín Cisternas, el muchacho de IDIEM, que estuvo siempre disponible para darme una mano sin nada a cambio; la adhesión del papel polietileno, confeccionar los termo-higrómetros, etc.

Gracias a todas las personas que se vieron involucradas de una u otra forma en mi ruta hacia esta segunda etapa en mi vida.

Índice de materias

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO 2 – CONFORT HIGRO-TÉRMICO Y LA HUMEDAD	3
2.1 Introducción	3
2.2 El calor y la temperatura	4
2.3 Ganancia y pérdida de calor en el ser humano	5
2.4 La atmósfera terrestre	6
2.5 El vapor de agua	7
2.6 La humedad en la atmósfera.....	7
2.6.1 Humedad relativa y humedad absoluta	8
2.6.2 Presión parcial de vapor	8
2.6.3 Temperatura de rocío	9
2.7 Carta psicrométrica	9
2.8 El agua y sus propiedades	10
2.8.1 Fases y cambios de fase de una sustancia	11
2.8.2 Calor específico	12
2.8.3 Calor latente.....	12
2.9 Permeabilidad y propiedades al agua de materiales	12
2.9.1 Permeabilidad al vapor	13
2.9.2 Permeabilidad a los gases atmosféricos	13
2.9.3 Barreras al vapor de agua	14
2.9.4 Absorción capilar	15
2.9.5 Absorción higroscópica	15
2.9.6 Hidrofobia.....	15
2.10 Transmitancia térmica.....	15
2.11 La condensación en edificios habitacionales	17
2.11.1 Tipos de condensación en muros.....	18
2.11.2 Tipos de humedades que afectan a los edificios.....	18
2.11.3 Daños y consecuencias de la humedad y condensación en el interior de una vivienda.....	19
CAPÍTULO 3 – VENTILACIÓN E INFILTRACIONES DE AIRE.....	20

3.1	Introducción	20
3.2	Los vientos.....	20
3.2.1	Los vientos y las diferencias de presión	20
3.2.2	Los vientos y la rotación terrestre.....	20
3.2.3	Movimiento del aire en la Tierra.....	21
3.2.4	Movimiento del aire en Chile	21
3.2.5	Los anemómetros.....	22
3.2.5.1	Anemómetros de velocidad	22
3.2.5.2	Anemómetros de presión	24
3.3	NCh1079:2008. Arquitectura y Construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.....	25
3.4	Ventilación.....	29
3.4.1	Tipos de ventilación.....	30
3.5	Infiltraciones de aire.....	32
3.5.1	Medios de infiltración de aire en una envolvente	33
3.6	Infiltraciones de aire y el marco internacional.....	34
3.7	Renovación de aire por hora (ach)	36
3.8	Norma NCh3295. Método de presurización del ventilador	37
3.8.1	Software Fantestic.....	40
3.8.2	Limitaciones del método	41
3.9	Método del gas trazador	41
3.9.1	Características de los gases trazadores.....	42
CAPÍTULO 4 – METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE INFILTRACIONES.....		44
4.1	Método de presurización del ventilador	44
4.2	Método del vapor de agua.....	46
4.2.1	Metodología de cálculo 1: Análisis discreto en toda la curva de humedad absoluta.....	47
4.2.2	Metodología de cálculo 2: Análisis continuo del transiente inicial de la curva de humedad absoluta.....	50
CAPÍTULO 5 – PREPARACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....		52
5.1	Ubicación experimental	52
5.1.1	Características climáticas del sector	53
5.2	Características de la caseta	54
5.3	Materiales montaje experimental.....	55
5.4	Aislación de muros y grietas.....	56

5.5 Punto de fuga singular. Medición flujo de aire mediante anemómetro.....	58
5.6 Preparación y adquisición de datos anemómetro	59
5.7 Preparación y adquisición de datos método vapor de agua.....	60
5.8 Preparación y adquisición de datos método de presurización del ventilador.....	62
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS Y CONCLUSIONES	65
6.1 Resultados obtenidos, anemómetro.....	65
6.2 Resultados obtenidos, método de presurización del ventilador	66
6.3 Resultados obtenidos, método vapor de agua, metodología 1	68
6.3.1 Medición 1.....	68
6.3.2 Medición 2.....	75
6.4 Resultados obtenidos, método vapor de agua, metodología 2	81
6.4.1 Medición 1.....	81
6.4.2 Medición 2.....	82
6.5 Comparación metodologías	83
6.6 Análisis de resultados.....	84
6.7 Conclusiones.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	88

Índice de tablas

Tabla 1. Concentración gases atmosféricos [21].	6
Tabla 2. Coeficientes de permeabilidad de varios polímeros [31].	14
Tabla 3. Transmitancia térmica de algunos elementos constructivos [14].	16
Tabla 4. Transmitancia térmica de algunos materiales [14].	16
Tabla 5. Zonificación climática. NCh1079 Of.2008.	26
Tabla 6. Características climáticas de Santiago. Fuente: NCh1079. Of2008.	28
Tabla 7. Porcentaje de infiltración según elemento.	33
Tabla 8. Exigencias de hermeticidad para 13 países europeos [10].	35
Tabla 9. Infiltraciones de aire máxima por zonificación térmica. Anteproyecto de norma NTM 011/3 2014.	38
Tabla 10. Límite de infiltraciones de aire propuesto provincial [7].	39
Tabla 11. Transmitancia máxima exigida por Zonas Térmicas. O.G.U.C, Art. 4.1.10 [14].	46
Tabla 12. Parámetros empíricos ecuación de Clausius-Clapeyron.	48
Tabla 13. Características climáticas para Santiago - Los Cerrillos. Período 1961 - 1990. NCh1079 Of.2008.	53
Tabla 14. Dirección predominante e intensidad del viento para Santiago - Quinta Normal. Periodo 1961-1990. NCh1079 Of.2008.	53
Tabla 15. Resultados entregados por el anemómetro.	65
Tabla 16. Resultados entregados por el blower door test.	66
Tabla 17. Diferencias de presión normales caseta.	67
Tabla 18. Medición 1. Humedad absoluta aire interior.	71
Tabla 19. Medición 1. Humedad absoluta aire exterior.	71
Tabla 20. Medición 1. Caudal de aire para los 30 primeros valores.	73
Tabla 21. Medición 1. Tasa de infiltración de aire final calculada.	74
Tabla 22. Medición 2. Humedad absoluta aire interior.	77

Tabla 23. Medición 2. Humedad absoluta aire exterior.....	77
Tabla 24. Medición 2. Caudal de aire para distintos pasos en el tiempo.	79
Tabla 25. Medición 2. Tasa de infiltración de aire final calculada.	80
Tabla 26. Filtraciones de aire obtenidas, método vapor de agua.....	81
Tabla 27. Resumen resultados y comparación con método de blower door test.	83
Tabla 28. Comparación resultados con la regla ACH50/20.	83

Índice de figuras

Figura 1. Gráfico de aire húmedo simplificado [14].	9
Figura 2. Comportamiento general de las masas de aire en la Tierra [34].	21
Figura 3. Representación anemómetro convencional. Fuente: PCE instruments.	23
Figura 4. Visualización zonificación climática. NCh 1079 Of.2008.	27
Figura 5. Formas de admisión y extracción de aire [7].	31
Figura 6. Esquema de despresurización y presurización en una envolvente térmica.	37
Figura 7. Resultados FanTestic de forma visual. Fuente: Manual FanTestic – Retrotec.	40
Figura 8. Representación resultado blower door test. Fuente: Norma ASTM E-779-03.	44
Figura 9. Mapa y vista satelital del lugar del ensayo.	52
Figura 10. Vista frontal y lateral de la caseta.	52
Figura 11. Aislación de grietas y aberturas.	56
Figura 12. Adhesión de la cinta doble cara en las paredes.	57
Figura 13. Vista del papel polietileno ya instalado.	57
Figura 14. Vista del punto de fuga singular.	58
Figura 15. Instalación adquisición de datos anemómetro.	59
Figura 16. Adquisición de datos mediante software.	59
Figura 17. Representación termo-higrómetros.	61
Figura 18. Representación de la metodología para la evaporación de agua.	61
Figura 19. Medición del marco, lona del ventilador.	62
Figura 20. Instalación marco del ventilador.	63
Figura 21. Instalación ventilador.	64
Figura 22. Adquisición de datos blower door test.	64
Figura 23. Resultado obtenido, método flujo de aire.	65

Figura 24. Curva de tendencia resultados blower door test en CFM.....	66
Figura 25. Curva de tendencia resultados blower door test en m^3min	67
Figura 26. Medición 1. Resultados entregados por cada termo-higrómetro.....	68
Figura 27. Medición 1. Representación humedad relativa v/s tiempo.	69
Figura 28. Medición 1. Representación temperatura v/s tiempo.	70
Figura 29. Medición 1. Humedad absoluta interior y exterior.....	72
Figura 30. Medición 1. Infiltración de aire v/s tiempo.	74
Figura 31. Medición 2. Resultados entregados por cada termo-higrómetro.....	75
Figura 32. Medición 2. Representación humedad relativa v/s tiempo.	76
Figura 33. Medición 2. Representación temperatura v/s tiempo.	76
Figura 34. Medición 2. Humedad absoluta interior y exterior.....	78
Figura 35. Medición 2. Infiltración de aire v/s tiempo.	80

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud la gente en promedio habita lugares cerrados más del 90% del tiempo, ya sea en un lugar residencial, lugar de trabajo o vehículo. Considerando esto se hace indispensable el estudio de los distintos fenómenos que afectan a los espacios cerrados como forma de evaluar la calidad del ambiente interior. Alcanzar la comodidad de las personas depende de una serie de factores físicos y químicos, independientemente de la estabilidad y resistencia de las viviendas, que debiesen ser estudiados en su medida. La física de la construcción se encarga del estudio de estos factores, entre los cuales tenemos: acústica, comportamiento higro-térmico, permeabilidad al aire y ventilación. La ventilación se entiende como la incidencia de aire exterior hacia una envolvente térmica que permite la renovación del aire interior, la cual forma parte del diseño propio de las edificaciones. La renovación de aire en una envolvente que se produce de forma no controlada se conoce como infiltraciones de aire, la cual puede afectar notablemente el confort higro-térmico e incluso posibilitar el ingreso de agentes patógenos al interior.

La ventilación se diseña para aumentar la calidad del aire interior mediante la penetración de aire desde una fuente externa. Esto logra liberar distintos tipos de contaminantes presentes en el interior y evitar que las personas sean afectadas por enfermedades específicas. Además, gracias a la ventilación se puede regular y controlar la temperatura al renovar el recinto con una distinta, principalmente a través de fenómenos de convección, para alcanzar una temperatura de confort aproximada y mejorar el bienestar de los ocupantes.

Actualmente en Chile se ocupa el método de presurización del ventilador, referente a la norma NCh3295, para cuantificar las infiltraciones de aire que tiene cualquier envolvente térmica determinada. Por otra parte, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo busca, dada la gran importancia que tiene, obligar a calcular infiltraciones de aire para edificios de salud y residencia, lo que se espera se logre en el mediano plazo.

El método de presurización del ventilador permite establecer un gradiente de presiones entre el interior y el exterior de la envolvente de interés, tal que se pueda medir fácilmente la tasa a la cual el aire está siendo renovado, utilizando medidores de flujo. A pesar de que este método entrega resultados confiables tiene una serie de limitaciones que complica su uso.

Por ello, surge la necesidad de estudiar la factibilidad de implementar una metodología más básica que permita conocer las infiltraciones de aire que se producen en edificios y viviendas, para luego formalizarla y llevarla finalmente a la práctica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Implementar un método de cálculo de infiltraciones de aire en un recinto, basado en el cambio de humedad absoluta del aire del local y que sea alternativo al método de presurización del ventilador.

1.1.2 Objetivos específicos

- Indicar los problemas o errores que tiene el método del ventilador escrito en la norma NCh3295.
- Establecer un procedimiento de cálculo que permita obtener el volumen de aire que se renueva en un recinto en función del tiempo en $\frac{1}{h}$ ó ach (cambios de aire por hora).
- Realizar un montaje experimental que logre reproducir el método desarrollado en el presente estudio y el método de presurización del ventilador para la evaluación de infiltraciones.
- Comparar los resultados que entrega la metodología implementada con la del método de presurización del ventilador de la norma NCh3295.

CAPÍTULO 2 – CONFORT HIGRO-TÉRMICO Y LA HUMEDAD

2.1 Introducción

Uno de los factores que las infiltraciones de aire afectan es el confort higro-térmico de los ocupantes en una envolvente térmica, por lo que dada su importancia requiere algunas profundizaciones.

El confort térmico (o más general confort higro-térmico), es una característica sensorial que depende de la percepción propia de cada individuo. Cuando se alcanza el confort higro-térmico se llega a un estado en el que no se siente ni frío ni calor [14], es decir no hay presencia de malestar térmico (sensación de molestia por exceso o carencia térmica del sector).

Existen una serie de factores que afectan el confort higro-térmico y la calidad de vida de las personas, léase:

- Humedad ambiental y condensación
- Velocidad del aire
- Actividad del ocupante
- Cantidad y tipo de ropa
- Temperatura
- Otros (metabolismo, edad, sexo, contextura física, etc.)

Se sabe que la velocidad del aire no afecta directamente la temperatura de la piel de las personas, pero sí la sensación térmica [30]. Cada ser humano tiene una capa de aire inmóvil que funciona como burbuja y le aísla del entorno, y que tiene una temperatura cercana a la de la piel y una alta humedad relativa. Si la velocidad del aire es muy alta esta capa podría ser removida, facilitando el intercambio de calor entre la piel y el ambiente.

Por otro lado, la actividad del ocupante hace énfasis en las distintas acciones que realiza el individuo en el interior de un recinto y que pueden alterar la percepción térmica. Por ejemplo, la sudoración se produce luego de un sobrecalentamiento del cuerpo, lo que puede deberse a una alta temperatura del entorno, por ejercicio, o por estímulos psicológicos como estrés o nerviosismo entre otros.

La cantidad de ropa permite aumentar el confort térmico, hasta cierto punto, utilizando la resistencia térmica que ésta tiene. Naturalmente, el vestuario aísla térmicamente el cuerpo del entorno, produciendo un intercambio de calor distinto.

Las condiciones de confort higro-térmico se alcanzan a una temperatura interior entre los 17 y 24°C, una humedad relativa entre 30 y 70% y una velocidad del aire entre 0,1 y 1 m/s [14].

2.2 El calor y la temperatura

El calor se define como la transferencia de energía térmica producida por zonas a diferentes magnitudes de temperatura. Esta transferencia ocurre desde un cuerpo o zona de mayor temperatura hacia uno de menor temperatura, hasta llegar al equilibrio térmico (punto donde no hay transferencia de calor puesto que la diferencia de temperatura entre los cuerpos en contacto es nula) [24].

Los modos de transferencia térmica son: radiación, conducción y convección.

Conducción: Es el mecanismo de intercambio de energía interna entre áreas en diferente temperatura, donde el intercambio de energía cinética se produce entre partícula y partícula en contacto directo, ya sea por colisión molecular directa o por desplazamiento de electrones libres en los metales [24].

Convección: En este caso la transferencia de calor se da por movimiento de las moléculas desde un cuerpo o sustancia, el cual se produce exclusivamente por los fluidos, tales como el agua o el aire. En los fluidos también hay transferencia de calor por conducción, pero en menor medida que por convección, la cual se produce debido a los gradientes de densidad creados por la temperatura en la masa del fluido (corrientes de convección) [24].

Radiación: Fenómeno producido por la transmisión de calor sin contacto directo, y que se genera gracias a la emisión de ondas electromagnéticas que emanan desde el cuerpo emisor, donde no necesitan un medio para desplazarse.

La temperatura es una magnitud escalar que está relacionada con la energía cinética interna promedio de una sustancia. En este sentido la energía cinética está asociada al movimiento interno de las partículas de una sustancia o sistema. Por lo tanto se considera que un cuerpo posee mayor temperatura si su energía cinética interna es mayor, es decir, si el movimiento de las partículas es más entrópico y rápido.

2.3 Ganancia y pérdida de calor en el ser humano

La pérdida y ganancia de calor en las personas se puede dar por una serie de factores y fenómenos que se citan a continuación [14].

El cuerpo gana calor por:

- Metabolismo.
- Radiación del entorno.
- Convección del aire.
- Contacto directo con un cuerpo a mayor temperatura.

El cuerpo pierde calor por:

- Radiación al entorno.
- Convección del aire en contacto con el cuerpo.
- Respiración.
- Trabajo externo (energía consumida en vencer las fuerzas mecánicas externas sobre un cuerpo).
- Evaporación del sudor.
- Contacto directo con un cuerpo a menor temperatura.

2.4 La atmósfera terrestre

La atmósfera terrestre es una capa gaseosa que envuelve la superficie de la Tierra por efecto de la fuerza de gravedad. Su densidad máxima se encuentra en la superficie terrestre y va disminuyendo a medida que aumenta la altura, producto de la fuerza gravitatoria [21].

La presión atmosférica es el peso por unidad de área que ejerce la columna de aire que se encuentra por encima de un punto determinado, la cual está relacionada proporcionalmente con la densidad, por lo tanto ésta también es decreciente a medida que aumenta la altura. A nivel del mar la presión media de la atmósfera es de 1013,25 hPa [21].

La atmósfera se divide, en función de la temperatura, en cuatro capas; la tropósfera, la estratósfera, la mesósfera y la termósfera.

Los gases principales que constituyen la atmósfera son: nitrógeno, oxígeno, argón y dióxido de carbono. La concentración de ellos (a nivel del mar), junto a los gases presentes en menor medida se ven en la siguiente tabla:

Constituyentes principales	Fracción molar (volumen)
N_2	0,7809
O_2	0,2095
Ar	0,0093
CO_2	0,00033
Constituyentes menores	ppm (volumen)
N_e	18
H_e	5
Kr	1
X_e	0,09
CH_4	1,5
CO	0,1
H_2	0,5

Tabla 1. Concentración gases atmosféricos [21].

Hay que tener en cuenta que estos gases son constituyentes del aire seco, es decir, cuando no hay presencia de agua en cualquiera de sus tres estados.

2.5 El vapor de agua

El vapor de agua es uno de los gases más variables y vitales en la atmósfera terrestre, con un tiempo de residencia (tiempo promedio en que una sustancia permanece en un medio luego de ser emitido o generado) del orden de 10 días. En algunos sectores puede ser inapreciable (tales como en regiones desérticas), mientras que cuando está saturado (en regiones cálidas y a nivel del mar) puede llegar a constituir hasta el 3% en volumen del aire circundante [21].

Éste proviene de la evaporación de agua de océanos y ríos, y se concentra en la capa más próxima a la superficie terrestre.

Su participación en la atmósfera es importante por los siguientes motivos:

- Los cambios de fase son importantes en la termodinámica de los procesos atmosféricos pues intervienen grandes cantidades de energía.
- Formación de nubes y precipitación producto de los movimientos ascendentes del aire húmedo.
- Es uno de los principales gases causantes del efecto invernadero ya que el vapor de agua absorbe parte de la radiación que emite la superficie terrestre.
- Participa en la eliminación de gases y partículas de la atmósfera.
- Participación activa en las reacciones químicas, reaccionando con otros gases.

2.6 La humedad en la atmósfera

El aire húmedo (mezcla de aire y vapor de agua) tiene menor densidad que el aire seco, lo cual hace que éste tienda a ascender en la atmósfera. Dado que la temperatura del aire disminuye a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, llega un punto donde el vapor de agua se empieza a condensar al alcanzar la temperatura de rocío (concepto que se profundizará más adelante), lo que induce el origen de las nubes (acumulación de gotas microscópicas). Luego de una alta condensación de vapor de agua, estas gotas empiezan a acumularse y aumentar su volumen, hasta precipitar debido a su propio peso.

La capacidad de la atmósfera para contener vapor de agua se relaciona con los conceptos de humedad absoluta y relativa [17].

2.6.1 Humedad relativa y humedad absoluta

Los conceptos que expresan la cantidad de vapor presente en el aire son los siguientes [17]:

Humedad absoluta (HA): Este término guarda relación con la masa de vapor de agua por unidad de volumen, por lo tanto sus unidades se expresan en g/m^3 de forma general.

Humedad absoluta de saturación (HAS): Es la máxima cantidad de vapor que puede haber en el aire sin que se produzca condensación, se expresa en g/m^3 .

Humedad relativa (HR): Corresponde al cociente entre la humedad absoluta y la humedad absoluta de saturación multiplicado por 100. Indica qué tan cerca está el aire de la saturación. Ésta se expresa en porcentaje (%).

$$\% HR = \frac{HA}{HAS} \cdot 100$$

El valor de la humedad relativa puede aumentar mediante dos fenómenos: Disminución de la temperatura ambiental y aumento de la cantidad de agua presente en el ambiente [17]. El primero de ellos se relaciona con el concepto de temperatura de rocío lo cual se verá más adelante.

Humedad específica: Este concepto es casi idéntico a la humedad absoluta. La humedad específica se refiere a la masa de vapor de agua (en gramo) por kilogramo de aire seco, por lo tanto se expresa en g/kg . Se puede por lo tanto hacer la transformación de unidades teniendo la correcta densidad del aire seco a una temperatura dada.

2.6.2 Presión parcial de vapor

La presión parcial de vapor, es la presión que ejerce el vapor de agua en un determinado volumen de aire [17]. Independiente de los otros gases, la presión parcial de vapor es un indicador de la cantidad de vapor presente en la atmósfera. Según la ley de Dalton, la presión total de la atmósfera se obtiene de la suma de las presiones parciales que ejercen todos los gases que componen el aire, incluido el vapor de agua.

2.6.3 Temperatura de rocío

Ésta se define como la temperatura a la cual debe disminuir la temperatura del aire húmedo, para que se alcance la saturación del vapor de agua (o una humedad relativa del 100%), manteniendo constante la cantidad de vapor de agua [17]. Ésta puede ser inferida mediante cartas psicrométricas o gráficos de aire húmedo (Ver 2.7).

2.7 Carta psicrométrica

Una carta psicrométrica es una gráfica que contiene información sobre las distintas propiedades del aire en presencia de humedad. Ésta se basa en tablas psicrométricas calibradas experimentalmente, las cuales son sumamente específicas. Las cartas psicrométricas contienen esta misma información pero de una forma más imprecisa, para obtener información de forma rápida.

Una carta psicrométrica convencional puede contener mucha información sobre las propiedades del aire: éstas son la temperatura de rocío, la humedad relativa, la razón de mezcla, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, entalpía y volumen específico.

No obstante, para nuestro propósito es suficiente una carta de aire húmedo simplificada a parámetros de humedad absoluta $[g/m^3]$ (eje vertical) y temperatura $[^{\circ}C]$ (eje horizontal):

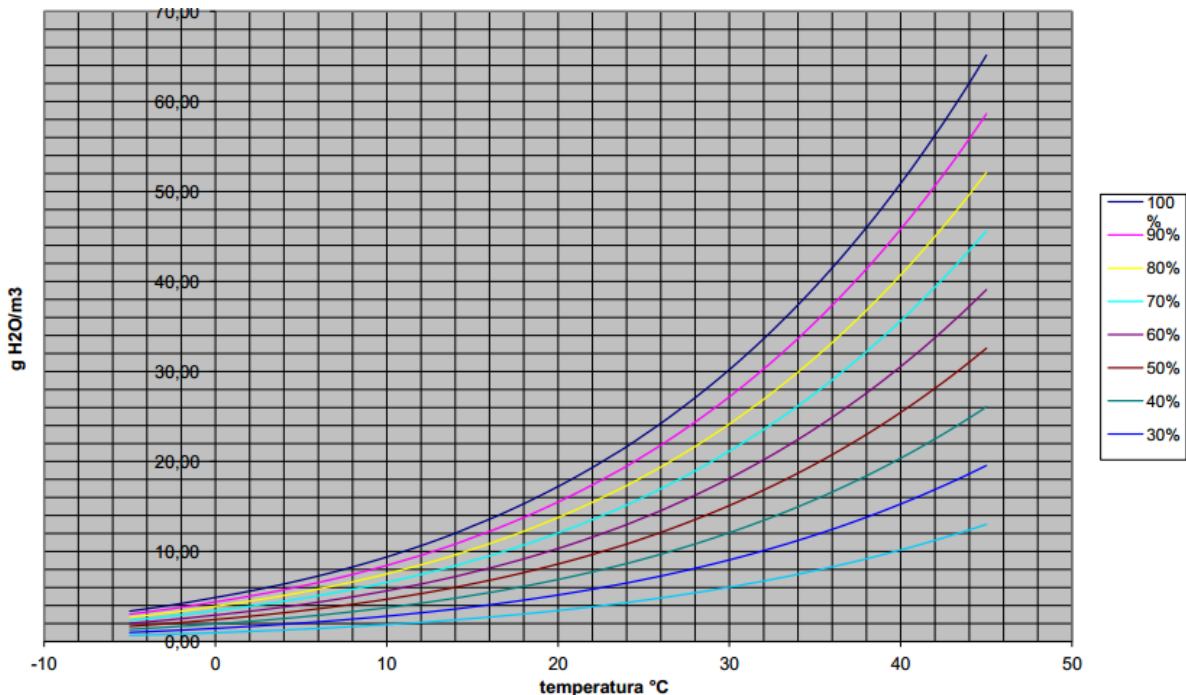


Figura 1. Gráfico de aire húmedo simplificado [14].

De acuerdo a la figura 1, se ve claramente que la humedad absoluta depende de parámetros tales como la temperatura y la humedad relativa. Este gráfico es útil cuando se requiere encontrar la humedad absoluta de forma rápida, donde la limitante de éste radica en: la imprecisión de los resultados y de la ineficacia al tratar con un número elevado de datos. En este documento se deberá realizar un gran número de cálculos de humedad absoluta, asociada a parámetros de temperatura ambiental y humedad relativa no enteros, por lo que se optará por utilizar fórmulas empíricas que se detallarán más adelante.

2.8 El agua y sus propiedades

El agua es la sustancia más abundante presente en la Tierra, la cual es esencial en todas las formas de vida [25]. La existencia de la vida en la Tierra depende fundamentalmente de la capacidad del agua para disolver una notable variedad de moléculas polares que sirven como bloques de construcción (hormigón), combustibles y catalizadores, entre otros. Los compuestos no polares son hidrofóbicos y no se disuelven fácilmente en el agua. El agua existe en tres estados de la materia: sólido (hielo), líquido y gaseoso (vapor de agua). Los puentes de las moléculas de agua son átomos de hidrógeno que las mantienen unidas, los cuales se forman y rompen muy frecuentemente. Éstos le atribuyen al agua las siguientes propiedades:

- Comportamiento cohesivo: Permite el transporte de nutrientes en las plantas y la circulación en animales.
- Resistencia a los cambios de temperatura: Esto provoca que el agua tenga la propiedad poder de absorber grandes cantidades de calor. Por lo tanto ésta tiene una gran capacidad calorífica con respecto a la mayoría de otros líquidos.
- Alto calor de vaporización: La evaporación requiere una gran cantidad de energía. Sudar sirve para reducir el calor corporal. El cuerpo pierde calor, luego el agua lo absorbe y se evapora.
- Alto punto de ebullición.
- Provoca que el agua se expanda cuando se congela: La disminución de la densidad del agua cuando cambia su estado de líquido a sólido explica por qué los hielos flotan.
- Propiedades solventes: El agua facilita una gran cantidad de reacciones químicas que son de suma importancia.
- Alta tensión superficial: El líquido tiene una resistencia para aumentar su superficie, lo cual permite, por ejemplo, algunos insectos poder desplazarse sobre la superficie del agua.

2.8.1 Fases y cambios de fase de una sustancia

Una sustancia puede existir en varias formas, por ejemplo si existe como líquido puede transformarse en gas o sólido (si se le añade calor o si se le quita respectivamente) [26]. A esto se le llaman las distintas fases de una sustancia. Un cambio de fase ocurre cuando una sustancia que se encuentra en una respectiva fase, pase a ser otra, con la intervención de calor (o presión).

Tal y como se necesita energía (aumento de temperatura) para elevar la entropía de un conjunto de partículas y derivar en un cambio de estado a uno más inestable, es posible realizar el proceso de forma inversa, es decir disminuir la entropía mediante la disminución de temperatura o aumentando la presión, lo cual puede resultar en un cambio de estado o fase. A continuación se definen los distintos cambios de estado que puede experimentar el agua (u otra sustancia) [11]:

Licuación y condensación: La condensación es una de las consecuencias de estar en presencia de la humedad y corresponde al cambio de estado de gas a líquido, el que depende principalmente de la temperatura, y ocurre cuando el vapor de agua es llevado hasta su punto de rocío mediante una disminución de la temperatura, manteniendo la presión básicamente constante.

Por otro lado la licuefacción o licuación, ocurre al cambio de estado de gas a líquido debido a una disminución de temperatura y aumento de presión, llegando a una sobrepresión elevada, lo que la diferencia de la condensación.

Fusión: Es el cambio de estado de sólido a líquido al haber una absorción de suficiente energía térmica.

Vaporización: Cuando el agua líquida absorbe suficiente energía térmica, éste cambia de estado a vapor de agua.

Solidificación: Cuando el agua líquida pierde suficiente energía térmica, éste experimenta un cambio de estado pasando a ser hielo (estado sólido).

Sublimación: Algunas veces la adición de energía térmica causa que el hielo se vuelva gas sin ser líquido primero.

Deposición: A veces la pérdida de energía térmica causa que el vapor de agua cambie directamente al estado sólido sin pasar primero por el líquido.

2.8.2 Calor específico

El calor específico es una magnitud física, que corresponde a la cantidad de calor que se requiere por unidad de masa para elevar la temperatura en una unidad de una sustancia [26]. Se representa con la letra c (minúscula).

La relación entre calor, temperatura y calor específico se muestra normalmente como:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Q : Calor añadido [cal] o [$kcal$]

m : Cantidad de masa de la sustancia [g] o [kg]

c : Calor específico [$cal \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$] o [$kcal \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$] o [$kcal \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$]

ΔT : Cambio de temperatura [$^\circ C$] o [$^\circ K$]

El calor específico del agua en estado líquido es aproximadamente de:

$$c_{agua} = 1 [cal \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}] = 1 [kcal \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}] = 1 [kcal \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}]$$

2.8.3 Calor latente

El calor latente es la energía necesaria para producir un cambio de fase. El calor necesario para producir la fusión y evaporación de una sustancia es equivalente al liberado para inducir el procedimiento de forma inversa (solidificación y condensación respectivamente), para el agua se especifican a continuación [14]:

$$Q_{fusión}(absorbe) = Q_{solidificación}(libera) = 80 \text{ kcal/kg} = 334 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{vaporización}(absorbe) = Q_{condensación}(libera) = 540 \text{ kcal/kg} = 2259 \text{ kJ/kg}$$

2.9 Permeabilidad y propiedades al agua de materiales

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido (tal como líquidos, vapores o gases) que lo atraviese sin cambiar su estructura interna. Ésta depende de la temperatura ambiental del sector. La permeabilidad de un material depende de la temperatura ambiental del sector, y aumenta al aumentar la temperatura.

El paso de pequeñas moléculas a través de materiales puede darse de dos formas. Una es pasando a través de un pequeño agujero o fuga. La segunda es que la pequeña molécula logre pasar a través del sólido entre los pequeños espacios intermoleculares [28].

La permeabilidad se cuantifica a través del coeficiente de permeabilidad el cual tiene como unidades: $\frac{mm \cdot cm^3}{m^2 \cdot día \cdot atm}$ [28] o dicho de otra forma $\frac{mm \cdot ml}{cm^2 \cdot s \cdot cmHg}$ [31].

2.9.1 Permeabilidad al vapor

Muchos productos necesitan ser protegidos ante la ganancia o pérdida de humedad. Materiales como films de celofán, polietileno, polipropileno, cloruro de polivinilideno y poliéster son excelentes barreras para el vapor de agua y son usados para resistir la transmisión de vapor de agua a través del film [28]. Debe considerarse, sin embargo, que incluso el más impermeable de estos films tiene una permeabilidad cuantificable.

La tasa de transmisión del vapor de agua dependerá del gradiente de presión de vapor a través del film. Si el elemento está seco en un ambiente húmedo absorberá humedad, por otro lado si el elemento está mojado en un ambiente seco perderá humedad, y si la humedad relativa de éste es igual a la del ambiente, no habrá transmisión incluso a través del más permeable de los films [28].

2.9.2 Permeabilidad a los gases atmosféricos

Es importante controlar el oxígeno, dióxido de carbono y nitrógeno en el plano de productos de consumo. Si se le permite al oxígeno ingresar a los productos, éste participará en la descomposición de materiales orgánicos iniciando o acelerando el proceso de descomposición. Si no se controla se promoverá la pérdida de valor nutritivo [28].

En el caso de la carne fresca, una alta tasa de transmisión de oxígeno es requerida para mantener el color rojo de la carne. Para alcanzar este requerimiento especial se utiliza el celofán, polietilenos y nitrilos, los cuales otorgan una transmisión baja de vapor de agua necesaria para evitar la sequedad de la carne, mientras proporcionan una alta transmisión de oxígeno para mantener el color.

El fenómeno de lograr una alta transmisión de oxígeno combinado con una baja transmisión de vapor de agua parece paradójico, pero es muy necesaria para estos requerimientos especiales. Las características inversas se aplican al nylon y otros films que tienen relativamente harta permeabilidad al vapor de agua pero una baja permeabilidad al oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. Otros films tienen alta (o baja) tasa de transmisión de todos los gases, además de vapor de agua.

En la siguiente tabla se pueden apreciar los coeficientes de permeabilidad de varios polímeros en función de los gases más importantes presentes en el aire [31].

Polímero	$P(\text{ml} \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm Hg}^{-1})$			
	N_2 30°C	O_2 30°C	CO_2 30°C	H_2O 30°C, 90% HR
Polietileno de baja densidad	19	55	352	800
Polietileno de alta densidad	2,7	10,6	35	130
Polipropileno	-	23	92	680
PVC no plastificado	0,4	1,2	10	1560
Acetato de celulosa	2,8	7,8	68	75000
Poliestireno	2,9	11	88	12000
Nylon 6	0,1	0,38	1,6	7000
Tereftalato de polietileno	0,05	0,22	1,53	1300
Cloruro de polivinilideno	0,0094	0,053	0,29	14

Tabla 2. Coeficientes de permeabilidad de varios polímeros [31].

Hay que destacar que mientras menor es el valor del coeficiente de permeabilidad, menos efectivo es el paso del gas a través del polímero. De acuerdo a la tabla anterior, se puede apreciar que el cloruro de polivinilideno es el polímero más impermeable al vapor de agua, siendo el acetato de celulosa más de cinco mil veces más permeable.

2.9.3 Barreras al vapor de agua

Existen otro tipo de materiales además de los polímeros que se caracterizan por servir de barrera al paso del vapor de agua, y evitar las condensaciones intersticiales. Como ejemplos comunes están algunas pinturas, el vidrio, el papel de aluminio, el algodón, etc.

2.9.4 Absorción capilar

La capilaridad es la propiedad de los líquidos de subir por las paredes de un cuerpo sólido atraídos por éste. Ésta depende de la tensión superficial de cada líquido, la cual depende, a su vez, de las fuerzas intermoleculares o cohesivas del líquido. Un ejemplo de capilaridad en la naturaleza es el fenómeno que ocurre en los tallos de las plantas que hacen que el agua suba por éstas en contra de la acción de la gravedad.

La absorción capilar es la habilidad de un material para absorber y transmitir líquidos mediante la capilaridad.

2.9.5 Absorción higroscópica

Un material higroscópico es aquel que tiene tendencia a atraer, absorber y retener humedad del aire [27]. Plásticos como los ABS (Acrilonitrilino butadieno estireno) y el nylon son higroscópicos y deben ser secados antes de ser procesados. Resinas en forma líquida tales como ciertos epoxis y agentes de curado de poliuretano también son materiales higroscópicos.

2.9.6 Hidrofobia

Los materiales hidrofóbicos tienen la tendencia a repeler el agua [27]. Ellos no absorben agua fácilmente y no se mojan con ésta. Los materiales hidrofóbicos por lo general presentan una baja energía superficial (la cual es la suma de todas las fuerzas intermoleculares que se encuentran en la superficie de un material). Cuando éstos son colocados en un medio acuoso, tienden a agruparse y separarse en una fase no acuosa. Los polietilenos, polipropilenos y fluorocarbonos se dice que son hidrofóbicos. Por otro lado los materiales hidrofílicos tienen una tendencia opuesta, ellos absorben agua.

2.10 Transmitancia térmica

Corresponde a la cantidad de energía que atraviesa, por unidad de tiempo, una unidad de superficie de un elemento constructivo. Representa la facilidad con que el calor es transferido a través de un material desde un ambiente con mayor temperatura al de menor. Se expresa en W/m^2K .

Para fines de este documento, la transmitancia térmica es importante puesto que es necesario que la variación de humedad absoluta se produzca únicamente por variaciones de humedad relativa, en el escenario ideal. Por lo tanto es necesario que el recinto a evaluar tenga una baja transmitancia térmica en sus elementos que lo constituyen.

A continuación se dispone la transmitancia térmica de algunos elementos [14].

Material	Condición	Transmitancia U [W/m^2K]
Ladrillo artesanal	Seco sin viento	2,1
Ladrillo artesanal	Seco con viento	2,4
Ladrillo artesanal	Húmedo sin viento	2,9
Ladrillo artesanal	Húmedo con viento	3,3
Ladrillo maquinado	Seco sin viento	2,0
Ladrillo maquinado	Seco con viento	2,2
Ladrillo maquinado	Húmedo sin viento	2,6
Ladrillo maquinado	Húmedo con viento	3,0
Mortero cemento	Seco sin viento	2,5
Mortero cemento	Seco con viento	2,8
Mortero cemento	Húmedo sin viento	3,1
Mortero cemento	Húmedo con viento	3,7

Tabla 3. Transmitancia térmica de algunos elementos constructivos [14].

Material	Transmitancia U [W/m^2K]
Plata	410
Cobre	380
Aluminio	210
Acero	58
Arena	58
Mármol	3
Hormigón armado	1,6
Estuco mortero	1,4
Vidrio	1,2
Agua	0,6
Yeso	0,30
Fibrocemento	0,23
Roble	0,16
Madera aglomerada	0,15
Pino	0,10
Fibras de poliéster	0,060
Poliestireno	0,040
Lana mineral	0,040
Lana de vidrio	0,036
Poliuretano	0,026

Tabla 4. Transmitancia térmica de algunos materiales [14].

Para calcular la transmitancia total U_t en presencia de varios elementos constructivos se utiliza la siguiente fórmula:

$$U_t = \frac{1}{R_t}$$
$$R_t = R_{si} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se}$$

Donde:

R_{si} ; R_{se} : Resistencias superficiales interior y exterior $[m^2 \cdot K/W]$.

e_i : Espesor de la capa i , en metros.

λ_i : Conductividad térmica $[W/(K \cdot m)]$.

2.11 La condensación en edificios habitacionales

Como se verá en el capítulo 3, el vapor de agua es considerado como uno de los contaminantes del aire, siendo la condensación un fenómeno que resulta de la presencia de éste. Por esta razón resulta de gran importancia definir y caracterizar el fenómeno de la condensación.

En la vivienda, la condensación se produce en muros y superficies cuando una capa de aire húmedo cede calor a éstos, dicho de otra forma, la molécula de agua libera energía en forma de calor hacia estas superficies para luego cambiar de estado. Este fenómeno se ve claramente al bañarnos: la elevada cantidad de vapor de agua liberado hace que fácilmente se alcance una humedad relativa del 100%, luego el aire saturado entra en contacto con las superficies que están a una temperatura inferior que la temperatura de rocío del ambiente, para finalmente condensarse en gotitas de agua. La condensación puede producir graves daños en el inmueble, afectando la calidad de vida de los ocupantes [14].

2.11.1 Tipos de condensación en muros

Los tipos de condensación que se producen en muros son la condensación intersticial y la condensación superficial [14].

Condensación intersticial: Producida en algún punto de la masa interior de un elemento. El aire contenido en la porosidad del elemento es condensado en su interior al saturarse

Condensación superficial: Producida en las superficies de los elementos cuando la temperatura de éstas es inferior a la temperatura de rocío propia del vapor de agua.

La condensación intersticial y la superficial se producen debido a la combinación de los siguientes factores:

- Baja temperatura ambiental al exterior de la envolvente.
- Baja resistencia térmica del elemento de la envolvente.
- Elevada humedad relativa del aire al interior de la envolvente.

2.11.2 Tipos de humedades que afectan a los edificios

Las humedades que afectan a los edificios o viviendas se pueden clasificar según su origen [14] en:

- Humedades de construcción: Son aquellas humedades que provienen del agua destinada a la construcción; dado generalmente por la confección de materiales (hormigón) in situ. El agua destinada a la fabricación de elementos constructivos puede tardar bastante en secar. En algunos casos puede que el secado sea insuficiente donde el agua será retenida en los materiales para luego aparecer en forma de patologías.
- Humedad accidental: Producida por falta de mantenimiento de la residencia, defectos de diseño o mala construcción. Se produce principalmente por rotura de cañerías lo que provoca el paso del agua a los elementos próximos.
- Humedad de lluvia: La humedad de lluvia se produce básicamente por el impacto de agua líquida que azota los muros y otros elementos de la envolvente (tales como techos, terrazas, pavimentos, etc.)
- Humedad de condensación: Se produce cuando hay condensación del vapor de agua en ambientes cerrados producto de la baja temperatura superficial interior (menor o igual a la temperatura de rocío). Una de sus principales causas es una ventilación deficiente. Este tipo de humedad puede inducir el crecimiento de microorganismos que podrían afectar la salud de los ocupantes.

- Humedad de suelo o capilar: El agua pasa por capilaridad a través de los materiales porosos que provoca que el agua suba desde el subsuelo y se evapore finalmente a la atmósfera. Las sales disueltas que trae el agua subterránea queda impregnada en los materiales y degrada la pintura.

2.11.3 Daños y consecuencias de la humedad y condensación en el interior de una vivienda

Los daños o consecuencias negativas de la humedad y la condensación de humedad ambiental son los siguientes [14]:

- Disminución considerable de calor y por consecuencia elevados gastos en calefacción.
- Depreciación de la vivienda por deterioros de maderas y elementos de hogar, y por lo tanto gastos adicionales en mantención por reparaciones.
- Facilitan el desarrollo de microorganismos que afectan el sistema respiratorio de los ocupantes, además de producir eventualmente olor desagradable.

CAPÍTULO 3 – VENTILACIÓN E INFILTRACIONES DE AIRE

3.1 Introducción

Para entender los conceptos de ventilación e infiltraciones de aire es necesario saber por qué se producen estos fenómenos. Resulta intuitivo que éstos se producen por el movimiento del aire a través de los distintos orificios que hay en cada envolvente térmica, pero no es tan directo señalar por qué se originan estos movimientos de aire (o vientos), y cuál es su forma de medición.

3.2 Los vientos

El viento se define como el movimiento horizontal del aire en la atmósfera. Para describir al viento, es necesario referirse a su dirección e intensidad, las cuales dependen de las diferencias de presión y del movimiento de rotación terrestre [32].

3.2.1 Los vientos y las diferencias de presión

El aire es impulsado preferentemente por una fuerza debida a diferencias de presión pertenecientes en el campo de presión atmosférica terrestre. El movimiento horizontal del aire se establece, desde los centros de alta presión o anticiclones hasta los de baja presión o ciclones. La intensidad o velocidad del viento depende de dos factores:

- Gradiente de presión: Diferencia de presión por unidad de longitud.
- Densidad del aire: A menor densidad (mayor temperatura del aire), más efectivo es su movimiento, resultando en una mayor aceleración.

3.2.2 Los vientos y la rotación terrestre

La rotación de la Tierra implica una desviación de la trayectoria del movimiento del aire, en el sentido de las altas presiones hacia las bajas presiones, la cual se ve modificado por la componente debida a la fuerza de Coriolis [32].

La fuerza de Coriolis es una fuerza ficticia, que conceptualmente explica la aceleración que afecta a un cuerpo en movimiento, el cual está en un sistema de rotación. Dada la rotación de la Tierra y el movimiento del viento producto de las diferencias de presión, se produce una aceleración relativa de éste, la cual es perpendicular al eje de rotación de la Tierra. Es por esta fuerza ficticia que los vientos no se mueven en línea recta, sino que tienden a girarse hacia un lado.

3.2.3 Movimiento del aire en la Tierra

Las condiciones de temperatura y densidad del aire son muy cambiantes, dado esto existen todavía muchas incógnitas sobre el movimiento de las masas atmosféricas, sin embargo, es posible dibujar un mapa con el comportamiento más general del viento.

Cerca del Ecuador, el sol calienta más la superficie de la Tierra, esto provoca que el aire se caliente más que en otras zonas [34]. Al hacerlo, éste disminuye su densidad, elevándose sobre el Ecuador (hacia el sur o el norte). Éste al elevarse se va enfriando, volviéndose más denso, para luego descender hacia la superficie y regresar hacia zonas ecuatoriales. Este ciclo se conoce como la “Celda de Hadley”, donde los vientos van recirculando permanentemente.

Por otro lado los vientos situados en altas latitudes describen un movimiento totalmente contrario al de la Celda de Hadley, conocido como “Celda de Ferrel”, al que le siguen los movimientos de las masas de aire en las cercanías de los polos.

El comportamiento general de las masas de aire se muestra a continuación:

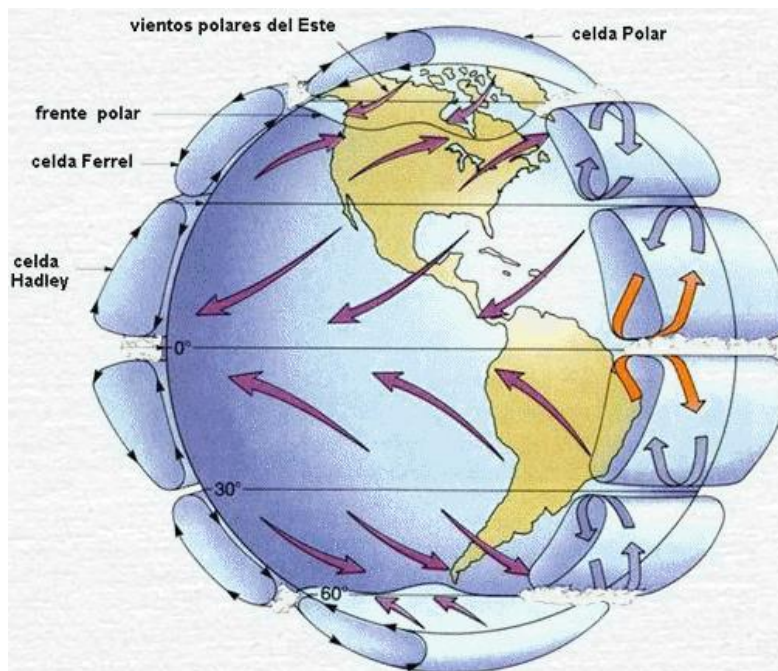


Figura 2. Comportamiento general de las masas de aire en la Tierra [34].

3.2.4 Movimiento del aire en Chile

En Chile el viento se desplaza principalmente con una dirección Sur-Oeste (SW) y Oeste (W) (de acuerdo a mediciones hechas normalmente en aeropuertos), la cual es relativa

a la localidad, pudiendo variar a dirección Norte en invierno dada su constante variabilidad [33].

De acuerdo a la dirección meteorológica de Chile en Santiago los vientos se dan con una intensidad media de $15 \frac{km}{hr}$.

3.2.5 Los anemómetros

Los anemómetros son instrumentos que miden la velocidad instantánea del viento y utilizan básicamente una hélice que mide el número de vueltas por unidad de tiempo, la cual es sumamente sensible al movimiento del aire para poder caracterizar velocidades del viento relativamente bajas. Éstos tienen una serie de aplicaciones en ámbitos de la agricultura, aviación, ventilación, meteorología, etc.

Los anemómetros pueden dividirse en dos clases: aquellos que miden la velocidad del viento y los que miden la presión de éste; considerar que hay una relación directa entre ambos conceptos, es decir, si un anemómetro entrega la velocidad del viento de forma directa, la presión de éste puede ser inferida, y viceversa [23].

3.2.5.1 Anemómetros de velocidad

Dentro de los anemómetros que miden la velocidad del viento de forma directa, están los anemómetros de taza, del molino de viento, de hilo caliente, láser Doppler y sónicos [23].

Anemómetros de taza

Un tipo simple de anemómetro que consiste en cuatro copas o tazas, cada una montada al final de cuatro brazos horizontales dispuestos a un mismo ángulo entre ellos. El plano de giro de estos brazos es paralelo a la superficie terrestre. El flujo de aire sobrepasa las copas en cualquier dirección horizontal que hace girar el sistema a una velocidad proporcional a la velocidad del viento, siendo el eje de rotación vertical. Luego, contando las vueltas de las copas por un periodo de tiempo establecido se puede obtener la velocidad del viento media para una amplia gama de velocidades.

Anemómetros del molino de viento

El anemómetro de molino de viento o hélice es otra forma de anemómetro de velocidad mecánica donde, a diferencia del anterior, ahora el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento y por lo tanto, horizontal (para mediciones de viento atmosférico)

Una variación del anemómetro del molino de viento son los anemómetros digitales básicos que utilizan una rueda alada para medir la velocidad de éste. A continuación se

representa un anemómetro convencional que además de medir la velocidad del viento entrega la temperatura ambiental a través de un termómetro infrarrojo.



Figura 3. Representación anemómetro convencional. Fuente: PCE instruments.

Anemómetros de hilo caliente

Los anemómetros de hilo caliente utilizan un delgado alambre (del orden de algunos micrómetros) eléctricamente calentado a una temperatura ligeramente sobre la ambiental. El flujo de aire que sobrepasa el alambre tiene un efecto refrigerante en éste. Como la resistencia eléctrica de la mayoría de los metales depende de la temperatura del metal, una relación se puede obtener entre la resistencia del alambre y la velocidad del flujo.

Los anemómetros de hilo caliente, a pesar de ser sumamente delicados, tienen una respuesta extremadamente alta en términos de frecuencia y una resolución espacial fina comparada a otros métodos de medición.

Anemómetros láser Doppler

Estos anemómetros utilizan un haz de luz desde un láser que es dividido en dos haces, con uno de ellos propagado fuera del anemómetro. Las partículas fluyen junto a las moléculas de aire cerca del lugar donde el haz es reflejado, o retrodispersado, la luz regresa hacia un detector, donde es medida en función del haz de luz original. Cuando las partículas están en fuerte movimiento, ellas producen un desplazamiento Doppler

para medición de la velocidad del viento en el láser, el cual se usa para medir la velocidad de las partículas y por consiguiente la del aire alrededor del anemómetro.

Anemómetros sónicos

Los anemómetros sónicos usan ondas de sonido ultrasónico para medir la velocidad del viento. Se mide la velocidad del viento basado en el tiempo de vuelo de los impulsos sónicos entre pares de traductores.

Éste tipo de anemómetros pueden tomar mediciones con una alta fineza de resolución temporal, de 20 Hz o mejor, bien adecuados para mediciones turbulentas.

Dada la influencia de la temperatura en la velocidad del sonido y su estabilidad en relación a los cambio de presión, los anemómetros sónicos pueden ser usados también como termómetros.

3.2.5.2 Anemómetros de presión

Dentro de los anemómetros que miden la velocidad del viento de forma indirecta mediante la presión, están los anemómetros de placa y de tubo [23].

Anemómetros de placa

Estos anemómetros consisten simplemente en una placa lisa suspendida desde la parte superior para que el viento la curve. La presión del viento en la placa es balanceado por un resorte, el cual al oponerse por compresión a la deformación de la placa, ésta entrega la fuerza real que ejerce el viento, la cual se puede llevar a velocidad del viento.

Instrumentos de este tipo no responden a los vientos suaves, no son precisos para lecturas de vientos fuertes y son lentos en responder a vientos variables.

Anemómetros de tubo

Los anemómetros de tubo consisten en un tubo de vidrio en forma de U que contiene líquido, con uno de sus extremos doblado horizontalmente para hacer frente al viento y el otro de forma vertical, perpendicular a éste. Se utiliza además un manómetro para medir la presión al inicio y al final del tubo. Si el viento sopla en la boca del tubo hay un aumento de su presión en un lado del manómetro. El viento sobre el extremo vertical del tubo causa pequeñas variaciones de presión en el otro lado del manómetro. El cambio de la posición del líquido en el tubo de U es un indicador de la velocidad del viento.

Para medir correctamente la velocidad el extremo horizontal del tubo debe ir paralelo a la dirección del viento, o de lo contrario se obtendrán resultados notablemente distintos a los reales.

3.3 NCh1079:2008. Arquitectura y Construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.

Chile es el país más largo del mundo, con 4329 Km de longitud. Dada su extensión territorial, éste tiene grandes contrastes climáticos y geográficos. Por lo tanto para el correcto diseño de viviendas, es imprescindible dividir al país en distintas zonas, siguiendo ciertos criterios.

Esta norma define zonas climáticas, de acuerdo a las siguientes variables: Temperatura, oscilación térmica, humedad relativa, precipitación, soleamiento, insolación, nubosidad, intensidad y dirección del viento.

Para los objetivos de este documento es importante la información que entrega la norma NCh1079 en cuanto a la caracterización climática de la zona donde se realiza el experimento. Esto pues los criterios anteriormente señalados tiene una repercusión directa con los resultados que se obtienen luego de la realización de la experiencia, esto tiene su fundamento en que el cálculo de la infiltración de aire en función de la variación de la concentración de vapor de agua, depende directamente de los factores ambientales.

Importancia de cada una de estas variables en la metodología a ensayar en este documento:

- **Temperatura:** La humedad absoluta depende del valor de la temperatura ambiental que haya en el sector a analizar. Teóricamente su magnitud no afectaría a los resultados finalmente obtenidos, puesto que se podría trabajar con cualquier valor de humedad absoluta exterior (mientras ésta no sea muy variable y menor que la interior).
- **Oscilación térmica:** Esta variable condiciona la uniformidad de la humedad absoluta ambiental. En el escenario ideal se requiere que la variación de ésta sea nula, esto implica evitar realizar la experiencia bajo una oscilación térmica alta.
- **Humedad relativa:** Se requiere que la humedad relativa sea lo más baja posible para que la tendencia de la humedad absoluta interior a la exterior sea evidente.
- **Precipitación:** La importancia de esta variable radica en la elevada humedad relativa que alcanza el aire en un día lluvioso y a la posible incidencia de agua en la envolvente. La humedad relativa debiera ser lo más baja posible ya explicado en el punto anterior. Por esto el ensayo debiera realizarse sin presencia de lluvia.

- Soleamiento: Esta variable da cuenta de la cantidad de horas de sol por día. Bajo la condición de que la experiencia se realiza con la presencia de energía solar directa, necesariamente la magnitud del soleamiento es mayor o igual al tiempo en que dura el ensayo.
- Insolación: La magnitud de insolación repercute de forma indirecta en los resultados del método de vapor de agua, dada la energía solar que condiciona la temperatura ambiental y con esto la humedad absoluta exterior.
- Nubosidad: Esta variable no tiene una influencia directa en la adquisición de resultados. Podría darse el caso que al haber una parcialidad de nubes, la energía solar fuera no constante en las proximidades de la envolvente, afectando la uniformidad de humedad absoluta. Se aconseja que el ensayo se realice con cielo despejado, considerando el alza de humedad relativa que conlleva la presencia de nubosidad.
- Intensidad y dirección del viento: Probablemente esta variable sea la más incidente en los resultados que entregue la metodología en cuestión. La intensidad del viento repercute directamente en el intercambio gaseoso entre el interior y el exterior de una envolvente térmica. En el escenario ideal se requiere que el experimento se realice con una intensidad de viento nula o cercana a cero para que el intercambio gaseoso sea realizado únicamente por la difusión del vapor de agua.

De acuerdo a estas variables, la norma propone una zonificación climática conformada por 9 zonas [33], léase:

Zona
Norte litoral (NL)
Norte desértica (ND)
Norte valles transversales (NVT)
Central litoral (CL)
Central interior (CI)
Sur litoral (SL)
Sur interior (SI)
Sur extrema (SE)
Andina (An)

Tabla 5. Zonificación climática. NCh1079 Of.2008.

A continuación se dispone de una visualización de la zonificación que propone la norma NCh1079 a lo largo de Chile.



Figura 4. Visualización zonificación climática. NCh 1079 Of.2008.

En particular zona central interior (donde se ubica la ciudad de Santiago), según la norma NCh1079, tiene las siguientes características:

- Alta oscilación diaria de temperaturas.
- Alta radiación solar en verano y baja en invierno.
- Humedad relativa es baja en verano y tiende a subir en invierno.
- Vientos moderados de predominancia SW.

Los factores climáticos dictados por la norma NCh1079 Of2008 para Santiago se observan en la siguiente tabla:

Temperatura media °C	Enero	20,9
	Julio	8,1
Oscilación térmica media mensual °C	Enero	16,7
	Julio	11,0
Insolación $\frac{Wh}{m^2 \cdot día}$	Enero	6908
	Julio	1918
Soleamiento $\frac{horas\ sol}{día}$	21 Diciembre	14,3
	21 Julio	9,8
Humedad relativa %	Enero	57
	Julio	84
Nubosidad <i>décimas</i>	Enero	1,3
	Julio	5,9
Precipitación <i>mm</i>	Anual	312,5
	Máx. 24h	111,1
Vientos predominantes	-	SSE

Tabla 6. Características climáticas de Santiago. Fuente: NCh1079. Of2008.

Como se dijo anteriormente el factor más significativo que afecta al ensayo en cuestión es la intensidad del viento, el cual tiene una repercusión directa en el intercambio de aire que se produce en el interior de la envolvente con el exterior. A través de la norma NCh1079 Of.2008 se puede conocer la velocidad del viento anual predominante que hay en un sector en particular.

Para obtener la infiltración de aire característica de una envolvente térmica a través del método del vapor de agua se deberá utilizar el principio de difusión del vapor de agua. Al tratarse de un sistema con concentraciones de gases distintas, la presión asociada al vapor de agua hace que se produzca desplazamiento de las moléculas de vapor de agua desde el sector más concentrado al menos concentrado, aun sin la presencia de viento que induzcan infiltraciones de aire. Esto viene del mismo principio de la transmisión de calor. Por lo anterior es conveniente efectuar el ensayo bajo una intensidad de viento nula (o cercana a cero), donde se deberá tener especial cuidado en zonas cuya velocidad del viento media anual sea elevada, de acuerdo a la norma NCh1079 Of.2008. Para verificar que la velocidad del viento sea nula podrían utilizarse anemómetros como los señalados en este capítulo.

Hay que recalcar que en esta oportunidad solo se está comparando el método del ventilador con el del vapor de agua, por lo que las infiltraciones estarán basadas en la intensidad del viento preferentemente.

3.4 Ventilación

La ventilación, en pocas palabras, es un fenómeno que caracteriza el intercambio y renovación de aire de un recinto que forma parte del diseño de la edificación, es decir de forma controlada [22]. Con esto se alteran las características del aire interior, donde se espera, que luego de la renovación de aire, se alcance una calidad aceptable de aire interior. Esto último implica que las concentraciones de contaminantes conocidos en el aire no supere un límite determinado y que para la mayoría de las personas expuestas no resulte molesto.

El procedimiento general de la ventilación abarca la extracción de aire desde una zona determinada (el cual puede corresponder o no a la intemperie), su movilización al recinto de destino y su capacidad para aumentar o disminuir la temperatura de la envolvente según sea necesario, todo esto optimizando los costos de operación.

Algunos de los principales contaminantes del aire son los siguientes [22]:

-Mohos y ácaros: Una baja ventilación del aire resulta en una acumulación de la humedad, lo que finalmente puede desencadenar en un crecimiento de microorganismos. Los daños por humedad y crecimiento microbiano afectan la salud (enfermedades respiratorias y otros síntomas).

-Generación de material particulado en el interior: La importancia del material particulado dependerá de su composición y tamaño. De forma usual se habla del polvo, el cual puede producir alteraciones en la respiración. Una baja ventilación puede radicar en la acumulación de polvo en las superficies del recinto y en forma de suspensión en el ambiente.

-Humo de tabaco ambiental: Se ha demostrado científicamente que el humo del tabaco tiene muchos componentes cancerígenos y que bajo una buena ventilación se puede reducir el riesgo de contraer alguna enfermedad producto de este contaminante.

-Vapor de agua: La concentración de vapor de agua al interior de un recinto podría influenciar el confort de los ocupantes y su bienestar. El control de vapor de agua en el aire es importante por las siguientes razones: una humedad baja puede contribuir a incrementar el riesgo de infecciones al aparato respiratorio, en cambio una humedad alta puede ocasionar incomodidad por la inhibición de la evaporación del sudor a través de la piel y surgimiento de olor a humedad producto de la proliferación de hongos, entre otras. Por otro lado el vapor de agua es responsable de la ocurrencia de la condensación, la cual tiene una serie de repercusiones en viviendas (ver capítulo 2).

-Otros (polen, óxidos de nitrógeno, formaldehído, monóxido de carbono, dióxido de carbono, ozono).

Además de reducir los agentes contaminantes en el aire, la ventilación puede potenciar la productividad de los ocupantes. Se han hecho estudios en oficinas donde el desempeño de las personas mejora considerablemente al aumentar la tasa de ventilación. Por ejemplo, el control personal de las condiciones ambientales, tales como poseer una ventana operativa, tiene un impacto positivo significativo en la satisfacción del ocupante, aumentando hasta un 10% [2].

La ventilación también es usualmente utilizada para controlar la temperatura y la velocidad del aire en el recinto, parámetros directamente ligados al confort higro-térmico.

3.4.1 Tipos de ventilación

Los tipos de ventilación se pueden clasificar en su forma de controlar la contaminación y en sus potenciales movilizadores de aire [7].

- Dependiendo de cómo se controla la contaminación se distinguen dos tipos de ventilación: ventilación general de base o ambiental y ventilación intensiva por extracción:

Ventilación general de base

Consiste en la aplicación constante de flujos de aire. Corresponde a la ventilación mínima necesaria para alcanzar niveles de concentraciones de CO_2 , olores, humedad y otras sustancias nocivas aceptables para garantizar la salud de las personas. Es decir se reduce por dilución el nivel del contaminante en un espacio determinado, hasta alcanzar un nivel admisible.

Ventilación intensiva por extracción

Se usa para la extracción específica de un contaminante, tiene por objetivo: evacuar vapores generados durante la ducha o cocción de alimentos, disminuir la temperatura en ambientes sobrecalentados por insolación y remover partículas contaminantes debido a actividades que se realizan ocasionalmente (como trabajos de pintura).

- Dependiendo de los potenciales movilizadores de aire se distingue: la ventilación natural, la ventilación mecánica y la ventilación híbrida.

Ventilación natural

La ventilación natural se produce cuando incide aire exterior en una envolvente térmica, la cual se produce de forma controlada y por métodos de diseño y constructivos. La renovación se produce por la capacidad natural que provee el ambiente mediante dos formas: las presiones originadas por el viento y las presiones producidas por

diferenciales térmicos [7]. Cuando se habla de una extracción y admisión de aire de forma natural se pueden caracterizar las siguientes ventajas y desventajas del mecanismo de ventilación:

Ventajas: Bajos costos de inversión, no demanda energía eléctrica y además requiere baja mantención y produce bajos o nulos ruidos molestos.

Desventajas: Ésta depende de fenómenos incontrolables que afectan el desempeño de la ventilación, riesgo de caudales excesivos de ventilación y con esto pérdidas energéticas importantes, además de un riesgo de incidencia no controlada de contaminantes, entre otros.

Ventilación mecánica

La renovación de aire se produce mediante la utilización de sistemas electromecánicos. El sistema de ventilación puede conformarse por una extracción (evacuación) mecánica y admisión (alimentación) de aire natural, extracción natural y admisión de aire mecánica, o extracción y admisión de aire mecánica. A continuación se presenta una figura que explica de forma gráfica las formas de alimentación y evacuación de aire:

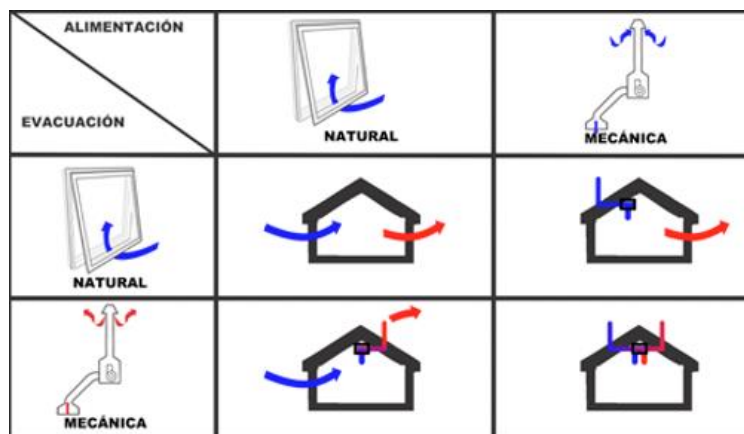


Figura 5. Formas de admisión y extracción de aire [7].

Ventajas de la alimentación mecánica: Simplicidad del sistema, fácil control de flujos de aire, reducción de infiltraciones de aire, el aire impulsado puede ser filtrado, calentado o enfriado, entre otros.

Ventajas de la extracción mecánica: Simplicidad del sistema, Bajos costos de operación, bajo riesgo de penetración de humedad en muros perimetrales, entre otros.

Desventajas de la alimentación mecánica: Favorece la penetración de humedad en los muros perimetrales, el ruido de los ventiladores y la distribución del aire pueden ser molestos, entre otros.

Desventaja de la extracción mecánica: Cuando se ocupa junto a alimentación de aire natural no se permite el filtrado del aire que entra a la envolvente y no es recomendable para uso en edificios ambientados con gran contaminación o ruidos, demanda uso de energía eléctrica y requiere una mantención regular, entre otros.

Ventilación híbrida

La renovación de aire se logra mediante la combinación de los dos tipos anteriores de ventilación. Puede ser utilizada mediante ventilación natural (cuando las condiciones ambientales lo permiten) o ventilación mecánica (cuando se supera el límite admisible de un contaminante). Para esto se diseña como sistema de ventilación natural, que a su vez incorpora ventiladores y un sistema de control de contaminantes.

3.5 Infiltraciones de aire

Las infiltraciones de aire ocurren cuando hay una renovación de éste en la envolvente térmica mediante la incidencia no controlada de aire externo, la cual puede contribuir en la pérdida de calor (y por lo tanto pérdidas energéticas por calefacción) y las condiciones de las propiedades del aire. Esto último puede desplazar contaminantes como los anteriormente descritos afectando la calidad del aire interior. Ésta se produce mediante un descuido del diseño, arquitectura, procedimiento constructivo y por otros factores como diferencias de temperatura y presión entre el interior y el exterior de la envolvente, que inducen entradas y salidas de aire [7].

Las infiltraciones de aire puede ser causa de enfermedades, gasto de energía y discomfort producto de corrientes de aire, entre otros [7]. Se producen mayormente debido a la presencia de grietas y mala estanqueidad de puertas y ventanas y/o de su instalación.

A mayor velocidad del aire exterior, mayor es la presión ejercida en la envolvente y por lo tanto mayor es la probabilidad de incidencia de aire. Esto se debe a que, al haber una mayor velocidad del viento, la cantidad de partículas de aire por unidad de tiempo que incide en la superficie es más alta, lo que aumenta la probabilidad de que partículas de aire incidan a través de una discontinuidad constructiva o bien a través del material mismo dependiente de la permeabilidad al aire que tenga. La presión ejercida por el viento aumenta a medida que los elementos superficiales quedan más expuestos a la dirección favorable del viento.

3.5.1 Medios de infiltración de aire en una envolvente

Las infiltraciones de aire pueden darse por los orificios, grietas y juntas de elementos que caracterizan una vivienda (tales como muros, ventanas y puertas). Además de esto, se sabe que cada material constructivo tiene un índice de permeabilidad que es la capacidad de permitir que un gas lo atraviese, siendo algunos materiales más permeables que otros.

Según estudios hechos por Dickerhoff, 1982 y Harrje et al., 1982, en edificios individuales se puede caracterizar el porcentaje de infiltración que pasa por cada elemento como se ve en la siguiente tabla:

Elemento	Porcentaje de infiltración [%]
Paredes ¹	18 a 50
Detalles de techo	3 a 30
Sistemas de calefacción	3 a 28
Ventanas y puertas ajustadas	6 a 22
Chimeneas	0 a 30
Rejillas de ventilación en espacios acondicionados	2 a 12
Difusión a través de las paredes	< 1

Tabla 7. Porcentaje de infiltración según elemento.

¹Se ve que la mayor parte de las infiltraciones de aire se produce por desperfectos en las paredes, dadas imperfecciones como grietas o juntas, enchufes eléctricos, penetraciones de plomería, etc [29].

La difusión del aire a través de las paredes contribuye en un pequeño porcentaje de las infiltraciones de aire puesto que el elemento en sí es básicamente hermético, donde la magnitud del paso de aire depende de factores ambientales (velocidad del viento principalmente).

3.6 Infiltraciones de aire y el marco internacional

Los estados miembros de la Unión Europea han definido una serie de políticas de Eficiencia Energética que mejoren el desempeño energético de las viviendas [10]. Una de estas medidas considera las pérdidas energéticas por infiltraciones de aire, lo que actualmente Chile no contempla en la Reglamentación Térmica.

Las medidas de la Eficiencia Energética se han preocupado en reducir en gran medida las pérdidas energéticas en la envolvente que tienen los edificios, las cuales corresponden a dos tipos:

- 1) Pérdidas energéticas por transmisión determinadas por el diseño constructivo, conductividad térmica y espesor de los materiales que constituyen la envolvente térmica.
- 2) Pérdidas energéticas por ventilación. Aquí es donde juegan un papel importante las infiltraciones de aire, determinadas por las características permeables de la envolvente o de hermeticidad.

La Reglamentación Térmica chilena solo estudia el primer punto, es decir las pérdidas energéticas por transmisión, no existe en Chile ninguna medida orientada al estudio de pérdidas energéticas por infiltraciones de aire, las cuales contribuyen en un 24 a un 73% en la demanda energética en la vivienda chilena [10].

A continuación se presentan los requisitos de hermeticidad de 13 países, basados en el método de presurización del ventilador [10].

País	Clasificación	Valor máximo exigido	Presión (Pa)
Alemania	Viviendas con ventilación natural	$3,0 \left[\frac{1}{h} \right]$	50
	Viviendas con ventilación mecánica	$1,5 \left[\frac{1}{h} \right]$	
Austria	Viviendas con ventilación natural	$3,0 \left[\frac{1}{h} \right]$	50
	Viviendas con ventilación mecánica	$1,5 \left[\frac{1}{h} \right]$	
Bélgica	Viviendas en general	$12 \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right]$	50
Dinamarca	Viviendas en general	$1,5 \left[\frac{l}{s \cdot m^2} \right]$	50
Eslovenia	Viviendas con ventilación natural	$3,0 \left[\frac{1}{h} \right]$	50
	Viviendas con ventilación mecánica	$2,0 \left[\frac{1}{h} \right]$	
Estonia	Inmuebles pequeños	$6,0 \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right]$	50
	Inmuebles de gran tamaño	$2,0 \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right]$	
Francia	Viviendas unifamiliares	$0,8 \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right]$	4
	Otro tipo de viviendas	$1,2 \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right]$	
Letonia	Viviendas en general	$3,0 \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right]$	50
Lituania	Viviendas con ventilación natural	$3,0 \left[\frac{1}{h} \right]$	50
	Viviendas con ventilación mecánica	$1,5 \left[\frac{1}{h} \right]$	
Noruega	Viviendas en general	$3,0 \left[\frac{1}{h} \right]$	50
Portugal	Viviendas en general	$0,6 \left[\frac{1}{h} \right]$	50
Reino Unido	Viviendas en general	$10,0 \left[\frac{1}{h} \right]$	50
Suecia	Viviendas en general	$0,8 \left[\frac{l}{s \cdot m^2} \right]$	50

Tabla 8. Exigencias de hermeticidad para 13 países europeos [10].

A pesar de tener un mismo objetivo, hay diferencia con respecto al valor máximo exigido con respecto a las infiltraciones de aire, su unidad de medida, y la diferencia de presión de referencia entre el interior y el exterior de la envolvente. Todos los países excepto Francia caracterizan las exigencias de infiltraciones de aire a una diferencia de presión de 50Pa como referencia. Como unidad para expresar la estanqueidad del aire se utiliza

mayoritariamente $\left[\frac{1}{h}\right]$, expresando los cambios de aire por hora (que se verá más adelante), siguiéndole $\left[\frac{m^3}{h \cdot m^2}\right]$ que relaciona el caudal de infiltración con la superficie de la envolvente, y finalmente $\left[\frac{l}{s \cdot m^2}\right]$ que tiene el mismo principio que la anterior.

Una reglamentación en Chile debiera indicar el tipo de presión a utilizar y la unidad de medida del grado de estanqueidad o de infiltraciones de aire. Un flujo determinado a 50Pa no representa el flujo de una envolvente en condiciones normales de uso, pero es razonablemente preciso considerando que no es afectado por las presiones naturales.

3.7 Renovación de aire por hora (ach)

La renovación de aire por hora (en inglés air changes per hour, de ahí la sigla ach) sirve para medir la renovación de aire en una envolvente térmica. Sus unidades son de 1 sobre hora, expresando la cantidad de renovaciones que se producen en todo el volumen de control del análisis por cada hora.

3.8 Norma NCh3295. Método de presurización del ventilador

En la actualidad no existe reglamentación alguna para el ensayo de infiltraciones de aire en Chile. La norma NCh3295 fue aprobada en el año 2013 y sirve para caracterizar la hermeticidad de una envolvente mediante el cálculo de infiltraciones de aire. Ésta se basa en la norma internacional ASTM E-779-03 “*Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization*”, que se apoya en el procedimiento del método del ventilador (blower door).

En condiciones normales, la magnitud de las infiltraciones de aire que gobiernan a una envolvente térmica es muy reducida y difícil de cuantificar. Es por esto que lo que se suele hacer (en varios países) es inducir una diferencia de presión, entre el interior y el exterior de la envolvente, más alta que la normal (la cual puede ser por presurización o despresurización) a través del funcionamiento de un ventilador, lo que implica la obtención de infiltraciones de aire más elevadas. A continuación se presenta un esquema gráfico de la dirección del flujo cuando el ventilador está en funcionamiento (despresurización, sector superior y presurización, inferior).

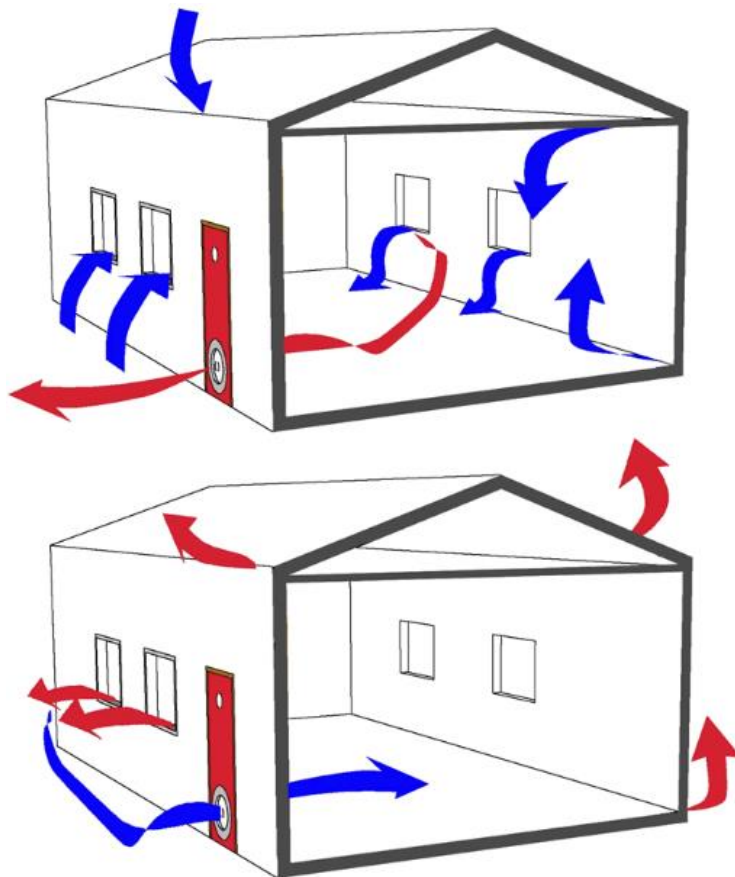


Figura 6. Esquema de despresurización y presurización en una envolvente térmica.

En Chile se busca exigir infiltraciones de aire máximas asociadas a una diferencia de presión de 50Pa, tal como se muestra en la siguiente tabla, según el anteproyecto de norma NTM 011/3 2014, de acuerdo a la zonificación térmica dictada por la norma NCh 1079-2008.

Zona Térmica	Clase de Infiltración de aire
	50Pa
	Ach
A	---
B	6,00
C	9,00
D	8,00
E	8,00
F	7,00
G	4,00
H	6,00
I	4,00

Tabla 9. Infiltraciones de aire máxima por zonificación térmica. Anteproyecto de norma NTM 011/3 2014.

El anteproyecto de norma señalado no está decretado y no es obligatorio, incluso se podría llegar a definir el método de blower door con carácter voluntario.

El valor de 50Pa se utiliza generalmente, puesto que este valor es lo suficientemente bajo como para ser alcanzado por un equipo estándar de blower door y suficientemente alto como para obtener resultados de forma independiente a las condiciones ambientales del exterior.

Además de lo que dicta el anteproyecto de norma anteriormente señalado, existe una propuesta a las exigencias en cuanto a infiltraciones de aire en Chile, la cual fue desarrollada por el proyecto Fondef D101 1025, donde se utilizaron criterios y procedimientos que, para propósitos similares, acordó la ASHRAE en los Estados Unidos. Éstas atribuyen límites máximos de infiltraciones de aire asociado a cada provincia a lo largo de Chile, a diferencia de una zona térmica, decisión respaldada por estudios de simulación energética realizados [7]. La geografía, orografía, topografía, altitud y naturaleza de los terrenos originan microclimas y regímenes de viento que hacen característicos a cada provincia en particular.

Ciudad	Valor n50 ¹ límite propuesto $\left[\frac{1}{h}\right]$	Ciudad	Valor n50 ¹ límite propuesto $\left[\frac{1}{h}\right]$	Ciudad	Valor n50 ¹ límite propuesto $\left[\frac{1}{h}\right]$
Arica	2	San Antonio	8	Concepción	5
Putre	4	Hanga Roa	2	Lebu	5
Iquique	2	Quilpué	8	Angol	8
Pozo Almonte	4	Colina	8	Temuco	5
Tocopilla	2	Santiago	6	Valdivia	5
Calama	4	Puente Alto	6	La Unión	5
Antofagasta	10	San Bernardo	6	Osorno	5
Chañaral	2	Melipilla	6	Puerto Montt	5
Copiapó	5	Talagante	6	Castro	5
Vallenar	10	Rancagua	6	Futaleufú	5
La Serena	8	San Fernando	6	Coyhaique	4
Ovalle	6	Pichilemu	6	Puerto Aysén	4
Illapel	8	Curicó	8	Chile Chico	4
La Ligua	10	Talca	5	Cochrane	4
Los Andes	5	Linares	8	Puerto Natales	4
San Felipe	8	Cauquenes	8	Punta Arenas	4
Quillota	8	Chillán	8	Porvenir	4
Valparaíso	6	Los Ángeles	8	Puerto Williams	4

Tabla 10. Límite de infiltraciones de aire propuesto provincial [7].

¹ Las renovaciones de aire por hora a una diferencia de presión de 50 pascales se les atribuye como $n50 \left[\frac{1}{h}\right]$.

² No se limitan las infiltraciones de aire.

Los instrumentos y equipos necesarios para llevar a cabo el ensayo del blower door son:

- Ventilador
- Lona puerta
- Dispositivo medidor de flujo y presión
- Software Fantestic

3.8.1 Software Fantestic

Este software se utiliza para ensayos de blower door en edificios residenciales o de gran tamaño, mediante pruebas completamente automatizadas, recolección de datos y finalmente generación de informes.

El software registra y calcula las lecturas de los ventiladores y manómetros configurados para medir las fugas de aire en recintos (usualmente habitaciones o edificios), incluyendo conductos de aire. Cuando se utiliza junto a manómetros digitales, el software puede automáticamente controlar los ventiladores y recoger datos de acuerdo a una serie de procedimientos de prueba de fugas estándar. El software generará un informe que contiene los resultados medidos y calculados de acuerdo a un protocolo de prueba (norma ASTM).

Los resultados de forma gráfica que entrega el software se pueden ver en la figura 7.

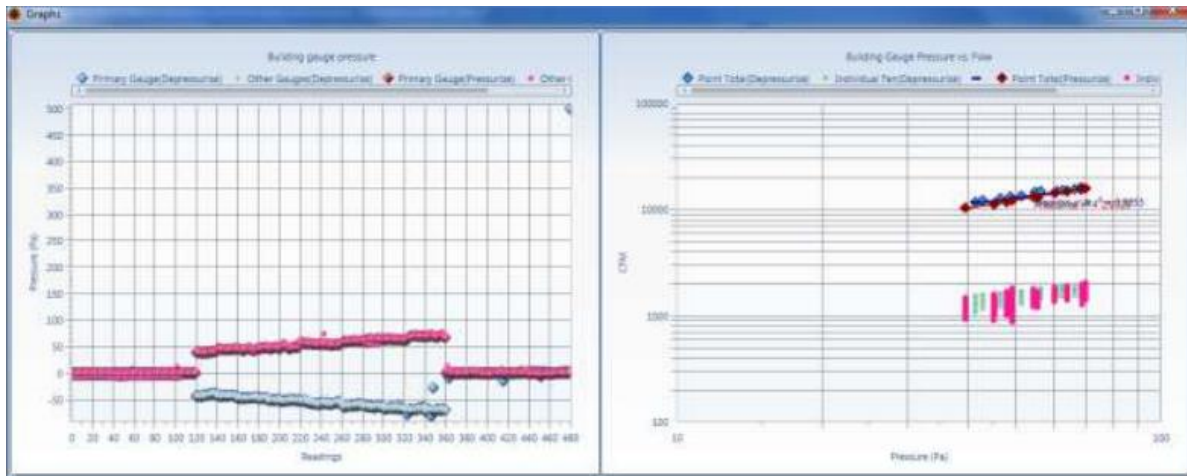


Figura 7. Resultados FanTestic de forma visual. Fuente: Manual FanTestic – Retrotec.

El gráfico de la izquierda muestra las lecturas de presión (Pa) desde los calibradores. El gráfico de la derecha muestra el flujo total del ventilador (en CFM u otras unidades) graficado con la presión de la envolvente en una escala logarítmica. El gráfico de la

derecha muestra además la regresión lineal basada en los datos, y el flujo individual desde todos los ventiladores incluidos en el total.

3.8.2 Limitaciones del método

El método tiene una serie de limitaciones que complica su uso, estos son:

- La metodología debe ser realizada con las condiciones ambientales óptimas posibles. Luego los factores ambientales que condicionan la verosimilitud de los resultados obtenidos son: el viento, la temperatura, las precipitaciones de lluvia/nieve y la carga solar.
- Para controlar el correcto funcionamiento del experimento se debe ir monitorizando presencialmente. Luego, por temas de espacio, se afecta el acceso al recinto y el diseño arquitectónico del sector.
- En particular en Chile hay una escasez de equipamientos necesarios para realizar el ensayo, además del reducido número de empresas que imparten el experimento.
- Ocupa un software especial para calcular directamente las filtraciones de aire, el cual requiere capital para adquirirlo y obtener los permisos necesarios para su uso.

3.9 Método del gas trazador

Este método utiliza las características referentes a la composición del aire en el interior de la envolvente térmica. Para alterar la composición del aire se suele liberar un determinado gas inerte al interior de la envolvente y mezclarlo bien (usualmente usando un ventilador) hasta que esté lo más homogéneo posible. Este método se usa para caracterizar la tasa de ventilación, pero como técnicamente la ventilación tiene el mismo principio que la infiltración de aire, también es factible ocuparlo para calcular esta última. Así es como se pueden cuantificar las infiltraciones de aire mediante un análisis de las variaciones de la concentración del gas en función del tiempo y aplicando los principios de balance de masa para sustancias conservativas. Sin embargo, este método supone grandes errores en las mediciones asociados a ensayos que se postergan mucho en el tiempo, lo que implica una alteración en las condiciones ambientales a lo largo de éste y con ello una variación en las condiciones de borde iniciales. Esto implica un cambio en el caudal de aire de entrada y salida, lo que afecta el resultado final obtenido.

Los gases trazadores típicamente utilizados son: dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, freones, helio y hexafluoruro de azufre.

Como ya se explicó, el fin de esta experiencia es calcular las infiltraciones de aire usando la metodología más sencilla posible, para lo que se ocupará como gas el vapor de agua y se analizará finalmente qué tan correctos son los resultados obtenidos.

3.9.1 Características de los gases trazadores

El gas utilizado para realizar esta metodología puede, teóricamente, ser cualquiera, pero por factores como manipulación, reacción y complejidad del ensayo se recomienda tener en cuenta lo siguiente [1]:

1. Seguridad: El gas no debe poner en riesgo a las personas o actividades que se desarrollen en las cercanías del ensayo. Por lo tanto no debe ser inflamable, tóxico, alérgico, etc.
2. Reactivo: Considerando que se usará el gas para inferir el flujo de aire, éste no debe reaccionar con el sistema puesto que es difícil de cuantificar la degradación de un compuesto.
3. Insensible: El gas no debe afectar los procesos que están siendo estudiados, tales como el flujo de aire o la densidad del mismo. Ante un cambio de densidad no se pueden aplicar los principios de conservación de masa.
4. Singularidad: El gas no debiese ser un constituyente normal del aire y debiese ser perfectamente diferenciable de los demás constituyentes¹.
5. Mensurable: El gas utilizado debe poder ser cuantificable mediante algún tipo de instrumentación.
6. Condensación: El gas debe ser difícil de condensar¹.

Al evaluar el vapor de agua como gas trazador se concluye que en general: es seguro, no reacciona, es insensible y mensurable. El punto 4 y 6 complican al vapor de agua para considerarlo como un posible gas trazador ideal.

¹ Como se vio anteriormente, el agua casi siempre está presente en una u otra medida y forma parte de un componente usual del aire y, además, el vapor de agua se condensa muy fácilmente cuando la temperatura de las superficies en contacto está por debajo de un rango de temperatura.

Hay que destacar que cada uno de estos puntos es una recomendación para poder realizar la experiencia, y eventualmente cualquier tipo de gas liberado en el interior puede ser un posible indicador por la variación de su concentración.

El vapor de agua, al condensarse y cambiar de estado, se pierde en las superficies de la envolvente, lo que es difícil de medir correctamente. Teóricamente este fenómeno no afectaría mayormente el ensayo puesto que la condensación es un proceso que se da mayoritariamente al inicio del experimento, dado el intercambio calorífico que se produce más efectivamente cuando más altas son las diferencias de temperatura entre el aire

húmedo y las superficies de recinto. Luego, este fenómeno no se propagaría mayormente a lo largo del ensayo, pues estas diferencias de temperatura serían más acotadas y, por lo tanto, no se alterarían de forma importante los resultados obtenidos.

Otros factores que afectan al ensayo utilizando el vapor de agua son:

-Presión de vapor: El cálculo de la humedad absoluta depende directamente de la presión de vapor que hay en el sector.

-Absorción higroscópica del agua por parte de los materiales: La absorción de humedad por parte de los materiales condiciona los resultados finalmente obtenidos. Es sumamente importante que toda la humedad circundante se pierda por el intercambio gaseoso con el exterior, y no de otra forma.

-Viento: La magnitud del viento en el exterior de la envolvente determina cuán efectivo es el intercambio gaseoso entre el exterior y el interior, siendo un fenómeno no factible de cuantificar y de aplicar en la práctica.

Nota: La presión del aire no afecta al ensayo puesto que la humedad absoluta no depende de éste, como se verá más adelante.

En particular, para el ensayo realizado en este documento, los instrumentos y equipos utilizados son:

- Termo-higrómetros
- Mechero
- Contenedor de agua
- Software DicksonWare

CAPÍTULO 4 – METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE INFILTRACIONES

4.1 Método de presurización del ventilador

El ensayo consiste en la instalación de un ventilador que va adherido a una lona, la cual va instalada en el lugar que ocupa la puerta principal de la envolvente térmica (o alguna ventana). Al ponerse en marcha aumenta (o disminuye) la presión del interior del recinto, generando un diferencial de presión entre el interior y el exterior, que puede ser positivo (presurización) o negativo (despresurización). Al generar una diferencia de presión, se origina un flujo de aire asociado, el cual puede moverse hacia el interior o hacia el exterior de la envolvente. La presión y el flujo de aire son medidos por un manómetro y un dispositivo que va conectado al ventilador. El manómetro consiste en un dispositivo que tiene dos mangueras, las cuales miden la presión del entorno; para el ensayo una de éstas debe ubicarse en el exterior (sin que le llegue de forma directa carga solar y viento) y la otra en el interior. El manómetro entrega el diferencial de presión natural y alterada de la envolvente. En el ensayo se mide el flujo de aire en CPM $\left[\frac{pie^3}{min}\right]$ o $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ mediante un software, para una diferencia de presión en general de 10, 20, 30, 40 y 50Pa. Con esto es posible originar una regresión lineal que una cada uno de estos puntos, como se ve en la figura 8.

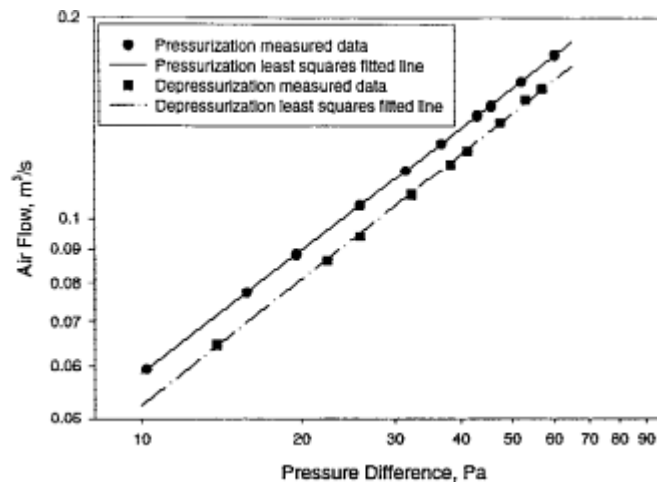


Figura 8. Representación resultado blower door test. Fuente: Norma ASTM E-779-03.

Para fines de este trabajo, es necesario conocer la infiltración de aire en condiciones normales, es decir, sin un gradiente de presión artificial asociado, o dicho de otra forma, asociado al diferencial de presión natural que posee la envolvente en cuestión. Para obtener la magnitud de la infiltración de aire en condiciones normales a través del método del ventilador, es necesario interpolar la diferencia de presión normal de la envolvente

en la ecuación de la recta de la figura 8, obteniendo la tasa de infiltración de aire asociada a esa diferencia de presión. En otras palabras, es necesario reemplazar el diferencial de presión natural (eje x) en la ecuación de la recta indicada anteriormente.

La diferencia de presión normal entre el interior y el exterior de la envolvente se puede obtener a través del manómetro ligado a los equipos asociados al ensayo del blower door.

Por otro lado se han realizado estudios donde se hace una comparación entre el método del ventilador y el método del gas trazador [18] a través del dióxido de carbono CO_2 .

Para llevar el resultado del ensayo del blower door a condiciones normales, se utilizó la regla de dividir el valor de ACH a 50Pa por el valor de 20 [19]. Este valor entrega la estimación del promedio anual de la tasa de infiltración en una envolvente térmica.

Esta correlación se obtiene de estudios que realizaron J. Kronvall y Andrew Persily los que compararon pruebas de presurización con el gas trazador en casas de Nueva Jersey y Suecia. Se concentraron en pruebas de presurización a 50 Pascales obteniendo una buena estimación del promedio de tasas de infiltración dividiendo los cambios de aire por hora a 50 pascales por 20.

La regla de ACH50/20 se ha perfeccionado utilizando varios factores que dependen de la ubicación y el tipo de inmueble. Esta mejor aproximación lleva ACH50 (Correlación de Sherman [20]) a las condiciones normales de operación promedio anual según ACH50/N.

$$N = C \cdot H \cdot S \cdot L$$

Donde:

C: Factor climático, función de las temperaturas y vientos locales anuales.

H: Factor de corrección por altura del inmueble

S: Factor de corrección por protección contra el viento.

L: Factor de corrección por fugas.

Al comparar el resultado del gas trazador con la regla de ACH50/20 y el método de Sherman se obtuvo un error de 33% y 38% respectivamente.

Dada la subjetividad del método de Sherman, se compararán los resultados utilizando la regla ACH50/20 en este documento (además de la extrapolación de la figura 8 explicada anteriormente).

4.2 Método del vapor de agua

Para obtener la metodología de cálculo de infiltraciones mediante la medición del cambio de la humedad absoluta en el interior, se asume un recinto con una serie de condiciones particulares que se detallan a continuación:

1. Superficies interiores de la envolvente con una permeabilidad baja al vapor de agua, cosa que se produzca una absorción de humedad despreciable por parte de los materiales que la constituyen.
2. En lo posible se deberá considerar un día con condiciones atmosféricas favorables (en particular un día despejado), esto para que el vapor de agua en el interior pueda ser renovado con mayor facilidad y además para evitar variaciones importantes de humedad absoluta en el exterior del local. Y, por otro lado, donde la velocidad del viento sea idealmente nula, esto para que el intercambio gaseoso se produzca únicamente por la difusión del vapor de agua.
3. La transmitancia térmica del recinto debiese obedecer a los valores que se citan en la siguiente tabla, esto según las exigencias térmicas dictadas por el artículo 4.1.10 de la O.G.U.C.

Zona térmica	Techumbre	Muros	Pisos ventilados
	$U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	$U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	$U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$
1	0,84	4,0	3,60
2	0,60	3,0	0,87
3	0,47	1,9	0,70
4	0,38	1,7	0,60
5	0,33	1,6	0,50
6	0,28	1,1	0,39
7	0,25	0,6	0,32

Tabla 11. Transmitancia máxima exigida por Zonas Térmicas. O.G.U.C, Art. 4.1.10 [14].

Nota: En la tabla anterior se habla de 7 zonas, las cuales corresponden a las Zonas Térmicas, las cuales no tienen correspondencia con la Zonificación Climático Habitacional de la norma NCh1079 Of.2008.

4. La envolvente debe tener dimensiones acotadas, esto para garantizar una distribución uniforme de la humedad al interior del recinto, para que la humedad absoluta que se mida sea característica de todo el volumen que ocupa la envolvente.

Luego de obtener la humedad relativa y la temperatura de la envolvente en cada paso de tiempo, se considerarán dos metodologías de cálculo para calcular la infiltración de aire y mediante los resultados obtenidos se concluirá cuál es la más factible.

4.2.1 Metodología de cálculo 1: Análisis discreto en toda la curva de humedad absoluta.

Para calcular la tasa de infiltración de aire primero es necesario transformar la humedad relativa en absoluta, mediante la temperatura. Para esto se considera la metodología de acuerdo a [15] y [17], como sigue:

$$HA = \frac{C \cdot P_v}{T}$$

Donde.

HA : Humedad absoluta $\left[\frac{g \text{ de agua}}{m^3 \text{ de aire}} \right]$

P_v : Presión del vapor [Pa]

$C = 2,16679 \frac{gK}{J} = 2,16679 \frac{gK}{Pa \cdot m^3}$: Constante

T : Temperatura [$^{\circ}K$]

La presión del vapor P_v se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_v = \frac{P_{vs} \cdot HR}{100}$$

Donde:

P_{vs} : Presión del vapor saturado [hPa]

HR : Humedad relativa [%]

La presión del vapor P_{vs} se calcula de acuerdo a la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$P_{vs} = A \cdot 10^{\frac{m \cdot T}{T+Tn}}$$

Donde:

T : Temperatura [$^{\circ}C$]

A, m, Tn : Parámetros empíricos

Los parámetros anteriores se extraen de la siguiente tabla, que contiene información empírica asociada al agua [15]:

A	m	Tn	Error máximo	Rango de temperaturas
6,116441	7,591386	240,7263	0,083%	-20... +50 $^{\circ}C$
6,004918	7,337936	229,3975	0,017%	+50... +100 $^{\circ}C$
5,856548	7,27731	225,1033	0,003%	+100... +150 $^{\circ}C$
6,002859	7,290361	227,1704	0,007%	+150... +200 $^{\circ}C$

Tabla 12. Parámetros empíricos ecuación de Clausius-Clapeyron

En este caso las temperaturas siempre están dentro del rango de -20 a 50 $^{\circ}C$, por lo tanto se ocuparán los parámetros asociados a la primera fila de la Tabla 12.

Luego, integrando todos los parámetros en una sola ecuación, se llega a :

$$HA = \frac{13,25304}{(273,15+T)} \cdot 10^{\frac{7,591386 \cdot T}{T+240,7263}} \cdot HR \quad (1)$$

La fórmula 1 se puede comprobar utilizando software de cálculo de humedades a partir de la temperatura ambiental y la humedad relativa, tal como el de la referencia bibliográfica [16].

Una vez calculada la humedad absoluta es posible calcular el caudal de aire Q según el análisis de conservación de volumen y masa, de la siguiente forma:

Balance de volumen:

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q_s = 0$$

Como el volumen de aire al interior del recinto considerado no varía se impone que su derivada en el tiempo es cero. Esto implica que el caudal que entra debe ser igual al que sale de la envolvente.

$$Q_e = Q_s \quad (2)$$

Balance de masa:

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = Q_e \cdot C_e - Q_s \cdot C_s$$

Nota: Se consideró que la densidad el aire no varía, lo cual puede ser incierto al estar en la presencia de fuerte viento.

Finalmente considerando un análisis diferencial y la ecuación (2) se llega a:

$$Q = \frac{V \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}}{(C_e - C_s)} \quad (3)$$

Donde:

Q : Caudal de aire $\left[\frac{m^3}{min} \right]$

V : Volumen que ocupa el aire al interior de la envolvente $[m^3]$

ΔC : Variación de la concentración de vapor de agua interior en un paso dado $\left[\frac{g}{m^3} \right]$

Δt : Variación del tiempo en un paso dado $[min]$

C_e : Concentración de vapor de agua exterior asociado al paso de tiempo $\left[\frac{g}{m^3} \right]$

C_s : Concentración de vapor de agua interior asociado al paso de tiempo $\left[\frac{g}{m^3} \right]$

La infiltración de aire en el tiempo paso i , se calcula dividiendo el volumen de aire que se va renovando por el tiempo en cuestión, llegando finalmente a:

$$Q_i^* = \frac{\sum_1^i \Delta t_j \cdot Q_j}{t_i} \quad (4)$$

Donde $\sum_1^i \Delta t_j \cdot Q_j$ es el volumen de aire que se va renovando en el paso i , y que al dividirlo por el tiempo en ese instante se obtiene la infiltración de aire Q_i^* asociada a ese momento.

La infiltración de aire final Q^* , y la que se considerará como característica de la envolvente se calculará como el promedio de los valores de Q_i^* que representen una homogeneidad o tendencia.

Para esto se debe estudiar de forma visual la gráfica que entregue Q_i^* en el tiempo, y caracterizar el tramo o el conjunto de puntos donde se aprecie que hay una tendencia de valores constante.

4.2.2 Metodología de cálculo 2: Análisis continuo del transiente inicial de la curva de humedad absoluta.

Integrando (3), considerando $C_e = HA_{in}$, $C_s = HA_{out}$ y utilizando el supuesto de que la humedad absoluta del exterior se mantiene constante y sea $ACH = \frac{Q}{Vol}$, se puede llegar a lo siguiente:

$$ACH = - \left[\ln(HA_{in} - HA_{out}(\Delta t)) - \ln(HA_{in} - HA_{out}(0)) / \Delta t \right] \quad (5)$$

Si tomamos el comportamiento inicial de las curvas de humedad absoluta interior, donde se aprecia una notoria disminución de la concentración de vapor de agua, se pueden caracterizar los cambios de aire por hora (ACH) propios de la envolvente. Esta forma que adopta la curva se puede ver por ejemplo en la caracterización del aire interior en la Figura 29 de la página 72 de este documento, asociada a la medición 1 de la parte experimental, dentro de los minutos 0 y 20. La caracterización de este tramo entrega resultados relevantes exclusivamente por la forma logarítmica que tiene la curva y la despreciable variación de la humedad absoluta exterior (que se asimila a la tendencia que debiera tener la variación teórica de concentración).

Para el cálculo se tomará el paso de tiempo que represente la máxima división entre variación de la humedad absoluta y variación de tiempo, es decir se tomará un Δt^* tal que:

$$\frac{HA_{out}^0 - HA_{out}^{\Delta t^*}}{\Delta t^*} = \max \left(\frac{HA_{out}^0 - HA_{out}^{\Delta t}}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

En otras palabras es la máxima pendiente que se obtiene en la curva de humedad absoluta, tomando como primer punto la humedad absoluta interior inicial (out).

La humedad absoluta exterior (HA_{in}) se calculará como el promedio entre los valores de humedad absoluta exterior que estén dentro del rango de Δt , como una aproximación de la dispersión de los datos.

CAPÍTULO 5 – PREPARACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1 Ubicación experimental

El lugar donde se realizará el montaje experimental es uno de los establecimientos de IDIEM, en las cercanías del Laboratorio de Incendios en Salomón Sack, Cerrillos. La experiencia se desarrollará específicamente en una caseta hecha de albañilería con disponibilidad inmediata, la cual actualmente se ocupa como una mini bodega para almacenar inventario.



Figura 9. Mapa y vista satelital del lugar del ensayo.



Figura 10. Vista frontal y lateral de la caseta.

5.1.1 Características climáticas del sector

Las características climáticas para la zona de Santiago – Los Cerrillos, se pueden observar en la siguiente tabla, según la norma NCh1079 Of.2008.

Variable Climática	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Temperatura media °C	20,5	19,6	17,4	14,2	11,1	8,5	8,2	9,4	11,3	14,1	17,0	19,4	14,2
Temperatura máxima media °C	29,4	28,7	26,7	22,6	18,4	15,0	14,8	16,4	18,8	22,1	25,1	28,1	22,2
Temperatura mínima media °C	12,9	12,4	10,8	8,1	6,2	4,2	3,8	4,7	6,1	8,1	10,0	12,0	8,3
HR media mensual %	58	62	66	71	79	83	83	80	77	71	64	60	71

Tabla 13. Características climáticas para Santiago - Los Cerrillos. Período 1961 - 1990. NCh1079 Of.2008.

Como se dijo anteriormente es conveniente realizar el ensayo del vapor de agua bajo la menor humedad relativa posible. De acuerdo a la tabla anterior, el mes donde se midió la humedad relativa más baja fue en enero, correspondiente a una humedad relativa media de 58%, fecha donde es más recomendable realizar, en la práctica, la experiencia (según el factor de humedad).

Por otro lado la norma NCh1079 Of.2008 no muestra información en cuanto a los vientos predominantes en la zona de Los Cerrillos, por lo tanto se considerará como indicador la zona más próxima de Quinta Normal, de acuerdo a la siguiente tabla:

Mes	Dirección vientos predominantes e intensidad media m/s	Mes	Dirección vientos predominantes e intensidad media m/s
Ene	SW 2,6	Jul	Calma
Feb	SW 2,6	Ago	Calma
Mar	SW 2,1	Sep	Calma
Abr	Calma	Oct	SW 2,1
May	Calma	Nov	SW 2,1
Jun	Calma	Dic	SW 2,6

Tabla 14. Dirección predominante e intensidad del viento para Santiago - Quinta Normal. Período 1961-1990. NCh1079 Of.2008.

La velocidad del viento debiera ser nula (punto 3.3), por lo tanto es recomendable, en la práctica, realizar la experiencia dentro de los meses donde la intensidad del viento es calma (según el factor viento), de acuerdo a la Tabla 14, esto para que sea más sencillo alcanzar velocidades nulas de viento durante el ensayo.

5.2 Características de la caseta

La caseta que se ocupará para realizar el procedimiento experimental se puede ver en la Figura 10. Ésta está cubierta casi completamente por poliuretano expandido en el exterior de 10 centímetros de espesor. Esto se hizo para poder aislar térmicamente el interior del exterior de la caseta en un trabajo de tesis previo.

Las dimensiones que ocupa el aire interior son 3,40x2,20x2,35 metros (largo, ancho y alto), ocupando un volumen total de 17,58 metros cúbicos.

La caseta está hecha de albañilería, es decir sus muros están confeccionados con ladrillos y mortero, tiene una ventana de dimensiones 1x1 metros y una puerta de 77,5 centímetros de ancho y 204 de alto.

Cálculo de la transmitancia de la caseta:

Para calcular la transmitancia de la caseta, se utilizaron los siguientes valores de conductividad térmica de acuerdo a la norma NCh 853 Of.2007:

Ladrillo macizo hecho a máquina con una densidad de $1200 \frac{kg}{m^3}$: $\lambda_L = 0,52 \frac{W}{m \cdot K}$

Poliuretano expandido con una densidad de $70 \frac{kg}{m^3}$: $\lambda_{PE} = 0,0274 \frac{W}{m \cdot K}$

Luego aplicando la fórmula de transmitancia:

$$U_t = \frac{1}{0,12 + 0,05 + \frac{0,1}{0,52} + \frac{0,1}{0,0274}} = 0,25 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

De acuerdo a la Tabla 11 (Santiago se ubica en la zona térmica 3), el valor de la transmitancia de la caseta es inferior al máximo exigido (equivalente a $1,9 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$).

Por otro lado se impermeabilizarán al vapor de agua las superficies interiores de la envolvente utilizando papel polietileno, con una permeabilidad al vapor de agua $130 \text{ ml} \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm Hg}^{-1}$, valor aceptable dentro de los polímeros que se caracterizan por resistir el paso del vapor de agua.

Para comprobar la uniformidad de la humedad en el interior de la caseta se medirá la humedad relativa en distintos puntos y se compararán las curvas en función del tiempo.

Dado lo anterior la caseta en cuestión cumple con las condiciones descritas en el punto 4.2, siendo razonable utilizarla para la realización del método del vapor de agua.

5.3 Materiales montaje experimental

- Papel polietileno: Se utilizó para cubrir las paredes, losa y cielo interiores de la caseta.
- Cinta doble cara: Cinta que permite adherir elementos a superficies, se utilizó para pegar el nylon a las superficies.
- Burlete para puerta: Elemento aislante que permite impedir el paso de aire por debajo de la puerta.
- Cinta selladora: Cinta que impide el paso de aire en grietas y separaciones, preferentemente en puertas y ventanas.
- Tubo PVC: Tubo de plástico utilizado para servir como paso de aire. Se ocupará un tubo de 3 pulgadas.
- Madera gruesa: Se utilizó una placa de madera gruesa de dimensiones 1x1m para reemplazar la ventana.

5.4 Aislación de muros y grietas

El vapor de agua es muy susceptible a ser absorbido por los materiales de su entorno, es por esto que los muros, la losa y el cielo se aislaron mediante papel polietileno (con una permeabilidad al vapor de agua de $130 \text{ ml} \cdot \text{mm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm Hg}^{-1}$), para evitar el efecto higroscópico de éstos. El papel polietileno, por ser un material hidrofóbico, permite que las superficies no entren en contacto directo con el ambiente, impidiendo que se absorba vapor de agua y se pierda humedad por medios distintos a la de infiltración de aire.

Como se verá más adelante, teóricamente es posible calcular las filtraciones de aire directamente utilizando un anemómetro, mediante la velocidad del flujo de las infiltraciones y el área de la rueda alada. Para este fin es necesario que todo el flujo de infiltración se produzca únicamente a través de este instrumento, por lo que es necesario sellar todas las aberturas o grietas que se estén en la envolvente.

Para sellar las fugas o grietas (las cuales estaban en su mayoría al borde de la puerta y de la ventana) se utilizó la cinta selladora de forma que no fuera posible identificarlas mediante la vista, tal como se ve en la siguiente figura.

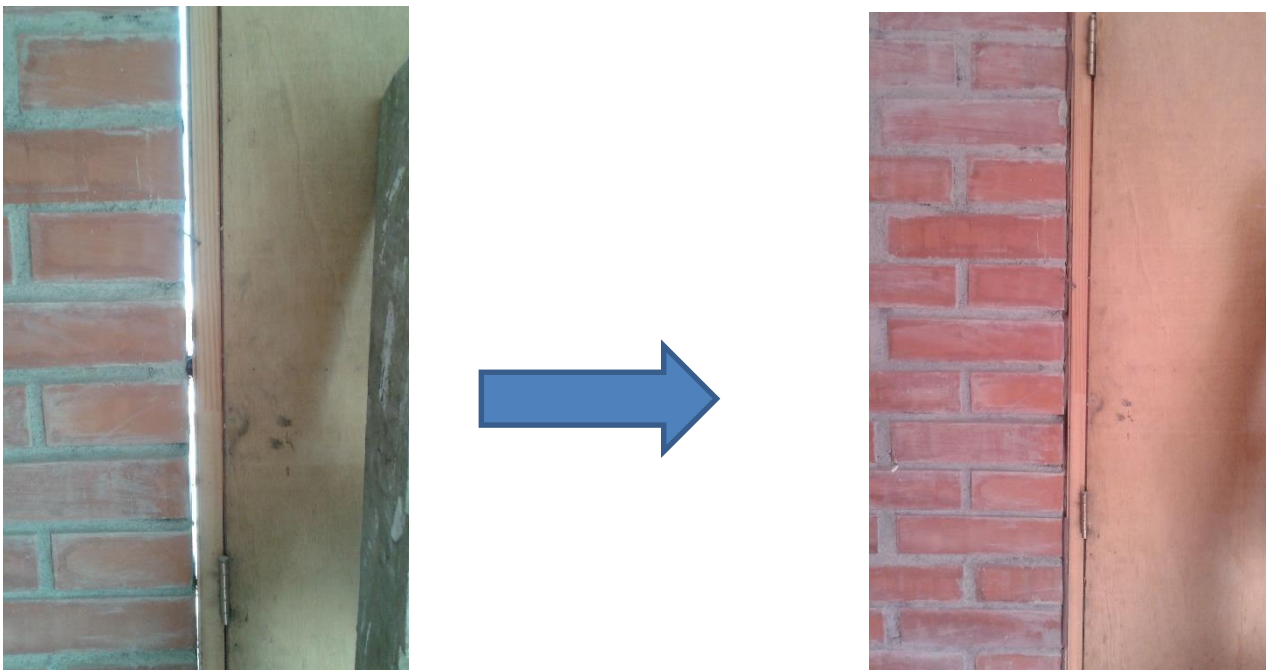


Figura 11. Aislación de grietas y aberturas

Luego se cortó el papel polietileno en varias partes para cubrir de forma completa cada superficie de la caseta. Éstas fueron adheridas a las paredes, cielo y losa mediante cinta doble cara, la cual se pegó longitudinalmente y separada a una distancia aceptable para evitar el despegue del papel.



Figura 12. Adhesión de la cinta doble cara en las paredes.

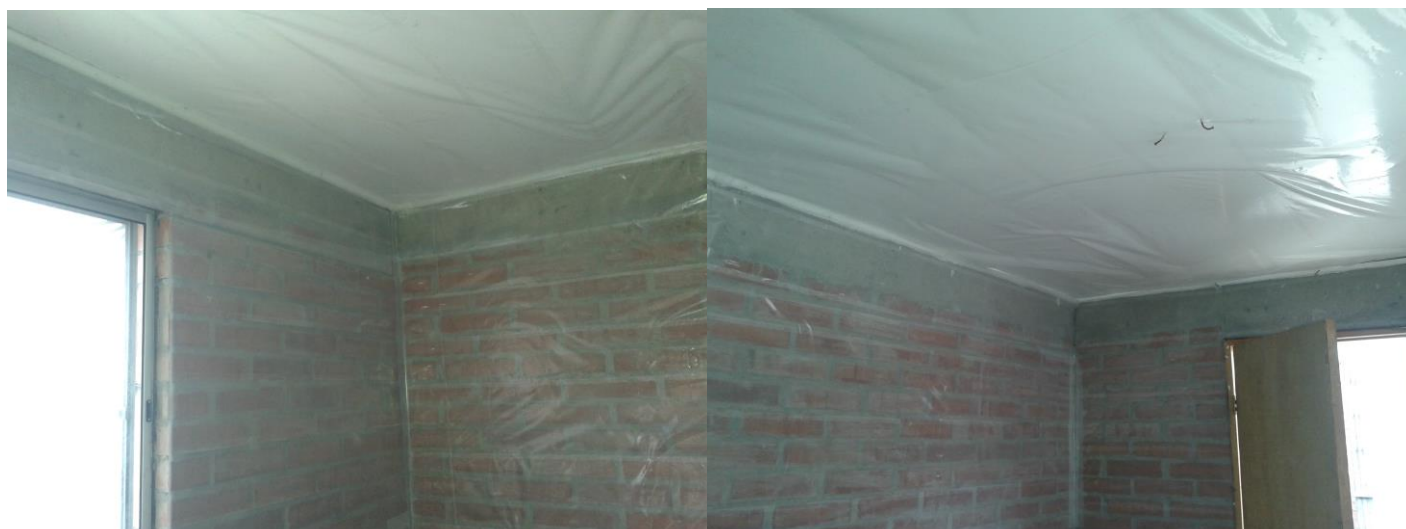


Figura 13. Vista del papel polietileno ya instalado

5.5 Punto de fuga singular. Medición flujo de aire mediante anemómetro.

Una forma de comprobar los resultados que entrega el método vapor de agua y el ensayo de presurización del ventilador es modificando la caseta de tal manera que el intercambio de aire se realizara a través de un único punto de fuga. El orificio se realizaría a través de un tubo PVC de 3 pulgadas de diámetro (el cual coincide con el tamaño de la rueda alada del anemómetro). Por lo tanto la sección de intercambio gaseoso sería conocida, tal como se ve en la Figura 14.

Teniendo la sección por donde se intercambiaría el aire, faltaría conocer la velocidad del flujo para poder calcular finalmente la renovación de aire en unidades de caudal. Para esto se utilizó un anemómetro con el diámetro de la rueda similar al del tubo PVC. De acuerdo al capítulo 3, éste instrumento permitiría encontrar la velocidad del flujo de aire que pasa por la rueda alada.



Figura 14. Vista del punto de fuga singular.

5.6 Preparación y adquisición de datos anemómetro

La adquisición de datos mediante el anemómetro tiene lugar cuando están funcionando los termo-higrómetros, es decir luego de comenzar el ensayo de vapor de agua.



Figura 15. Instalación adquisición de datos anemómetro.



Figura 16. Adquisición de datos mediante software.

5.7 Preparación y adquisición de datos método vapor de agua

Luego de verificar que la caseta en cuestión cumple los requisitos señalados en el punto 4.2, se procede a señalar paso a paso la metodología de obtención de resultados para el método de vapor de agua.

1. Se programarán termo-higrómetros usando el software DicksonWare para que registren datos cada 10 segundos o 1 minuto y posteriormente se adherirán a las cuatro paredes interiores, el cielo y en el exterior de la caseta, conformando un total de 6.
2. Unos 20 minutos antes de que los instrumentos empiecen a tomar datos, se hervirá una determinada cantidad de agua utilizando una olla y un mechero simple.
3. Cuando comiencen a tomar datos los termo-higrómetros se medirá la humedad relativa y la temperatura utilizando un termo-higrómetro calibrado, para así calibrar a los 6 restantes.
4. Al siguiente día se desmontarán los instrumentos y se descargará la información de cada termo-higrómetro.
5. Verificar que las curvas de humedad relativa de cada termo-higrómetro ubicado en el interior de la envolvente sean similares entre sí para comprobar que la humedad absoluta fue uniforme.

Notas:

- La información que entrega cada termo-higrómetro es la humedad relativa y la temperatura ambiental, para cada paso de tiempo. Y para los efectos de cálculo se considerarán los datos del termo-higrómetro ubicado en el cielo de la envolvente.
- En esta metodología no se incluyó el procedimiento para medir el flujo de aire mediante el anemómetro (como se vio anteriormente), mediante el sello de aberturas y grietas.



Figura 17. Representación termo-higrómetros.

Los termo-higrómetros fueron adheridos a cada superficie de la caseta, tal como se ve en la Figura 17. Resultando de un total de 6 termo-higrómetros instalados considerando además el cielo de la caseta y otro en el exterior.



Figura 18. Representación de la metodología para la evaporación de agua.

En la figura anterior se ve el mechero en funcionamiento y la olla que se utilizó para permitir la evaporación de agua.

5.8 Preparación y adquisición de datos método de presurización del ventilador



Figura 19. Medición del marco, lona del ventilador.

Para instalar la lona que reemplazará la puerta primero es necesario confeccionar un marco de dimensiones similares a la puerta, con tal de cubrirla por completo.



Figura 20. Instalación marco del ventilador.

En la Figura 20 se ve la instalación del marco que tiene lugar en el sector de la puerta. Éste tiene que calzar lo mejor posible con el fin de evitar fugas de aire.



Figura 21. Instalación ventilador.

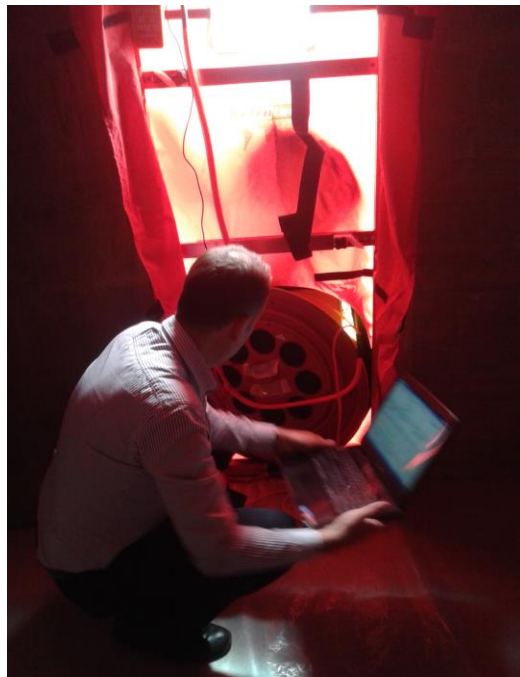


Figura 22. Adquisición de datos blower door test.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 Resultados obtenidos, anemómetro

La medición del flujo de aire se realizó con un anemómetro de rueda alada de 3 pulgadas de diámetro.

Se tomaron datos por 1 hora aproximadamente resultando en el siguiente gráfico:

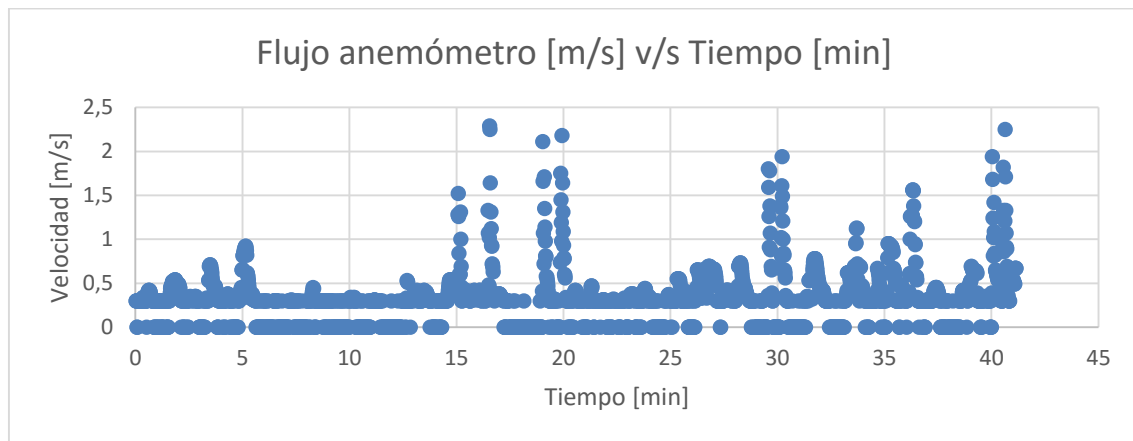


Figura 23. Resultado obtenido, método flujo de aire.

Vemos que la distribución de la velocidad del flujo en el tiempo no obedece a un comportamiento homogéneo. Esto se debe a que ella estaba gobernada exclusivamente por la velocidad del viento, el cual no es un indicador del flujo de aire que sale de la caseta producto de la diferencia de humedad entre el interior y el exterior de la envolvente.

La franja sin puntos que se advierte en la Figura 23 guarda relación con la sensibilidad del anemómetro. El instrumento utilizado no mide flujos de aire entre 0 y 0,3 m/s, representando todo este intervalo con un único valor de 0,3 m/s.

Calculando el promedio de todos los puntos y utilizando la sección de la rueda del anemómetro se puede llegar al siguiente resultado:

Velocidad promedio [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Área sección de flujo [m ²]	Infiltración de aire [m ³ /min]
0,29	2,29	0,018	0,32

Tabla 15. Resultados entregados por el anemómetro.

6.2 Resultados obtenidos, método de presurización del ventilador

Luego de realizar la metodología para el cálculo de infiltraciones mediante el método del ventilador se puede obtener la siguiente tabla:

Diferencia de presión [Pa]	Flujo CFM $\left[\frac{pie^3}{min}\right]$	Flujo $\left[\frac{m^3}{min}\right]$	ACH $\left[\frac{1}{hr}\right]$	Error [%]
10,8	68,2	1,93	6,59	1,1
21,9	120,5	3,41	11,64	1,5
29,7	163,4	4,62	15,77	4,4
41,6	211,7	5,99	20,44	3,3
52,6	232,4	6,58	22,46	6,0
57,2	267,4	7,57	25,84	1,3

Tabla 16. Resultados entregados por el blower door test.

Donde CFM es cubic feet per minute $\left[\frac{ft^3}{min}\right]$.

De la Tabla 16 se desprenden los siguientes gráficos:

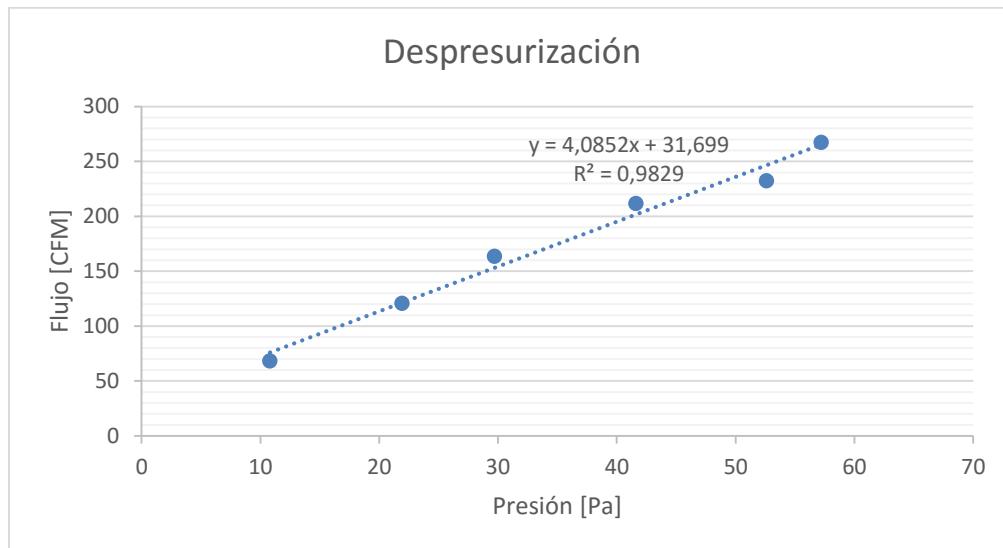


Figura 24. Curva de tendencia resultados blower door test en CFM.

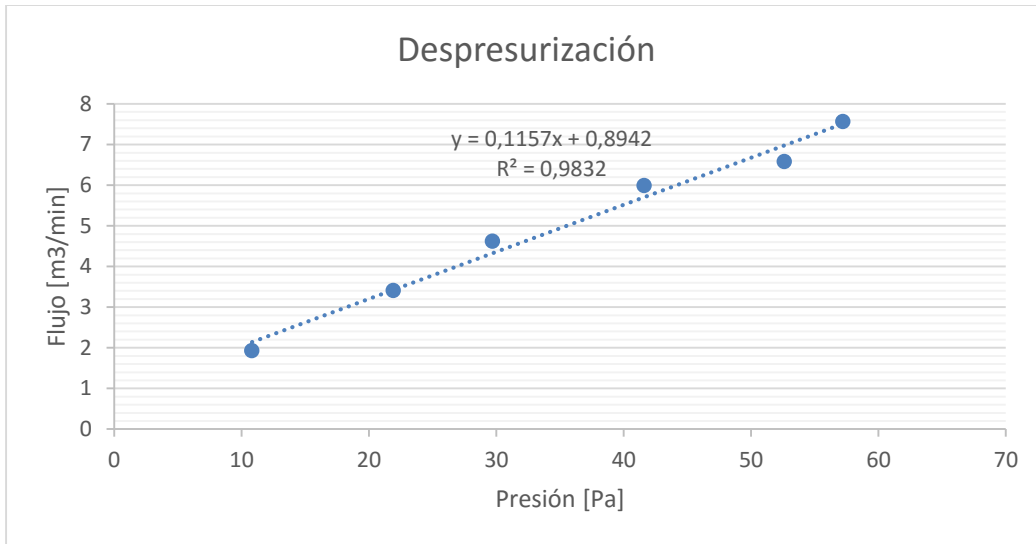


Figura 25. Curva de tendencia resultados blower door test en $\frac{m^3}{min}$.

Notar que la primera ecuación es equivalente a la segunda (Figuras 24 y 25) mediante la correcta transformación de unidades.

Además de esto como los equipos del método del ventilador incluyen un manómetro, también se obtuvo la diferencia de presión normal de la caseta, calculadas al inicio y al final del ensayo. Luego aplicando el promedio de ambas mediciones se puede estimar la diferencia de presión normal en ese momento, entregando:

Diferencia de presión inicial [P_a]	-0,35
Diferencia de presión final [P_a]	-0,58
Promedio [P_a]	-0,46

Tabla 17. Diferencias de presión normales caseta.

Donde el promedio de ambas mediciones será la diferencia de presión considerada para el análisis. El signo negativo indica que la presión del interior es más baja que la del exterior.

Considerando entonces la diferencia de presión de la caseta, y la curva $y = 0,1157x + 0,8942$, se obtiene que:

$$\text{Infiltración de aire, método del ventilador} = 33,58 \left[\frac{ft^3}{min} \right] = 0,94 \left[\frac{m^3}{min} \right]$$

Dividiendo por el volumen de la caseta se obtiene $ACH = 3,21 \left[\frac{1}{h} \right]$ cambios de aire por hora.

6.3 Resultados obtenidos, método vapor de agua, metodología 1

Se desarrollaron dos mediciones en donde cada una partió a la misma hora, siendo ésta las 11:00am para poder considerar el comportamiento relativo preferentemente en la tarde. Lo anterior se debe a que la visualización de los resultados depende en gran parte de las condiciones atmosféricas del exterior de la caseta, por lo que se necesita que la humedad relativa exterior sea lo más baja posible. Dado esto el experimento se realizó en días soleados exclusivamente.

6.3.1 Medición 1

Para la primera medición se evaporaron 350 cc de agua con tal de alcanzar una humedad relativa inicial de 80% aproximadamente. Los termo-higrómetros se configuraron para tomar mediciones cada 10 segundos, resultando en un universo de datos de 9 horas aproximadamente. Se tomaron finalmente un total de 3968 datos por cada instrumento.

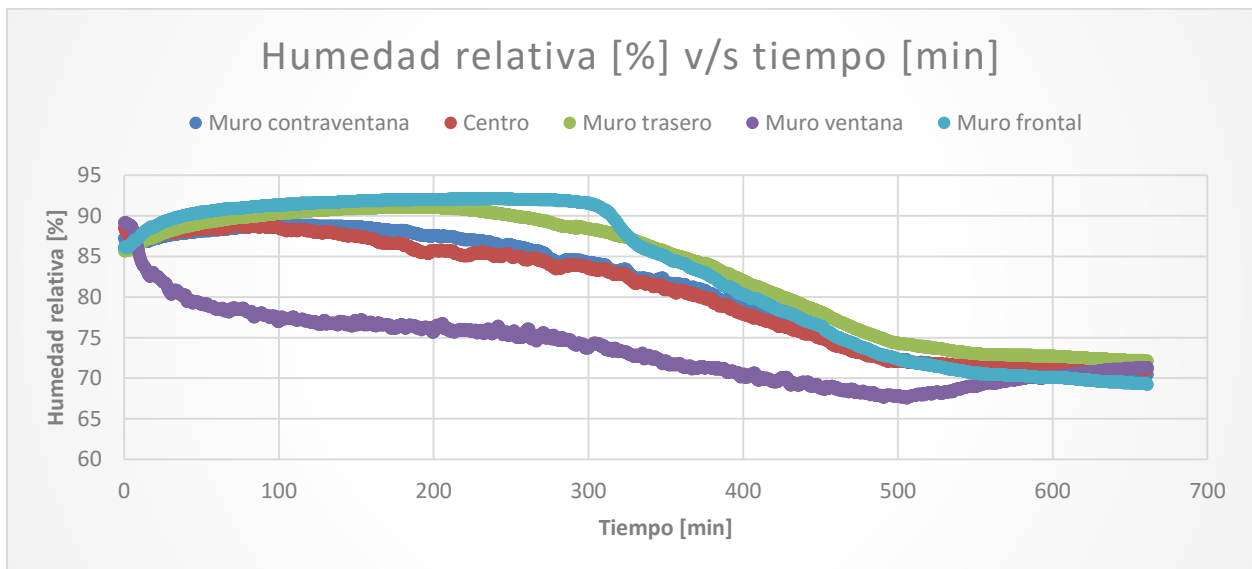


Figura 26. Medición 1. Resultados entregados por cada termo-higrómetro.

De acuerdo a la Figura 26 se puede observar que los termo-higrómetros ubicados en el muro contraventana, centro, muro trasero y frontal, responden a una variación de humedad relativa parecida. Por otro lado, el termo-higrómetro ubicado en el sector de la ventana responde a un comportamiento un poco desviado al de los demás, lo que se debe básicamente a que las características del aire en ese lugar se veían alteradas de forma directa por el intercambio de éste con el exterior, dado que está próximo al punto de fuga.

La humedad relativa responde a una distribución relativamente homogénea, luego se considerará representativo el termo-higrómetro ubicado en el centro de la envolvente térmica para efectos de cálculo.

La comparación entre humedades relativas interior y exterior se ve en la siguiente figura:

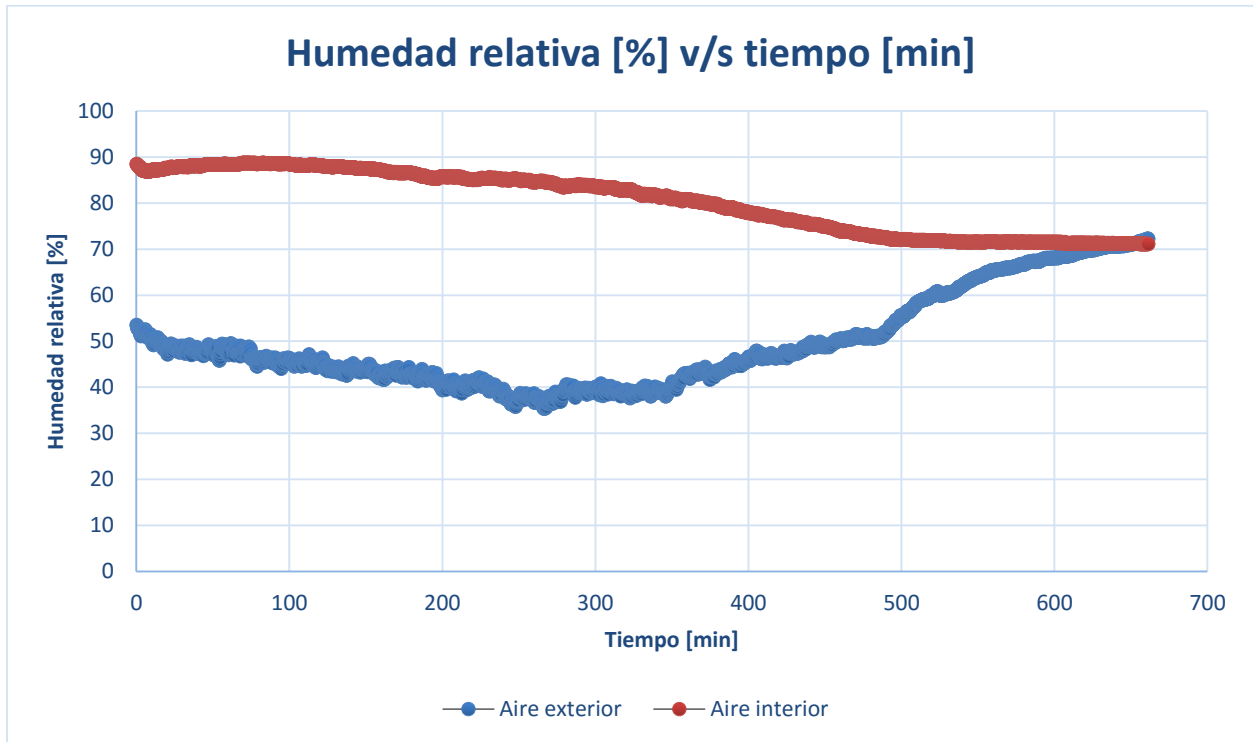


Figura 27. Medición 1. Representación humedad relativa v/s tiempo.

De acuerdo a la Figura 27 se puede desprender lo siguiente:

- La humedad relativa interior disminuye hasta llegar a un mínimo aproximado de 70% a las 19:00 horas.
- La humedad relativa exterior experimenta un mínimo de aproximadamente 35% de humedad relativa a las 16:00 horas y luego aumenta hasta igualarse con la del interior.
- Se ve que el comportamiento de la humedad relativa interna tiende a ser más parejo que el de la externa, lo que se debe principalmente a la variación higrométrica producto de las condiciones ambientales.

A continuación se presenta el comportamiento térmico del ambiente interior y del exterior.

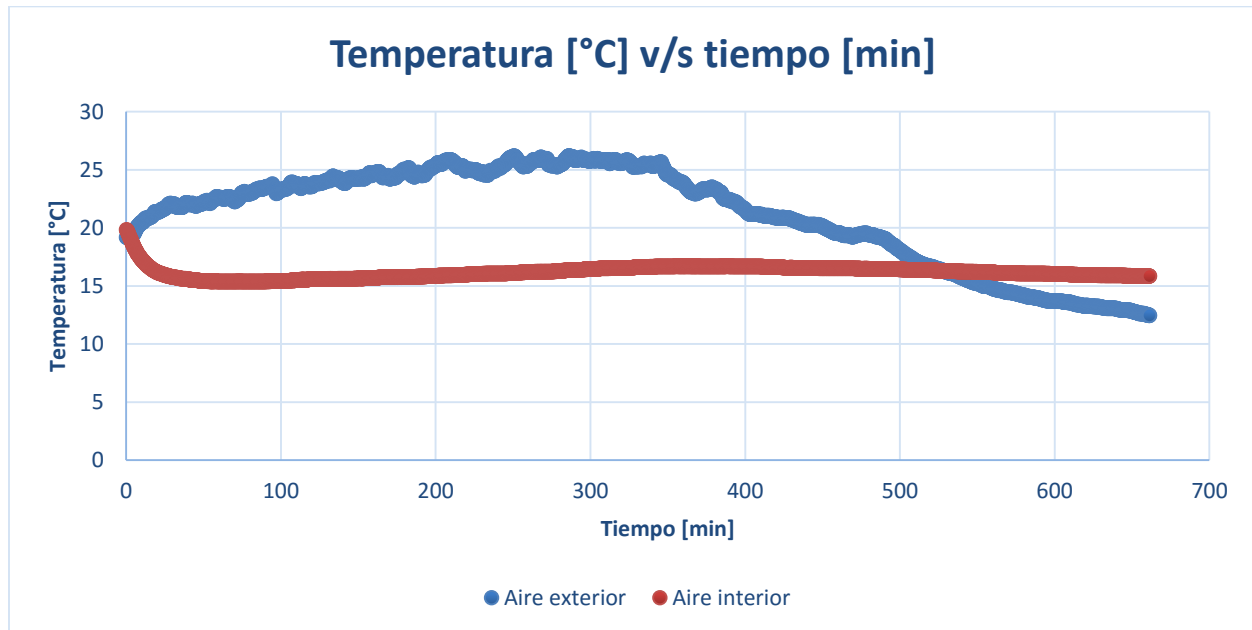


Figura 28. Medición 1. Representación temperatura v/s tiempo.

De acuerdo a la Figura 28 se puede desprender lo siguiente:

- La temperatura interior parte de un máximo, donde la temperatura debido al vapor del agua sigue latente, para luego tener un comportamiento homogéneo abordando un valor aproximado de 16°C.
- La temperatura exterior aumenta desde las 11:00 am hasta decaer desde las 17:00 pm.
- El hecho de que no se note una relación entre ambas curvas se debe a la capacidad de la caseta para funcionar como aislante del calor, considerando el poliuretano expandido que abriga la parte exterior de ésta.

Luego se debe calcular la humedad absoluta mediante la fórmula 1. Se sabe, por lo tanto, que ésta dependerá de la humedad relativa y presión del vapor saturado, el que a su vez depende de la temperatura del ambiente. Considerando que se está trabajando con cerca de 4 mil datos, se considerarán solo los 10 primeros valores con tal de apreciar visualmente el procedimiento de cálculo:

Temperatura [°C]	HR [%]	HA [$\frac{g}{m^3}$]
19,83	88,5	15,15
19,78	88,4	15,08
19,78	88,3	15,06
19,72	88,3	15,01
19,67	88,2	14,95
19,61	88,1	14,88
19,56	88,1	14,83
19,50	88	14,77
19,44	88	14,72
19,39	87,9	14,65

Tabla 18. Medición 1. Humedad absoluta aire interior.

Temperatura [°C]	HR [%]	HA [$\frac{g}{m^3}$]
19,17	53,5	8,80
19,17	53,4	8,79
19,17	53,2	8,75
19,17	53	8,72
19,17	52,7	8,67
19,17	52,9	8,71
19,17	53	8,72
19,11	52,7	8,64
19,11	52,5	8,61
19,11	52,5	8,61

Tabla 19. Medición 1. Humedad absoluta aire exterior.

Gráficamente, se puede observar una tendencia entre la humedad absoluta interior y la exterior, de acuerdo a la siguiente figura:

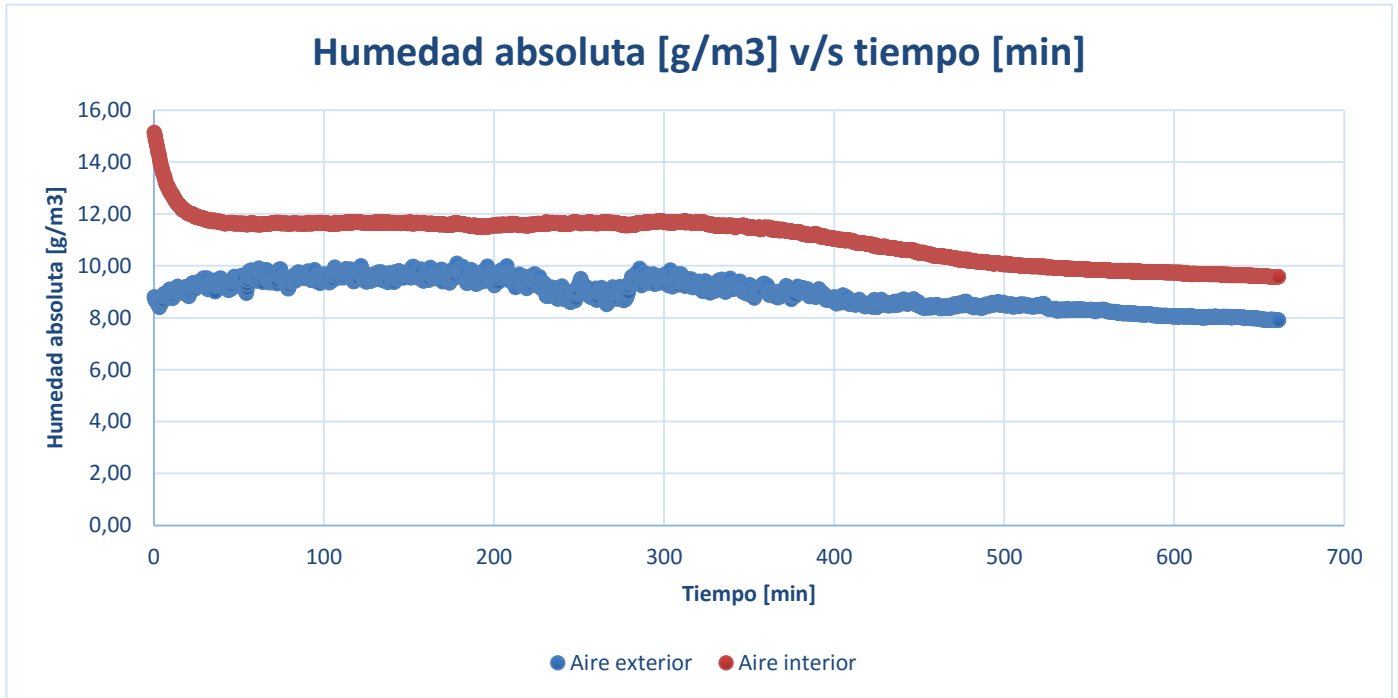


Figura 29. Medición 1. Humedad absoluta interior y exterior.

El siguiente paso es calcular derechamente la infiltración de aire asociada a esta medición, para lo que se ocupa la fórmula 4.

Utilizando la ecuación (4) se disponen a continuación distintos valores de la tasa de infiltración de aire para distintos pasos de tiempo:

<i>Tiempo [min]</i>	$Q^* [m^3/min]$	<i>Tiempo [min]</i>	$Q^* [m^3/min]$	<i>Tiempo [min]</i>	$Q^* [m^3/min]$
1,333	0,112	10,000	0,723	200,000	0,074
1,500	0,200	10,167	0,719	200,167	0,074
1,667	0,277	10,333	0,715	200,333	0,074
1,833	0,343	10,500	0,712	200,500	0,074
2,000	0,396	10,667	0,706	200,667	0,074
2,167	0,441	10,833	0,703	200,833	0,074
2,333	0,480	11,000	0,700	201,000	0,074
2,500	0,511	11,167	0,698	201,167	0,074
2,667	0,532	11,333	0,692	201,333	0,074
2,833	0,550	11,500	0,687	201,500	0,073
3,000	0,573	11,667	0,686	201,667	0,073
3,167	0,591	11,833	0,683	201,833	0,073
3,333	0,610	12,000	0,683	202,000	0,073
3,500	0,625	12,167	0,680	202,167	0,073
3,667	0,641	12,333	0,680	202,333	0,072
3,833	0,656	12,500	0,677	202,500	0,072
4,000	0,674	12,667	0,677	202,667	0,072
4,167	0,690	12,833	0,677	202,833	0,072
4,333	0,698	13,000	0,674	203,000	0,072
4,500	0,709	13,167	0,673	203,167	0,072
4,667	0,715	13,333	0,669	203,333	0,072
4,833	0,721	13,500	0,669	203,500	0,072
5,000	0,725	13,667	0,667	203,667	0,072
5,167	0,729	13,833	0,665	203,833	0,072
5,333	0,733	14,000	0,661	204,000	0,072
5,500	0,737	14,167	0,659	204,167	0,072
5,667	0,740	14,333	0,657	204,333	0,071
5,833	0,738	14,500	0,653	204,500	0,071
6,000	0,741	14,667	0,651	204,667	0,071
6,167	0,739	14,833	0,646	204,833	0,071

Tabla 20. Medición 1. Caudal de aire para los 30 primeros valores.

Luego se puede graficar la infiltración de aire en el tiempo:

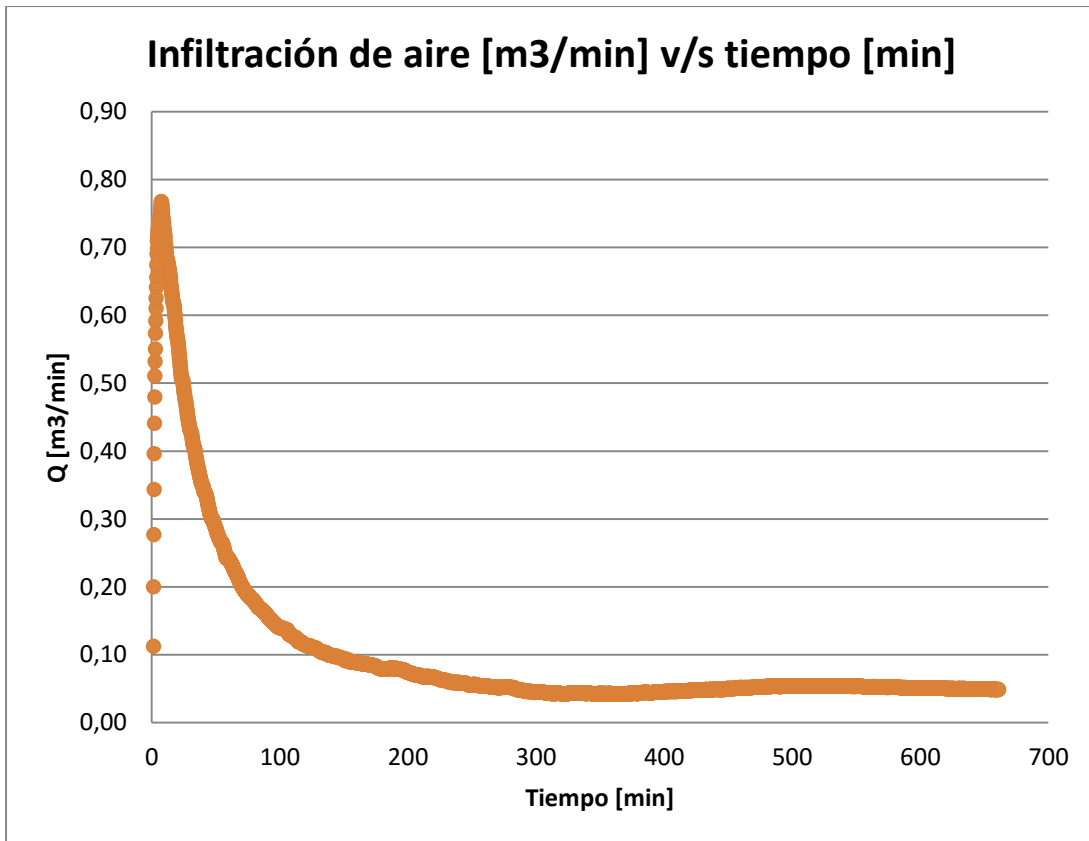


Figura 30. Medición 1. Infiltración de aire v/s tiempo.

De acuerdo a la Figura 30 se puede desprender lo siguiente:

- Al principio la infiltración de aire tiende a ser muy elevada, esto se debe a que en un inicio la alta cantidad de vapor hace que salga mucho aire por la alta presión de vapor que tiene el aire al inicio, la cual después va decayendo hasta estabilizarse.
- La curva experimenta un comportamiento relativamente constante aproximadamente luego del minuto 200 del comienzo del ensayo.
- La tasa de infiltración de aire se calculará como el promedio de los valores desde el minuto 200 en adelante.

Finalmente se obtiene:

Tasa de infiltración de aire [m^3/min]	Cambios de aire por hora [$1/h$]
0,051	0,173

Tabla 21. Medición 1. Tasa de infiltración de aire final calculada.

6.3.2 Medición 2

Resulta interesante saber lo que ocurría post medición 1, y cómo se comportan las diferencias higró-terómicas en el mediano plazo, puesto que como se ve en la Figura 29 la humedad absoluta interior y exterior no alcanzan a intersectarse.

Para esto se realizó una segunda medición, donde se evaporó la misma cantidad de agua, pero a diferencia de que se tomaron mediciones cada 1 minuto, resultando en un universo de datos cercano a 50 horas.

La gráfica de la humedad relativa que entregan los diferentes termo-higrómetros se presenta a continuación:

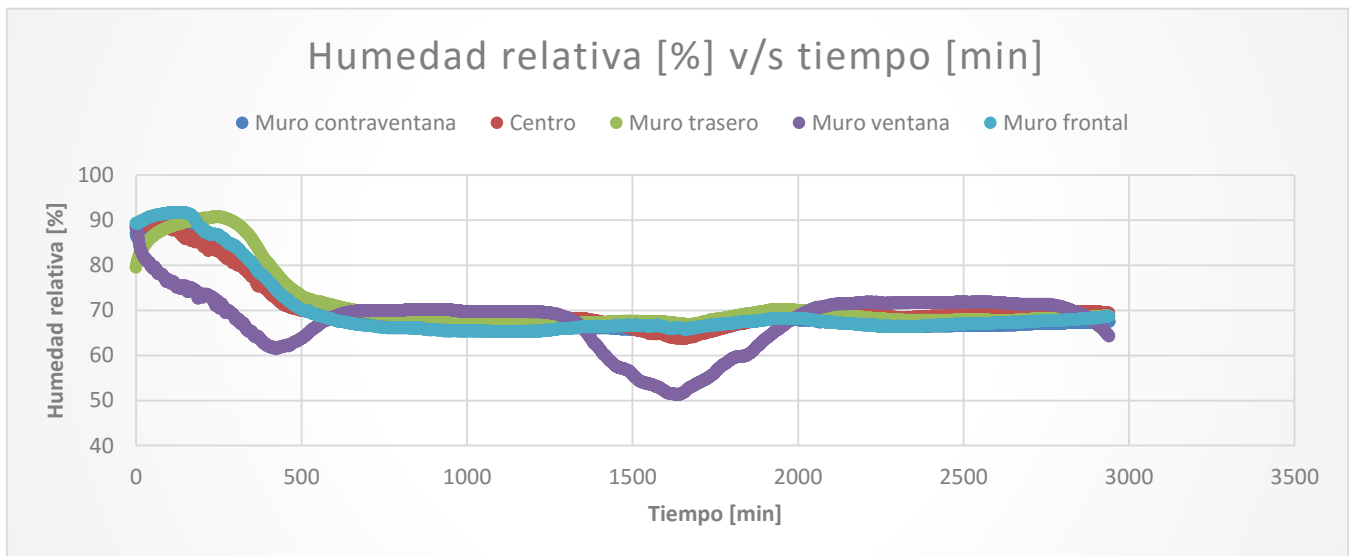


Figura 31. Medición 2. Resultados entregados por cada termo-higrómetro.

Se ve una vez más que el termo-higrómetro ubicado en la ventana tiende a desviarse del comportamiento de los demás, mientras que se considera representativo el termo-higrómetro ubicado en el centro.

Los gráficos de humedades relativas y temperaturas en el exterior e interior se ven a continuación:

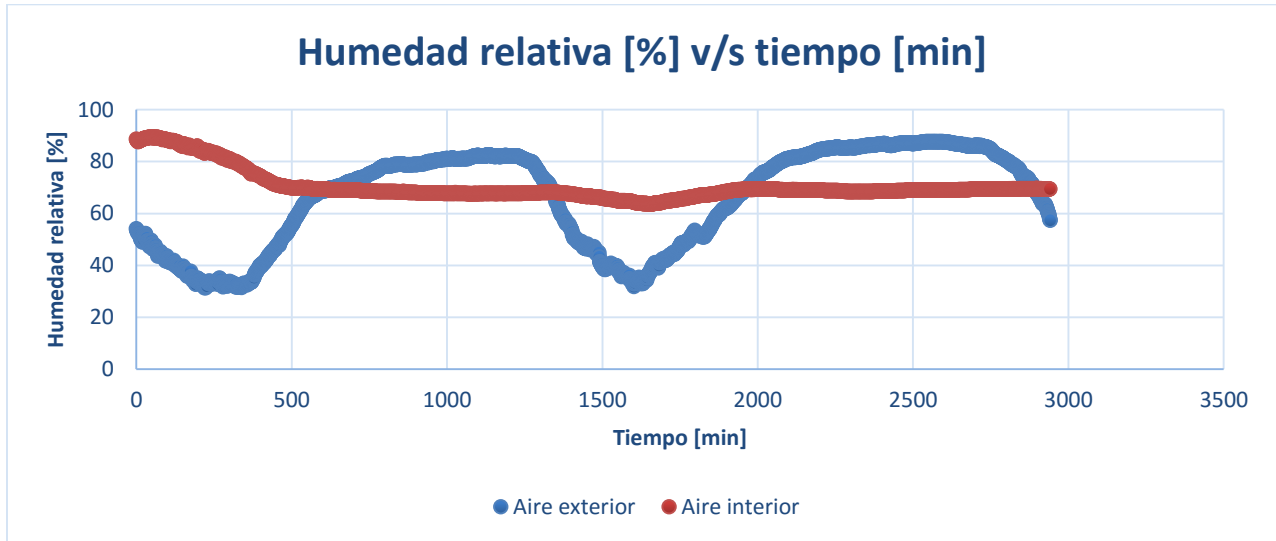


Figura 32. Medición 2. Representación humedad relativa v/s tiempo.

- Una vez que ambas humedades relativas se igualan, la humedad relativa del interior tiende a ser más homogénea, sin cambiar mayormente su comportamiento en relación a la otra.
- El hecho de que la humedad relativa exterior suba y baje como se ve en la gráfica se debe a que el experimento se prolongó por dos días y dos noches.

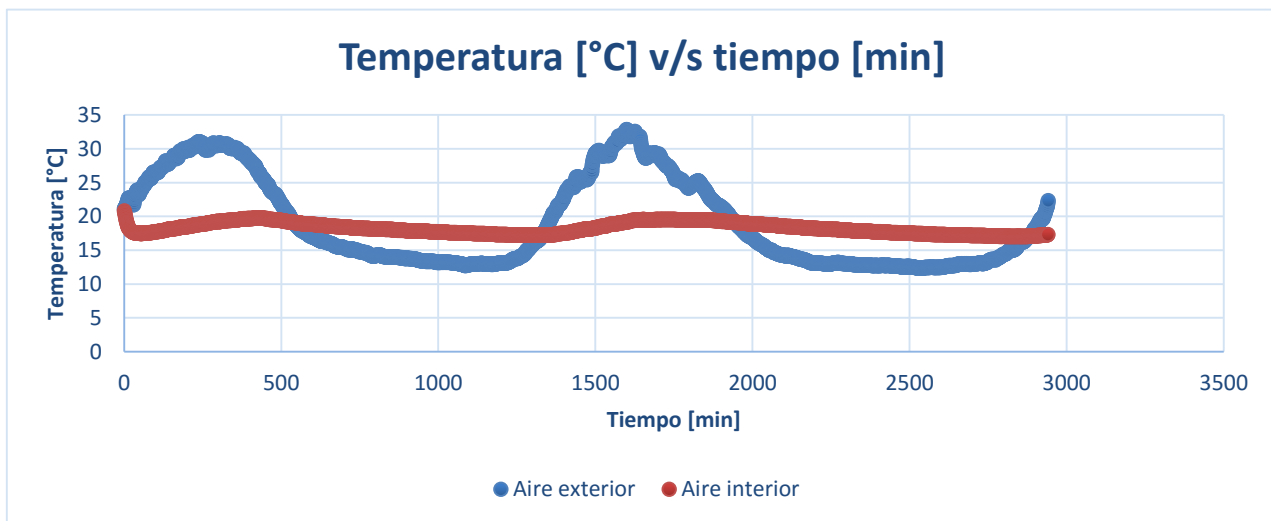


Figura 33. Medición 2. Representación temperatura v/s tiempo.

- Nuevamente la temperatura interior no se ve afectada mayormente por la del exterior dado el material que cubre la caseta por el exterior.

De la misma forma se calcula la humedad absoluta, y se indican los 10 primeros valores.

Temperatura [°C]	HR [%]	HA [$\frac{g}{m^3}$]
20,83	88,7	16,09
20,56	88,4	15,78
20,33	88,2	15,54
20,06	88,1	15,27
19,83	87,8	15,02
19,56	87,7	14,77
19,39	87,7	14,62
19,17	87,8	14,45
19,00	87,9	14,32
18,83	87,9	14,18

Tabla 22. Medición 2. Humedad absoluta aire interior.

Temperatura [°C]	HR [%]	HA [$\frac{g}{m^3}$]
21,11	54,1	9,97
21,22	53,5	9,93
21,22	53,5	9,93
21,33	53,2	9,93
21,33	52,5	9,80
21,50	53,3	10,05
21,67	52,9	10,07
21,78	52,5	10,06
21,94	52,8	10,21
22,06	51,8	10,08

Tabla 23. Medición 2. Humedad absoluta aire exterior.

Se puede observar gráficamente como se asocian las humedades absolutas interior y exterior de acuerdo a la siguiente figura:

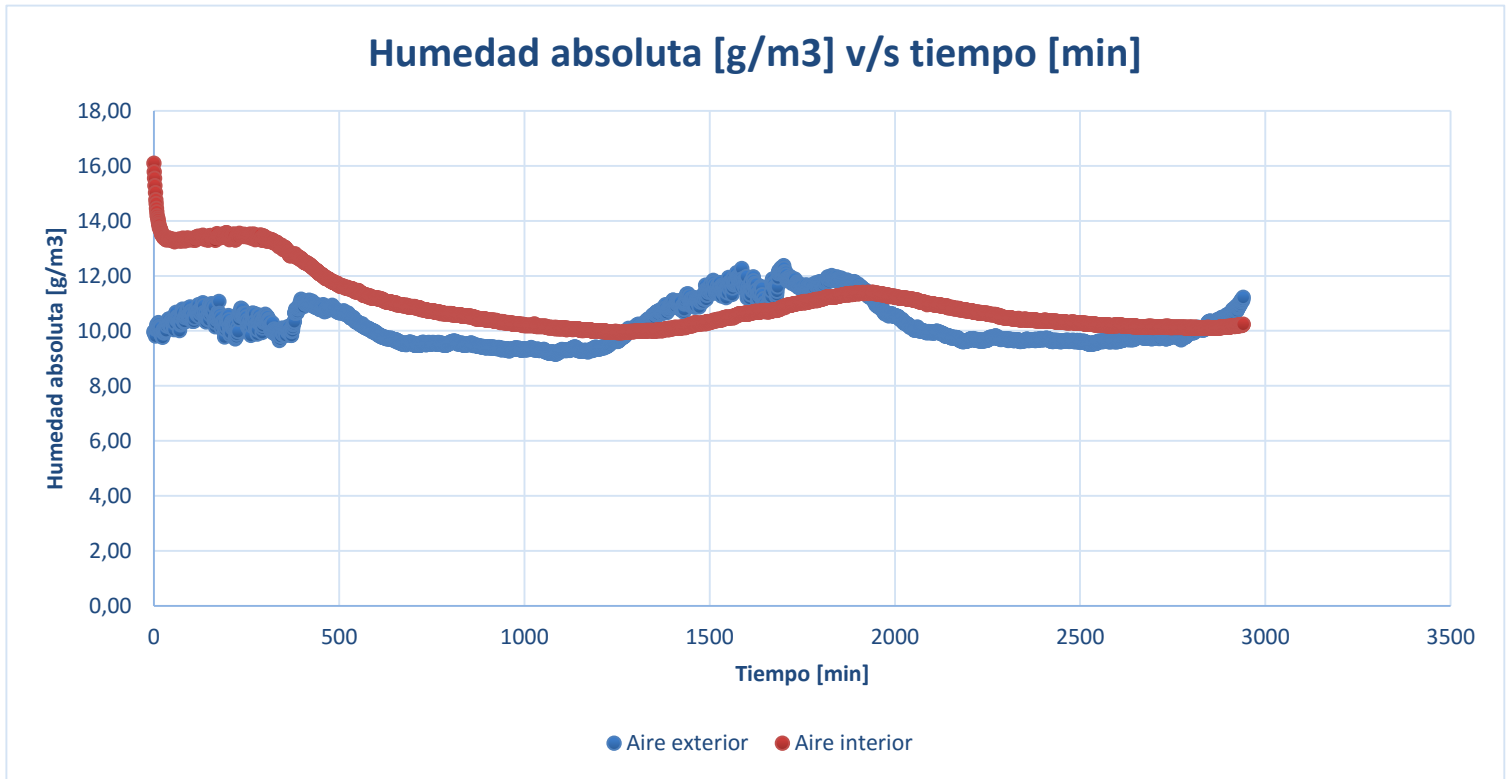


Figura 34. Medición 2. Humedad absoluta interior y exterior.

De acuerdo a la Figura 34 la humedad absoluta interior y exterior se intersectan en 3 puntos. Se ve además que siempre la humedad absoluta interior está tendiendo a la exterior.

Utilizando la ecuación (4) se disponen a continuación distintos valores de la tasa de infiltración de aire para distintos pasos de tiempo:

<i>Tiempo [min]</i>	$Q^* [m^3/min]$	<i>Tiempo [min]</i>	$Q^* [m^3/min]$	<i>Tiempo [min]</i>	$Q^* [m^3/min]$
7	0,106	250	0,028	2000	0,050
8	0,181	251	0,028	2001	0,050
9	0,235	252	0,028	2002	0,050
10	0,271	253	0,028	2003	0,050
11	0,296	254	0,028	2004	0,050
12	0,310	255	0,028	2005	0,050
13	0,319	256	0,028	2006	0,050
14	0,325	257	0,027	2007	0,050
15	0,327	258	0,027	2008	0,050
16	0,324	259	0,027	2009	0,050
17	0,320	260	0,027	2010	0,050
18	0,316	261	0,027	2011	0,050
19	0,312	262	0,027	2012	0,050
20	0,307	263	0,027	2013	0,050
21	0,302	264	0,027	2014	0,050
22	0,295	265	0,027	2015	0,050
23	0,289	266	0,027	2016	0,050
24	0,284	267	0,027	2017	0,050
25	0,278	268	0,027	2018	0,050
26	0,272	269	0,026	2019	0,050
27	0,267	270	0,027	2020	0,050
28	0,260	271	0,027	2021	0,050
29	0,254	272	0,026	2022	0,050
30	0,248	273	0,026	2023	0,050
31	0,242	274	0,026	2024	0,050
32	0,237	275	0,026	2025	0,050
33	0,232	276	0,026	2026	0,050
34	0,226	277	0,027	2027	0,050
35	0,221	278	0,027	2028	0,050
36	0,216	279	0,027	2029	0,050

Tabla 24. Medición 2. Caudal de aire para distintos pasos en el tiempo.

Luego graficando la infiltración de aire en el tiempo se obtiene:

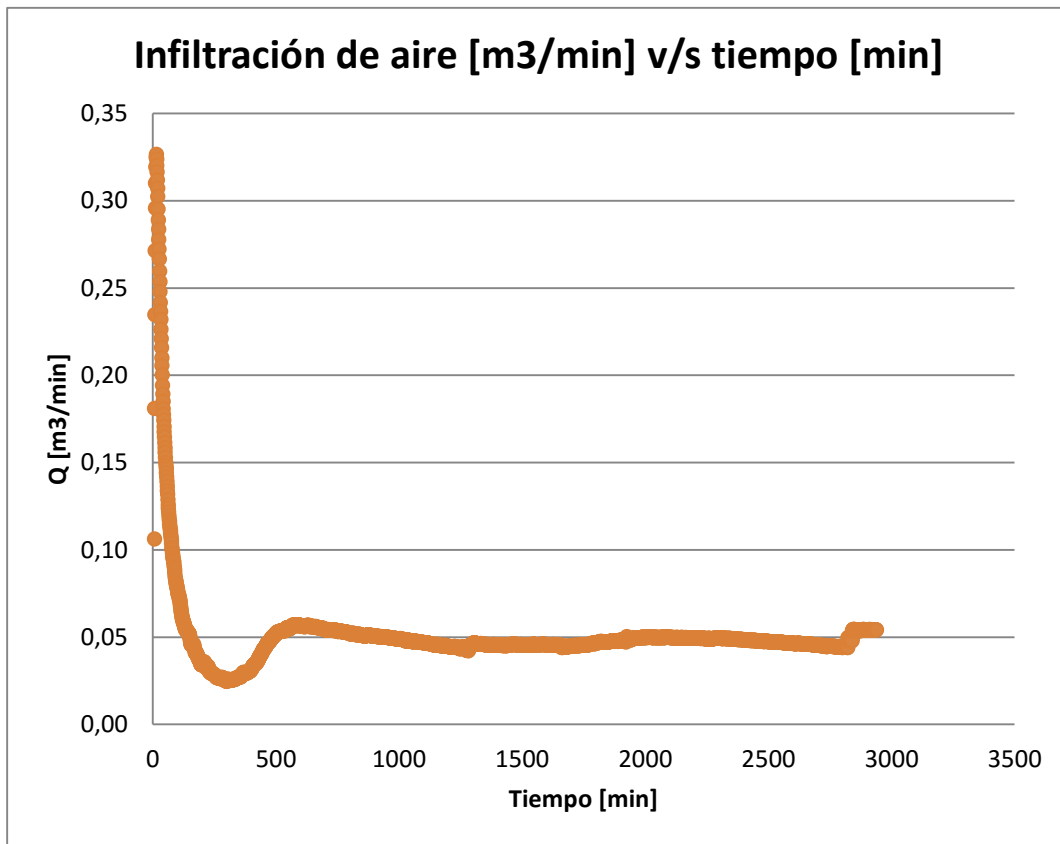


Figura 35. Medición 2. Infiltración de aire v/s tiempo.

De acuerdo a la Figura 35 se puede desprender lo siguiente:

- La curva experimenta un comportamiento variable, parte de una gran infiltración, luego llega a un mínimo y sube nuevamente. Esta tendencia no tiene mucho sentido teóricamente, luego este comportamiento se podría atribuir al viento que afectó el intercambio de aire exterior e interior.
- La curva se vuelve relativamente estable luego del minuto 1000.
- La infiltración de aire se calculará como el promedio de los datos desde el minuto 1000 en adelante.

Finalmente se obtiene:

Tasa de infiltración de aire [m^3/min]	Cambios de aire por hora [$1/h$]
0,047	0,161

Tabla 25. Medición 2. Tasa de infiltración de aire final calculada.

Finalmente se pueden resumir los resultados en la siguiente tabla:

Parámetro	Medición 1	Medición 2
<i>Infiltración de aire</i> $\left[\frac{m^3}{min}\right]$	0,051	0,047
<i>ach</i> $\left[\frac{1}{h}\right]$	0,173	0,161

Tabla 26. Filtraciones de aire obtenidas, método vapor de agua.

6.4 Resultados obtenidos, método vapor de agua, metodología 2

6.4.1 Medición 1

Aplicando la fórmula (6) en los datos de humedad absoluta interior de la medición 1 se obtiene que la pendiente máxima de la humedad absoluta interior de la curva de la Figura 29 se consigue a los 3,83 minutos, entregando un valor de $13,97 \frac{g}{m^3}$ de humedad absoluta interior, donde la inicial es de $15,15 \frac{g}{m^3}$:

$$\Delta t = t_f - t_i = 3,83 \text{ min} - 0 = 3,83 \text{ min} = 0,0638 \text{ hrs}$$

$$HA_{out}^0 = 15,15 \frac{g}{m^3}$$

$$HA_{out}^{\Delta t} = 13,97 \frac{g}{m^3}$$

Luego aplicando el promedio a los valores de humedad absoluta exterior para el rango de Δt se obtiene:

$$HA_{in} = 8,61 \frac{g}{m^3}$$

Finalmente, aplicando la fórmula (5) para el cálculo de los cambios de aire por hora (ACH) resulta:

$$ACH = - \left[\ln(8,61 - 13,97) - \ln(8,61 - 15,15) \right] / 0,0638$$

$$\rightarrow ACH = 3,118 \frac{1}{hr}$$

6.4.2 Medición 2

De la misma forma, usando la fórmula (6) en los datos de humedad absoluta interior de la medición 2 se obtiene que la pendiente máxima de la humedad absoluta interior de la curva de la Figura 34 se consigue al primer minuto, entregando un valor de $15,78 \frac{g}{m^3}$ de humedad absoluta interior, donde la inicial es de $16,09 \frac{g}{m^3}$:

$$\Delta t = t_f - t_i = 1 \text{ min} - 0 = 1 \text{ min} = 0,0167 \text{ hrs}$$

$$HA_{out}^0 = 16,09 \frac{g}{m^3}$$

$$HA_{out}^{\Delta t} = 15,78 \frac{g}{m^3}$$

Luego aplicando el promedio a los valores de humedad absoluta exterior para el rango de Δt se obtiene:

$$HA_{in} = 9,95 \frac{g}{m^3}$$

Finalmente, aplicando la fórmula (5) para el cálculo de los cambios de aire por hora (ACH) resulta:

$$ACH = - \left[\ln(9,95 - 15,78) - \ln(9,95 - 16,09) \right] / 0,0167$$

$$\rightarrow ACH = 3,102 \frac{1}{hr}$$

6.5 Comparación metodologías

Resumiendo, se puede confeccionar la siguiente tabla:

Parámetro	Blower door	Medición 1, metodología 1	Medición 2, metodología 1	Medición 1, metodología 2	Medición 2, metodología 2	Anemómetro
<i>Infiltración de aire</i> $\left[\frac{m^3}{min}\right]$	0,94	0,051	0,048	0,914	0,909	0,32
<i>ach</i> $\left[\frac{1}{h}\right]$	3,21	0,173	0,165	3,118	3,102	1,09
<i>Desviación blower door</i> [%]	-	94,61	94,88	2,866	3,364	65,96

Tabla 27. Resumen resultados y comparación con método de blower door test.

Por otro lado, utilizando la regla ACH50/20 se llega a:

Parámetro	Blower door	Medición 1, metodología 1	Medición 2, metodología 1	Medición 1, metodología 2	Medición 2, metodología 2	Anemómetro
<i>Infiltración de aire</i> $\left[\frac{m^3}{min}\right]$	0,333	0,051	0,048	0,914	0,909	0,32
<i>ach</i> $\left[\frac{1}{h}\right]$	1,138	0,173	0,165	3,118	3,102	1,09
<i>Desviación blower door</i> [%]	-	84,80	85,50	173,99	172,58	4,22

Tabla 28. Comparación resultados con la regla ACH50/20.

Nota: El porcentaje de error se calcula como:

$$\%E = \left| \frac{\text{valor teórico} - \text{valor experimental}}{\text{valor teórico}} \right| \cdot 100$$

Se tomó como valor teórico el que entrega el método blower door.

6.6 Análisis de resultados

De acuerdo a la Tabla 27 vemos que la desviación propuesta del 10% no se alcanza utilizando la primera metodología, entregando un importante error aproximado del 95% según ambas mediciones, mientras que en la segunda metodología, se obtuvo un error aproximado del 3,1% entre ambas mediciones, estando este resultado dentro del rango propuesto. Por otro lado el anemómetro entrega un importante error del 66%, donde tampoco se alcanza el error esperado.

Metodología 1: Esta metodología entregó un elevado error del 95%. Dentro de los resultados que entregaron ambas mediciones, éstos presentan valores similares entre sí, a pesar de que curvas de infiltración de aire de acuerdo a las Figuras 30 y 35 tienen tendencias distintas. Junto a esto se descarta esta metodología para ser ocupada en la práctica pues los resultados obtenidos no guardan relación con la tasa de infiltración propia de la envolvente. Resulta sensato atribuir al fenómeno del viento como causa de cada uno de estos defectos.

Metodología 2: Bajo esta metodología se obtuvo un error aceptable del 3,1%. Resulta interesante el hecho de que se obtuvo un resultado similar entre ambas mediciones, esto implica que no fue casualidad que el resultado coincidiera con el del método del ventilador. La realización de este procedimiento requiere solo un reducido lapso de tiempo para su ejecución, esto pues solo es necesario analizar el transiente inicial de la curva de humedad absoluta donde son aplicables los conceptos de balance de masa.

Anemómetro: Para una mejor obtención de resultados es necesario que las condiciones atmosféricas sean ideales (velocidad nula del aire en el exterior), considerando que el viento influye directamente en la toma de resultados. Esto se puede ver claramente en los resultados del anemómetro de la Figura 23, en donde hay varias alzas en la distribución de los puntos en el gráfico.

Además de esto resultaría útil tener un anemómetro más sensible, donde entregara flujos de aire para pequeñas perturbaciones (inferiores a 0,3 m/s). Este instrumento solo se utilizó para comprobar los resultados de los otros dos métodos, pero dadas las condiciones en las que fue realizada la experiencia no se pudieron obtener resultados que guardaran relación con la infiltración de aire propia de la envolvente.

Utilizando la regla de dividir por 20 el resultado que entrega el método del blower door a 50Pa en cambios de aire por hora se obtuvo un valor bastante desviado de las demás mediciones, excepto del anemómetro de acuerdo a la Tabla 28. La discrepancia puede radicar en que este resultado entrega las renovaciones de aire promedio anuales, y en el presente ensayo se utilizó la diferencia de presión natural que implica que se están calculando las infiltraciones en el instante en que se realiza la medición y no como un indicador a largo plazo. Recordar que esta regla es una aproximación y a veces puede expresar resultados muy distintos a los correctos pues ignora detalles del proceso de infiltración:

- Viento: la correlación ACH50/20 no tiene en cuenta la repercusión del viento en la ubicación del inmueble.
- Tipos de fallas: El comportamiento de fuga de un agujero en la envolvente de un edificio varía con la forma del orificio. Una grieta larga y delgada, por ejemplo, responde menos a las variaciones en la presión de aire que uno redondo.
- Efecto chimenea: El aumento de aire caliente induce una diferencia de presión que causa exfiltración por el cielo del inmueble e infiltración de aire por el suelo. El efecto chimenea depende tanto de la temperatura exterior como de la altura del edificio. Considerando dos edificios idénticos, el que esté situado en un clima más frío tendrá más infiltración de aire inducida por el efecto chimenea.

Además del viento, existen otros factores que pudieron haber afectado los resultados de las metodologías propuestas. Estos factores provienen de las recomendaciones que debería tener un gas para considerarse como gas trazador ideal, donde el vapor de agua no cumple lo siguiente:

- Singularidad: El gas no debiese ser un constituyente normal del aire y debiese ser perfectamente diferenciable de los demás constituyentes
- Condensación: El gas debe ser difícil de condensar.

Se sabe que el vapor de agua siempre forma parte, en alguna medida, del aire. Por lo tanto no se respeta esta indicación.

Por otro lado el vapor de agua se condensa muy fácilmente en las superficies que tienen temperatura igual o inferior a la temperatura de rocío. El ensayo se hizo considerando la hipótesis que las pérdidas de vapor de agua por condensación eran despreciables con respecto a la pérdida que ocurría por entrada o salida de flujo de aire. Si esta hipótesis no es correcta, la condensación podría ser un factor importante, afectando en gran medida a los resultados obtenidos.

Además de la condensación, pudo haber influido en alguna medida la absorción de humedad, es decir las características higroscópicas de los materiales producto de imperfecciones en la instalación del papel polietileno, por lo cual se podría haber complementado con pintura para reforzar la resistencia al paso de vapor de agua.

Otro factor a tener en cuenta es la densidad del aire la que puede ser variable en presencia de fuerte viento. En la metodología de cálculo, al hacer el balance de masa, se consideró como supuesto que la densidad del aire era constante, lo cual puede no ser cierto en la práctica.

6.7 Conclusiones

El método implementado para el cálculo de infiltraciones de aire utiliza la variación de la humedad absoluta en un local, donde se comprobó su factibilidad al obtener un bajo error del 3,1% con respecto al método de presurización del ventilador. Éste utiliza el análisis continuo del balance de masa de las concentraciones de vapor de agua que entran y salen de un recinto, llegando finalmente a las relaciones:

$$HA = \frac{13,25304}{(273,15+T)} \cdot 10^{\frac{7,591386 \cdot T}{T+240,7263}} \cdot HR$$
$$ACH = - \left[\frac{\ln(HA_{in} - HA_{out}(\Delta t)) - \ln(HA_{in} - HA_{out}(0))}{\Delta t} \right]$$

Luego de analizar la metodología que usa el método del ventilador se pueden desprender las siguientes limitaciones que complican o acotan su uso:

- La metodología debe ser realizada con las condiciones ambientales óptimas posibles. Luego los factores ambientales que condicionan la veracidad de los resultados obtenidos son: El viento, la temperatura, lluvia/nieve y carga solar.
- Para controlar el correcto funcionamiento del experimento se debe ir monitorizando presencialmente. Luego por temas de espacio, se afecta el acceso al recinto y el diseño arquitectónico del sector.
- En particular en Chile hay una escasez de equipamientos necesarios para realizar el ensayo, además del reducido número de empresas que imparten el experimento.
- Ocupa un software especial para calcular directamente las filtraciones de aire, el cual requiere capital para adquirirlo y para obtener los permisos necesarios para su uso.

Por lo anterior se ideó una nueva metodología para el cálculo de infiltraciones de aire que utiliza el vapor de agua como indicador a través de la variación de la concentración de humedad absoluta. Ésta es una derivación del método del gas trazador, donde se utiliza el mismo principio.

Luego de comparar la metodología del método del ventilador y la del vapor de agua se puede concluir que es factible ocupar la variación de humedad absoluta como indicador de infiltraciones de aire, obteniendo un error de desviación de aproximadamente 3,1%. Pero para esto es necesario considerar algunas indicaciones:

- Considerando la dificultad que conlleva homogeneizar el vapor de agua en la totalidad de la envolvente que se quiere evaluar, resulta aconsejable realizar la experiencia solo en recintos de reducidas dimensiones para evitar el uso de ventiladores que permitan establecer la misma humedad relativa en cada punto del interior.

- A diferencia del montaje experimental que se expone en este documento, en la práctica no es necesario obligar que las infiltraciones de aire se produzcan a través de un solo orificio puesto que esto se realizó para comprobar los resultados con el anemómetro. Por lo tanto el montaje experimental consistiría en impermeabilizar las paredes interiores con papel polietileno para evitar la absorción de humedad por parte de los materiales constituyentes, dada la condición hidrofóbica del plástico, y respetar las exigencias de transmitancia térmica máxima del art. 4.1.10 de la O.G.U.C.
- Por otro lado se debería profundizar el cálculo para determinar la influencia de las características higroscópicas de los materiales. Para verificarlo se podrían realizar estudios posteriores que acrediten si utilizar o no el papel polietileno a través de la realización de ensayos comparativos, para distintos tipos de elementos que conformen la envolvente. Si es que ambos procedimientos entregan un error bajo entre ellos, sea un 5% (como indicador útil), para algún tipo de material constituyente (por ejemplo hormigón), se considerará factible no considerar el papel polietileno para ese tipo de material.
- Las condiciones atmosféricas exteriores debieran ser lo más invariables posible, es decir, que la variación de humedad y temperatura no sea muy inestable a lo largo de la realización del ensayo y que éstas se mantengan homogéneas en cada cara externa de la envolvente. Idealmente que la velocidad del viento durante el ensayo sea nula o cercana a cero.

Para darle utilidad y validación al método del vapor de agua en Chile en cuanto al cálculo de infiltraciones de aire, debieran hacerse estudios que propongan infiltraciones de aire máximas a condiciones experimentales (difusión del vapor de agua, velocidad del viento nulo) en las distintas zonas climáticas que hay a lo largo del país.

Por otro lado el método de vapor de agua (como gas trazador válido) podría utilizarse para estudios de eficacia de ventilación. Mediante la variación de su concentración se podría calcular la tasa de renovación de aire al haber un funcionamiento de ventilación que siga un protocolo de diseño. Así se podría comparar la tasa de infiltración de diseño de un sistema de ventilación, con el que trabaja en la práctica, luego derivar en mantenimientos para ahorro de energía destinada a la calefacción o refrigeración.

El estudio completo de ventilación e infiltraciones de aire tiene como finalidad garantizar el confort de las personas, junto a minimizar gastos en energía utilizada a regular la temperatura de un recinto (para fomentar el desarrollo económico), proporcionar un medio ambiente sano y libre de contaminación para la sociedad, para abordar así, una fracción de lo que se conoce como sustentabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sherman, M. H. (1990). Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 25(4), 365-374.
- [2] Huizenga, C., Abbaszadeh, S., Zagreus, L., & Arens, E. A. (2006). Air quality and thermal comfort in office buildings: results of a large indoor environmental quality survey. *Center for the Built Environment*.
- [3] Fariborz Haghighat, *Thermal Comfort in Housing and Thermal Enviornments Sustainable Built Environment*. Vol. 1.
- [4] Wyer, S. S. (1907). *A Treatise on Producer-gas and Gas Producers*. Hill Publishing Company.
- [5] Instruments, I. A. Thermal Comfort, 2003. *INNOVA AirTech Instruments*.
- [6] Hunt, G. R., & Linden, P. P. (1999). The fluid mechanics of natural ventilation—displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind. *Building and Environment*, 34(6), 707-720.
- [7] Bobadilla, A., Arriagada, R., Figueroa, R., Muños, C., Espinoza, R., Díaz, M., ... & Fookes, J. (2014). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*
- [8] Santamouris, M., & Wouters, P. (Eds.). (2006). *Building ventilation: the state of the art*. Routledge.
- [9] DICTUC – IICOS. Seminario de Viviendas Sustentables.
- [10] Ossio, F., De Herde, A., & Veas, L. (2012). Exigencias europeas para infiltraciones de aire: Lecciones para Chile. *Revista de la Construcción*, 11(1), 54-63.
- [11] <https://classnet.wcdsb.ca/ele/stal/gr8/Elaine-Ward-Wilson/Class%20Documents/SCIENCE%20WEEK%205/10.3.pdf>

- [12] Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2001). *The properties of gases and liquids* (Vol. 5). New York: McGraw-Hill.
- [13] Norma internacional ASTM E779-03
- [14] Rodriguez, G. (2014). Física de la Construcción. Apuntes.
- [15] Vaisala, O. (2010). Humidity conversion formulas.
- [16] <http://www.michell.com/uk/calculator/>
- [17] Meruane, C., & Garreaud, R. (2006). Determinación de Humedad en la Atmósfera. *Santiago: Universidad de Chile*.
- [18] Patel, T., Mitsingas, C., Miller, J. P., & Newell, T. A. (2011, January). Comparison of Blower Door and Tracer Gas Testing Methods for Determination of Air Infiltration Rates Through Building Envelopes at Normal Operating Conditions. In *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability* (pp. 1013-1019). American Society of Mechanical Engineers.
- [19] Kronvall, J. (1980). CORRELATING PRESSURIZATION AND INFILTRATION RATE DATA-TESTS OF AN HEURISTIC MODEL.
- [20] Sherman, M. H. (1987). Estimation of infiltration from leakage and climate indicators. *Energy and Buildings*, 10(1), 81-86.
- [21] Castillo, M. C. C., & Jordán, M. A. (1999). *Meteorología y clima* (Vol. 79). Univ. Politèc. de Catalunya.
- [22] Awbi, H. B. (2003). *Ventilation of buildings*. Taylor & Francis.

- [23] <http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2011/04/Anemometer.pdf>
- [24] Vega, J. P. CALOR Y TEMPERATURA.
- [25] http://faculty.ksu.edu.sa/52876/Documents/BCH_201_5_Water.pdf
- [26] Van Wylen, G. J. S., Van Wylen, R. E., & Sonntag, R. E. (1967). *Fundamentos de termodinámica* (No. 536.7 VAN).
- [27] Harper, C. A., & Petrie, E. M. (2003). *Plastics materials and processes: a concise encyclopedia*. John Wiley & Sons.
- [28] McKeen, L. W. (2011). *Permeability properties of plastics and elastomers*. William Andrew.
- [29] Krarti, M. (2012). *Weatherization and energy efficiency improvement for existing homes: an engineering approach*. CRC Press.
- [30] <http://www.tutiempo.net/meteorologia/sensacion-termica.html>
- [31] Zeman, S., & Kubík, L. (2007). Permeability of polymeric packaging materials. *Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn*, 26-34.
- [32] Preciado, J. M. S., Yanci, M. P. G., Uribeondo, M. P. B., & Arilla, M. J. A. (1994). *GEOGRAFÍA GENERAL I (GEOGRAFÍA FÍSICA)*.
- [33] Bustamante, W., Rozas, Y., CEPEDA, R., ENCINAS, F., & MARTINEZ, P. (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. *Santiago, Ministerio de Vivienda y Urbanismo división Técnica de Estudio y Fomento Habitacional y Programa País de Eficiencia Energética (CNE)*.
- [34] http://www.tayabeixo.org/sist_solar/tierra/mov_atmosfera.htm

- [35] Instituto Nacional de Normalización de Chile (INN). NCh1079 Of.2008.
Arquitectura y Construcción – Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.
- [36] Instituto Nacional de Normalización de Chile (INN). NCh853 Of.2007.
Acondicionamiento térmico – Envoltente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas.
- [37] Instituto Nacional de Normalización de Chile (INN). NCh3295 Of.2013.
Construcción – Determinación de la tasa de fuga mediante el método de presurización del ventilador.
- [38] Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C.) Art. 4.1.10.
(2006). Reglamentación Térmica. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.