



umsnh

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
FACULTAD DE ARQUITECTURA**

**TESIS
“EFECTO DE LA INERCIA TERMICA EN UN DISPOSITIVO DE
VENTILACION POR EXTRACCION PASIVA”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN ARQUITECTURA PRESENTA**

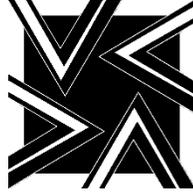
MAESTRO EN ARQUITECTURA MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO

**DIRECTOR DE TESIS:
DOCTOR EN ARQUITECTURA HÉCTOR JAVIER GONZÁLEZ LICÓN**

**CO-DIRECTORES DE TESIS:
DOCTOR EN ARQUITECTURA ARMANDO ALCANTARA LOMELÍ**

DOCTOR EN INGENIERIA ANÍBAL LUNA LEÓN

**MORELIA, MICHOACAN.
FEBRERO DE 2016**



**PROGRAMA INTERINSTITUCIONAL DE DOCTORADO
EN ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
UNIVERSIDAD DE COLIMA**

**“EFECTO DE LA INERCIA TERMICA EN UN DISPOSITIVO DE
VENTILACION POR EXTRACCION PASIVA”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN ARQUITECTURA PRESENTA
M. ARQ. MARCOS EDUARDO GONZÁLEZ TREVIZO**

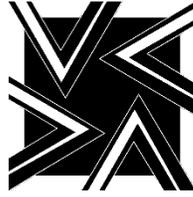
**DIRECTOR DE TESIS
DR. ARQ. HÉCTOR JAVIER GONZÁLEZ LICÓN**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. ARQ. ARMANDO ALCANTARA LOMELÍ**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. ING. ANIBAL LUNA LEÓN**

LINEA DE INVESTIGACIÓN: ARQUITECTURA Y MEDIO AMBIENTE

**MORELIA, MICHOACAN.
FEBRERO DE 2016**



**PROGRAMA INTERINSTITUCIONAL DE DOCTORADO
EN ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
UNIVERSIDAD DE COLIMA**

**TESIS
“EFECTO DE LA INERCIA TERMICA EN UN DISPOSITIVO DE
VENTILACION POR EXTRACCION PASIVA”**

MIEMBROS DEL SÍNODO:

**DR. ARQ. HÉCTOR JAVIER GONZÁLEZ LICÓN
DIRECTOR**

**DR. ARQ. ARMANDO ALCANTARA LOMELÍ
CO-DIRECTOR**

**DR. ING. ANIBAL LUNA LEON
CO-DIRECTOR**

**DR. ARQ. LUIS ALBERTO TORRES GARIBAY
SINODAL**

**DR. ARQ. ADOLFO GÓMEZ AMADOR
SINODAL**

**MORELIA, MICHOACAN.
FEBRERO DE 2016**

PROGRAMA INTERINSTITUCIONAL DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA



Morelia, Michoacán, a 26 de febrero de 2016

Consejo Académico
Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura
Presente

Por este medio hago de su conocimiento que la tesis denominada: *Efecto de la Inercia Térmica en un Dispositivo de Ventilación por Extracción Pasiva*, realizada por M. Arq. Marcos Eduardo González Trevizo bajo mi tutoría, ha sido concluida, en virtud de que se efectuaron las correcciones que le fueron señaladas al doctorante en la última versión. Por lo anterior, no se tiene inconveniente alguno para que el tesista realice las gestiones pertinentes para poder defender su examen de grado.

ATENTAMENTE

Dr. Héctor Javier González Licón

C. c. p. Dr. Adolfo Gómez Amador Secretario Técnico del consejo Académico del PIDA.
C. c. p. Doctorante

Universidad Autónoma de Aguascalientes
Universidad de Colima
Universidad de Guanajuato
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



En modesta contribución a la lucha de mis padres por brindarme una vida mejor.

....a Gaby[†], en tu memoria, A NOSOTROS.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por impulsar y fortalecer la investigación científica y con ello servir de plataforma para el desarrollo de México. El presente documento es producto del apoyo económico otorgado en favorecimiento de la formación del capital humano.

Agradecimiento especial al Dr. Arq. Héctor Javier González Licón por la confianza, sus sobradas demostraciones de apoyo, su enorme paciencia y calidad humana, por otorgarme su apoyo incondicionalmente, fue crucial en momentos significativos de carácter personal y académico. Al comité tutorial que por medio del Dr. Arq. Armando Alcántara de la Universidad de Colima ofreció apertura y sencillez; al Dr. Ing. Aníbal Luna que en la Universidad Autónoma de Baja California me brindó el trato que se le brinda a un amigo, compartiendo codo a codo cada jornada de aprendizaje durante mis estancias académicas, gracias por valorar mi trabajo.

No menos importante, el apoyo otorgado por la dirección académica y administrativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo con sus infinitas consideraciones y amable trato a través de la Dra. Catherine Ettinger, Dra. Eugenia Azevedo, Dra. Claudia Rodríguez y Sra. Ana. María Chávez.

A quienes me alentaron en días de profundo agotamiento, es imposible corresponder en magnitud a toda la generosidad que me obsequiaron en esos momentos tan difíciles. Me llevo entrañables recuerdos, alegría en el corazón y sobre todo de un ejemplo único de fraternidad y humanismo: familias Avalos Muciño y Gómez Barajas, Presbítero Onofre Larios y Adriana Merino, mi hermana.

A Francisco y Gonzalo por su incondicional hospitalidad y nobleza, a Armando y Marisol por las alegrías...“porque no hay mañana”, a mis amigos en la distancia: Arturo, Omar, Zendel, Jeffrey, Alberto, Felipe y en especial a Silvia, gracias por la palabra de alivio, demostración de afecto e inagotable paciencia. Eres un ser humano excepcional.

A mis compañeros de andanzas: Karen, Cecilia, Carlos y Peter gracias por las edificantes experiencias que compartieron conmigo a lo largo de todo este tiempo, mis deseos de éxito para todos. A mis padres y hermanos por ser mi gran motivo de inspiración durante estos años lejos de casa, todo logro es para y con ustedes....

RESUMEN

El presente estudio analiza a escala de objeto y bajo un enfoque cuantitativo el papel de la inercia térmica en los captadores eólicos conocidos comúnmente como *Bâdgir*, *Baud-geer* o *Malqaf*; elementos arquetípicos de ventilación pasiva en la arquitectura persa y árabe respectivamente. Para ello, se establece inductivamente una tesis que correlaciona las propiedades termofísicas del canal de ventilación del captador y su eficiencia operativa. Lo anterior, a través del uso de la simulación energética y la dinámica computacional de fluidos integrada en el software Design Builder®.

En las etapas iniciales del estudio se recurrió al uso de información climática producto de la interpolación de valores de la base de datos de GEBA¹, con el software Meteonorm®. Lo que permitió modelar un año meteorológico típico² tanto para definir temporadas climáticas a partir del modelo de confort de ASHRAE: 55 y establecer un día típico mensual, así como para analizar el recurso solar y régimen de viento local; variables climáticas de mayor impacto en la inercia térmica.

La metodología de la investigación integra escenarios de simulación basados en la conjugación de 3 variables presentes en el canal de ventilación de un mismo diseño de captador eólico, estas son: su orientación geométrica, el material con el que está construido y el espesor de sus paredes. La orientación geométrica deriva de un estudio de la ventilación y recurso solar de la localidad, la selección de materiales de su propia conductividad y calor específico y el espesor de las paredes de la posibilidad que ofrecen los sistemas constructivos de cada material. En este apartado, la investigación incluye además, la implementación de un método experimental para la determinación de las propiedades termofísicas de uno de los materiales en cuestión; el tabique vibrocompactado de jal-cemento.

Palabras clave: Inercia térmica, torre de viento, captador eólico, ventilación de confort, *Bâdgir*, CFD.

¹ Archivo de balance de la energía global (por sus siglas en inglés), perteneciente a la Organización mundial de Meteorología.

² Conocido como formato de archivo TMY por sus siglas en inglés.

ABSTRACT

This study analyzes at object scale within a quantitative approach the role of the thermal inertia in wind catchers commonly known as *Bâdgir*, *Baud-geer* or *Malqaf*; archetypical elements of passive ventilation in Persian and Arabic architecture respectively. For this, an inductive thesis that correlates thermophysical properties of the ventilation channel and operational efficiency achieved by itself is set. This, through the use of energy simulation and computational fluid dynamics integrated in Design Builder® software.

In the initial stages of the study, weather information obtained from interpolation of values from GEBA³ database was generated with the Meteonorm® software. Allowing to model a typical meteorological year⁴ both to define three climatic seasons based on ASHRAE 55 comfort model, set a monthly typical day, as well as to analyze the solar resource and local wind regime; weather conditions with the greatest impact on thermal inertia.

The research methodology integrates different simulation arrangements based on the conjugation of three variables in the ventilation channel of the same windcatcher design, these are: its geometrical orientation, the construction material employed and the thickness of its walls. The geometric orientation derived from a study of local ventilation and solar resource, selection of materials from their specific heat and thermal conductivity and walls thickness from the possibility offered by the own construction systems of each material. In this section, research also includes the implementation of a method for thermophysical properties estimation properties of one of the construction materials in question; the pumice concrete vibro-compacted solid block.

Key words: Thermal inertia, windtower, windcatcher, confort ventilation, Bâdgir, CFD.

³ Global Energy Balance Archive.

⁴ Better known as TMY file format.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
INDICE DE CONTENIDOS.....	1
INDICE DE TABLAS.....	3
INDICE DE FIGURAS.....	4
INDICE DE ECUACIONES.....	6
LISTA DE ABREVIATURAS, CARACTERES GRIEGOS Y SIMBOLOS.....	7
DENOMINACIÓN CIENTIFICA DE CARACTERES Y SIMBOLOS.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1 DIMENSION GENERAL: LA VENTILACION Y LA HABITABILIDAD TERMICA.....	14
1.2 DIMENSION PARTICULAR: LOS EFECTOS DE LA VENTILACION Y SU RELACIÓN CON LA MASA TERMICA.....	18
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	29
1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	30
1.5 HIPÓTESIS.....	31
1.6 OBJETIVOS.....	31
1.6.1 Objetivo general.....	31
1.6.2 Objetivos particulares.....	32
1.7 ALCANCES Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
II. MARCO TEORICO.....	34
2.1 EL CLIMA Y EL AMBIENTE TERMICO.....	34
2.1.1 El viento como elemento de transferencia térmica.....	40

2.1.2	La radiación solar como mecanismo de transferencia térmica	45
2.2	LA ENVOLVENTE ARQUITECTONICA: LA CONDUCCIÓN TERMICA DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS.....	51
2.2.1	El papel de la masa e inercia térmica	51
2.2.1	Procedimientos de caracterización de las propiedades termofísicas de los elementos constructivos.....	56
2.3	LOS PARAMETROS AMBIENTALES EN LA VENTILACION.....	60
2.3.1	Temperatura: convección natural en los dispositivos de ventilación.....	60
2.3.2	Presión: dirección y velocidad de viento en los dispositivos de ventilación.....	64
2.4	LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	72
III.	MARCO METODOLÓGICO	78
3.1	OBJETO DE ESTUDIO.....	78
3.2	VARIABLES	78
3.2.1	Variables de control.....	78
3.2.2	Variables independientes	79
3.2.3	Variables dependientes.....	79
3.3	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	80
3.4	ANALISIS DE DATOS.....	81
3.4.1	Escenario experimental.....	81
3.4.2	Cámaras de simulación.....	82
3.4.3	Sistema de acoplamiento de torre.....	83
3.4.4	Selección del modelo de confort y periodo de simulación.....	83
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	85
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	98

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distintos enfoques sobre la ventilación como elemento de habitabilidad	15
Tabla 2. Propiedades superficiales de emisividad y absorción de materiales de construcción....	27
Tabla 3. Aspectos técnicos de las principales bases de datos climáticos del mundo.	37
Tabla 4. Tabla resumen: El viento como elemento de transferencia de energía.	44
Tabla 5. Modelos de cálculo de radiación en superficies inclinadas.	46
Tabla 6. Tabla resumen: Modelos de cálculo de irradiación solar como elemento de transferencia de energía.....	50
Tabla 7. Tabla resumen: La masa térmica y sus efectos en la ventilación.	55
Tabla 8. Tabla resumen: Caracterización térmica de materiales constructivos	59
Tabla 9. Tabla resumen: Dispositivos de ventilación natural basados en la convección.....	63
Tabla 10. Captadores eólicos y torres de viento perspectiva en el tiempo y espacio.....	67
Tabla 11. Tabla resumen: Dispositivos de ventilación natural basados en la presión.	70
Tabla 12. Tabla resumen: Uso de la dinámica computacional de fluidos en dispositivos de ventilación.	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. El Bâdgir, vista actual de la provincia de Yazd, Irán,.....	13
Figura 2. Desarrollo histórico de la zona de confort según ASHRAE. Fuente: Auliciems & Szokolay (2007).	16
Figura 3. Dimensión general de la problemática de la habitabilidad térmica su relación con la ventilación natural de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia en base a ASHRAE 55	17
Figura 4. La ventilación y su relación en la habitabilidad. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 5. Clasificación de los dispositivos más comunes de ventilación natural, según su principio de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.....	19
Figura 6. Emplazamiento del <i>Bâdgir</i> en la vivienda iraní. Fuente: Bichon, P. (2008).....	20
Figura 7. Diseño tradicional de <i>Bâdgir</i> según O'kane.....	21
Figura 8. Comportamiento operativo del <i>Bâdgir</i> ante las condiciones térmicas nocturnas y diurnas. Fuente: Elaboración propia en base a Hughes (2012).....	22
Figura 9. Ganancia por radiación térmica: emisividad-absortividad. Fuente: Cengel (2011)	26
Figura 10. Fuerzas motrices del viento en un Bâdgir. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 11. Fenomeno de transferencia de calor entre el ambiente termico y un Bâdgir. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 12. Energía renovable y la problemática de climatización del ambiente edificado. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 13. Estructura de la investigación. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 14. Taxonomía del marco teórico de investigación. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 15. Composición del clima según García. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 16. Esquema del Sistema Mundial de Observación del Clima. Fuente: OMM	36
Figura 17. Información climática en archivos TMY. Fuente: Elaboración propia	38
Figura 18. Heliógrafo de Campbell-Stokes (izquierda) y piranómetros de cúpula (derecha). Fuente: www.tiempo.com	45

Figura 19. Integración de HTD en torres de viento. De izquierda a derecha: modelo CAD, Esquema 3D del dispositivo, vectorización de velocidades en CFD y túnel de viento Fuente: Calautit, J.K. (2014).....63

Figura 20. Torres de viento tradicionales con diferente numero de aberturas a) unidireccional, b)bidireccional, c) tetradireccional, d) octaédricos. Fuente: Hughes, Calautit, Ghani (2012).....66

Figura 21. Torres de viento modernas a) *circular roof mounted*, b) *square roof mounted*, c) *air tree*. Fuente: Hughes, (2012) y Soutullo (2012).69

Figura 22. Aproximación multidisciplinaria a la ventilación natural en edificios. Fuente: J.K. Calautit (2015).....75

Figura 23. Las variables en el diseño multifactorial. Fuente: Elaboración propia.79

Figura 24. Diseño del experimento. Fuente: Elaboración propia.....80

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley de Fourier de la conducción.	22
Ecuación 2. Ley de enfriamiento de Newton	23
Ecuación 3. Ley de Stefan-Boltzman de la radiación	23
Ecuación 4. Ley de Stefan-Boltzman de la radiación para radiadores térmicos no ideales.....	23
Ecuación 5. Determinación del calor específico en un material.	24
Ecuación 6. Estimación de la capacidad térmica de un cuerpo.	24
Ecuación 7. Determinación del coeficiente de conductividad de un material.	25
Ecuación 8. Determinación del coeficiente de resistividad térmica de un material.	25
Ecuación 9. Determinación de la Transmitancia de un elemento constructivo.	25
Ecuación 10. Determinación de la resistencia térmica total de un elemento constructivo.....	25
Ecuación 11. Ecuación de cálculo de la emisividad.....	26
Ecuación 12. Transferencia de energía entre una torre de viento y el medio ambiente natural....	28
Ecuación 13. Balance de flujo de masa.....	42
Ecuación 14. Ecuación para el cálculo de la temperatura sol-aire	54

LISTA DE ABREVIATURAS, CARACTERES GRIEGOS Y SIMBOLOS

Abreviatura	Definición	Unidades
a	Aceleración	m/s^2
A	Área	m^2
C	Conductancia térmica	$W/m^2 \cdot K$
	Capacidad térmica	$J/^\circ C$
CFD	Dinámica de fluidos computacional	(-)
clo	Factor de arropamiento	(-)
C_p	Calor específico	$J/Kg \cdot ^\circ C$
C.V.	Coefficiente de variación	(-)
cva	Cambios de volumen de aire	(-)
cva/hr	Cambios de volumen de aire por hora	(-)
dt	Día típico	(-)
e	Espesor	m
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
h, hc	Coefficiente convectivo de transferencia de calor o	
	Conductancia de película	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
HR	Humedad relativa	%
I	Radiación	W/m^2
k	Conductividad térmica ⁵	$W/m \cdot ^\circ C$
Ka	Transmitancia, conductividad aire-aire o coeficiente	
	global de transferencia de calor (ver U)	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
L	Longitud	m
M	Tasa metabólica	W

⁵ Empleado como K en la literatura técnica anglosajona, aunque su símbolo universal es (λ).

m	Masa	kg
P	Presión	Pa
Q	Flujo térmico	W
q	Calor	W/m ²
Qm	Caudal másico o flujo másico.	m ³ /s
R	Resistencia térmica total ⁶ (ver <i>Ra</i>)	m ² ·K/W
r	Resistividad térmica ⁷	m°C/W
Ra	Resistencia térmica total	m ² ·K/W
Rad	Radiación solar en una superficie	kWh/m ²
Re	Numero de Reynolds	(-)
TBS	Temperatura de bulbo seco	°C
TBH	Temperatura de bulbo húmedo	°C
TG	Temperatura de globo	°C
Tm	Temperatura media	°C
Tn	Temperatura neutral	°C
To	Temperatura operativa	°C
TRM	Temperatura radiante media	°C
Tsa	Temperatura sol-aire	°C
t	Tiempo	(hr)
U	Coficiente global de transferencia de calor ⁸ (ver <i>Ka</i>)	W/m ² K
V	Velocidad de viento	m/s
	Volumen	m ³

⁶ Empleado en la literatura técnica anglosajona como *R-Value*, aunque su símbolo universal es (*Ra*).

⁷ Empleado en la literatura técnica anglosajona como *r*, aunque su símbolo universal es (γ).

⁸ Empleado en la literatura técnica anglosajona como *U-Factor*, aunque su símbolo universal es (*Ka*).

DENOMINACIÓN CIENTÍFICA DE CARACTERES Y SIMBOLOS

Carácter/símbolo	Definición	Unidades
α (alfa)	Absortancia (coeficiente de absorción)	(-)
	Difusividad térmica	m^2/s
	Proporcionalidad	(-)
β (beta)	Pendiente de un eje o superficie	(-)
γ (gamma)	Angulo acimutal de una superficie	$^\circ$
	Resistividad térmica	$m^\circ C/W$
Δ (delta)	Diferencial o gradiente	(-)
ϵ (Épsilon)	Emisividad	(-)
θ (Theta)	Angulo de incidencia.	$^\circ$
θ_z	Angulo cenital solar	$^\circ$
I (Iota)	Separación entre dos superficies	m
λ (lambda)	Conductividad térmica.	$W/(m \cdot K)$
N (Ni)	Población	(-)
ν (Ni)	Viscosidad cinemática	m^2/s
π (pi)	Constante de Arquímedes	(-)
ρ (rho)	Densidad	kg/m^3
	Reflectividad, Reflectancia	(-)
Σ (Sigma)	Sumatoria	(-)
σ (Sigma)	Desviación estándar	(-)
	Constante de Stefan Boltzman	$W/(m^2 \cdot K^4)$
φ (Fi)	Latitud	$^\circ$
ω (Omega)	Angulo medio horario	$^\circ$

INTRODUCCIÓN

Como parte de su proceso de adaptativo, el ser humano ha buscado de manera constante mejorar las condiciones de salvaguardia y habitabilidad que el ambiente natural le ofrece, por medio de herramientas tecnológicas de transformación del medio físico existente y de edificación de uno nuevo. Desde tiempos remotos -siglo I a.C.- Marco Vitruvio ya documentaba la necesidad de considerar al clima en el diseño de las edificaciones, pero no fue sino hasta después de la revolución industrial que el problema se hizo evidente dada la acelerada construcción de un entorno artificial a disposición de una población creciente, misma que en la actualidad ronda los 7.2 billones de personas; de ellas, el 53% está concentrado en zonas urbanas (P.R.B., 2013).

Los citados asentamientos urbanos generan cantidades enormes de contaminantes; entre ellos emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) por medio del uso intensivo de combustibles fósiles en actividades industriales y de transporte, consumiendo al mismo tiempo la mayor parte de la energía mundial (ONU-HABITAT, 2014). Tan solo en Latinoamérica 433 millones se ven inmiscuidos en esta moderna dinámica de vida que entraña problemáticas sociales y económicas drásticamente intensificadas por fenómenos climáticos.

Así fue que en décadas recientes se despertaron inquietudes en relación al impacto de la actividad industrializada en el anómalo comportamiento climático mundial. En 1987, la comisión Brundtland, sobre el medio ambiente de la Organización de Naciones Unidas fijó el paradigma del desarrollo sustentable y lo tradujo al mundo como “Aquél desarrollo que no pone en riesgo las necesidades de las generaciones futuras para satisfacer las presentes”.

Con ello se dio cabida entre otras cosas, a una nueva generación de pensamiento en la que bajo una óptica holística se vinculan dimensiones humanas, económicas, ambientales y tecnológicas que interactúan para dar lugar a patrones de comportamiento masivo, mismos que pretenden regular una idea de sustentabilidad que se perfila como piedra angular en los procesos de productividad del hombre.

La modificación de las pautas de consumo humano, una entera comprensión de la diversidad de los ecosistemas para el aprovechamiento de los recursos naturales en un ambiente que propicie la reducción en la tasa demográfica, son algunas de las medidas estratégicas derivadas de esfuerzos para llegar a consensos internacionales aumentando con ello las condiciones de salud y educación en estratos poblacionales que mantienen una vergonzosa polaridad.

Surgieron así manifestaciones como la cumbre de Río en 1992, en la que por medio de la “Agenda 21”, 179 países disertaron sobre la responsabilidad en la que incurrían las naciones según sus ciclos de desarrollo en contraste con el deterioro de la biosfera. Diversos esfuerzos han derivado en la instrumentación de políticas para la cooperación internacional en el combate a la pobreza, la evolución de las modalidades de consumo, la dinámica demográfica y su integración con el medio ambiente y en particular sobre el cambio climático; prueba de ello es el compromiso adquirido por la mayoría de países industrializados que conforman el 17% de la población mundial a través del protocolo de Kioto (O.N.U., 1998).

Por otra parte, estudios de la agencia Internacional de Energía han demostrado que las edificaciones de carácter habitacional, comercial y público contribuyen con lo anterior sumando casi un 40% del consumo energético mundial, debido principalmente a aspectos de climatización lumínica, acústica y -para propósitos particulares de este estudio- térmica. Lo que además produce entre el 25 y 35% de las emisiones de CO₂. Así pues, el sector de la construcción ofrece significativas oportunidades de mejoramiento de la eficiencia energética de los edificios, sobre todo en países emergentes (Schwarz, 2010).

Al recapitular, es posible identificar que la climatización artificial necesaria para el acondicionamiento térmico de los edificios empleaba ya tecnologías activas de calentamiento y enfriamiento mecánico que proliferaron desde principios del siglo XX a partir de estudios de la ASHVE⁹ que fijaron un precedente al definir las temperaturas de diseño y la Zona de Confort (ZC) con las que las mencionadas tecnologías operan. Estudios que durante 1932 continuaron Vernon y Warner y que se intensificarían multidisciplinariamente en manos de otros durante la segunda guerra mundial. En el ámbito de la arquitectura Víctor Olgyay en 1963 fue el primero en integrar hallazgos en las áreas de ingeniería, fisiología, medicina y climatología, con énfasis especial en el ya mencionado concepto de confort térmico (Auliciems & Szokolay, 2007).

En dicho concepto, es posible definir dos grandes vertientes que impactan a nivel del individuo. La primera, factores individuales de actividad metabólica y el índice de arropamiento; la segunda de carácter ambiental, conformada por la temperatura del aire, la velocidad a la que este se desplaza, la temperatura media radiante y la humedad relativa. En esta última se puede incidir por medio de los elementos de interface; es decir, por medio de las envolventes arquitectónicas.

⁹ Sociedad americana de ingenieros de calefacción y ventilación por sus siglas en inglés.

Para adoptar medidas pertinentes en el ahorro energético de acondicionamiento térmico de dichas envolventes, se ha definido como axioma la reducción de sus cargas térmicas, a fin de disminuir el uso de tecnologías activas usadas para mantener un ambiente térmico interior confortable. Esto es posible con el uso de estrategias de diseño pasivo; dentro de ellas, una de gran impacto consiste en la optimización de las envolventes arquitectónicas por medio de cambios en su configuración geométrica o constitución física, para armonizar la relación existente entre el micro-clima interior y el ambiente térmico exterior.

Una de las alternativas para mejorar el comportamiento térmico a nivel de la envolvente arquitectónica y la reducción de las cargas de enfriamiento es la correcta selección de materiales y el aprovechamiento de la conservación de la energía en su masa térmica para reducir la oscilación de temperaturas interiores logrando el confort térmico (Balaras, 1996), ya que la energía usada en las edificaciones es más significativa en su fase operativa que durante su construcción y demolición. Es así que estudiosos plantean la importancia de la selección adecuada de materiales en su vida útil, incorporando no solo el análisis de su ciclo de vida, sino conceptos como el diseño regenerativo, comúnmente conocido como C2C¹⁰ (Silvestre, De Brito, & Pinheiro, 2014).

Por su parte, la ventilación es otra estrategia de diseño de alto impacto en el mejoramiento de factores ambientales de confort térmico; según modelos de confort de ASHRAE, tanto a escala del individuo como edificatoria. Contribuye a la disipación de calor metabólico y la descarga térmica de las envolventes arquitectónicas mediante el enfriamiento convectivo; esta última escala de intervención, integra el uso de elementos de diseño, sistemas y dispositivos tales como ventanas, sobrecúpulas, respiraderos, patios y atrios ventilados, deflectores, rejillas, chimeneas, torres de viento, captadores eólicos, entre otros (R. García & Fuentes, 1987).

Considerando que los sistemas de ventilación natural aprovechan fenómenos físicos naturales como diferencias de presión y temperatura, dirección e intensidad de viento (Yarke, 2005b); es pertinente revalorizar elementos de la arquitectura vernácula de medio oriente, cuya naturaleza convectiva en particular ha sido aprovechada de manera empírica y masiva durante siglos. Amén de lo anterior, las torres de viento conocidas como *Bâdgir* o *Baud-geers* en persa o *Malqaf* en árabe; estas últimas integradas a elementos adicionales; el *Salsabil* o *el Sirdap*. La figura 1, muestra su adopción en la morfología urbana de Yazd (A'zami, 2005).

¹⁰ Cradle to cradle por sus siglas en inglés, i.e. “de la cuna a la cuna”.



**Figura 1. El Bâdgir, vista actual de la provincia de Yazd, Irán,
Fuente: <http://ghoolabad.com>**

Así pues, este documento se enfoca en el estudio de la conservación de energía existente en la masa térmica de los canales de ventilación de las referidas torres -que de ahora en adelante podrán referirse como *Bâdgir*, *Baud-geer*, *Malqaf* o *Malkaf*, torre de viento o captador eólico-, y su relación con la ventilación por extracción pasiva a través del efecto de la inercia térmica.

La presente tesis diserta lo anterior a través de cinco capítulos; el primero plantea el problema mediante una referencia a la ligereza con la que ha sido abordado por los estudiosos el fenómeno de la inercia térmica en las torres de viento, aporta elementos de justificación que permiten formular una pregunta de investigación, así como una respuesta hipotética. El segundo capítulo aborda la contextualización del problema por medio del marco de referencia y su respectiva revisión literaria, sustenta teóricamente el estudio y analiza su factibilidad técnico-científica.

En el tercer capítulo se caracteriza la investigación, su enfoque y alcances como la metodología empleada para la generación de escenarios de simulación. Se guarda especial interés en la relación del régimen de viento, el recurso solar y la orientación geométrica de la torre, así como las propiedades termofísicas de los sistemas constructivos, el uso de la dinámica de fluidos computacional resulta de particular importancia en este apartado. El cuarto capítulo analiza la distribución de los resultados en los periodos climáticos definidos a razón de un modelo de confort térmico para establecer el potencial de las distintas configuraciones del dispositivo respecto a los escenarios de simulación y discute sobre la correlación encontrada con la inercia térmica del dispositivo. Finalmente el quinto capítulo concluye con las aportaciones y hallazgos científicos más relevantes en la investigación, así como con un listado de recomendaciones de utilidad para el diseño de estos dispositivos si es que desea extrapolarse su uso en condiciones climáticas distintas.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe una problemática implícita en los fenómenos del hábitat al interior de los núcleos urbanos; esta se desprende de la ruptura entre el hombre y su capacidad adaptativa al medio ambiente natural a causa de los procesos de industrialización de los espacios habitables. El punto medular de este documento radica en el deterioro de las condiciones de habitabilidad térmica y la respuesta que la ventilación natural ofrece a través de una torre de viento. Para definir la escala del problema que atañe a esta tesis, es conveniente dimensionarlo, para ello se establece la siguiente sub-capitulación.

1.1 DIMENSION GENERAL: LA VENTILACION Y LA HABITABILIDAD TERMICA

La problemática de habitabilidad ya planteada se agrava particularmente en localidades con climas extremos y economías precarias; sin embargo, ha sido identificada y denominada “Síndrome del edificio enfermo” desde hace décadas por comités de la OMS¹¹ en una tercera parte de los edificios nuevos o remodelados de todo el mundo (Edelman & Hethmon, 1993). Dicho concepto aborda un conjunto de síntomas que afectan la productividad laboral y salud humana, obedecen a:

- Ventilación inadecuada de los espacios.
- Contaminantes químicos interiores/exteriores.
- Contaminantes biológicos.

Dichas variables están vinculadas a deficiencias en la ventilación sanitaria de los espacios y el poco entendimiento del balance térmico existente entre los habitantes y su entorno inmediato. En el pasado Olgay ya había esbozado la importancia de la ventilación en la definición de una zona de confort térmico humano incluyendo relaciones psicrométricas en su carta bioclimática, sin embargo el papel de la ventilación se fue ponderando paulatinamente con el desarrollo de normas prescriptivas de carácter analítico, como en el caso de la norma ASHRAE¹² 62-73 sobre ventilación mecánica y natural, que retoma estudios de psicrometría de Willis Haviland Carrier.

¹¹ La Organización Mundial de la Salud es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas.

¹² Sociedad americana de ingenieros de calefacción, refrigeración y aire acondicionado por sus siglas en Ingles.

Este estándar de ASHRAE define tanto el valor mínimo, como recomendable de la tasas flujo de aire exterior a fin de lograr una aceptable calidad de aire interior, considerando medianamente condiciones térmicas.

Más tarde, la adenda 62c de la misma norma 62-73 dio paso a la definición de las dos vertientes más importantes en materia de ventilación; la calidad del aire y por último la calidad del ambiente térmico, dando la pauta para que en lo sucesivo la norma ASHRAE 55 abordara la denominada ventilación de confort orientada al estudio del ambiente térmico.

La siguiente tabla delimita las principales definiciones de las normas de ASHRAE a fin de ilustrar el distinto enfoque de cada una.

Tabla 1. Distintos enfoques sobre la ventilación como elemento de habitabilidad

Enfoques de abordaje de la ventilación según ASHRAE		
Norma	Enfoque	Definiciones principales
ASHRAE 62	Efecto de la ventilación en la calidad del aire interior	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad aceptable del aire interior • Sistemas de limpieza del aire. • Aire (extraído, exterior, recirculado, transferido, suministrado, etc.) • Material particulado, contaminantes, polvo, humo, gases, vapores, etc. • Oxidación • Infiltración y exfiltración • Partículas respirables
ASHRAE 55	Efecto de la ventilación en las condiciones del ambiente térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente térmico aceptable (Confort térmico, modelo adaptativo, voto medio previsto, porcentaje de insatisfechos, porcentaje previsto de insatisfechos) • Aire (velocidad, velocidad media) • Temperatura (Neutral, radiante, del aire, operativa, efectiva estándar, • Humedad (relativa, relación de, punto de rocío, presión de vapor de agua, etc.) • Tasa metabólica (met) • Arropamiento (Clo, aislamiento)

Elaboración propia en base a las normas ASHRAE 62-1999 y ASHRAE 55-2010.

Estas normas de ASHRAE indican que los sistemas de calefacción, refrigeración, humidificación o deshumidificación consideran a la temperatura y humedad como las condiciones que de manera más significativa mejoran o degradan la condición de percepción de la calidad del ambiente térmico de los ocupantes (Taylor et al., 1999).

Lo anterior coincide con la aplicabilidad del índice analítico de Fanger en la determinación del índice PMV aunado al PPD, en el que es probablemente uno de los análisis más meticulosos de la relación térmica del humano y su ambiente próximo y que fueron incorporados a la norma ISO 7730:1994 (Auliciems & Szokolay, 2007).

Entonces, la ventilación como elemento inherente en la conformación del ambiente térmico es uno de los factores protagónicos del mejoramiento de la habitabilidad según las normas e índices ya citados (ASHRAE, 2010a). Consecuentemente, otros autores líderes como Olgyay, Evans o Mahoney han incorporado aportaciones de distintos áreas del conocimiento para conformar una perspectiva holística para el diagnóstico y delimitación del confort térmico, tal es el caso de Givoni y Milne que idearon uno de los instrumentos de diagnóstico y diseño más usados: la carta bioclimática Givoni-Milne (Steinfeld, Bhiwapurkar, Dyson, & Vollen, 2010).

Esta carta guarda estrecha similitud con la evolución grafico-analítica de la definición de la zona de confort térmica de ASHRAE a lo largo del tiempo; esto puede ser apreciado en la figura 1, en donde se distinguen distintas zonas de confort para el verano e invierno, con variaciones importantes en la acotación geométrica de los límites superiores debido a la consideración de la humedad como variable de impacto.

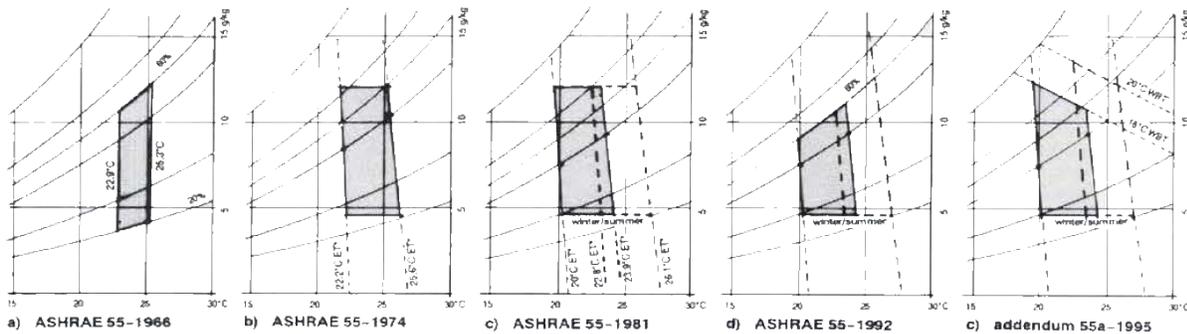


Figura 2. Desarrollo histórico de la zona de confort según ASHRAE. Fuente: Auliciems & Szokolay (2007).

Así pues la escala general del problema radica en el mejoramiento de las condiciones de habitabilidad térmica de los espacios por medio de la ventilación de confort, so pretexto de la garantía en la calidad del aire interior a través de estrategias de diseño pasivo; lo anterior en base a un modelo de confort ampliamente conocido; el estándar 55 de ASHRAE ya citado. Descrito lo anterior, se sostiene de manera ilustrativa en la figura 2 la escala general del problema.

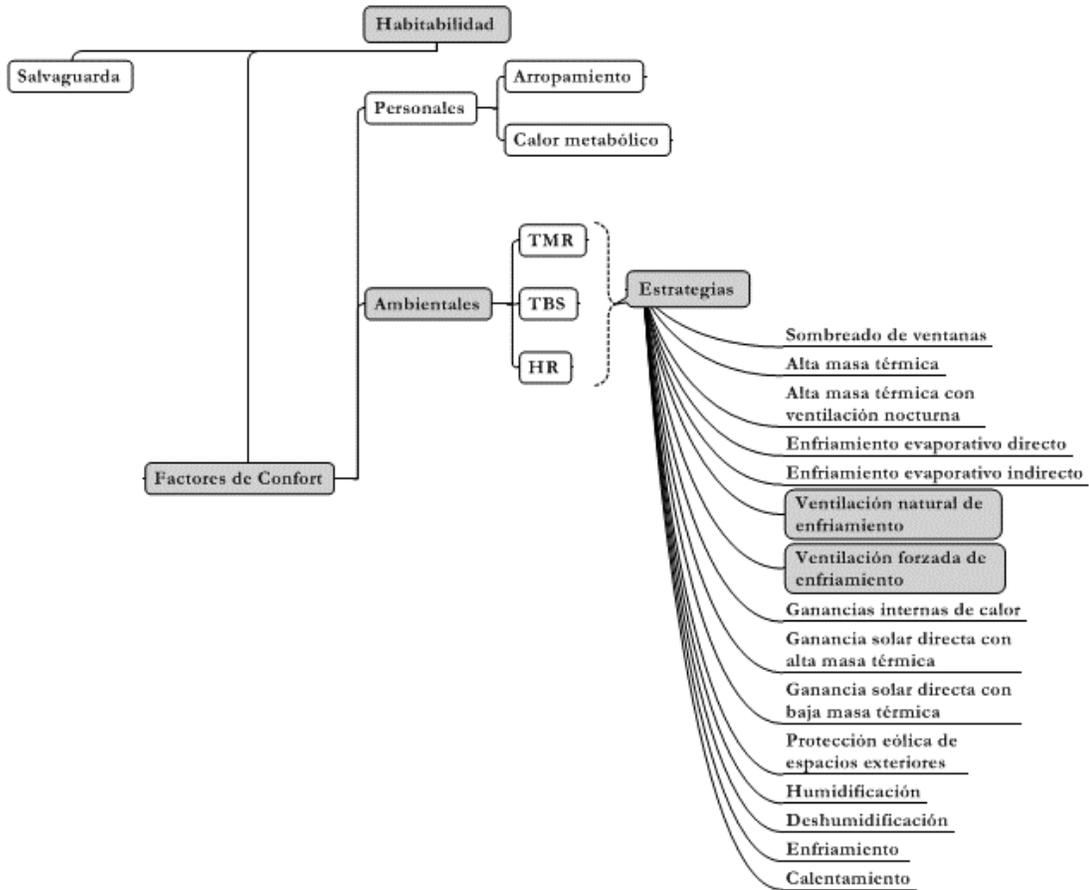


Figura 3. Dimensión general de la problemática de la habitabilidad térmica su relación con la ventilación natural de enfriamiento. Fuente: Elaboración propia en base a ASHRAE 55

Partiendo del proceso de adaptación del hombre al medio ambiente natural los diseñadores se han decantado por un particular interés en la habitabilidad térmica. No obstante, es necesario no solo el reparo en los factores ambientales como el viento que amplía los límites de la habitabilidad térmica a nivel de interacción con el habitante, sino también a nivel de las envolventes arquitectónicas pues promueve ahorro energético a través del enfriamiento como señala el enfoque de la figura a continuación.

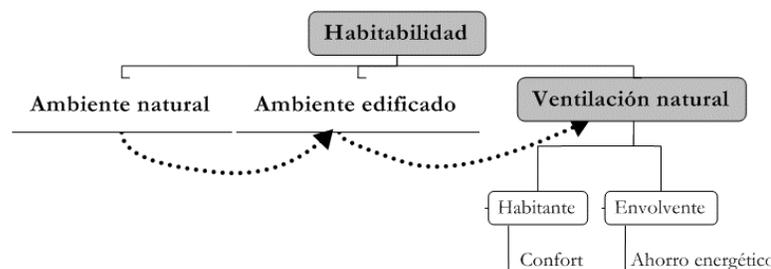


Figura 4. La ventilación y su relación en la habitabilidad. Fuente: Elaboración propia.

1.2 DIMENSION PARTICULAR: LOS EFECTOS DE LA VENTILACION Y SU RELACIÓN CON LA MASA TERMICA.

Si bien, la temperatura media radiante, la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa son los aspectos protagónicos en el ambiente térmico interior; en los primeros dos, cabe destacar la importancia del papel que juega la conservación de la energía y la inercia térmica. Según estadísticas de la OCDE¹³, hasta un 50% de la energía se consume en edificios no industriales; de esta, la mitad es disipada en mecanismos de ventilación, por lo que la proporción de energía asociada, convierte a la ventilación en el mecanismo de descarga térmica predominante en los edificios. Entender el rol de contribución de la renovación del aire interior en ello es esencial, ya que se ha llegado a demostrar que representa casi el 36% de la energía de acondicionamiento total de los espacios (Liddament & Orme, 1998).

Sin embargo, esta descarga térmica está ligada a la renovación de aire y a su vez a la velocidad de sus flujos; los valores óptimos van entre 0.3-0.7 m/s. Algunos autores han trabajado en los coeficientes de espacios con ventilación de confort ideal y su relación con la velocidad del flujo existente (Bastide, Lauret, Garde, & Boyer, 2006). Para ello es necesario la incorporación de elementos de diseño en favor de la ventilación natural la figura 5 señala los elementos fundamentales de funcionamiento de dichos dispositivos basados invariablemente en la convección natural y el efecto mecánico del viento; es decir, ventilación debido a diferencias de presión y temperatura destacando primordialmente a las torres de viento de entre el resto.

Por su parte algunas de las técnicas más comunes en climas cálidos aprovechan la ventilación nocturna, que usa comprensivamente factores como la oscilación, el retraso y el amortiguamiento térmico de la envolvente, las ganancias internas y tasas de ventilación entre otros. Esto conduce a la valoración de técnicas y dispositivos de enfriamiento pasivo basados en estos parámetros climatológicos (Hughes, Chaudhry, & Ghani, 2011).

Las torres de viento como elementos arquetípicos tradicionales, son elementos simbólicos, pero también dispositivos de climatización pasiva que inducen aire fresco al interior edificado a través de la presión positiva de barlovento y lo extraen por medio del efecto combinado de la convección libre debido a la diferencia de densidad de la masa de aire y las presiones negativas de sotavento.

¹³ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).

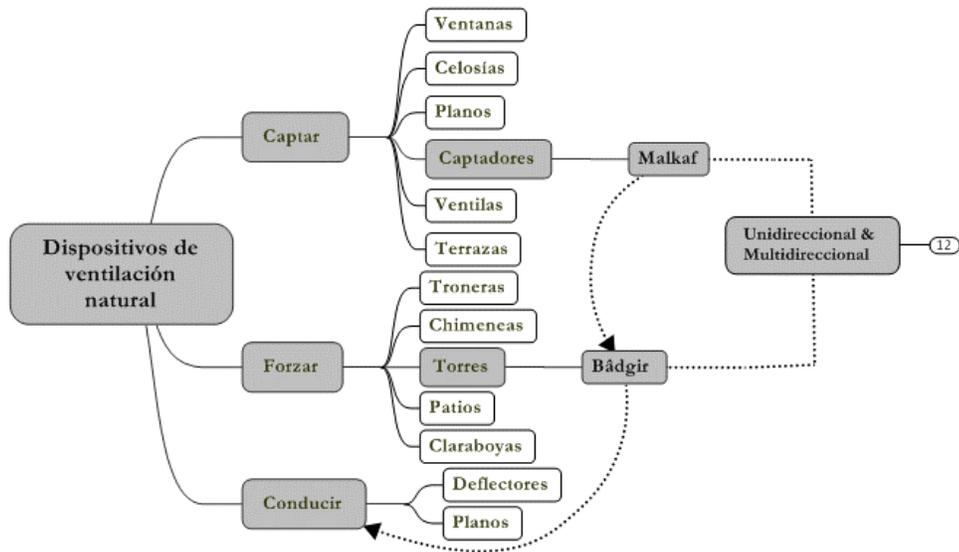


Figura 5. Clasificación de los dispositivos más comunes de ventilación natural, según su principio de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

Diversidad de investigaciones han estudiado a las torres analítica, numérica y experimentalmente, ya sea analizando ángulos de incidencia y velocidad de vientos, hasta el análisis de las condiciones térmicas de mayor margen. Sin embargo, existe un elemento poco evaluado: la inercia térmica.

Como ilustra la figura 6, estas estructuras de ventilación operan en la parte superior de las viviendas, orientadas geométricamente según las condiciones de viento dominante y radiación solar de regiones regularmente secas y áridas. Morfológicamente son similares a chimeneas que desplantan subterráneamente y se erigen por encima de las cubiertas de las edificaciones en conjuntos de viviendas que se despliegan sobre una traza vial con altos muros de adobe o ladrillo, en ocasiones con secciones abovedadas, estas estrechas calles son mejor conocidas como *Kucheh* o *Koocheh*, y son incluso en la actualidad especialmente diseñadas para brindar resguardo ante las tormentas de arena al mismo tiempo que maximizan el sombreado entre edificaciones y aíslan al conjunto de las bajas temperaturas invernales (Karim Pirnia & Gulām Husain, 2005).

A escala de objeto arquitectónico, los captadores eólicos se integran como parte de sistemas que incluyen reservas de agua, pozos y fuentes interiores que enfrían y humidifican el aire por medio de la modificación de su contenido de vapor de agua; es decir, a través del enfriamiento latente.



Figura 6. Emplazamiento del *Bâdgir* en la vivienda iraní. Fuente: Bichon, P. (2008)

La referida estrategia es útil durante el cálido verano que presenta por ejemplo el desierto iraní de la provincia de Yazd. Cuando esto no era posible en climas húmedos cercanos al golfo pérsico en la provincia de Hormozgan, la ciudad de Bandar Lengheh muestra como las torres de viento también se adaptan al clima por medio de variaciones geométricas; mientras en las ciudades de clima húmedo las torres son más robustas y bajas, en las zonas áridas se erigen a mayor altura aprovechando ráfagas de viento más fresco que después se humedecía en canales de agua llamados *Qanat*, climatizando por medio del enfriamiento indirecto o sensible los espacios. La distancia geográfica es apreciable en la figura 7.

Cuando no está integrado a un sistema, este dispositivo de ventilación pasiva puede funcionar a la inversa; es decir, retirando aire del interior debido al rol que juegan los materiales de su estructura y la fluctuación térmica del ambiente exterior; esto es, almacenando energía térmica durante el día y perdiéndola por convección y radiación durante la noche en un recurrente proceso de balance térmico que ha sido poco atendido por los estudiosos que han dedicado sus investigaciones a partes o componentes muy específicos de estos dispositivos (A'zami, 2005).

Tal es el caso de la parte superior de la torre, conocida como plataforma; misma que incluye los deflectores que inducen y aceleran el viento al interior del canal de flujo interior de la columna o también llamado tallo. La estructura vertical tradicional de diseño del *Bâdgir* puede apreciarse en la figura siguiente, este diseño proliferó en tiempos de la gran dinastía Timúrida durante la edad media y podría describirse de la parte inferior a la superior como sigue: a) tallo, b) catgut-cadena y c) la plataforma (O'Kane, 1976).

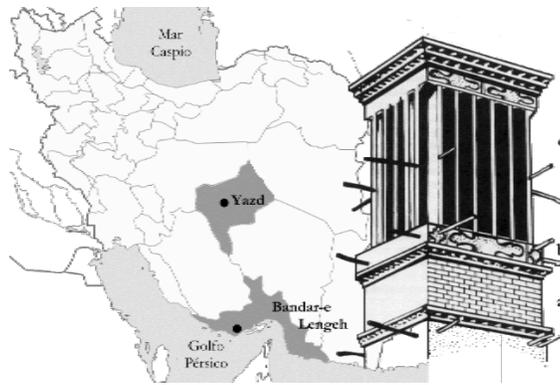


Figura 7. Diseño tradicional de *Bâdgir* según O'kane
 Fuente: Elaboración propia en base a O'kane (1976).

La ventilación vertical generada por diferencia de temperatura y comprendida conceptualmente como efecto *stack*, aumenta la eficiencia operativa de las torres y hoy por hoy puede aplicarse en edificios contemporáneos. Básicamente lo que sucede es que la energía térmica almacenada en la masa del tallo durante las horas de radiación solar se libera horas más tarde, generando la posterior succión de aire interior por efecto de convección. Los conceptos de retraso e inercia térmica durante el día y la noche son fundamentales para que esto suceda (Moghaddam, Amindeldar, & Besharatizadeh, 2011).

Este ciclo de intercambio de energía entre la masa de las paredes del tallo y el ambiente térmico exterior impacta en el flujo de aire al interior de la torre, pues la marcha térmica horaria de la masa de aire al interior y exterior son distintas al mantener como barrera de interface las paredes que conforman el canal del tallo. Esto se debe a que las propiedades térmicas y superficiales del tallo cumplen una esta función climática, lo que obedece al empleo de materiales locales, esencialmente lodo, paja y/o ladrillo; desde ciudades como Teherán cercanas al mar caspio, pasando por ciudades continentales como Yazd, Ardakan, Mehriz o Jahrom hasta llegar al golfo pérsico de clima cálido y húmedo se aplican emplastes a base de morteros con terminados en colores de baja absortancia; como el amarillo y el blanco que circundan el 0.20 y el 0.30.

No obstante, el funcionamiento de este dispositivo varía dependiendo del momento del día en que se analice, la figura 8 ilustra la función diurna en que las fuerzas mecánicas de los vientos dominantes insuflan viento por el cuadrante de captación, mientras que por los otros cuadrantes de la torre la succión es posible gracias a la convección natural y la presión negativa de sotavento; durante la noche es posible la captación por todos los cuadrantes de la torre.

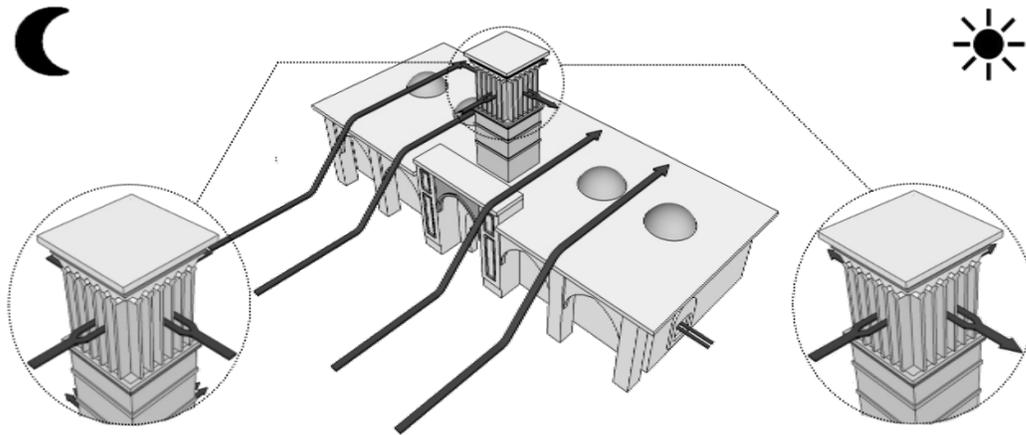


Figura 8. Comportamiento operativo del *Bâdgir* ante las condiciones térmicas nocturnas y diurnas. Fuente: Elaboración propia en base a Hughes (2012)

Elementalmente esta variación de comportamiento se rige por la distinta aportación de energía del ambiente térmico inmediato a la torre a través de la radiación solar, lo que puede describirse como un fenómeno de transferencia de calor; esto es posible a través de tres medios cualitativos: la conducción, convección y radiación (Holman, 1998). Los principios teóricos de estos mecanismos de transferencia se expresan como sigue:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Ecuación 1. Ley de Fourier de la conducción.

Donde, q es el flujo de calor, $-k$ la conductividad térmica en sentido de las temperaturas decrecientes, A el área y $\partial T/\partial x$ el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. Esta ley llamada Ley de Fourier de la conducción de calor en honor al físico matemático Joseph Fourier explica la transferencia de energía de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura por medio del contacto en cuerpos sólidos isótropos y se presenta entre el cuerpo de la torre de viento y su desplante sobre la cubierta de los espacios a climatizar.

Por otra parte, el gradiente de temperaturas en el tallo del *Bâdgir* es un fenómeno físico de conducción altamente influenciado por el efecto global de enfriamiento-calentamiento convectivo debido a la acción de la masa de aire circundante; de ahí que sea importante considerar la velocidad a la que actúa el intercambio energético, esto lo define la siguiente relación de transferencia de calor por convección desde una superficie:

$$q = hA(T_p - T_\infty) \quad (2)$$

Ecuación 2. Ley de enfriamiento de Newton

Donde, q representa el efecto global de la transferencia de calor entre la pared y el fluido; h el coeficiente de transferencia de calor por convección; A , la superficie de contacto; T_p la temperatura inicial de la superficie del cuerpo analizado y T_∞ la temperatura ambiente de corriente libre; en vista de lo anterior, se puede anticipar la gran dependencia de la viscosidad del fluido, así como de sus propiedades térmicas (conductividad térmica, calor específico y densidad).

En contraposición a las anteriores, las torres de viento también intercambian energía en forma de calor con el ambiente inmediato a través de un vacío perfecto, la ley de Stefan-Boltzman explica como la radiación electromagnética se propaga como resultado de diferencia de temperaturas entre radiadores térmicos ideales o *cuerpos negros*.

$$q_{emitido} = \sigma AT^4 \quad (3)$$

Ecuación 3. Ley de Stefan-Boltzman de la radiación

Sin embargo, para radiadores térmicos no ideales como lo son los elementos constructivos del tallo de los captadores eólicos, es necesaria la consideración de un factor adicional llamado función de emisividad F_ε , y la función “factor de vista” F_G para relacionar la radiación de una superficie “gris” no ideal con la de un cuerpo negro, como sigue:

$$q = F_\varepsilon F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

Ecuación 4. Ley de Stefan-Boltzman de la radiación para radiadores térmicos no ideales.

Las tres leyes descritas circunscriben el fenómeno del intercambio térmico entre el tallo de un captador eólico y/o torre de viento y las condiciones medio ambientales que interactúan con él. Pese a ello, en elementos constructivos estos mecanismos de transito energético tiene implicaciones más complejas, ya que la propagación de energía a través de ellos es distinta en sistemas constructivos heterogéneos, debido a que éstos se encuentran constituidos de masa con un determinado potencial de acumulación y transmisión térmica.

Así entonces la capacidad de acumulación térmica de un material depende de un índice que sujeto a la cantidad de calor que es necesario aportarle a la masa que conforma al material para modificar su temperatura en una unidad. A este índice le llamamos calor específico y se estima por medio de la siguiente ecuación desarrollada por Joseph Black:

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{C}{m} \quad (5)$$

Ecuación 5. Determinación del calor específico en un material.

Donde Q es la cantidad de calor a suministrar a una cantidad de masa m , para que esta presente un cambio de temperatura ΔT . Es bien sabido que los materiales de construcción mantienen un valor cercano a los 800 J/Kg°C. A partir del conocimiento de este índice es posible estimar la capacidad térmica de un cuerpo concreto ante la cantidad global de calor que necesita para que la suma de las masas que lo conforman modifique su temperatura en un grado centígrado, lo anterior se define bajo la siguiente ecuación:

$$C = \sum_{i=1}^n m_i C_{p_i} = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (6)$$

Ecuación 6. Estimación de la capacidad térmica de un cuerpo.

Por tanto, los conceptos de calor específico y capacidad térmica tienen significativa importancia en el comportamiento de las torre de viento, pues los muros que conforman el tallo de la estructura funcionan como pozos de calor con capacidad aislante y emisividad radiante en las que actúan tanto el amortiguamiento, como el retraso térmico ante la aportación energética del ambiente exterior, influenciada totalmente por la radiación solar.

Con todo lo anterior, la etapa de emisividad radiante o restitución térmica de los elementos constructivos hacia el ambiente exterior mantiene un ritmo por medio de la existencia de dos parámetros igualmente importantes; la conductividad térmica (λ), también conocida como k y la conductancia. La primera de las dos mide la facilidad con que un cuerpo isótropo permite el tránsito energético a través de sí por una unidad de tiempo en una superficie unitaria. Esto se calcula a partir de la ecuación 1 -mostrada anteriormente- como sigue:

$$k = \lambda = \frac{q \cdot l}{\Delta T} \quad (7)$$

Ecuación 7. Determinación del coeficiente de conductividad de un material.

Donde q es el calor aportado por una fuente de calor; en este caso el sol en W/m^2 , a una pared de un espesor l en metros, provocando un gradiente térmico en $^{\circ}C$. Este coeficiente por tanto es medido en $W/m^{\circ}C$ y su valor inverso; es decir la resistividad, se define como la obstrucción al libre tránsito térmico que ofrece una sustancia y se define así:

$$r = \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

Ecuación 8. Determinación del coeficiente de resistividad térmica de un material.

Estas propiedades anteriores, son consideradas intrínsecas en un material o sustancia con propiedades laminares. Aunque la capacidad aislante de un elemento constructivo es aquella que expresa la magnitud del flujo calorífico en la unidad de superficie de determinado material con un espesor determinado e ; se conoce comúnmente como Transmitancia, conductividad aire-aire o coeficiente global de transferencia de calor C , Ka o en la literatura técnica anglosajona U -value y se calcula de la siguiente manera Transmitancia,

$$Ka = \frac{1}{Ra} \quad (9)$$

Ecuación 9. Determinación de la Transmitancia de un elemento constructivo.

El valor recíproco de la anterior se denomina resistencia térmica R o resistividad aire-aire y dado que posee propiedades aditivas, si el material suma varias capas con resistencias definidas, bastaría con sumarlas considerando las resistencias superficiales convectivas exterior e interior para obtener la resistencia térmica total Ra , también llamada valor R (R -value) que en el sistema métrico se conoce como RSI y tiene una equivalencia de 0.1761101838 veces el valor R .

$$Ra = R_{se} + \sum R_i + R_{si} \quad (10)$$

Ecuación 10. Determinación de la resistencia térmica total de un elemento constructivo.

Pese a que lo anterior describe el comportamiento térmico de un elemento constructivo laminar ante la aportación energética ambiental, para estimar su comportamiento térmico global se debe considerar el efecto convectivo-radiante existente en sus caras. Se emplean así los términos de resistencia y conductancia superficial. La primera de las dos dependerá sobre todo de:

- Velocidad del aire.- A mayor velocidad, mayor intercambio convectivo.
- Posición del elemento respecto al flujo térmico.- La convección natural de una masa de aire presenta un movimiento vertical ascendente, por lo que superficies horizontales presentan una mayor resistencia al flujo térmico.
- Rugosidad del acabado.- Este dificulta el deslizamiento de las capas de aire sobre la superficie aminora la convección y aumenta la Ra del sistema constructivo.
- Emisividad.- Conocida como ε y antes llamada *emitancia* es la fracción de radiación térmica emitida por una superficie debido a su temperatura respecto a aquella emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda. Su valor esta entre 0 y 1. Cuanto más pequeño el valor, menos emisivo el material. Se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{Q}{\sigma \cdot A_s \cdot T_s^4} \quad (11)$$

Ecuación 11. Ecuación de cálculo de la emisividad

Donde Q es el flujo de calor, σ es la constante de Stefan-Boltzman, A_s es la área superficial del objeto y T_s la temperatura superficial del mismo. Por el contrario, la absorptividad es la fracción de radiación térmica recibida que es absorbida; cuando ésta es mayor a la emitida, se dice que se está ganando energía por radiación, en caso contrario se está cediendo (Cengel & Boles, 2011). Esto se aprecia en la figura 9; la tabla 2 valores comunes de α en materiales de construcción:

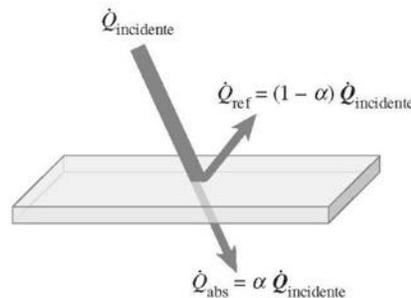


Figura 9. Ganancia por radiación térmica: emisividad-absorptividad. Fuente: Cengel (2011)

Tabla 2. Propiedades superficiales de emisividad y absorptancia de materiales de construcción.

Emisividad y absorptividad de algunos materiales		
Material	Emisividad (ϵ)	Absorptancia (α)
Hoja de aluminio brillante	0.05-0.10	0.05-0.10
Lámina de aluminio con pátina de oxidación	0.20-0.50	0.30-0.50
Pintura de aluminio	0.40-0.55	0.40-0.55
Hierro galvanizado con pátina normal	0.20-0.40	0.30-0.50
Madera	0.90	0.40
Ladrillo, teja, piedra	0-90	0.70
Concreto aparente	0.90	0.45-0.60
Pintura de aceite blanca	0.90	0.20
Pintura verde o gris, clara	0.90	0.40
Pintura verde o gris, oscura	0.90	0.70
Pintura negra, asfalto	0.90	0.85

Fuente: Elaboración propia basado en Evans, J. (1980) y Givoni, B. (1976)

Pese a que no es el propósito estudiar las fuerzas motrices del viento, conviene apreciar sus efectos mecánicos y su influencia en la conductancia superficial como función de transferencia de calor en cualquier prototipo de *Baud-geer*. La siguiente figura ilustra la presión (magnitud y dirección) como parámetro de la ventilación¹⁴, en el efecto Venturi explicado por el trinomio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa como papel determinante. Donde D es el conducto de paso (m); D_2 , el paso de vena contracta (m); V_1 , la velocidad entrada (m/s); V_2 , la velocidad de salida (m/s); d , el conducto de paso estrecho (m); β , el cociente de obstrucción (--), F , la vena contracta; G , la región remansada; H , la línea de corriente divisoria; Q , el gasto (m³/s); A_T , el área (m²), V_T : la velocidad (m/s); C_d , el coeficiente de descarga (-) y ρ , la densidad del aire (kg/m³).

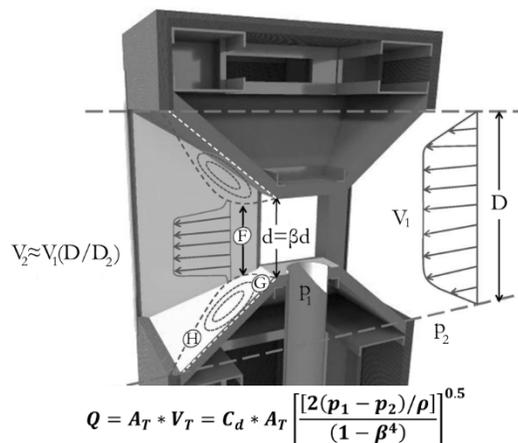


Figura 10. Fuerzas motrices del viento en un Bâdgir. Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ Se discute a profundidad a través de estudios como los de Evola (2006), Hughes (2011), T. van Hooff (2011), etc

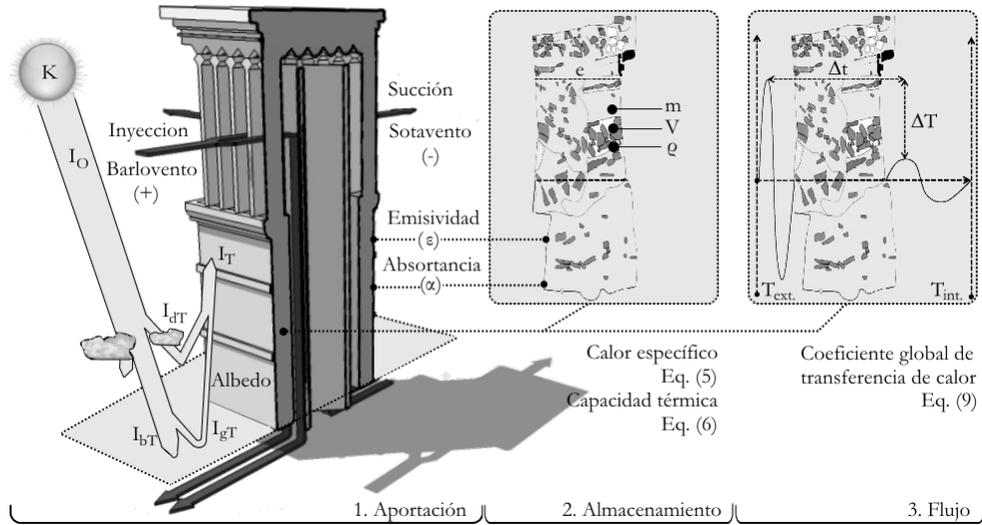


Figura 11. Fenómeno de transferencia de calor entre el ambiente térmico y un Bâdgir. Fuente: Elaboración propia.

El ideograma superior representa la intervención de elementos de transferencia energética que conforman el escenario de balance térmico de una torre de viento, así como los parámetros físicos y ambientales participantes en ello. Donde en términos de 1) Aportación energética¹⁵ K , es el valor de constante solar (1.366 kW/m^2); I_o , la radiación extraterrestre; I_{dT} , la radiación difusa en superficies inclinadas; I_{bT} , la radiación directa en superficies inclinadas; I_{gT} , la radiación reflejada en superficies inclinadas e I_T , la radiación total en superficies inclinadas. 2) Almacenamiento las ecuaciones de calor específico y capacidad térmica y 3) Flujo térmico a partir del coeficiente global de transferencia de calor, aunque el coeficiente de conductividad térmica como tal también está implicado en el intercambio del Bâdgir y la superficie de cubierta donde este se monta.

Por cuestiones narrativas, lo anterior se describirá con mayor profundidad en el marco teórico del presente documento; sin embargo en resumen esto puede ser expresado algebraicamente en la ecuación mostrada a continuación:

$$mC_p \frac{dT_t}{dt} = \alpha I - h_t A_t (T_{ce} - T_t) - hA_e (T_t - T_{amb}) - F_\varepsilon F_G \sigma \varepsilon A (T^4 - T_\infty^4) \quad (12)$$

Ecuación 12. Transferencia de energía entre una torre de viento y el medio ambiente natural.

¹⁵ Según nomenclatura anglosajona perteneciente a modelos de cálculo de radiación solar en planos inclinados.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Ya se ha detallado con anterioridad el origen de la degradación ambiental y la crisis energética y sus impactos; por lo que es menester de este documento sustentar el papel del acoplamiento de la masa térmica y la ventilación natural como elemento clave en el mejoramiento del confort térmico microclimático y la descarga térmica de las envolventes arquitectónicas. (Flourentzou, Maas, & Roulet, 1998).

Actualmente, la mayor parte del consumo eléctrico en el sector edilicio obedece actividades operativas que incluyen el uso de electrodomésticos para conservación y cocción de alimentos, iluminación, aseo, entretenimiento, pero sustancialmente a la demanda de climatización atribuible a cargas de térmicas de enfriamiento-calefacción por el uso de tecnologías mecánicas (ventiladores, sistemas de refrigeración, refrigeración desecante, evaporativos, etc.), donde la energía utilizada proviene de fuentes no renovables totalmente dependientes de la red de suministro estatal.

Ante esto, una alternativa viable es la edificación energéticamente sustentable a través de la integración, uso de fuentes de energía renovables de la región: energía solar, biomasa, geotermia, hidrogeno renovable y eólica, así como su conjugación con estrategias pasivas basadas en parámetros climatológicos; tales como el aislamiento térmico, la reducción de aportaciones internas de calor y sobre todo la ventilación natural a fin de minimizar las ganancias de calor, prevenir la condensación, la desodorización y descontaminación de los espacios (Luna, 2008)

Estos principios son conocidos como estrategias de pre-enfriamiento basadas en el acoplamiento de la masa térmica y la ventilación; investigaciones en Reino Unido basadas en la aplicabilidad de la ventilación nocturna en edificios climatizados artificialmente y con razonable masa térmica, han demostrado que la ventilación puede afectar condiciones internas diurnas e impactar en un ahorro energético del 5% e incluso considerando los flujos de calor de volumen de las envolventes a razón de los flujos de en la ventilación (Faure & Le Roux, 2012; Kolokotroni & Aronis, 1999)

A menor escala, estrategias de ventilación híbrida conjugan simbióticamente el uso de tecnologías pasivas de ventilación para el mejoramiento de la eficiencia de tecnología termosolar y fotovoltaica por medio de la descarga térmica de los paneles de dichas tecnologías mejorando hasta en un 10.1% la producción anual de energía con el uso de la extracción de aire como fluido de enfriamiento (Koinakis, 2005).

Conforme a lo anterior es pertinente el perfeccionamiento de elementos de climatización pasiva que permitan la disminución de la utilización de tecnologías que consumen fuentes no renovables de energía por medio de la reducción de cargas térmicas, como el caso de las torres y los captadores de viento, esto puede señalarse esquemáticamente en la siguiente figura.

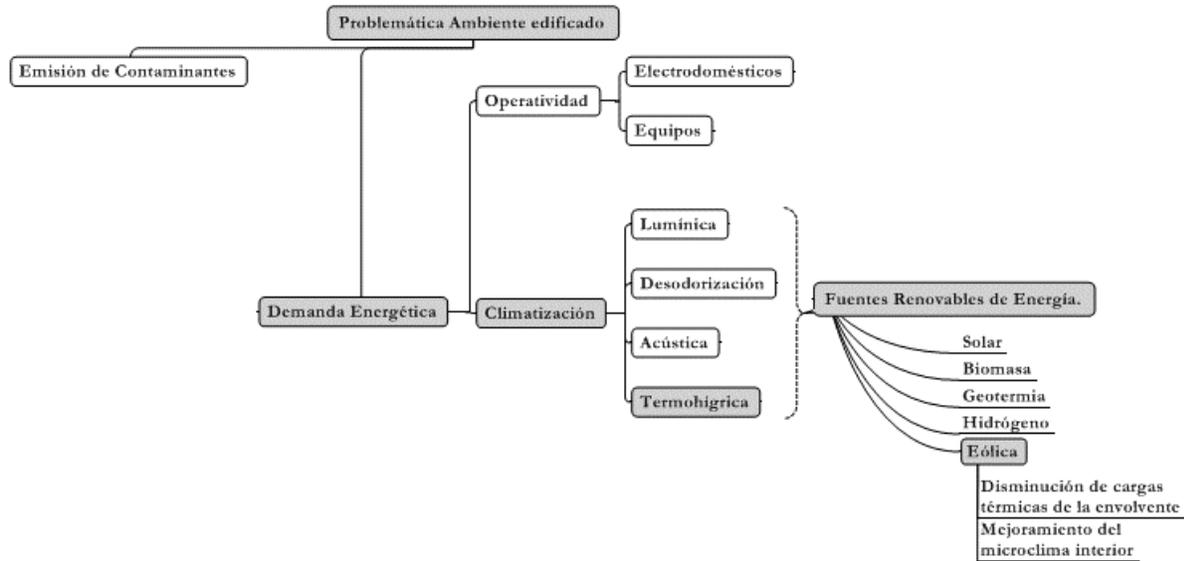


Figura 12. Energía renovable y la problemática de climatización del ambiente edificado. Fuente: Elaboración propia.

1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Una vez definidos los factores climáticos circunstanciales de la problemática, el curso histórico de la respuesta del hombre ante ella, así como los elementos teóricos, conceptuales y la evidencia empírica encontrada en la arquitectura vernácula es posible formular la siguiente pregunta de investigación:

{
 ¿Cuál es el factor de relación entre la capacidad térmica de las paredes
 del canal de ventilación de una torre de viento y la amplitud de su periodo
 de funcionamiento?
 }

1.5 HIPÓTESIS

Con base en la información ya citada en este documento existen elementos técnico-científicos para afirmar que es posible extrapolar el uso de captadores eólicos y/o torres de viento como dispositivos de control ambiental en condiciones climáticas no tradicionales e incluso mejorar su funcionamiento. Esto es posible bajo dos condiciones: la primera es la consideración de las variables climáticas de mayor incidencia en los mecanismos de transferencia de calor entre el ambiente natural y el dispositivo de ventilación; entiéndase conducción, convección y radiación. La segunda es el estudio de la forma del dispositivo, pero sobre todo el análisis de las propiedades termofísicas en el aprovechamiento de la masa térmica de los materiales que la constituyen.

Así pues, es posible mejorar los índices de ventilación de un espacio acondicionado con un captador eólico que trabaja bajo un principio de extracción pasiva, esto debido a que existe una relación directa y no proporcional entre el aumento de la capacidad térmica de los materiales empleados en el canal de ventilación de la torre y la amplitud del tiempo de extracción que el dispositivo tiene gracias al efecto de la inercia térmica, por tanto se postula la siguiente hipótesis de investigación.

**{ A mayor capacidad térmica en las paredes del canal de ventilación de un
captador eólico, mayor amplitud en el periodo de ventilación por
extracción pasiva debido al efecto de la inercia térmica. }**

1.6 OBJETIVOS

Dado que la presente investigación tiene implicaciones a escala de un objeto arquitectónico como dispositivo de control ambiental, se define el carácter los objetivos como sigue:

1.6.1 Objetivo general

La aportación de elementos técnicos que permitan definir a la capacidad térmica de las paredes del canal de flujo de un captador eólico como variable de impacto en la amplitud de su periodo de funcionamiento.

1.6.2 Objetivos particulares

Dado que el planteamiento hipotético de la investigación se sustenta en el impacto de la masa de del canal de flujo, su capacidad potencial de almacenamiento térmico y los efectos que por medio de la inercia térmica genera en los ciclos convectivos del dispositivo, es de vital importancia mencionar como objetivos particulares los siguientes:

- a. La realización de estudios de las variables climáticas de mayor impacto en los fenómenos de transferencia de calor entre al ambiente exterior y el dispositivo; estos son:
 - El recurso solar.
 - El régimen de vientos dominantes.
- b. La definición del impacto de dichas variables climáticas en el funcionamiento del dispositivo.
- c. El desarrollo de un análisis que permita establecer en base a un modelo de confort térmico el potencial de enfriamiento convectivo por medio de la ventilación natural y/o forzada y con ello la ventana de oportunidad del dispositivo.
- d. La definición del impacto de los parámetros de la forma en el funcionamiento; estos son:
 - Orientación geométrica del canal de flujo respecto a la radiación solar.
 - Espesor de las paredes del canal de flujo.
 - Propiedades termofísicas de los materiales empleados.
- e. El estudio del comportamiento de los ciclos convectivos en el canal de flujo y su comportamiento como cavidad ventilada a través de la dinámica computacional de fluidos.

1.7 ALCANCES Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance de la presente investigación es correlacional y se basa en un diseño experimental factorial a través de la simulación computarizada. Así pues, expresa la relación de causa-efecto entre más de una variable independiente para ver su relación con distintas variables dependientes, además establece la posibilidad de establecer una prueba empírica por medio de la replicabilidad en modelos a escala en futuras investigaciones, la estructura general de la investigación puede apreciarse en la figura 1 (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2006).

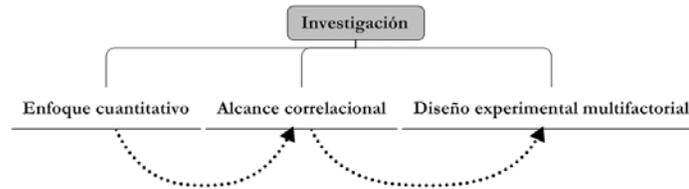


Figura 13. Estructura de la investigación. Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la presente investigación parte de un antecedente inmediato de cuasi-experimentación con un modelo a escala de una torre de viento probada por el mismo autor, la información obtenida en dicho estudio, servirá como medida de contraste en secciones muy puntuales de este documento.

Así pues la tesis define como alcances primordiales el estudio y caracterización del medio ambiente físico por medio de archivos climáticos construidos computacionalmente, el aislamiento de las variables climáticas de mayor impacto en el objeto de estudio, la definición de un listado de materiales que permitan la comparación de sus propiedades termofísicas y geométricas, así como la influencia de estas en la inercia térmica del canal de flujo de la torre; lo que incluye el uso de valores teóricos más aceptados en la literatura especializada y la implementación de un método de caracterización para un material de construcción de uso regional.

Lo anterior permitirá conocer valores de velocidad de extracción de aire alcanzadas en la torre, la tasa de ventilación, las renovaciones de volumen de aire generadas a partir de ello y un estudio detallado de la cavidad ventilada de la torre a través de la CFD.

No serán abordados en esta tesis de grado elementos estructurales, mecánicos, estéticos, económicos, de costo-beneficio, diseño regenerativo, ciclo de vida, o aquellos que moneticen de alguna forma el ahorro energético que pueda derivar de la mejora en las condiciones de habitabilidad térmica que el uso del dispositivo suponga en un espacio habitable.

Las limitaciones obedecen a cuestiones de índole económica y al tiempo concedido para la conclusión del presente documento parte de las instituciones que lo financian; si bien la construcción de modelos a escala aportaría elementos comparativos importantes, el diseño de la investigación presupone el manejo de un gran número de escenarios experimentales, lo que demanda una cantidad de instrumental de monitoreo ambiental y periodos de acopio de información superiores a los disponibles.

II. MARCO TEORICO

El presente apartado del documento revisa la literatura especializada relacionada con el problema de investigación a fin de situarlo dentro del campo de conocimiento y construir una perspectiva teórica pertinente (Hernandez et al., 2006). La revisión bibliográfica comprendida en el abordaje del problema de investigación se ilustra taxonómicamente de la siguiente manera:

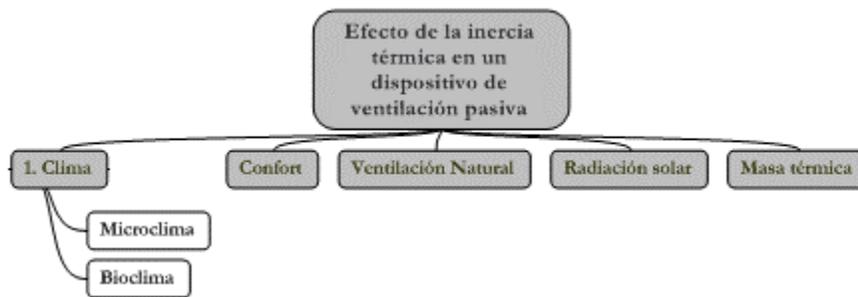


Figura 14. Taxonomía del marco teórico de investigación. Fuente: Elaboración propia.

2.1 EL CLIMA Y EL AMBIENTE TERMICO

El medio ambiente natural constantemente se ve sujeto a cambios en los que impacta la actividad vegetal, animal y humana. A través del diseño y el empleo de artificios, el hombre incide en él suplantando sus benefactores al construir su hábitat; el éxito de ello depende en gran medida del nivel tecnológico empleado y la cantidad de energía para hacerlo en conjugación con el conocimiento del entorno físico del que deliberadamente se apropia (Azpeitia, 1990)

Dentro de los elementos del ambiente destaca el clima; denominación dada al proceso de interacción de masa y energía entre la superficie terrestre y la atmosfera, determinado por el desigual reparto de la energía aportada por el sol en el planeta. El clima pues está emparentado con la latitud de los sitios y atendiendo a su escala distingue entre macroclimas y microclimas y para su estudio la meteorología trata de fenómenos cambiantes, mientras la climatología explica un aspecto más general bajo el uso de medias estadísticas. Esto permite clasificar y establecer correlaciones, subtipos de clima y distribuciones de los mismos a partir de datos reportados por las estaciones meteorológicas, formando así sistemas de clasificación, el más reconocido es el establecido por Vladimir Köppen en 1918 (E. García, 1967; Tudela, 1980)

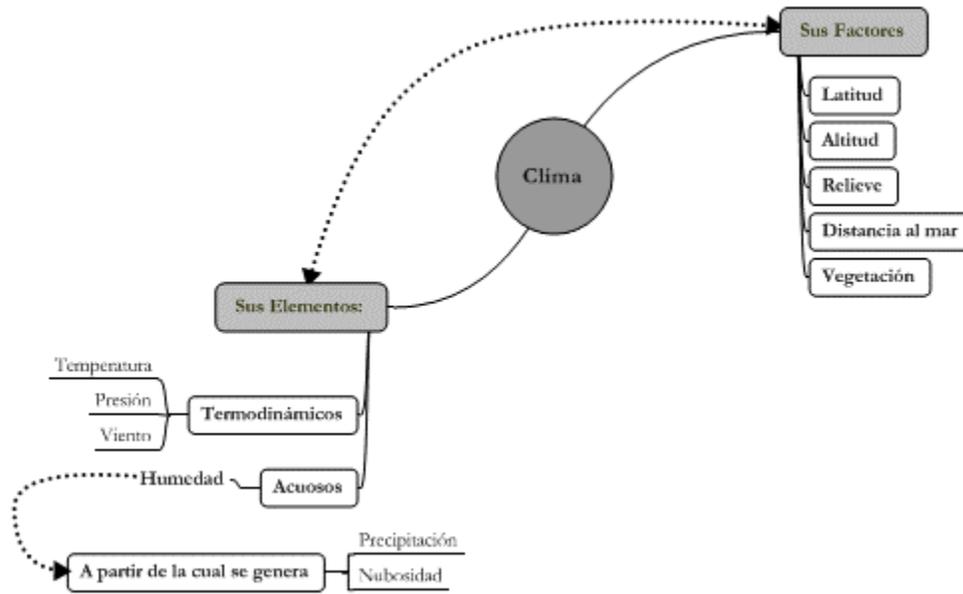


Figura 15. Composición del clima según García. Fuente: Elaboración propia.

La figura 14 precisa los factores y elementos del clima que determinan el comportamiento del tiempo climático. Supeditados principalmente por la latitud de la localidad, aunque dependiente de correlaciones entre factores que afectan a elementos termodinámicos del aire atmosférico y su contenido de vapor de agua, tal es el caso de la altitud local y su presión atmosférica. Este complejo fenómeno es descrito por la climatología y ciencia del suelo (Gandullo, 2000; OMM, 2006).

A nivel mundial, la información sobre la atmósfera terrestre, su interacción con los océanos, el clima que produce y la distribución resultante de los recursos hídricos es provista por la OMM¹⁶; organismo adjunto a la ONU. En él, los servicios meteorológicos de los 131 países miembros construyen bases de datos útiles tanto a la agricultura, aviación, navegación como al medio ambiente en general. Como resultado de ello se creó el Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC) empleando un sofisticado sistema de monitoreo ambiental constituido por:

- 15 satélites espaciales.
- 100 boyas fondeadas/600 a la deriva.
- 3,000 aeronaves y 7,300 embarcaciones.
- 10, 000 estaciones meteorológicas terrestres.

¹⁶ Organización Meteorológica Mundial

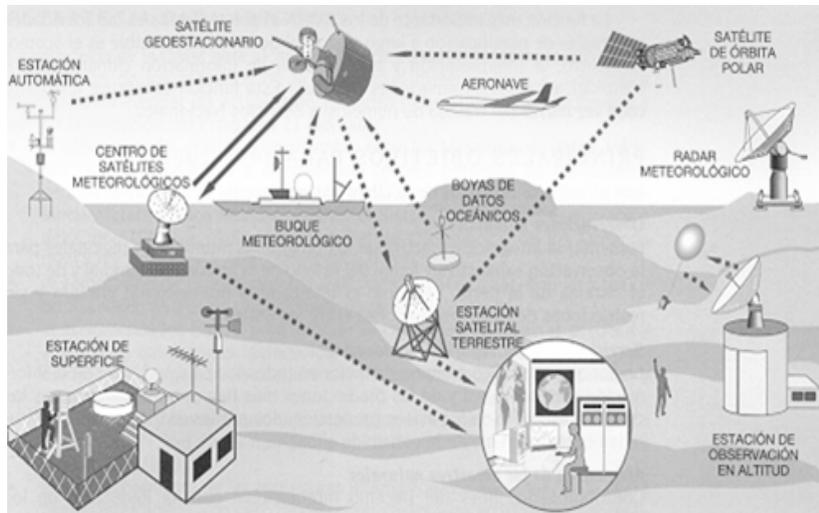


Figura 16. Esquema del Sistema Mundial de Observación del Clima. Fuente: OMM

Así pues, por medio del sistema mundial de información se procesan datos computarizadamente por medio del uso de modelos matemáticos basados en leyes físicas para elaborar miles de mapas, productos digitales, pronósticos meteorológicos y de calidad del aire, predicciones climáticas, evaluaciones de los riesgos, así como servicios de alerta temprana para el público de todo el mundo. Además, se elaboran otros productos para una amplia gama de usuarios de distintos sectores económicos y científicos en beneficio de procesos de diseño, planificación y operatividad. Dentro de ellos destacan aquellas aplicaciones usadas para la producción de energía, procesos de hidratación y deshidratación, esterilización, limpieza, reacciones químicas, etc.

Estas aplicaciones integran modelos matemáticos y empíricos con sistemas de información geográfica (GIS*), que principalmente abordan fenómenos de radiación solar, dada su importancia en el comportamiento del clima; destacan bases de datos como el Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA*), la información meteorológica y de energía solar (SSE*) de la NASA¹⁷, así como la provista por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de EE.UU (NREL) o la información de alta resolución de alta resolución disponible de SolarGIS o el sofisticado Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (PVGIS) que provee información de Europa, África y Asia. La siguiente tabla compara las bases de datos bajo aspectos de aproximación técnica, exactitud, frecuencia de actualización entre otros.

¹⁷ Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de E.U.A.

*Acrónimos comúnmente conocidos en inglés.

Tabla 3. Aspectos técnicos de las principales bases de datos climáticos del mundo.

Comparación de aspectos técnicos de bases de datos climáticos.						
Concepto	Bases de datos de información climática					
	SolarGIS	Meteonorm	NASA	NREL	PVGIS+	
Fuente de alimentación.	Satélite	Estaciones terrestres y Satélites.	Satélite	Satélite	Satélite	
Cobertura	Global	Global	Global	América, África, Asia y China	Europa, medio oriente y África.	
Resolución espacial.	Hasta 90x90m	Interpolación	110 x 110 km	40 x 40 km	1 x 1km	
Resolución temporal	15/30 min.	Mensual	Mensual	Mensual	Mensual	
Periodo de tiempo	1994/1999 hasta hoy (18+/13+años)	1960 a 1991 1995 a 2005 (32+10 años)	1983 a 1993 (10 años)	1985 a 1991 (6 años)	1998 a 2011 (14 años)	

Nota: PVGIS+ es mejor conocido como PVGIS-CMSAF
Fuente: Elaboración propia en base a SolarGIS.

Dentro de los logros de las anteriores bases de datos, destaca la posibilidad de algunas para modelar información en series horarias –de 8760 valores- de hasta 40 variables climáticas en cualquier localidad de mundo por medio modelos estocásticos de interpolación espacial; la información satelital y terrestre es sintetizada para representar tendencias y patrones de información climática registrada en grandes periodos de tiempo comúnmente conocido como normales climatológicas.

Pese a que esto es posible apenas hace algunas décadas, distintas asociaciones se han esforzado en detallar sus series de información climática horaria según distintos intereses; tal es el caso del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) que actualizó su serie de datos denominada TMY¹⁸ o el laboratorio de simulación WATSUN que creó los sets de datos CWEC, al tiempo que la Comisión de Energía de California diseñó sus series de datos denominada CTZ, mientras que ASHRAE presenta el set de datos WYEC2 para representar patrones típicos climáticos, o el formato IWEC usado para cálculos energéticos (Crawley, 1998). Y con ello, aunque existe una enorme variedad de formatos fuente como el CityUHK, CSWD, CTYW, ETMY, IGDG, IMGW, IMS, INETI, ISHRAE, ITMY, KISR, NIWA, RMY, SWEC o SWERA, en su mayoría ordenan variables climatológicas como se expresa en la figura a continuación.

¹⁸ Año típico meteorológico por sus siglas en inglés.

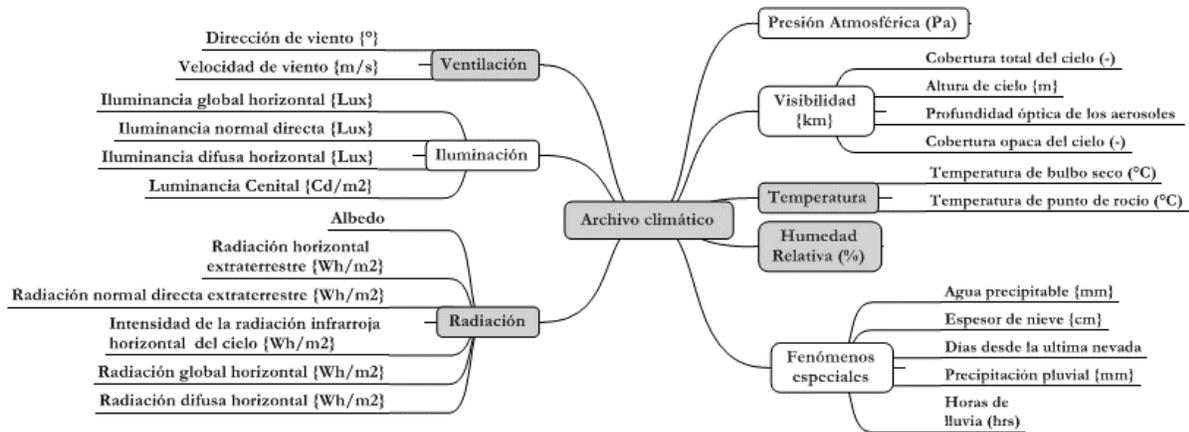


Figura 17. Información climática en archivos TMY. Fuente: Elaboración propia

No obstante, la información presente en la gráfica anterior es usada con particular interés en el análisis y simulación del desempeño energético de edificios, pues conjuga variables de alto impacto como: a) humedad relativa, b) temperatura, c) radiación solar y d) régimen de viento en el concepto de cargas térmicas aplicable a los edificios. Lo anterior ha conducido el desarrollo y sofisticación de los estándares de desempeño térmico requerido para los edificios alrededor del mundo, así como al diseño bioclimático de los mismos. La adecuada selección de series de tiempo climático que provean fieles condiciones límite en estas aplicaciones es de vital importancia, puesto que los términos de “*temperaturas exteriores de diseño*” o los “*grados-día*” no resultan inadecuados en estos procesos.

Aunque dentro de esta dinámica se ha logrado clasificar tres tipos de información climática horaria: Series de datos multianuales, semanas típicas o días representativos, diversos autores coinciden en la practicidad de usar series horarias para construir un año típico meteorológico, por lo que han abordado los métodos más comunes para seleccionar años típicos meteorológicos: el método de año de prueba de referencia (TRY) y el método del año típico meteorológico (TMY) definidos 1976 y 1981 respectivamente; mientras que el primer método construye la información climática de un año entero por medio de la selección del mes más representativo en una serie de años, el segundo selecciona el año con el comportamiento más representativo en su conjunto (Hui, 1996; J. Rodríguez, 2006).

Este tipo de selección metodológica de información climática detallada posibilita el estudio de la dicotomía existente entre variables climatológicas de manera analítica; como muestra la definición entre la humedad relativa y la calidad del aire interior según diversos autores.

La información climática diaria puede asociarse con estudios epidemiológicos y clínicos para decidir si el aire introducido al edificio debe ser tratado. Según investigaciones recientes, la humedad relativa entre el 30-60% es apropiada para mantener una aceptable calidad del aire interior. (Wolkoff & Kjaergaard, 2007).

Zhao comenta en sus estudios los efectos negativos de las estrategias de acondicionamiento en los ambientes interiores dentro de los climas cálidos, mediante la reconsideración de un concepto de confort y aceptabilidad, nuevas estrategias de acondicionamiento usando la fluctuación de viento basado en la respuesta del humano a un ambiente térmico transitorio, información relativamente acotada por Givoni una década antes (Givoni, 1994; Zhao, Sun, & Ding, 2004)

Esto ha sido a últimas fechas bien integrado en estándares que tratan las condiciones del ambiente térmico para la ocupación humana, así como para definir las anteriores en edificios ventilados naturalmente por medio de modelos adaptativos con aceptabilidad para un 80 o 90% de los ocupantes, puesto que la postura de los autores supone que la facultad de los habitantes de modificar el ambiente interior de las edificaciones a fin de lograr condiciones de habitabilidad redundan significativamente en la apertura de vanos para permitir la ventilación natural y con ello la interacción con el ambiente térmico exterior (ASHRAE, 2010b; de Dear & Brager, 2002).

Por otra parte, también ha sido posible conformar mapas, métodos bioclimáticos y herramientas virtuales que correlacionan las variables climáticas con modelos de confort térmico de los espacios interiores, además de diagnósticos bioclimáticos para espacios exteriores. Bajo este tenor, la Universidad de California automatizó herramientas basadas en ambientes gráficos que ayudan a especialistas a entender el clima local y establecer lineamientos de diseño, la más conocida es Climate Consultant©, que traslada información climática horaria en gráficas y recomendaciones de diseño de envolventes edilicias bajo preceptos de sostenibilidad y eficiencia energética (Castillo, Bojorquez, & Luna, 2014; Liggett & Milne, 2014; Vissilia, 2009).

La dicotomía referida redundan en la exaltación de estrategias de diseño; en este caso la ventilación natural como una de las estrategias selectivas de más impacto, particularmente en distintas localidades y diferentes periodos climáticos. Si bien se ha convertido en axioma el principio de diseño que dicta que los edificios deben de ser diseñados a razón de una ventilación natural controlable, existen muy variados efectos de la ventilación en los edificios.

2.1.1 *El viento como elemento de transferencia térmica*

El análisis contextual del clima permite evaluar los recursos naturales del sitio como elementos de intercambio energético; el viento es una variable determinante, pues como ya se ha mencionado, después de la radiación, la convección es el medio de transferencia energética de mayor impacto en las edificaciones. Pese a la aleatoriedad de su disponibilidad, para su correcta incorporación en ambientes edificados es vital conocer su dirección, velocidad, frecuencia, turbulencia y ráfaga; información precisada comúnmente por estaciones meteorológicas terrestres (Brown, 1994; Fuentes, 2004; Yarke, 2005a).

El efecto de la ventilación en los ambientes térmicos interiores ha sido ampliamente estudiado, desde los estudios de los hermanos Olgyay en 1963 se describe la ampliación del rango de confort por medio de la ventilación unilateral o cruzada; en la primera, la flotación térmica y la presión inducida por el viento son las únicas fuerzas impulsoras de la ventilación, mientras que en la segunda, el flujo varía según la diferencia de presión en las aberturas cuando es (Dascalaki, Santamouris, Argiriou, & Helmis, 1995).

A últimas fechas, las estadísticas de energía de la OCDE¹⁹ muestran que entre 30 y 50% de la energía primaria es consumida por edificios no industriales. De este, tanto como el 50% es disipado por el edificio por las corrientes de aire salientes; así pues, entre más eficientes térmicamente sean los edificios, la proporción de pérdidas de energía asociada con la ventilación será más significativa, ya que la ventilación es el mecanismo de disipación de energía más dominante. (Liddament & Orme, 1998). Respecto al viento y la marcha horaria, Santamouris presentó un método para calcular la contribución de energía de las técnicas de ventilación nocturna basada en el principio de *temperatura de punto de balance* que usa algoritmos para predecir la carga térmica, para su validación se usó el software TRNSYS® (Santamouris, Mihalakakou, Argiriou, & Asimakopoulos, 1996).

Debido a que una amplia tasa de ventilación es requerida, la tasa de transferencia de calor interior-exterior puede también estimarse con el propósito de aumentar la comodidad en los usuarios a altas temperaturas y climas particularmente húmedos, así como la capacidad térmica del edificio para reducir el uso de climatización artificial (Fordham, 2000; Indraganti, Ooka, & Rijal, 2012)

¹⁹ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

Si bien, el diseño de edificaciones ventiladas naturalmente debe derivar del estudio detallado de las corrientes de viento que es gobernado por diferencias de presión debido a fuerzas de convección en configuraciones de espacios interiores. Algunos estudios analíticos han demostrado que es posible validar dichas configuraciones bajo la perspectiva de modelos de turbulencia RANS²⁰ con alto número de Reynolds a través del contraste con monitoreos experimentales. El estudio de Stavrakakis en CFD analiza la distribución de velocidad y temperatura en cámaras de prueba considerando ángulos de incidencia del viento para identificar patrones de flujo en arreglos asimétricos de entrada-salida del flujo de viento. Los resultados demostraron que la rugosidad del terreno y el ángulo de incidencia no tienen impacto significativo en la fluctuación de los resultados calculados con respecto a los reales. (Stavrakakis, Koukou, Vrachopoulos, & Markatos, 2008).

Por su parte, Priyadarsini estudió los edificios departamentales de rápido crecimiento conocidos como HDB que emplean la ventilación natural como eje rector de diseño arquitectónico. La investigación emplea un modelo a escala de un departamento de 4 habitaciones en un túnel de viento, para determinar el desempeño del sistema *stack*. Se realizaron pruebas con 4 modelos con diferentes tamaños y en diferentes ubicaciones del departamento, el estudio mostró que el *stack* pasivo que incorporaba el principio de convección natural en el flujo de viento no aumenta la velocidad de viento en el departamento, sin embargo, el *stack* activo que operaba basado en el efecto de succión inducido por un ventilador adaptado al final del dispositivo conlleva a un significativo aumento en la velocidad del viento en las habitaciones (Priyadarsini, Cheong, & Wong, 2004).

En Japón, Akashi Mochida implementó un sistema de simulación para evaluar la ventilación cruzada y protección solar de árboles como elementos de enfriamiento pasivo en bajo la influencia de la distribución espacial del microclima circundante de los edificios; de tal manera, se consideró la transferencia de calor por medios convectivos en CFD y radiativos a través del cálculo de superficial en muros bajo el efecto de sombreado de árboles. Dichas variables fueron consideradas cargas térmicas en el software de simulación en estado dinámico TRNSYS® y definidas como condiciones de frontera en una simulación macroscópica. Los resultados mostraron que el análisis macroscópico de los ambientes circundantes tiene un efecto significativo en el ambiente térmico interior de los edificios (Mochida, Yoshino, Miyauchi, & Mitamura, 2006).

²⁰ Sistema de ecuaciones Reynolds Averaged Navier-Stokes

Investigadores malayos han abordado los efectos de la ventilación nocturna como técnica de enfriamiento en ambientes térmicos interiores de edificios residenciales ubicados en zonas cálido-húmedas. Para ello se identificaron los patrones de uso típico de ventanas y aires acondicionados, que posteriormente, las temperaturas operativas conseguidas son comparados con la aplicación de estrategias de ventilación natural, se demostró que debido a la pérdida evaporativa de calor de los ocupantes inhibe el efecto de enfriamiento convectivo en este clima, a tal grado que la ventilación indiscriminada durante todo el día resulta mejor que la nocturna; esto hace patente la necesidad de estrategias de deshumidificación (Kubota, Chyee, & Ahmad, 2009).

La ventilación natural unilateral es frecuente en diseños emplazados en entornos urbanos; en Grecia se experimentó con 52 configuraciones distintas y se les comparó con 6 modelos de predicción de ventilación. Se analizaron las características de transferencia de masa y energía hasta proponer un nuevo modelo para predecir las tasas de ventilación.

Modelos empíricos simplificados como el de DeGids y Paff de 1982 ya ofrecía correlaciones generales para calcular el flujo del aire; estas eran expresiones que combinaban el flujo de aire, la diferencia de temperaturas, velocidad del viento y tiempos de fluctuación, pero son deducciones experimentales que no tienen validez general. Modelos de predicción de red como AIRNET (Walton, 1988), BREEZE (B.R.E., 1992), COMIS (Feustel et al., 1990), ESP (Clarke, 1993), NORMA (Santamouris, 1994) y PASSPORT-AIR (Dascalaki y Santamouris, 1995), combinan el efecto del viento y la flotación para calcular las diferencias de presión; sin embargo desprecian los efectos de la turbulencia y las presiones de fluctuación correspondientes.

Los modelos antes previstos se basaban en el balance de flujo de masa en una zona según se describe la siguiente ecuación:

$$\sum_{i \approx 1}^{j_m} \rho_{im} Q_{im} = 0 \quad (13)$$

Ecuación 13. Balance de flujo de masa

Donde Q_{im} es la tasa de flujo volumétrico a través de la trayectoria de flujo i del nodo m y ρ_{im} es la densidad del flujo de aire a través de la trayectoria de flujo i del nodo m (kg/m^3).

Este experimento se desarrolló en la planta baja del edificio multinivel del IMPAE²¹ que fue estudiado en un túnel de viento, mientras que un modelo a escala 1:125 fue probado bajo un bajo un amplio rango de velocidades y direcciones de viento a fin de aislar los flujos de aire alrededor del edificio, se monitorearon diversos puntos al interior en comparación con los diversos modelos de predicción citados. La investigación encontró que cuando las fuerzas de inercia son más importantes que las fuerzas gravitacionales existe una diferencia sistemática entre los valores teóricos y los experimentales, por lo que se propuso un factor de corrección basado en los factores climatológicos y geométricos de cada configuración (Dascalaki et al., 1995).

Conceptos como el *porcentaje de ventilación apropiada* de espacios habitables han resultado de la incorporación de modelos de análisis de ventilación en zona-nodo y CFD, este parámetro gradúa el nivel de reducción del periodo de climatización artificial por medio del uso de la ventilación natural como estrategia de diseño bioclimático en un espacio logrado con el tratamiento adecuado de la envolvente arquitectónica y la optimización de flujos de viento. (Bastide et al., 2006).

Posteriores investigaciones en Reino Unido detallaron la aplicabilidad de la ventilación nocturna en edificios de oficinas climatizados empleando la denominada “*NiteCool: herramienta de prediseño de ventilación nocturna para oficinas*” que combinaba modelos de cálculo eólico del manual de CIBSE²² y de simulación térmica con el método 3TC del software del B.R.E.²³; en donde cada cuarto es modelado como una red de capacitancias y conductancias usando 3 constantes de tiempo extraídas de información climatológica. Para estimar el potencial de ahorro energético y el mejoramiento de las condiciones de confort mediante la aplicación de enfriamiento mediante ventilación nocturna a fin de 1) reducir las temperaturas máximas extremas, 2) reducir las temperaturas interiores matutinas, 3) reducir de las temperaturas en losas y sobre todo 4) el adecuado manejo del periodo de retraso térmico en la envolvente arquitectónica. Los resultados indicaron que existe un ahorro energético de 5%. (Kolokotroni & Aronis, 1999).

Debido a la complejidad de la fenomenología involucrada en los estudios de ventilación de confort y sus implicaciones en el desempeño energético de las edificaciones se ha hecho patente la necesidad de herramientas más sofisticadas, esto se hace patente en la siguiente tabla resumen.

²¹ Instituto de Meteorología y física del ambiente atmosférico del Observatorio nacional de Atenas.

²² Chartered Institute of Building Service Engineers/Instituto Colegiado de Ingenieros de Instalaciones

²³ Building Research Establishment/Instituto de Investigación en Edificios.

Tabla 4. Tabla resumen: El viento como elemento de transferencia de energía.

Estudios e investigaciones				
Autor/País	Palabra clave*	Elementos del estudio y/o investigación		
		Enfoque	Escala	Diseño: Herramientas
Dascalaki, et. al Grecia (1995)	Ventilación simple	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Cuasi-experimental: monitoreo en sitio y modelo a escala
Santamouris, et. Al Grecia (1996)	--	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: software TRNSYS®
Liddament Reino Unido (1998)	Impacto energético, Ventilación, Infiltración	Cualitativo	Objeto arquitectónico	Sistemático: Recolección de documentos
Kolokotroni Reino Unido (1999)	--	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: software NiteCool®
Fordham Reino Unido (2000)	--	Cualitativo	Objeto arquitectónico	Sistemático: Recolección de documentos
Priyadarsini Singapur (2004)	Ventilación natural, Efecto stack.		Objeto arquitectónico	Cuasi-experimental: modelo a escala y túnel de viento.
Mochida Japón (2006)	Cargas térmicas, Ventilación cruzada, Sombreado	Cuantitativo	Objeto arquitectónico y contexto.	Experimental: software TRNSYS® y software CFD desarrollado por el propio autor
Bastide Francia (2006)	CFD, Diseño bioclimático	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: software CFD no identificado
Stavrakakis Grecia (2008)	Turbulencia, Convección, Ventilación cruzada	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Cuasi-experimental: monitoreo en sitio Experimental: software CFD Fluent®
Kubota Malasia (2009)	Ventilación nocturna, Enfriamiento pasivo	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Cuasi-experimental: monitoreo en sitio y encuestas a usuarios
Indraganti India (2012)	Movimiento de aire, Humedad, Método Griffiths	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Cuasi-experimental: monitoreo en sitio y análisis estadístico

Nota: * Traducidas del inglés.

2.1.2 La radiación solar como mecanismo de transferencia térmica

Dentro del ambiente térmico, el elemento de mayor aportación energética es la radiación electromagnética de energía proveniente del sol, su caracterización permite la correcta toma de decisiones en cuanto a producción eléctrica fotovoltaica, sistemas solares pasivos, así como criterios de diseño bioclimático. Conocer las irradiaciones global, directa y difusa en superficies horizontales e inclinadas es de vital importancia. Es preciso por ello contar con bases de datos que permitan diseñar, simular y evaluar el desempeño de dispositivos que implican energía solar.

Inicialmente los estudios dedicados a ello estimaban la radiación solar diaria promedio mensual en base a horas de insolación medidas en heliógrafos Campbell-Stokes y posteriormente de manera directa mediante piranómetros de cúpula en estaciones meteorológicas terrestres (Figura 17). Los parámetros meteorológicos normalmente implicados son la HR, TBS, altitud, nubosidad, así como la heliofanía relativa. Esta última estima la cantidad de radiación dispersada por la atmosfera; i.e. radiación difusa como un parámetro primordial de correlación con la radiación global.

El registro in-situ de datos de radiación solar en planos horizontales es relativamente sencillo en las estaciones meteorológicas, no obstante, el cálculo de la radiación solar total sobre una superficie inclinada es un problema que excede la traslación geométrica de valores horizontales, ya que el cálculo de la componente difusa es un problema que depende de su distribución en el hemisferio celeste, de las condiciones de nubosidad y de la turbiedad atmosférica. Por tal motivo, se han desarrollado modelos de estimación que pueden clasificarse en isotrópicos y anisotrópicos. Los modelos isotrópicos asumen que la intensidad de la radiación difusa del cielo es uniforme, mientras que los anisotrópicos consideran que la distribución de la radiación difusa del cielo es irregular, una clasificación de los más usados se presenta en la tabla 5.



Figura 18. Heliógrafo de Campbell-Stokes (izquierda) y piranómetros de cúpula (derecha). Fuente: www.tiempo.com

Tabla 5. Modelos de cálculo de radiación en superficies inclinadas.

Modelos de radiación	
Modelos Isotrópicos	Modelos anisotrópicos
<ul style="list-style-type: none"> • Isotrópico • Liu-Jordan (1963) • Jiménez-Castro (1986) • Koronakis (1986) • Tian et al. (2001) • Badescu (2002) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bugler (1977) • Temps-Coulson (1977) • Hay (1979) • Klucher (1979) • Skartveit-Olseth (1979) • Hay-Davies (1980) • Steven-Unsworth (1980) • Willmot (1982) • Ma-Iqbal (1983) • Gueymard (1987) • Pérez et al. (1987) • Reindl et al. (1990) • Pérez et al. (1990) • Muneer (1997) • Olmos et al. (1999)

Nota: Elaboración propia en base a Armendáriz (2014).

Así pues; valiéndose de lo anterior, estudios en la Universidad de Córdoba, España evaluaron el rendimiento del modelo isotrópico de Liu & Jordan (1960) y los anisotrópicos de Hay & Davies (1980) y Reindl (1990) para estimar por medio de la irradiación difusa horaria en superficies inclinadas en relación a datos registrados en sitio durante 3 años el *promedio mensual horario de energía utilizable*. Los valores calculados se contrastaron con los valores registrados a través de métodos estadísticos RMBE²⁴ y RRMSE²⁵. Los autores concluyeron que los tres modelos subestimaron el cálculo de la radiación, sin embargo, el modelo de Reindl alcanzó los resultados más precisos pese a la simplicidad del modelo (Posadillo & López Luque, 2009).

El mismo año, se presentó en la India otro estudio comparativo de campo en relación a 4 modelos de cálculo de la irradiación en planos inclinados. Para delimitar la desviación de los valores de radiación difusa calculados con los modelos Circunsolar, Isotrópico, Klucher y Hay y Davies se emplearon los métodos estadísticos RMSE, MBE²⁶ y MPE²⁷. El esquema anisotrópico de Klucher reportó el porcentaje de error más bajo, pues incorpora condiciones de nubosidad del cielo en su modelo matemático (Pandey & Katiyar, 2009).

²⁴ Relative Mean Bias Error/ Media del error relativo de sesgo.

²⁵ Relative Root Mean Square Error/ Media cuadrática del error relativo.

²⁶ Mean Bias Error/Media del error de sesgo.

²⁷ Mean Percentage Error/ Media del porcentaje de error.

En Padova, Italia se analizaron 4 modelos para el cálculo de radiación global y difusa en planos inclinados: Liu-Jordan (1963), Klucher (1979), Pérez (1990) y HDKR de Reindl (1990) a partir de la integración de correlaciones experimentales de fracción difusa como variables de cálculo en modelos de transposición anisotrópica. Se estudió la incidencia solar en planos inclinados a 20° y 40° orientados al sur y 45° y 65° al este; los resultados se analizaron con métodos estadísticos RMSE, MBE, MAE²⁸ y ME²⁹. Se concluyó indicando que las correlaciones de fracción difusa empleada sobreestiman los datos medidos en sitio; esto es, explicado a través de la correlación de Erbs et al. (1982) indica que entre más grande el ángulo azimutal, mayor la imprecisión (Padovan & Del Col, 2010). Mientras que al medir la irradiación global los modelos anisotrópicos de Pérez et al. y Reindl et al. (HDKR) mostraron valores más cercanos, son altamente recomendados cuando solo se dispone de la radiación global horizontal (Padovan & Del Col, 2010).

Los estudios comparativos iniciales se dedicaron a verificar el desempeño de modelos para estimar la radiación global total diaria en superficies inclinadas. Otros trabajos realizan éste tipo de comparativos a partir de mediciones realizadas en uno o varios planos inclinados. Tal es el caso de Nijmeh y Mammlook que analizaron el desempeño de dos modelos de cálculo de radiación en planos inclinados (Hay y Liu-Jordan) a partir de datos medidos en radiación en una superficie horizontal y sobre una superficie inclinada a 45° con orientación sur en Amman, Jordania. Los métodos estadísticos utilizados para el análisis de los resultados fueron MBE Y RMSE. El modelo de Liu-Jordan tuvo una variación entre 3.6% y 25.7% y el modelo de Hay entre 3.5% y 25.6% del RMSE. Para el MBE, el modelo de Liu-Jordan dio resultados ligeramente mejores en los meses de verano y el modelo de Hay tuvo mejor desempeño en el resto de los meses. Los autores concluyen que a pesar de la limitada disponibilidad de datos, los modelos son recomendables para proponer una orientación óptima (Nijmeh & Mamlook, 2000).

Tras una revisión estadística y una comparación cualitativa por medio de índices estadísticos de los modelos de cálculo de irradiación solar horaria en planos inclinados; isotrópicos (Liu-Jordan, Koronakis, Jiménez-Castro, Badescu y Tian) y anisotrópicos (Bugler, Temps-Coulson, Klucher, Ma-Iqbal y Reindl) Mehleri et al., identificaron el de mejor desempeño para la región de Atenas. Una vez identificados los modelos de Tian y Badescu como los de mejor desempeño, fue posible desarrollar una red neuronal artificial que predice la irradiancia solar global en planos inclinados.

²⁸ Mean Absolute Error/Media del error absoluto.

²⁹ Mean Error/Media del error.

Lo anterior fue posible usando como constantes empíricas los datos monitoreados in-situ de radiación extraterrestre irradiación solar global en superficies inclinadas, el ángulo cenital solar, y el ángulo de incidencia solar en planos inclinados (Mehlerer, Zervas, Sarimveis, Palyvos, & Markatos, 2010).

Por su parte y de la misma forma, componentes de la irradiación solar, tales como radiación difusa, global y directa en el plano horizontal fueron usados como datos de entrada en un complejo estudio de validación de siete modelos de radiación solar empleados para estimar las cargas térmicas en fachadas según los códigos de simulación energética de edificios; los modelos de radiación empleados fueron: (1) cielo isotrópico, (2) Klucher, (3) Hay–Davies, (4) Reindl, (5) Muneer, (6) 1987 Pérez, y (7) 1990 Pérez. Los códigos de simulación energética incluidos: EnergyPlus, DOE-2.1E, TRNSYS-TUD y ESP-r. Con fines de validación, se empleó información de radiación solar concerniente a un periodo de 25 días. Loutzenhiser discute finalmente las implicaciones de las irradiancias solares estimadas en los modelos de cálculo y el comportamiento la carga térmica de enfriamiento prevista para los edificios (Loutzenhiser et al., 2007).

En Egipto, se analizaron los valores horarios medios de radiación solar total, directa y difusa incidente en planos inclinados, el periodo registrado (1990-210) con pirómetros Eppley de alta precisión y piranómetros SBS equipados con bandas de sombreado calibrados según la referencia radiométrica mundial (WRR). Los resultados medidos y analizados según los índices estadísticos MBE, RMSE, MPE y R^2 fueron comparados con los estimados en distintos ángulos de inclinación: 0, 15, 30, 45, 60, 75 y 90° según 11 modelos de radiación. El estudio concluye indicando que los valores más aproximados resultan de utilizar el modelo de Hay, Skartveit-Olset y Pérez et al. (Khalil & Shaffie, 2013).

Gueymard estudió la incertidumbre en la predicción de la radiación solar en superficies inclinadas con particular interés en aplicaciones de ingeniería, para ello usó sistemas de seguimiento a dos ejes y superficies fijas inclinadas a 40° y 90° , para ello comparó los modelos de radiación de ASHRAE, Gueymard, Hay, Isotrópico, Klucher, Muneer, Pérez, Reindl, Skartveit y Temps para el cálculo de la irradiación sobre una superficie inclinada a partir de datos medidos de radiación global en un plano con orientación sur y 40° de inclinación y un seguidor solar a 2 ejes en las instalaciones del NREL en Golden, Colorado. Los datos se obtuvieron de la combinación de pirheliómetros avanzados que proveen medidas óptimas de radiación directa y difusa para simular finalmente el valor de radiación global con una ecuación fundamental.

Se usaron modelos de transposición comunes: Carr (2005), Loutzenhiser et al. (2007), entre otros; los resultados se analizaron estadísticamente y se concluyó afirmando que la mayor parte de incertidumbre en la predicción de superficies inclinadas en sitios soleados deriva de modelos empíricos no medidos localmente (Gueymard, 2009)

Por su parte, en el Laboratorio de Energía Solar de La Universidad Ben-Gurión del Néguev se comparó el desempeño relativo de 11 modelos para el cálculo de radiación en superficies inclinadas a partir de datos medidos para una superficie inclinada a 40° al sur con 4 tipos de cielo (despejado, parcialmente nublado, nublado y cualquier tipo de cielo-general). El análisis de datos se elaboró a partir de SD³⁰, AS³¹, t-statistic y K&R (Kudish-Rahima). Se señala que el modelo de Muneer se comporta de manera estable ante las condiciones de cielo nublado, mientras que el de Ma-Iqbal fue el mejor para las condiciones de cielo parcialmente nublado y despejado. En cuanto a las condiciones generales, el modelo de Ma-Iqbal fue el que obtuvo datos más precisos, seguido por el modelo de Pérez (Evseev & Kudish, 2009)

Cucumo et al. evaluaron cuatro modelos de radiación en planos inclinados (Isotrópico, Hay-Davies, HDKR – Hay, Davies, Klucher y Reindl- y Pérez 1990) con 5 diferentes modelos de correlación para la división de los componentes de haz de radiación y radiación difusa. En general, las desviaciones medias estuvieron en un rango de 10% (con excepción de la orientación norte con un 20%) para todos los modelos. En la orientación sur el más preciso fue el modelo Isotrópico, en la orientación oeste el mejor fue el modelo de Hay y Davies y en la orientación norte, el mejor fue el modelo de Pérez 1990. A pesar de que en general el modelo que reportó mejor desempeño fue el de Pérez 1990, los autores comentan que una correcta elección del modelo de transposición es más importante que la elección del modelo de radiación para planos inclinados. (Cucumo, De Rosa, Ferraro, Kaliakatsos, & Marinelli, 2007).

Como es apreciable, en su totalidad las investigaciones abordan cuantitativamente el cálculo de la componente difusa de la radiación en planos inclinados con distintas orientaciones, las tendencias muestran la utilidad de integrar constantes empíricas del sitio a los modelos para obtener aproximaciones más precisas y poder a su vez predecir por medio de simulación el comportamiento de tecnologías, dispositivos o edificaciones como se ilustra en la tabla siguiente.

³⁰ Sum of Deviation/Suma de desviaciones.

³¹ Accuracy Score/Grado de precisión.

Tabla 6. Tabla resumen: Modelos de cálculo de irradiación solar como elemento de transferencia de energía.

Estudios e investigaciones.			
Autor/País	Palabra clave*	Elementos del estudio y/o investigación	
		Escala	Diseño: Herramientas/Modelos
Nijmeh et. al Jordania (2000)	Modelo isotrópico, anisotrópico	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo en sitio y pruebas estadísticas RMSE y MBE/Mod. (LJ) y (Ha).
Diez- Mediavilla et al. España (2005)	Radiación solar difusa.	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas RMSE y MBE/ Mod. de (Mn), (Re), (Pe) y (TC).
Cucumo et. al Italia (2007)	Superficies inclinadas.	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo en sitio y pruebas RMS/ Modelos (Iso), (HD), HDKR y (Pe).
Loutzenhiser et. al EE.UU. (2007)	Validación empírica, Análisis de incertidumbre	Objeto arquitectónico	Experimental: Simulación energética en Energy Plus®, DOE 2.1E®, TRNSYS-TUD y ESP-r®/ Mod. (Iso), (Kl), (HD), (Re), (Mn) y (Pe).
Evseev et. al Israel (2009)	Gradiente de modelos	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas RMS/ Mod. (Ol) y (Olr).
Gueymard et.al EE.UU. (2009)	Irradiación, Reflectancia, Albedo	Superficies inclinadas	CE*: monitoreo y pruebas MBE y RMSE/ Mod. ASHRAE, (Gm), (Ha), (Kl), (Mu), (Re), (Te), (Sk) e (Iso).
Pandey et.al India. (2009)	Radiación solar difusa, Ángulos de variación.	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas estadísticas MBE, RMSE y RPE/ Mod. (CS), (Iso), (Kl) y (Ha).
Posadillo et.al España. (2009)	Radiación solar difusa	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas RMBE, RRMSE/ Mod. (CS), (LJ), (HD) y (Re).
Mehlerli et.al Grecia. (2010)	Función Base Radial (RBF) Red neuronal	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas MBE, RMBE, RMSE y R ² / Mod. (LJ), (Ko), (JC), (Ba), (Ti), (Bu), (TC), (Kl), (Mq) y (Re).
Padovan et.al Italia. (2010)	Medición de la irradiación solar	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas RMSE, MBE, MAE y ME/ Mod. (LJ), (Kl), (Pe) y HDKR.
David et.al Francia. (2013)	Radiación solar difusa, Albedo.	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas NRMSE y NMBE/ Mod. (Ha), (Gm), (SO) y (Pe).
Khalil et.al Egipto. (2013)	Radiación solar, Modelos Isotrópicos.	Superficies inclinadas	CE**: monitoreo y pruebas estadísticas MBE, RMSE, MPE y R ² / Mod. (Ha), (SO) y (Pe).

Notas: * Traducidas del inglés, ** Cuasi-experimental.

(Iso) Isotrópico, (HD) Hay-Davies, (LJ) Liu-Jordan, (Mn) Muneer, (Re) Reindl, (Pe) Pérez, (Te) Temps, (TC) Temps-Coulson, (Kl) Klucher, (Ol) Olmo et al., (Olr) Olmo revisado por Evseev-Kudish, (Gm) Gueymard, (Sk) Skartveit, (CS) Circumsolar, (Ko) Koronakis, (JC) Jiménez-Castro, (Ba) Badescu, (Ti) Tian, (Bu) Bugler, (Mq) Ma-Iqbal, (SO) Skartveit-Olseth.

2.2 LA ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA: LA CONDUCCIÓN TÉRMICA DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

2.2.1 El papel de la masa e inercia térmica

Un sinnúmero de estudios reportan la importancia de la masa como una variable de control en la reducción de cargas térmicas al interior de los espacios; conformada por la envolvente de los edificios, muros divisorios e incluso el mobiliario, esta puede usarse como medio de almacenamiento térmico diurno de descarga nocturna. Particularmente útil durante el invierno, en edificios comerciales puede contribuir con hasta un 20% de ahorro una vez definido el periodo de retraso térmico; la literatura indica que es efectivo si la oscilación térmica exterior es mayor a los 10°C. En este sentido diversos autores han estudiado la distribución, carga y descarga térmica de los materiales, sus propiedades termofísicas: apropiada densidad, alta capacidad térmica, así como un valor de conductividad térmica moderado, al igual que materiales con alta difusividad.

Se distinguen dos casos de distribución y localización de la masa térmica; directa, donde el material recibe la energía de la radiación en muros exteriores y la indirecta: por radiación infrarroja y convección del aire interior a través de cuerpos opacos o muros interiores. Se ha comprobado también que el aislamiento deteriora el desempeño de la masa térmica y que la ventilación ayuda a la pérdida convectiva de calor en la envolvente. La tasa de ventilación nocturna horaria sugerida para tal efecto es de 90 m³/hr por metro cuadrado habitable, según los aspectos de ocupación.

En Grecia se analizó el efecto de la masa térmica en 16 modelos simplificados en donde se estudió la interacción de parámetros denominados CLTD³² y CLF³³ en un método de cálculo propuesto para determinar el impacto de la masa térmica en edificios de envolvente ligera, normal y pesada.

Asumiendo que un edificio de alta masa térmica tiene una baja fluctuación térmica se ha evaluado la efectividad de distintos niveles de masa asociados con técnicas de ventilación y sombreado a fin de disminuir los picos de temperatura interior, se ha logrado determinar que la ventilación térmica tiene efectos significativos solo cuando los edificios tienen alta masa y que se maximiza el impacto cuando cambian los colores de la envolvente modificando así los valores de absorbanza térmica de la misma (Balaras, 1996; Givoni, 1998)

³² Cooling Load Temperature Difference/Diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento

³³ Cooling Load Factors/Factores de carga de enfriamiento.

Años después, Ogoli retomó estos precedentes a través de un modelo de arquitectura paramétrica para establecer una fórmula de predicción de ambientes térmicos interiores en edificios con distinta masa térmica en la franja ecuatorial de Nairobi, en Kenia. Para ello usó cuatro diferentes configuraciones de cubiertas y dos tipos de muros; piedra natural y paneles de madera estableciendo coeficientes de descarga térmica. Los resultados indicaron que esto puede ser determinado por medio de la observación de la TBS, TBH y la TMR (Ogoli, 2003).

Roucoult por su parte propuso una caracterización simplificada de la inercia térmica, como parte de la instalación de un sistema de enfriamiento en verano usando la ventilación de enfriamiento nocturna basado en estudios previos que demuestran la inercia térmica de los edificios y la variación de las tasas de ventilación. El estudio demostró que la noción de masa térmica es insuficiente como medio de incorporación de la inercia térmica en términos de enfoque sobre un sistema de ventilación nocturna, pues es necesaria la observación de los efectos convectivos de la ventilación, especialmente la nocturna (Roucoult, Douzane, & Langlet, 1999).

Shaviv posteriormente calculó la influencia de la masa térmica y la ventilación nocturna en las temperaturas interiores máximas asumiendo que la temperatura interior guarda una relación lineal con la oscilación térmica exterior y las tasas de ventilación nocturna. El estudio simula cuatro escenarios en cámaras de prueba: 1) sin ventilación nocturna, 2) con ventilación natural nocturna, 3) Ventilación forzada nocturna y d) Ventilación forzada nocturna con 4 niveles de masa térmica y tasas de ventilación. La simulación se llevó a cabo en 4 localidades de Israel. Los resultados mostraron que en un clima cálido húmedo es posible una reducción de entre 3 y 6°C en un edificio de alta masa térmica sin necesidad de operar una unidad de aire acondicionado (Shaviv, Yezioro, & Capeluto, 2001).

En contraposición a Shaviv, Yam definió un modelo ideal de edificio naturalmente ventilado que permite un estudio teórico de la masa térmica con el asociamiento no-lineal con la tasa de flujo y temperatura del aire. Cuando la tasa de ventilación es constante, ambos; tanto la tasa de cambio, como la fluctuación de la temperatura interior son determinados por una constante de tiempo del sistema y su coeficiente de transferencia de calor convectivo. Cuando la tasa de ventilación es una función de la diferencia de temperatura interior-exterior, se propone el factor de masa térmica y el parámetro de cambio de aire por coeficiente de transferencia de calor. Este número de masa térmica mide la capacidad térmica, en lugar de la cantidad de masa térmica.

Así pues la fase de cambio de la máxima temperatura interior inducida por el suministro directo de aire exterior es de seis horas. Cuando los edificios son ventilados naturalmente, la masa térmica puede ser usada para regular las temperaturas interiores, reduciendo tanto las temperaturas máximas como amortiguando las oscilaciones. Sin embargo existen al menos dos dificultades significativas asociadas con la ventilación natural y la masa térmica. Primeramente, las tasas de ventilación no son constantes pues la abertura de puertas y ventanas es siempre afectada por la actividad humana. En segundo término, los flujos de ventilación natural también dependen de variables térmicas y cambio el régimen de viento.

El estudio concluye diciendo que es posible diseñar un sistema con un tiempo de predicción del retraso para edificios ventilados usando métodos simplificados. También se demostró que el periodo máximo de retraso sin control es de 6 horas en un edificio, ya sea ventilado natural o mecánicamente, aunque la no-linealidad del sistema no afecta significativamente el comportamiento general. (Yam, Li, & Zheng, 2003).

En California, se formularon estrategias de diseño para la programación de un termostato con una microcomputadora que regulaba el flujo de aire exterior de acuerdo a las necesidades térmicas interiores de enfriamiento por medio de la activación de ventiladores, lo anterior permitió establecer el impacto del tamaño de las ventanas y la masa térmica utilizando variables de desempeño como: la comparación de TBS máxima, el cociente de diferencia de temperatura y el porcentaje de horas con sobrecalentamiento. Los resultados mostraron que este tipo de dispositivos son efectivos y que las variables de mayor afectación son la tasa de ventilación, el límite inferior de confort, la capacidad térmica del edificio y las ganancias solares en las ventanas (La Roche & Milne, 2004).

Yang a su vez demostró la relación entre la masa térmica y el consumo de energía de climatización analizando un modelo de edificio de oficinas con aire acondicionado durante el día y enfriamiento libre durante la noche. Identificó que la constante de tiempo puede reducir efectivamente la carga de enfriamiento hasta en un 60% cuando la constante de tiempo es mayor a 400 horas, sin embargo, cuando es mayor a 1,000 horas la liberación de calor por efecto de la masa puede incrementar la carga de enfriamiento, pues ésta se realiza hasta el día siguiente, por lo que los coeficientes de transferencia de calor interiores y exteriores tienen que ser contrastados adecuadamente.

El modelo simplificado de edificio permitió examinar los beneficios horarios de usar la masa térmica y la ventilación nocturna. El análisis cuantificó la dependencia de la carga de enfriamiento en las propiedades térmicas de los materiales de la masa térmica, incluyendo la constante de tiempo y los coeficientes de transferencia de calor convectivo (interior-exterior) como los que producen mayor impacto. Los resultados mostraron que solo la apropiada cantidad de masa térmica, combinando propiedades térmicas y transferencia de calor convectivo aunado a condiciones climáticas favorables beneficia directamente (Yang & Li, 2008).

Por su parte Zhou en China estudió los efectos de transferencia de calor entre la masa térmica exterior y la denominada interior por medio de tres distintos métodos de acoplamiento entre ambas y la ventilación. Para ello utilizó seis configuraciones de muros de distinta masa con y sin aislamiento bajo el entendimiento en que los muros exteriores son generalmente estructuras multicapa que reciben la incidencia solar directa por lo que debe de estimar la temperatura sol-aire bajo la ecuación donde T_o es la TBS exterior, α el índice de absortividad de la radiación solar, I es la radiación solar global y ΔQ_{ir} la radiación infrarroja adicional debido a la diferencia entre la temperatura del aire exterior y la temperatura del cielo aparente.

Ecuación 14. Ecuación para el cálculo de la temperatura sol-aire

$$T_{sa} = T_o + \frac{(\alpha \cdot I - \Delta Q_{ir})}{h_o} \quad (14)$$

El estudio concluye señalando la influencia de las distintas configuraciones de muros exteriores en muros interiores adiabáticos a fin de orientar a arquitectos en los criterios de diseño de masa térmica interior que propicie un ambiente térmico favorable (Zhou, Zhang, Lin, & Li, 2008).

Más recientemente, estudios han llevado a cabo monitoreo de edificios con alta masa térmica en distintas localidades de climas áridos de Israel; Sde Boqer a fin de predecir la temperatura interior y el desempeño interior bajo la comparación de estrategias de diseño distintas: enfriamiento evaporativo directo conocido como sistema IEPCS usado en Maracaibo. Lo anterior por medio de la sustitución de condiciones ambientales como límites de frontera en el sistema. Los resultados demostraron el mejor desempeño del enfriamiento evaporativo por encima de la masa térmica en climas áridos bajo el uso del modelo de confort de ASHRAE (Krüger, González Cruz, & Givoni, 2010).

Tabla 7. Tabla resumen: La masa térmica y sus efectos en la ventilación.

Estudios e investigaciones				
Autor/País	Palabra clave*	Elementos del estudio y/o investigación		
		Enfoque	Escala	Diseño: Herramientas
Balaras, Grecia (1996)	Masa térmica Cargas de enfriamiento	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Simulación térmica con 16 modelos matemáticos*.
Givoni, EE.UU (1998)	Masa térmica Enfriamiento pasivo	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Cuasi-experimental: Monitoreo interior, estaciones meteorológicas terrestres.
Roucoult, Francia (1999)	Constante de tiempo, Ventilación nocturna.	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Analítico, modelos matemáticos y ecuaciones.
Shaviv Israel (2001)	Masa térmica Ventilación nocturna.	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Modelos de simulación horaria ENERGY
Ogoli Kenia (2003)	Energía, Confort, Masa térmica	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Cuasi-experimental: Cámaras de prueba ambiental.
Yam China (2003)	Masa térmica Ventilación natural	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Modelos matemáticos.
La Roche EE.UU. (2004)	Masa térmica Confort Ventilación	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Cámaras de prueba ambiental, sensores y termostatos inteligentes.
Yang & Li China (2008)	Carga térmica Ventilación nocturna	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Modelo matemático con ecuaciones de balance térmico.
Zhou et al China (2008)	Carga térmica Método de respuesta armónica	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Métodos de transferencia de calor: método de respuesta armónica, de factor de respuesta y de función de transferencia Z.
Krüger Brasil (2010)	Monitoreo térmica Masa térmica	Cuantitativo	Espécimen	Cuasi-experimental: Cámaras de prueba ambiental.

Nota: * Traducidas del inglés

*ASHRAE, Athienitis, Vida-Kreider, BRE, Catani, Givoni-Balcomb, Givoni-Hoffman, Kusuda, LANL, van der Mass-Roulet, Mathews-Richards, Passport Plus, PMDG, Seem, Shaviv, SPIEL, Steady State

2.2.1 Procedimientos de caracterización de las propiedades termofísicas de los elementos constructivos.

Una vez definido el clima como agente de aportación energética, así como sus principales medios de transmisión, es indispensable la estimación de la transferencia de dicha energía a través de los materiales constructivos. El adecuado manejo de la masa térmica de los materiales constructivos como elemento de diseño pasivo, permite retrasar las temperaturas mínimas y máximas extremas ambientales, así como reducir su rango de oscilación al llegar al interior de las edificaciones a fin de conservar las condiciones de habitabilidad térmica. Dado que este tipo de medidas se toman en la fase inicial de diseño, es indispensable contar con información accesible acerca de las características de los materiales de construcción a emplear.

Por esto, es necesaria la caracterización mecánica y termodinámica de los materiales, estudios recientes inclusive plantean la importancia de la selección adecuada de materiales en su vida útil incorporando análisis adicionales de ciclo de vida y diseño regenerativo³⁴ (Silvestre et al., 2014).

Son cada vez más frecuentes las aproximaciones multidisciplinarias que recurren a información inventariada de los materiales de construcción para abordar la influencia económica y ambiental de su selección adecuada como componentes estructurales, térmicos, e incluso superficiales en las edificaciones sustentables. A través de esquemas selectivos de edificación de sistemas constructivos, es bien sabido que los profesionales de la industria de la construcción también buscan la mitigación del calentamiento global mediante los análisis de los materiales con menores emisiones de dióxido de carbono (Kadir, Marsono, & Balasbanch, 2015; Takano, Hughes, & Winter, 2014).

En pos de lo anterior se han desarrollado estudios para la selección multi-criterio de materiales con sistemas de evaluación de gases de efecto invernadero integrados en los materiales de construcción empleados en edificios verdes con respecto normas internacionales, como en Corea con la norma ISO 14040 (Roh, Tae, & Shin, 2014).

³⁴ También llamada C2C “Cradle to cradle” de la cuna a la tumba.

Para ello es necesario estudiar la eficiencia energética en la creación de ambientes vernáculos; donde el impacto de los materiales de construcción repercute en la generación de microclimas interiores usando métodos tradicionales que sean a la vez sostenibles y ecológicos (Almusaed & Almssad, 2015). Investigaciones en sitios históricos de Italia demuestran a través del software ENVI-MET® como se generan escenarios a partir del uso de materiales de alto albedo, que pueden reducir la carga térmica de los edificios que generan alto estrés térmico a los peatones que interactúan con ellos (Salata, Golasi, Vollaro, & Vollaro, 2015).

Sin embargo, para hablar de lo anterior, para que la selección de materias primas que lleve a la manufactura de materiales, el diseño de sistemas constructivos y su integración en diseños arquitectónicos, es necesario observar las dos vertientes del impacto ambiental y consumo energético de las edificaciones: la energía integrada y la energía operativa. La primera que atiende los flujos del ciclo de vida de los materiales y la segunda que observa la interacción de la envolvente arquitectónica por medio de los materiales de construcción y el medio ambiente físico natural para la generación de los mencionados microclimas.

Como propósito preliminar de este estudio se responde a la necesidad de indagar métodos experimentales asequibles de caracterización térmica de los materiales de construcción como herramienta indispensable en los procesos de toma de decisión en la etapa inicial de diseño en circunstancias en donde es imposible disponer del instrumental sofisticado necesario.

Existe una inmensa cantidad de estudios de caracterización de materiales de construcción, desde aquellos con fines estructurales que aprovechan análisis paleosismológicos que utilizan avanzadas herramientas arqueomagnéticas y de datación radiométrica (Benjelloun et al., 2015), hasta aquellos que pretenden determinar niveles de humedad crítica de los materiales para evitar su deterioro por agentes biológicos (Johansson, Ekstrand-Tobin, & Bok, 2014) que parten de normas como la ASTM C272/C272M12. No obstante, de manera constante, los estudios se centran en la determinación de las propiedades superficiales y mecánicas de los materiales.

No fue hasta fechas recientes que la caracterización de las propiedades térmicas comenzó a ser ampliamente estudiada. Entre las normas que extensivamente han estandarizado la metodología para determinar estas propiedades encontramos la ISO 8302 o la ASTM C177-97, cuyo principio radica en establecer un gradiente térmico en régimen estacionario a un espécimen de espesor conocido con una prueba de placa caliente protegida, lo que involucra rigurosos ambientes de laboratorio (ASTM International, 1997; ISO, 1991).

Por su parte, las normas ASTM C1363-05 e ISO 8990 miden la resistencia térmica total de un espécimen sujeto a un gradiente térmico por medio de un dispositivo de caja caliente. La principal crítica se basa en que se requieren largos periodos de prueba, así como numerosas restricciones normativas aplicables a robustos arreglos experimentales en ambientes controlados que demandan costos elevados y sofisticadas herramientas de ensayo (Derbal, Defer, Chauchois, & Antczak, 2014; ISO, 1994). Otras pruebas como la ISO 8301:1991 están orientadas en el uso de medidores de flujo térmico e involucran la interacción de radiación, conducción y convección aunado a la transferencia de masa; papel especialmente importante en ambientes húmedos; por ello, la interpretación de resultados experimentales requiere sumo cuidado (ISO, 1991).

Otras normas como la ASTM D5334-14 presentan un procedimiento para determinar la conductividad térmica (λ) de suelos o rocas suaves usando un método de transferencia de calor en estado transitorio que solo es aplicable para materiales secos y homogéneos en condiciones de temperatura de entre 0 y 100°C. Utiliza sondas de aguja, por lo que es necesaria la perforación previa de los especímenes, con lo que la calidad de los resultados producidos por la prueba depende en mucho de la instrucción profesionalizada del personal que la ejecuta, así como de su equipamiento y las instalaciones en las que opera (ASTM International, 1997).

En México, las normas oficiales regularmente armonizan con las normas internacionales, la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 por ejemplo, es de carácter voluntario y orienta sus directrices a edificaciones de todo tipo bajo esquemas de consumo energético eficiente mediante el uso de electrodomésticos de bajo consumo eléctrico, ahorradores de agua y para abordar cuestiones de envolvente arquitectónica solo de manera tangencial induce el uso de las normas NOM-020-ENER-2011 y NOM-018-ENER-2011, esta última trata los aislantes térmicos en las edificaciones (Secretaría de Economía, 2013; SEGOB, 2011b; SENER, 2011).

Las normas mexicanas para la determinación de la transmisión térmica en régimen estacionario de materiales termoaislantes NMX-C-181-ONNCCE-2010 y NMX-C-189-ONNCCE-2010 se basan en el uso de medidores de flujo de calor y aparato de placa caliente aislada respectivamente para determinar la conductividad térmica de los materiales. Instruye al fabricante a indicar el valor del material termoaislante a evaluar el espécimen de ensayo a una temperatura media de 24 °C mediante el sometimiento de evaluación de una muestra de 30 x 30 centímetros con un espesor determinable y dos piezas adicionales de verificación con una variación siempre menor al 10% (SEGOB, 2010, 2011a).

Toda normatividad señalada anteriormente necesita instrumental de laboratorio de elevado costo, por lo que diversos estudiosos se han dado a la tarea de desarrollar la simulación experimental como una herramienta poderosa para diseñar un óptimo escenario experimental antes de llevar a cabo pruebas reales; ya que la mejor configuración deriva de la minimización de la función del costo que representa el error promedio en la identificación como función del diseño de las variables. Ya que la construcción material de los posibles experimentos de prueba no es viable debido a la infinidad de posibilidades existentes (Rossi & Pierron, 2012).

Tabla 8. Tabla resumen: Caracterización térmica de materiales constructivos

Estudios e investigaciones				
Autor/País	Palabra clave*	Elementos del estudio y/o investigación		
		Enfoque	Escala	Diseño: Herramientas
ISO ¹ , Suiza (1991)	Medidor de flujo térmico.	Cuantitativo	Espécimen	Experimental: Medidor de flujo térmico en régimen estacionario.
ISO ¹ , Suiza (1991)	Placa caliente protegida.	Cuantitativo	Espécimen	Experimental: Método de placa caliente protegida en régimen estacionario.
ISO ¹ , Suiza (1994)	Caja caliente calibrada	Cuantitativo	Espécimen	Experimental: Método de caja caliente calibrada en régimen estacionario.
ASTM ² EE.UU. (1997)	Placa caliente protegida.	Cuantitativo	Espécimen	Experimental: Método de placa caliente protegida en régimen estacionario.
SEGOB ³ México (2010)	NMX-C-181-ONNCCE-2010	Cuantitativo	Espécimen	Experimental: Medidor de flujo térmico en régimen estacionario.
SEGOB ³ México (2010)	NMX-C-189-ONNCCE-2010	Cuantitativo	Espécimen	Experimental: Método de placa caliente protegida en régimen estacionario.
SENER ⁴ México (2011)	Métodos de prueba	Cualitativo	Espécimen	Descriptivo: Revisión teórica de los distintos métodos de prueba de materiales termoaislantes.
Derbal, et al Francia (2014)	Caracterización térmica Condiciones de frontera	Cuantitativo	Espécimen	Experimental: Modelo matemático de regresión con termopares en arreglo multicapa.

Nota: * Traducidas del inglés, ¹Organización Internacional para la normalización, ²Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, ³Secretaría de Gobernación, ⁴Secretaría de Energía.

2.3 LOS PARAMETROS AMBIENTALES EN LA VENTILACION.

La ventilación natural recae fundamentalmente en las condiciones del medio ambiente exterior, al igual que en aspectos geométricos y físicos del diseño tanto de los espacios a ventilar, como de los dispositivos de ventilación. Para propósitos de la presente investigación se clasificaron a través de la revisión de la literatura los parámetros ambientales determinantes en la ventilación natural en los dos apartados subsiguientes:

2.3.1 Temperatura: convección natural en los dispositivos de ventilación

En este sentido entendemos los efectos convectivos derivados del diferencial de temperatura en estratos de aire que generan fuerzas de succión o forzamiento. Bansal propuso un sistema de acoplamiento de una serie de chimeneas solares con colector de placa plana al sotavento de una torre de viento con sección transversal conectada a cuartos de prueba empleando métodos analíticos de iteración y coeficientes de presión y balance energético en la serie de chimeneas para determinar el diferencial de presión ejercido por ambos dispositivos en conjunto, para ello define una serie de parámetros geométricos y termofísicos. El efecto mecánico y convectivo del sistema presupone un ángulo de incidencia constante y un flujo másico calculado como función de diferentes intensidades de radiación solar. Los resultados mostraron incrementos considerables respecto a una torre de viento convencional, mostrando tasas de flujo másico a partir de una incidencia solar de 200 W/m^2 y particularmente a velocidades bajas de 1 m/s (Bansal, Mathur, & Bhandari, 1994).

Cabe mencionar que el autor considera constantes empíricas extraídas de la literatura y desestima el aspecto de sombreado y de balance térmico en la torre de viento al considerarla exclusivamente como captador eólico, por último utiliza un modelo simplificado de radiación.

Por su parte Hughes estimó el efecto de presión interna y velocidad provocado por el distinto arreglo de las persianas que actúan frente a los vientos dominantes en los dispositivos comerciales conocidos como *windvents* instalados con asiduidad en cubiertas europeas; para ello emplea análisis numéricos por medio código CFD. El interés principal es estudiar bajo la teoría aerodinámica el denominado ángulo de ataque como factor dominante en la separación de microflujos de viento.

Para lo anterior se modelaron escenarios de simulación con arreglos geométricos de inclinación de las persianas del dispositivo en incrementos de 5° en un rango de 10 a 45° con respecto a una incidencia de viento laminar horizontal y un difusor. Bajo el método de volumen finito en FLUENT y el modelo de turbulencia K- ϵ . Los resultados fueron validados con un modelo a escala y demostraron que cuando las persianas tienen una inclinación de 35° con los parámetros y condiciones de frontera establecidos (Hughes & Ghani, 2010).

Debido al auge de las fachadas acristaladas de doble piel, no solo por aspectos de conservación de energía, sino por su posibilidad de ofrecer buenas condiciones de temperatura interior es que se han desarrollado investigaciones como la de Ding en Japón, en la que se propone un prototipo de edificación con un atrio en su lado norte, mientras que en el lado sur una fachada acristalada de doble piel y un espacio de almacenaje de calor llamado chimenea solar es albergado en la cubierta de la fachada. Para analizar este modelo a escala Ding se auxilió del uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para demostrar el incremento en la tasa de ventilación propiciada por el diferencial de temperaturas generadas por el atrio y el canal de viento de la fachada acristalada de doble piel con resultados significativos. (Ding, Hasemi, & Yamada, 2005)

Por su parte, Burek y Habeb reportaron en investigaciones experimentales sobre transferencia de calor y flujo de masa en calentadores de aire termosifónicos, tales como muros Trombe y chimeneas solares. Para ello destinaron un canal de viento abierto al final y de costados cerrados ensamblado a un colector solar o chimenea de aproximadamente un metro cuadrado. Para el manejo de ambientes controlados se suministró una entrada de calor en un rango de 200w a 1000w y la profundidad del canal se encontraba entre los 20 y 110mm . Se mostró que el flujo de aire en el canal fue una función tanto de la entrada de calor, como de la profundidad de canal y que la eficiencia térmica del colector solar fue una función tan solo del suministro de calor, mas no de la profundidad del canal (Burek & Habeb, 2007).

A diferencia de lo propuesto por Bansal, el autor del presente documento propone la evaluación del recurso solar incidente bajo un modelo de radiación anisotrópicos para determinar el potencial de ventilación a través de la extracción pasiva de un modelo de chimenea de placa plana; esto es particularmente importante debido a la dinámica real de aportación energética del medio ambiente térmico en distintas temporadas climáticas donde participan de manera combinada los efectos de la radiación electromagnética y el enfriamiento-calentamiento convectivo a causa de los vientos dominantes de la localidad en cuestión.

Para lo anterior se utilizó un archivo climático generado por algoritmos de interpolación espacial en el software Meteonorm® en formato de año típico meteorológico que después fue tratado en procesadores de radiación según el modelo anisotrópicos de Pérez integrados en el software de simulación TRNSYS, este modelo es el que mejor se ajusta según la literatura a las latitudes cercanas al ecuador. Finalmente se lograron establecer herramientas de diagnóstico útiles para validar la correcta la inclinación de la placa colectora de la chimenea solar a razón del máximo recurso solar, este tipo de herramientas ha sido extrapolado como elemento preliminar de análisis de energías fotovoltaicas.

Los resultados monitoreados durante una semana representativa en un modelo a escala instalado en la cubierta de una cámara de prueba mostraron que el dispositivo es capaz de generar velocidades de extracción similares a una brisa ligera de hasta 0.6 m/s y que el desempeño del mismo es 45% más efectivo durante el día; en total fue posible la generación de 0.24 cva/hr en las condiciones de prueba (Gonzalez, Gomez, Luna, Escobar, & Esparza, 2015).

Recientemente, se ha trabajado en la integración y aplicación de sistemas de enfriamiento con torres de viento incorporando HTD³⁵ y HHTD³⁶ que permiten el enfriamiento latente del aire cálido del exterior por medio de elementos de alta conductividad que forman parte de un sistema multiseccionado de evaporación, condensación y transición adiabática que conduce fluidos en un serpentín cerrado. En sus estudios, Calautit se asiste de la simulación de modelos CAD en CFD de usando diversos modelos de viscosidad a través del código FMV³⁷ con distintos algoritmos en régimen estacionario provistos en el software ANSYS FLUENT®. Los resultados regularmente son armonizados con maquetaciones a escala 1:10 en un túnel de viento para validar experimentalmente el análisis numérico. Los resultados mostraron que la velocidad promedio interior se reduce hasta en 52% al usar el HTD y que su capacidad de enfriamiento se reduce a medida que aumenta la velocidad del viento en el sistema, velocidades de 1 a 2 m/s mostraron una disminución de hasta 12 K, la siguiente figura muestra una secuencia lógica de uno de los trabajos del autor en cuestión (Calautit, Hughes, Connor, & Shahzad, 2015; Calautit & Hughes, 2015, 2014).

³⁵ Heat Transfer Devices/Dispositivos de transferencia de calor.

³⁶ Horizontally-arranged Heat Transfer Devices/ Dispositivos de transferencia de calor de montaje horizontal.

³⁷ Finite-Volume Method/Método de volumen finito usado para representar y evaluar ecuaciones diferenciales parciales en forma de ecuaciones algebraicas (LeVeque, 2002; Toro, 1999).

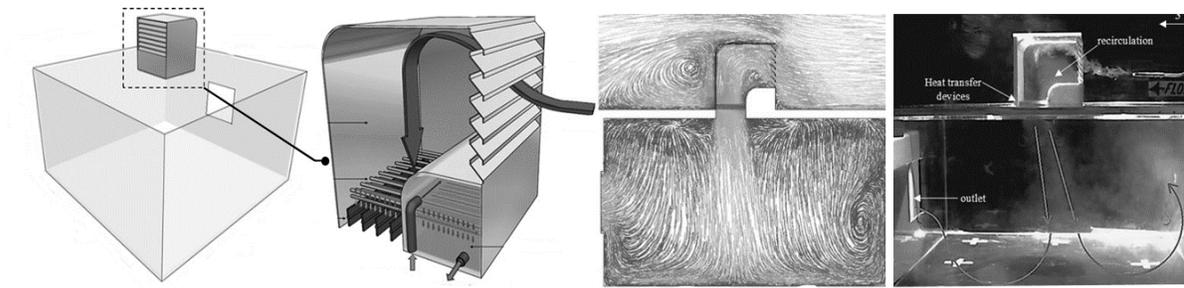


Figura 19. Integración de HTD en torres de viento. De izquierda a derecha: modelo CAD, Esquema 3D del dispositivo, vectorización de velocidades en CFD y túnel de viento Fuente: Calautit, J.K. (2014).

Tabla 9. Tabla resumen: Dispositivos de ventilación natural basados en la convección.

Estudios e investigaciones				
Autor/País	Palabra clave*	Elementos del estudio y/o investigación		
		Enfoque	Escala	Diseño: Herramientas
Bansal, India (1996)	--	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación térmica con modelos matemáticos.
Ding, Japón (2004)	Fachada de doble piel, Chimenea solar.	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	Experimental: Modelo experimental a escala y simulación de CFD en software no especificado.
Burek, Escocia (2007)	Muro Trombe, Chimenea solar	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Modelos a escala en ambiente controlado.
Calautit Reino Unido (2014)	Torres de viento HTD	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación de CFD en FLUENT® y visualización de trazas en túnel de viento con mod. esc. 1:10.
Calautit Reino Unido (2015)	--	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación de CFD en FLUENT®.
Calautit Reino Unido (2015)	Torres de viento HHTD	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación de CFD en FLUENT®.
González México (2015)	Chimenea solar, Ventilación por extracción	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Herramientas de diagnóstico TRNSYS y modelo experimental a escala.

Nota: * Traducidas del inglés.

2.3.2 Presión: dirección y velocidad de viento en los dispositivos de ventilación.

Pese a que existen países con climatología continental muy distinta, existe un acotado número de dispositivos y elementos de ventilación natural, basados –cuando menos- en alguno de los tres ejes operativos de diseño originados mecánicamente a través de vectores de dirección y magnitud de las corrientes de viento asociadas a la teoría circunscrita en el principio de Bernoulli, estos son:

- La captación.
- La conducción.
- El forzamiento.

Dichos elementos son empleados para incidir habitualmente tanto en las envolventes, como en los usuarios por medio del enfriamiento pasivo. Para los propósitos de este estudio se observan con especial atención las torres de viento y los captadores eólicos por encima de otros dispositivos de ventilación natural señalados en la [figura 5](#) del capítulo I. La perspectiva histórica y geográfica de los mismos se recapitula en la tabla 10 mostrada en páginas posteriores de este apartado.

A fin de conformar una visión crítica, este apartado contrasta los enfoques del revisionismo histórico, cultural, técnico y científico presentado previamente por estudiosos destacados. Mehdi Bahadori, estudioso de la Universidad de Shiraz ya proponía durante la década de 1980 un diseño mejorado de torres de viento para enfriamiento pasivo y ventilación natural partiendo de una perspectiva histórica, pero aportando elementos de análisis de momento, masa y energía en su propuesta. El autor presume en las conclusiones de su estudio que su análisis teórico es también útil como guía de diseño para sistemas pasivos en áreas cálidas y áridas (Bahadori, 1985).

A'zami por su parte indaga en los aspectos técnicos de las torres de viento en la tradición constructiva de Irán; sin embargo, dirime algunos elementos del diseño a razón de los distintos tipos de torres de viento que existen y su relación con algunos parámetros climáticos de las localidades donde estas se erigen, así como los componentes estructurales, constructivos y algunos de los aspectos geométricos más destacados de las mismas; tales como la simetría, forma de la planta, tamaño y dimensión, entre otros. No obstante, su estudio es meramente descriptivo y resulta en ocasiones de particular interés para los profesionales iraníes (A'zami, 2005)

No así con el estudio presentado por Vázquez, quien establece una desambiguación internacional de la denominación técnica existente entre los *Bádgers*, *Malkafs*, chimeneas de enfriamiento, mirillas y trampillas de respiración sustentado en una clasificación según las funciones bioclimáticas y el países de origen de las mismas; partiendo de los captadores de viento en Egipto, Pakistán e Irak hasta las torres de viento en Irán y la península arábiga. El autor hace un recorrido en el mundo árabe y persa mostrando la arquitectura vernácula emblemática, al tiempo que señala las repetitivas limitaciones interpretativas de los autores anteriores ante fenómenos como la eficiencia energética y los vacíos existentes en cuanto a la evaluación experimental (Vazquez, 2007).

Hughes por su parte discrepa de Vázquez señalando que los *Malkafs* no son otra cosa que torres de viento unidireccionales; aborda en su artículo “El desarrollo de las torres de viento comerciales de ventilación natural” una revisión extraordinaria de la existencia de estos elementos no mecánicos a partir de las variaciones microclimáticas resultantes del aprovechamiento de factores climáticos externos como velocidad, dirección y temperatura de viento, el efecto de barlovento y sotavento en las estructuras, afirmando que estas propician un 76% más de ventilación que la originada por la convección natural.

Incorre en un detallada deconstrucción del diseño de sistemas de torre de viento abordando aspectos como la dimensión y posicionamiento de aberturas ante el régimen de viento y su relación con el efecto Bernoulli ante el estrechamiento de las secciones y el diseño de los planos divisores interiores e incluso estudia la altura aconsejable del canal de la torre auxiliado de un análisis de la turbulencia utilizando el CFD y túneles de viento para afirmar que ante un diseño inapropiado la torre puede funcionar como chimenea solar, lo que va en consonancia con lo planteado por el tesista del presente documento. Completa la revisión con una mención de los sistemas que incorporan el *Bádger* a sistemas que persiguen técnicas de enfriamiento evaporativo, que se asisten de chimeneas solares, patios interiores, cubiertas curvas e incluso tecnología fotovoltaica y sistemas de control de amortiguamiento con persianas presentes en las versiones prefabricadas que se comercializan con éxito en Europa, algunos ejemplos se aprecian en la figura 19.

El estudio concluye con una detallada tabla resumen que divide los sistemas tradicionales y modernos de TV, los sistemas pasivos a los que pertenecen, sus aplicaciones, limitaciones y los caudales típicos alcanzados, así como los rangos de variación térmica alcanzados en los estudios de caso. La investigación presentada por el autor es quizá la más completa de la que se pudo echar mano en materia de revisión (Hughes, Calautit, & Ghani, 2012).

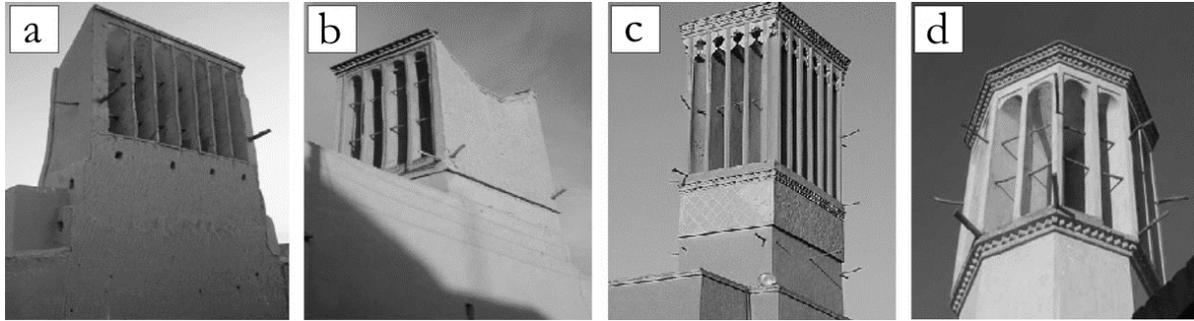


Figura 20. Torres de viento tradicionales con diferente numero de aberturas a) unidireccional, b)bidireccional, c) tetradireccional, d) octaédricos. Fuente: Hughes, Calautit, Ghani (2012).

Recurrentemente, se discuten conceptos sobre los atributos de estos sistemas, enfatizando el poder del viento como energía renovable, su baja incorporación en edificaciones y su drástico menosprecio en climas tropicales. Algunos estudios los categorizan en tres vertientes: vernáculos, modernos y supermodernos, distinguiendo entre *Malkafs* a los captadores eólicos bidireccionales y *Bâdgirs* a los elementos multidireccionales y mono-estacionales, cuyo uso se inhibe en invierno, fenómeno abordado por Policastro que propone un modelo de impacto meteorológico que provee una predicción del impacto mensual, estacional y anual sobre las torres de enfriamiento con distintas aberturas (Policastro, Assessment, Division, Dunn, & Carhart, 1994).

En ese tenor, estudios hidrodinámicos hablan de la ineficiencia de los *Bâdgirs* con mayor número de aberturas y la relación entre el ángulo de incidencia del viento y el flujo de aire inducido en la torre. Saadatian precisa que la configuración bidireccional con un ángulo de incidencia cero es la que produce los más altos flujos de aire en una torre y que a mayor velocidad en el viento captado, menor la temperatura inducida (Khodakarami & Aboseba, 2015; Saadatian, Haw, Sopian, & Sulaiman, 2012).

Para analizar otro aspecto de la eficiencia de un *Bâdgir* bidireccional, Montazeri presenta una aproximación semi-empírica con datos experimentales extraídos de pruebas de visualización de trazas de humo en túneles de viento con modelos analíticos y a escala, a los que incorpora CFD para estudiar coeficientes de presión y flujo volumétrico a razón de ángulos de incidencia distintos. Los resultados indicaron que a menor perpendicularidad de incidencia del viento, disminuye uniformemente la presión y aumenta la turbulencia interior de los espacios. Su estudio demostró una similitud razonable entre los resultados experimentales, analíticos y simulados en CFD (H. Montazeri, Montazeri, Azizian, & Mostafavi, 2010; Hamid Montazeri, 2011).

Tabla 10. Captadores eólicos y torres de viento perspectiva en el tiempo y espacio.

Clasificación de los dispositivos según sus funciones bioclimáticas			
Dispositivo	Tipo	País	Funciones y características principales
Captadores de viento <i>Malqaf o Malkaf</i>	Modelos Vernáculos	Egipto. Pakistán Irak.	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos de mediana altura incorporados a la cubierta. • Captación unidireccional diurna y extracción nocturna de aire. • Inducción y conducción del viento. • Formación de circuitos de ventilación con sótanos (<i>Sirdap</i>). • Presentan modificaciones geométricas en la cubierta del cabezal. • Postigo superior como elemento de desactivación operativa.
	Modelos Vernáculos	Irán. Península Arábica. Emiratos Árabes. Unidos. Qatar. Argelia.	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos de significativa altura y edificación individual • Captación multidireccional diurna y extracción nocturna de aire • Inducción, conducción y humidificación por medio de enfriamiento indirecto (enfriamiento sensible). • Formación de circuitos de ventilación con canales de agua (<i>Qanat</i>), fuentes (<i>Salsabil</i>) y sótanos (<i>Sirdap</i>). • Usado para ventilación de cisternas de almacenamiento de agua. • Uso de la masa térmica a través del uso de deflectores intramuros. • Rejillas inferiores como elementos de desactivación operativa.
Torres de viento <i>Bâdgir, Baud-geer</i>	Modernos	Reino Unido. Qatar.	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositivos automatizados. • Cuentan con sensores de HR, TBS, ruido, flujo de aire y CO₂. • Incorporan tanto ventilación como iluminación natural.
	Supermodernos	Australia España. Emiratos Árabes Unidos.	<ul style="list-style-type: none"> • Diseños aerodinámicos integrados a la envolvente edificatoria. • Incorporación de turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos de generación de energía eléctrica. • Uso asistido en sistemas con materiales de cambio de fase.

Elaboración propia en base a Vázquez (2007), Hughes (2012) y Saadatian (2012).

En Madrid, por otro lado se ha analizado el potencial de enfriamiento evaporativo de un dispositivo cilíndrico denominado “*air tree*” en el espacio abierto de zonas pedestres; el mismo cuenta con una altura de 18 metros y 25 de diámetro con 9 torres de viento individuales de tallos (toberas) de un metro de diámetro y 12 de altura. La metodología de la investigación consistía en establecer en régimen estacionario condiciones de frontera simuladas por velocidades de entre 1 y 9 m/s con dirección perpendicular usando una base climática conformada de una estación climática terrestre cercana, estableciendo una completa optimización paramétrica de flujo volumétrico, optimización energética, térmica, eólica y la influencia de flujo hídrico y eólico, número y geometría de aberturas y altura de la tobera.

Una de las aportaciones significativas del estudio es el desarrollo de un modelo de predicción térmica que estima la reducción gracias al sistema en un máximo de 8 °C. Las conclusiones mostraron que entre más grande el área de descarga, menores la velocidad alcanzada y que la eficiencia máxima se logra con una sola entrada de aire.(Soutullo, Sanjuan, & Heras, 2012)

Otros autores líderes coinciden en que los diseños de torre comparativos que incluían mecanismos de enfriamiento evaporativo han mostrado un mejor desempeño que el diseño convencional, lo que significa que pueden ser incorporados contribuyendo con un ahorro significativo en climas áridos con altas cargas térmicas de refrigeración (H. Montazeri & Azizian, 2008)

El estudio de Dehghani-sanij propone un sistema de torre de viento instalado en la cima de los edificios orientados a razón del viento dominante con un sistema de seguimiento rotativo, así como la incorporación de una chimenea solar y un captador eólico. Los estudios previos han demostrado que el campo de presión interno y la tasa de flujo de aire inducido son fuertemente influenciados por la geometría de la cubierta de las torres. Así pues, se propone un diseño de TV de doble entrada con una columna que puede abrirse/cerrarse, una columna con rieles que permite la desinstalación de la cabeza de la torre y ventanas. Y se hace la propuesta de diseños asistidos usando chimeneas solares o ventanas sobre diseños de habitaciones ideales.

Las conclusiones sugieren posibles aplicaciones de torres de viento en edificios comerciales auxiliadas de otros dispositivos como el Kolah-farangi y canales subterráneos, este tipo de dispositivos siempre está acompañado del uso de sistemas de humidificación. Así como la integración de materiales permeables que favorecen la iluminación cenital y la adhesión de dispositivos auxiliares según el clima de la región y el potencial que ofrezcan los parámetros climáticos (Dehghani-sanij, Soltani, & Raahemifar, 2015).

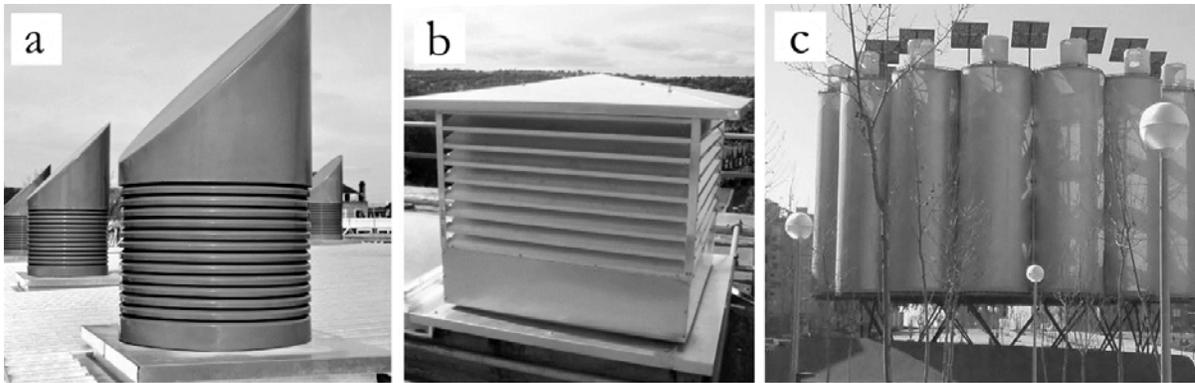


Figura 21. Torres de viento modernas a) *circular roof mounted*, b) *square roof mounted*, c) *air tree*. Fuente: Hughes, (2012) y Soutullo (2012).

Los estudios más progresivos se han desarrollado en Reino Unido, debido al amplio uso de las torres de viento comerciales y lineamientos de la BSI³⁸ para promover la ventilación natural. Hughes ha examinado ampliamente la relación existente entre los aspectos mecánicos y convectivos de los flujos en prototipos comerciales de torres usando softwares comerciales de simulación de fluidos como FLUENT® y Gambit® con modelo de turbulencia k-e, aunado de las ecuaciones de Navier-Stokes. En un reciente estudio construye un escenario de simulación a través de una configuración de dominio multinivel de cálculo por medio de método numérico de FEM³⁹ en donde establece exhaustivas condiciones de frontera a partir de regiones de cálculo detalladas y un proceso de adaptación de la malla de cálculo para reducir el error (%).

Todo lo anterior fue validado con un modelo experimental *full-scale* seleccionando condiciones climáticas similares a las de la simulación y normalizando resultados. Las conclusiones del estudio señalan que el efecto de convección es insignificante sin un paso de aire exterior adicional al de la torre y que cuando se añade alguno en combinación con la convección la eficiencia incrementa en un 47 % (Hughes & Cheuk-Ming, 2011).

En México se estudió la distribución de flujo y transferencia de calor en distintas configuraciones de acoplamiento de TV en edificios usando simulaciones numéricas en CFD con información climática normalizada como condición de frontera para un clima árido y semi-árido. Los resultados llevaron a la selección de configuraciones para la captación franca de vientos dominantes, como variables a razón de la distribución, turbulencia y velocidad interior alcanzada.

³⁸ British Standard Institution/Institución británica de normalización.

³⁹ Finite Element Method/Método de los Elementos Finitos.

El estudio concluye proponiendo una configuración conformada por la relación ideal entre el diseño curvo de entrada de viento y la localización superior –cercana a la cubierta- de la inyección o paso de viento al interior del espacio estudiado. Los valores resultantes de temperatura de bulbo seco y humedad relativa fueron coordinados para delimitar la condición de confort higrotérmico según el modelo de confort de Olgay, lo que permite presumir que es posible proveer condiciones de confort en cerca del 50% del área interior analizada (Reyes, Moya, Morales, & Sierra-Espinosa, 2013).

Cabe resaltar que el modelo citado presenta cierto grado de obsolescencia y es aplicado comúnmente para exteriores, lo que desvirtúa un poco la intención de los autores al incorporarlo como elemento concluyente; sin embargo es una valiosa aportación que como la siguiente tabla muestra no se integra en la gran mayoría de las investigaciones.

Tabla 11. Tabla resumen: Dispositivos de ventilación natural basados en la presión.

Estudios e investigaciones					
Autor/País	Palabra clave*	Elementos del estudio y/o investigación			
		Enfoque	Escala	Diseño: Herramientas	
Bahadori, EE.UU. (1985)	--	Cuantitativo	Dispositivo	Analítico: matemáticos	Modelos de balance térmico.
Policastro, EE.UU. (1994)	Torre de enfriamiento	Cuantitativo	Dispositivo	Analítico: impacto meteorológico.	Modelos de
A'zami, Irán (2005)	--	Cualitativo	Dispositivo	Descriptivo: estado del arte.	Revisión del
Vázquez México (2005)	Torre de viento	Cualitativo	Dispositivo	Descriptivo: estado del arte.	Revisión del
Bahadori, EE.UU. (2008)	Torre de viento	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: modelos a escala real.	Monitoreo en
Montazeri, Irán (2008)	<i>Band-geer</i> Coeficiente de presión	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: trazas de humo en túnel de viento de circuito cerrado.	Visualización
Montazeri, Irán (2010)	<i>Band-geer</i> Coeficiente de presión	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: trazas de humo en túnel de viento y Simulación de CFD en FLUENT®	Visualización
Attia, Bélgica (2009)	<i>Malkaf</i> Enfriamiento pasivo	Cualitativo Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: trazas de humo en túnel de viento de circuito cerrado.	Visualización

Estudios e investigaciones

Autor/País	Elementos del estudio y/o investigación			
	Palabra clave*	Enfoque	Escala	Diseño: Herramientas
Montazeri, Irán (2011)	Torres de viento multi-abertura.	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Visualización de trazas de humo en túnel de viento y Simulación de CFD en FLUENT®
Hughes, Emiratos Unidos (2011)	CFD Árabes Persianas Windvent®	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación de CFD en FLUENT® con Gambit® y modelo <i>full-scale</i> .
Maleki Irán (2011)	Torre de viento	Cualitativo	Dispositivo	Descriptivo: Revisión del estado del arte.
Montazeri, Irán (2011)	Torres de viento multi-abertura	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Visualización de trazas de humo en túnel de viento y Simulación de CFD en FLUENT®
Hughes, Reino Unido (2012)	Torre de viento	Cualitativo	Dispositivo	Descriptivo: Revisión del estado del arte.
Soutullo, España (2012)	Torre de viento evaporativa.	Cuantitativo	Urbana	Experimental: Modelos teóricos, modelo de predicción térmica en TRNSYS y simulación de CFD en FLUENT®
Saadatian, Malasia (2012)	Torre de viento, Eficiencia	Cualitativo	Dispositivo	Descriptivo: Revisión del estado del arte.
Reyes, México (2013)	Torre de viento, Enfriamiento pasivo	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación de CFD en FLUENT®
Hosseinnia, Irán (2013)	Torre de viento, Particiones	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación de CFD en Open FOAM® e información experimental.
Dehghani-sanij, Canadá (2015)	CFD Persiana	Cualitativo	Dispositivo	Descriptivo: Revisión del estado del arte y proposición de un diseño tridimensional.
Khodakarami, Canadá (2015)	Torres de viento, CFD	Cuantitativo	Dispositivo	Experimental: Simulación de CFD en FLUENT® con Gambit®

Nota: * Traducidas del inglés.

2.4 LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.

En últimas décadas ha cobrado gran auge el CFD como herramienta para el estudio de la ventilación, entendiéndose esta como la aplicación de la mecánica de fluidos bajo el uso de métodos numéricos y algoritmos para resolver la interacción de fluidos con superficies complejas a través de la simulación computarizada; pese a que permite la incorporación de software, la verificación de los resultados se suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala. El método consiste en discretizar una región de un modelo tridimensional –usualmente- creando lo que se conoce como malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño, dicha dinámica es mostrada en la figura 22.

Estudiosos en China han usado el CFD para analizar un CTM⁴⁰ considerando la geometría de un cuerpo humano femenino en posición sedente para estudiar el microambiente alrededor del cuerpo humano con y sin un sistema de ventilación personalizada. En la simulación se aplicó un modelo $k-\epsilon$ y se estimó el flujo de la ventilación personalizada con la norma ASHRAE 55-1992. Los resultados demostraron que la máxima velocidad del aire observada en la habitación por encima de la cabeza del cuerpo humano sentado fue de 0.25 m/s. el coeficiente convectivo de transferencia de calor del cuerpo humano fue de 4.95 W/m²K, con la temperatura ambiente media en torno a 24°C y una temperatura del aire de la ventilación personalizada de 20°C, la temperatura más baja del aire inhalado fue de 25.9°C cuando se consigue el máximo nivel de reducción de exposición a contaminantes. (Gao & Niu, 2004).

Wong y Heryanto evaluaron el comportamiento de un dispositivo activo de efecto stack con el objetivo de determinar su potencial en residencias en Singapur. Se contempló un modelo de construcción típico de cuatro habitaciones de 100 m² y 3 metros de altura. Por otro lado, el modelo para el túnel de viento se realizó a una escala 1:5 con plástico transparente y madera contrachapada. Las variables consideradas fueron dimensión de 15 x 15 centímetros ó 40 x 40 centímetros del dispositivo; la cantidad (1 ó 2) y ubicación del dispositivo; puerta abierta o cerrada; velocidades de viento de 1.2 m/s o en calma y; el ventilador del dispositivo con velocidad de 5.5 m/s o apagado.

⁴⁰ Computational Thermal Manikin/ Maniquí térmico computacional.

Los autores concluyeron que el cerrar las puertas de las habitaciones durante de la noche reduce la ventilación natural drásticamente. Además, señalan que el uso del dispositivo de efecto stack puede incrementar la ventilación natural un 47% dentro de las habitaciones cuando el tamaño del dispositivo es mayor, se prende el ventilador y se cierran las puertas (Wong & Heryanto, 2004).

Evola y Popov evaluaron la velocidad y presión del viento en el interior y alrededor de un edificio suponiendo la existencia de ventilación cruzada, ventilación con una abertura en la pared de barlovento y ventilación con una abertura en la pared de sotavento a partir de la ecuación RANS, los modelos $k-\epsilon$, RNG y el software ACFD. Para facilitar la comparación de los resultados con los modelos construidos y simulados existentes en la literatura se utilizó un módulo de 2.5 x 2.5 x 2.5 metros.

Los resultados demostraron una concordancia entre los datos experimentales y el método RGN, especialmente en los casos de ventilación con una abertura. En general, la discrepancia de la tasa de ventilación es inferior al 10% (Evola & Popov, 2006).

Su et al. evaluaron la tasa de flujo neto de un Monodraught™ ABS 550 considerando diversas velocidades y direcciones de viento emitidos por un ventilador con estabilizador de flujo a un metro de distancia del dispositivo. El sistema contempló una cámara de prueba y una cámara de compensación del mismo tamaño (2 x 2 metros) conectadas por un tubo de 100 mm de diámetro. La turbulencia se estimó con el modelo estándar $k-\epsilon$, procesado en el software FLUENT.

Los resultados demostraron que la presión de la sala debido a las aberturas de la pared es mejor con techo a dos aguas en relación a un techo plano. Igualmente, se demostró que el efecto de chimenea tiene una consecuencia positiva al limitar las tasas de flujo en el Windcatcher cuando velocidad del viento inferior y un efecto insignificante en la velocidad del viento más grande (Su, Riffat, Lin, & Khan, 2008).

Saffari y Hosseinnia estudiaron numéricamente un diseño de torre de viento con columnas húmedas en contacto con cortinas colgadas de columna de columna. Los escenarios considerados fueron la variación en la altura de las columnas y velocidades de viento. Se utilizó el algoritmo SIMPLE para las ecuaciones de momento y continuidad y el método de volúmenes finitos (FVM) procesados en el software Open FOAM. Los resultados demostraron que las columnas húmedas de 10 metros de altura disminuyeron 12 K la temperatura del aire a la vez que incrementaron la humedad relativa un 22% (Saffari & Hosseinnia, 2009).

Gan simuló y comparó los flujos de calor totales y la distribución de calor en las paredes de cavidades con entradas horizontales y verticales; FLUENT se utilizó para determinar el flujo de aire y la transferencia de calor distribuido a las paredes. Se varió la altura de las cavidades entre 1 y 6 metros y su espesor entre 0.1 y 0.6 metros. La ganancia de calor fue asimétrica, dependiendo de las necesidades de calefacción y se fijó 100 W/m^2 con una temperatura ambiente de 20°C . Los autores observaron que la ventilación fue superior con una calefacción simétrica, pero con coeficientes de transferencia de calor inferiores en relación a una calefacción asimétrica, se observó que con dos paredes verticales, el calor se distribuye con mayor uniformidad (Gan, 2010).

Diaconu evaluó el efecto de la ocupación en el valor de punto de fusión y la ventilación en el ahorro potencial de energía de un sistema de pared con materiales de cambio de fase (PCM⁴¹). La sala de ensayo considerada fue de 6.5 x 4.5 por 2.5 metros de alto y los materiales de la pared eran de ladrillo en la parte interior y poliestireno expandido en el exterior; igualmente se contempla una ventana de 2 m² y se desestimaron tanto el suelo y como el techo.

Los datos horarios de la temperatura ambiente se generaron para el periodo de demanda de calor con TRNSYS a partir de un archivo climático TMY2 Lasi, Rumania. Los resultados demostraron que el valor más alto de ahorro de energía (10 kWh) se presentó con el punto de fusión de 19°C . También se observó que durante los intervalos con ventilación activa continua o intermitente, el potencial de ahorro de energía disminuyó (Diaconu, 2011).

van Hooff et al. evaluaron la ventilación natural en un techo dispuesto para ejercer el efecto Venturi (sin alabes de guía, con alabes de guía a 90° y con alabes de guía a 10°), así como la precisión de la ecuación RANS y el modelo RNG $k-\epsilon$. También se utilizó el algoritmo SIMPLE para las ecuaciones de momento y continuidad.

Los resultados demostraron que la constante RANS y el modelo $k-\epsilon$ concuerdan con las mediciones en el túnel de viento en relación a la velocidad media del viento interior del techo. Por otro lado, la configuración sin alabes presentó un mejor comportamiento en relación a las dos configuraciones de techo con alabes debido a que estas últimas presentaron resistencia al paso del flujo de aire (van Hooff, Blocken, Aanen, & Bronsema, 2011).

⁴¹ Phase Change Materials/Materiales de cambio de fase.

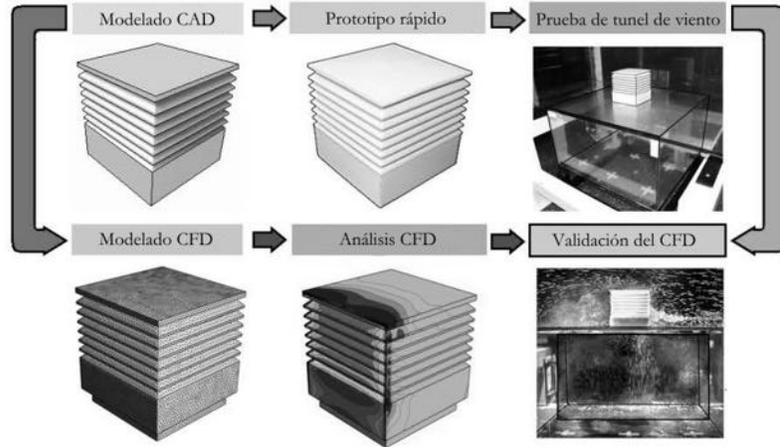


Figura 22. Aproximación multidisciplinaria a la ventilación natural en edificios. Fuente: J.K. Calautit (2015).

Reyes et al. analizaron la distribución de flujo de aire en cinco diferentes configuraciones de sistemas de torre de viento. Las simulaciones se llevaron a cabo con el método RANS en el software FLUENT. Asimismo se utilizó el modelo de disipación específica $k-\omega$, el sistema QUICK se combinó con el algoritmo SIMPLEC para estimar la velocidad y la presión. Para definir las condiciones de confort de velocidad promedio y temperatura se utilizó el diagrama de Olgyay.

Los resultados demostraron que se alcanzaron las condiciones de confort térmico en cerca del 50% de la habitación principal de la construcción analizada. Los autores resaltan el potencial que tiene un sistema de torre de viento para disminuir el consumo de energías en localidades con climas áridos y semiáridos. (Reyes et al., 2013).

Gijón-Rivera et al. (2013) evaluaron el comportamiento la ventilación de tres diferentes configuraciones de acristalamiento (vidrio transparente, vidrio transparente con recubrimiento de control solar en interior de SnSeCuxS y un cristal reflectante) en un edificio de la Ciudad de México con el acoplamiento de los modelos CFD-BES procesados en TRNSYS y ESP-r. Las dimensiones de la habitación modelada fueron de 4 x 4 x 12 metros, considerando las paredes del este, oeste y el suelo como superficies adiabáticas y las orientaciones sur, norte y techo expuestos al ambiente exterior. Las ecuaciones de masa y momento se llevaron a cabo con el algoritmo SIMPLEC.

Los resultados demostraron que el vidrio reflectante fue el que menor requerimiento de energía para la climatización de la habitación. Los resultados demostraron que el vidrio reflejante registró el menor consumo de energía, mientras que el vidrio transparente con recubrimiento solar registró el mayor consumo de energía (Gijón-Rivera, Xamán, Álvarez, & Serrano-Arellano, 2013).

Calautit et al. estudiaron el comportamiento de la ventilación por la integración de un dispositivo de transferencia de calor (HTD) en un windcatcher con el método de volumen finito (FVM) y el método semi-implícito de presión vinculada (SIMPLE). Asimismo, para el análisis de CFD se utilizó el software ANSYS Fluent. Para el macroclima se utilizó un módulo de 5, 5 y 10 metros para simular la velocidad del viento en el exterior y para el microclima se utilizó un módulo de 3, 5 y 5 metros para representar una habitación para 15 personas, en las que se probaron velocidades de viento de 1-5 m/s.

En las simulaciones de CFD se obtuvo un margen de error de 0-15% que se consideran adecuadas. Los resultados demostraron que con velocidades de 5 m/s, la reducción de la temperatura del aire se redujo sólo 5-6 K; mientras que a velocidades de 2 m/s se alcanzaron reducciones de la temperatura del aire de hasta 9.5 K. Los resultados demostraron que la integración del HTD reduce la tasa de alimentación de aire en 20-35%. Los autores concluyen que el receptor eólico propuesto tiene el potencial de reducir la temperatura de 12 K dentro del microclima en función de la velocidad del aire exterior (Calautit, Hughes, & Shahzad, 2015).

Rodríguez et al. (2015) evaluó numérica y experimentalmente el comportamiento de turbulencia y convección en una cavidad ventilada. Los parámetros evaluados fueron una cavidad de 1 x 1 x 1 metro, con dimensiones de entrada y salida de 0.08 x 0.08 metros y velocidades de viento de entre 0.1 y 0.5 m/s. para estimar la turbulencia se utilizó el modelo estándar k- ϵ , el algoritmo SIMPLEC para las ecuaciones de momento y continuidad.

En el modelo experimental se colocaron termopares en diversas zonas con la finalidad de controlar las temperaturas dentro de la cavidad. En la pared izquierda se consideró un flujo uniforme de calor de 75 W/m² y 125 W/m², a la vez que la pared de la derecha se mantiene a una temperatura constante de 298 K; las paredes restantes se consideraron como adiabáticas. Los resultados numéricos presentaron resultados próximos, con un porcentaje de diferencia máximo de 2.0% y 3.0%, por lo que se consideran adecuados. En relación a las predicciones del coeficiente de transferencia de calor, las diferencias porcentuales fueron de 0.3-0.8% (N. A. Rodríguez, Hinojosa, & Xamán, 2015).

Tabla 12. Tabla resumen: Uso de la dinámica computacional de fluidos en dispositivos de ventilación.

Estudios e investigaciones				
Autor/País	Palabra clave*	Elementos del estudio y/o investigación		
		Enfoque	Escala	Diseño Experimental/ Software/Configuración
Gao, China (2004)	Ventilación personalizada CTM	Cuantitativo	Dispositivo	SW: N/E; Geometría: CTM; MT ¹ : k - ϵ ; CF ² : Influjos de aire controlado.
Wong, Singapur (2004)	Análisis de diseño factorial	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	SW: PHOENICS 3.3; Geometría: N/E; MT ¹ : N/E; CF ² : N/E
Evola, Italia (2006)	Ventilación unilateral y cruzada	Cuantitativo	Dispositivo	SW: ACFD; Geometría: N/E; MT ¹ : k - ϵ y RNG; CF ² : Experimental.
Su, Reino Unido (2008)	Ventilación Experimento	Cuantitativo	Dispositivo	SW: FLUENT 6; Geometría: N/E; MT ¹ : k - ϵ ; CF ² : Experimental.
Saffari, Irán (2009)	Flujo bifásico	Cuantitativo	Dispositivo	SW: Open FOAM; Geometría: N/E; MT ¹ : FVM; CF ² : Experimental.
Gan, Reino Unido (2010)	CFD Persianas	Cuantitativo	Dispositivo	SW: FLUENT; Geometría: N/E; MT ¹ : RNG k - ϵ ; CF ² : Experimental.
Diaconu, Portugal (2011)	Materiales de cambio de fase	Cuantitativo	Dispositivo	SW: TRNSYS; Geometría: N/E; MT ¹ : N/E; CF ² : Experimental.
Van Hooff, Holanda (2011)	Efecto Venturi	Cuantitativo	Dispositivo	SW: N/E; Geometría: N/E; MT ¹ : k - ϵ ; CF ² : Experimental.
Reyes, México (2013)	Solución conjugada de CFD	Cuantitativo	Dispositivo	SW: FLUENT; Geometría: N/E; MT ¹ : k - ω ; CF ² : Experimental.
Gijón-Rivera, México (2013)	Modelos acoplados	Cuantitativo	Objeto arquitectónico	SW: TRNSYS y ESP-r; Geometría: ESP-r; MT ¹ : N/E; CF ² : Experimental.
Calautit Reino Unido (2015)	HTD	Cuantitativo	Dispositivo	SW: ANSYS Fluent; Geometría: FVM; MT ¹ : k - ϵ ; CF ² : Experimental..
Rodríguez México (2015)	Convección mixta	Cuantitativo	Dispositivo	SW: FLUENT 6.3; Geometría: N/E; MT ¹ : estándar k - ϵ ; CF ² : Experimental

Nota: * Traducidas del inglés. ¹ Modelo de turbulencia, ² Condiciones de frontera, SW; Software.

III. MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación persigue el objetivo particular de determinar la influencia de la inercia térmica en los ciclos convectivos del canal de flujo de un captador eólico como variable de diseño. Lo anterior hace necesaria la consecución metodológica de pasos que permitan desarrollar el diseño experimental citado en el apartado de alcances de este documento y cuyo carácter multifactorial es definido por los siguientes aspectos.

3.1 OBJETO DE ESTUDIO

El objeto de estudio a abordar son las condiciones de ventilación natural al interior un espacio experimental climatizado bajo el efecto de la extracción pasiva a través de un captador eólico, lo anterior bajo la influencia ejercida por la inercia térmica de su canal de flujo según distintas configuraciones. En donde, el conocimiento de las cuantías de velocidad y temperaturas del viento es determinante en el incremento de las tasas interiores de ventilación.

3.2 VARIABLES

Debido al enfoque cuantitativo del presente estudio es necesario el arreglo de distintas variables dentro de un sistema de producción causal de resultados. Por lo anterior es indispensable estudiar la relación entre los distintos tipos de variables involucradas como lo indica la figura 23.

3.2.1 Variables de control

Para garantizar la continuidad de las condiciones de control alrededor del escenario virtual de experimentación, se usaron softwares especializados que permiten el modelado y análisis de condiciones macroclimáticas como variables de control; para la construcción del citado ambiente se usaron métodos de interpolación espacial a través del software Meteonorm® que procesa información satelital mensual proveniente de la WMO⁴² por medio de un modelo estocástico que genera series de datos horarios que conforman un año típico meteorológico en distintos formatos, los usados en el presente documento son TMY y EPW.

⁴² World Meteorological Organization/Organización Meteorológica Mundial.

3.2.2 Variables independientes

Una vez configurado un ambiente controlado en un archivo climático, es posible estimar de entre los más de 22,000 registros horarios contenidos en cerca de 30 variables climatológicas -y bajo el argumento hipotético inicial- los parámetros que permitirán manipular las relaciones multifactoriales de causa-efecto en el diseño del experimento. Es importante destacar que algunas de estas variables deben de estimarse partir de los archivos climáticos, mientras que otras, simplemente se extraen y analizan; e.g. radiación global en planos inclinados y régimen de vientos dominantes respectivamente.

- El recurso solar global en un plano inclinado.
- El régimen de vientos dominantes.
- Espesor de las paredes del canal de flujo.
- Propiedades termofísicas de los materiales empleados.

3.2.3 Variables dependientes

Una vez identificadas las variables independientes es posible asumir cual será la contraparte en el arreglo experimental, estas son aquellas cuya magnitud o comportamiento se asume hipotéticamente se vea alterado ante las distintas configuraciones del canal de flujo, a enlistar son:

- Orientación geométrica del canal de flujo respecto al recurso solar incidente.
- La temperatura de bulbo seco al interior del canal de flujo.
- La velocidad de extracción de viento al interior del canal de flujo.
- La velocidad del viento al interior de la cámara de experimentación.
- La relación de velocidades alcanzadas en relación a la marcha térmica de la misma cámara.



Figura 23. Las variables en el diseño multifactorial. Fuente: Elaboración propia.

3.3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Con el propósito de confrontar la hipótesis del estudio ante el sistema de producción de resultados es necesario un arreglo experimental, según Christensen (1980) el diseño por sí mismo es el conjunto de estrategias y procedimientos útiles para responder a las preguntas de investigación (Hernandez et al., 2006). “El término experimento puede tener -al menos- dos acepciones, una general y otra particular. La general se refiere a tomar una acción y después observar las consecuencias de una acción” (Babbie, 1979), sin embargo, la acepción particular, como su nombre lo indica, se refiere a un sistema en el que se estimula intencionalmente una variable independiente y se presume el comportamiento de una dependiente.

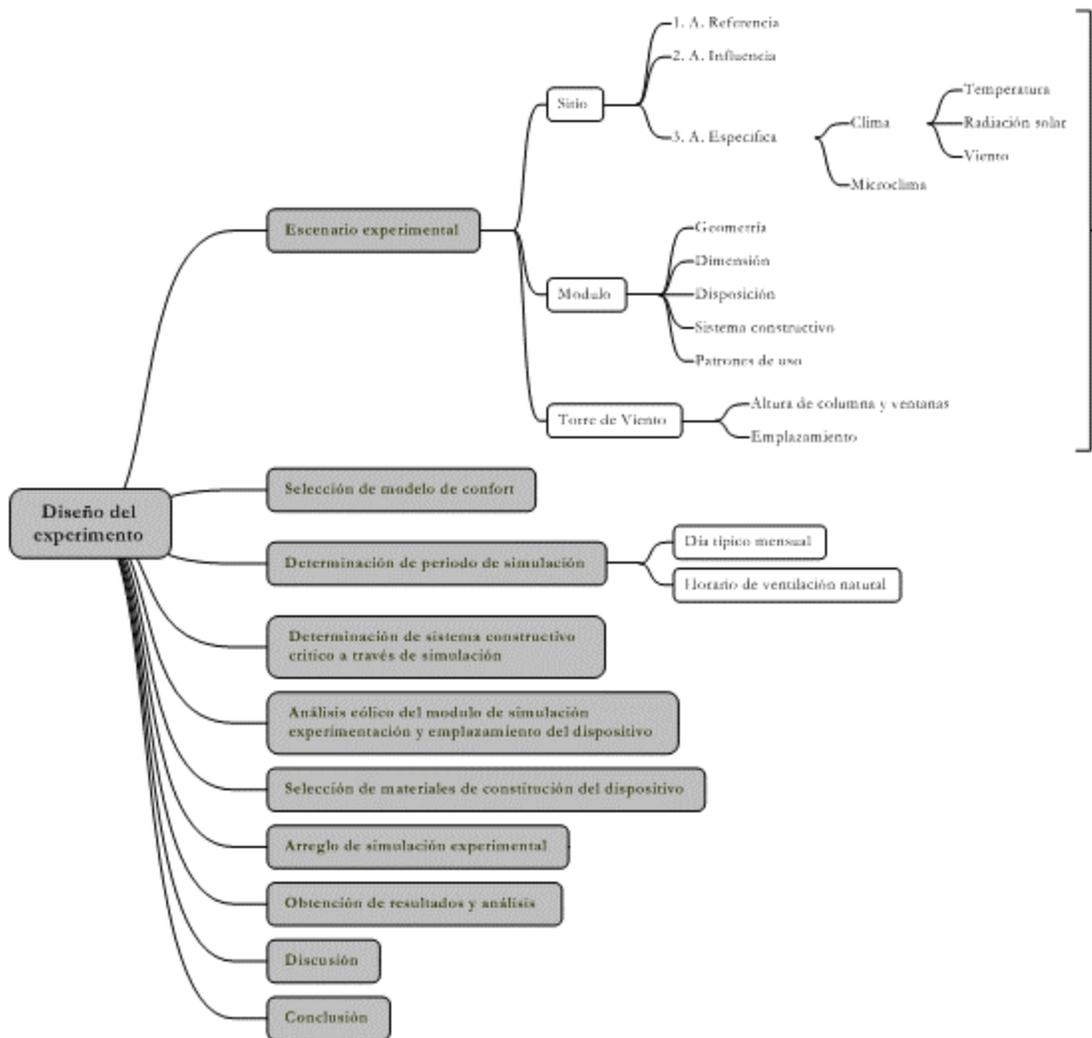


Figura 24. Diseño del experimento. Fuente: Elaboración propia.

3.4 ANALISIS DE DATOS

Como se aprecia en el apartado anterior, el arreglo experimental se configuró a priori estableciendo la metodología necesaria para la simulación del comportamiento térmico de un captador eólico acoplado a cámaras de experimentación climática, así como de la selección del sitio para la edificación del conjunto de ellas. Este último podría en términos de referencia geográfica describirse de la siguiente manera:

3.4.1 *Escenario experimental*

Dado que el presente documento de investigación reporta información producto de estudios anteriores, es de utilidad conservar información recopilada en sitio para aspectos de validación, sin embargo el presente trabajo se desarrolla bajo métodos, planteamientos hipotéticos y premisas distintas al ya referido; así pues, el escenario se acota bajo los mismos criterios siendo sus áreas de referencia e influencia las siguientes:

- Área de referencia: El estado de Colima situado en el occidente del país con latitud de $19^{\circ}12'37''\text{N}$, longitud $103^{\circ}48'17''\text{W}$ y 430 m.s.n.m.
- Área de influencia: Municipio de Coquimatlán ubicado al centro del estado de Colima con latitud de $19^{\circ}12'37''\text{N}$, longitud $103^{\circ}48'17''\text{W}$ y 430 m.s.n.m.



Figura 25. Área de influencia del estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Cámaras de simulación

Mientras que para la configuración final de dicho escenario se acotó un conjunto de cámaras de experimentación climática con características tales, que cada una de las cámaras es capaz de ofrecer individualmente condiciones climáticas casi idénticas a sus semejantes, para ello fue necesario la realización de un estudio de soleamiento.

Las cámaras no fueron diseñadas para contar con protecciones solares o alguna tarea de adecuación pasiva. Las características de diseño específico de las cámaras obedecen a la representación de una habitación con las medidas mínimas establecidas en el artículo 108 “Mínimos dimensionales o de superficie” contenida en la sección primera: “Dimensiones mínimas aceptables” del Capítulo II: “Requerimientos de habitabilidad y funcionamiento” del Reglamento de construcción de Colima.

Cuentan con una abertura frontal en una de sus caras de 1.0 m de ancho por 2.10 m de altura para proporcionar la entrada de aire necesaria para simular las condiciones de ventilación de una habitación en una vivienda de interés social, cuando la ventilación cruzada en espacios de este tipo es mínima y solo se da por medio de una puerta de acceso a la habitación abierta cuando las ventanas de la habitación se encuentran cerradas u obstruidas significativamente.

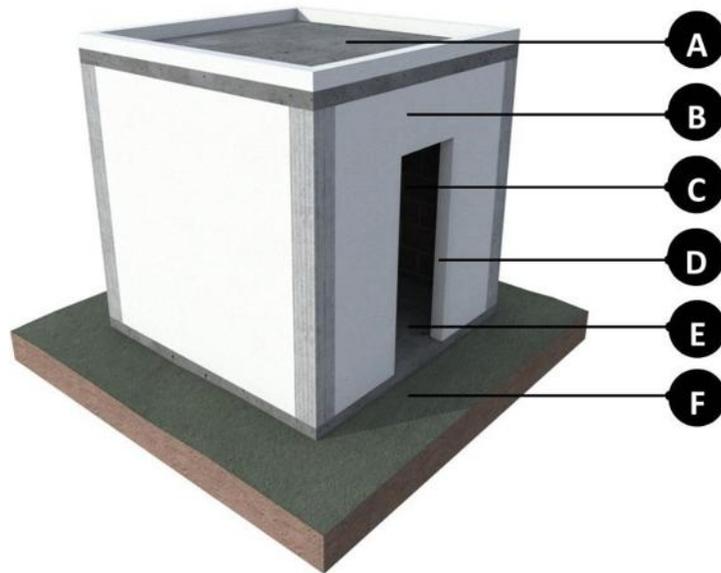


Figura 26. Diseño de cámaras de experimentación climática. Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Sistema de acoplamiento de torre

El diseño base de la torre de ventilación por extracción pasiva deriva de investigaciones anteriores y se compone de 4 ventanas con planos concentradores que proporcionan una función multidireccional como se muestra en las siguientes imágenes.

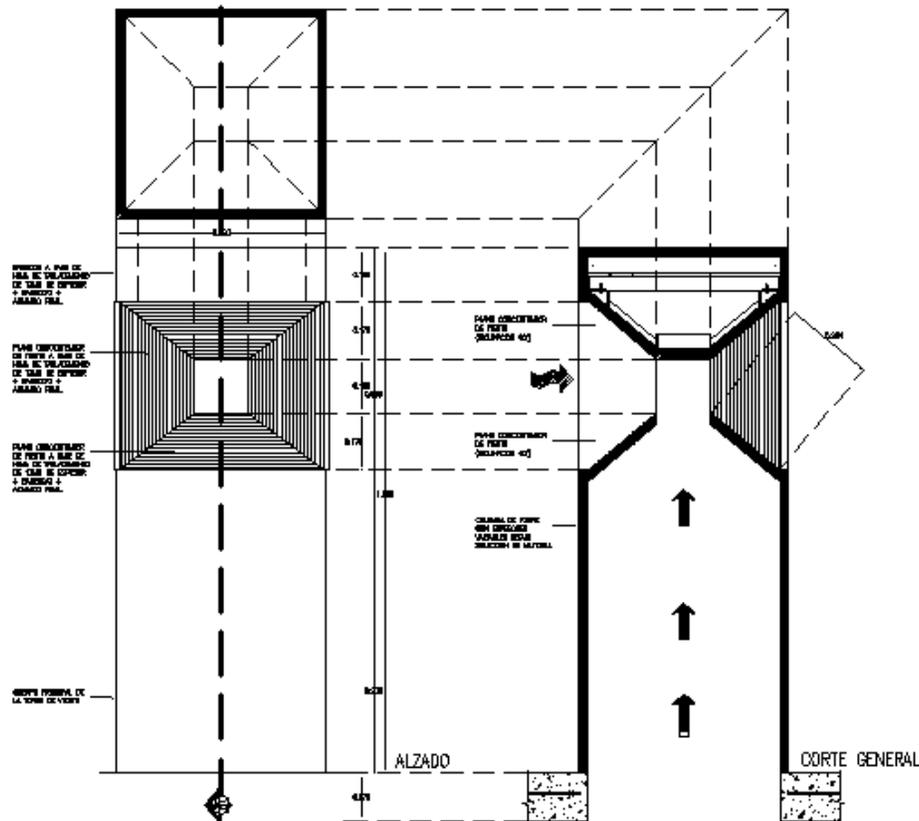


Figura 27. Diseño de la torre viento de experimentación. Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Selección del modelo de confort y periodo de simulación

Para los fines de esta investigación se seleccionó la revisión del modelo adaptativo presentado por Brager y de Dear del modelo de confort de la norma 55 "Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana" de ASHRAE; en dicha revisión incluyen una norma de confort adaptativa que permite temperaturas interiores más cálidas para espacios ventilados durante el verano con aceptabilidad para un 80 o 90% de los ocupantes.

Una vez estimado la temperatura neutral y el rango de confort mensual según la adaptabilidad del 80 o 90% de los habitantes, es posible estimar el impacto de la ventilación como estrategia de diseño bioclimático en el rango de confort de cada mes y con ello establecer un escenario conveniente de simulación. Para lo anterior se recurrió al trazo de las estrategias de confort en el diagrama psicrométrico. La siguiente muestra el 5.6% de impacto anual de la ventilación natural como estrategia de diseño bioclimático.

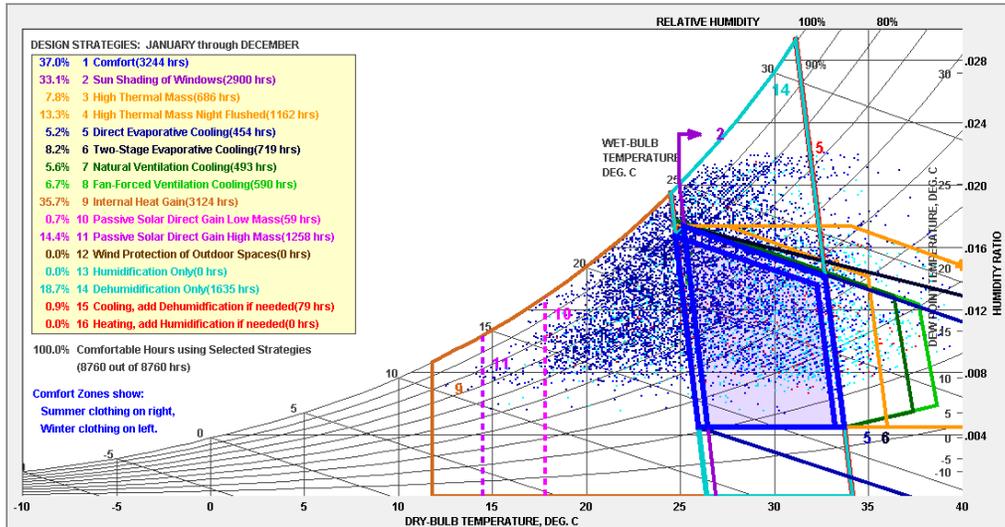
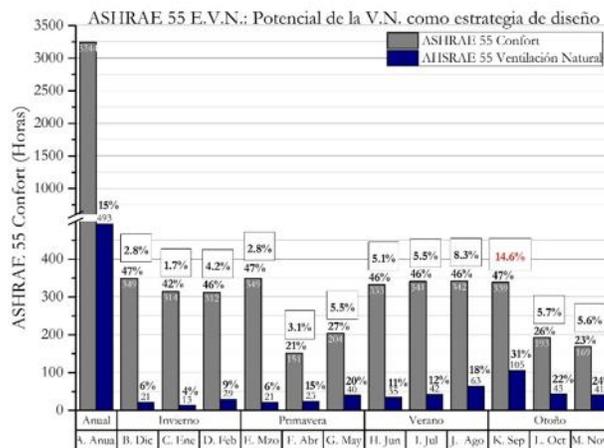


Figura 28 Impacto de la ventilación natural como estrategia de diseño bioclimático. Fuente Elaboración propia

Aunado a lo anterior fue necesaria la ponderación del impacto de la ventilación natural por medio de un análisis mensual, la gráfica siguiente demuestra que **septiembre** es el mes en donde la ventilación mantiene un porcentaje de impacto ponderado más grande a lo largo del año con un 14.6%.



IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procesamiento de la radiación para la ciudad de Colima se realizó en el software TRNSYS 17, que cuenta con los modelos para el cálculo de la radiación en planos inclinados Isotrópico, Hay-Davies, Reindl y Pérez; a partir de un archivo TMY2 que contiene un conjunto de valores horarios de radiación solar y elementos meteorológicos calculados con el software METEONORM. De esta manera, se determinó con planos orientados a cada 5 grados de inclinación (desde 0 hasta 90) y a cada 10 grados de acimut (desde 0 hasta 360).

Los archivos TMY2 contienen datos que se calculan por medio de un modelo estocástico para obtener series de valores horarios, para con ello poder conformar un año típico. Dichos valores provienen de información satelital de mensual proveniente de la base de datos de GEBA (Global Energy Balance Archive) de la Organización Mundial de Meteorología (WMO).

Los modelos de cálculo de la radiación en superficies inclinadas requieren conocer la radiación total y radiación difusa (o haz de radiación) sobre una superficie horizontal, así como la posición del sol. La radiación total en un plano inclinado se estima sumando los componentes de la radiación directa, difusa y reflejada sobre el plano.

Todos los modelos de radiación en superficies inclinadas usan la misma técnica para proyectar la radiación directa y reflejada en la superficie inclinada; ellos difieren solo en la estimación de la radiación difusa. La contribución de la radiación directa sobre una superficie inclinada (en intervalos cortos de tiempo) puede ser calculada usando el factor geométrico de tiempo R_b (Relación de radiación directa en una superficie inclinada y una horizontal):

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

Donde:

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \sin\beta$$

En la ecuación anterior, β es la pendiente de la superficie definida como el ángulo entre la superficie inclinada y el plano horizontal, mientras que γ es el ángulo acimutal, o el ángulo entre la proyección de la normal a la superficie en el plano horizontal y el meridiano local. La convención del signo para el acimut es idéntica a aquella para el acimut solar (cero hacia el ecuador, positiva

hacia el oeste y negativas hacia el este). La pendiente es un valor positivo cuando esta inclinada en la dirección de la especificación del acimut.

Una vez encontrado R_b :

$$I_{bT} = I_b * R_b$$

Donde I_{bT} es el haz de Radiación en superficie inclinada, mientras que I_b es el haz de radiación en el plano horizontal.

La contribución de la radiación reflejada en una superficie inclinada es calculada asumiendo los efectos del suelo como un reflector isotrópico y definiendo R_r como la relación de radiación reflejada sobre una superficie inclinada con respecto a la radiación total en una superficie horizontal, que es igual a:

$$R_d = 0.5 (1 - \cos\beta)\rho_g$$

Donde R_d es la relación de radiación difusa en una superficie inclinada y una horizontal y ρ_g es la reflectancia superficial.

Por lo tanto la radiación difusa sobre una superficie inclinada suponiendo cielo isotrópico (modelo Isotrópico) es:

$$I_{dT} = I_d * R_d$$

El modelo Hay-Davies considera tanto la radiación circunsolar, como la radiación difusa isotrópica. Bajo condiciones de cielo claro, la intensidad de radiación difusa alrededor del sol (área circunsolar) es mayor. Por ello, se pondera la cantidad de difusión circunsolar usando un índice de anisotropía A_I ; este define una porción de la radiación difusa a ser tratada como circunsolar con la porción restante de radiación difusa considerada isotrópica. El índice de anisotropía se estima de la siguiente manera:

$$A_I = \frac{I_{bn}}{I_{on}}$$

Donde I_{on} es la radiación extraterrestre en incidencia normal. Asimismo:

$$I_{dT} = I_d[0.5(1 - A_I)(1 + \cos\beta) + A_I R_b]$$

En donde I_d es la radiación difusa en superficie horizontal y I_{dT} es la radiación difusa en superficie inclinada.

El modo de Reindl añade un término de iluminación difusa del horizonte al modelo de Hay-Davies, que es agrupado con el término de difusión isotrópica y su magnitud es controlada por un factor de modulación, f . El modelo es expresado como sigue:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$$

En donde I es la radiación total en una superficie horizontal. La radiación difusa en superficie inclinada se determina de la siguiente manera:

$$I_{dT} = I_d [0.5(1 - A_I)(1 + \cos \beta)(1 + (f)\text{sen}^3(\beta/2)) + A_I R_b]$$

Por último, el modelo de Pérez tiene en cuenta la radiación circunsolar, la luminosidad del horizonte y la radiación isotrópica difusa por medio de los “coeficientes de brillo reducido”; es decir, el coeficiente de brillo circunsolar F'_1 y el coeficiente de brillo en el horizonte F'_2 . F'_1 , y F'_2 , son funciones de los parámetros de claridad de cielo, ϵ , brillo del cielo y Δ .

$$\epsilon = \frac{\left[\frac{(I_d + I_{dn})}{I_d} + 1.041\theta_z^3 \right]}{[1 + 1.041\theta_z^3]}$$

En donde ϵ es un parámetro de claridad del cielo, I_d es la radiación difusa en superficie horizontal, I_{dn} es el haz de radiación normal directa y θ_z es el ángulo cenital solar expresada en radianes.

$$\Delta \equiv \frac{I_d m}{I_{on}} = \frac{I_d}{I_o}$$

Donde Δ representa el brillo del cielo, I_o es la radiación extraterrestre y I_{on} es la radiación extraterrestre en incidencia normal.

Los parámetros de claridad y brillo del cielo son usados para calcular los coeficientes de brillo reducido de las relaciones y tablas siguientes:

$$F'_1 = F_{11}(\epsilon) + F_{12}(\epsilon) \cdot \Delta + F_{13}(\epsilon) \cdot \theta_z$$

$$F'_2 = F_{21}(\epsilon) + F_{22}(\epsilon) \cdot \Delta + F_{23}(\epsilon) \cdot \theta_z$$

Asimismo, el modelo de Pérez considera una serie de factores de ajuste en relación a la orientación de la incidencia de la radiación. La magnitud de los *coeficientes de brillo reducido* ponderan los componentes de radiación circumsolar, la luminosidad del horizonte y la radiación isotrópica difusa. La locación angular de la región circumsolar es determinada por la relación del ángulo sólido circumsolar ponderado a/c .

$$a/c = \frac{\max[0, \sin \theta]}{\max[\cos 85, \cos \theta_z]}$$

La radiación difusa de la superficie inclinada puede ser estimada como sigue:

$$I_{dT} = I_{dT} \left[0.5 (1 - F'_1)(1 + \cos \beta) + F'_1 \left(\frac{a}{c} \right) + F'_2 \sin \beta \right]$$

Así, el total de la radiación incidente sobre una superficie plana inclinada para todos los modos de radiación superficie inclinada es:

$$I_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{Gt}$$

En donde I_{Gt} es la radiación superficial reflejada en una superficie inclinada.

En general, los modelos de cielo anisotrópico (Hay-Davies, Reindl y Pérez) proporcionan estimaciones comparables de la radiación total sobre una superficie inclinada y se recomiendan para uso general.

Dado que muchos de los cálculos realizados en la transformación de radiación solar en una superficie horizontal dependen de la hora del día, es importante que se utilice el tiempo solar correcto. TRNSYS cuenta con varios factores de corrección para calcular el tiempo solar:

$$\text{solar time (hrs)} = \text{hora estandar} + E + (L_{st} + L_{loc})/15$$

Donde E cuenta por la excentricidad de la órbita de la tierra y varía entre -0.24 horas y +0.26 horas cada año. L_{st} es el meridiano estándar para el huso horario local y L_{loc} es la longitud de la locación en cuestión.

Para procesar el total de la radiación en un intervalo de tiempo determinado, el ángulo medio horario es usado

$$\omega = 0.5(\omega_1 + \omega_2)$$

En donde ω es el ángulo horario medio del intervalo de tiempo, ω_1 es el ángulo horario medio del intervalo de tiempo, o tiempo del amanecer, si este ocurre durante el intervalo de tiempo y ω_2 es el ángulo horario al inicio del intervalo de tiempo, o tiempo del atardecer, si este ocurre durante el intervalo de tiempo. Esto es para garantizar que la posición calculada del sol será la posición promedio para el intervalo de tiempo.

El tiempo solar que es usado es:

$$\text{tiempo solar: } t + E + SHFT/15$$

Donde t es el tiempo solar en horas correspondiente a ω .

La estimación de la radiación mensual (kWh/m^2) de los planos verticales se realizaron con el modelo de Pérez en base a que en la literatura revisada, es el que logra evaluaciones con mayor precisión.

Se analizaron un total de 40 orientaciones distintas, con 19 inclinaciones diferentes, generando un total de 760 valores de radiación solar global en tres integraciones diferentes: diaria, mensual, anual para determinar finalmente la orientación óptima. En la Tabla 13 se muestran los planos verticales que presentan mayor recurso solar en los diferentes meses del año.

Tabla 13. Planos verticales con mayor recurso solar en kWh/m^2 mes en Coquimatlán, Colima

Orientaciones												
Meses												
Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Vel. (m/s)	132.9	116.4	115.0	109.6	100.1	85.2	92.0	91.1	83.9	87.2	123.0	131.3
Orient. (°)	0	0	310	80	100	110	100	90	70	10	350	0

RECURSO SOLAR GLOBAL ANUAL DE COQUIMATLAN, COLIMA

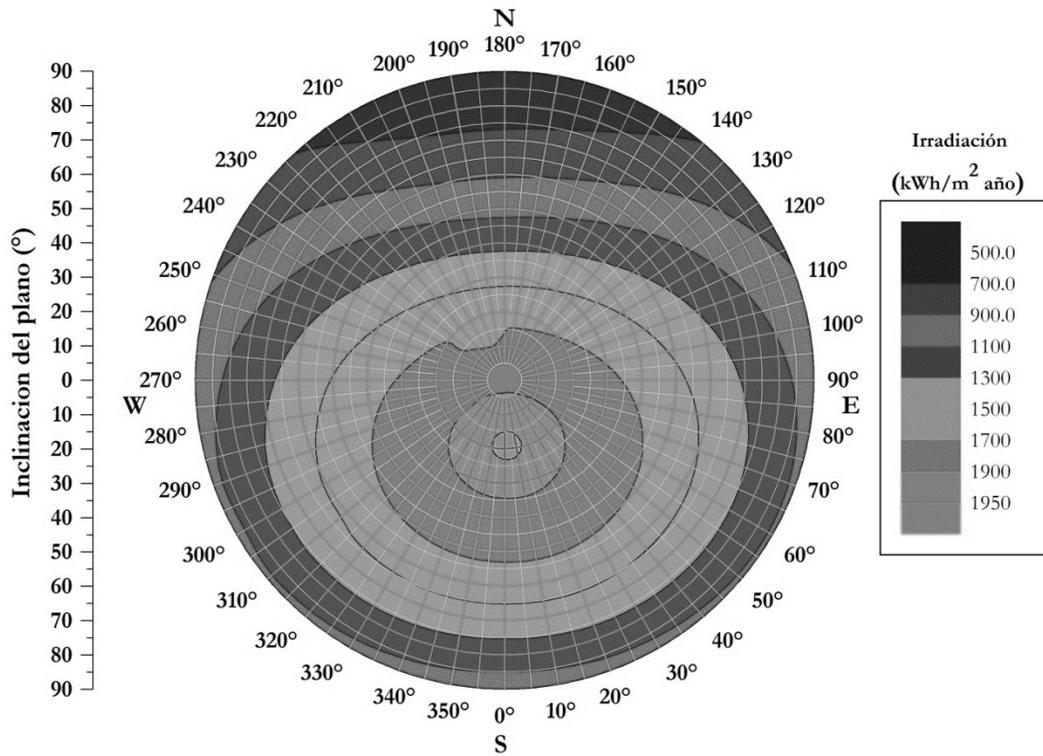


Figura Recurso solar de Coquimatlán, Colima, según cálculos del modelo de Pérez a partir de la base de datos del software Meteonorm® . Fuente: Elaboración propia.

VIENTO

En TRNSYS se procesaron los 8,760 valores horarios que constituyen el régimen anual de viento en Coquimatlán, Colima, en donde el porcentaje de dominio mayor es de 7.4% con un azimut de 80° a una velocidad de 1.9 m/s.

Tabla 14. Orientaciones mensuales óptimas de la torre de viento según el régimen de viento de Coquimatlán, Colima

Variable	Orientaciones											
	Meses											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Vel. (m/s)	1.61	1.80	1.99	2.00	2.10	1.79	1.19	1.10	1.00	1.09	1.09	1.01
Orient. (°)	80	80	70	70	70	60	340	80	60	20	70	90

VIENTO-RADIACIÓN

A razón de la información anterior es posible analizar la interacción de las magnitudes de las dos variables climatológicas preponderantes en el sitio; es decir, radiación solar global y régimen de vientos incidentes sobre los planos en términos mensuales.

Por medio de lo anterior se fijará el arreglo de simulación dentro de cada alternativa de potencial de masa térmica.

Materiales

El arreglo experimental se montó a partir de la selección de un espécimen de jalcreto típico con la condición de humedad y homogeneidad habitual de uso; a su vez, se determinó una configuración geométrica para los especímenes que permitiera la estabilización térmica de los mismos en un periodo razonable de tiempo, dando lugar al procedimiento descrito a continuación e ilustrado en la figura 24:

1. Se extrajeron 3 muestras de 11.0 x 6.0 x 2.5 cm. (± 0.02 cm.) de los bloques típicos de jalcreto. Las caras de contacto del espécimen fueron pulidas para garantizar la mayor superficie de contacto entre la fuente de calor y los sensores de flujo de calor.
2. Los especímenes de prueba fueron pesados con una báscula digital portátil para determinar la masa de los mismos con una exactitud de ± 0.1 gr.
3. Se configura el arreglo experimental instalando los sensores de flujo de calor y termopares en los especímenes según se indicó en el esquema de instalación; tanto para la determinación de la conductividad térmica, como para el calor específico.
4. Se inició con el suministro controlado de calor por medio de las estufas de placa caliente. A través de un software de adquisición de datos integrado en un data logger de 8 canales marca Fourtec Fourier® modelo DaqPro 5300 con resolución de 0.1 °C y una precisión de $\pm 0.5\%$ con un intervalo de registro de 10 segundos y una frecuencia mínima de 90 observaciones por espécimen, una vez llegado al periodo de estabilización.
5. Se almacenó la información en un equipo de convencional de cómputo portátil con sistema operativo de 64 bits y condiciones mínimas de operación requeridas por el data logger interfase.

6. Se garantizó la inexistencia de pérdida de masa significativa durante la aplicación de calor a los especímenes por medio del pesaje y medida de la superficie de contacto del espécimen antes y después del procedimiento.
7. A partir de la información colectada se inicia con la estimación de las propiedades del espécimen de prueba.

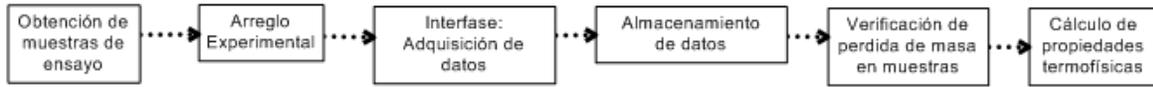


Figura 294.- Procedimiento de prueba para la determinación de propiedades.

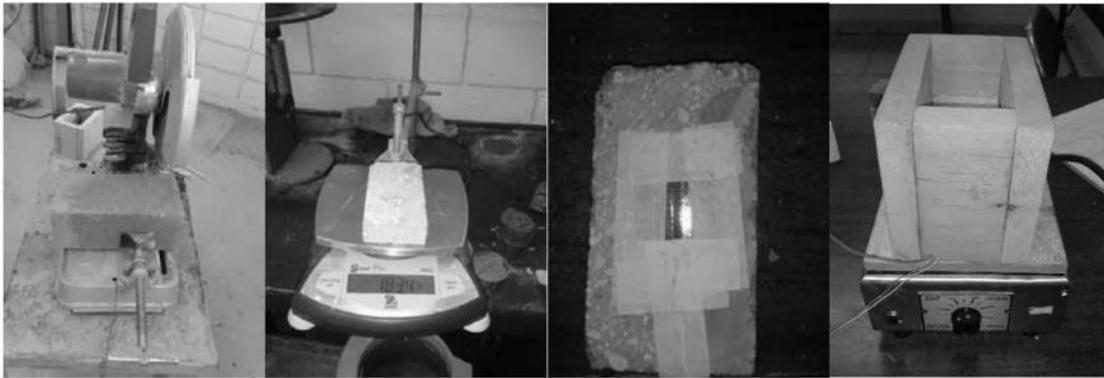


Figura 25.- Procedimiento de prueba, de izquierda a derecha: Extracción del espécimen, pesaje, instalación de sensores y termopares y arreglo experimental para adquisición de datos.

Las características físicas de las 3 muestras extraídas de los bloques de jalcreto en su condición típica pasaron por un procedimiento de medición, pesaje y pulido. Los valores obtenidos en cada muestra se encuentran indicados en la tabla 15.

Tabla 15. Características físicas de las muestras de prueba

Especímen	Características					
	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Volumen (m ³)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m ³)
Numero 1	0.108	0.059	0.024	0.00015	0.183	1196.49
Numero 2	0.110	0.058	0.025	0.00016	0.207	1301.21
Numero 3	0.109	0.058	0.026	0.00016	0.194	1197.85

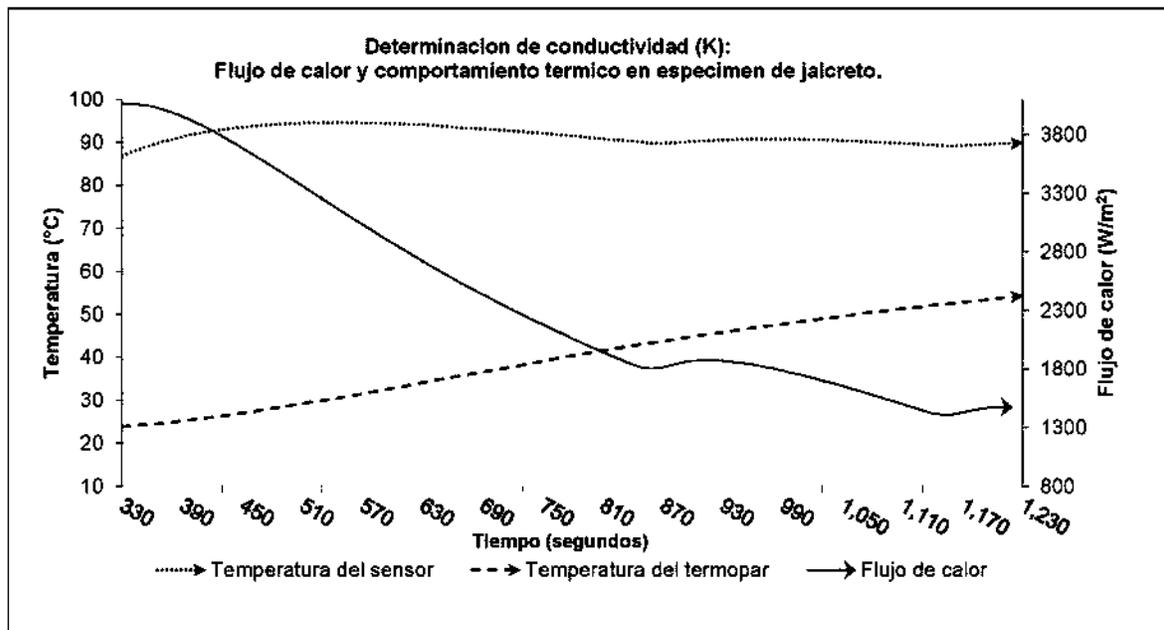
Orientaciones												
Meses												
Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Vel. (m/s)	1.61	1.80	1.99	2.00	2.10	1.79	1.19	1.10	1.00	1.09	1.09	1.01
Orient. (°)	80	80	70	70	70	60	340	80	60	20	70	90

Estimación de la conductividad térmica

A partir de la adquisición de datos se estableció el cálculo de la conductividad térmica en base a la Ley de Fourier para cada observación registrada:

$$\lambda = \frac{q \cdot l}{\Delta T} \quad (1)$$

De la misma forma se graficó dicha información para seleccionar el periodo de estabilización térmica, con el propósito de delimitar la frecuencia mínima de 90 observaciones a analizar por muestra. Un ejemplo de selección de dicha frecuencia se aprecia en la gráfica 1.



Gráfica 1. Flujo de calor y comportamiento térmico para determinar la conductividad térmica del espécimen 1 de jalcreto vibrocompactado.

Una vez obtenida la información, fue posible el análisis de la misma para obtener el valor de conductividad representativo de cada muestra como indica la siguiente tabla:

Tabla 16. Valores de conductividad térmica de las muestras de prueba analizadas.

Espécimen	Valores						
	Observaciones (n)	Conductividad λ (W/m°C)	D.S. σ	Coefficiente de Variación C.V.	Intervalo de confianza (%)	Límite Inferior L.I. (W/m°C)	Límite Superior L.S. (W/m°C)
Numero 1	90	0.88	0.196	22.31	4.61	0.84	0.92
Numero 2	90	1.09	0.174	16.07	3.32	1.05	1.12
Numero 3	90	1.03	0.050	4.92	1.02	1.02	1.04

Así pues, fue posible establecer la media representativa de la conductividad térmica del bloque vibrocompactado de jalcreto como se describe en la ecuación 2.

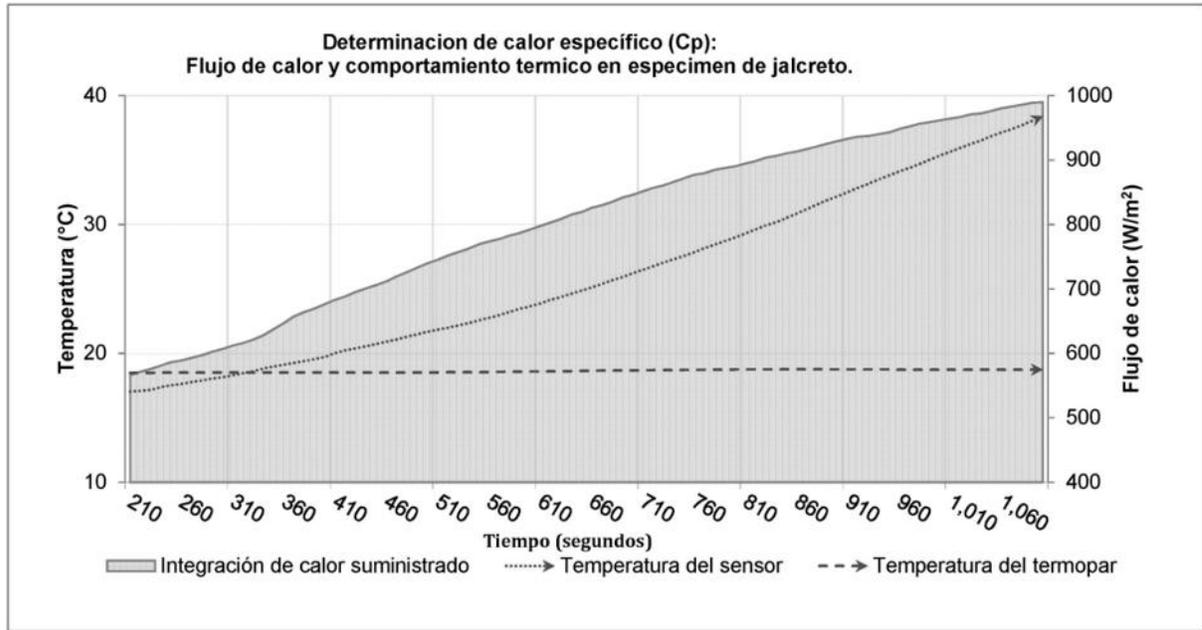
$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \\ &= \frac{0.88 + 1.09 + 1.03}{3} \\ &\cong \mathbf{1.00 \text{ W/m}^\circ\text{C}}\end{aligned}\tag{2}$$

Determinación del calor específico.

A partir de la adquisición de datos se estableció el cálculo de la conductividad térmica en base a la ecuación de cálculo de la capacidad térmica desarrollada por Joseph Black para cada observación registrada:

$$Cp \approx \frac{Q}{m \cdot \Delta T}\tag{3}$$

Al igual que en el caso de la determinación de la conductividad, se graficó dicha información para seleccionar el periodo de estabilización térmica del material, con el propósito de delimitar la frecuencia mínima de 90 observaciones a analizar por espécimen, un ejemplo de la selección de dicha frecuencia se aprecia en la gráfica 2.



Gráfica 2. Flujo de calor y comportamiento térmico para determinar el calor específico del espécimen 1 de jalcreto vibrocompactado.

Una vez obtenida la información, fue posible el análisis de la misma para obtener el valor de calor específico representativo de cada espécimen como indica la siguiente tabla.

Tabla 17. Valores de calor específico de las muestras de prueba analizadas.

Espécimen	Valores						
	Observaciones (n)	Calor específico Cp (J/Kg°C)	D.S. σ	Coficiente de Variación C.V.	Intervalo de confianza (%)	Límite Inferior L.I. (J/Kg°C)	Límite Superior L.S. (J/Kg°C)
Numero 1	90	1260.82	347.33	27.55	5.7	1189.06	1332.58
Numero 2	90	1251.02	173.05	13.83	2.9	1215.27	1286.77
Numero 3	90	844.07	130.05	15.41	3.2	817.20	870.94

Con la información anterior se estableció la media representativa de calor específico del bloque vibrocompactado como se indica en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned}\bar{c}_p &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \\ &= \frac{1260.82 + 1251.02 + 844.07}{3} \\ &\cong \mathbf{1231.85 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}}\end{aligned}\tag{4}$$

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio analizó a escala de objeto y bajo un enfoque cuantitativo el papel de la inercia térmica en los captadores eólicos conocidos comúnmente como *Bâdgir*, *Baud-geer* o *Malqaf*; elementos arquetípicos de ventilación pasiva en la arquitectura persa y árabe respectivamente. Para correlacionar las propiedades termofísicas del canal de ventilación del captador y su eficiencia operativa. Lo anterior, a través del uso de la simulación energética y la dinámica computacional de fluidos integrada en el software Design Builder®.

La investigación tiene en términos comparativos una serie de particulares aportaciones metodológicas respecto de aquellas analizadas de manera análoga en la revisión de la literatura especializada, dado que la mayoría de estudios iniciales expuestos considera registros de información climática con poca representatividad histórica y estadística en las localidades de estudio, lo que reduce significativamente la replicabilidad del estudio; por otro lado aquellos de última publicación consideran la definición de condiciones de frontera para el estudio de estos dispositivos en régimen estacionario de escenarios muy diversos; sin embargo, dichas condiciones pueden no presentarse jamás en un escenario real.

Este estudio, en cambio utiliza series de datos horarios provenientes de la más amplia base de datos climatológica existente en la actualidad, con más de 22,000 registros de cerca de 30 variables climáticas distintas, lo que permite en principio desarrollar estudios preliminares de diagnóstico y diseño a razón de las variables más preponderantes; en este caso, la radiación global incidente en planos inclinados y el régimen de vientos predominantes, ambas en un rango de precisión que alcanza los registros estacionales, mensuales, diarios e incluso horarios. Por otro lado el extenso estudio de modelos de radiación solar implementado y representado polarmente ha sido una herramienta de diagnóstico con aplicación incluso en el sector de las energías renovables.

Por otro lado y en un sentido no menos importante se implementó un novedoso método para la determinación de las propiedades termofísicas de conductividad y calor específico de especímenes en régimen estacionario para incluir en la simulación del comportamiento del dispositivo materiales de uso en la región, pero no descritos en los inventarios de las normas oficiales o literatura relacionada, este método es de especial importancia, pues la simplicidad que representa desestima la utilización de robustos arreglos propuestos por otros autores o aquellos que hacen imprescindible el uso de costoso instrumental.

BIBLIOGRAFÍA

- A'zami, A. (2005). Badgir in traditional Iranian architecture. In *Passive and low energy cooling for the built environment* (pp. 1021–1026).
- Almusaed, A., & Almssad, A. (2015). Building Materials in Eco-Energy houses from Iraq and Iran. *Case Studies in Construction Materials*, 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.02.001>
- ASHRAE. (2010a). *ASHRAE 55-2010 Thermal environmental conditions for human occupancy (definitions)*.
- ASHRAE. (2010b). *Thermal environmental conditions for Human Occupancy*. (ASHRAE, Ed.) *ANSI/ASHRAE Standard 55-2013*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.
- ASTM International. (1997). ASTM C177 - 97. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. Retrieved February 14, 2015, from <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C177-97.htm>
- Auliciems, A., & Szokolay, S. (2007). Thermal comfort. In P. and low energy Architecture (Ed.), *Note 3: Design tools and techniques* (p. 68). Queensland: Passive and low energy architecture.
- Azpeitia, G. (1990). *Metodo para el diseño bioclimático*. Universidad de Colima.
- Bahadori, M. N. (1985). An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling. *Solar Energy*, 35(2), 119–129. [http://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90002-7](http://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90002-7)
- Balaras, C. a. (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Buildings*, 24(1), 1–10. [http://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00956-6](http://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00956-6)
- Bansal, N. K., Mathur, R., & Bhandari, M. S. (1994). A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. *Building and Environment*, 29(4), 495–500. [http://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)90008-6](http://doi.org/10.1016/0360-1323(94)90008-6)
- Bastide, A., Lauret, P., Garde, F., & Boyer, H. (2006). Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates. *Energy and Buildings*, 38(9), 1093–1103. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.12.005>
- Benjelloun, Y., de Sigoyer, J., Carlut, J., Hubert-Ferrari, A., Dessales, H., Pamir, H., & Karabacak, V. (2015). Characterization of building materials from the aqueduct of Antioch-on-the-Orontes (Turkey). *Comptes Rendus Geoscience*. <http://doi.org/10.1016/j.crte.2014.12.002>
- Brown, G. Z. (1994). Viento. In Editorial Trillas (Ed.), *Sol, luz y viento* (Primera ed, p. 30). Mexico, D.F.: Editorial Trillas.
- Burek, S. a. M., & Habeb, a. (2007). Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls. *Energy and Buildings*, 39(2), 128–135. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.04.015>
- Calautit, J. K., & Hughes, B. (2015). Application of a Passive Cooling Wind Catcher within the Built Environment [Sun Number 2015 \(part 10\)](#), Experimental Analysis. In
- Calautit, J. K., & Hughes, B. R. (2014). Integration and application of passive cooling within a

- wind tower for hot climates. *HVAC&R Research*, 20(October 2014), 722–730. <http://doi.org/10.1080/10789669.2014.936795>
- Calautit, J. K., Hughes, B. R., Connor, D. O., & Shahzad, S. S. (2015). Performance Investigation of a Commercial Wind Catcher with (HHTD). In *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Architecture and Civil Engineering (ACE 2015)* (p. 8). Sheffield.
- Calautit, J. K., Hughes, B. R., & Shahzad, S. S. (2015). CFD and wind tunnel study of the performance of a uni-directional wind catcher with heat transfer devices. *Renewable Energy*, 83(July), 85–99. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.005>
- Castillo, C., Bojorquez, G., & Luna, A. (2014). Diagnostico bioclimatico para espacios exteriores caso de estudio: Ensenada, Baja California. In *XXXVIII Semana de Energia Solar* (p. 7). Queretaro: Asociacion Nacional de Energia Solar.
- Cengel, Y. a., & Boles, M. E. (2011). *Termodinamica*. (McGraw-Hill, Ed.)*Termodinamica* (7ma ed.). Mexico, D.F.: McGraw-Hill. Retrieved from <http://www.mediafire.com/download/7a3idxrs2gxjbpu/Termodinamica+-+Cengel+7th.pdf>
- Crawley, D. B. (1998). Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? *ASHRAE Transactions*, 104(2), 498–515.
- Cucumo, M., De Rosa, a., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2007). Experimental testing of models for the estimation of hourly solar radiation on vertical surfaces at Arcavacata di Rende. *Solar Energy*, 81(5), 692–695. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2006.09.002>
- Dascalaki, E., Santamouris, M., Argiriou, A., & Helmis, C. (1995). Predicting single sided natural ventilation rates in buildings. *Solar Energy*, 55(5), 327–341.
- de Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549–561. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)
- Dehghani-sani, A. R., Soltani, M., & Raahemifar, K. (2015). A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 182–195. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.018>
- Derbal, R., Defer, D., Chauchois, a., & Antczak, E. (2014). A simple method for building materials thermophysical properties estimation. *Construction and Building Materials*, 63, 197–205. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.076>
- Diaconu, B. M. (2011). Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: Influence of occupancy pattern and ventilation. *Energy and Buildings*, 43(1), 101–107. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.019>
- Ding, W., Hasemi, Y., & Yamada, T. (2005). Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. *Energy and Buildings*, 37(4), 411–418. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.002>
- Edelman, P. a., & Hethmon, T. (1993). Sick building syndrome. *The New England Journal of Medicine*, 329, 503; author reply 504.

- Evola, G., & Popov, V. (2006). Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 38(5), 491–501. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.008>
- Evseev, E. G., & Kudish, A. I. (2009). The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. *Solar Energy*, 83(3), 377–388. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.010>
- Faure, X., & Le Roux, N. (2012). Time dependent flows in displacement ventilation considering the volume envelope heat transfers. *Building and Environment*, 50, 221–230. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.007>
- Flourentzou, F., Maas, J. Van Der, & Roulet, C. (1998). E ' IEKGY A | ID Natural ventilation for passive cooling : measurement of discharge coefficients, 27, 283–292.
- Fordham, M. (2000). Natural ventilation. *Renewable Energy*, 19(1-2), 17–37. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00012-9](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00012-9)
- Fuentes, V. (2004). Introduccion. In *Rodriguez, Manuel* (1a Edicion, p. 13). Mexico, D.F.: Universidad Autonoma Metropolitana.
- Gan, G. (2010). Simulation of buoyancy-driven natural ventilation of buildings—Impact of computational domain. *Energy and Buildings*, 42(8), 1290–1300. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.022>
- Gandullo, J. (2000). *Climatología y ciencia del suelo*. (F. C. del V. de Salazar, Ed.) (2da ed.). Madrid: Escuela Tecnica Superior de Tecnicos de Montes.
- Gao, N., & Niu, J. (2004). CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation. *Building and Environment*, 39(7), 795–805. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.026>
- García, E. (1967). *Apuntes de climatología*. (UNAM, Ed.) (1a ed.). Mexico, D.F.: Universidad Nacional Autonoma de México.
- García, R., & Fuentes, V. (1987). *Viento y arquitectura* (Tercera ed). Mexico, D.F.: Trillas.
- Gijón-Rivera, M., Xamán, J., Álvarez, G., & Serrano-Arellano, J. (2013). Coupling CFD-BES Simulation of a glazed office with different types of windows in Mexico City. *Building and Environment*, 68, 22–34. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.005>
- Givoni, B. (1994). Building design principles for hot humid regions. *Renewable Energy*, 5, 908–916.
- Givoni, B. (1998). Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. *Energy and Buildings*, 28(1), 25–32. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00056-X](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00056-X)
- Gonzalez, M., Gomez, A., Luna, A., Escobar, C., & Esparza, C. (2015). Exhaust Ventilation through a Solar Chimney: A Response to High Hermeticity in Welfare Housing. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9(7), 767–774. <http://doi.org/10.17265/1934-7359/2015.07.002>
- Gueymard, C. a. (2009). Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications. *Solar Energy*, 83(3), 432–444. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2008.11.004>

- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación*. (McGraw-Hill, Ed.) (Cuarta). Mexico: McGraw-Hill.
- Holman, J. P. (1998). *Transferencia de calor*. (McGrawHill, Ed.) (8th ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A. (2012). The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy*, *92*, 606–627. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>
- Hughes, B. R., Chaudhry, H. N., & Ghani, S. A. (2011). A review of sustainable cooling technologies in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(6), 3112–3120. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.032>
- Hughes, B. R., & Cheuk-Ming, M. (2011). A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers. *Energy and Buildings*, *43*(7), 1784–1791. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.022>
- Hughes, B. R., & Ghani, S. a a A. (2010). A numerical investigation into the effect of Windvent louvre external angle on passive stack ventilation performance. *Building and Environment*, *45*(4), 1025–1036. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.010>
- Hui, S. C. M. (1996). *Energy Performance of Air-conditioned Buildings in Hong Kong*. The University of Hong Kong. Retrieved from <http://web.hku.hk/~cmhui/thesis/toc.htm>
- Indraganti, M., Ooka, R., & Rijal, H. (2012). Significance of air movement for thermal comfort in warm climates: A discussion in Indian context. In *Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world* (pp. 12–15). Windsor. Retrieved from [http://nceub.commoncense.info/uploads/W1213 Indraganti.pdf](http://nceub.commoncense.info/uploads/W1213%20Indraganti.pdf)
- ISO. (1991). ISO 8302:1991. Thermal insulation: Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus. Retrieved February 14, 2015, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8302:ed-1:v1:en>
- ISO. (1994). ISO 8990:1994. Thermal insulation: Determination of steady-state transmission properties. Calibrated and guarded hot box. Retrieved February 14, 2015, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8990:ed-1:v1:en>
- Johansson, P., Ekstrand-Tobin, A., & Bok, G. (2014). An innovative test method for evaluating the critical moisture level for mould growth on building materials. *Building and Environment*, *81*, 404–409. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.002>
- Kadir, A., Marsono, B., & Balasbaneh, A. T. (2015). Combinations of building construction material for residential building for the global warming mitigation for Malaysia. *Construction and Building Materials*, *85*, 100–108. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.083>
- Karim Pirnia, M., & Gulām Husain, M. (2005). *Study of styles in Iranian architecture* (1st ed.). Tehran: Tihrān : Surūš-i Dāniš.
- Khalil, S. a., & Shaffie, a. M. (2013). A comparative study of total, direct and diffuse solar irradiance by using different models on horizontal and inclined surfaces for Cairo, Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *27*, 853–863. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.038>
- Khodakarami, J., & Aboseba, M. R. (2015). Impact of Openings ' Number and Outdoor Flow

Direction on the Indoor Vertical Flow Velocity in Wind Catchers, 5(2).

- Koinakis, C. J. (2005). Combined thermal and natural ventilation modeling for long-term energy assessment: validation with experimental measurements. *Energy and Buildings*, 37(4), 311–323. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.022>
- Kolokotroni, M., & Aronis, A. (1999). Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation. *Applied Energy*, 63(4), 241–253.
- Krüger, E., González Cruz, E., & Givoni, B. (2010). Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate. *Building and Environment*, 45(6), 1422–1433. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.12.005>
- Kubota, T., Chyee, D. T. H., & Ahmad, S. (2009). The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia. *Energy and Buildings*, 41(8), 829–839. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.008>
- La Roche, P., & Milne, M. (2004). Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller. *Solar Energy*, 77(4), 421–434. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.004>
- Liddament, M. ., & Orme, M. (1998). Energy and ventilation. *Applied Thermal Engineering*, 18(11), 1101–1109. [http://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00040-4](http://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00040-4)
- Liggett, R., & Milne, M. (2014). Climate Consultant. Los Angeles: University of California, Los Angeles. Retrieved from <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>
- Loutzenhiser, P. G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P. a., Frank, T., & Maxwell, G. M. (2007). Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*, 81(2), 254–267. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2006.03.009>
- Luna, A. (2008). *Diseno y evaluacion de vivienda energeticamente sustentable*. Universidad Autonoma de Baja California.
- Mehleri, E. D., Zervas, P. L., Sarimveis, H., Palyvos, J. a., & Markatos, N. C. (2010). A new neural network model for evaluating the performance of various hourly slope irradiation models: Implementation for the region of Athens. *Renewable Energy*, 35(7), 1357–1362. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.005>
- Mochida, A., Yoshino, H., Miyauchi, S., & Mitamura, T. (2006). Total analysis of cooling effects of cross-ventilation affected by microclimate around a building. *Solar Energy*, 80(4), 371–382. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.014>
- Moghaddam, E. H., Amindeldar, S., & Besharatizadeh, A. (2011). New approach to natural ventilation in public buildings inspired by Iranian's traditional windcatcher. *Procedia Engineering*, 21, 42–52. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.1985>
- Montazeri, H. (2011). Experimental and numerical study on natural ventilation performance of various multi-opening wind catchers. *Building and Environment*, 46(2), 370–378. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.031>
- Montazeri, H., & Azizian, R. (2008). Experimental study on natural ventilation performance of

- one-sided wind catcher. *Building and Environment*, 43(12), 2193–2202. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.01.005>
- Montazeri, H., Montazeri, F., Azizian, R., & Mostafavi, S. (2010). Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling. *Renewable Energy*, 35(7), 1424–1435. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.12.003>
- Nijmeh, S., & Mamlook, R. (2000). Testing of two models for computing global solar radiation on tilted surfaces. *Renewable Energy*, 20(1), 75–81. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00091-9](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00091-9)
- O.N.U. (1998). *Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático* (Vol. 61702). Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- O’Kane, B. (1976). The Madrasa Al-Ghiyāsīyya at Khargird. *Iran*, 14(1), 79–92. <http://doi.org/10.2307/4300545>
- Ogoli, D. M. (2003). Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass. *Energy and Buildings*, 35(9), 851–862. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00246-3](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00246-3)
- OMM. (2006). *La OMM de un vistazo*. Ginebra.
- ONU-HABITAT. (2014). *Por un mejor futuro urbano*. Nairobi.
- P.R.B. (2013). *2014 World population data sheet*. Washington, DC. Retrieved from http://www.prb.org/pdf14/2014-world-population-data-sheet_eng.pdf
- Padovan, A., & Del Col, D. (2010). Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. *Solar Energy*, 84(12), 2068–2084. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2010.09.009>
- Pandey, C. K., & Katiyar, a. K. (2009). A note on diffuse solar radiation on a tilted surface. *Energy*, 34(11), 1764–1769. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.006>
- Policastro, A. J., Assessment, E., Division, I. S., Dunn, W. E., & Carhart, R. A. (1994). A model for seasonal and annual cooling wind tower impacts. *Atmospheric Environment*, 28(3), 379–395.
- Posadillo, R., & López Luque, R. (2009). Evaluation of the performance of three diffuse hourly irradiation models on tilted surfaces according to the utilizability concept. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2324–2330. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.014>
- Priyadarsini, R., Cheong, K. ., & Wong, N. . (2004). Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system. *Energy and Buildings*, 36(1), 61–71. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00076-8](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00076-8)
- Reyes, V. a., Moya, S. L., Morales, J. M., & Sierra-Espinosa, F. Z. (2013). A study of air flow and heat transfer in building-wind tower passive cooling systems applied to arid and semi-arid regions of Mexico. *Energy and Buildings*, 66, 211–221. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.032>
- Rodríguez, J. (2006). *Determinacion de un año climático tipo para estudios de energia en edificios*. Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Rodríguez, N. A., Hinojosa, J. F., & Xamán, J. (2015). Comparative Study Between Experimental Data and Numerical Results of Turbulent Mixed Convection in a Ventilated Cavity. *Journal*

of *Heat Transfer*, 137(5), 054501. <http://doi.org/10.1115/1.4029646>

- Roh, S., Tae, S., & Shin, S. (2014). Development of building materials embodied greenhouse gases assessment criteria and system (BEGAS) in the newly revised Korea Green Building Certification System (G-SEED). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 410–421. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.034>
- Rossi, M., & Pierron, F. (2012). On the use of simulated experiments in designing tests for material characterization from full-field measurements. *International Journal of Solids and Structures*, 49(3-4), 420–435. <http://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.09.025>
- Roucoul, J.-M., Douzane, O., & Langlet, T. (1999). Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural nighttime ventilation system in buildings. *Energy and Buildings*, 29(2), 129–133. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00057-7](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00057-7)
- Saadatian, O., Haw, L. C., Sopian, K., & Sulaiman, M. Y. (2012). Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1477–1495. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.037>
- Saffari, H., & Hosseinnia, S. M. (2009). Two-phase Euler-Lagrange CFD simulation of evaporative cooling in a Wind Tower. *Energy and Buildings*, 41, 991–1000. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.006>
- Salata, F., Golasi, I., Vollaro, A. D. L., & Vollaro, R. D. L. (2015). How High Albedo and Traditional Buildings' Materials and Vegetation Affect the Quality of Urban Microclimate. a Case Study. *Energy and Buildings*. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.010>
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Argiriou, A., & Asimakopoulos, D. (1996). On the efficiency of night ventilation techniques for thermostatically controlled buildings. *Solar Energy*, 56(6), 479–483.
- Schwarz, V. (2010). *Promoting Energy Efficiency in Buildings : Lessons Learned from International Experience. United Nations Development Programme* (Vol. New York).
- Secretaría de Economía. Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 Edificación Sustentable Criterios Y Requerimientos Ambientales Mínimos, Pub. L. No. NMX-AA-164-SCFI-2013 (2013). Mexico: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/DO3156.pdf>
- SEGOB. (2010). NMX-C-189-ONNCCE-2010: Industria de la construcción: Materiales termoaislantes-Determinación de la transmisión térmica (Aparato de placa caliente aislada). Retrieved February 14, 2015, from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5162160&fecha=06/10/2010
- SEGOB. (2011a). NMX-C-181-ONNCCE-2010: INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION - MATERIALES TERMOAISLANTES-DETERMINACION DE LA TRANSMISION TERMICA EN ESTADO ESTACIONARIO (MEDIDOR DEL FLUJO DEL CALOR). Retrieved from http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5175837&fecha=27/01/2011
- SEGOB. (2011b). NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltante de edificios para uso habitacional. Retrieved June 1, 2015, from

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011

- SENER. Norma Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011, Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba., 50 Secretaria de Energía 23–59 (2011).
- Shaviv, E., Yezioro, A., & Capeluto, I. G. (2001). Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy*, 24(3-4), 445–452. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00027-1](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00027-1)
- Silvestre, J. D., De Brito, J., & Pinheiro, M. D. (2014). Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials - Calculation rules, results and contribution to a “cradle to cradle” life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 66, 37–45. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.028>
- Soutullo, S., Sanjuan, C., & Heras, M. R. (2012). Energy performance evaluation of an evaporative wind tower. *Solar Energy*, 86(5), 1396–1410. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.001>
- Stavrakakis, G. M., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Markatos, N. C. (2008). Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings*, 40(9), 1666–1681. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.022>
- Steinfeld, K., Bhiwapurkar, P., Dyson, A., & Vollen, J. (2010). Situated Bioclimatic Information Design : a new approach to the processing and visualization of climate data. In *Acadia 2010 Conference* (pp. 88–96). Nueva York: The Irwin S. Chanin School of Architecture.
- Su, Y., Riffat, S. B., Lin, Y.-L., & Khan, N. (2008). Experimental and CFD study of ventilation flow rate of a Monodraught™ windcatcher. *Energy and Buildings*, 40(6), 1110–1116. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.001>
- Takano, A., Hughes, M., & Winter, S. (2014). A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Building and Environment*, 82, 526–535. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.026>
- Taylor, S. T., Persily, A. K., Burge, H., Daynard, R., Fanger, P. O., Fickes, E. a, ... Hittle, D. C. (1999). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE Standards* (Vol. 1999).
- Tudela, F. (1980). *Ecodiseño*. (Universidad Autonoma Metropolitana, Ed.) (Universida). Mexico, D.F.: Universidad Autonoma Metropolitana.
- van Hooff, T., Blocken, B., Aanen, L., & Bronsema, B. (2011). A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. *Building and Environment*, 46(9), 1797–1807. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.009>
- Vazquez, J. E. (2007). *Captadores y torres de viento : Análisis de sus funciones bioclimáticas y clasificación de acuerdo con su país de origen*. Mexicali.
- Vissilia, a. M. (2009). Bioclimatic lessons from James C. Rose’s architecture. *Building and Environment*, 44(8), 1758–1768. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.017>
- Wolkoff, P., & Kjaergaard, S. K. (2007). The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International*, 33(6), 850–7. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2007.04.004>
- Wong, N. H., & Heryanto, S. (2004). The study of active stack effect to enhance natural ventilation

- using wind tunnel and computational fluid dynamics (CFD) simulations. *Energy and Buildings*, 36(7), 668–678. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.013>
- Yam, J., Li, Y., & Zheng, Z. (2003). Nonlinear coupling between thermal mass and natural ventilation in buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(7), 1251–1264. [http://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00379-4](http://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00379-4)
- Yang, L., & Li, Y. (2008). Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation. *Energy and Buildings*, 40(11), 2052–2058. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.014>
- Yarke, E. (2005a). Alcances de la ventilacion natural. In Nobuko (Ed.), *Ventilación natural de edificios* (1a Edicion, p. 10). Buenos Aires: Nobuko.
- Yarke, E. (2005b). *Ventilacion natural de edificios* (Primera). Buenos Aires: nobuko.
- Zhao, R., Sun, S., & Ding, R. (2004). Conditioning strategies of indoor thermal environment in warm climates. *Energy and Buildings*, 36(12), 1281–1286. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.07.002>
- Zhou, J., Zhang, G., Lin, Y., & Li, Y. (2008). Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 40(6), 979–986. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.08.001>