

EDIFICIOS ENERGETICAMENTE EFICIENTES: EL FACTOR EPIDEMIOLOGICO

Marcelo Ballesteros y Juan Pablo Aparicio¹

Instituto de Investigación en Energías no Convencionales,
Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia N° 5150, 4400 – Salta, Argentina. juan.p.aparicio@gmail.com

RESUMEN: En este trabajo revisamos los principios fundamentales del control de enfermedades transmitidas por aire y como estos podrían adecuarse a un diseño energéticamente eficiente. Utilizamos modelos matemáticos para simular el proceso de transmisión lo cual nos permiten ilustrar el efecto de distintas medidas de prevención, en particular ventilación adecuada y segregación de pacientes, sospechosos de enfermedades transmitidas por vía aérea, en ambientes especialmente diseñados. Finalmente discutimos posibles líneas de investigación en esta área.

Palabras Clave: arquitectura sustentable, infección intrahospitalaria, modelos matemáticos, simulación.

INTRODUCCION

El diseño y construcción de edificios energéticamente eficientes es un área en crecimiento empujado por el aumento de los costos de mantenimiento asociados con la calefacción y refrigeración de los mismos. La arquitectura basada en estos principios se conoce como arquitectura bioclimática (ver por ejemplo Olgyay 1963, Serra Florensa y Coch Roura 1995). En particular en los últimos años se han construido en esta línea edificios públicos: escuelas, centros de salud y hospitales. En este trabajo discutiremos algunos aspectos relacionados con el diseño de estos últimos y su relación con un problema de suma importancia en salud pública, el control de infecciones intrahospitalarias.

Desde el punto de vista de la calefacción un edificio energéticamente eficiente se basa en la aislación térmica, disminución de fugas, y la mayor ganancia pasiva posible de energía a través de radiación solar. Entre los dispositivos utilizados se encuentran superficies vidriadas convenientemente orientadas tanto en paredes como en techos (ver por ejemplo Filippín 2005) y colectores solares que recirculan el aire del ambiente a climatizar (ver por ejemplo Hernández et al 2007, 2008). Sin embargo, algunos de estos principios fundamentales, minimización de fugas y recirculación de aire, se contraponen a los principios fundamentales del control de infecciones transmitidas por aire.

Desde un punto de vista epidemiológico es deseable altas tasas de ventilación así como la eliminación de sistemas de recirculación que no traten el aire. Si bien estas consideraciones se aplican al diseño de cualquier centro de salud, adquieren una dimensión particularmente importante a la hora de diseñar un edificio energéticamente eficiente ya que en este caso debe evaluarse no solo la eficiencia energética sino también la eficiencia en el control de la transmisión de enfermedades en el edificio.

En este trabajo revisamos los principios básicos del control de enfermedades transmitidas por aire, los sistemas utilizados para lograrlo y el potencial impacto sobre diseños energéticamente eficientes. Finalmente discutimos posibles líneas de investigación en el área.

VENTILACION, SISTEMAS DE RECIRCULACION Y TRANSMISION DE ENFERMEDADES

Entre las enfermedades transmitidas por aire de mayor relevancia en salud pública se encuentra la influenza, tuberculosis, *Severe Acute Respiratory Syndrome* (SARS) entre muchas otras (Tang et al 2006, Li et al 2007). Transmisión por aire ocurre cuando una persona infecciosa dispersa patógenos al toser y/o estornudar. En estos procesos se producen aerosoles infecciosos: microgotas líquidas o sólidas con tamaños variables en un amplio rango entre 10^{-3} a 10^2 μm . Mientras las microgotas mas grandes caen rápidamente por efecto de la gravedad, las mas pequeñas (típicamente menores a 50 μm) se evaporan rápidamente dejando un núcleo potencialmente infeccioso y que puede permanecer suspendido en el aire por muchas horas. La infección de enfermedades transmitidas por aire ocurre por la respiración de tales microgotas o núcleos infecciosos.

Los prolongados tiempos de suspensión de aerosoles infecciosos hace que un ambiente cerrado se convierta en un área de riesgo de infección y que dicho riesgo aumente en la medida que mas fuentes infecciosas visiten el lugar. La ventilación es una de las herramientas fundamentales para disminuir este riesgo. El proceso de ventilación consiste en la introducción de un flujo de aire libre de contaminantes en un ambiente dado. Una forma conveniente de medir el nivel de ventilación es en términos de cuantas veces se introduce un volumen igual al del ambiente a ventilar por unidad de tiempo (cambios de aire, abreviado como AC). Es importante destacar que cuando se produce un cambio de aire, la concentración de núcleos o microgotas infecciosas no se reduce a cero ya que estas se diluyen en el aire ingresado. Una consecuencia de este hecho es que la disminución de la concentración de contaminantes no es proporcional a la ventilación, y por lo tanto reducciones por debajo de cierto umbral resultan impracticables o muy costosas.

¹ Investigador del CONICET y autor para correspondencia

Una forma de lograr mayor eficiencia en el proceso de ventilación consiste en tener flujos de aire laminares que “barran” las partículas infecciosas y ubicar las tomas de aire en las zonas de mayor concentración de contaminantes.

La forma más económica de obtener aire limpio para ventilación es tomarlo desde el exterior de los edificios, sin embargo, los niveles de ventilación recomendados representan varios cambios de aire por hora y por lo tanto no se utilizan cuando por ejemplo la temperatura exterior es mucho más baja que la del ambiente a ventilar. En tales caso se pueden utilizar sistemas de recirculación de aire siempre y cuando tales dispositivos estén equipados para tratar el aire utilizando, por ejemplo, filtros de alta eficiencia y/o lámparas ultravioletas.

SISTEMAS DE IRRADIACION ULTRAVIOLETA

Si bien existe consenso acerca de la importancia de una buena ventilación en el control de la transmisión de enfermedades, los sistemas de irradiación ultravioleta constituyen una herramienta complementaria de reconocida acción contra virus y bacterias (ver por ejemplo, Ko et al 2001). Las lámparas de descarga más comúnmente utilizadas presentan un pico de emisión alrededor de los 254 nm que se ubica justo dentro del espectro de absorción del ácido desoxirribonucleico (240 nm-270 nm). La exposición a esta radiación produce la muerte de organismos unicelulares o inactiva la capacidad de reproducción de los virus al dañar irreversiblemente su ADN. Estas lámparas pueden utilizarse en los sistemas de recirculación aunque un arreglo común es su instalación en el techo de los ambientes a desinfectar. En tal caso estas deben protegerse de las personas mediante la construcción de un antetecho que permita el paso de aire. Para que este sistema funcione eficientemente el aire debe circular ya sea por convección natural o por medios mecánicos dentro de la zona de exposición a la radiación ultravioleta. La efectividad de estos sistemas depende del microorganismo en cuestión así como de la potencia de irradiación instalada y de la tasa de circulación de aire por la zona de desinfección.

INFECCION EN UNA SALA DE ESPERA: UN EJEMPLO ILUSTRATIVO UTILIZANDO MODELOS MATEMATICOS Y SIMULACIONES

Los modelos de infección tienen una larga tradición en epidemiología y en particular en el estudio de transmisión por vía aérea. Utilizando experimentos con conejillos de indias Wells, Riley y colaboradores (Wells 1955, Riley et al 1959) propusieron un modelo empírico para relacionar el número de casos producidos con la tasa de ventilación. Posteriormente se desarrollaron y estudiaron una variedad de modelos de transmisión por vía aérea incluyendo la influencia de sistemas de circulación, ventilación y de irradiación ultravioleta (Nardell et al 1991, 2001, 2004, Ko et al 2001, Chao y Wan 2006, Beggs et al 2003, 2010, Radonovich et al 2001).

Modelo de Wells-Riley

Este modelo se utiliza frecuentemente para estimar el número de nuevos casos producidos en un ambiente infeccioso y se basa en el hecho de que la probabilidad de infección de un individuo en un ambiente caracterizado por un riesgo R está dada por

$$P_{inf} = 1 - e^{-R} \quad (1)$$

El riesgo R depende de las características del ambiente, la susceptibilidad del individuo expuesto, la concentración de partículas infecciosas, la tasa de ventilación pulmonar, la tasa de ventilación ambiental y el tiempo de exposición. El modelo de Wells – Riley fue propuesto para estimar el número de casos secundarios de tuberculosis producidos por I casos fuente² conocida la tasa de ventilación. En este modelo el riesgo R viene dado por

$$R = Iqpt/Q \quad (2)$$

Donde

I = número de infecciosos

q =número de partículas infecciosas emitidas por unidad de tiempo

p =tasa de respiración

t =tiempo de exposición

Q =tasa de ventilación

Este modelo es de amplia utilización y cuenta con un importante respaldo experimental. Cuando la tasa de ventilación es nula la probabilidad de infección es uno independientemente del tiempo de exposición, y por lo tanto, una reformulación es sin duda necesaria. Sin embargo este modelo simple sirve para ejemplificar el efecto de distintas tasas de ventilación sobre la generación de nuevos casos. Por ejemplo para el caso en que $Iqpt=1$ /hora la probabilidad de infección decrece con la tasa de ventilación Q como se muestra en la Fig. 1.

² Se denomina caso fuente (o caso índice) a un individuo infeccioso.

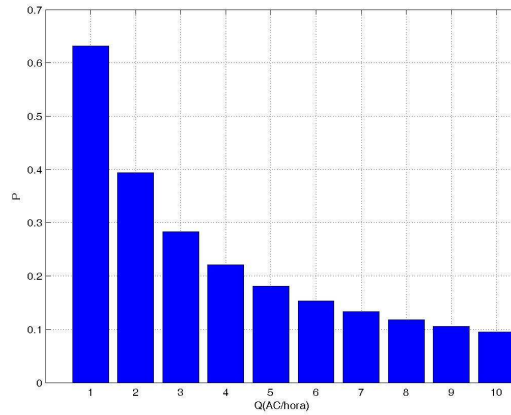


Fig. 1. Variación de la probabilidad de infección con la tasa de ventilación Q (AC/hora) de acuerdo al modelo de Wells-Riley. Para tuberculosis el CDC (1994) recomienda una tasa de al menos 6 AC/hora en ambientes hospitalarios.

Modelos del estilo (1) asumen un alto grado de homogeneidad, en particular se considera que el aire dentro del ambiente donde ocurre la transmisión está bien mezclado en todo tiempo. Sin embargo la concentración de las partículas infecciosas presenta una distribución espacial que hace que los individuos más cercanos a la fuente emisora posean un riesgo de infección más alto que los otros. A modo de ilustración consideremos una sala de espera con un arreglo lineal de 21 asientos y con un solo emisor ubicado en el centro del mismo. Una primera aproximación consiste en considerar mezcla homogénea en volúmenes relativamente pequeños y tener en cuenta la difusión entre volúmenes adyacentes. En nuestro caso consideramos como variable dinámica el número de partículas infecciosas (N_i) en el volumen ocupado por una persona en la sala de espera en el asiento i -ésimo. Consideraremos también dispersión pasiva caracterizada por un coeficiente C igual a la probabilidad de que una partícula pase de un volumen a otro por unidad de tiempo. El modelo para la difusión pura resulta entonces

$$N_i(t + dt) = N_i(t) - 2CN_i(t)dt + CN_{i-1}(t)dt + CN_{i+1}(t)dt, \quad (3)$$

que es una discretización de la ecuación de difusión en una dimensión

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (4)$$

si definimos el coeficiente de difusión en una dimensión como $D=C/\Delta^2x$ donde Δx es la separación entre dos volúmenes adyacentes. El modelo se completa especificando el valor de la tasa de emisión de la fuente infecciosa (número de partículas infecciosas emitidas por el caso fuente por unidad de tiempo, o los casos fuente si hubiera mas de uno), su ubicación, y la tasa de remoción de partículas infecciosas (debidas a ventilación, tratamiento del aire, o simplemente por difusión fuera de lugares viables para la transmisión). El modelo resultante es uno de tipo reacción-difusión,

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + f(x) \quad (5)$$

Donde el término de reacción $f(x,t)=-v(x,t)N(x)+I_0(x,t)$, contiene un término de pérdida debido a la tasa de ventilación, $v(x,t)$ que nosotros consideramos constante durante los periodos simulados, y un término de ganancia que representa la emisión de partículas infecciosas por los casos fuente. Estos individuos pueden estar ubicados en distintas partes del ambiente y por periodos variables de tiempo. En nuestro ejemplo ilustrativo consideramos un solo caso fuente, ubicado en el centro del arreglo de asientos, emitiendo a tasa constante por el intervalo de una hora. En estas condiciones el término de ganancia viene dado por

$$I_0(x) = \begin{cases} i_0 & \rightarrow x = x_c \\ 0 & \rightarrow x \neq x_c \end{cases}$$

donde x_c representa la posición central. Es importante destacar que en este modelo, a diferencia del de Wells-Riley podemos incluir ventilación nula sin problema. El riesgo de infección del individuo en la posición i será proporcional a la densidad N_i y a el tiempo de permanencia en dicha posición.

Como podemos apreciar en las figuras 2 y 3 la concentración de partículas infecciosas disminuye a medida que nos alejamos del caso fuente y a medida que aumentamos la tasa de ventilación. Estos resultados ejemplifican porque la segregación

especial de pacientes portadores de enfermedades transmisibles por aire en ambientes con buena ventilación puede resultar en significativas reducciones en transmisiones intrahospitalarias.

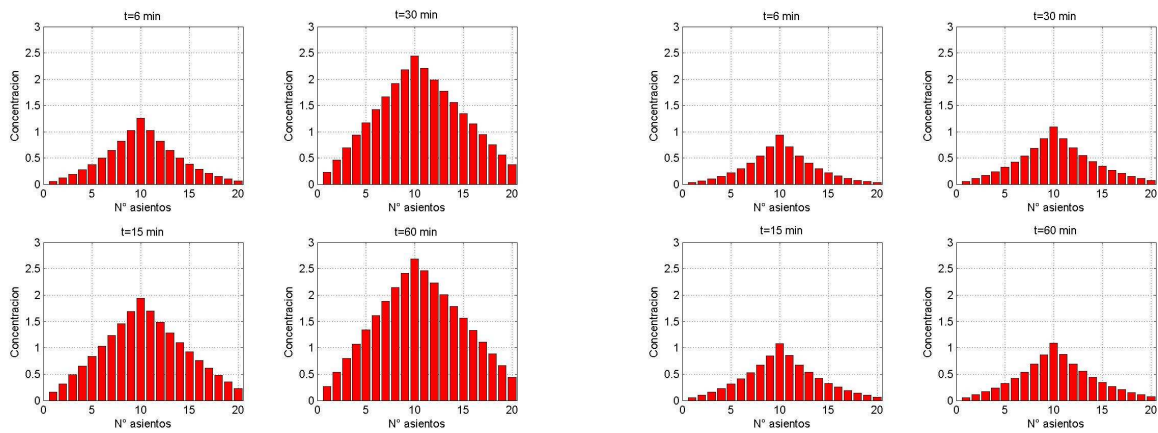
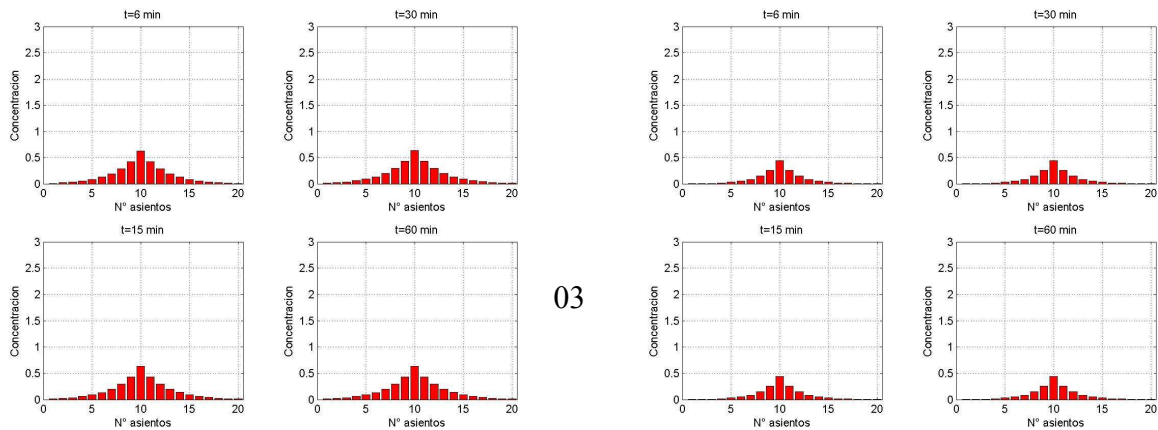


Fig. 2. Variación de la densidad de partículas infecciosas con la posición en un arreglo lineal de 21 asientos donde un caso fuente se ubica en el centro para distintos tiempos a partir del arribo del caso índice. (panel izquierdo: tasa de ventilación nula, panel derecho tasa de ventilación 3 AC/hora).



03

Fig. 3. Variación de la densidad de partículas infecciosas con la posición en un arreglo lineal de 21 asientos donde un caso fuente se ubica en el centro para distintos tiempos a partir del arribo del caso índice. (panel izquierdo: tasa de ventilación 6AC/hora, panel derecho tasa de ventilación 10 AC/hora).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Como hemos discutido en este trabajo los principios básicos del diseño de edificios energéticamente eficientes se contraponen, en principio, con los principios básicos del control de enfermedades. Ambientes cerrados y sistemas que calientan aire por recirculación son fundamentalmente perniciosos.

Los colectores solares de tipo convectivo circulan el aire en sentido opuesto al recomendado para controlar la transmisión. La eficiencia térmica de estos dispositivos se incrementa notablemente cuando la circulación es asistida mecánicamente lo cual empeora el escenario epidemiológico. Una solución a este problema se podría lograr utilizando un sistema de filtrado de alta eficiencia eventualmente combinado con el uso de irradiación ultravioleta. En tal caso convendría además invertir el sentido de circulación ubicando las tomas de aire en las regiones superiores del ambiente donde los niveles de contaminación son más elevados.

Si bien existe consenso acerca de la importancia de la ventilación en el control de enfermedades transmitidas por la vía aérea, no ocurre lo mismo con los valores mínimos de las tasas de ventilación requeridos para lograrlo (Li et al 2007). Para ambientes hospitalarios en general se recomienda una ventilación mínima de 2 AC/hora (ASHRAE 1990). Centers for Disease Control and Prevention recomienda una ventilación de al menos 6 AC/hora para ayudar a prevenir la transmisión de la tuberculosis en salas de espera (CDC 1994). Teniendo en cuenta que la probabilidad de transmisión de la tuberculosis es mucho mas baja que la de otras enfermedades de transmisión por aire podemos darnos una idea de los altos niveles de ventilación necesarios en ambientes de riesgo. Si estos niveles de ventilación se lograran mediante un flujo de aire externo contrarrestaría las ganancias logradas con un diseño energéticamente eficiente. Es claro entonces que la forma de obtener altas tasas de ventilación debe lograrse por otros medios. Uno es recircular el aire pero tratándolo con filtros de alta eficiencia

y sistemas de irradiación ultravioleta. Si estos sistemas se utilizaran tanto en ambientes refrigerados como calefaccionados conviene que sean internos o bien aislados para minimizar pérdidas térmicas. La construcción de cámaras de aire superiores con sistemas de lámparas ultravioletas es una alternativa interesante ya que provee desinfección sin pérdidas térmicas significativas al ser la circulación totalmente interna al edificio. Es importante remarcar que la eficiencia de tales sistemas depende de altas tasas de convección natural y/o de circulación asistida mecánicamente.

Otra herramienta epidemiológica a utilizar podría ser la segregación de pacientes de acuerdo a los síntomas. Pequeñas salas de espera especialmente diseñadas para pacientes sospechosos de enfermedades transmitidas por vía aérea puede resultar una solución relativamente económica. De la misma forma es altamente recomendable que los ambientes de internación de tales pacientes estén negativamente presurizados.

El estudio de la transmisión aérea de patógenos es un área activa de investigación multidisciplinaria que involucra estudios epidemiológicos, experimentos con modelos animales, desarrollo de nuevos modelos matemáticos y simulaciones, y diseño adecuado tanto desde el punto de vista arquitectónico como de ingeniería. Una exhaustiva revisión reciente (Li et al 2007) muestra que existe una deficiencia de estudios multidisciplinarios en esta área del conocimiento. En el contexto del diseño de hospitales o centros sanitarios energéticamente eficientes creemos importante destacar que el principal factor a tener en cuenta puede ser el epidemiológico. Otros edificios públicos donde el control de transmisión de enfermedades debiera jugar un papel central son los establecimientos educativos. Los salones de clase resultan ambientes de riesgo debido al elevado número de personas que comparten ambientes donde existen contactos prolongados y frecuentes entre sus ocupantes.

El control de infecciones intrahospitalarias es un área activa de investigación multidisciplinaria. No ocurre lo mismo con la adecuación y utilización de los sistemas utilizados para dicho control en el diseño de edificios energéticamente eficientes. A continuación presentamos y discutimos algunos conceptos y técnicas que debieran tenerse en cuenta.

Ventilación natural. Cuando las condiciones climáticas lo permitan la opción de utilizar ventilación natural debe ser tenida en cuenta. La ventilación natural es en general más efectiva, y además más económica, que la ventilación mecánica (WHO 2009). Un buen diseño de ventilación natural debe contemplar la ubicación y dimensiones de las ventanas (que pueden no coincidir con la mejor orientación necesaria para ganancia por radiación). En particular es importante que el flujo de aire resultante no contamine áreas de espera o circulación de personas.

Sistemas de aire acondicionado. En los casos, o épocas del año, en que la ventilación natural no se pueda utilizar deben considerarse sistemas de ventilación mecánica que garanticen las tasas de ventilación adecuadas. Las alternativas en este caso consisten en acondicionar aire tomado desde el exterior de los edificios ó bien recircular el aire y desinfectarlo por medio de la instalación de filtros de alta eficiencia y eventualmente sistemas de radiación ultravioleta.

Análisis de costos. Un análisis cuidadoso de costos de construcción versus costos de mantenimiento debe realizarse teniendo en cuenta que lo primero que debe garantizarse es un diseño que minimice las probabilidades de transmisión de enfermedades dentro del edificio.

Modelos matemáticos y computacionales. En particular será de utilidad el desarrollo de modelos realistas que permitan evaluar tanto el número como ubicación de filtros de alta eficiencia, así como la potencia de irradiación ultravioleta germicida por superficie, necesarios para lograr los niveles recomendados de desinfección. En nuestro modelo simple consideramos un arreglo lineal de asientos. En este caso un flujo de aire laminar perpendicular al arreglo, como implícitamente se consideró, es efectivo. Si consideramos arreglos bidimensionales debemos tener en cuenta que el flujo de aire puede llevar las partículas infecciosas lejos de la fuente emisora.

El objetivo principal del diseño de edificios energéticamente eficientes es lograr que los ambientes operen en la zona de confort humano (esencialmente alrededor de los 20⁰C) minimizando los requerimientos de acondicionamiento. Sin embargo, cuando se trata de centros de atención médica la dimensión epidemiológica debe ser la principal a tener en cuenta. Esto plantea nuevos desafíos que requieren de enfoques multidisciplinarios.

REFERENCIAS

- ASHRAE (1990). Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, USA.
- Beggs C.B., Noakes C.J., Sleight P.A., Fletcher L.A., Siddiqi K. (2003). The transmission of tuberculosis in confined spaces: an analytical review of alternative epidemiological models. *Int J. Tuberc Lung Dis.* Vol. 7 (11), pp 1015-1026.
- Beggs C.B., Shepherd S.J., Kerr K.G. (2010). Potential for airborne transmission of infection in the waiting areas of healthcare premises: stochastic analysis using a Monte Carlo model. *BMC Infectious Diseases*, Vol. 10, p 247
- CDC (1994). Guidelines for preventing the transmission of *Mycobacterium tuberculosis* in health-care facilities, *Morbidity and Mortality Weekly Reports*, Centers for Disease Control and Prevention, Vol. 43 (RR-13), 1-132.
- Chao C.Y.H., Wan. P.M. (2006). A study of the dispersion of expiratory aerosols in unidirectional downward and ceiling-return type airflows using a multiphase approach. *Indoor Air*, Vol. 16 pp. 296-312

- Filippín C. (2005). *Uso eficiente de la energía en edificios*, Ediciones Amerindia, La Pampa, Argentina.
- Hernández A., Fernández C., Salvo N. y Suligoy H. (2007). Diseño, construcción y primeros ensayos de un colector solar calentador de aire de tipo loop convectivo para el calentamiento de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol 11, N° 2, pp. 03.76–03.82.
- Hernández A., Salvo N., Fernández C. y Suligoy H. (2008). Diseño y evaluación termica de un colector solar calentador de aire de placa perforada para calefacción de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol 12, N° 2, pp. 03.133–03.140.
- Li Y., Leung G.M., Tang J.Y., Yang X., Chao C.Y.H., Lin J.Z., Lu J.W., Nielsen P.V., Niu J., Qian H., Sleigh A.C., Su H.J.J., Sundell J., Wong T.W., Yuen P.L. (2007). Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment-a multidisciplinary systematic review. *Indor Air*, Vol. 17, pp 2-18.
- Nardell E.A., Ko G., Burge H.A., Thompson K.M. (2001). Estimation of Tuberculosis Risk and Incidence under Upper Room Ultraviolet Germicidal Irradiation in a Waiting Room in a Hypothetical Scenario. *Risk Analysis*, Vol 21, Nro 4.
- Nardell E., Ko G., Thompson K. (2004). Estimation of Tuberculosis Risk on a Commercial Airliner. *Risk Analysis*, Vol 24 Nro 2.
- Nardell EA, Keegan J, Cheney SA, Etkind SC (1991). Airborne infection. Theoretical limits of protection achievable by building ventilation. *Am Rev Respir Dis*, Vol. 144 (2):302-306.
- Nazaroff W.W., Nicas M., Miller S.L. (1998). Framework for Evaluating Measures to Control Nosocomial Tuberculosis Transmission. *Indor Air*, Vol. 8, pp. 205-218.
- Olgay, V. (1963), *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princenton University Press, p.203.
- Radonovich L., Martinello R., Hodgson M. (2008). Influenza and Ultraviolet Germicidal Irradiation. *Virology Journal*, Vol. 5, pp 149.
- Riley RL, Mills C., Nyka W., Weinstock N., Storcy P. B., Sultan L.U., Riley M.C., Wells W.F. (1959). Aerial dissemination of pulmonary tuberculosis: a two-year study of contagion in a tuberculosis ward. *American Journal Epidemiogy*, Vol 142, Nro 1.
- Serra Florensa, R. y Coch Roura, H. (1995), *Arquitectura y energía natural*. Ediciones de la Universidad de Catalunya, España, pp 395.
- Tang J.W., Li Y., Eames I., Chan P.K.S., Ridgway G.L. (2006). Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *Journal of Hospital Infection*, Vol. 64, pp. 100-114
- Wells W.F. (1955). *Airborne contagion and air hygiene*. Chapter 1, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- WHO (2009). *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*. James Atkinson, Yves Chartier, Carmen Lúcia Pessoa-Silva, Paul Jensen, Yuguo Li and Wing-Hong Seto (editores), WHO Publication/Guidelines, World Health Organization.

ABSTRACT: In this work we review the fundamentals of the control of airborne diseases and their relationship with energetically efficient buildings. Mathematical models and simulations are used to illustrate the effect of different preventive measures including the role of ventilation and the segregation of patients suspected to be carriers of airborne diseases. We finally discuss potential research lines in this area.

Key words: Sustainable architecture, intrahospitalary infection, mathematical models, simulations