# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

## OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICACIONES EN CLIMAS CÁLIDOS DEL ECUADOR

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**


**JUAN PABLO KASTILLO ESTEVEZ**

**(juanpakas_17@hotmail.es)**

**ROBINSON DAVID BELTRÁN CORREA**

**(rdbeltran.10@gmail.com)**

**DIRECTOR: CARLOS FABIÁN ÁVILA VEGA, Ph.D.**

**(cavila67@caltech.edu)**

**CODIRECTOR: ARQ. MARÍA ISABEL MIÑO RODRÍGUEZ, Msc.**

**(isabel.mino@iner.gob.ec)**

**CODIRECTOR: ÁLVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGÁN, Ph.D**

**alvaro.aguinaga@epn.edu.ec**


**Quito, Enero de 2015**

# DECLARACIÓN

Nosotros, JUAN PABLO KASTILLO ESTEVEZ y ROBINSON DAVID BELTRÁN CORREA, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**JUAN PABLO KASTILLO ESTEVEZ**

**ROBINSON DAVID BELTRÁN CORREA**

# CERTIFICACIÓN

Nosotros certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por ROBINSON DAVID BELTRÁN CORREA y JUAN PABLO KASTILLO ESTEVEZ, bajo nuestra supervisión.

**Carlos Ávila, Ph.D.**
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

**Arq. Isabel Miño, MSc.**
**CO-DIRECTOR DEL PROYECTO**

**Álvaro Aguinaga, Ph.D.**
**CO-DIRECTOR DEL PROYECTO**

# AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todo el equipo de investigación Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables y en especial al equipo de Eficiencia Energética en Edificaciones por su generosa colaboración en el desarrollo de esta investigación.

Un especial agradecimiento a Isabel Miño por su paciencia y guía durante el desarrollo de esta investigación.

A Carlos Naranjo por su aporte en el tema de simulaciones energéticas, y sistemas de climatización.

Al doctor Carlos Ávila por presentarnos este tema de investigación e introducirnos en el mundo de la investigación.

# DEDICATORIAS

Dedico el esfuerzo realizado en este proyecto a mis padres Felipe y Yolanda por todo su apoyo y confianza en el transcurso de mi formación académica y por enseñarme todos los valores que hoy me llevan a convertirme en profesional.

A toda mi familia por su apoyo y amor ya que han sido fundamentales para sentirme motivado y salir adelante.

A mis amigos por hacer de la universidad una gran experiencia de vida.

*David Beltrán*

Dedico esta tesis a mis padres Lucia y Marco quienes han sido un soporte durante toda mi vida y además me han bridado todo su apoyo en todas mis decisiones.

A toda mi familia por siempre estar al pendiente de mí.

A mis amigos por todas las experiencias vividas durante la vida estudiantil.

*Juan Pablo Kastillo*

*"Dedicado a la memoria de Jerko M. Labus"*

# ÍNDICE

DECLARACIÓN ..... i
CERTIFICACIÓN ..... ii
AGRADECIMIENTOS ..... iii
DEDICATORIAS ..... iv
ÍNDICE DE TABLAS ..... vii
ÍNDICE DE FIGURAS ..... viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS ..... ix
RESUMEN ..... x
ABSTRACT ..... xi
PRESENTACIÓN ..... xii
GLOSARIO DE TÉRMINOS ..... xiii
CAPÍTULO 1 ..... 1
1.1 INTRODUCCIÓN ..... 1
CAPÍTULO 2 ..... 5
2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL ..... 5
2.1.1 FLOTABILIDAD TÉRMICA ..... 5
2.1.2 VIENTO ..... 6
2.2 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN NATURAL ..... 7
2.2.1 VENTILACIÓN UNILATERAL ..... 7
2.2.2 VENTILACIÓN CRUZADA ..... 8
2.2.3 CHIMENEA SOLAR ..... 9
2.2.4 DOBLE FACHADA ..... 10
2.3 SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y ANÁLISIS CFD ..... 12
2.3.1 MODELOS CFD ..... 12
2.3.2 SIMULACIÓN ENERGÉTICA ..... 12
2.3.3 DESIGNBUILDER-ENERGYPLUS ..... 13
2.4 NORMATIVAS SOBRE REQUERIMIENTOS DE VENTILACIÓN ..... 14
CAPÍTULO 3 ..... 16
3.1 METODOLOGÍA ..... 16
3.1.1 RECOPILACIÓN DE DATOS ..... 17
3.1.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CASOS PARA SIMULACIÓN ..... 19

3.1.2.1 Dimensionamiento de aberturas de estrategias de ventilación natural 22
3.1.2.1.1 Ventilación unilateral .....22
3.1.2.1.2 Ventilación cruzada .....23
3.1.2.1.3 Chimenea solar .....26
3.1.2.1.4 Doble fachada .....27
3.1.3 SIMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS .....28
3.1.3.1 Simulación energética .....28
3.1.3.1.1 Simulación energética de estrategias de ventilación natural.....28
3.1.3.1.2 Simulación energética de sistemas híbridos .....29
3.1.3.2 Simulación CFD de estrategias de ventilación natural .....29
3.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....31
3.2.1.1 Dimensionamiento de estrategias de ventilación natural .....35
3.2.2 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS .....39
3.2.2.1 Simulación energética .....39
3.2.2.1.1 Simulación energética de estrategias de ventilación natural.....39
3.2.2.1.2 Simulación energética de sistemas híbridos .....39
3.2.2.2 Simulación CFD de estrategias de ventilación natural .....41
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....42
BIBLIOGRAFÍA .....45
ANEXO 1 .....51
ANEXO 2 .....55
ANEXO 3 .....58
ANEXO 4 .....62

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Relación entre elementos característicos y sistemas de ventilación natural, así como su uso .....7
Tabla 2.2 Tasas de renovación de aire por persona .....15
Tabla 3.1 Formulas estándar para estimar el flujo de aire para ventilación unilateral. .....23
Tabla 3.2 Formulas estándar para estimar el flujo de aire para ventilación cruzada. .....24
Tabla 3.3 Identificación de las facultades y aulas analizadas.....32
Tabla 3.4 Parámetros de actividad.....32
Tabla 3.5 Horarios de ocupación.....32
Tabla 3.6 Materialidad del aula .....33
Tabla 3.7 Rangos de confort higrotérmico.....34
Tabla 3.8 Resultados de la simulación de forma y orientación con relación a las características de cada edificio .....34
Tabla 3.9 Dimensiones de las aberturas .....37

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diferencia de presiones en las fachadas .....5
Figura 2.2 Incidencia del viento sobre la envolvente del edificio .....6
Figura 2.3 Esquema de ventilación por un solo lado .....7
Figura 2.4 Esquema de ventilación cruzada.....8
Figura 2.5 Ejemplo de ventanas tipo basculante .....9
Figura 2.6 Chimenea Solar .....10
Figura 2.7 Doble fachada en climas cálidos .....10
Figura 2.8 Red de volúmenes finitos .....13
Figura 3.1 Metodología de estudio .....17
Figura 3.2 Datos recopilados de las aulas.....18
Figura 3.3 Variantes de la chimenea solar .....27
Figura 3.4 Ejemplo de ocupación de un aula para la simulación CFD .....30
Figura 3.5 Formas de edificaciones de la investigación de campo .....34

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Rangos aceptables de temperatura operativa y humedad para oficinas (ASHRAE-55, 2004). ....21
Gráfico 3.2 Consumo de energía de acuerdo con la profundidad de la cavidad (Joe et al., 2014). ....27
Gráfico 3.3 Velocidades del aire en el contorno de la edificación. ....35
Gráfico 3.4 Presión en el contorno del edificio. ....36
Gráfico 3.5 Distribución de temperaturas en rangos de confort ....39
Gráfico 3.6 Consumo energético con sistema híbrido ....40
Gráfico 3.7 Resumen de análisis CFD ....41

Gráfico A2. 1 Distribución de la temperatura de bulbo seco (izq.) y humedad relativa (der) en un año típico durante el día ....56
Gráfico A2. 2 Velocidad y dirección del viento en un año típico ....57
Gráfico A2. 3 Distribución del porcentaje de cielo cubierto (izq.) e iluminación global (der) en un año típico durante el día ....57

Gráfico A3. 1 Sensación con respecto a la temperatura por aula ....60
Gráfico A3. 2 Percepción de la temperatura por aula ....60
Gráfico A3. 3 Percepción de la calidad del aire y olor en cada aula ....61

# RESUMEN

La ventilación natural es una medida de eficiencia energética que simultáneamente mejora las condiciones de confort higrotérmico y reduce el consumo energético por sistemas de climatización que pueden consumir hasta el 75 % de la energía total de la edificación. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la ventilación natural como estrategia para reducir el consumo energético e incrementar el confort higrotérmico en una edificación educativa en el clima cálido-húmedo de Guayaquil.

Mediante simulaciones energéticas y análisis CFD, se evaluó el nivel de confort térmico que pueden alcanzar cuatro estrategias de ventilación natural: ventilación unilateral, ventilación cruzada, chimenea solar y doble fachada. Debido al elevado nivel de humedad relativa, apenas el 10 % de las horas de ocupación alcanzaron un rango de confort higrotérmico aceptable en todas las estrategias. Por este motivo, se evaluaron sistemas híbridos que integran estrategias de ventilación natural, deshumificador y climatización mecánica. A través de estos sistemas híbridos, todas las estrategias de ventilación natural alcanzaron el 100 % de confort higrotérmico durante las horas de ocupación. Finalmente, se estimó la reducción del consumo energético comparando la demanda energética de los sistemas híbridos con la demanda de un sistema de climatización convencional. Las estrategias más efectivas, que redujeron hasta un 8 % la demanda de refrigeración, son la ventilación cruzada y chimenea solar. Futuros estudios se realizaran para evaluar el efecto de la ventilación natural y otras estrategias pasivas en distintas condiciones meteorológicas de Ecuador.

*Palabras clave: Ventilación natural, edificaciones educativas, simulaciones energéticas, CFD, Ecuador.*

# ABSTRACT

Natural ventilation is an effective strategy to simultaneously improve indoor air quality and reduce energy consumption due to HVAC systems that usually consume 75 % of the total energy of the building. The objective of this study was to assess the effect of using natural ventilation to reduce the energy consumption and ensure hygrothermal comfort in an educational building on the warm-humid climate of Guayaquil. The hygrothermal comfort level that four natural ventilation strategies can achieve, were assessed through energetic simulation and CFD: single-sided ventilation, cross ventilation, solar chimney, and double skin façade. Due to the high relative humidity, only 10 % of occupied hours were considered in a hygrothermal comfort range. Hence, a hybrid system that integrates natural ventilation, dehumidifier and HVAC systems was evaluated. Through this system, all natural ventilation strategies reported 100 % of hygrothermal comfort in all occupied hours. Finally, the reduction of energy consumption was estimated by comparing the energy demand of the hybrid strategies with the demand of a conventional HVAC system. The most effective strategies that reduced the cooling demand by 8 %, were cross ventilation and solar chimney. Future research will be conducted to assess the effect of natural ventilation and other passive strategies in different climate condition of Ecuador.

*Keywords: Natural ventilation, education buildings, energetic simulations, CFD, Ecuador.*

# PRESENTACIÓN

A nivel nacional las políticas de gobierno se han enfocado en reducir el déficit cuantitativo de edificaciones residenciales y de servicio. Este proceso masivo de construcción ha dejado de lado parámetros cualitativos y de confort higrotérmico. Para compensar los requerimientos de confort higrotérmico, los usuarios optan por incluir sistemas de climatización mecánicos que incrementan de forma considerable el consumo energético durante la vida útil de la edificación. El presente estudio plantea recomendaciones que ayuden a la comunidad de arquitectos e ingenieros del Ecuador a implementar estrategias pasivas para garantizar confort higrotérmico y disminuir el consumo energético de sistemas de climatización activa. Con estos antecedentes, el principal objetivo de este estudio es establecer una estrategia de ventilación natural que garantice confort higrotérmico y estimar la reducción del consumo energético. Para esto, se propone el uso de ventilación natural como estrategia pasiva en edificaciones de educación universitaria en la ciudad de Guayaquil, donde el uso de sistemas activos de climatización es elevado debido al clima cálido-húmedo y donde garantizar confort higrotérmico es primordial para mejorar la productividad.

El punto de partida para este estudio fue una investigación de campo que consto de un levantamiento de datos y una encuesta de confort higrotérmico dirigida a los usuarios de edificaciones universitarias de la ciudad de Guayaquil. De esta investigación de campo se obtuvieron antecedentes de percepción térmica de los usuarios y parámetros constructivos y ocupacionales reales. Estos parámetros fueron usados como datos de entrada para simular energéticamente cuatro estrategias de ventilación natural aplicadas a una tipología de edificación. Los resultados demostraron que el uso de ventilación natural de forma híbrida con sistemas de climatización mecánicos, se puede garantizar confort higrotérmico y reducir el consumo energético.

# GLOSARIO DE TÉRMINOS

1. *SBS (Sick building syndrom):* Síndrome del edificio enfermo. La Organización Mundial de la Salud lo ha definido como un conjunto de enfermedades originadas o estimuladas por la contaminación del aire en espacios cerrados.
2. *Confort higrotérmico:* Puede definirse confort higrotérmico como la ausencia de malestar térmico. En fisiología se dice que hay confort higrotérmico cuando no tienen que intervenir los mecanismos termorreguladores del cuerpo para una actividad sedentaria y con un ligero arropamiento. Esta situación puede registrarse mediante índices que no activen el funcionamiento de los sistemas termorreguladores (metabolismo, sudoración y otros).
3. *Estrategias pasivas*: Diseño pasivo es un método utilizado en arquitectura con el fin de obtener edificios que logren su acondicionamiento ambiental sin consumir energía.
4. *CFD*: La mecánica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias.
5. *HVAC*: Heating, Ventilation and Air Conditioning (calefacción, ventilación y aire acondicionado). Son sistemas de climatización de ambientes.
6. *Eficiencia energética*: Es una manera de manejar y restringir el consumo energético. Un sistema es energéticamente eficiente cuando entrega el mismo servicio con menor consumo energético.
7. *Índice de arropamiento (clo)*: Clo es una unidad de medida empleada para el índice de indumento, que procede del inglés *clothing*, (vestimenta). La unidad se define como el aislamiento térmico necesario para mantener a una temperatura estable y cómoda a la piel durante 8 horas, cuando una persona está en reposo a una temperatura de 20 °C, con una humedad relativa del 50 % y sin influencia de la radiación solar. Un clo es equivalente a 0,155 $m^2K/W$.
8. *Índice metabólico (met)*: Se utiliza en climatización para aproximarse a la sensación de comodidad térmica, evaluando la cantidad de calor que el cuerpo humano necesita disipar al ambiente, según la actividad realizada. Un met es equivalente a 58,2 $W/m^2$. La superficie promedio de una persona adulta es

1,8 $m^2$, por lo tanto un met equivale aproximadamente a 100 W de emisión de calor total.

9. *Confort adaptativo*: El modelo de confort adaptativo fue desarrollado en múltiples campos de estudio con la idea de que los ocupantes interactúan dinámicamente con el medio ambiente. Las personas controlan su ambiente térmico adaptando su ropa, operando ventanas y aberturas, ventiladores, calentadores personales y dispositivos de sombra.

# CAPÍTULO 1
# INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Garantizar confort higrotérmico es un desafío que ingenieros y arquitectos deben afrontar a la hora de diseñar edificios. Al garantizar confort higrotérmico se puede mejorar la productividad, asegurar espacios saludables y evitar el síndrome del edificio enfermo (Finnegan et al., 1984; Fisk et al., 1997; Von Mackensen et al., 1999). Actualmente, para garantizar este confort se prefiere instalar sistemas activos de climatización, los mismos que incrementan considerablemente el consumo energético en edificaciones. Según Santamouris (2005), a nivel mundial, los edificios consumen el 40% de la energía total, siendo la ventilación y el aire acondicionado los principales contribuyentes de este consumo. Dicho consumo es incluso mayor en edificaciones universitarias debido a las grandes cargas calóricas generadas por equipos y usuarios (Wang et al., 2014). Esta última depende de factores relativos a la edad, actividad, vestimenta y clima. En lugares de clima cálido-húmedo, la carga calórica de los usuarios es incluso mayor y los sistemas de climatización mecánicos son utilizados para garantizar confort higrotérmico. Este tipo de clima es característico de las regiones amazónica y costera de Ecuador. Estas regiones presentan condiciones atmosféricas donde la temperatura ambiente puede superar los 30 °C con una humedad relativa promedio de hasta 80 %. Por consiguiente, el uso de sistemas mecánicos de climatización es elevado en estas regiones, sin embargo, hoy en día, en la región costa es donde más se instalan este tipo de sistemas debido a su mayor poder adquisitivo y alto índice poblacional. De hecho, según él INEC (2012), la ciudad de Guayaquil cuenta con el mayor número de sistemas mecánicos de climatización instalados, convirtiéndola en la ciudad que más consume energía en el país. La energía necesaria para suplir este consumo, es generada por hidroeléctricas y termoeléctricas, siendo estas últimas las más contaminantes. No obstante, con el cambio de la matriz energética llevada a cabo por el gobierno actual, se ha propuesto el uso de sistemas energéticamente eficientes y energías renovables que reduzcan el consumo energético en general. Por este motivo, investigaciones en el campo de las energías renovables se están realizando en

universidades e institutos gubernamentales. Varias de estas investigaciones han sido enfocadas al estudio de sistemas pasivos en edificaciones que reduzcan los consumos energéticos generados por sistemas de climatización mecánicos. En el caso de las universidades, se han realizado acercamientos sobre eficiencia energética en edificaciones (Palacios, 2014), tipologías pasivas para edificaciones escolares (Albarracin, 2014) y aplicaciones tecnológicas para sistemas pasivos (P. Alvear, 2010). Por otro lado, el gobierno y su Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) tienen una línea de investigación de eficiencia energética en edificaciones, en la cual se han realizado estudios dirigidos a reducir los consumos energéticos y garantizar confort térmico en viviendas sociales (Miño et al., 2013) y el desarrollo de sistemas pasivos para edificaciones sustentables (A. Alvear et al., 2013) . Los sistemas pasivos son un punto de partida para la eficiencia energética en edificaciones ya que tienen el potencial de reducir el consumo energético de una edificación. Específicamente en el caso de reducir el consumo energético por climatización, existen sistemas pasivos como la ventilación natural, que además, garantiza buenas condiciones de aire interior. Este sistema pasivo es aplicado de manera empírica, no obstante, pocas son las investigaciones sobre ventilación natural en el país. En cambio, a nivel mundial la ventilación natural ha sido estudiada desde hace más de 60 años presentando beneficios como reducir el consumo energético (Cardinale et al., 2003; Cohen, 1997; Lomas, 2007; Priyadarsini et al., 2004), maximizar confort térmico y mantener condiciones interiores saludables (Busch, 1992; Omer, 2008; Zhao et al., 2004). Según la Energy Consumption Guide (1993) al emplear ventilación natural, el consumo energético se puede reducir hasta en 40%. No obstante, para garantizar confort interior en ciertos climas mediante la ventilación natural, se debe analizar limitantes como velocidad del viento, humedad relativa, ganancias térmicas elevadas, entre otras (Levermore, 2002).

La ventilación natural depende de dos principios relacionados a la mecánica de fluidos (Bansal et al., 1993; Linden, 1999): la flotabilidad térmica (Bangalee, Miau, & Lin, 2013; Gan, 2010; Hussain et al., 2013) y la velocidad del aire (Khan et al., 2008; Larsen et al., 2008). Dentro de estos principios, las estrategias de ventilación natural de mayor estudio y aplicación son la ventilación unilateral

(Allocca et al., 2003; Larsen et al., 2008), ventilación cruzada (Bangalee, Miau, Lin, et al., 2013; Stavridou et al., 2013), chimeneas solares (Bansal et al., 1993; Espinoza et al., 2006; Khanal et al., 2011; León, 2013) y dobles fachadas (Joe et al., 2014; Mingotti et al., 2011). El objetivo principal de estos estudios es aumentar las horas dentro de rangos de confort higrotérmico y reducir el consumo energético asociado a equipos de climatización. Sin embargo, muchos de los modelos empleados en estos estudios son propuestas empíricas o de casos reales que no consideran el dimensionamiento óptimo de aberturas. De hecho, según los estudios de Givoni (1992) y Olgyay (1960), es importante seleccionar y dimensionar correctamente las aberturas de las estrategias de ventilación, además de realizar un análisis de clima para determinar parámetros como velocidad y dirección del viento. La principal limitación de los actuales estudios sobre ventilación natural, es que toman casos aislados para analizar la ventilación natural. Al hacer esto se deja de lado el verdadero estado de las edificaciones del lugar de estudio.

Además de los modelos empíricos de casos reales, existen otros métodos para evaluar la ventilación natural como son los modelos matemáticos analíticos (Bangalee, Miau, & Lin, 2013; Bansal et al., 1993; Hussain et al., 2013), modelos a escala en túneles de viento (Hunt et al., 1999) y modelos computacionales de dinámica de fluidos (CFD) (Allocca et al., 2003; Bangalee, Miau, Lin, et al., 2013; Bordalo Junior, 2011; Chen, 1997), siendo los modelos CFD los más empleados por su efectividad, bajo costo y simplicidad en el procesamiento de datos.

En base a estos antecedentes, el principal objetivo de este estudio es estimar las horas de confort higrotérmico interior y el potencial de reducir el consumo energético de equipos de climatización que se pueden conseguir mediante la implementación de estrategias de ventilación natural. El estudio se aplicó para una edificación universitaria bajo las condiciones de meteorológicas de Guayaquil. Los principales aportes de esta investigación al estado del arte actual, es la implementación de una metodología que permita conocer el verdadero estado de las edificaciones de Guayaquil, además de analizar el nivel de confort higrotérmico que los sistemas de climatización generan en las edificaciones.

Para lograr este objetivo, cuatro estrategias de ventilación natural se determinaron en primera instancia en base a una revisión del estado del arte sobre sistemas de ventilación natural aplicados en climas cálido-húmedos como el de Guayaquil. Después se definieron parámetros de simulación, tanto de actividad como constructivos para una edificación universitaria. Para ello se realizó una investigación de campo en diferentes edificaciones universitarias de Guayaquil. En base a los resultados de esta investigación, se realizaron simulaciones energéticas de diferentes formas de edificación con el fin de definir el caso base de estudio. Las simulaciones fueron realizadas bajo condiciones de forma, constructivas y ocupacionales idénticas. Además se implementó un sistema mecánico de climatización para determinar el consumo de energía por climatización. La forma y orientación que presentó el menor consumo energético por climatización fue seleccionada como caso base. Posteriormente, se simularon las estrategias de ventilación natural aplicadas a la edificación base. El dimensionamiento de los vanos de las diferentes estrategias de ventilación natural se realizó en base a varias fórmulas, análisis CFD externos del edificio y bibliografía. Finalmente se determinaron las horas de disconfort y el ahorro energético que generan las diferentes estrategias de ventilación natural mediante simulaciones energéticas y CFD internas. Para ello se simularon sistemas 100% ventilación natural y sistemas híbridos de ventilación natural y sistemas de climatización mecánica.

Para la presentación de este estudio, se ha dividido el documento en cuatro capítulos. En el primer capítulo se realizó una introducción al tema de la ventilación natural y sus beneficios en el campo de la eficiencia energética en edificaciones. Para entender el funcionamiento y fuerzas que dominan la ventilación natural, se realizó una revisión del estado del arte sobre estudios de estrategias de ventilación natural aplicables a climas cálido-húmedos en el segundo capítulo. Con estos antecedentes se determinó una metodología para el estudio la cual se detalla en el tercer capítulo. Para finalizar, se realizan conclusiones y recomendaciones sobre el estudio y la mejor estrategia de ventilación natural aplicable al caso de estudio.

# CAPÍTULO 2
# MARCO TEÓRICO

El estudio del presente capitulo se centra en una revisión bibliográfica de los fundamentos físicos de la ventilación natural, así como las estrategias aplicadas a climas similares al de Guayaquil, seguido por una breve descripción del software usado tanto para la simulación energética y CFD. Finalmente se tiene una recopilación de normativas y métodos usados para definir el rango de confort higrotérmico adecuado y los requerimientos de ventilación.

## 2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL

La ventilación natural es una técnica pasiva que permite mejorar las condiciones de confort interior aprovechando dos fuerzas: la fuerza del viento y la flotabilidad térmica (Bordalo Junior, 2011) . Estas fuerzas pueden actuar por separado o en conjunto por lo tanto, es importante aclarar que la infiltración del aire a pesar de ser causada por las mismas fuerzas es diferente de la ventilación natural. Esto se debe a que el suministro y extracción de aire por rendijas e imperfecciones de construcción es incontrolable (Linden, 1999).

### 2.1.1 FLOTABILIDAD TÉRMICA

La flotabilidad térmica es la fuerza que se produce cuando existe diferencia de presión entre el interior y exterior del sistema debido al gradiente de temperatura a través del plano neutro (Figura 2.1). Este efecto crea movimiento del aire por diferencia de densidades, lo cual se ve reflejado con presiones más bajas en la parte inferior del edificio y presiones más altas en la parte superior.

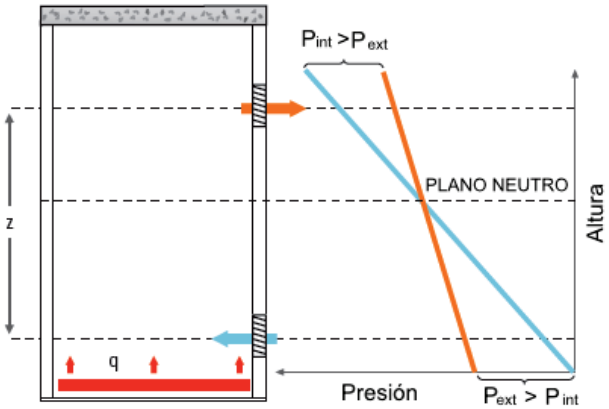



**Figura 2.1 Diferencia de presiones en las fachadas (Bordalo Junior, 2011)**

Según Kleiven (2003) la diferencias de presión sobre una abertura situada a una altura cualquiera sobre el plano neutro, relaciona parámetros propios del aire como: densidad a la entrada y salida del aire, temperatura del aire y la diferencia de presiones con la altura del plano neutro, en el cual las presiones externas e internas del edificio son iguales.

Para el cálculo de la altura del plano neutro se relacionan parámetros de forma como: superficie de las aberturas y altura a la que se encuentran las mismas (Kleiven, 2003).

### 2.1.2 VIENTO

La ventilación por medio de viento ocurre como resultado de las presiones creadas sobre la envolvente del edificio. Como se observa en la Figura 2.2, la diferencia de presión positiva produce un flujo de aire dirigido hacia el interior del edificio. Por el contrario, una diferencia de presión negativa produce un flujo de aire hacia el exterior, es decir el aire es dirigido hacia el interior del edificio por el barlovento y sale hacia el exterior por el sotavento. Según Linden (1999), estas presiones están relacionadas con la forma del edificio y los edificios subyacentes.

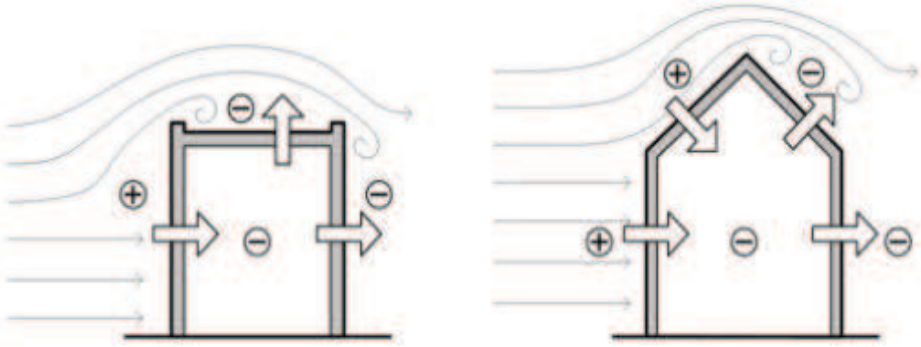


**Figura 2.2 Incidencia del viento sobre la envolvente del edificio (Bordalo Junior, 2011)**

Para cuantificar el efecto de la presión dinámica, Linden (1999) relaciona parámetros de forma con la velocidad y densidad del viento. Los parámetros de forma se determinan según el coeficiente de presión (Cp), el mismo que depende de varios factores como: la geometría y ubicación del edificio, velocidad y dirección del viento, topografía y vegetación. Relacionar todos estos parámetros hace que el cálculo del Cp sea complicado, por lo tanto, este factor es medido en túneles de viento o calculado utilizando CFD (Bordalo Junior, 2011) .

Una vez conocidos los fundamentos físicos que gobiernan la ventilación natural, se determinó que el uso combinado de la fuerza del viento y flotabilidad térmica es un punto clave en el diseño de estrategias de ventilación natural para climas cálido- húmedos. Así lo demuestran estudios realizados por Siew et al. (2011) y Nguyen y Reiter (2014), los cuales afirman que para este tipo de climas se debe combinar el efecto de las dos fuerzas ya que se tiene altas temperaturas y bajas velocidades de viento. En la Tabla 2.1, se muestran distintas estrategias usadas para la ventilación natural en climas cálido-húmedos.

**Tabla 2.1 Relación entre elementos característicos y sistemas de ventilación natural, así como su uso (Kleiven, 2003)**

| Elemento característico | Sistemas de ventilación natural | Suministro o extracción de aire |
|---|---|---|
| Chimenea | Cruzada y apilamiento | Extracción |
| Doble fachada | Cruzada, apilamiento, un solo lado | Suministro y extracción |
| Cámara de ventilación | Cruzada y apilamiento | Suministro y extracción |
| Aberturas en la fachada | Cruzada, apilamiento, un solo lado | Suministro y extracción |

## 2.2 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN NATURAL

### 2.2.1 VENTILACIÓN UNILATERAL

Es la ventilación que aprovecha el efecto de la flotabilidad térmica con aberturas en un solo lado de la fachada. El suministro de aire entra en la habitación sobre el mismo lado que el aire se extrae, como se muestra en la Figura 2.3.

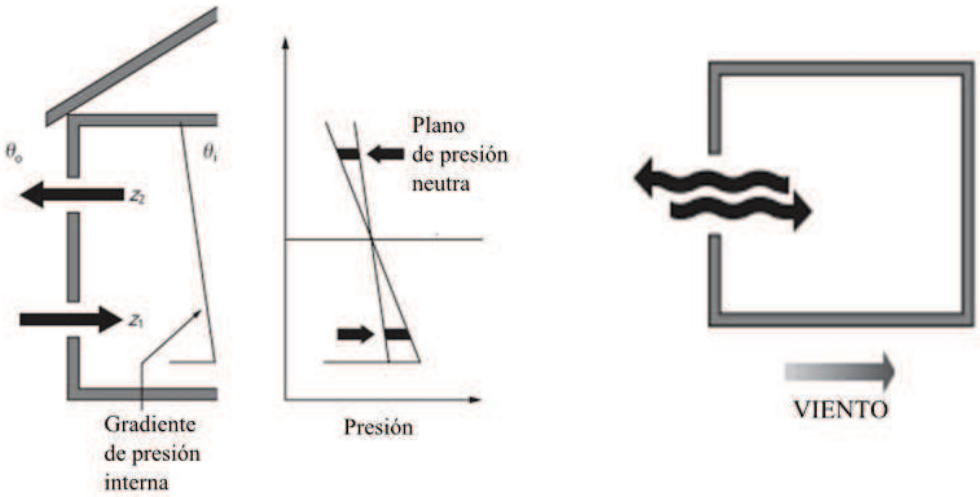



**Figura 2.3 Esquema de ventilación por un solo lado (CIBSE-A, 2006)**

El efecto de esta estrategia para climas cálidos está dominado principalmente por la turbulencia del viento. Para aprovechar su efecto se instalan aberturas en la fachada, distribuidas a diferentes alturas que aprovechan el efecto de la flotabilidad térmica (Kleiven, 2003). Comparado con otros sistemas, el efecto de ventilación es bajo y es aplicable para profundidades menores de 2 a 2,5 veces la altura entre el piso y el techo de la fachada (Awbi, 2010).

### 2.2.2 VENTILACIÓN CRUZADA

En la ventilación cruzada el aire fluye entre dos fachadas opuestas (desde la fachada del barlovento hacia la fachada sotavento) como se observa en la Figura 2.4. Este efecto produce diferencia de presiones en la entrada y salida del aire.

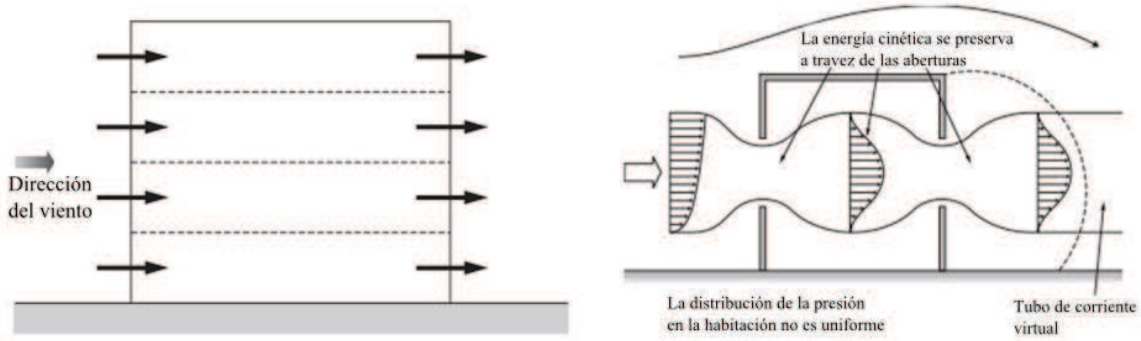



**Figura 2.4 Esquema de ventilación cruzada (CIBSE-A, 2006)**

Para implementar esta estrategia, se utiliza una gran variedad de ventanas o ventoleras en la fachada al ingreso y a la salida del aire (Figura 2.5), las mismas que tienen la función de distribuir el aire en el edificio (Santamouris et al., 1998). En la ventilación cruzada se debe considerar la profundidad efectiva, es por esto que Tavares (2009) en su estudio diseño un edificio tomando en cuenta la forma y la profundidad más efectiva. De la misma manera, la profundidad efectiva fue estudiada también por Linden (1999). En ambos estudios se demuestra que esta profundidad debe ser máximo cinco veces la altura libre de la habitación. Por lo tanto, el dimensionamiento y la forma son importantes para maximizar el rendimiento de la ventilación cruzada (Cao et al., 2013). Como resultado de estos estudios se demuestra un mayor rendimiento de la ventilación natural debido a que se maximiza el efecto del viento sobre la envolvente del edificio.

**Figura 2.5 Ejemplo de ventanas tipo basculante**

### 2.2.3 CHIMENEA SOLAR

Es una estrategia diseñada para extraer el aire de una habitación aprovechando el efecto de la flotabilidad térmica (León, 2013). Una de las principales ventajas que ofrece esta estrategia es que al utilizar el efecto de la flotabilidad térmica, la dirección del viento no influye en su rendimiento (Figura 2.6) (Hughes et al., 2012).

Las chimeneas solares son comúnmente instaladas en el techo o en una de las fachadas de la edificación. Pueden ser de sección cuadrada, rectangular o cilíndrica siendo la ultima la que tiene un mayor rendimiento según Dehghan et al. (2013)

Para aprovechar el efecto combinado del viento y la flotabilidad térmica se debe tomar en cuenta el diseño de las aberturas, el cual se basa en el efecto Bernoulli para obtener presiones negativas de succión del viento (Santamouris et al., 1998). Por otro lado, se ha encontrado que para profundidades mayores a cinco veces la altura libre esta estrategia es más efectiva (Kleiven, 2003). Sin embargo para un diseño global de la chimenea solar, hay que tomar en consideración otros parámetros como: la altura del colector, la sección transversal de los conductos de aire y el número de aberturas (Dehghan et al., 2013). Además, para aumentar la eficiencia del sistema, la salida del aire debe ser orientada a un espacio de baja presión (sotavento).

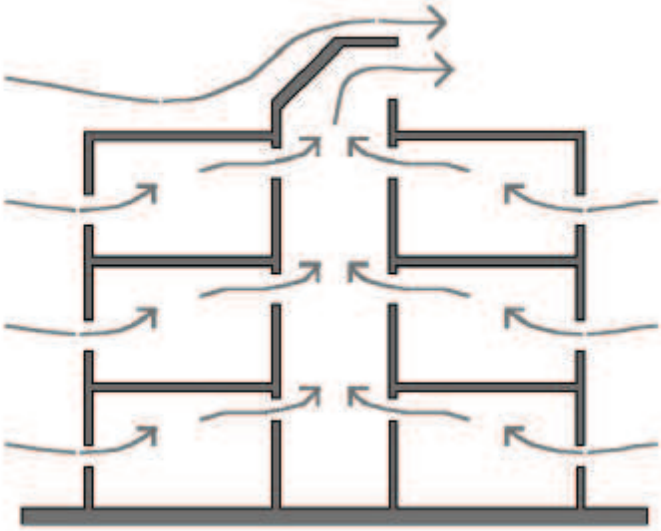


**Figura 2.6 Chimenea Solar (Bordalo Junior, 2011)**

### 2.2.4 DOBLE FACHADA

Es una estrategia diseñada para aprovechar la flotabilidad del aire, mediante la construcción de una doble pared. La cavidad formada por esta doble pared se utiliza como un canal de aire (Mingotti et al., 2011) , el cual optimiza la incidencia de luz y al mismo tiempo sirve como un mecanismo de aislamiento hacia el interior de la edificación (Figura 2.7).

**Figura 2.7 Doble fachada en climas cálidos (Mingotti et al., 2011)**

Ambas fachadas tanto la interna como la externa contienen aberturas que permiten la ventilación de la cavidad como se observa en la Figura 2.7. Estudios realizados por Mingotti et al. (2011) y Joe et al. (2014) mencionan que la distancia optima entre fachadas debe ser de 10 a 40 cm para aumentar el flujo de aire. Este efecto es más determinante en climas cálidos, donde el ancho entre las dos fachadas deber ser el mayor recomendado para evitar sobrecalentamiento en la cavidad y el área contigua a la misma. Otra forma de controlar el sobrecalentamiento es la implementación de elementos de sombra dentro de la doble fachada (Mingotti et al., 2011).

Para el estudio de las estrategias de ventilación natural se debe analizar los flujos de aire y temperatura en una edificación (León, 2013) . Para ello se puede optar por modelos matemáticos analíticos, modelos a escala en tuéneles de viento y modelos CFD, cada modelo presenta sus respectivas ventajas y desventajas Es por esto, que con la aplicación en conjunto de los mismos se obtiene resultados más exactos (Yarke, 2005) .

Existen muchos estudios como el de Nguyen y Reiter (2014), en el cual dimensionó las aberturas y estimó el flujo de aire que se requiere inducir en la edificación utilizando modelos matemáticos. El autor igualmente realizó su análisis en el clima y el confort adaptativo, obteniendo resultados de eficiencia de la ventilación natural en diferentes climas. De igual manera Mingotti et al. (2011) aplicó modelos matemáticos para el cálculo del flujo de aire que se induce en la doble fachada variando parámetros geométricos como: espacio entre fachadas y formas de edificaciones. Usualmente, estos modelos son comparados con modelos a escala en túneles de viento para verificar si el comportamiento del modelo planteado es el esperado, como se muestra en estudios realizados por Fontanini et al. (2013) y Cao et al. (2013).

Para el caso de análisis de flujos de aire, distribución de temperatura y análisis dinámico de flujo en las aberturas es recomendable usar modelos CFD (Awbi, 2010; Bordalo Junior, 2011).Varios estudios se han realizado usando estos modelos como el de Wang et al. (2014), en el cual realiza un análisis de diferentes estrategias de ventilación natural en un aula. Este estudio demuestra que el CFD permite simular estos parámetros como si fueran experimentos en un laboratorio

virtual. Al igual que el análisis CDF también es importante estudiar las estrategias de ventilación desde el punto de vista energético. Con esto se puede estimar la reducción del consumo energético de las edificaciones utilizando la ventilación natural como se muestra en el estudio realizado por Bordalo Junior (2011).

## 2.3 SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y ANÁLISIS CFD

### 2.3.1 MODELOS CFD

Los modelos CFD son herramientas de cálculo avanzadas que resuelven simultáneamente las ecuaciones de conservación de masa, energía y momento basados en las complejas ecuaciones de Navier-Stokes. La resolución de estas ecuaciones muestran resultados como: campos de distribución de velocidad del aire, temperatura, presiones y patrones de flujo (Bordalo Junior, 2011) .

### 2.3.2 SIMULACIÓN ENERGÉTICA

La simulación energética es una herramienta que sirve para el cálculo de cargas térmicas y análisis energéticos. Para la simulación energética, son necesarias condiciones de frontera del edificio referentes a la forma, localización, orientación y sistemas mecánicos, entre otros. Con estos datos se obtiene resultados de temperaturas interiores operativas, horas de confort, pérdidas y ganancias por la envolvente y ganancias internas (Mendes et al., 2005) . Según Zhai et al. (2011), la simulación energética y el CFD son herramientas complementarias para la evaluación completa de un edificio. Mientras la primera predice el comportamiento térmico de la edificación, la segunda calcula las características detalladas del flujo al interior o exterior de la edificación.

El uso de paquetes computacionales es necesario para el análisis de modelos CFD y de simulación energética. Estas herramientas surgieron principalmente en los Estados Unidos entre los pioneros se encuentran los programas BLAST Y DOE-2 del Departamento de energía de Estados Unidos (York et al., 1984). Estas herramientas son la base del programa EnergyPlus, el cual es el más confiable y utilizado en la actualidad (Nguyen, Reiter, et al., 2014). Este programa requiere un cierto nivel de conocimiento para operarlo, por lo cual muchos desarrolladores de software han creado interfaces gráficas y de ingreso de datos más amigables. Este es el caso DesignBuilder, el cual es un programa confiable que utiliza el motor de cálculo de EnergyPlus. Además proporciona todas las herramientas

necesarias para el estudio de la ventilación natural ya que tiene integrado un módulo CFD (York et al., 1984).

### 2.3.3 DESIGNBUILDER-ENERGYPLUS

Creado en el Reino Unido, DesignBuilder ofrece simplicidad al momento de modelar la geometría, además de contar con amplias bibliotecas de materiales y plantillas, integrando además un módulo CFD. El módulo CFD del programa se basa en el método de volúmenes finitos, el cual consiste en la solución de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales que describe el transporte de cantidades de momento, energía y turbulencia (Tindale, 2005). Para este cálculo, el programa divide al objeto en una serie de células rectilíneas adyacentes que no se superponen, las que se conoce como la red de volúmenes finitos (Figura 2.8.). Además el DesignBuilder-EnergyPlus permite que los resultados obtenidos en la simulación energética sean usados en el análisis CFD, resolviendo así, un problema común en otros software (Tindale, 2005).

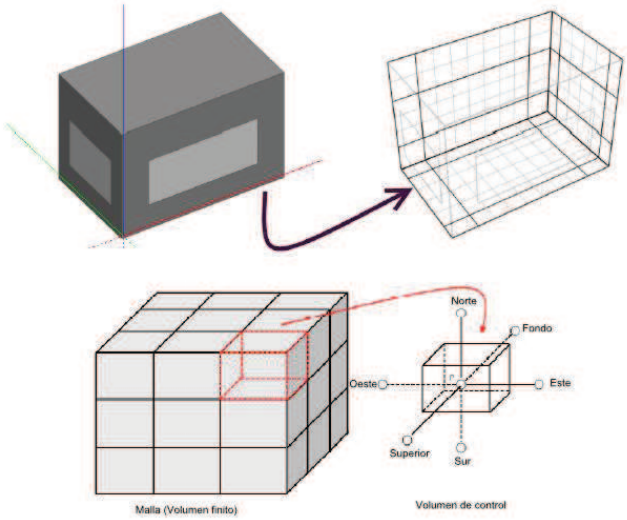



**Figura 2.8 Red de volúmenes finitos (Tindale, 2005)**

El software usa un método de volúmenes finitos con mallas predefinidas; en caso de tener problemas de convergencia se puede editar las dimensiones de la malla. Por otro lado, existen dos modelos de turbulencia en el programa: el de la viscosidad constante efectiva y el modelo k-e.

El modelo de la viscosidad constante efectiva es un acercamiento simple en el cual se reemplaza la viscosidad molecular en la ecuación de Navier-Stokes con

una viscosidad efectiva constante. A pesar de que ser incapaz de modelar la turbulencia local, es mucho más rápida y con bajo requerimiento computacional. El modelo K-e es el más usado en problemas de CFD y pertenece a la familia de ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Naver-Stokes). Este modelo tiene mayor exactitud pero con un requerimiento computacional muy elevado.

## 2.4 NORMATIVAS SOBRE REQUERIMIENTOS DE VENTILACIÓN

Según la organización mundial de la salud, el confort se define como una condición mental del ser humano que expresa satisfacción con las condiciones interiores del clima (Her Majesty's Stationery Office, 1992). Es por esto que al hablar de condiciones de confort se debe englobar factores ambientales como: condiciones higrotérmicas, visuales, acústicas, calidad del aire y campos electromagnéticos. Con el control de todos estos factores se podría asegurar el confort interior. El presente estudio se centró en el análisis de condiciones de confort higrotérmico y calidad del aire interior, debido a que el factor incidente en el estudio, es el análisis de la ventilación natural.

Por lo tanto, para brindar un confort higrotérmico por ventilación natural, se debe combinar de manera simultánea el enfriamiento convectivo del edificio con el enfriamiento psicológico de las personas. El enfriamiento psicológico se refiere al cambio en la sensación térmica al introducir un flujo de aire en los ocupantes, lo cual produce una aceleración de la evaporación de la piel (Bordalo Junior, 2011).

Para esto, el estándar ASHRAE-55 (2004) plantea tres métodos para fijar el rango de confort para diferentes casos de aplicación. El primer modelo de la temperatura operativa, relaciona valores de humedad, velocidad del aire, tasa metabólica y nivel de arropamiento en un modelo en el cual se fija una zona de confort en función de temperaturas operativas aceptables.

El segundo modelo tarta sobre un método gráfico, el cual es aplicado en espacios donde los ocupantes tienen niveles de actividad entre 1 y 1,3 unidades metabólicas (met) y con un índice de arropamiento de 0,5 a 1 clo. El modelo gráfico se utiliza para fijar valores de confort térmico en oficinas y aulas de clases (Brager et al., 2001). Finalmente para el caso de espacios acondicionados naturalmente, existe el modelo de confort adaptativo, el cual determina rangos de confort para el 80 y 90 % de ocupantes a partir de la temperatura exterior media

mensual. A pesar de ser el modelo más ocupado para sistemas de ventilación natural, no considera las condiciones de humedad relativa, motivo por el cual los rangos de confort tienen errores para climas con alto porcentaje de humedad relativa (Fisk et al., 1997).

Con respecto a la calidad del aire interior, existen varias normativas que definen la renovación de aire según la actividad que se realiza en un ambiente determinado. Los valores máximos se definen a continuación en la Tabla 2.2, según cada norma.

**Tabla 2.2 Tasas de renovación de aire por persona**

| **Norma** | **Tipo de edificio** | **Renovación de aire** (l/s persona) |
|---|---|---|
| CIBSE-A (2006) | Espacios de lectura o enseñanza | 10 |
| INEN 1-125 | Escuelas o salas de 3 $m^3$/persona | 11 |
| Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejora del medio ambiente del trabajo | Escuelas universidades | 8 |

# CAPÍTULO 3
# LA PROPUESTA

## 3.1 METODOLOGÍA

La metodología de este estudio se fundamentó en el análisis de resultados de simulaciones energéticas y de modelos CFD para evaluar el comportamiento de diferentes estrategias de ventilación natural. Para estos análisis se utilizó el programa DesignBuilder que usa el motor de cálculo EnergyPlus y su propio modelador CFD. La metodología se dividió en cuatro etapas:

En la primera etapa de recopilación de datos, se realizó una revisión bibliográfica y una investigación de campo. Los datos recopilados en esta etapa, sirvieron más adelante para ingresar parámetros de entrada en las simulaciones del programa DesignBuilder-EnergyPlus. Los parámetros de entrada necesarios para la simulación son referentes a actividad, materiales de construcción, iluminación equipos, meteorología y sistemas de climatización.

En la segunda etapa se definieron los parámetros y casos de estudio para el estudio a partir del análisis de los datos de la etapa 1. Del análisis de los parámetros y una simulación energética, se obtuvo una edificación base de estudio a la cual se le aplicaron las estrategias de ventilación natural recomendables para el clima de Guayaquil. Las aberturas de las estrategias de ventilación fueron dimensionadas de acuerdo a estándares internacionales y estudios sobre estrategias de ventilación natural.

Después de dimensionar las aberturas y modelar las estrategias en el edificio base, se realizaron simulaciones energéticas y análisis CFD en la etapa 3. De las simulaciones energéticas se obtuvieron distribuciones de temperatura operativa, rangos de confort y consumo energético con sistemas mecánicos e híbridos. Luego, los resultados de la simulación energética se usaron como parámetros de entrada para la simulación CFD, de la cual se obtuvieron distribuciones de temperatura, distribución de aire y tiempos de renovación de aire.

Finalmente en la etapa 4, se compararon los resultados de las simulaciones energéticas y el análisis CFD, mediante el cual, se obtuvo una estrategia que presentó mayores beneficios en cuanto a confort, consumo energético y

distribución de aire. El esquema de las etapas de la metodología se muestra en la Figura 3.1.

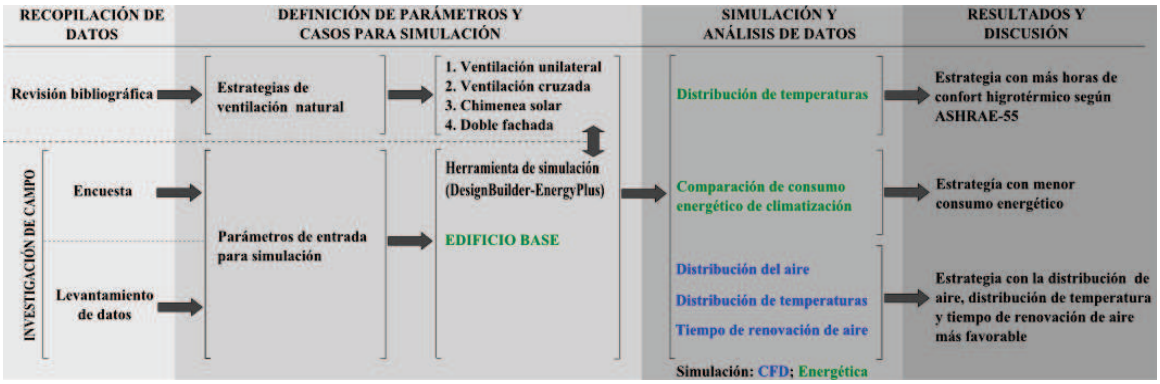



**Figura 3.1 Metodología de estudio**

### 3.1.1 RECOPILACIÓN DE DATOS

La recopilación de datos para el estudio se basó en una investigación de campo y una revisión bibliográfica. De la investigación de campo se determinó el caso base de estudio y de la revisión bibliográfica se determinaron las estrategias de ventilación natural aplicables al clima de Guayaquil. Las estrategias de ventilación natural definidas en este estudio, responden a la situación actual del estado del arte de ventilación natural para climas cálido-húmedos. Como parte de la investigación de campo, se realizó una encuesta para obtener parámetros de ocupación y un levantamiento de datos con el cual se definieron parámetros formales de edificaciones universitarias.

*Encuesta*

La encuesta se formuló en base a un modelo de encuesta desarrollado por la US Green Building Council (USGBC, 2008), el cual está basado en el estándar ASHRAE-55 (2004).De este modelo se recopilaron las preguntas necesarias para determinar parámetros de actividad y sensación térmica.

1. ¿Cuántas horas permanece dentro del aula de clase?
2. Hora del día en que se realiza la encuesta
3. Género
4. ¿Cuál es su sensación respecto a la temperatura?

5. ¿Cómo percibe la temperatura?
6. ¿Cómo desearía que fuera la temperatura?
7. ¿Cómo percibe la calidad del aire?
8. ¿Cómo percibe la intensidad del olor?
9. Las condiciones de clima en el aula interfieren o realzan el desempeño de estudio.
10. ¿Cómo valora la cantidad de iluminación en el aula?
11. ¿Cómo valora el confort de iluminación? (reflexión, contraste, brillo)
12. Las condiciones de iluminación interfieren o realzan el desempeño de estudio.
13. Considerando el uso de energía, ¿qué tan eficiente es el edificio en su opinión?
14. Índice de arropamiento (clo)

*Levantamiento de datos*

Después de finalizadas las encuestas se realizó el levantamiento de datos en las mismas facultades donde se realizó la encuesta. La medición de los parámetros del levantamiento de datos fue realizado dentro y fuera de las edificaciones, en donde se tomaron datos de ubicación, orientación y forma utilizando una aplicación GPS. Por otro lado, en cada aula se recopiló la información que se detalla en la Figura 3.2 utilizando un flexómetro y un registro fotográfico. El modelo de encuesta y los resultados del levantamiento de datos se encuentran en el ANEXO 1.

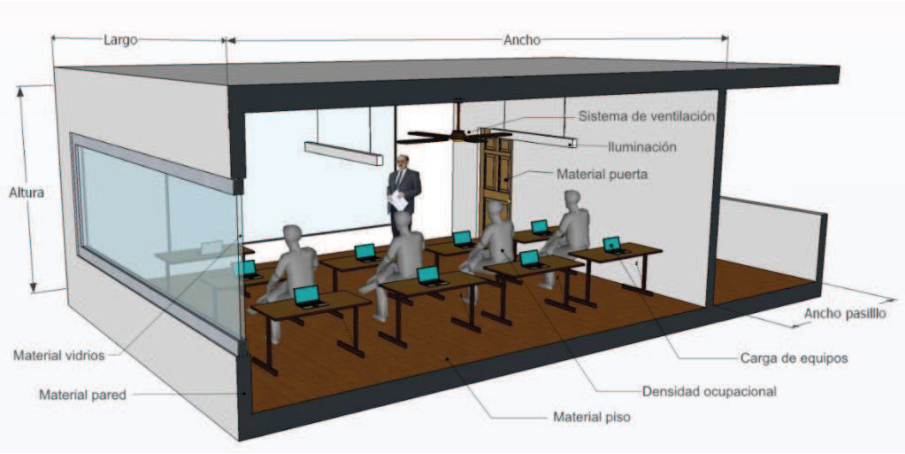



**Figura 3.2 Datos recopilados de las aulas**

### 3.1.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CASOS PARA SIMULACIÓN

A partir de los datos obtenidos en la recopilación de datos, se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo para determinar los parámetros necesarios para la simulación. Con estos parámetros se determinó el caso base de estudio y las estrategias de ventilación natural aplicables al clima de Guayaquil.

Los parámetros necesarios para las simulaciones en DesignBuilder-EnergyPlus son a clima, actividad, condiciones ambientales, climatización, equipos, iluminación, materiales de la envolvente. Con estos parámetros, se simularon energéticamente las formas y orientaciones de la edificación para determinar el caso base de estudio.

El primer parámetro necesario para las simulaciones es el clima y la ubicación. El sitio de estudio es la ciudad de Guayaquil en la provincia de Guayas, ubicada a 2º 8' 42" Sur y 79° 57' 56" Oeste, a una altitud de 10 msnm. El archivo de clima para la simulación fue proporcionado por el INER. El archivo esta generado con datos horarios en un año típico medidos en sitio en la ESPOL de Guayaquil. El segundo parámetro para las simulaciones son las condiciones de actividad.

De la encuesta realizada en la investigación de campo se obtuvieron parámetros de actividad referentes a horarios y densidad de ocupación, tasa metabólica e índice de arropamiento. Los horarios de ocupación fueron determinados en función a la distribución de frecuencias de las horas que los entrevistados pasan en las aulas de clase. Por otro lado, la densidad de ocupación mide la concentración de personas por cada metro cuadrado y se determinó mediante el promedio de ocupantes que puede albergar cada aula. Además para estar dentro de parámetros aceptables en Ecuador, se comparó este valor con la norma de construcción ecuatoriana (Distrito Metropolitano de Quito, 2005).

Según la ASHRAE-55 (2004), la tasa metabólica es la tasa de liberación de calor del organismo y se determinó en función del tipo de actividad que se realiza en un aula de clases. En cuanto al índice de arropamiento, se usó el promedio de índices determinados en el estándar CIBSE-A (2006) en función del tipo de ropa

de los entrevistados. Una vez asociados las condiciones de actividad para las simulaciones, el siguiente paso es definir las condiciones ambientales interiores.
Las condiciones ambientales para garantizar confort interior son las tasas de ventilación de aire, iluminación y rangos de temperatura y humedad relativa. Para definir los parámetros de tasas de ventilación e iluminación usó el estándar (CIBSE-A, 2006). Este estándard determina que para actividades de estudio como universidades y escuelas la tasa de ventilación mínima es de 10 l/s/persona y el nivel mínimo de iluminación de 300 lux. Por otro lado, para definir los rangos de temperatura y humedad relativa, se usó el método grafico del estándar ASHRAE-55 (2004). Los rangos de temperatura y humedad relativa de confort en este método se determinan con la Ecuación 3.1, Ecuación 3.2, y el Gráfico 3.1. Cabe mencionar que el método gráfico es aplicable para ocupación de oficinas o trabajo ligero e índices de arropamiento de entre 0,5 y 1 clo.

$$T_{mín,Icl} = \frac{\left[(I_{cl} - 0{,}5\ clo)\ T_{min,\ \ 1{,}0clo} + (1{,}0\ clo - I_{cl}) T_{min,\ \ 0{,}5clo}\right]}{0{,}5\ clo} \qquad \text{(Ecuación 3.1)}$$

$$T_{máx,Icl} = \frac{\left[(I_{cl} - 0{,}5\ clo)\ T_{máx,\ \ 1{,}0clo} + (1{,}0\ clo - I_{cl}) T_{máx,\ \ 0{,}5clo}\right]}{0{,}5\ clo} \qquad \text{(Ecuación 3.2)}$$

Donde, $T_{máx,\ Icl}$ es el límite superior de temperatura operativa para un índice de arropamiento $I_{cl}$. $T_{min,Icl}$ es el límite inferior de temperatura operativa para un indice de arropamiento $I_{cl}$ el cual es el indice de arropamiento de los ocupantes de las edificaciones universitarias. La $T_{máx}$, $T_{mín}$ y la humedad relativa asociada a estas temperatura fueron usados como consigna del sistema de climatización en el estudio. Cuando la temperatura operativa alcanza la $T_{mín}$ y la $T_{máx}$, el sistema de calefacción y refrigearción entran en funcionamiento respectivamente. Sin embargo para nuestro estudio solo se uso un sistema de refrigeración. Este sistema constó de un enfriador de volumen constante con un COP de 4,5 y un deshumidificador. Es importante decir que en este estudio el sistema de climatización solo fue usado para fines comparativos debido a que se garantiza confort higrotérmico para el 100% de ocupantes en todas las horas de ocupación.

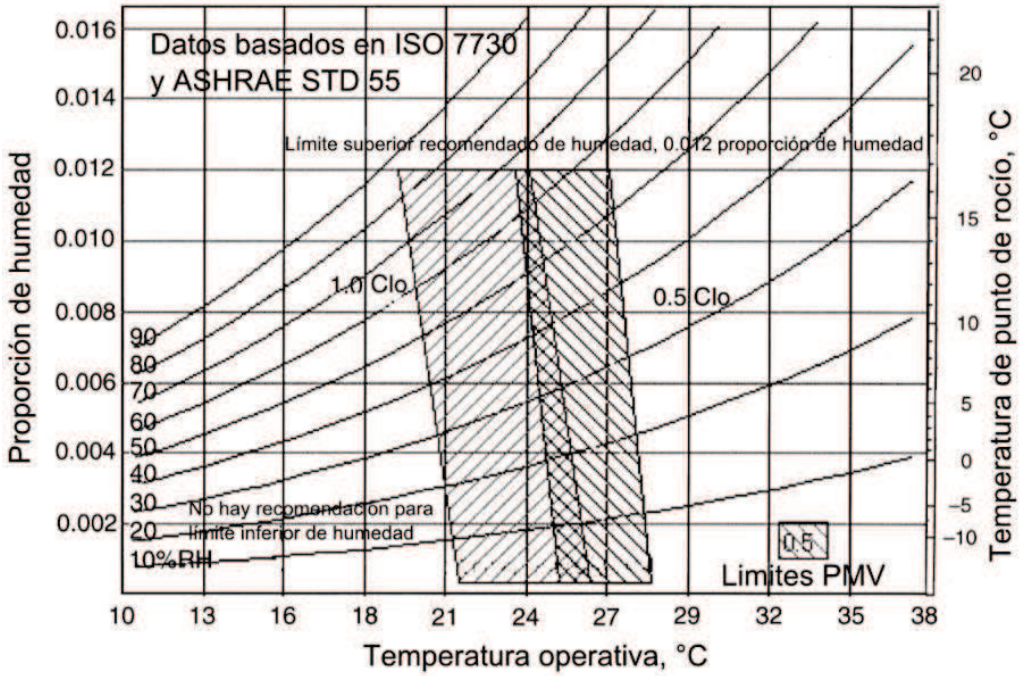



**Gráfico 3.1 Rangos aceptables de temperatura operativa y humedad para oficinas (ASHRAE-55, 2004).**

Por otro lado, del levantamiento de datos se determinaron los horarios de uso y cargas térmicas de equipos e iluminación. Para determinar la carga de equipos e iluminación, se contabilizaron el número de luminarias, computadoras y dispositivos electrónicos que se usan en las aulas. La carga de estos equipos se relacionó con el horario de ocupación de los estudiantes para obtener los horarios de uso de equipos. Además, del levantamiento de datos también se determinaron los materiales de la envolvente. Para esto, de los materiales encontrados en la investigación, se seleccionaron los materiales de construcción más usados en las edificaciones visitadas.

Luego de definir los parámetros para la simulación, el siguiente paso es obtener la forma y orientación para el caso base de estudio. Para ello, en primer lugar se definieron las dimensiones del aula base. Estas dimensiones se eligieron en base a un promedio de las medidas de las aulas analizadas en el levantamiento de datos, las cuales responden a condiciones funcionales. El aula obtenida fue aplicada y modelada en DesignBuilder-EnergyPlus a todas las formas encontradas de la investigación de campo. Estas formas fueron simuladas

utilizando idénticos parámetros de actividad, condiciones ambientales, sistemas de climatización y materiales variando la orientación cada 15°. El objetivo de esta simulación es obtener resultados de consumo energético por climatización. A partir de estos resultados, la edificación con menor consumo energético por climatización fue seleccionada como edificación base para el resto del estudio. Además, el consumo energético fue comparado con un factor de forma para determinar la relación de la forma con el consumo energético de la edificación. El factor de forma es una ecuación simple que relaciona la superficie envolvente con el volumen envuelto (Dictuc et al., 2011) (Ecuación 3.3). Un factor de forma alto implica que el edificio tiene más pérdidas por la envolvente (Ordoñes, 2012). Una vez que se determinó la edificación base de estudio, se dimensionaron las aberturas de las estrategias de ventilación natural.

$$\text{Factor de forma (FF)} = \frac{\text{Superficie externa}}{\text{Volumen construido}} \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

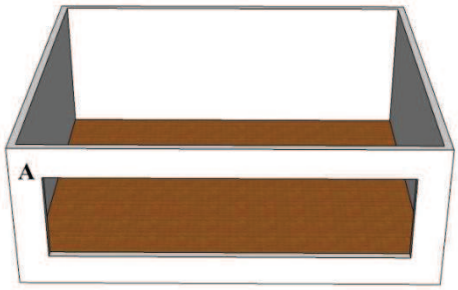
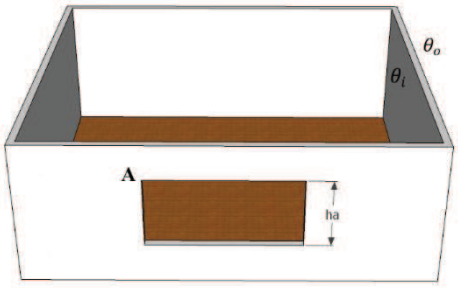
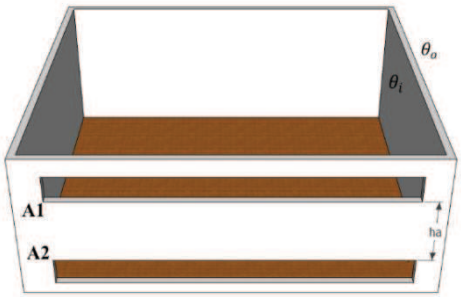
#### 3.1.2.1 Dimensionamiento de aberturas de estrategias de ventilación natural

Las estrategias de mayor rendimiento en climas cálido-húmedos fueron determinadas a partir de la revisión bibliográfica realizada en la recopilación de datos. Las aberturas de estas estrategias fueron dimensionadas y aplicadas al edificio base. Cabe mencionar que las dimensiones de las aberturas de las estrategias se limitan al edificio base de estudio.

##### *3.1.2.1.1 Ventilación unilateral*

El dimensionamiento de las aberturas de la ventilación unilateral se basó en el estándar CIBSE-A (2006). Las ecuaciones necesarias para su dimensionamiento se muestran en la Tabla 3.1. Este estándar, considera tres de la ventilación unilateral de acuerdo al tipo de fuerza que domina su funcionamiento. La ventilación unilateral-1 (VU-1) funciona bajo el principio de la velocidad del aire, mientras que la ventilación unilatera-2 y 3 (VU-2 y VU-3) funcionan bajo el principio de la flotabilidad térmica.

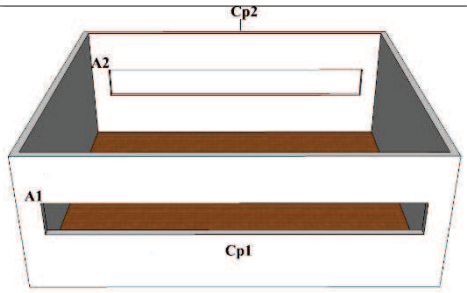
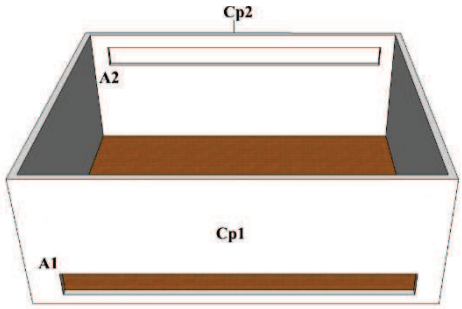
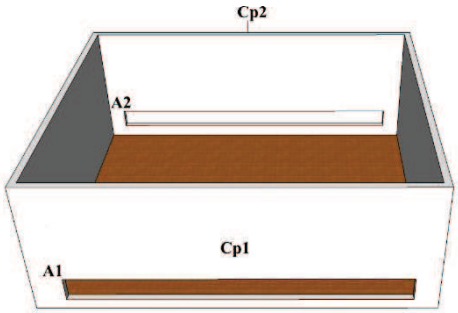
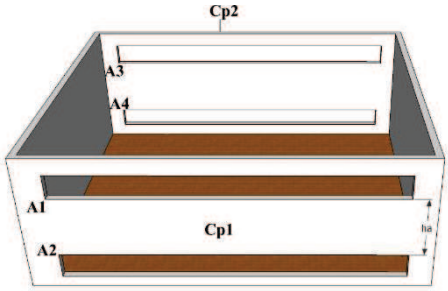
**Tabla 3.1 Formulas estándar para estimar el flujo de aire para ventilación unilateral.**

| Variación | Esquema | Ecuación |
|---|---|---|
| Ventilación unilateral-1 VU-1 |   | $Q = 0{,}025AV_r$ |
| Ventilación unilateral-2 VU-2 |   | $Q = C_d \left(\frac{A}{3}\right)\left(\frac{\Delta\theta\, h_a g}{\bar{\theta} + 273}\right)^{0,5}$ |
| Ventilación unilateral-3 VU-3 |   | $Q = C_d\,(A_1 \quad + A_2)\left[\frac{\varepsilon\sqrt{2}}{(1+\varepsilon)(1+\varepsilon^2)^{0,5}}\right]\left(\frac{\Delta\theta\, h_a g}{\bar{\theta} + 273}\right)^{0,5}$ <br> $\varepsilon = \frac{A_1}{A_2}$ <br> $A_1 = A_2$ |

*3.1.2.1.2 Ventilación cruzada*

El dimensionamiento de las aberturas de la ventilación cruzada también fue basado en el estándar CIBSE-A (2006). Este estándar define la estrategia ventilación cruzada-4 (Tabla 3.2), que funciona bajo el efecto de la velocidad del aire y la flotabilidad del aire combinados. Sin embargo, en el presente estudio se proponen tres variantes que funcionan bajo el mismo principio combinado, en las cuales se le modificó la posición de las aberturas en las fachadas opuestas del aula (Tabla 3.2).

**Tabla 3.2 Formulas estándar para estimar el flujo de aire para ventilación cruzada.**

| Variación | Esquema | Ecuación |
|---|---|---|
| Ventilación cruzada 1 VC-1 |   | $Q = C_d A_{ef} V_r (\Delta C_p)^{0,5}$ <br> $\frac{1}{{A_{ef}}^2} = \frac{1}{(A_1)^2} + \frac{1}{(A_2)^2}$ <br> $A_1 = A_2$ |
| Ventilación cruzada 2 VC-2 |   | $Q = C_d A_{ef} V_r (\Delta C_p)^{0,5}$ <br> $\frac{1}{{A_{ef}}^2} = \frac{1}{(A_1)^2} + \frac{1}{(A_2)^2}$ <br> $A_1 = A_2$ |
| Ventilación cruzada 3 VC-3 |   | $Q = C_d A_{ef} V_r (\Delta C_p)^{0,5}$ <br> $\frac{1}{{A_{ef}}^2} = \frac{1}{(A_1)^2} + \frac{1}{(A_2)^2}$ <br> $A_1 = A_2$ |
| Ventilación cruzada 4 VC-4 |   | $Q = C_d A_{ef} V_r (\Delta C_p)^{0,5}$ <br> $\frac{1}{{A_{ef}}^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$ <br> $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$ |

Debido a que los modelos de ventilación cruzada y ventilación unilateral se definieron en base al estándar CIBSE-A (2006), estos tienen parámetros similares en sus ecuaciones. De estas ecuaciones, se encontró el área efectiva ($A_{ef}$) de las aberturas de cada estrategia con el fin de definir las medidas de las aberturas en las fachadas. El $A_{ef}$ se define en función del de caudal de aire (Q), coeficientes de descarga ($C_d$), diferencias de temperatura de bulbo seco ($\bar{\theta}$) y alturas ($Z_a$, $h_a$),

velocidad del aire ($V_r$) y coeficientes de presión ($C_p$). Todos estos parámetros fueron definidos en base a estándares y estudios relacionados con las estrategias de ventilación natural.

Q corresponde a 10 l/s/persona que es el caudal mínimo de ventilación para lugares de enseñanza (CIBSE-A, 2006). El $C_d$ depende del tipo de abertura en la fachada; se asumió que las rejillas de ventilación tienen una abertura de 100% con bordes agudos, con lo cual se tiene un Cd de 0,61 (CIBSE-A, 2006).

La temperatura de bulbo seco promedio mensual ($\bar{\theta}$) fue de 25°C según lo registrado en el archivo de clima de Guayaquil. La diferencia de temperatura entre el interior y exterior ($\Delta\bar{\theta}$) para ventilación natural por flotabilidad térmica fue de 2,5°C (Dictuc et al., 2011).

La separación de las aberturas ($Z_a$, $h_a$) fue definida en 1,5 m en base a un estudio paramétrico de Awbi (2010) y el valor de la gravedad (g) fue de 9,8 m/s$^2$. Por otro lado, la $V_r$ y los coeficientes Cp fueron establecidos en base a un análisis externo CFD del edificio base. Para realizar la simulación CFD externa se requieren variables de entrada de velocidad de aire promedio (2 m/s) y dirección del viento (165°). Estas variables se determinaron en base a un análisis de clima del sitio de estudio en Guayaquil (ANEXO 2). A partir de los resultados obtenidos de la simulación CFD externa se realizaron cortes con valores de velocidad y presión en el primer y último piso tomados desde la vista superior del edificio. El valor definido de $V_r$ representa la velocidad más crítica registrada en ambos pisos.

Por otro lado, los datos de presión se usaron para obtener los valores de Cp aplicando la Ecuación 3.4. En esta ecuación, $P_w$ es la presión en caras opuestas de la edificación; $P_0$ es la presión libre del aire; ρ es la densidad del aire libre a la temperatura ambiente con un valor de 1,29 kg/m$^3$ y V es la velocidad del aire libre. Esta ecuación fue aplicada en el primer y último piso del edificio y se eligieron los Cp más críticos para el dimensionamiento. Cabe mencionar que el análisis CFD fue realizado luego de obtener la edificación base debido a que sus resultados fueron necesarios para el dimensionamiento de aberturas de la ventilación unilateral y cruzada.

$$C_p = \frac{P_w - P_o}{1/2\rho V^2} \qquad \text{(Ecuación 3.4)}$$

#### *3.1.2.1.3 Chimenea solar*

Para el dimensionamiento de las aberturas de la chimenea solar se tomó como referencia el estudio de León (2013), debido a la falta de estándares con parámetros de dimensionamiento. A partir de un estudio paramétrico, León plantea restricciones y parámetros para dimensionar las aberturas de las chimeneas solares y se detallan a continuación:

Parámetros:

1. La abertura de entrada de aire debe posicionarse en una altura entre 75 a 90% de la altura total en que se encuentra el punto a ventilar.
2. La superficie de la abertura de aire es proporcional a una tercera parte de la superficie de la abertura de salida de aire.
3. La altura de la torre deberá ser entre 1 a 1,5 veces la distancia entre las aberturas de la habitación.
4. La abertura de entrada a la habitación debe coincidir con la abertura de entrada a la torre, tomando en cuenta la altura a la que se quiere mayor flujo de aire.

Restricciones:

1. La posición de la abertura de entrada de aire o de la torre no debe localizarse por encima del nivel del plano neutro de la habitación, ya que reduce la velocidad de aire al reducir las diferencias de presión.
2. La relación de las dimensiones de la abertura de entrada y salida modifican el flujo de aire al interior. Se observó que cuando la altura es mayor al 50% de su base se produce un contraflujo hacia el exterior, es decir, en cuanto más vertical sea la configuración de la abertura menor será la eficiencia del sistema.
3. La superficie de la abertura de salida no debe ser menor a la superficie de la abertura de entrada, ya que se reduce drásticamente la velocidad del aire interior.

A pesar de obtener buenos resultados con estos parámetros, la chimenea solar no cubre toda fachada de la habitación como se muestra Figura 3.3-a. Sin embargo, en el presente estudio también se simuló una variación de la chimenea solar, en la cual se cubre toda la fachada contraria a la dirección del viento (Figura 3.3-b)

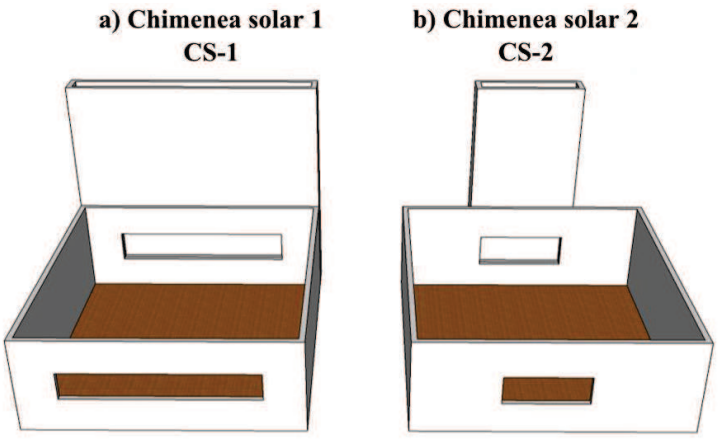



**Figura 3.3 Variantes de la chimenea solar**

*3.1.2.1.4 Doble fachada*

El dimensionamiento de la doble fachada se tomó como referencia el estudio de Joe et al. (2014), debido a la falta de estándares. Joe et al. (2014) realizó un estudio paramétrico simulando un edificio con doble fachada ventilada en un clima cálido-húmedo en Corea. El estudio muestra que a una profundidad de 38 cm de cavidad se tiene menor consumo de energía por calefacción o refrigeración (Gráfico 3.2). Sin embargo en el estudio no se toman en cuenta las aberturas del interior de la edificación. Por este motivo, en el presente estudio se simuló la profundidad propuesta de 38 cm con el modelo de abertura ventilación unilateral 3 (VU-3) (Tabla 3.1).

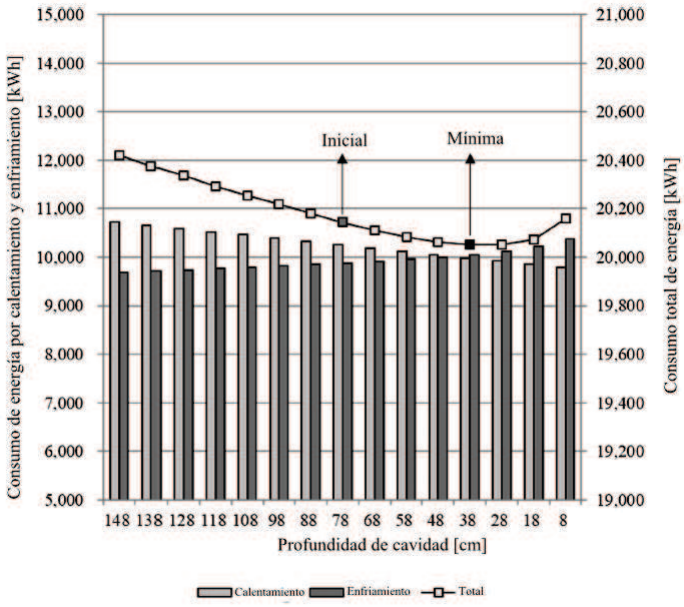



**Gráfico 3.2 Consumo de energía de acuerdo con la profundidad de la cavidad (Joe et al., 2014).**

### 3.1.3 SIMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Con el edificio base seleccionado y las estrategias de ventilación dimensionadas, el siguiente paso fue simularlas energéticamente y realizar un análisis CFD interior. Para esto, las diez variaciones de las estrategias propuestas se modelaron en el edificio base y se cargaron los datos obtenidos en la etapa de definición de parámetros. Estos datos fueron introducidos en el programa mediante plantillas de actividad, cerramientos, iluminación, acristalamiento y sistemas de climatización (Tindale, 2005). En la primera etapa de la simulación energética se analizó solamente la ventilación natural para determinar la factibilidad de usar estas estrategias pasivas en climas cálido-húmedos. Luego en la segunda etapa, se realizaron simulaciones de sistemas híbridos que garanticen confort higrotérmico durante las horas de ocupación. Finalmente, se compararon los resultados para estimar la reducción de consumo energético de climatización con el uso de ventilación natural.

#### 3.1.3.1 Simulación energética

Luego de crear y cargar las plantillas de datos necesarios, se realizaron las simulaciones considerando solamente los periodos de ocupación de las edificaciones a lo largo de un año.

##### *3.1.3.1.1 Simulación energética de estrategias de ventilación natural*

Para determinar la factibilidad de usar ventilación natural en un clima como el de Guayaquil, se simuló el funcionamiento las estrategias de ventilación natural sin otro sistema de climatización. Para esto, se puso en funcionamiento la ventilación natural al 100% durante las horas de ocupación de la edificación y siempre que cumpla dos condiciones. La primera condición es que la temperatura exterior sea mayor a la temperatura operativa interior y la segunda es que la temperatura interior sea mayor a 22 °C. Los resultados de temperatura operativa horario, se analizaron a través de una gráfica de distribución de temperatura en rangos de confort. Los rangos de confort para la ventilación natural se determinaron en base al método gráfico de la ASHRAE-55 (2004) detallados en Gráfico 3.1. Cabe mencionar que los resultados obtenidos de esta simulación se usaron como datos de entrada para la simulación CFD de cada estrategia.

*3.1.3.1.2 Simulación energética de sistemas híbridos*

Luego de determinar la factibilidad del uso de la ventilación natural como sistema de climatización, se simularon sistemas híbridos que efectivamente garanticen confort en todas las horas de ocupación de la edificación. En este contexto se estimó la reducción de consumo energético. El sistema híbrido está constituido por el sistema de climatización usado en el edificio base. Este sistema fue configurado para funcionar durante las horas de ocupación de la edificación bajo dos condiciones. La primera condición es que funcione solamente la ventilación natural y el deshumidificador mientras la temperatura operativa sea menor que la temperatura de consigna del sistema de refrigeración y deshumidificador. Cuando la temperatura operativa alcanza la esta temperatura de consigna, la segunda condición se cumple y el sistema de refrigeración y deshumidificador funciona al 100%. La temperatura y humedad relativa de consigna del sistema híbrido fueron los mismos usados en el edificio base. De esta manera, se garantiza que siempre exista confort en la edificación. El objetivo de este análisis es estimar la reducción en el consumo de un sistema híbrido en comparación a un sistema HVAC. Para el análisis de estos sistemas se obtuvieron resultados de consumo energético por refrigeración para los periodos de ocupación y se compararon porcentualmente con el consumo energético del edificio base.

#### 3.1.3.2 Simulación CFD de estrategias de ventilación natural

A parte de los resultados obtenidos de la simulación energética, existen otros parámetros que se deben tomar en cuenta para realizar las simulaciones CFD. En primer lugar, solo un bloque fue simulado de cada estrategia para evitar problemas de convergencia de solución. Además, otros aspectos que se tomaron en cuenta para asegurar la convergencia fueron: el mallado, los modelos de cálculo de turbulencia y el esquema de discretización. En cuanto al mallado, se utilizó el mallado de volúmenes finitos con dimensiones recomendadas por el programa.

Por otro lado, los modelos de turbulencia y esquema de discretización fueron el de velocidad efectiva constante y contra el viento respectivamente. Estos modelos fueron seleccionados en base a recomendaciones del programa debido al nivel de detalle en el modelado (Tindale, 2005) .

Además de los datos de entrada obtenidos en la simulación energética, es necesario ingresar condiciones iniciales de velocidad del viento y temperatura del aire. La velocidad del viento fue elegida en base al análisis CFD externo de la edificación y la temperatura corresponde al valor promedio de la temperatura máxima registrada (30°C) en el archivo de clima de Guayaquil. Finalmente para determinar la obstrucción del viento y la radiación de calor de los usuarios, se incluyó en las aulas de estudio modelos de personas sentadas y el mobiliario como se muestra en la Figura 3.4. Para esto, se fijó el flujo de calor según el estándar CIBSE-A (2006) para los usuarios en 33 W y computadoras en 100 W. A partir de estos parámetros se realizaron las simulaciones con 20 000 iteraciones para alcanzar un criterio de convergencia válido. Para determinar la convergencia de la solución, se utilizó el monitor de residuos del programa. Aunque el programa converge a la solución cuando el residuo de masa alcanza el valor de 0,0001, se considera aceptable una solución con valores constantes cercanos a cero (Tindale, 2005)

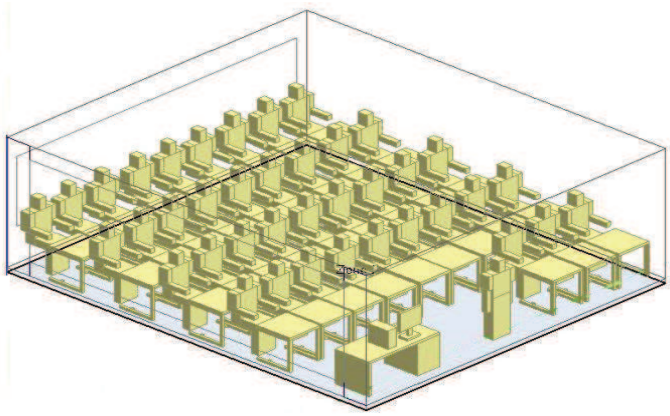


**Figura 3.4 Ejemplo de ocupación de un aula para la simulación CFD**

De la simulación CFD se obtuvieron datos de distribución aire, distribución de temperaturas y tiempos de renovación de aire en el interior de cada aula. Para realizar estos análisis se tomó una capa en la mitad del aula de cada estrategia y los valores y coordenadas se exportaron a una hoja de cálculo. En primer lugar se analizó la distribución del aire en el aula y su velocidad en el área del plano de corte. Para analizar la velocidad del aire, se establecieron rangos de velocidades para determinar la factibilidad de aumentar el rango de temperatura de confort con el aumento de la velocidad del aire. De acuerdo al estándar ASHRAE-55 (2004) se puede incrementar el rango de temperatura de confort cuando la velocidad del

aire en el interior está entre 0,2 y 0,5 m/s. A partir de este estándar se determinó porcentualmente el área del corte que se encuentra dentro de este rango de velocidades. De manera similar, para analizar la distribución de temperatura del aula se fijaron los rangos de temperatura usados en el análisis energético (Apartado 3.1.3.1.1). De esta manera se analizó porcentualmente el área de las aulas que se encuentran dentro de un rango de confort. Por otro lado, el tiempo de renovación de aire se evaluó a través de la distribución de frecuencias de los tiempos de renovación de aire en un rango de cumplimiento. Para esto se tomó como referencia las renovaciones de aire para aulas de clase de 10 l/s/persona (CIBSE-A, 2006). Con este valor se determinó porcentualmente el área del corte que cumple con el tiempo máximo de renovación de aire en cada estrategia.

## 3.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en cada etapa de la metodología se presentan en el presente apartado. Los resultados de las etapas de recopilación de datos y definición de parámetros y casos de simulación, sirvieron como datos de entrada para la etapa de simulación y análisis de datos.

En la etapa de recopilación de datos, se realizó una revisión bibliográfica y una investigación de campo. De la revisión bibliográfica se determinó que las estrategias de ventilación natural de mayor rendimiento aplicables al clima de Guayaquil son: ventilación unilateral, ventilación cruzada, chimenea solar y doble fachada. Con relación a la investigación de campo, esta fue realizada en seis aulas de cuatro universidades que tienen convenios de cooperación con el INER (Tabla 3.3). La investigación de campo que constó de una encuesta y un levantamiento de datos, se realizó los días 28 y 29 de Enero de 2014. La encuesta fue realizada a alumnos que se encontraban en clases al momento de las visitas. El número de encuestados fue de 186 personas que equivalen al 76% de la capacidad total de las seis aulas. De la encuesta se obtuvieron los parámetros de actividad (Tabla 3.4) y horas de ocupación (Tabla 3.5) necesarios para la simulación. Por otro lado, del levantamiento de datos se obtuvieron datos de cargas térmicas de equipos e iluminación y materialidad de la envolvente

(Tabla 3.6). La carga de equipos e iluminación es de 7 y 12 W/m$^2$ respectivamente. Otros resultados de la encuesta de confort higrotérmico referentes a la percepción y sensación térmica de los usuarios se encuentran resumidos en el ANEXO 3.

**Tabla 3.3 Identificación de las facultades y aulas analizadas**

| UNIVERSIDAD | FACULTAD | ENCUESTA | LEVANTAMIENTO DE DATOS | DENOMINACIÓN |
|---|---|---|---|---|
| **Universidad Católica Santiago de Guayaquil** | Facultad de Arquitectura | Facultad de Arquitectura | FA-Aula 1 | UCSG-FA-A1 |
| **Universidad de Guayaquil** | Facultad de Arquitectura | Facultad de Arquitectura | FA-Aula 2 | UG-FA-A2 |
| | Facultad de Ciencias Químicas | Facultad de Ciencias Químicas | FCQ-Aula 3 | UG-FCQ-A3 |
| **Escuela Superior Politécnica del Litoral** | Facultad de Ingeniería Mecánica | ESPOL-FIMCP-A4 | FIMCP-Aula 4 | ESPOL-FIMCP-A4 |
| | Facultad de Ingeniería Mecánica | ESPOL-FIMCP-A5 | FIMCP-Aula 5 | ESPOL-FIMCP-A5 |
| **Universidad Santa María** | Facultad de Economía | Facultad de Economía | FE-Aula 6 | USM-FE-A6 |

**Tabla 3.4 Parámetros de actividad**

| Densidad ocupacional | Tasa metabólica | Índice de arropamiento |
|---|---|---|
| personas/m$^2$ | W/persona | Clo |
| 0,7140 | 99,00 | 0,70 |

**Tabla 3.5 Horarios de ocupación**

| Horario de ocupación | | |
|---|---|---|
| Lunes-Viernes | Sábado | Domingo |
| 00:00 - 07:00 = 0,00 | 00:00 - 07:00 = 0,00 | 00:00 - 07:00 = 0,00 |
| 07:00 - 08:00 = 0,25 | 07:00 - 08:00 = 0,25 | 07:00 - 08:00 = 0,25 |
| 08:00 - 09:00 = 0,50 | 08:00 - 09:00 = 0,50 | 08:00 - 09:00 = 0,50 |
| 09:00 - 12:00 = 1,00 | 09:00 - 12:00 = 1,00 | 09:00 - 12:00 = 1,00 |
| 12:00 - 15:00 = 0,75 | 12:00 - 24:00 = 0,00 | 12:00 - 24:00 = 0,00 |
| 15:00 - 17:00 = 1,00 | | |
| 17:00 - 18:00 = 0,50 | | |
| 18:00 - 21:00 = 0,25 | | |
| 21:00 - 24:00 = 0,00 | | |

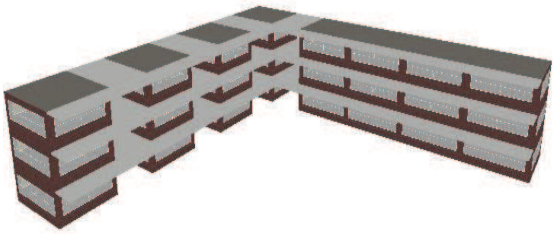
Nota: El índice de ocupación es la relación entre la densidad de ocupación y la superficie del espacio de análisis.

**Tabla 3.6 Materialidad del aula**

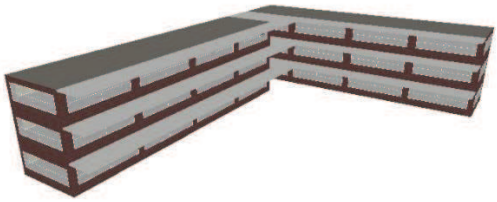
| | Piso | Muros | Ventanas | Perfilería | Cubierta | Puertas |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Materialidad** | Concreto reforzado | Bloque de concreto | Vidrio simple | Aluminio | Concreto reforzado | Metálicas |
| **Espesor [m]** | 0,25 | 0,15 | 0,006 | 0,005 | 0,25 | 0,005 |
| **Conductividad [W/m$^2$]** | 2,33 | 2,48 | 5,78 | 5,88 | 3,74 | 3,84 |

A partir de los datos obtenidos en la recopilación de datos, en primer lugar se definió una tipología de edificio base. En segundo lugar, se dimensionaron las aberturas de las estrategias de ventilación natural y se aplicaron al edificio base.

La tipología de la edificación base se definió a partir de una simulación energética de las seis formas encontradas en la investigación de campo (Figura 3.5). El consumo energético por refrigeración fue calculado de las seis formas para determinar la forma y orientación que menos energía consume. Para comparar estas seis formas de edificación, se definió un aula unificada de dimensiones 7x8 m y 2,9 m de altura a partir de un promedio de las medidas de las aulas encontradas en el levantamiento. Esta aula cumple con los requerimientos constructivos y de ocupación definidos en códigos de construcción ecuatorianos (Distrito Metropolitano de Quito, 2005). Además, para comparar el consumo energético por refrigeración, se agregó un sistema de climatización. Las temperaturas de consigna del sistema de climatización se definieron en función de los rangos de confort higrotérmico definidos en función del método gráfico del estándar ASHRAE-55 (2004) (Tabla 3.7). Se determinó a partir de estos rangos, que el sistema de refrigeración funcione cuando a temperatura operativa alcance 26 °C y que mantenga la humedad relativa en 50%. Con estos parámetros establecidos, se simuló y posteriormente analizó los resultados de consumo de energía por climatización (Tabla 3.8).



FORMA 1



FORMA 2

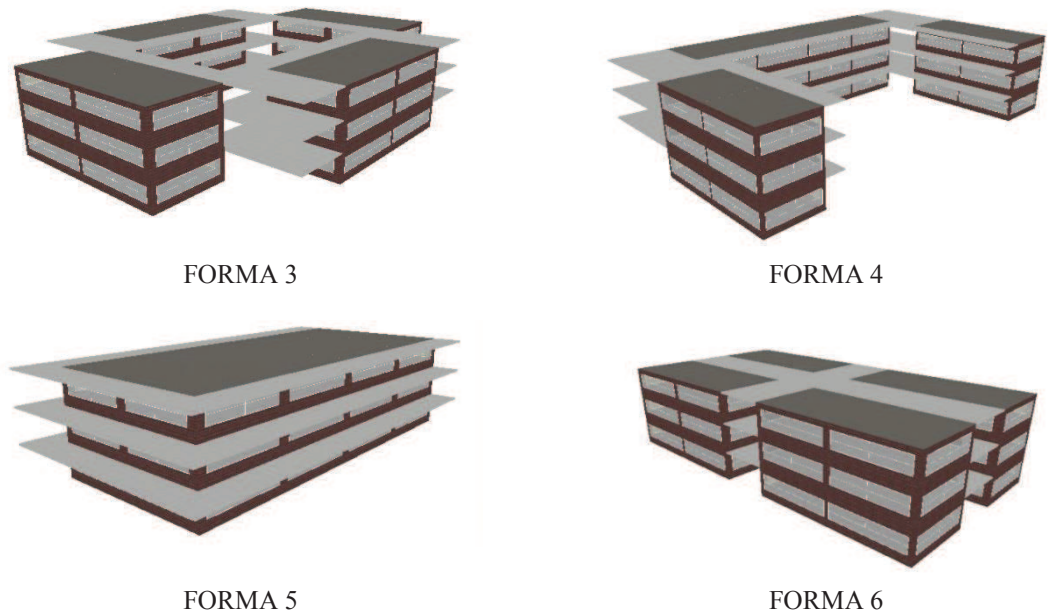



**Figura 3.5 Formas de edificaciones de la investigación de campo**

**Tabla 3.7 Rangos de confort higrotérmico**

| Rangos | Consigna de confort |
|---|---|
| < 22 °C | Disconfort |
| 23 °C - 26 °C | Confort para 100% de ocupantes con 50% de humedad relativa |
| 27 °C - 28 °C | Confort para 80% de ocupantes con 50% de humedad relativa |
| > 29 °C | Disconfort |

**Tabla 3.8 Resultados de la simulación de forma y orientación con relación a las características de cada edificio**

| FORMA | Área suelo útil | Superficie externa | Volumen construido | Factor de forma | Orientación | Energía de refrigeración |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $m^2$ | $m^2$ | $m^3$ | FF | Grados | kWh |
| Forma 1 | 1 344 | 2 170,60 | 3 897,60 | 0,56 | 345 | 298 922,80 |
| Forma 2 | 1 344 | 1 805,20 | 3 897,60 | 0,46 | 345 | 378 442,07 |
| Forma 3 | 1 344 | 2 048,80 | 3 897,60 | 0,53 | 345 | 330 777,84 |
| Forma 4 | 1 344 | 1 927,00 | 3 897,60 | 0,49 | 345 | 408 528,32 |
| Forma 5 | 1 344 | 1 248,40 | 3 897,60 | 0,32 | 0 | 338 261,30 |
| Forma 6 | 1 344 | 2 048,80 | 3 897,60 | 0,53 | 45 | 417 564,03 |

La Tabla 3.8, muestra el menor consumo por forma y orientación. Con este análisis se demostró que la forma 1 es la que consume menos energía de climatización.

Según Kleiven (2003), esta forma y en general formas estrechas, mejoran el efecto de enfriamiento convectivo del aire para aprovechar la ventilación natural. El efecto de enfriamiento convectivo permite que la forma 1 tenga el menor consumo energético debido a mayor superficie de la envolvente se encuentra expuesta al aire. Esto se traduce en un factor de forma de 0,56, donde el área de la envolvente es mayor al volumen de la edificación. También se destacó que la orientación de 345 grados, es la más óptima para todas las formas excepto para la forma 5 y 6. Esto se debe a que estas formas no aprovechan el efecto del aire para mejorar el efecto convectivo de la ventilación natural, ya que son edificios cerrados que no permiten el ingreso del aire. Cabe mencionar que el valor del consumo energético por refrigeración de la Forma 1 (298 922,80 kWh) equivale al 75% de la energía total consumida por el edificio. Este valor fue usado para comparar el consumo energético con el empleo de sistemas híbridos. A partir de estos resultados, se estableció la forma 1 como el caso base para aplicar las estrategias de ventilación natural y estimar la reducción en el consumo energético al emplear ventilación natural.

#### 3.2.1.1 Dimensionamiento de estrategias de ventilación natural

Para determinar la velocidad del aire y los coeficientes de presión necesarios para dimensionar las estrategias de ventilación unilateral y ventilación cruzada, se realizó un análisis CFD externo de la edificación (Gráfico 3.3 y Gráfico 3.4).

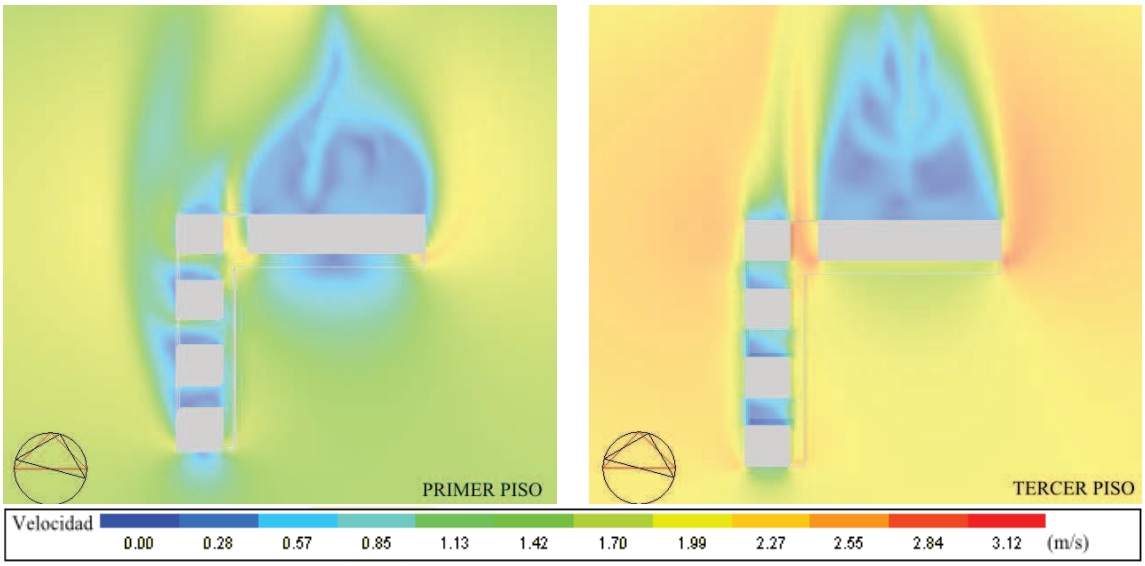



**Gráfico 3.3 Velocidades del aire en el contorno de la edificación.**

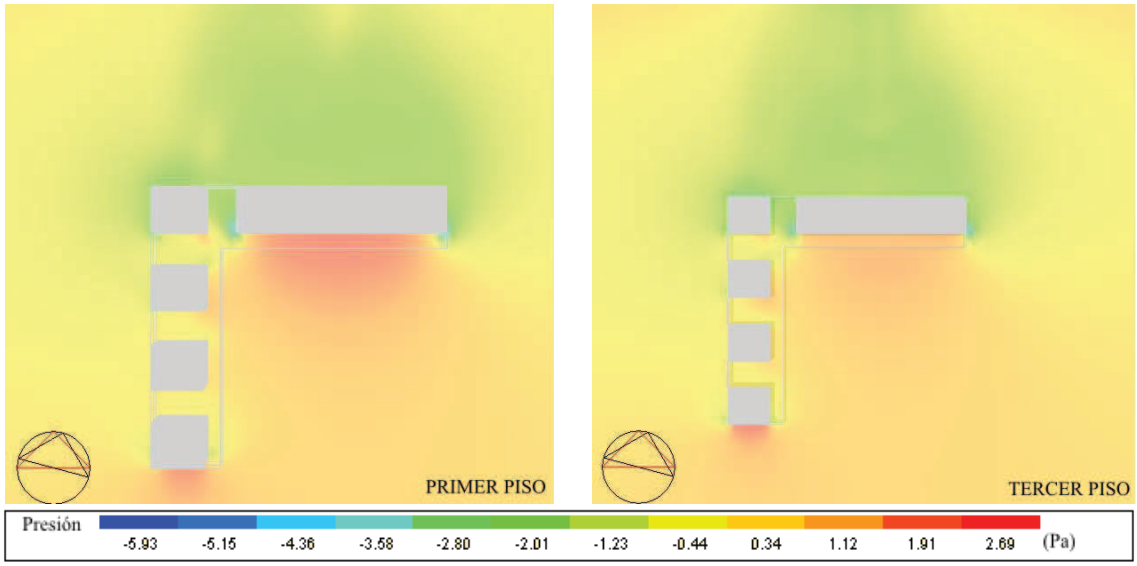
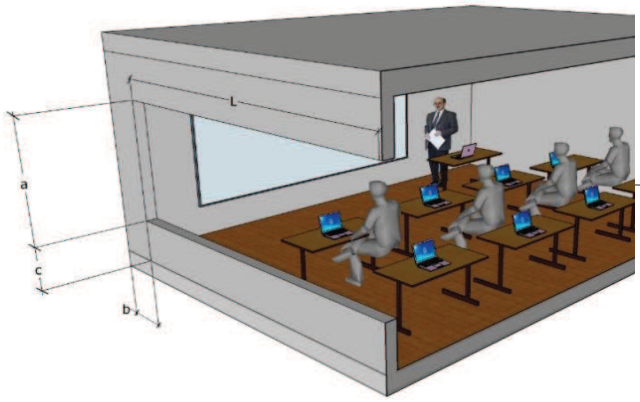
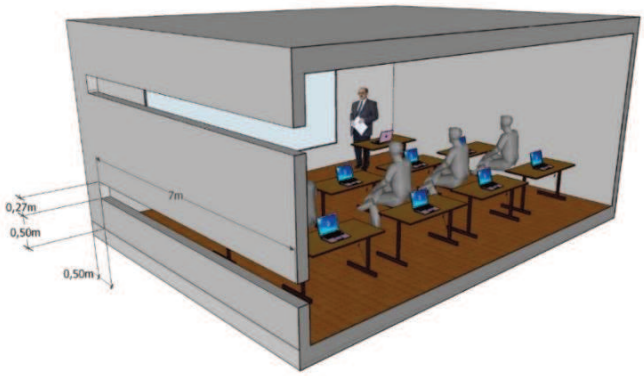
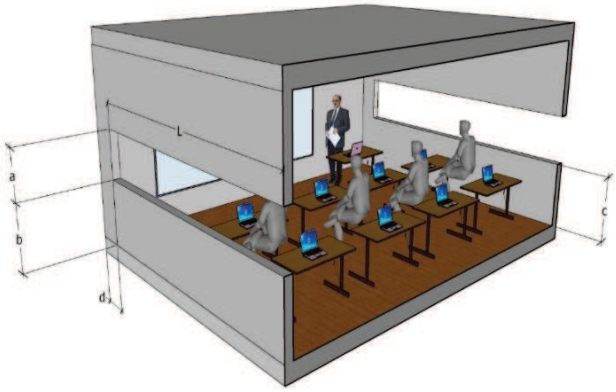



**Gráfico 3.4 Presión en el contorno del edificio.**

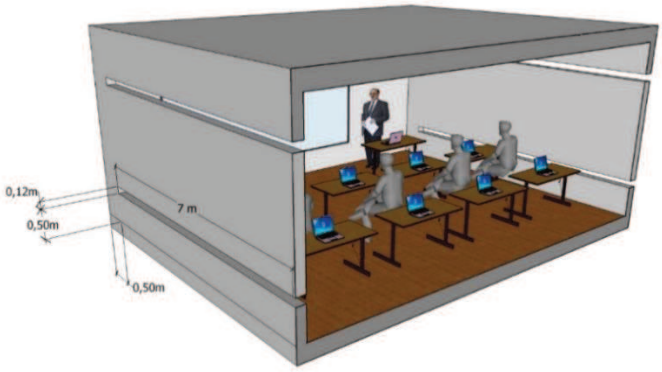
En el Gráfico 3.3, se observa que la velocidad del aire en el primer piso es menor a la velocidad del viento en el tercer piso. El dimensionamiento de las aberturas se realizó utilizando el valor más crítico que corresponde al menor valor de velocidad del aire (1 m/s). De la misma manera se tomó el valor promedio de la velocidad del aire libre de 2 m/s.

Al igual que la velocidad del aire, los valores de presión (Gráfico 3.4) cambian de acuerdo a la altura del edificio. Así, la presión sobre la cara sur en el primer piso es mayor a la presión en el tercer piso. La menor diferencia de presiones entre fachadas opuestas se observa en la parte izquierda del tercer piso. En este punto se determinó el $P_w$ para la cara sur de 1,12 Pa y la cara norte de 0,34 Pa. En cuanto al $P_0$, se definió en promedio un valor de 0,5 Pa. Con estos datos se encontró los valores de $C_p$ usando la Ecuación 3.4, con lo cual se tiene para la cara sur un Cp de 0,24 y en la cara norte de -0,06. Con los datos anteriormente descritos y los detallados en la metodología, se dimensionaron las cuatro estrategias de ventilación natural y sus variantes las cuales se encuentran esquematizadas en la Tabla 3.9.

## Tabla 3.9 Dimensiones de las aberturas

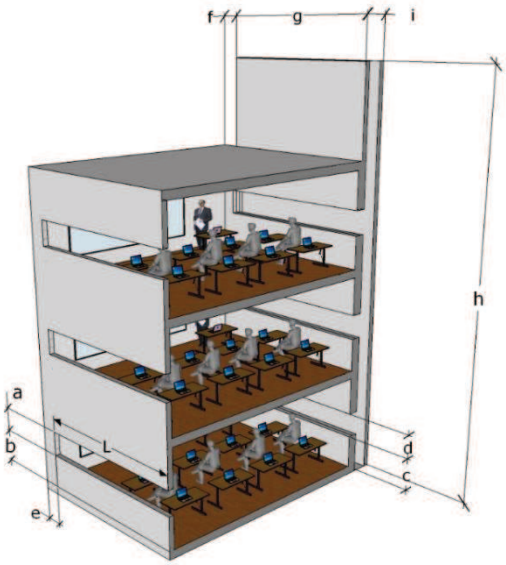
| Designación | Esquema | Dimensiones |
|---|---|---|
| | **Ventilación Unilateral** | |
| **VU-1** |   | L=7,00 m<br>a= 2,30 m<br>b= 0,50 m<br>c= 0,50 m |
| **VU-2** | | L=3,70 m<br>a= 1,50 m<br>b= 2,00 m<br>c= 0,70 m |
| **VU-3** |   | |
| | **Ventilacion Cruzada** | |
| **VC-1** |   | L= 7,00 m c=1,45 m<br>a= 0,17 m d= 0,50 m<br>b= 1,45 m |
| **VC-2** | | L= 7,00 m c= 2,20 m<br>a= 0,17 m d= 0,50 m<br>b= 0,50 m |
| **VC-3** | | L= 7,00 m c= 0,50 m<br>a= 0,17 m d= 0,50 m<br>b= 0,50 |

**VC-4**




**Chimenea Solar**

**CS-1**



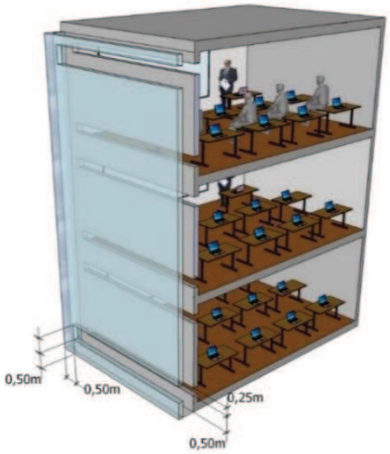

| | |
|---|---|
| L= 7,00 m | e= 0,50 m |
| a= 0,25 m | f= 0,00 m |
| b= 0,85 m | g= 8,00 m |
| c= 0,85 m | h= 7,00 m |
| d= 0,75 m | i= 0,75 m |

**CS-2**

| | |
|---|---|
| L= 2,3 m | e = 2,70 m |
| a= 0,25 m | f= 2,70 m |
| b= 0,85 m | g= 8,00 m |
| c= 0,85 m | h= 7,00 m |
| d= 0,75 m | i= 0,75 m |

**Doble Fachada**

**DF**



### 3.2.2 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

#### 3.2.2.1 Simulación energética

##### *3.2.2.1.1 Simulación energética de estrategias de ventilación natural*

El objetivo de simular la ventilación natural fue determinar si es factible usar solamente ventilación natural para garantizar confort higrotérmico en un clima cálido-húmedo. Para garantizar el confort higrotérmico, la temperatura operativa debe ser menor de 26 °C con una humedad relativa menor a 50 %. Como se observa en el Gráfico 3.5, apenas el 10 % de horas de uso cumple con este requerimiento. A pesar de tener el 10 % de horas de uso dentro de condiciones de confort, este análisis deja de lado la humedad relativa, la cual alcanza valores mayores al 50 % en todas las horas de ocupación. En base a esto, para que la ventilación natural garantice confort higrotérmico a 26 °C, se debe mantener la humedad relativa menor a 50 %. Por este motivo, en la siguiente etapa de la simulación, se utilizó un sistema híbrido (ventilación natural/deshumidificador y sistema de climatización) que regule la humedad relativa en las horas que se usa la ventilación natural y que garantice confort higrotérmico a 26 °C con 50 % de humedad relativa.

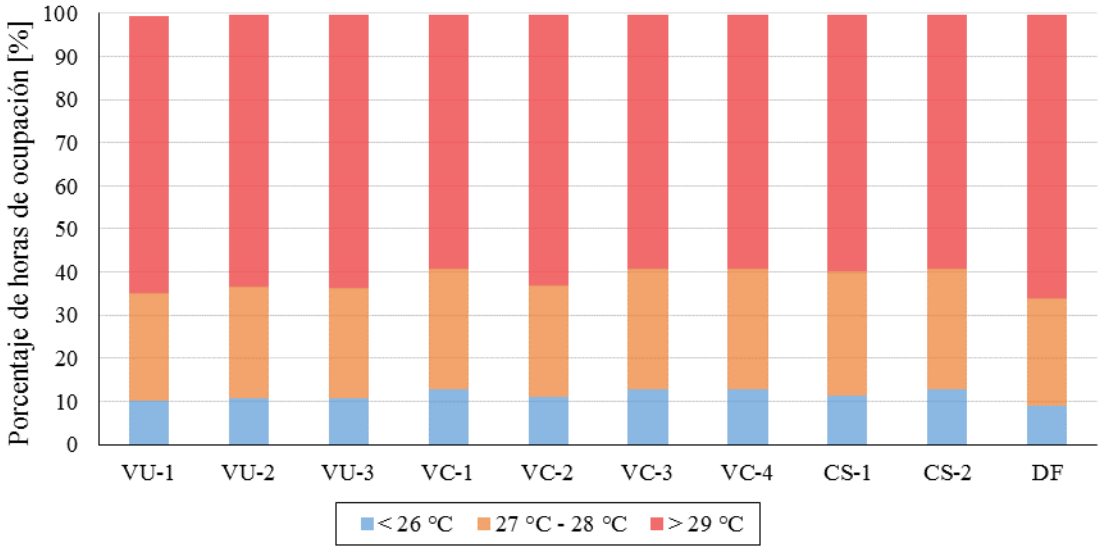



**Gráfico 3.5 Distribución de temperaturas en rangos de confort**

##### *3.2.2.1.2 Simulación energética de sistemas híbridos*

Con la temperatura de consigna de 26 °C y 50 % de humedad relativa, se simularon las estrategias de ventilación natural con el sistema híbrido. El sistema híbrido constó de la combinación de las estrategias de ventilación

natural/deshumidificador y un sistema de climatización. Como se mencionó anteriormente, el sistema de climatización consume el 75% de la energía total de la edificación y para el presente análisis se tomó este valor como el 100% de consumo energético para compararlo con el sistema híbrido. A partir de esto, los sistemas híbridos logran reducir el consumo energético en un mínimo de 7 %. Sin embargo, como se muestra en el Gráfico 3.6, se destacan las estrategias de ventilación cruzada y chimenea solar-2 por ser las que más reducen el consumo energético de refrigeración (10,6 %) con excepción de la variación VC-2. En la variación VC-2 el consumo del sistema de climatización es mayor al de las estrategias de ventilación cruzada debido a que las aberturas en caras opuestas del aula no están a la misma altura como se observa en la Tabla 3.2.

De manera similar, se probó un sistema híbrido que use solo ventilación natural en la noche y sistema de climatización durante las horas de ocupación. El resultado de este sistema demostró que aunque las temperaturas durante la noche se mantienen bajo los 25 °C, la humedad relativa aumenta a más de 70 %. Esto resulta en un consumo energético incluso mayor al que se tiene al usar solamente sistemas de climatización. Esto se debe a que al aumentar la humedad relativa durante la noche, el sistema necesita mayor energía para deshumidificar el ambiente durante las primeras horas de ocupación.

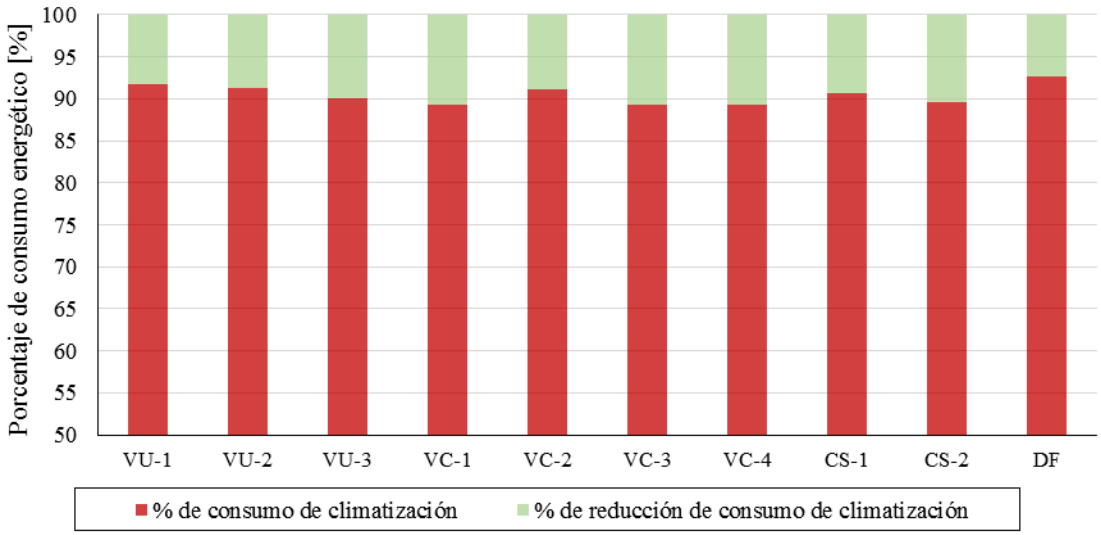



**Gráfico 3.6 Consumo energético con sistema híbrido**

#### 3.2.2.2 Simulación CFD de estrategias de ventilación natural

El Gráfico 3.7 resume los resultados obtenidos en el análisis CFD, con el cual se analizó cualitativamente la distribución de velocidad del aire, distribución de temperaturas y tiempo de renovación de aire. Con relación a la distribución de velocidad del aire, el porcentaje de área donde la velocidad del aire alcanza de 0,2 a 0,5 m/s es menor a 25 % en todos los casos. Con esta magnitud de velocidades no es posible aumentar el rango de confort interno mediante la velocidad de aire (ASHRAE-55, 2004). Por este motivo, el rango de temperatura en que se considera confort se mantiene entre 22 y 26 °C. Con respecto a la distribución de temperaturas, al menos el 90 % del área de todas las estrategias cumple con el rango de confort, sin embargo, este análisis deja de lado a la humedad relativa por lo que no se puede considerar que todos esos puntos en la edificación presenten confort. Por otro lado, el tiempo máximo de renovación de aire interior es 400 s para cumplir con la tasa de 10 l/s/persona definida en el estándar CIBSE-A (2006). A excepción de las estrategias VU-2 y DF, todas las estrategias cumplen con una renovación de aire de 100 % en el tiempo determinado. Los resultados gráficos del análisis CFD referentes a distribución de velocidad de aire, distribución de temperatura y tiempo de renovación de aire se encuentran en el ANEXO 4.

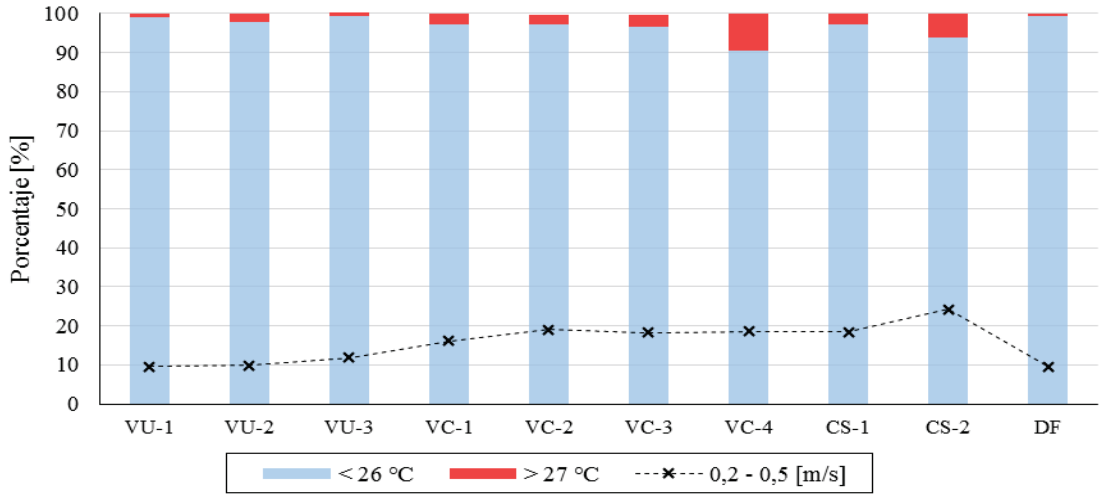



**Gráfico 3.7 Resumen de análisis CFD**

A pesar de que con el análisis CFD se tienen resultados de temperatura prometedores para la ventilación natural, cabe mencionar que este análisis es

instantáneo, en estado estable y además los resultados solo muestran una parte de todo el volumen del aula.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio parte con la revisión bibliográfica y la investigación de campo con el fin de identificar los antecedentes necesarios para el estudio. La revisión del estado del arte sobre estrategias de ventilación natural en climas cálido-húmedos como el de Guayaquil, indicó que las estrategias de mayor uso y rendimiento para estas condiciones climáticas son la ventilación unilateral, ventilación cruzada, chimenea solar y dobles fachadas. Con respecto a la investigación de campo, se llevó a cabo una encuesta y un levantamiento de datos en universidades en la ciudad de Guayaquil. Los datos obtenidos de esta investigación son parte de los parámetros de entrada necesarios para para las simulaciones. De los diferentes edificios analizados en la investigación de campo, solo uno emplea sistemas pasivos para climatizar los espacios, en el cuál, a pesar de que el 80 % de usuarios sienten calor, apenas el 30 % siente como “inaceptable” esta condición. Con respecto al resto de edificaciones, se identificó el uso de sistemas mecánicos para climatizar los espacios, no obstante, apenas el 60 % de los ocupantes siente como “aceptables” las condiciones de clima interior. Esto demuestra que el diseño de los sistemas mecánicos de climatización no ha sido optimizado en estas edificaciones y se deben tomar medidas correctivas para garantizar confort higrotérmico para todos los ocupantes. Por otro lado, los materiales usados (concreto) en todas las edificaciones, presentan un comportamiento térmico que no responde a las condiciones meteorológicas del lugar y no favorecen a las condiciones de confort higrotérmico. A pesar del uso de pasillos y atrios que generan protección solar, los materiales de paredes y techos de concreto permiten ganancias térmicas en las horas de mayor incidencia solar. Esto resulta en un aumento de la temperatura radiante y consecuentemente el incremento de la temperatura operativa del espacio que son climatizados con sistemas mecánicos.

En base a los antecedentes del estado del arte y condiciones reales de edificaciones universitarias de Guayaquil, el objetivo de este estudio fue determinar una estrategia de ventilación natural que mejore las condiciones de confort higrotérmico, con una consecuente reducción de consumo energético a partir de análisis energéticos y CFD. Después de haber realizado estos análisis, se pudo concluir por una parte, que el análisis CFD instantáneo y en estado estable permite realizar un análisis cualitativo del comportamiento dinámico del flujo de aire en las estrategias de ventilación natural, debido a que los resultados muestran una sección de todo el volumen del aula. Por el contrario, a través de simulaciones energéticas anuales se analizó cuantitativamente los parámetros más influyentes en la edificación como ganancias y pérdidas de la envolvente, temperatura operativa, humedad relativa y estimación de consumos energéticos.

A partir del análisis energético, se demostró que las edificaciones que presentan mayor superficie expuesta y una orientación adecuada (perpendicular a la dirección del viento) presentan menor demanda de climatización debido al efecto convectivo del aire. Por otro lado, se demostró que con el uso de ventilación natural, solo el 10 % de las horas de ocupación están dentro del rango de confort higrotérmico debido principalmente, a los altos niveles de humedad relativa. El rango de confort higrotérmico se mantuvo entre 23 a 26 °C a 50 % de humedad relativa, dado que para extender este rango, la velocidad del aire dentro del aula debería alcanzar entre 0,2 a 0,5 m/s. Sin embargo, bajo las condiciones meteorológicas de Guayaquil, apenas el 25 % del área de las secciones analizadas mediante CFD cumplen con este requerimiento. De esta manera, se concluyó que con el uso exclusivo de ventilación natural en las condiciones meteorológicas de Guayaquil, no es posible garantizar confort higrotérmico para los ocupantes de edificaciones universitarias debido a la alta temperatura, alto nivel de humedad relativa, baja velocidad del aire y elevadas cargas térmicas.
Por este motivo se evaluaron sistemas híbridos que reduzcan la humedad relativa mientras funciona la ventilación natural, y así, garantizar confort interior para todos los usuarios durante todas las horas de ocupación. Los resultados demostraron que el consumo energético por climatización se puede reducir hasta el 10,6 % con el uso combinado de la estrategia de ventilación cruzada o la

estrategia de chimenea solar-2 con el sistema de climatización. Para generar un funcionamiento adecuado de la estrategia de ventilación cruzada, las aberturas en las fachadas opuestas de la edificación deben estar ubicadas a la misma altura. Por otro lado, a pesar de que la chimenea solar tiene el mismo rendimiento que la ventilación cruzada, es recomendable realizar un análisis de aislación térmica que mejore el rendimiento térmico de la misma. De manera contraria, la estrategia que presentó la menor reducción del consumo energético (7,5 %) fue la doble fachada. Esto se debe a la transferencia de calor desde la cavidad hacia el interior por falta de aislamiento térmico.

A pesar de que la temperatura del aire presenta valores en promedio bajo los 25°C por la noche, la estrategia híbrida (ventilación natural nocturna y sistema de climatización en las horas de ocupación) no es efectiva debido al elevado nivel de humedad relativa del ambiente. Esto causa que el sistema de climatización consuma más energía al disminuir la humedad relativa en las primeras horas de ocupación. Por lo tanto, la ventilación nocturna en clima cálido-húmedo no es efectiva para edificaciones con altas cargas térmicas por ocupación y equipos, como lo son las edificaciones educativas.

Este estudio es el punto de partida para futuras investigaciones sobre implementación de estrategias pasivas en edificaciones educativas en el Ecuador. Es necesario evaluar la incidencia de la forma, orientación, aislación térmica materiales y protecciones solares en el confort higrotérmico y consumo energético de las edificaciones bajo las diferentes condiciones meteorológicas del país.

# BIBLIOGRAFÍA


Albarracin, G. (2014). *Diseño de tipologías pasivas, eficientes energéticamente para edificios escolares en el Ecuador*. Articulo presentado en Taller de eficiencia energética en edificaciones, Cuenca.

Alvear, A., Peña, P., & Labus, J. (2013). Edificaciones Sustentables: Caso Ecuador. *Revista Tecnológica-ESPOL, 26*(2).

Alvear, P. (2010). *Control inteligente de temperatura de un departamento prototipo por ventilación natural*. Articulo presentado en Taller de eficiencia energética en edificaciones, Cuenca.

Allocca, C., Chen, Q., & Glicksman, L. R. (2003). Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings, 35*(8), 785-795. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6

ASHRAE-55. (2004). ASHRAE STANDARD 55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta*.

Awbi, H. (2010). Basic Concepts for Natural Ventilation of Buildings. Recuperado de www.reading.ac.uk/tsbe

Bangalee, M., Miau, J., & Lin, S. (2013). Computational techniques and a numerical study of a buoyancy-driven ventilation system. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 65*, 572-583. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.040

Bangalee, M., Miau, J., Lin, S., & Yang, J. (2013). Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model. *Energy and Buildings, 66*, 306-314. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.005

Bansal, N., Mathur, R., & Bhandari, M. (1993). Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building and environment, 28*(3), 373-377. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(93)90042-2

Bordalo Junior, H. D. (2011). *Estrategias de ventilación natural para la majora de la eficiencia energética en edificios.* Master, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

Brager, G., & de Dear, R. (2001). Climat, comfort and natural ventilation: a new adaptative comfort for ASHRAE Standard 55 Indoor Enviroment Quality (IEQ). *UC Berkeley: Center for the Built Enviroment.*

Busch, J. F. (1992). A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. *Energy and buildings, 18*(3), 235-249. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(92)90016-A

Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R., & Zhang, J. (2013). A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and Environment*.

Cardinale, N., Micucci, M., & Ruggiero, F. (2003). Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian building. *Energy and buildings, 35*(2), 153-159. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00024-5

CIBSE-A. (2006). Environmental design. *The Chartered Institution of Building Services Engineers, London*.

Cohen, R. (1997). Environmental criteria for naturally ventilated buildings. *Naturally ventilated buildings: Buildings for the senses, economy and society*, 105-122.

Chen, Q. (1997). Computational Fluid Dynamics for HVAC: Successes and Failures. *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin, 103*(1), 178-187.

Dehghan, A., Esfeh, M. K., & Manshadi, M. D. (2013). Natural ventilation characteristics of one-sided wind catchers: experimental and analytical evaluation. *Energy and Buildings, 61*, 366-377. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.048

Dictuc, S., & Mema, M. I. (2011). Evaluación de estrategias de diseño constructivo y de estándares de calidad ambiental y uso eficiente de energía en edificaciones públicas, mediante monitorización de edificios construidos. Chile.

Distrito Metropolitano de Quito, D. (2005). *Normas de Arquitectura y Urbanismo que corresponde a la codificación de los textos de las ordenanzas N 3457 y 3477*. Ecuador.

Energy Consumption Guide. (1993). Energy Consumption Guide: Energy Efficiency in offices *Energy Efficiency Office/HMSO*. London: HMSO.

Espinoza, H., Patiño, L., Tovar, F., & Gonzáles, Y. (2006). Simulación térmica y fluidodinámica de una chimenea solar como sistema pasivo de ventilación. *SABER, 18*(1).

Finnegan, M., Pickering, C., & Burge, P. (1984). The sick building syndrome: prevalence studies. *British medical journal (Clinical research ed.), 289*(6458), 1573. doi: http://dx.doi.org/10.1136/bmj.289.6458.1573

Fisk, W. J., & Rosenfeld, A. H. (1997). Estimates of improved productivity and health from better indoor environments. *Indoor air, 7*(3), 158-172. doi: http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.t01-1-00002.x

Fontanini, A., Vaidya, U., & Ganapathysubramanian, B. (2013). A stochastic approach to modeling the dynamics of natural ventilation systems. *Energy and buildings, 63*, 87-97. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.053

Gan, G. (2010). Simulation of buoyancy-driven natural ventilation of buildings—Impact of computational domain. *Energy and Buildings, 42*(8), 1290-1300. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.022

Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings, 18*(1), 11-23. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K

Her Majesty's Stationery Office, H. (1992). The workplace regulations No. 3004 *Statutory regulations 1992*. London.

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. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066

Hunt, G. R., & Linden, P. F. (1999). The Fluid Mechanics of natural ventilation-displacement ventilation by bouyancy. *Building and Environment, 34*, 707-720. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00053-5

Hussain, S., & Oosthuizen, P. H. (2013). Numerical investigations of buoyancy-driven natural ventilation in a simple three-storey atrium building and thermal comfort evaluation. *Applied Thermal Engineering, 57*(1), 133-146. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.033

INEC. (2012). *Encuesta nacional de empleo, desempleo y subempleo*. Ecuador: INEC.

Joe, J., Choi, W., Kwak, Y., & Huh, J.-H. (2014). Optimal design of a multi-story double skin facade. *Energy and Buildings, 76*, 143-150. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.002

Khan, N., Su, Y., & Riffat, S. B. (2008). A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and buildings, 40*(8), 1586-1604. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015

Khanal, R., & Lei, C. (2011). Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation. *Energy and Buildings, 43*(8), 1811-1819. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.035

Kleiven, T. (2003). *Natural ventilation in buildings.* PhD Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Noruega. (7242)

Larsen, T. S., & Heiselberg, P. (2008). Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. *Energy and Buildings, 40*(6), 1031-1040.

León, J. (2013). *Parámetros de diseño de la chimenea solar.* Master, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

Levermore, G. (2002). The exponential limit to the cooling of buildings by natural ventilation. *Building Services Engineering Research and Technology, 23*(2), 119-125. doi: http://dx.doi.org/10.1191/0143624402bt032oa

Linden, P. F. (1999). The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual review of fluid mechanics, 31*(1), 201-238. doi: http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.31.1.201

Lomas, K. J. (2007). Architectural design of an advanced naturally ventilated building form. *Energy and Buildings, 39*(2), 166-181. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.004

Mendes, N., Westphal, F. S., Lamberts, R., & Bellini da Cunha Neto, J. A. (2005). Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. *Ambiente Construído, 5*(4), 47-68.

Mingotti, N., Chenvidyakarn, T., & Woods, A. W. (2011). The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin facade. *Building and environment, 46*(4), 807-823. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.015

Miño, I., Lobato, A., & Labus, J. (2013). *Simulaciones energéticas como herramienta para evaluación térmica de las viviendas sociales del Ecuador: Caso Yachay*. Articulo presentado en ISEREE.

Nguyen, A.-T., & Reiter, S. (2014). A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets. *Energy and buildings, 68*, 756-763. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.050

Nguyen, A.-T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy, 113*, 1043-1058. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061

Olgyay, V. (1960). *Bioclimatic evaluation method for architectural application.* Articulo presentado en Biometeorology: Proceedings of the 2nd International Bioclimatological Congress.

Omer, A. M. (2008). Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12*(6), 1562-1587. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.010

Ordoñes, A. (2012). Evaluación del impacto de diversas variables de diseño y constructivas en el desempeño ambiental y energético de edificios de oficina en un clima caribeño (pp. 28): Universitat Rovira i Virgili.

Palacios, C. (2014). *Edificaciones eficientes energéticas como mitigación del fenómeno Isla de Calor en la ciudad de Guayaquil*. Articulo presentado en Taller de Eficiencia Energética en Edificaciones, Cuenca.

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. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00076-8

Santamouris, M. (2005). Energy in the urban built environment: The role of natural ventilation. *Natural ventilation in the urban environment: assessment and design*, 1-19.

Santamouris, M., & Allard, F. (1998). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*: Earthscan.

Siew, C., Che-Ani, A., Tawil, N., Abdullah, N., & Mohd-Tahir, M. (2011). Classification of natural ventilation strategies in optimizing energy

consumption in Malaysian office buildings. *Procedia Engineering, 20*, 363-371. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.178

Stavridou, A. D., & Prinos, P. E. (2013). Natural ventilation of buildings due to buoyancy assisted by wind: Investigating cross ventilation with computational and laboratory simulation. *Building and Environment, 66*, 104-119. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.011

Tavares, P. (2009). *An approach to natural ventilation through sustainable building design*. Oslo by Steinerskole. Oslo

Tindale, A. (2005). DesignBuilder software. Stroud, Gloucestershire UK.

USGBC (Producer). (2008). Thermal comfort survey. Recuperado de http://www.usgbc.org/

Von Mackensen, S., Bullinger, M., & Morfeld, M. (1999). The sick building syndrome as a subjective perception-theoretical approach and assessment methods. *Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin, 202*(2), 243-248.

Wang, Y., Zhao, F.-Y., Kuckelkorn, J., Liu, D., Liu, J., & Zhang, J.-L. (2014). Classroom energy efficiency and air environment with displacement natural ventilation in a passive public school building. *Energy and Buildings, 70*, 258-270. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.071

Yarke, E. (2005). *Ventilación natural de edificios: fundamentos y métodos de cálculo para aplicación de ingenieros y arquitectos*. Buenos Aires: Nobuko.

York, D. A., Cappiello, C. C., & Olson, K. H. (1984). *DOE-2 Reference Manual: Version 2.1 C*: Los Alamos National Laboratory, Solar Energy Group.

Zhai, Z., Johnson, M.-H., & Krarti, M. (2011). Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. *Energy and Buildings, 43*(9), 2251-2261. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.026

Zhao, R., Sun, S., & Ding, R. (2004). Conditioning strategies of indoor thermal environment in warm climates. *Energy and buildings, 36*(12), 1281-1286. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.07.002

# ANEXO 1

# MODELO DE ENCUESTA Y LEVANTAMIENTO DE DATOS

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

## ENCUESTA DE CONFORT TÉRMICO

FECHA: Edad:

CENTRO EDUCATIVO:

1. **En una semana típica, ¿cuántas horas permanece dentro del aula de clase?**

| | |
|---|---|
| | 10 o menos |
| | 11-30 horas |
| | más de 30 horas |

2. **En que horario recibe clases:**

| | |
|---|---|
| | Mañana |
| | Tarde |
| | Noche |

3. **Género:**

| | |
|---|---|
| | Masculino |
| | Femenino |

MARCAR CON UNA"X" SU RESPUESTA

| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4. | **¿Cuál es su sensación respecto a la temperatura?** | | | | | | |
| | Muy frio | Frio | Algo de frio | Neutro | Algo de calor | Calor | Mucho calor |
| 5. | **¿Cómo percibe la temperatura?** | | | | | | |
| | Claramente inaceptable | Inaceptable | Ligeramente inaceptable | Neutro | Ligeramente aceptable | Aceptable | Claramente aceptable |
| 6. | **¿Cómo desearía que fuera la temperatura?** | | | | | | |
| | Más baja | | | 0 | | | Más alta |
| 7. | **¿Cómo percibe la calidad del aire?** | | | | | | |
| | Muy inaceptable | Inaceptable | Ligeramente inaceptable | Neutro | Ligeramente aceptable | Aceptable | Muy aceptable |
| 8. | **¿Cómo percibe la intensidad del olor?** | | | | | | |
| | Sin olor | | | 0 | | | Olor abrumador |
| 9. | **Las condiciones de clima en el aula interfieren o realzan el desempeño de estudio** | | | | | | |
| | Interfieren | | | 0 | | | Realza |
| 10. | **¿Cómo valora la cantidad de iluminación en el aula?** | | | | | | |
| | Muy insatisfecho | | | 0 | | | Muy satisfecho |
| 11. | **¿Cómo valora el confort de iluminación? (reflexión, contraste, brillo)** | | | | | | |
| | Penumbra | | | 0 | | | Sobre iluminación |
| 12. | **Las condiciones de iluminación interfieren o realzan el desempeño de estudio** | | | | | | |
| | Interfieren | | | 0 | | | Realza |
| 13. | **Considerando el uso de energía, ¿qué tan eficiente es el edificio en su opinión?** | | | | | | |
| | Nada eficiente | | | 0 | | | Muy eficiente |

## DATOS DE LEVANTAMIENTO TÉCNICO DE DATOS

| | | UCSG-FA-A1 | UG-FA-A2 | UG-FCQ-A3 | ESPOL-FIMCP-A4 | ESPOL-FIMCP-A5 | USM-FE-A6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EDIFICIO | **Orientación** | 15° NO | N | N | 15° NE | 15° NE | 15° NO |
| | **Latitud** | 2º 10' 51.63" S | 2º 11' 0.45" S | 2º 11' 0.45" S | 2° 8' 42.02" S | 2° 8' 39.30" S | 2° 9' 50.86" S |
| | **Longitud** | 79º 54' 19.5" W | 79º 53' 47.16" W | 79º 53' 47.16" W | 79° 57' 56.78" W | 79° 57' 58.63" W | 79° 55' 29.67" W |
| | **Forma** | Rectangular | L | Rectangular con atrio central | U | Rectangular | L |
| | **N° Pisos** | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 |
| | **N° Aulas** | 27 | 24 | 20 | 10 | 21 | 50 |
| | **N° Aulas por piso** | 9 | 12 | 10 | 5 | 8 | 10 |
| | **N° Baños** | 6 | 4 | 4 | 4 | 6 | 8 |
| | **Ancho de pasillos (m)** | 2,54 | 1,75 | 2,21 | 2,39 | 2,39 | 1,78 |
| | **Altura de piso (m)** | 2,62 | 3,51 | 3,18 | 2,87 | 2,87 | 3,12 |
| AULAS | **Ancho [m]** | 8,81 | 6,99 | 6,5 | 9,12 | 6,55 | 6,68 |
| | **Altura [m]** | 2,62 | 3,51 | 3,18 | 2,87 | 2,87 | 2,92 |
| | **Largo [m]** | 8,86 | 17,88 | 7,34 | 11,07 | 10,46 | 6,40 |
| | **Área [m$^2$]** | 78,13 | 124,9 | 47,73 | 100,98 | 68,58 | 42,76 |
| | **Volumen [m$^3$]** | 204,41 | 437,81 | 151,55 | 289,84 | 196,83 | 124,9 |
| | **Espesor de pared [cm]** | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 |
| | **Material de pared** | Bloque de cemento | Bloque de cemento | Bloque de cemento | Bloque de cemento | Bloque de cemento | Bloque de cemento |
| | **N° de ventanas** | 5 | 24 | 4 | 4 | 2 | 3 |
| | **N° de usuarios** | 50 | 30 | 30 | 67 | 42 | 25 |
| | **Material techo** | Hormigón | Cemento | Cemento | Gypsum | Gypsum | Gypsum |
| | **Forma** | Cuadrada | Rectangular | Rectangular | Rectangular | Rectangular | Cuadrada |
| | **N° puertas** | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | **N° Lámparas** | 9 | 7 | 8 | 9 | 9 | 6 |
| | **Electrónica** | Proyector, CPU | No | No | Proyector, CPU | Proyector, CPU | Proyector |
| | **Ventilación** | 4 ventiladores | 4 ventiladores | 4 ventiladores | 6 difusores | 6 difusores | 4 difusores |
| | **HVAC** | Si | No | Si | Si | Si | Si |
| | **Control** | Manual/remoto | Manual | Manual/remoto | Manual/remoto | Manual/remoto | Manual/remoto |

| | | UCSG-FA-A1 | UG-FA-A2 | UG-FCQ-A3 | ESPOL-FIMCP-A4 | ESPOL-FIMCP-A5 | USM-FE-A6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| VENTANAS | **Altura [m]** | 1,73 | 0,97 | 1,83 | 1,82 | 0,61 | 1,07 |
| | **Largo [m]** | 0,58 | 1,04 | 1,09 | 1,22 | 1,07 | 1,93 |
| | **Espesor [mm]** | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| | **Material** | Vidrio opaco | Vidrio simple | Vidrio simple | Vidrio simple | Vidrio simple | Vidrio opaco |
| | **Área de apertura [m$^2$]** | 2,39 | 24,12 | 3,99 | 8,94 | 0,00 | 2,07 |
| | **Forma** | Rectangular | Ventoleras | Rectangular | Rectangular | Rectangular | Rectangular |
| | **% de Acristalamiento** | 78,50 | 31,50 | 30,00 | 55,70 | 16,60 | 28,60 |
| | **Orientación** | S-O | S-N | S-N | S-O | S-O | S-O |
| PUERTAS | **Altura [m]** | 2,06 | 2,26 | 2,26 | 2,21 | 2,21 | 2,11 |
| | **Largo [m]** | 0,97 | 1,98 | 0,97 | 1,02 | 1,02 | 0,94 |
| | **Espesor [cm]** | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 |
| | **Material** | Acero | Acero | Acero | Madera | Acero | Madera |
| | **Área [m$^2$]** | 1,99 | 4,48 | 2,18 | 2,25 | 2,25 | 1,98 |

# ANEXO 2

# ANÁLISIS DE CLIMA

El análisis de clima es una herramienta que permite evaluar estrategias pasivas óptimas según las condiciones meteorológicas del sitio de estudio. Para realizar el análisis de clima se evaluó anualmente a nivel horario los datos de un archivo de clima generado con datos a nivel horario en una estación meteorológica ubicada en la ESPOL de la ciudad de Guayaquil. Para las condiciones meteorológicas de Guayaquil, se evaluaron distintos parámetros, que según Olgyay (1960) son más influyentes en un análisis de clima. Los parámetros evaluados fueron temperatura del aire, niveles de humedad relativa, velocidad y orientación del aire, radiación global, dirección del aire, porcentaje de cielo cubierto y radiación global.

Con respecto a la temperatura del aire y humedad relativa, el Gráfico A2. 1 muestra que la temperatura alcanza de 26 °C a 30 °C, mientras la humedad relativa se mantiene en un rango de 48 a 70 % el 80 % del año a lo largo del día. La alta temperatura a lo largo del día aumenta la temperatura operativa del espacio generando elevadas cargas térmicas. La demanda de refrigeración ocasionada por las elevadas cargas térmicas puede ser disminuida por ventilación natural. Por otro lado durante la noche la humedad relativa alcanza sus niveles máximos de hasta 90 % y la temperatura se mantiene en promedio bajo los 25 °C el 70 % del año. La ventilación natural nocturna puede ser una alternativa para disminuir la temperatura operativa en las primeras horas de la mañana.

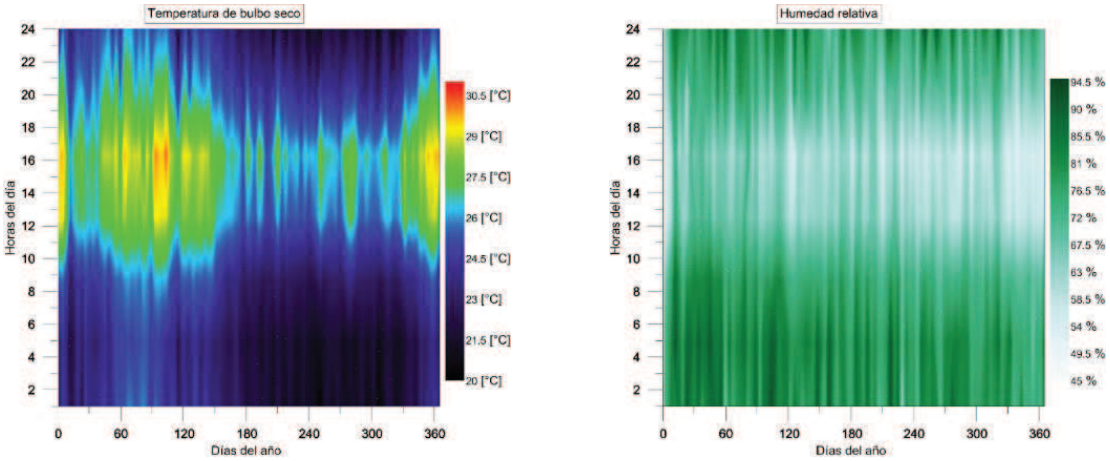



**Gráfico A2. 1 Distribución de la temperatura de bulbo seco (izq.) y humedad relativa (der) en un año típico durante el día**

Para evaluar el efecto de la ventilación natural se analizaron las caracteristicas de dirección y velocidad del viento (Gráfico A2. 2). La dirección del viento está entre los 110° a 200°, siendo 165° (15°NO) la dirección predominante. Las edificaciones al ser orientadas en esta dirección aprovechan mejor las condiciones del aire para

ventilar naturalmente los espacios por el efecto convectivo del aire. No obstante, la velocidad del aire no supera los 2,5 m/s el 70 % del año, por lo cual, se debe analizar mediante una simulación CFD, la velocidad del aire a la que efectivamente entra en el espacio a ventilar.

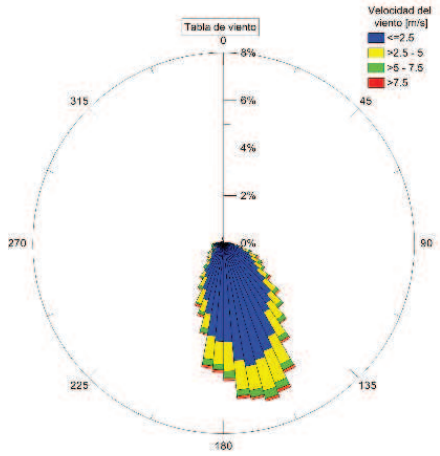



**Gráfico A2. 2 Velocidad y dirección del viento en un año típico**

Por otro lado, es importante análizar la radiación solar, ya que su incidenca en la envolvente aumenta la temperatura radiante y conseceunetemente aumenta la temperatura operativa de la edificación. Como se observa en el Gráfico A2. 3, la radiación globar supera los 300 Wh/m$^2$ a pesar de que el porcentaje de cielo cubieto supera el 80 % el 80 % del año. Por este motivo, implementar protección solar y materiales aislates en la envolvente puede reducir considerablemente las cargas térmicas.

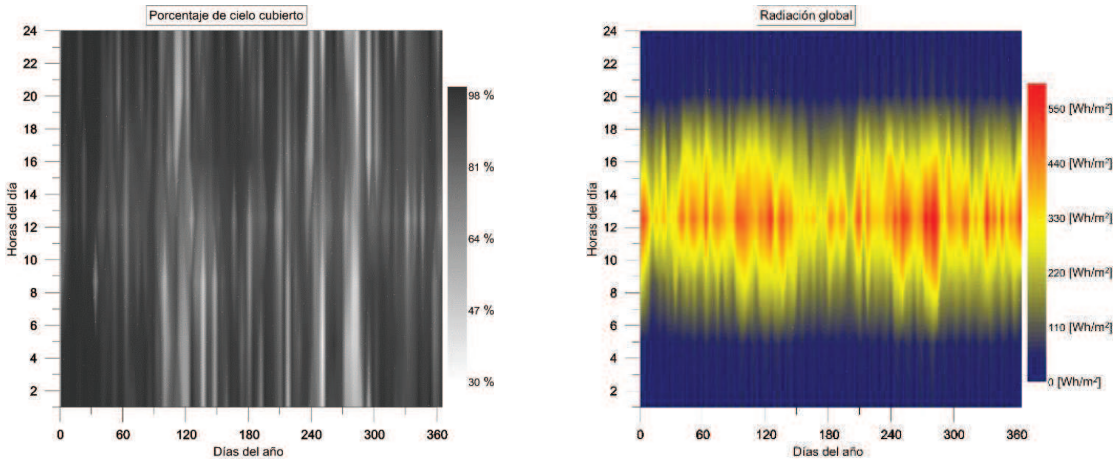



**Gráfico A2. 3 Distribución del porcentaje de cielo cubierto (izq.) e iluminación global (der) en un año típico durante el día**

# ANEXO 3

# RESUMEN DE ENCUESTA DE CONFORT HIGROTÉRMICO

La encuesta de confort higrotérmico se realizó para establecer antecedentes de las condiciones de confort higrotérmico de los usuarios de edificaciones universitarias de la ciudad de Guayaquil y además, para obtener parámetros de ocupación necesarios para las simulaciones energéticas. El presente anexo se enfoca en los resultados de sensación y percepción térmica, así como la percepción de la calidad de aire de los usuarios.

Las preguntas para el desarrollo de la encuesta fueron determinadas en base al estándar ASHRAE-55 (2004). Las encuestas fueron realizadas en las aulas y facultades donde se realizó el levantamiento de datos los días 28 y 29 de Enero del 2014. El número total de encuestados fue de 186, que equivalen al 76 % de la capacidad total de las aulas. De este porcentaje, el 32,26% de los entrevistados pertenecen a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (UCSG-FA-A1) dada su apertura a responder la encuesta. Por otro lado en la Universidad Santa María (USM-FE-A6) se encuentra el menor número de encuestados debido a que no se encontraban en clases regulares al momento de la visita. Del total de entrevistados, el 51,91 % usa las instalaciones entre 10 y 30 horas, el 22 % menos de 10 horas y el otro 22 % más de 30 horas a la semana. Por otro lado, el 40 % de los encuestados son mujeres y el 60 % son hombres.

Cabe destacar que de las seis aulas visitadas, solo el aula UG-FA-A2 funciona con sistemas pasivos como protección solar, bajas cargas térmicas y ventilación cruzada para climatizar. El resto de aulas usan sistemas mecánicos con una temperatura de consigna de 24 °C sin sistema deshumidificador. De las cinco aulas que usan sistemas de climatización mecánicos, se destacaron las aulas de la ESPOL (ESPOL- FIMCP- A4 y ESPOL- FIMCP- A4) debido a que, a parte del sistema mecánico, se han reducido las infiltraciones y usa protección solar y bajo porcentaje de acristalamiento como estrategias pasivas.

Las encuestas evaluaron porcentualmente la sensación y percepción térmica y la calidad del aire según los usuarios de cada aula visitada, ya que cada una tiene distintos sistemas para climatizar los ambientes.

Con respecto a la sensación térmica, en promedio el 57 % de encuestados sienten calor, sin embargo, a pesar de sentir calor, en promedio el 50 % de usuarios encuentran aceptable esta condición. Esto se observa principalmente al comparar el aula UG-FA-A2 en el Gráfico A3. 1 y el Gráfico A3. 2, donde, a

pasear de que cerca del 80 % de usuarios siente calor, apenas el 32 % percibe esta temperatura como inaceptable. Esto se debe a que esta aula funciona exclusivamente con sistemas pasivos para climatizar los espacios. Este comportamiento cambia en cada facultad y se debe al tipo de sistema de climatización usado. En las aulas de la ESPOL donde el sistema de climatización mecánica es optimizado la mayoría de ocupantes sienten frio pero aceptan estas condiciones. No obstante, según el estándar ASHRAE-55 (2004), si menos del 80 % de ocupantes sienten aceptable las condiciones interiores de temperatura, significa que se debe corregir y optimizar los sistemas. Como se ve en el Gráfico A3. 2, esto ocurre en todas las aulas analizadas, incluso en las aulas de la ESPOL donde se ha priorizado el uso de sistemas mecánicos.

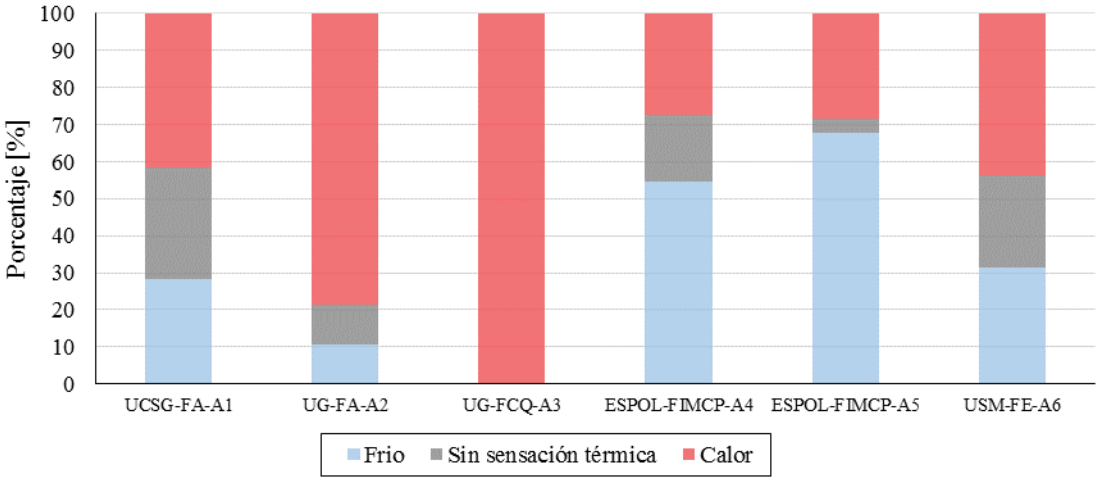



**Gráfico A3. 1 Sensación con respecto a la temperatura por aula**

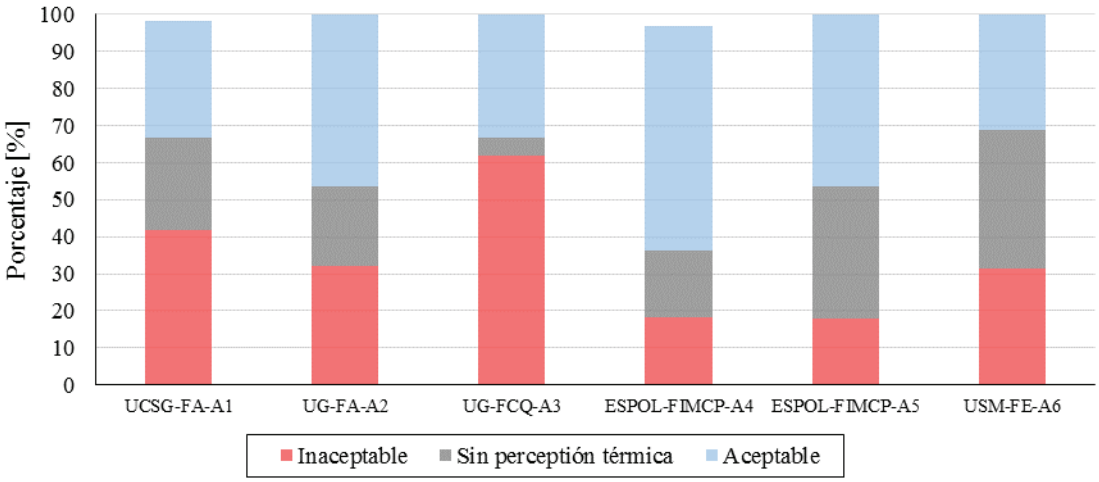



**Gráfico A3. 2 Percepción de la temperatura por aula**

Otro aspecto para evaluar las condiciones interiores dentro del aula, son la calidad del aire y la percepción de olor en la misma. En este sentido, el Gráfico A3. 3 muestra que más del 40 % de entrevistados sienten aceptable las condiciones de calidad de aire. Esto se debe a que en todas las aulas existen sistemas de ventilación, ya sea difusores o ventiladores de techo. Sin embargo, es evidente que estos sistemas necesitan ser optimizados para garantizar que el aire se renueve en un tiempo apropiado para evitar concentración de olores y calor.

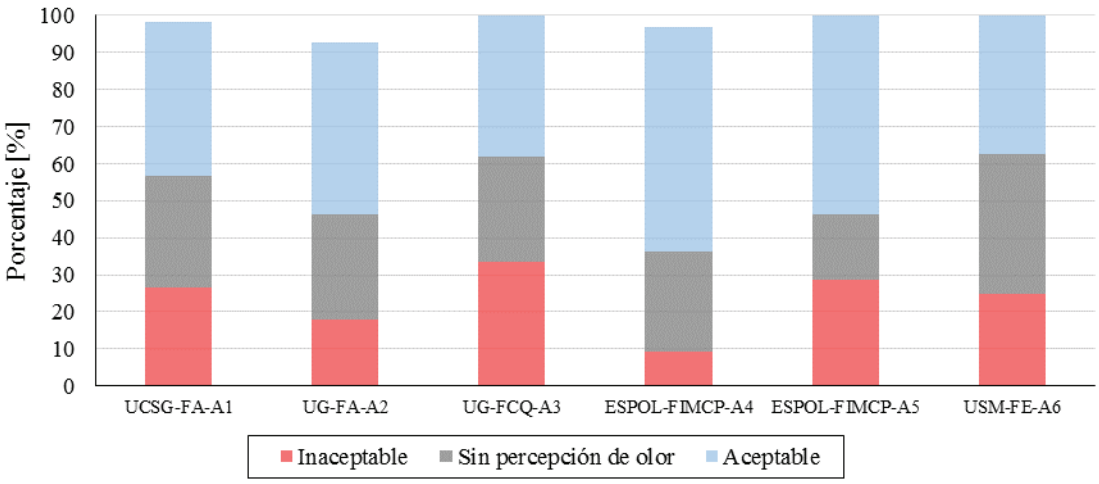
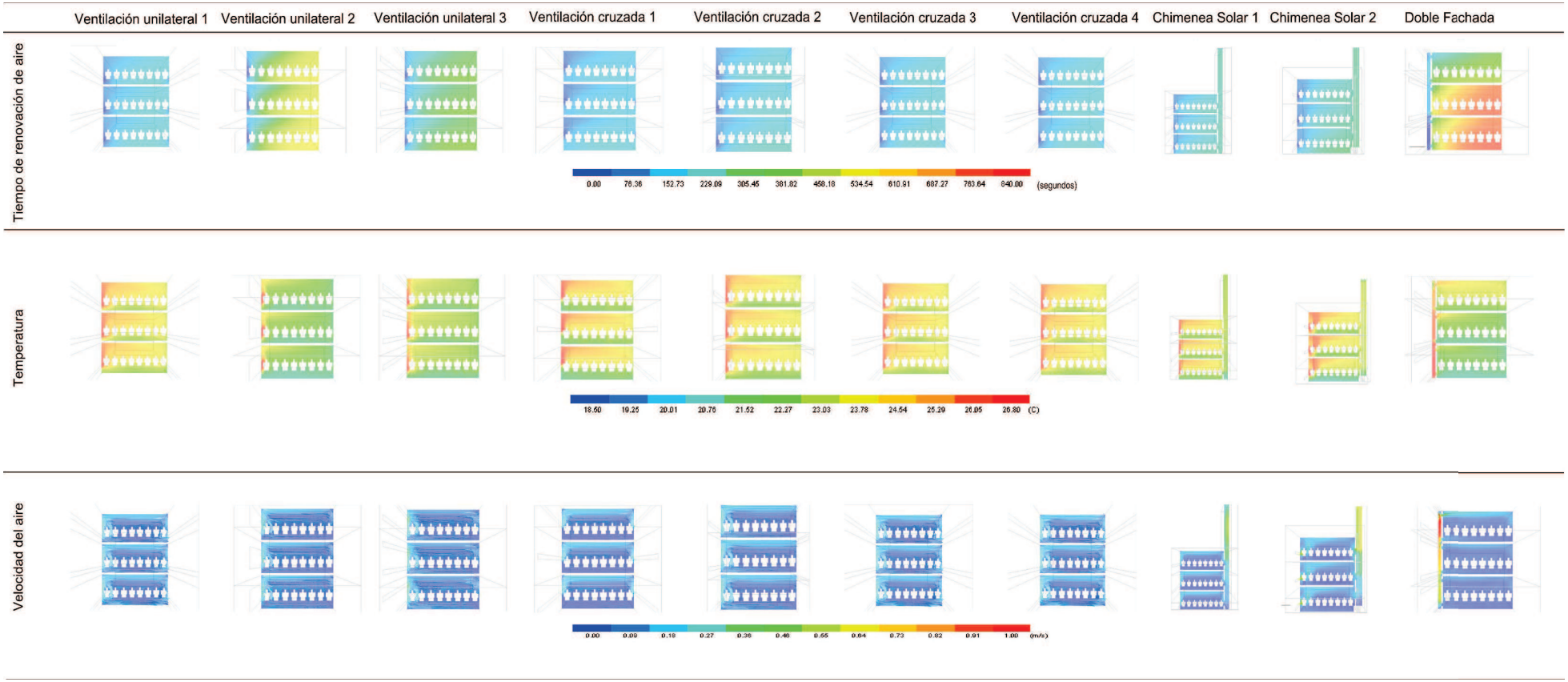



**Gráfico A3. 3 Percepción de la calidad del aire y olor en cada aula**

Por otro lado la opinión de los entrevistados fue evaluada para conocer si las condiciones interiores de clima y calidad de aire actuales dificultan su labor de estudiar. Efectivamente cerca del 40 % de todos los entrevistados encuentra que las condiciones de clima empeoran el rendimiento de estudio. Es por esto que mejorar los sistemas de climatización es importante en climas cálidos-húmedos para evitar que las condiciones del clima interfieran en la productividad de los usuarios.

# ANEXO 4

# RESULTADOS GRÁFICOS DEL ANÁLISIS CFD

# RESULTADOS GRÁFICOS DEL ANÁLISIS CFD