

**ESTRATEGIAS CONSTRUCTIVAS EN EL DISEÑO DE LA ENVOLVENTE DE UN
HOSPITAL EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA PARA EL AHORRO
ENERGÉTICO MEDIANTE ANÁLISIS DETALLADO**

RAÚL ERNESTO PABÓN MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

BARRANQUILLA

2017

**ESTRATEGIAS CONSTRUCTIVAS EN EL DISEÑO DE LA ENVOLVENTE DE
UN HOSPITAL EN LA CIUDAD DE BARRANQUILLA PARA EL AHORRO
ENERGÉTICO MEDIANTE ANÁLISIS DETALLADO**

RAÚL ERNESTO PABÓN MARTÍNEZ

Proyecto para optar el título de Magíster en Ingeniería Mecánica

Asesores

Ing. Iván Tovar Ospino, MSc, PhD

Ing. Diego Mendoza Muñoz, MSc, PhD

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN EN

ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE - GIIMA

ENERGÍAS RENOVABLES Y USO RACIONAL DE LA ENERGÍA

BARRANQUILLA

2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Barranquilla, diciembre 1° de 2017

Dedicado a:

**Mi esposa Marta Isabel por su apoyo y
Por mis hijos Raúl Ernesto y Víctor Daniel**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa agradecimientos a:

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe que participaron en la formación impartida en el programa de maestría en ingeniería mecánica, especialmente a los Doctores Iván Tovar Ospino y Diego Mendoza Muñoz.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	16
RESUMEN.....	21
INTRODUCCIÓN	22
1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
2. JUSTIFICACIÓN.....	25
3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	27
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	27
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
4. MARCO TEÓRICO	28
4.1. ACUERDOS INTERNACIONALES FRENTE AL AHORRO ENERGÉTICO	28
5. MARCO LEGAL.....	30
6. ESTADO DEL ARTE	32
6.1. PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DE LOS MATERIALES	33
6.1.1. <i>Transmitancia térmica U de los materiales.....</i>	33
6.1.2. <i>Transferencia de calor a través de la envolvente del edificio – OTTV </i>	37
6.1.3. <i>Aislamiento de la fachada</i>	39
6.1.4. <i>Vidrio de ventana.....</i>	41
6.1.5. <i>Relación de acristalamiento</i>	42
6.1.6. <i>Coeficiente de sombra.....</i>	43
6.2. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE UN EDIFICIO.....	46

6.2.1.	<i>Simulación energética de edificios</i>	<i>47</i>
6.2.2.	<i>Etapas en la simulación energética de edificios</i>	<i>49</i>
6.2.3.	<i>Componentes: interfaz gráfico y motor de cálculo.....</i>	<i>50</i>
6.2.4.	<i>Suposiciones en la construcción de un modelo.....</i>	<i>53</i>
6.2.5.	<i>Precisión del modelo</i>	<i>53</i>
6.2.6.	<i>EnergyPlus®</i>	<i>54</i>
7.	DISEÑO METODOLÓGICO	56
7.1.	TIPO DE ESTUDIO.....	57
7.2.	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	57
7.3.	ACTIVIDADES.....	57
7.3.1.	<i>Actividades para determinar y seleccionar los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía asociados con la envolvente de edificaciones.....</i>	<i>58</i>
7.3.2.	<i>Actividades para analizar el consumo de energía, transmitancia térmica y OTTV obtenidos por la simulación del comportamiento energético de diferentes modelos de un hospital.</i>	<i>58</i>
7.3.3.	<i>Actividades para establecer medidas de ahorro energético asociadas al diseño constructivo de la envolvente de un hospital.</i>	<i>59</i>
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	60
8.1.	RESULTADOS DE ACTIVIDADES PARA DETERMINAR Y SELECCIONAR LOS PARÁMETROS DE MAYOR IMPACTO EN EL CONSUMO DE ENERGÍA ASOCIADOS CON LA ENVOLVENTE DE EDIFICACIONES.	60
8.1.1.	<i>Localización del edificio de hospital.....</i>	<i>60</i>
8.1.2.	<i>Datos climáticos de la ciudad de Barranquilla</i>	<i>61</i>
8.1.3.	<i>Modelos seleccionados para simulación</i>	<i>63</i>
8.2.	RESULTADOS DE ACTIVIDADES DEL ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA, TRANSMITANCIA TÉRMICA Y OTTV OBTENIDOS POR LA	

SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE DIFERENTES	
MODELOS DE UN HOSPITAL	69
8.2.1. <i>Caso de estudio en Google Sketchup 8</i>	69
8.2.2. GEOMETRÍA Y UBICACIÓN TÉRMICA DE LAS ZONAS DEL HOSPITAL	72
8.2.3. <i>Introducción de datos para la simulación con EnergyPlus®</i>	76
8.2.3.1. Editor idf	76
8.2.3.2. Parámetros de simulación	77
8.2.3.3. Localización y clima	79
8.2.3.4. Elementos de construcción	81
8.2.3.5. Zonas térmicas y superficies	82
8.2.3.6. Ganancias internas	84
8.2.4. <i>Resultados de la simulación</i>	85
8.2.4.1. Reporte de salidas	85
8.2.4.2. Resultados de energía primaria y energía final	86
8.2.4.3. Resultados de transmitancia térmica en fachada, cubierta y ventanas	91
8.2.4.4. Resultados de calor superficial almacenado por unidad de área (OTTV)	92
8.2.5. <i>Análisis de resultados</i>	94
8.2.5.1. Análisis de resultados de energía final	94
8.2.5.1. Análisis de resultados de transmitancia térmica en la envolvente	96
<i>Análisis de resultados de OTTV en la envolvente</i>	97
8.3. RESULTADOS DE ACTIVIDADES PARA ESTABLECER MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO ASOCIADAS AL DISEÑO CONSTRUCTIVO DE LA ENVOLVENTE DE UN HOSPITAL	101
8.3.5. <i>Estrategias en las propiedades termo físicas de los materiales de la envolvente</i>	101

8.3.6.	<i>Estrategias de acristalamiento en la envolvente</i>	102
8.3.7.	<i>Estrategias de orientación del edificio</i>	103
8.3.8.	<i>Estrategias de sombreado en la envolvente</i>	104
9.	CONCLUSIONES	105
10.	RECOMENDACIONES	109
11.	BIBLIOGRAFÍA	110
	ANEXOS	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Consumo promedio de energía en edificaciones en Colombia.....</i>	23
Tabla 2 <i>Parámetros que determinan las necesidades energéticas del edificio.....</i>	33
Tabla 3. <i>Datos climáticos utilizados en los modelos de hospital.....</i>	63
Tabla 4. <i>Propiedades de los materiales utilizados en los modelos de hospital.....</i>	66
Tabla 5 <i>Materiales y espesores de material en la envolvente del edificio de hospital.</i>	67
Tabla 6 <i>Zonas y áreas del edificio de hospital representativo.</i>	72
Tabla 7. <i>Comparación de resultados con investigaciones anteriores..</i>	100
Tabla 8. <i>Parámetros de mayor impacto en el consumo de energía.....</i>	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Transmitancia térmica de acuerdo al aislamiento térmico.</i>	34
Figura 2. <i>Pérdida de calor a través de la envolvente.</i>	36
Figura 3. <i>Transferencia de calor a través de la envolvente de un edificio.</i>	37
Figura 4. <i>Efecto del alero sobre la radiación incidente en una ventana.</i>	44
Figura 5. <i>Ejemplos de edificios “auto-sombreados”.</i>	45
Figura 6. <i>Procesos de transferencia de calor implicados en la simulación energética de edificios.</i>	47
Figura 7. <i>Flujo de datos de un motor de simulación.</i>	51
Figura 8. <i>Flujo de datos en EnergyPlus®.</i>	55
Figura 9. <i>Archivo meteorológico de la ciudad de Barranquilla EPW.</i>	62
Figura 10. <i>Velocidad y dirección del viento en Barranquilla, mayo 2017.</i>	62
Figura 11. <i>Distribución de materiales en la envolvente de los modelos de hospital.</i>	65
Figura 12. <i>Fachada norte del hospital.</i>	69
Figura 13. <i>Fachada sur del hospital.</i>	70
Figura 14. <i>Fachada este del hospital.</i>	70
Figura 15. <i>Fachada oeste del hospital.</i>	71

Figura 16. Fachada isométrica del hospital.	71
Figura 17. Zonas en la primera planta del edificio hospital.	73
Figura 18. Zonas en la segunda planta del edificio hospital.	74
Figura 19. Zonas en la tercera planta del edificio hospital.	74
Figura 20. Zonas en la cuarta planta del edificio hospital.	75
Figura 21. Zonas en la quinta planta del edificio hospital.	75
Figura 22. Editor IDF de EnergyPlus® V7-2.	77
Figura 23. Simulación de control.	78
Figura 24. Datos de orientación de la edificación.	79
Figura 25. Localización.	79
Figura 26. Periodo de simulación.	80
Figura 27. Temperatura terrestre mensual.	80
Figura 28. Propiedades de los materiales.	81
Figura 29. Capas de materiales en la envolvente del edificio.	82
Figura 30. Zonas térmicas del edificio.	82
Figura 31. Dimensionamiento de las superficies del edificio.	83
Figura 32. Dimensionamiento de las ventanas del edificio.	83
Figura 33. Ganancias internas de personas por zona térmica.	85

Figura 34. <i>Tipo de información en el reporte de salidas.</i>	85
Figura 35. <i>Estilo y unidades en el reporte de salidas.</i>	86
Figura 36. <i>Resultados de energía primaria y energía final en el modelo 1.</i>	86
Figura 37. <i>Resultados de energía primaria y energía final anual para 12 modelos de hospital.</i>	87
Figura 38. <i>Resultados de energía final anual por unidad de área.</i>	88
Figura 39. <i>Resultados de energía final anual de climatización, iluminación y calefacción en los 12 modelos de hospital.</i>	88
Figura 40. <i>Resultados de energía final anual por climatización contra porcentaje de acristalamiento del edificio.</i>	89
Figura 41. <i>Resultados de energía final anual por climatización contra absorción solar de la capa externa de la envolvente del edificio.</i>	90
Figura 42. <i>Resultados de energía final anual por climatización para el edificio sin sombreado y con sombreado general.</i>	90
Figura 43. <i>Resultados de transmitancia térmica en fachada, cubierta y ventanas.</i>	91
Figura 44. <i>Resultados de transmitancia térmica para fachada, cubierta y ventanas en los 12 modelos de hospital.</i>	92
Figura 45. <i>Resultados de calor superficial almacenado por unidad de área.</i>	93
Figura 46. <i>Resultados de calor almacenado por unidad de área en W/m^2 en la cubierta plana, cubierta inclinada, pared sur, pared este, pared norte y pared oeste para los 12 modelos de hospital.</i>	94

Figura 47. <i>Porcentaje de consumo energético final en el edificio de hospital sin aislamiento térmico en su envolvente.</i>	95
Figura 48. <i>Consumo anual y porcentaje de ahorro de energía eléctrica por sistema de climatización de acuerdo al espesor del aislamiento térmico interno y externo.</i>	96
Figura 49. <i>OTTV y transmitancia térmica para cubierta, paredes y ventana del edificio de hospital de acuerdo al espesor del aislamiento térmico externo.</i>	97
Figura 50. <i>Ganancias de calor interna y externa anual en 9 modelos de hospital.</i>	98
Figura 51. <i>Configuración de envolvente recomendada para edificios de hospital en ciudad de Barranquilla.</i>	106

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo A. Valores de energía final, energía primaria, transmitancia térmica y energía final anual por iluminación, climatización y calefacción para los 12 modelos de hospital.</i>	116
<i>Anexo B. Valores de calor almacenado por unidad de área en W/m² en la cubierta plana, cubierta inclinada, pared sur, pared este, pared norte y pared oeste para los 12 modelos de hospital.</i>	117
<i>Anexo C. Valores de energía final de acuerdo al porcentaje de acristalamiento del hospital.</i>	118
<i>Anexo D. Valores de energía final de climatización anual de acuerdo a la absorción solar de la capa externa de la envolvente del hospital.</i>	118
<i>Anexo E. Valores de Energía final de climatización para edificio sin sombreado y con sombreado general.</i>	119
<i>Anexo F. Valores de ganancia interna y externa en KWh para 9 modelos de hospital.</i>	119

GLOSARIO

ABSORTANCIA SOLAR: Fracción de radiación solar incidente absorbida por el material.

ABSORTANCIA TÉRMICA: Fracción de radiación incidente de longitud de onda larga absorbida por el material.

ABSORTANCIA VISIBLE: Fracción de radiación incidente de longitud de onda visible absorbida por el material.

AHORRO ENERGÉTICO: Disminución de la intensidad energética mediante un cambio de las actividades que requieren insumos de energía. Pueden realizarse ahorros de energía adoptando medidas técnicas, organizativas, institucionales y estructurales, o modificando el comportamiento.

CARGA TÉRMICA: Cantidad de energía, en KWh, que se necesita en un área para conservar determinadas condiciones de temperatura y humedad para una aplicación específica (p. ej. en un sector de internación de un hospital).

COEFICIENTE DE SOMBRA: Relación entre el calor solar ganado a través del sistema de ventanas con respecto al calor solar ganado bajo un cristal estándar de 3 mm de espesor.

COMPACIDAD: Relación entre el volumen interior del edificio y la superficie de la envolvente.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA: Es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor en $W / (K \cdot m)$.

DENSIDAD: Es una propiedad física que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo en Kg/m^3 .

DOE-2: Es un programa informático para el diseño de edificios con eficiencia energética, desarrollado para el Departamento de Energía de Estados Unidos por el Grupo de Investigación de Simulación del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. El DOE-2 calcula el consumo de energía por hora y el costo de energía de un edificio comercial o residencial dada información sobre el clima, construcción, y equipos.

EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HOSPITAL: La eficiencia energética es la relación entre la producción de energía útil y la cantidad de energía consumida. En el caso de un hospital, por ser un centro de ocupación continuada (24 horas al día, los 365 días del año) que obliga a tener climatizado el edificio de forma continua, tiene un alto grado de demanda energética que puede reducirse mediante un aislamiento térmico adecuado en su envolvente y mediante control de las fugas de aire (estanqueidad).

ENERGÍA FINAL: Representa la cantidad de calor y electricidad consumida por un edificio como se refleja en sus facturas de servicios públicos.

ENERGÍA PRIMARIA: Representa la cantidad total de Energía que se requiere para operar el edificio. Incorpora todas las pérdidas de transmisión, entrega y producción.

ENVOLVENTE DE UN EDIFICIO DE HOSPITAL: Compuesta por el cerramiento que limita espacios habitables con el ambiente exterior (aire, terreno u otro edificio) y por todas las particiones interiores que limitan los espacios habitables con los espacios no habitables que a su vez estén en contacto con el ambiente exterior. Estos se clasifican en las siguientes categorías:

- Cubiertas: cerramientos superiores en contacto con el aire cuya inclinación sea inferior a 60° respecto a la horizontal.
- Suelos: cerramientos inferiores horizontales o ligeramente inclinados que estén en contacto con el aire, con el terreno, o con un espacio no habitable.
- Fachadas: cerramientos exteriores en contacto con el aire cuya inclinación sea superior a 60° respecto a la horizontal. La orientación de una fachada se caracteriza mediante el ángulo que es el formado por el norte geográfico y la normal exterior de la fachada, medido en sentido horario.
- Medianeras: cerramientos que lindan con otros edificios ya construidos o que se construyan a la vez y que conformen una división común. Si el edificio se construye con posterioridad el cerramiento se considerará, a efectos térmicos, una fachada.
- Cerramientos en contacto con el terreno: cerramientos distintos a los anteriores que están en contacto con el terreno.
- Particiones interiores: elementos constructivos horizontales o verticales que separan el interior del edificio en diferentes recintos.

FACTOR DE GANANCIA SOLAR FGS: Cantidad de radiación solar transmitida a través de la envolvente de la edificación.

INTENSIDAD ENERGÉTICA: cantidad de energía consumida por actividad o producción entregada por sub-sector y uso final. Generalmente la intensidad energética es calculada como la energía consumida dividida por un indicador económico (p.ej.: producto interior bruto [PIB]). Alta Intensidad energética indica un costo alto en la "conversión" de energía en riqueza. Se consume mucha energía obteniendo un PIB bajo.

OTTV: "Valor total de transferencia térmica". Es un valor en W/m^2 que indica la tasa media de transferencia de calor en a través de la envolvente del edificio. Para el caso de fachada de edificios la OTTV no debe exceder de $35 W/m^2$ [22].

RELACIÓN DE ACRISTALAMIENTO: Relación entre el área de ventanas y el área de pared.

RESISTENCIA TÉRMICA: Representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor en $(m^2 \cdot K)/W$.

RUGOSIDAD: Es la medida de las variaciones micrométricas en la superficie de los artículos manufacturados, las cuales le confieren aspereza.

SITE ENERGY: Representa la cantidad de calor y electricidad consumida por un edificio como se refleja en sus facturas de servicios públicos.

SOURCE ENERGY: Representa la cantidad total de Energía que se requiere para operar el edificio. Incorpora todas las pérdidas de transmisión, entrega y producción.

TEMPERATURA DE BULBO SECO: Es la medida en $^{\circ}C$ con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco.

TEMPERATURA DE CONFORT: Es un índice que se ha elaborado con el propósito de establecer las condiciones ambientales interiores o exteriores bajo las cuales se presenta el equilibrio adecuado entre el metabolismo del cuerpo y la actividad desarrollada por las personas, de manera, que éstas sienten bienestar.

TEMPERATURA SOL-AIRE: es una variable que se utiliza para calcular la carga de refrigeración de un edificio y determinar la ganancia total de calor a través de las superficies exteriores.

TRANSMITANCIA TÉRMICA: (U , pero denominada también como Valor- U en algunos lugares) es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un sistema constructivo, formado por una o más capas de material, de caras plano paralelas, cuando hay un gradiente térmico de 1°C (1K) de temperatura entre los dos ambientes que éste separa. En el Sistema Internacional se mide en $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. A fin de que una fachada sea adecuada para un clima cálido el valor de U máximo no debe sobrepasar de $1 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$ [41].

TRANSMITANCIA TÉRMICA GLOBAL U : Se calcula por medio de la ecuación 1, donde:

X_1 y X_2 son los espesores de dos capas de materiales en m ,

K_1 y K_2 son las conductividades térmicas de dos materiales en $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$

h_e y h_i son los coeficientes convectivos de transferencia de calor exterior e interior de la pared estudiada en $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$:

Ecuación 1

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}}$$

ZONA TÉRMICA: Es un espacio o volumen de control climatizado cuya carga térmica varía uniformemente en el tiempo.

RESUMEN

El objetivo general de esta investigación es proponer estrategias constructivas en el diseño de la envolvente de un hospital en la ciudad de Barranquilla para el ahorro energético, mediante la selección de parámetros de mayor impacto en el consumo de energía, la simulación del comportamiento energético de un hospital y el análisis detallado de los resultados de energía consumida, transmitancia térmica y OTTV.

Después de la revisión de varias normas de eficiencia energética e investigaciones realizadas en otros países se identificaron los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía asociados con la envolvente de edificaciones, se recolectaron datos de estos parámetros y se definieron 12 modelos de hospital; en el programa de simulación de comportamiento energético EnergyPlus®, y utilizando como interfaz gráfica Google SketchUp 8, se introdujeron los datos recolectados para cada uno de los modelos y se realizó la simulación, obteniendo resultados de consumo energético, transmitancia térmica y OTTV en la envolvente.

El análisis de estos resultados permitió identificar que, el uso de materiales aislantes en la envolvente, preferiblemente por el exterior generan un ahorro hasta de un 18% de la energía eléctrica consumida por climatización y que la fachada norte presenta menor tasa de transferencia de calor anual, por lo que se proponen varias estrategias que le permitan a los proyectistas obtener medidas de ahorro energético en sus diseños.

Palabras Claves: *Eficiencia energética, envolvente,, Transmitancia Térmica, medidas pasivas de ahorro.*

INTRODUCCIÓN

El uso indiscriminado de combustible, para satisfacer la demanda energética mundial, ha provocado un aumento en la temperatura del planeta, situación que, en el sector residencial, han sufrido las edificaciones con el aumento de sus costos operacionales y que puede tornarse insostenible, si los proyectistas no consideran medidas de ahorro energético en sus diseños y una adecuada selección en equipos de uso final de la energía.

Esta problemática ha impulsado la apertura de investigaciones en la búsqueda de la reducción de la demanda energética en edificaciones relacionadas con la arquitectura bioclimática, con la envolvente, con el sistema de calefacción o aire acondicionado y con la iluminación del edificio. Con respecto a la envolvente se busca mejorar su calidad a través del empleo de materiales aislantes que disminuyan la transmitancia térmica, controlando así la ganancia de calor en la edificación.

Esta investigación busca proponer estrategias constructivas en el diseño de la envolvente de un hospital en clima cálido (*Tabla 1*), las cuales les permitirían a los proyectistas obtener medidas de ahorro energético en sus diseños derivado de la reducción de la demanda térmica en la edificación objeto de estudio como producto de la mitigación de la ganancia externa debido al clima severo de Barranquilla.

Tabla 1. Consumo promedio de energía en edificaciones en Colombia. Fuente: Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones en Colombia, Ministerio de Vivienda, julio 2015 [1].

kWh/m ² -año	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	96,1	151,3	132,5	217,8
Hospitales	249,6	108,3	344,1	344,1
Oficinas	81,2	132,3	318,2	221,3
Centros comerciales	403,8	187,8	187,8	231,5
Educativos	40,0	44,0	72,0	29,8
Vivienda no VIS	46,5	48,3	36,9	50,2
Vivienda VIS	44,6	44,0	34,6	49,3
Vivienda VIP	48,1	53,3	44,9	50,6

1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La importancia de las medidas de ahorro y eficiencia energética se manifiesta en la necesidad de reducir los costos en la factura energética, restringir la dependencia energética del exterior, y reducir la emisión de Gases de Efecto Invernadero con el objeto de cumplir los compromisos adquiridos con la ratificación del Protocolo de Kioto en 1997 y el Acuerdo de París en el año 2014.

Los edificios consumen gran cantidad de energía para climatizar, iluminar, ventilar, etc., buscando satisfacer las necesidades de confort de los usuarios y, reducir este consumo, requiere el análisis detallado del comportamiento energético en materiales, estructura, equipos y su relación con el medio ambiente, que permita definir un código técnico que especifique los valores mínimos de calidad, en cuanto a transmitancia térmica y ganancia de calor externa, que aseguren el cumplimiento de los requisitos básicos en el uso racional de la energía en edificaciones [45].

En Colombia, aunque desde julio del 2015 existe una guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones [1] que expresa algunas medidas de ahorro, no especifica espesores de aislamiento o valores límite de transmitancia, que debe tener la envolvente por tipología de edificios para el clima severo de la ciudad de Barranquilla y que garantice el uso racional de la energía.

Es así como, existen países como Chile, que poseen un Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos [7], donde recomiendan valores de transmitancia térmica para envolventes de edificaciones según la zona climática, garantizando el uso racional de la energía.

2. JUSTIFICACIÓN

Con el acuerdo de París, el gobierno colombiano busca impulsar una política nacional de cambio climático para continuar con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero; es por esto que recientemente se han firmado algunas leyes que estimulan este propósito.

La Ley 1715 del 13 de mayo del 2014 [2] en el artículo 30 establece que las administraciones de edificios públicos en Colombia tienen un periodo de 10 años para establecer medidas de gestión eficiente de la energía en sus edificios.

El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio firma el 10 de julio de 2015 la resolución 0549 [3] donde expresa que el gobierno nacional adopta parámetros y lineamientos para la construcción sostenible y adopta la Guía para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones, lo cual obliga a los constructores a establecer, a partir del año 2016, medidas de uso racional y eficiente de la energía en los diseños de edificaciones en municipios y distritos de más de 1.200.000 habitantes en Colombia, teniendo en cuenta que aún no existe un código técnico con medidas que regulen la construcción de edificios con uso racional de la energía, especialmente en los hospitales de clima cálido húmedo que, por ser edificaciones que deben presentar condiciones que preserven la salud pública las 24 horas del día y 365 días al año, demandan alto consumo de energía [1].

Definir los valores límites de transmitancia térmica y transferencia de calor a través de la envolvente de la edificación permitirá establecer medidas que reduzcan la demanda energética de los sistemas de climatización. Estas medidas permitirían diseñar edificaciones racionales con el consumo de energía, reduciendo

considerablemente las emisiones contaminantes y aportando a los constructores en el cumplimiento de los requerimientos ambientales.

Para los constructores, las estrategias en el diseño de la envolvente de un hospital, propuestas en esta investigación, contribuirán al establecimiento de dichas medidas en el momento de definir sus diseños.

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer estrategias constructivas en el diseño de la envolvente de un hospital en la ciudad de Barranquilla para el ahorro energético, mediante análisis detallado.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y seleccionar los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía asociados con la envolvente de edificaciones, a través de consulta y revisión de normas e investigaciones especializadas.
- Analizar el consumo de energía, transmitancia térmica y OTTV obtenidos por la simulación del comportamiento energético de diferentes modelos de un hospital, utilizando los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía.
- Establecer medidas de ahorro energético asociadas al diseño constructivo de la envolvente de un hospital, para racionalizar los consumos de energía.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. ACUERDOS INTERNACIONALES FRENTE AL AHORRO ENERGÉTICO

Como acuerdo internacional, firmado por las principales economías mundiales, con el ánimo de promover el desarrollo sostenible y combatir el cambio climático, el Protocolo de Kioto, fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto - Japón, pero no entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005 [4]. Este protocolo mostró un claro compromiso mundial hacia el cuidado del medio ambiente y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, obligando a los gobiernos a establecer leyes y políticas que cumplan sus compromisos adquiridos haciendo más rigurosas las leyes y normas en los aspectos ambientales.

Hasta la fecha de hoy, 192 países han firmado y ratificado este protocolo. Si bien el protocolo de Kioto ha marcado un paso importante hacia el pensamiento sostenible, no fue el inicio; desde hace varias décadas y principalmente desde los años setenta se ha cuestionado el modelo energético, el cual está basado, preferentemente, en la explotación de los combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) para la generación de energía, en la entrega inconsciente de energía al consumidor y en grandes puntos de generación distantes de la fuentes de consumo.

En el año 2015, durante la COP21 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se adoptó el Acuerdo de París con el objetivo de reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza [42]. Las emisiones de gases efecto invernadero acumuladas entre 1990 y 2012 en Colombia la sitúan entre los 40 países con mayor responsabilidad histórica en la generación de

emisiones. Como respuesta a esto el gobierno colombiano presentó un proyecto piloto que presente reducir las emisiones provenientes de los hidrofluorocarbonos.

Globalmente las edificaciones usan una gran cantidad de recursos y emiten diferentes tipos de material contaminante. Más de la mitad de los recursos consumidos globalmente son usados en construcción y para reducir las emisiones de carbono es crucial ocuparse de la sostenibilidad ambiental a largo plazo, de la industria de la construcción y de la subsecuente ocupación de las edificaciones.

La edificación sostenible, comienza a hacerse visible en los años setenta, con el movimiento hacia la edificación verde y el desarrollo sostenible, haciendo especial énfasis en la conservación de la energía y la eficiencia energética [5]. En los años ochenta se pone en evidencia el impacto ambiental producido por la construcción y operación de edificios, además en esta misma década se diagnostican enfermedades a los residentes de edificios provocadas por la mala calidad del aire interior y la inadecuada ventilación en edificios herméticos, surgiendo el síndrome del edificio enfermo.

Es así como, desde la década de los ochenta, se ha venido construyendo gradualmente un modelo de edificación verde que incluya impactos asociados a la construcción y operación de edificios más eficientes y amigables con el ambiente [5]. A su vez, ha existido una progresiva conciencia y exigencia por parte de las administraciones y agentes del sector de la construcción en diseñar, construir y rehabilitar edificaciones que sean cada vez más sostenibles, eficientes y disminuyan el impacto negativo hacia el ambiente.

5. MARCO LEGAL

En Colombia existen leyes y normas sobre eficiencia energética que han generado interés nacional desde hace una década.

La Ley 697 de 2001 [12] declara que el Uso Racional y Eficiente de la Energía es un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, con el fin de garantizar un suministro energético pleno y oportuno, competitividad en la economía nacional y protección al consumidor.

Mediante la resolución 180919 de 2010 se establecen lineamientos, políticas, estrategias y herramientas, mediante la creación del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no convencional – PROURE, que busca fomentar la promoción y divulgación del Uso Racional y Eficiente de la Energía y es así como el Plan de Acción Indicativo PAI 2017-2022 [13] designa el desarrollo de un programa de eficiencia energética para edificios, donde se busca aprovechar el nivel energético de los edificios sin desmejorar la calidad de vida de sus habitantes, mediante el uso de materiales térmicamente adecuados en su envolvente.

La Ley 1715 del 13 de mayo del 2014 [2], en el artículo 30, establece que las administraciones de *Edificios públicos* en Colombia tienen un periodo de 10 años para establecer medidas de gestión eficiente de la energía en sus edificios.

El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio firma el 10 de julio de 2015 la resolución 0549 [3] donde expresa que el gobierno nacional adopta parámetros y lineamientos técnicos para la construcción sostenible y adopta la Guía para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones, lo cual obliga a los constructores a

establecer, a partir del año 2016, medidas de uso racional y eficiente de la energía en los diseños de edificaciones en municipios y distritos de más de 1.200.000 habitantes en Colombia.

Es así como en Colombia se han desarrollado proyectos donde tienen en cuenta estas medidas, como por ejemplo: El proyecto GEF-PNUD-UPME COL 59829, sobre mejoramiento de la eficiencia energética en edificaciones colombianas a través de sinergias entre convenciones ambientales, ha incentivado la construcción de edificios donde se hace uso eficiente de la energía como son: [14], El edificio Ruta N y el Hospital Universitario San Vicente De Paul, ubicados en la ciudad de Medellín; el Hotel Aloft Bogotá Airport y La Torre Panoramic Ecobusines Club, ubicados en la ciudad de Bogotá, quienes cuentan con el grado de certificación LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design del Green Building Council*) otorgado por la máxima autoridad en construcciones verdes en Estados Unidos por presentar un diseño arquitectónico y constructivo en el cual se le da relevancia a la conservación y sostenibilidad del medio ambiente, factores que favorecen el manejo de eficiencia energética.

6. ESTADO DEL ARTE

Actualmente ya existen normas internacionales e investigaciones relacionadas con el uso racional y eficiente de la energía en edificaciones como son la Norma Americana ASHRAE 90.1 del 2010 [6], norma de energía para edificios no residenciales que regulan los sistemas de la edificación relacionados con el consumo de energía, como iluminación, distribución y potencia eléctrica, sistemas de ventilación y aire acondicionado, sistemas y equipamientos auxiliares, equipos de calentamiento, equipos y sistemas de servicio de agua caliente.

En países asiáticos se han encontrado investigaciones orientadas al diseño eficiente de la envolvente que permiten reducir el consumo de energía de un edificio. Describiremos algunas de estas investigaciones y sus resultados.

El diseño de la envolvente de un edificio (fachada, cubierta y suelos) es uno de los factores que afectan en mayor medida al consumo energético total del edificio, debido a que la envolvente determina las condiciones de clima interior y, por lo tanto, la demanda o no de energía adicional para la climatización [18].

Según B. Ekici *et al*, 2011 [19] existen muchos parámetros que afectan los requerimientos energéticos del edificio y básicamente se dividen en dos grupos como se ve en la *Tabla 2*. La eficiencia energética puede lograrse considerando los valores óptimos de estos parámetros en el diseño previo del edificio.

Tabla 2 *Parámetros que determinan las necesidades energéticas del edificio. Fuente: B. Ekici & Aksoy, 2011 [19].*

Parámetros Físico - Ambientales	Parámetros de Diseño
Temperatura exterior diaria (°C)	Propiedades termo-físicas de los materiales
Radiación solar (W/m ²)	Relación de Acristalamiento
Dirección y velocidad del viento (m/s)	Orientación
	Factor de Forma
	Distancia entre edificios

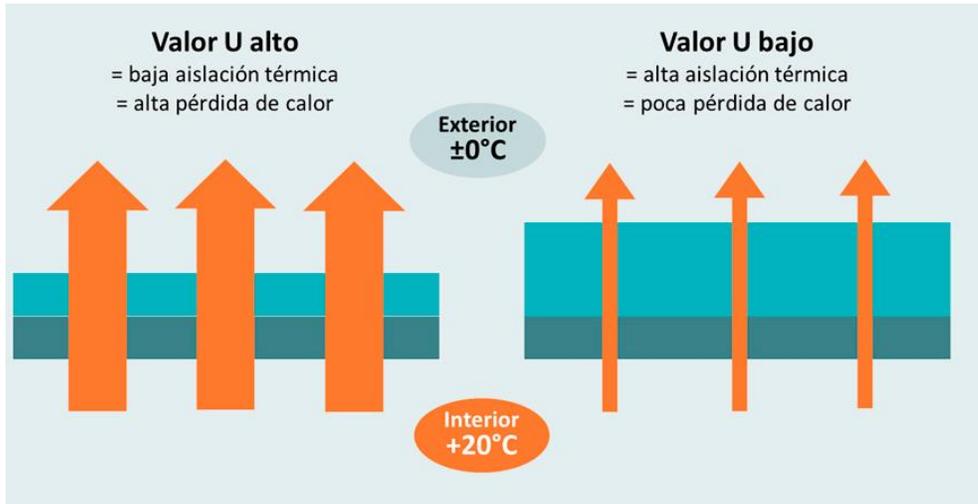
6.1. PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Las propiedades termo-físicas de los materiales involucran la transmitancia térmica U de los materiales, la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio OTTV y el espesor del aislamiento.

6.1.1. Transmitancia térmica U de los materiales

La transmitancia térmica (U_0) determina la transferencia de calor a través de la unidad de área de los componentes de la envolvente como se observa en la *Figura 1*.

Figura 1. Transmitancia térmica de acuerdo al aislamiento térmico. Fuente: Arquitectura y energía [43]



G. Oral *et al*, 2002 [18] proponen una metodología para la determinación de la transmitancia térmica de los componentes opacos de la fachada. Con la ecuación 2 se calcula este parámetro:

Ecuación 2
$$U_o = \frac{h_i (t_i - t_{io})}{(t_i - t_{eo})}$$

Dónde:

h_i Es el coeficiente de transferencia de calor superficial interno en W/ (m²·K);

t_i es la temperatura de confort interior en K;

t_{io} es el valor límite de las temperaturas superficiales interiores de los componentes opacos en K;

t_{eo} es la temperatura sol-aire de los componentes opacos en K y se define como:

$$t_e = t_o + \frac{\alpha * I - \Delta Q_{ir}}{h_o}$$

Dónde:

t_o = Temperatura ambiente en °C;

α = Absortancia solar de la superficie;

I = Irradiancia solar global en W/m²;

ΔQ_{ir} = Radiación infrarroja adicional debido a la diferencia entre la temperatura del aire exterior y la temperatura del cielo aparente en W/m²;

h_o = Coeficiente de transferencia de calor por convección en W/m².K.

Es así como la cantidad de pérdida de calor diaria promedio por unidad de área de la envolvente del edificio se puede calcular sobre la base de la temperatura del sol-aire. Con la ecuación 3 se calcula este parámetro [18]:

Ecuación 3
$$q = U_o (t_i - t_{eo})(1 - X) + U_g (t_i - t_{eg})X$$

Dónde:

q es la pérdida de calor diaria en W / m²;

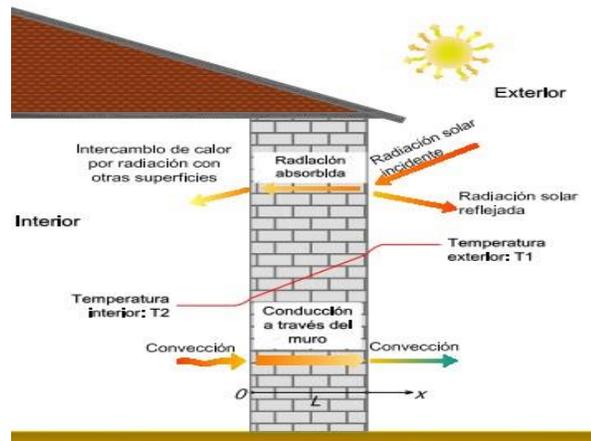
U_o y U_g son los valores de transmitancia térmica de los componentes opacos y transparentes, respectivamente en W / (m².K);

t_i es la temperatura interior en K;

X es el índice de transparencia;

t_{eo} y t_{eg} son las temperaturas sol-aire de los componentes opacos y transparentes en K.

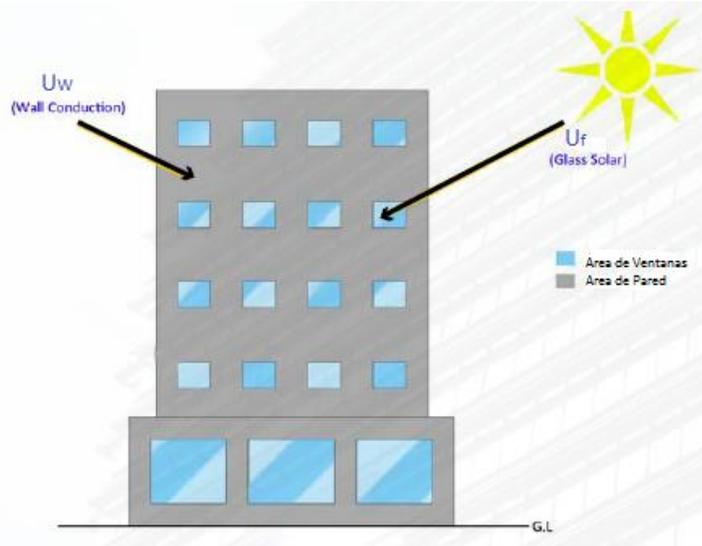
Figura 2. Pérdida de calor a través de la envolvente. Fuente: Arquitectura y energía [43]



El método desarrollado por G. Manioğlu *et al*, 2006 [20] obtiene la combinación de la envolvente y el régimen de funcionamiento del sistema de calefacción que proporciona las condiciones de confort térmico, con el mínimo costo, durante el ciclo de vida del edificio. Este procedimiento permite obtener las características de los materiales que componen la envolvente y que en su conjunto satisfacen el valor de transmitancia térmica máxima del edificio. Para ello, se tiene en cuenta la mejor combinación de materiales que proporcionan este valor U , la cantidad total de calor perdido, el coste económico del régimen de funcionamiento y el coste económico del ciclo de vida de los componentes. Para cada alternativa de la envolvente que satisface esta condición, estudian varios periodos de funcionamiento hasta encontrar la solución más económica y energéticamente eficiente. Es destacable que esta solución óptima puede no coincidir con la opción en la que se produce menor pérdida de calor a través de la fachada del edificio.

6.1.2. Transferencia de calor a través de la envolvente del edificio – OTTV

Figura 3. Transferencia de calor a través de la envolvente de un edificio. Fuente: El Autor



El autor J. Vijayalaxmi, 2010 [21] plantea el método de cálculo de OTTV como una medida de transferencia de calor en el edificio a través de su envolvente. Este concepto se origina en los estándares de conservación de energía de la norma ASHRAE 90.1 [6] y es aplicable a los edificios refrigerados mecánicamente. Tres componentes de la ganancia de calor se consideran en el cálculo de OTTV: la conducción a través paredes opacas, conducción a través de las ventanas de vidrio y la radiación solar a través del vidrio de la ventana. Con las ecuaciones 4 y 5 se calcula este parámetro:

Ecuación 4
$$OTTV_i = \frac{[(A_w \times U_w \times \alpha \times TD_{eq}) + (A_f \times U_f \times DT) + (A_f \times SC \times SF)]}{A_i}$$

Ecuación 5
$$OTTV_{paredes} = \frac{\sum(OTTV_i \times A_i)}{\sum A_i}$$

Dónde:

A_w es el área de la parte opaca de una pared en m^2 ;

U_w Es la transmitancia térmica o valor U de la parte opaca de una pared en $W/(m^2 \cdot K)$;

α es la altura del sol (ángulo sobre el horizonte) en radianes;

TD_{eq} Diferencia de temperatura equivalente en K;

A_f Área de ventanas en m^2 ;

U_f Transmitancia térmica o valor U de vidrio de la ventana en $W/(m^2 \cdot K)$;

DT Diferencia de temperatura en K;

SC Coeficiente de sombreado de una ventana o claraboya;

SF Factor solar en W/m^2 .

$OTTV_{paredes}$ es la OTTV global de las paredes que conforman la envolvente en W/m^2

J. Vijayalaxmi, 2010 [21] utilizando materiales aislantes en la envolvente obtuvo valores por debajo de $30 W/m^2$ en edificios de la India.

El autor Sam C. M. Hui, 1997 [22] examinó los valores de OTTV para varios países para encontrar maneras de mejorar su control y encontró un valor promedio de OTTV para paredes y cubiertas de $35 W/m^2$ en edificios de Hong Kong.

6.1.3. Aislamiento de la fachada

Los autores J. Yu, *et al*, 2008 [23] utilizaron el software eQUEST para analizar el efecto del diseño de la envolvente en el ahorro de energía eléctrica por climatización y los efectos de las estrategias de ahorro energético en el consumo eléctrico de viviendas con diferentes orientaciones en clima cálido y frío en china. El método desarrollado por los autores comprende estrategias combinadas con absorción de radiación solar en la superficie exterior de la fachada, relación y categorías de acristalamiento y tipos de sistema de sombreado. Los resultados indican que el sombreado de envolvente y el aislamiento térmico de las paredes exteriores son las mejores estrategias para disminuir el consumo eléctrico por climatización, logrando un ahorro energético entre 11.31 y 11.55%. La optimización de diferentes estrategias puede disminuir el consumo eléctrico anual por climatización en un 25,92%, y el consumo eléctrico de refrigeración y calefacción se disminuye en 21,08 y 34,77%, respectivamente.

El valor mínimo de consumo eléctrico para climatización se obtiene con una capa de 25 mm de aislamiento, mientras que el mínimo para calentamiento se obtiene con 100 mm de espesor.

Estas diferencias obligan a plantear el problema mediante un análisis económico que permita obtener el espesor del aislamiento económicamente más ventajoso y energéticamente más eficiente.

Los autores K. Çomakli *et al*, 2003 [24] Investigaron el espesor óptimo de aislamiento para las ciudades más frías. El ahorro de energía se obtuvo cuando se aplica el espesor de aislamiento óptimo en la pared. Ellos obtuvieron la fórmula que

determina el aislamiento económicamente óptimo (x_0) teniendo en cuenta parámetros económicos, materiales de aislamiento y condiciones climáticas. Con la ecuación 6 se calcula este parámetro:

$$\text{Ecuación 6} \quad x_0 = 293.94 \sqrt{\frac{PWF DD C_f k}{C_i H_u \mu}} - k R_t$$

Donde:

DD *degree days* (grados diarios);

C_f y C_i es el costo del combustible y costo del aislamiento, respectivamente;

H_u el poder calorífico del combustible;

R_t la resistencia térmica total de la pared sin el material aislante;

μ La eficiencia del sistema de calefacción,

k la conductividad térmica del aislamiento.

PWF representa el factor valor actual que se calcula sobre la base de la inflación y la tasa de interés como se observa en la ecuación 7:

$$\text{Ecuación 7} \quad PWF = \frac{1 - (1+r)^{-N}}{r}$$

Dónde:

N es el número de años de vida útil;

r es el índice ajustado para la inflación que se calcula según la ecuación 8:

$$\text{Ecuación 8} \quad r = \frac{i-g}{1+g} \quad (i > g)$$

Dónde:

i es el índice de interés

g el índice de inflación

Los resultados muestran que el espesor del aislamiento es inversamente proporcional al costo del combustible y directamente proporcional al costo del aislamiento, logrando un espesor óptimo en 10 mm.

6.1.4. Vidrio de ventana

Los vidrios que reducen la entrada de la radiación solar son más efectivos en verano y permiten reducir la demanda de refrigeración. En cambio, en invierno provocan un aumento de la necesidad de calefacción porque impiden que se aproveche la energía solar para el calentamiento pasivo del edificio.

Los autores Y. Chen, *et al*, 2014 [25] realizaron un estudio del potencial de ahorro energético en un edificio industrial en China mediante el aprovechamiento de la iluminación natural y su repercusión en la demanda final de calefacción. Evaluaron dos estrategias de aprovechamiento de la iluminación natural, la primera un control on/off y la segunda un control del oscurecimiento interior. Como resultados obtuvieron un potencial de ahorro del uso de iluminación artificial de entre el 36.1% y el 41.5% para ambas estrategias, mientras que la demanda de calefacción se incrementó entre un 7.1% y un 8.7%. Construyeron un modelo del edificio en Ecotect (Autodesk®) y realizaron una simulación de la iluminación natural con el software Radiance (Desktop®). Finalmente, evaluaron el consumo energético de

ambas propuestas mediante la simulación con el software EnergyPlus®.

Los autores Z. Yang *et al*, 2006 [26] encontraron que el principal criterio sobre la base del vidrio de construcción es que, si el Coeficiente de sombra es menor, la energía de la radiación solar en la sala es menor, y el efecto del ahorro de energía de sombreado de verano es mejor. Ellos clasifican los vidrios que proporcionan ahorro energético así:

- Vidrios absorbentes: transforman la radiación solar absorbida en energía calorífica, aumentando su temperatura, y dispersando el calor en la habitación a través de convección y radiación para reducir la radiación directa a través del cristal.
- Vidrios reflectantes: son aquellos con un film o imprimación que bloquea la entrada de radiación solar en la habitación.
- Vidrios de baja radiación: también pertenecen a los vidrios con imprimación. Reducen la transferencia de calor mediante un film o imprimación en verano.

6.1.5. Relación de acristalamiento

Los autores J. Yu *et al*, 2015 [27] investigaron los efectos de algunos parámetros como la relación de acristalamiento, el factor de sombra, la transmitancia y el sistema de sombreado sobre el consumo total de energía de refrigeración,

calefacción e iluminación mediante un software de simulación obteniendo el diseño óptimo de envolvente para edificios de oficinas de verano y de invierno. Los resultados muestran que el consumo total anual de energía es el más bajo cuando la relación de ventana a pared es del 40%.

6.1.6. Coeficiente de sombra

El uso de las sombras que inciden en los elementos de fachada permite controlar el nivel de radiación solar recibido por el edificio. Esta estrategia proporciona resultados favorables cuando se actúa sobre los huecos de fachada puesto que son los elementos que transmiten mayor nivel de radiación al interior.

El Coeficiente de sombra se define como la relación entre el calor solar ganado a través del sistema de ventanas con respecto al calor solar ganado bajo un cristal estándar de 3 mm de espesor. En la ecuación 9 se observa cómo se calcula:

Ecuación 9
$$CS = \frac{\text{factor de ganancia solar de ventanas}}{\text{factor de ganancia solar del vidrio de referencia}}$$

Los autores Z. Yang, *et al*, 2006 [26] analizan las características térmicas del sistema del vidrio del edificio y proponen la ecuación 10 para calcular el ahorro anual total energético en función del coeficiente de sombra:

Ecuación 10
$$CES = \frac{Q_s \times (1 - CS) + Q_w \times CS}{Q_s + Q_w}$$

Dónde:

CEs es el coeficiente de ahorro energético por radiación solar;

CS es el coeficiente de sombra;

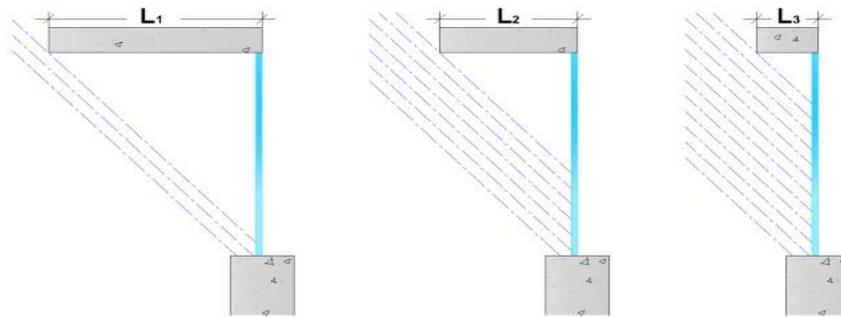
Q_s es la ganancia de ahorro energético en verano debido a la sombra;

Q_w es la energía solar entrante en invierno debido a la sombra.

Los resultados muestran que en climas cálidos se obtiene más ahorro energético con un coeficiente de sombra menor de 0,3, al reducirse las ganancias solares.

Los sistemas pasivos de sombra son los aleros y persianas. Los aleros permiten evitar la entrada de radiación directa en la ventana durante ciertos momentos del día, regulando la entrada de calor e iluminación natural no deseada, como muestra la *Figura 4*:

Figura 4. *Efecto del alero sobre la radiación incidente en una ventana. Fuente: Autor*



Otro diseño pasivo es con la sombra del propio edificio. Mediante este diseño se puede conseguir que sea el propio edificio el que arroje sombra sobre sí mismo, sin necesidad de elementos adicionales. Esto puede resultar beneficioso especialmente en edificios aislados que reciben alta cantidad de radiación solar directa indeseada. La forma más empleada para este fin es la de pirámide invertida [29]. La *Figura 5* muestra ejemplos de este tipo de edificios.

Figura 5. Ejemplos de edificios “auto-sombreados”. Fuente: (Chwieduk & Bogdanska, 2004) [29].



a) Tempe City Hall, Arizona Hall, Boston

b) Banco de Israel

c) City Hall, Boston

Para los autores A. Tzempelikos *et al*, 2007 [28] en climas cálidos el control de la sombra es necesario para asegurar el confort térmico y visual en el interior. Los sistemas de sombra pasivos favorecen una reducción del calor ganado por el edificio, lo que se traduce en un menor uso de los sistemas de refrigeración. Tienen el inconveniente de que reducen la disponibilidad de iluminación natural diurna, por lo tanto proteger al edificio de sombras inadecuadas aumenta las horas de consumo por luz artificial.

Los autores analizaron la efectividad de sistemas pasivos fijos de sombra con un

sistema automático de sombra sencillo, concretamente persianas enrollables automáticas. Los resultados de la simulación indican que, si se utiliza un enfoque integrado para el control automático del sombreado motorizado junto con sistemas de iluminación eléctrica controlables, se podría lograr una reducción sustancial de la demanda de energía para refrigeración e iluminación en espacios perimetrales, dependiendo de las condiciones climáticas y orientación.

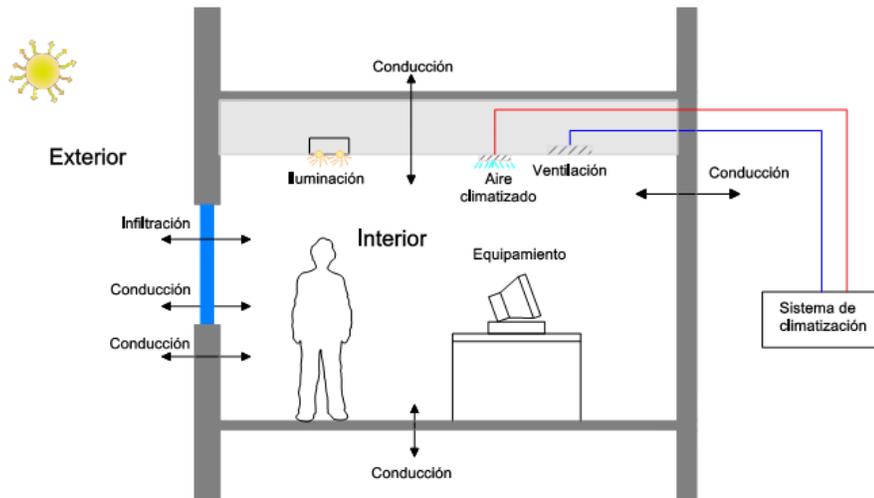
6.2. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE UN EDIFICIO

Un edificio puede considerarse como un sistema termodinámico en el que se puede evaluar el balance de energía. Las ganancias de calor que se dan en un edificio pueden ser internas o externas:

- Nivel de ocupación
- Irradiación del sistema de iluminación
- Funcionamiento de equipos en el interior
- Radiación solar recibida a través de los elementos de la envolvente (fachadas, huecos y cubiertas)

Por otra parte, en el edificio se producen pérdidas térmicas como consecuencia de la ventilación y la infiltración del aire exterior. De forma esquemática, la *Figura 6* recoge los procesos de transferencia de calor implicados en la simulación energética de edificios.

Figura 6. *Procesos de transferencia de calor implicados en la simulación energética de edificios.*
Fuente: autor.



6.2.1. Simulación energética de edificios

La necesidad de incluir todas las interacciones dinámicas que se producen en el fenómeno de transferencia de calor en un edificio hace que sea preciso el uso de métodos o modelos dinámicos, modelos que por otra parte son matemáticamente complejos. La simulación energética de un edificio consiste en estimar la demanda energética como consecuencia de la actividad que se desarrolla en él. En el caso de edificios residenciales, la demanda energética calculada mediante modelos de cálculo, comprende la demanda de: calefacción, refrigeración, iluminación, agua caliente sanitaria y equipamientos habituales.

La simulación dinámica de edificios calcula, a partir de los datos de entrada definidos por el usuario y las bases de datos pre-establecidas en el simulador, la demanda energética del edificio y los usos en los que se emplea, en términos anuales generalmente, como resultado de las características del edificio y la

actividad desarrollada por sus ocupantes. Su estructura permite considerar las interacciones térmicas entre cada zona de edificios multizona.

El autor C. Ghiaus, 2013 [30] sostiene que el cálculo de la carga térmica en los edificios, a partir de modelos dinámicos, es ampliamente utilizado por los softwares de simulación y es además es recomendado por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*, a partir de ahora ASHRAE) y el Comité Europeo de Estandarización, CEN (*European Committee for Standardization*). El principio en el que se basan es determinar el balance de calor para un volumen de aire del espacio considerado, a una temperatura uniforme y calcular de esta ecuación la carga o la potencia necesaria para cumplir los requerimientos de temperatura interior.

Estos modelos complejos están basados en modelos termodinámicos más sencillos que formulan cada flujo de energía unificados para representar el edificio en su conjunto. Todo proceso de simulación constará de tres partes diferenciadas. En primer lugar, se crea un modelo que representa el objeto a estudiar. Esta información puede introducirse directamente codificada o, la opción más común, puede generarse mediante un programa gráfico o interfaz. En la segunda etapa de simulación se genera un modelo matemático o informático que, a partir de los datos anteriormente introducidos, simula el comportamiento del edificio. La última etapa es la de post- tratamiento o representación de los datos de una forma accesible para el usuario y en un formato almacenable.

Pueden realizarse dos tipos de modelos para representar un objeto. Por un lado, los objetos geométricos, y por otro lado, los objetos físicos que representan magnitudes intensivas que actúan sobre los modelos geométricos. Se crea así un modelo físico-matemático que permite representar los fenómenos físicos que se

den en una geometría [31].

En el modelo físico-matemático que representa un edificio, a cada elemento geométrico definido (tales como un volumen y la superficie que lo delimita) se le asignan objetos físicos (como flujo de calor o de aire), siendo posible obtener cantidades absolutas de una magnitud física (por ejemplo, cantidad de calor que traspasa un muro y accede al interior del volumen). Aunque este es el concepto generalizado para la creación de un modelo físico-matemático de un edificio, cada software de simulación aplica de forma diferente esta metodología.

Las ecuaciones físicas que evalúan cómo los objetos físicos actúan sobre los geométricos se resuelven matemáticamente por diferentes medios (ecuación de Laplace o método de diferencias finitas, por ejemplo). Se tienen en cuenta también si los elementos geométricos analizados tienen capacidad o no de almacenar energía y si ésta es representativa para ser incluida o no en el cálculo. Finalmente se realiza el balance de las densidades de flujo de energía, el denominado balance energético.

6.2.2. Etapas en la simulación energética de edificios

En la actualidad se ha desarrollado un gran número de aplicaciones informáticas de simulación energética de edificios, como son TRNSYS, EnergyPlus®, ESP-r, eQUEST. Aunque el principio de funcionamiento es similar para todos, las diferencias entre ellos radican en aspectos como el modelo termodinámico empleado, la interfaz de usuario o la capacidad de exportar datos a otras aplicaciones.

Los autores Kalema, T., *et al*, 2008 [32] sostienen en su investigación que la precisión de estos modelos de cálculo depende de tres aspectos: las habilidades del usuario para conseguir describir la realidad en el modelo de cálculo; la fiabilidad de los datos de entrada como dimensiones, propiedades térmicas de los materiales, coeficientes de transferencia de calor, etc. y el método de cálculo empleado.

Aunque se traten de programas muy avanzados, testados por la comunidad científica y con grandes capacidades de cálculo, gran parte del éxito de los resultados obtenidos radica en la habilidad y experiencia del profesional que los emplea, especialmente a la hora de introducir los datos de partida. Cuanta mayor experiencia tenga el “modelador” o usuario mayor fiabilidad puede derivarse de los datos de entrada.

6.2.3. Componentes: interfaz gráfico y motor de cálculo

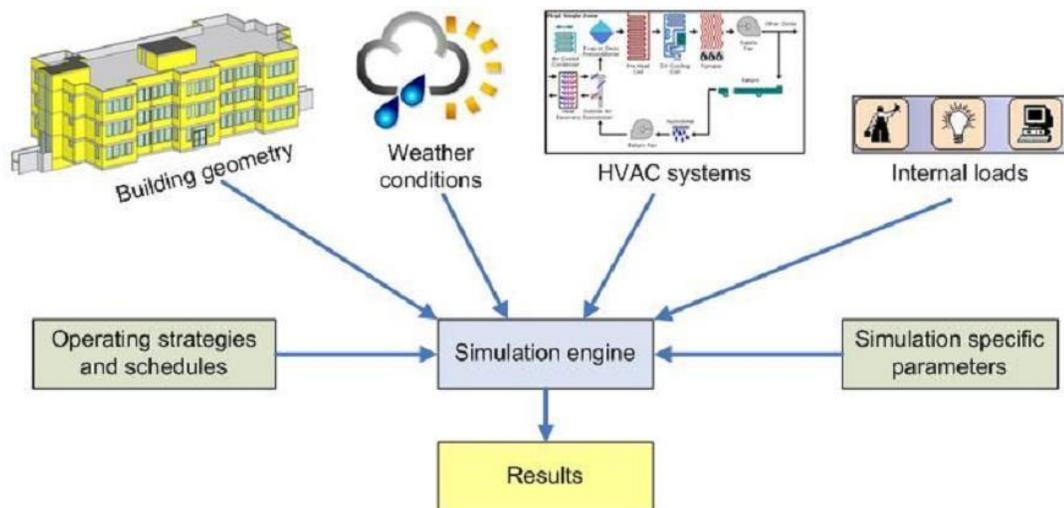
Generalmente, las herramientas de simulación de edificios se componen de una interfaz y un motor de cálculo. El motor de cálculo contiene los algoritmos termodinámicos y matemáticos necesarios y suele estar compuesto a su vez por otros programas de cálculo para cada una de las necesidades energéticas. Por lo general, estas aplicaciones han sido desarrolladas por instituciones o centros de investigación especialistas en la materia y cuentan con el respaldo de estudios de verificación previos.

La interfaz es la herramienta de introducción de datos y puede ser una interfaz de entrada directa de datos o una interfaz gráfica. Una interfaz de usuario sencilla y

una entrada de datos accesible son aspectos esenciales a la hora de escoger un software de simulación energética. Aun así, es necesario que el usuario conozca los procesos térmicos que se dan en el edificio y las limitaciones del programa de cálculo que está empleando. Al contrario que en el caso de los motores de cálculo, la interfaz gráfica normalmente es desarrollada por agentes privados y no es gratuita.

La *Figura 7* ilustra el flujo de datos de un motor de simulación en el que, de forma simplificada, los datos de entrada son la geometría del edificio, las condiciones climáticas, las propiedades de los sistemas de climatización, el nivel de cargas internas, así como el número de usuarios y los horarios.

Figura 7. Flujo de datos de un motor de simulación. Fuente: Tobias Maile [33]



El motor de cálculo emplea los datos de entrada para realizar la simulación y ofrecer los resultados, generalmente en forma de informes, que incluyen también los errores o mensajes de advertencia obtenidos durante la simulación. Es habitual que

estos resultados puedan ser leídos por la interfaz gráfica, o bien por otro programa de lectura de datos.

Los datos de entrada requeridos por los modelos dinámicos de simulación pueden agruparse en:

- ❖ Emplazamiento, orientación y geometría del edificio
- ❖ Condiciones externas (temperatura externa, velocidad del viento, nivel de radiación solar recibido, humedad exterior, entre otros)
- ❖ Condiciones térmicas internas que deben mantenerse en cada zona
- ❖ Propiedades termo físicas de los materiales de construcción y características térmicas de los cerramientos como la capacidad térmica y el aislamiento
- ❖ Aspectos que afectan a la pérdida de calor, como hermeticidad y ventilación
- ❖ Ganancias térmicas (debido a la ocupación, al equipamiento o ganancias solares)
- ❖ Intensidad y horarios de ocupación y uso del edificio
- ❖ Propiedades de los sistemas de calefacción, refrigeración, iluminación, equipamiento y demás servicios ya sean individuales o colectivos

Con los datos de entrada definidos, el software de simulación realiza las siguientes acciones [34]:

- ❖ Calcula la demanda energética para iluminación teniendo en cuenta el área acristalada, las sombras, sistemas de control de iluminación ...
- ❖ Establece unas ganancias de calor y un nivel de humedad en cada área, como resultado de las ganancias internas que se producen
- ❖ Calcula la transferencia de calor dentro del edificio y con respecto al exterior

- ❖ Calcula la demanda energética de los sistemas de climatización y ventilación para mantener las condiciones térmicas interiores requeridas
- ❖ Calcula la demanda energética derivada de los equipamientos instalados en el edificio según el uso del mismo
- ❖ Proporciona la calificación energética del edificio, o permite exportar el modelo creado a otro software que lo realice

6.2.4. Suposiciones en la construcción de un modelo

Algunos datos de entrada deben estar basados en suposiciones, especialmente en el caso de edificios no existentes. Cuando se modelan edificios que ya existen, es tarea del usuario realizar una exhaustiva auditoría al edificio con el fin de recopilar la mayor cantidad de información del edificio existente y reducir así el número de suposiciones que ha de hacer durante la definición del edificio y sus sistemas.

El usuario debe conocer de antemano la importancia de las suposiciones que haga y, con conocimiento de las normas y códigos de diseño y en base a su propia experiencia profesional, tener las herramientas y capacidades necesarias para hacer unas suposiciones lo más próximas a la realidad [34].

6.2.5. Precisión del modelo

El nivel de precisión del modelo no puede ser determinado antes de comenzar, sino que debe evaluarse a lo largo del proceso.

Antes de decidir con qué precisión se va a trabajar, el usuario debe evaluar los

siguientes conceptos:

- ❖ Calidad de los datos de entrada que conoce
- ❖ Limitaciones del programa escogido
- ❖ Confianza en las suposiciones que se vayan a realizar para la simulación
- ❖ Nivel de detalle de resultados necesarios para conseguir el fin para el que se está realizando la simulación

El hecho de no emplear el máximo nivel de precisión que permite el programa de cálculo, no significa que los resultados sean de menor calidad. De hecho, un proceso de simulación demasiado detallado pero que incluya supuestos poco fiables, no necesariamente da resultados razonables y correctos en comparación con la realidad [33]. El usuario debe considerar cuidadosamente la precisión y la validación (a través de otros estudios) del método elegido.

6.2.6. EnergyPlus®

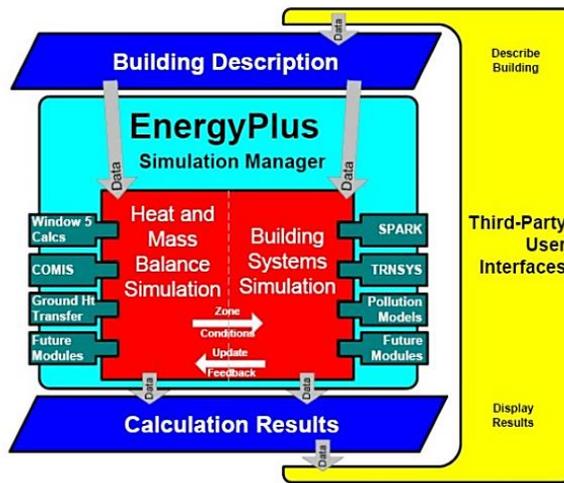
EnergyPlus® es un software de simulación térmico-energético que abarca estructuras arquitectónicas complejas. Es un programa desarrollado por el Departamento Norteamericano de Energía, que ofrece muchos adelantos en cuanto a las capacidades de simulación. Fue desarrollado en la década del 70 y 80 producto de la necesidad generada a partir de la crisis energética norteamericana, por lo que abarca normas y conceptos de eficiencia energética en su procesamiento.

EnergyPlus® se basa en un enfoque integrado (carga y simulación de sistemas), lo que conduce a predicciones más precisas de las temperaturas en los espacios y por lo tanto una mejor estimación de varios parámetros resultantes, como el confort térmico. EnergyPlus® utiliza como motor de cálculo el método de balance de calor, “Heat Balance Method”, lo cual modela: la transferencia de calor por conducción a través de los materiales del edificio, convección del aire, absorción y reflexión de la radiación de onda corta e intercambio radiante de onda larga [33].

Hoy en día, la simulación de EnergyPlus® se basa principalmente en la entrada de archivos de texto, lo que aumenta el esfuerzo para definir todos los datos de entrada necesarios en comparación con los motores con interfaces gráficas de usuario.

La *Figura 8* muestra el flujo de datos dentro y alrededor del motor EnergyPlus®. La simulación del balance de calor y masa térmica se integra con la simulación de los sistemas de construcción, de manera que el resultado sea siempre preciso e independiente de las cargas de espacio que se cumplan o no. Además, módulos como COMIS, SPARK, TRANSYS y otros pueden ser fácilmente incorporados en la simulación para combinar diferentes conceptos y aspectos de la simulación energética del edificio. Este enfoque modular permite la integración de módulos adicionales en el futuro.

Figura 8. *Flujo de datos en EnergyPlus®. Fuente: Tobias Maile [33]*



7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1. TIPO DE ESTUDIO

La presente investigación se implementó de forma exploratoria para establecer relaciones potenciales entre los parámetros asociados a la envolvente influyente en el consumo energético de un edificio de Hospital.

7.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para realizar la simulación energética de los modelos de hospital se utilizaron los siguientes recursos:

- Software Google SketchUp 8
- Software EnergyPlus® V-7-2
- Información climatológica del IDEAM
- Código Técnico de la Edificación CTE
- Catálogos de Distribuidor de materiales de envolvente de Hospitales en Colombia

7.3. ACTIVIDADES

Para lograr cada objetivo se desarrollaron una serie de actividades que se describen a continuación:

7.3.1. Actividades para determinar y seleccionar los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía asociados con la envolvente de edificaciones

- Determinar y seleccionar los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía asociados con la envolvente de edificaciones:

Se consultaron y revisaron de normas e investigaciones especializadas: Inicialmente se realizó la revisión de normas internacionales, nacionales y programas establecidos en Colombia para el uso eficiente de la energía en edificaciones y finalmente se revisaron algunas investigaciones desarrolladas en países asiáticos sobre ahorro energético y simulación energética de edificios, las cuales muestran los parámetros influyentes en la simulación energética de un edificio y su relación con el ahorro energético en edificaciones.

- Recolección de datos:

Se utilizaron los boletines mensuales publicados por el IDEAM, la página web [35], el código técnico de edificación, catálogos de distribuidores en Colombia de materiales para envolvente y de archivos predeterminados de EnergyPlus® V7-2.

7.3.2. Actividades para analizar el consumo de energía, transmitancia térmica y OTTV obtenidos por la simulación del comportamiento energético de diferentes modelos de un hospital.

- Modelar un edificio representativo de hospital en el software de modelado en 3D Google SketchUp 8.

- Simular el comportamiento energético de 12 modelos de hospital con materiales y espesores distintos en la envolvente utilizando el software EnergyPlus® V7-2: Para realizar la simulación del comportamiento energético del edificio se utilizó el modelo de un edificio de hospital público elaborado en Google SketchUp 8 al cual se le asignaron los datos, recolectados anteriormente, en EnergyPlus® V7-2 y se obtuvieron resultados de energía consumida, transmitancia térmica y calor almacenado en la envolvente.
- Analizar los resultados de energía consumida, transmitancia térmica y OTTV obtenidos por la simulación de 12 modelos de hospital:
Se relacionaron los parámetros de mayor impacto en el ahorro energético de la envolvente, utilizados en la simulación, con los resultados de energía consumida, transmitancia térmica y OTTV en la envolvente.

7.3.3. Actividades para establecer medidas de ahorro energético asociadas al diseño constructivo de la envolvente de un hospital.

- Proponer estrategias de ahorro energético asociadas al diseño constructivo de la envolvente de un hospital en la ciudad de Barranquilla:
De acuerdo a los resultados de energía consumida, transmitancia térmica y OTTV que se obtuvieron en la simulación de los modelos de hospital, se realizó el análisis comparativo y se identificaron las estrategias a seguir para obtener ahorro energético en su envolvente.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados y análisis de esta investigación se presentan de acuerdo a las actividades planteadas en el diseño metodológico así:

8.1. RESULTADOS DE ACTIVIDADES PARA DETERMINAR Y SELECCIONAR LOS PARÁMETROS DE MAYOR IMPACTO EN EL CONSUMO DE ENERGÍA ASOCIADOS CON LA ENVOLVENTE DE EDIFICACIONES.

Los parámetros de mayor impacto seleccionados fueron los parámetros físico ambientales como la ubicación del edificio, temperatura exterior del edificio, la radiación solar, la dirección y velocidad del viento y, además, parámetros de diseño como las propiedades termo físicas de los materiales, es decir, la transmitancia térmica, la conductividad térmica, la resistencia térmica, la densidad, calor específico y espesor del material, y la relación de acristalamiento.

8.1.1. Localización del edificio de hospital

El edificio de hospital se sitúa en la ciudad de Barranquilla, capital del departamento del Atlántico, Colombia. Está ubicada sobre la margen occidental del río Magdalena a 7,5 km de su desembocadura en el mar Caribe y se sitúa geográficamente en la latitud 10° 52' 59" N, longitud 74° 46' 59" O, y a una altitud de 30 metros sobre el nivel del mar.

8.1.2. Datos climáticos de la ciudad de Barranquilla

Para obtener los datos climáticos se utilizan los siguientes recursos:

Se utiliza la página web [35], para obtener el archivo meteorológico de la ciudad de Barranquilla, archivo en extensión EPW que se ejecutará en EnergyPlus® V7-2 para simular las condiciones climáticas de Barranquilla (*Figura 9*).

Se utiliza el boletín climatológico del año 2016 según el IDEAM [36][37] para obtener los datos de velocidad y dirección del viento en Barranquilla (*Figura 10*). Los resultados se muestran en la *Tabla 3*.

Figura 9. Archivo meteorológico de la ciudad de Barranquilla EPW. Fuente: <http://weather.whiteboxtechnologies.com> [35].



Figura 10. Velocidad y dirección del viento en Barranquilla, mayo 2017.

Fuente: <http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/colombia/SKBQ.txt>. [37]

IDEAM – SUBDIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA GRUPO DE MODELAMIENTO DE TIEMPO Y CLIMA							
PRONOSTICO DEL ESTADO DEL TIEMPO EN SUPERFICIE PARA BARRANQUILLA RESULTADOS CON EL MODELO WRF00Z A 20 KM DE RESOLUCIÓN FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 15 05 2017 HORA: 03:32:10 HLC							
RESUMEN A 24 HORAS ENTRE 7 A.M. Y 7 A.M.							
AÑO	MES	DÍA	LLUVIA (mm)	DIR (grados)	VEL (nudos)	TMAX (°C)	TMIN (°C)
2017	05	15	15.0	162	0.9	35.3	25.7
2017	05	16	4.5	200	4.1	33.8	25.7
2017	05	17	5.5	270	1.3	34.5	26.1

Tabla 3. *Datos climáticos utilizados en los modelos de hospital. Fuente: El Autor*

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura ambiente [°C]	27,7	28	28	28,5	29,3	29,3	28,9	29,2	29	28	27,9	28
Velocidad del viento [m/s]	1,1											
Dirección del viento [grados]	210											

8.1.3. Modelos seleccionados para simulación

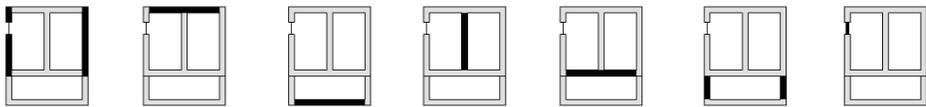
Se definieron 12 modelos de hospital para realizar la simulación en EnergyPlus®. El modelo 1 presenta envolvente sin aislamiento, con hormigón armado y ventana con vidrio simple; el modelo 2 presenta envolvente con aislamiento 10 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 3 presenta envolvente con aislamiento 15 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 4 presenta envolvente con aislamiento 20 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; modelo 5 presenta envolvente con aislamiento 25 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 6 presenta envolvente con aislamiento 30 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 7 presenta envolvente con aislamiento 50 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 8 presenta envolvente con aislamiento 100 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 9 presenta envolvente con aislamiento 150 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y

ventana con vidrio aislante; el modelo 10 presenta envolvente con aislamiento 50 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 11 presenta envolvente con aislamiento 100 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante; el modelo 12 presenta envolvente con aislamiento 150 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante. Aunque los modelos presentan ganancias internas iguales de personas, luces y equipos, la diferencia radica en los tipos de materiales y el espesor del material aislante térmico, buscando establecer una relación entre estos y los valores de consumo de energía, transmitancia térmica y transferencia de calor a través de la envolvente.

En la *Figura 11* se observa la distribución de materiales en la envolvente de los modelos de hospital. En la *Tabla 4* se observan los nombres y las propiedades de los materiales utilizados en la envolvente del edificio de hospital, como conductividad térmica, densidad y calor específico.

En la *Tabla 5* se observan los materiales y espesores de material para la fachada, cubierta, suelo del cimiento, pared interna, suelo interno, techo interno, pared del cimiento y ventana de los 12 modelos de hospital. Las abreviaturas de capa se observan en la *Tabla 4* y la distribución y propiedades de los materiales en la envolvente del edificio de hospital cumplen con el Código Técnico de Edificación CTE [38], además, se sugieren materiales distribuidos por la empresa FiberGlass Colombia S.A. [39]

Figura 11. Distribución de materiales en la envolvente de los modelos de hospital. Fuente: El autor



	FACHADA	CUBIERTA	SUELO CIMENTO	PARED INTERNA	SUELO INTERNO / TECHO INTERNO	PARED CIMENTO	VENTANA
MODELO 1 Sin aislamiento	HA	HA	HA	HA	HA	HA	VS
MODELOS 2 - 9 Con espesores de aislamiento externo $t = 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100, 150$ mm	YL LCH EY t	MPP S560 LF HA t	AC M HA LF	YL LF PA LF YL	AC M LF HA LF YL	YL LF HA	VA
MODELOS 10 - 12 Con espesores de aislamiento interno $t = 50, 100, 150$ mm	EY LCH LF YL t	MPP S560 HA LF t	AC M LF HA	YL LF PA LF YL	AC M LF HA LF YL	HA LF YL	VA

Tabla 4. *Propiedades de los materiales utilizados en los modelos de hospital. Fuente: Código técnico de edificación [38]*

	Material	Conductividad Térmica W/m-K	Densidad Kg/m ³	Calor Específico J/Kg-K
HA	Hormigón Armado	2,5	2500	800
LCH	Ladrillo Cerámico Hueco	0,29	650	1000
M	Mortero	1,4	2000	1000
EY	Enlucido de Yeso	0,30	800	880
YL	Yeso Laminado	0,25	800	1000
LF	Lana Mineral Fiberglass	0,038	60	800
MPP	Capa Asfáltica Manto Prieta Pro	0,16	1121	1460
S560	Impermeabilizante Sikalastic 560	0,19	1320	800
AC	Acabado Cerámico	2,3	2000	1000

	Material	Resistencia Térmica M ² -K/W
PA	Pared de Aire	0,208

	Material	Factor – U W/m ² -K	Factor de Ganancia Solar
VS	Vidrio Simple	5,7	0,85
VA	Vidrio con Aislante	3,0	0,85

Tabla 5 Materiales y espesores de material en la envolvente del edificio de hospital. Fuente: El Autor

Modelo	Fachada		Cubierta		Suelo Cimiento		Pared Interna		Suelo Interno		Techo Interno		Pared Cimiento		Ventana			
	Capa	Espesor mm	Capa	Espesor mm	Capa	Espesor mm	Capa	Espesor mm	Capa	Espesor mm	Capa	Espesor mm	Capa	Espesor mm	Capa	Espesor mm		
1	Envolvente sin aislamiento, Hormigón armado y ventana con vidrio simple		HA	100	HA	200	HA	100	HA	100	HA	100	HA	100	HA	100	VS	4
2	Envolvente con aislamiento 10 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante		YL	15	MPP	9,5	LF	10	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
			LF	10	S560	1,3	HA	200	LF	10	LF	10	M	50	LF	10		
			LCH	100	LF	10	M	50	PA		HA	200	LF	10	HA	200		
			EY	15	HA	200	AC	20	LF	10	LF	10	HA	200				
											YL	15	M	50	LF	10		
													AC	20	YL	15		
3	Envolvente con aislamiento 15 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante		YL	15	MPP	9,5	LF	15	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
			LF	15	S560	1,3	HA	200	LF	15	LF	15	M	50	LF	15		
			LCH	100	LF	15	M	50	PA		HA	200	LF	15	HA	200		
			EY	15	HA	200	AC	20	LF	15	LF	15	HA	200				
											YL	15	M	50	LF	15		
													AC	20	YL	15		
4	Envolvente con aislamiento 20 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante		YL	15	MPP	9,5	LF	20	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
			LF	20	S560	1,3	HA	200	LF	20	LF	20	M	50	LF	20		
			LCH	100	LF	20	M	50	PA		HA	200	LF	20	HA	200		
			EY	15	HA	200	AC	20	LF	20	LF	20	HA	200				
											YL	15	M	50	LF	20		
													AC	20	YL	15		
5	Envolvente con aislamiento 25 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante		YL	15	MPP	9,5	LF	25	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
			LF	25	S560	1,3	HA	200	LF	25	LF	25	M	50	LF	25		
			LCH	100	LF	25	M	50	PA		HA	200	LF	25	HA	200		
			EY	15	HA	200	AC	20	LF	25	LF	25	HA	200				
											YL	15	M	50	LF	25		
													AC	20	YL	15		
6	Envolvente con aislamiento 30 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante		YL	15	MPP	9,5	LF	30	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
			LF	30	S560	1,3	HA	200	LF	30	LF	30	M	50	LF	30		
			LCH	100	LF	30	M	50	PA		HA	200	LF	30	HA	200		
			EY	15	HA	200	AC	20	LF	30	LF	30	HA	200				
											YL	15	M	50	LF	30		
													AC	20	YL	15		

Tabla 5 Materiales y espesores de material en la envolvente del edificio de hospital. Fuente: El Autor

7	Envolvente con aislamiento 50 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	YL	15	MPP	9,5	LF	10	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
		LF	50	S560	1,3	HA	200	LF	50	LF	50	M	50	LF	50		
		LCH	100	LF	50	M	50	PA		HA	200	LF	50	HA	200		
		EY	15	HA	200	AC	20	LF	50	LF	50	HA	200				
								YL	15	M	50	LF	50				
								AC	20	YL	15						
8	Envolvente con aislamiento 100 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	YL	15	MPP	9,5	LF	100	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
		LF	100	S560	1,3	HA	200	LF	100	LF	100	M	50	LF	100		
		LCH	100	LF	100	M	50	PA		HA	200	LF	100	HA	200		
		EY	15	HA	200	AC	20	LF	100	LF	100	HA	200				
								YL	15	M	50	LF	100				
								AC	20	YL	15						
9	Envolvente con aislamiento 150 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	YL	15	MPP	9,5	LF	150	YL	15	YL	15	AC	20	YL	15	VA	6
		LF	150	S560	1,3	HA	200	LF	150	LF	150	M	50	LF	150		
		LCH	100	LF	150	M	50	PA		HA	200	LF	150	HA	200		
		EY	15	HA	200	AC	20	LF	150	LF	150	HA	200				
								YL	15	M	50	LF	150				
								AC	20	YL	15						
10	Envolvente con aislamiento 50 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	EY	15	MPP	9,5	HA	200	YL	15	YL	15	AC	20	HA	200	VA	6
		LCH	100	S560	1,3	LF	50	LF	50	LF	50	M	50	LF	50		
		LF	50	HA	200	M	50	PA		HA	200	LF	50	YL	15		
		YL	15	LF	50	AC	20	LF	50	LF	50	HA	200				
								YL	15	M	50	LF	50				
								AC	20	YL	15						
11	Envolvente con aislamiento 100 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	EY	15	MPP	9,5	HA	200	YL	15	YL	15	AC	20	HA	200	VA	6
		LCH	100	S560	1,3	LF	100	LF	100	LF	100	M	50	LF	100		
		LF	100	HA	200	M	50	PA		HA	200	LF	100	YL	15		
		YL	15	LF	100	AC	20	LF	100	LF	100	HA	200				
								YL	15	M	50	LF	100				
								AC	20	YL	15						
12	Envolvente con aislamiento 150 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	EY	15	MPP	9,5	HA	200	YL	15	YL	15	AC	20	HA	200	VA	6
		LCH	100	S560	1,3	LF	150	LF	150	LF	150	M	50	LF	150		
		LF	150	HA	200	M	50	PA		HA	200	LF	150	YL	15		
		YL	15	LF	150	AC	20	LF	150	LF	150	HA	200				
								YL	15	M	50	LF	150				
								AC	20	YL	15						

8.2. RESULTADOS DE ACTIVIDADES DEL ANÁLISIS DEL CONSUMO DE ENERGÍA, TRANSMITANCIA TÉRMICA Y OTTV OBTENIDOS POR LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE DIFERENTES MODELOS DE UN HOSPITAL

8.2.1. Caso de estudio en Google Sketchup 8

Una vez determinados los parámetros y recolectados los datos se define el edificio de hospital caso de estudio en 3D mediante el programa *Google SketchUp 8*, que junto al plugin *OpenStudio* permite editar y modificar la geometría del edificio utilizando los archivos idf de *EnergyPlus®*, además, suministra una serie de herramientas que facilita las simulaciones *EnergyPlus*.

Para el estudio se selecciona el edificio de hospital [40], el cual es un edificio de referencia del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). En las *Figuras 12, 13, 14, 15 y 16* se muestran las diferentes fachadas del hospital.

Figura 12. Fachada norte del hospital. Fuente: *www.energy.gov*, [40]

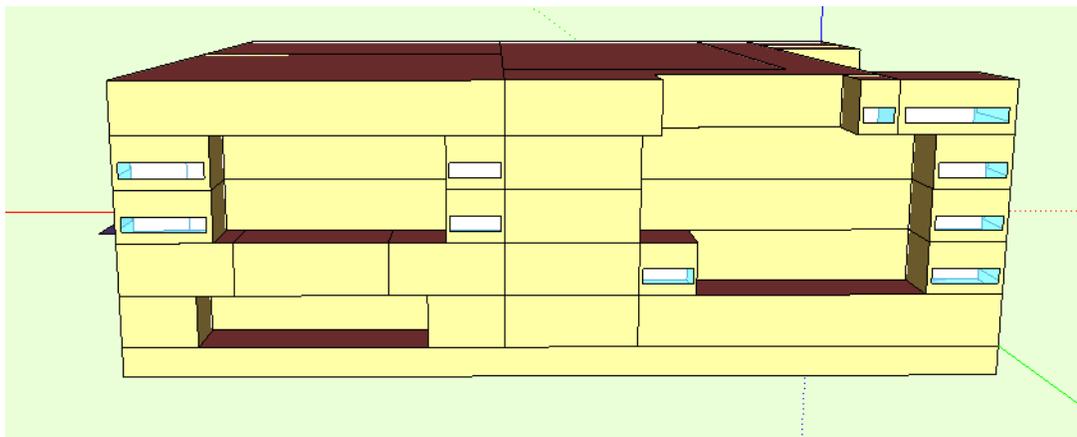


Figura 13. Fachada sur del hospital. Fuente: www.energy.gov, [40]

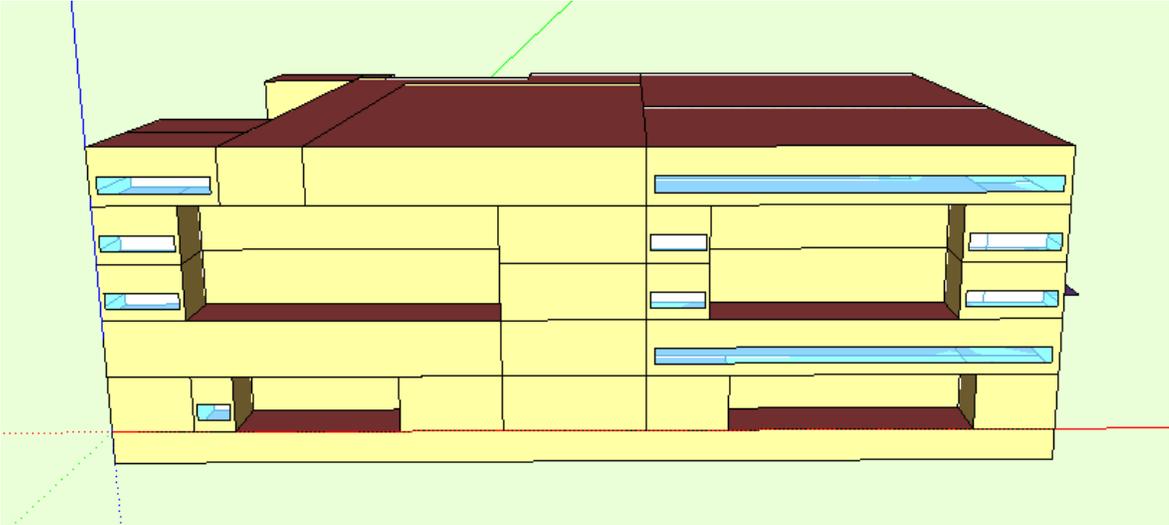


Figura 14. Fachada este del hospital. Fuente: www.energy.gov, [40]

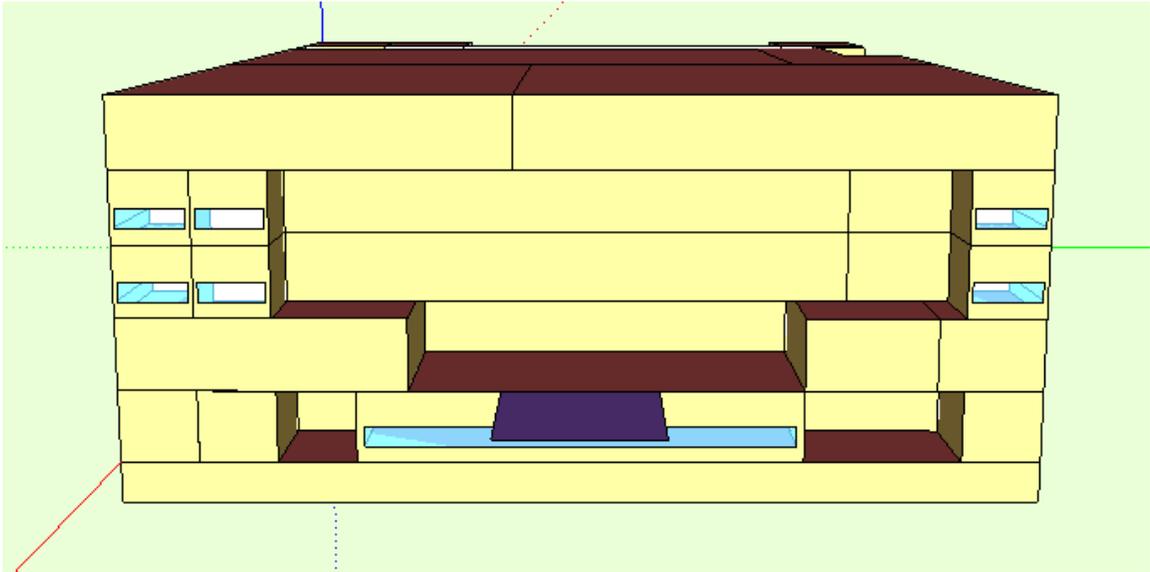


Figura 15. Fachada oeste del hospital. Fuente: www.energy.gov, [40]

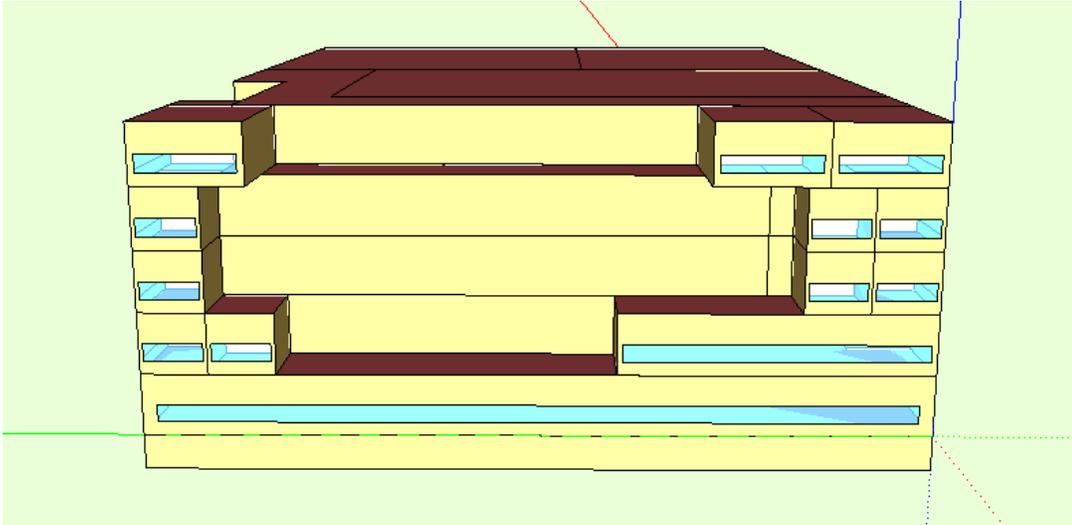
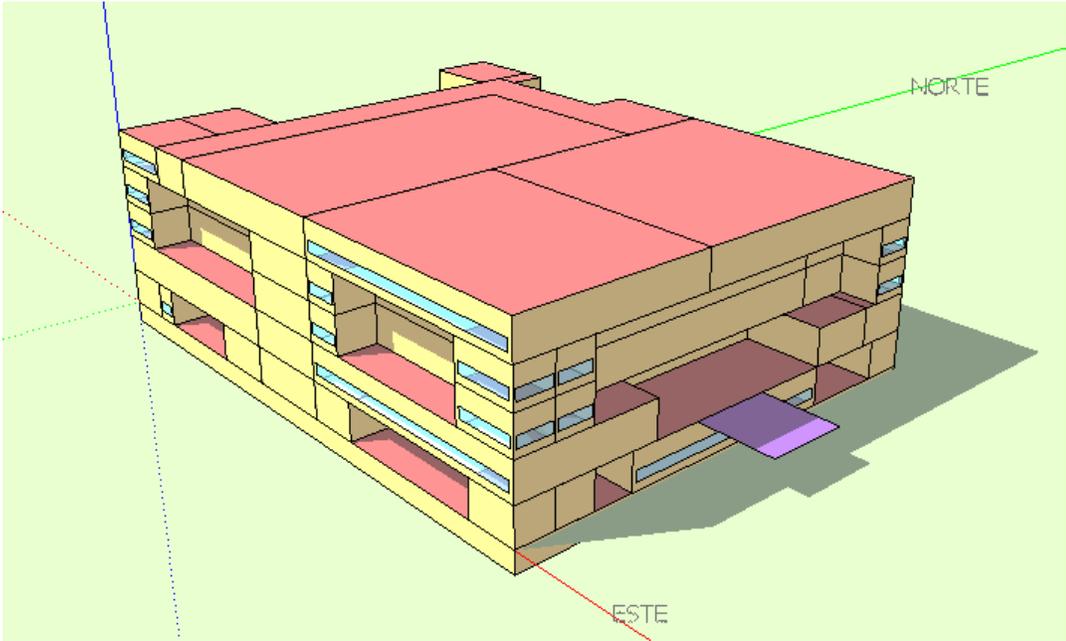


Figura 16. Fachada isométrica del hospital. Fuente: www.energy.gov, [40]



8.2.2. Geometría y ubicación térmica de las zonas del hospital

El edificio de hospital representativo para estudio ocupa un área de 53,34 m (frente) por 70,10 m, con un área total de 22408 m² y posee 55 zonas térmicas cuya área útil se observa en la *Tabla 6*.

Tabla 6 Zonas y áreas del edificio de hospital representativo. Fuente: El Autor

Ítem	Zona Térmica	Área[m ²]	Ítem	Zona Térmica	Área[m ²]
1	Cimientos del Hospital	3739.35	29	Habitación UCI 2	27.87
2	Cocina y Lavandería	929.03	30	Habitación UCI 3	20.90
3	Comedor	696.77	31	Laboratorio del Piso 3	264.77
4	Corredor NorOeste del Piso 3	566.71	32	Laboratorio del Piso 4	264.77
5	Corredor NorOeste del Piso 4	566.71	33	Lobby Piso 3	905.80
6	Corredor SurEste del Piso 3	566.71	34	Lobby Piso 4	905.80
7	Corredor SurEste del Piso 4	566.71	35	Lobby Piso 5	1040.51
8	Corredor del 1º Piso	569.03	36	Lobby Sala de Cirugías	1012.64
9	Corredor del 2º Piso	569.03	37	Lobby Sala de Urgencias	1235.61
10	Corredor del 5º Piso	501.68	38	Lobby Unidad de Cuidados Intensivos	668.77
11	Fisioterapia	487.74	39	Oficina 501	69.70
12	Habitación 301	20.90	40	Oficina 502	69.65
13	Habitación 302	34.84	41	Oficina 503	69.68
14	Habitación 303	20.21	42	Oficina 504	13.94
15	Habitación 304	34.84	43	Oficina 101	13.94
16	Habitación 305	20.90	44	Radiología	487.74
17	Habitación 306	27.87	45	Sala de Cirugía 1	55.74
18	Habitación 307	20.21	46	Sala de Cirugía 2	69.68
19	Habitación 308	27.87	47	Sala de Cirugía 3	55.74
20	Habitación 401	20.90	48	Sala de Cirugía 4	222.97
21	Habitación 402	34.84	49	Sala de Registros 1º Piso	1474.81
22	Habitación 403	20.21	50	Sala de Traumas 1	27.87
23	Habitación 404	34.84	51	Sala de Traumas 2	27.87
24	Habitación 405	20.90	52	Sala de Urgencias 1	27.87
25	Habitación 406	27.87	53	Sala de Urgencias 2	27.88
26	Habitación 407	20.21	54	Triage	27.87
27	Habitación 408	27.87	55	Unidad de Cuidados Intensivos	617.96
28	Habitación UCI 1	20.90		Área Total	22408.16

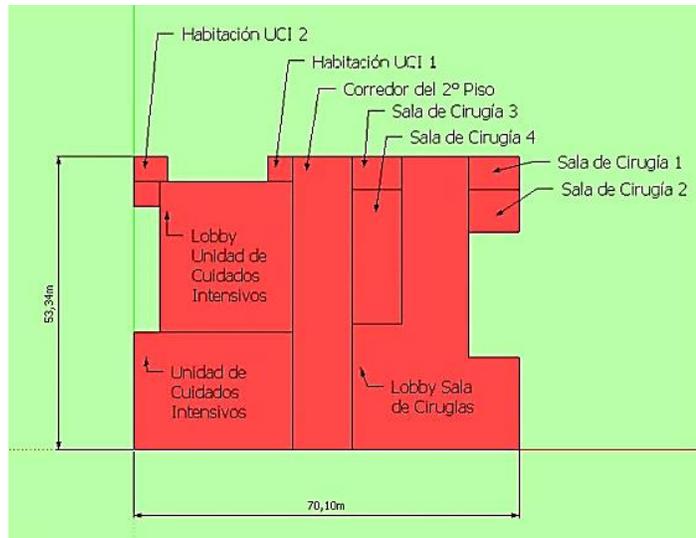
Las zonas se ubican en 5 plantas. En la primera planta se encuentran las zonas térmicas de oficina 101, Triage, sala de registro del primer piso, sala de urgencia 1, sala de urgencia 2, lobby sala de urgencia, sala de traumas 1 y sala de traumas 2, como se observa en la figura 17.

Figura 17. Zonas en la primera planta del edificio hospital. Fuente: El Autor



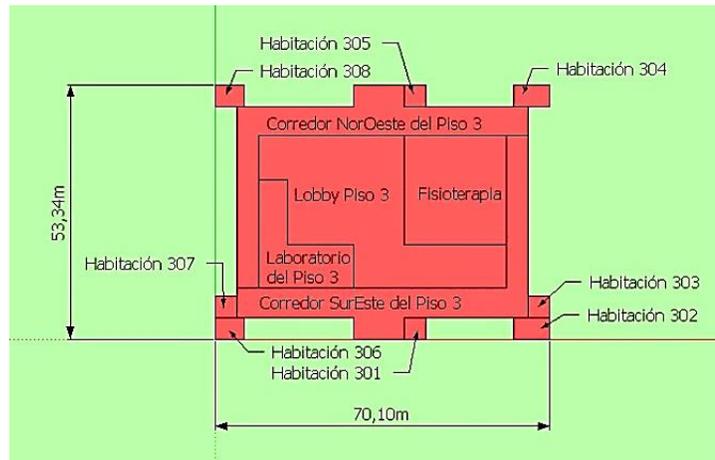
En la segunda planta se encuentran las zonas térmicas de Unidad de cuidados intensivos, Lobby unidad de cuidados intensivos, Habitación UCI 1, Habitación UCI 2, corredor del 2º piso, sala de cirugías 1, sala de cirugías 2, sala de cirugías 3, sala de cirugías 4 y lobby de sala de cirugías, como se observa en la *Figura 18*.

Figura 18. Zonas en la segunda planta del edificio hospital. Fuente: El Autor



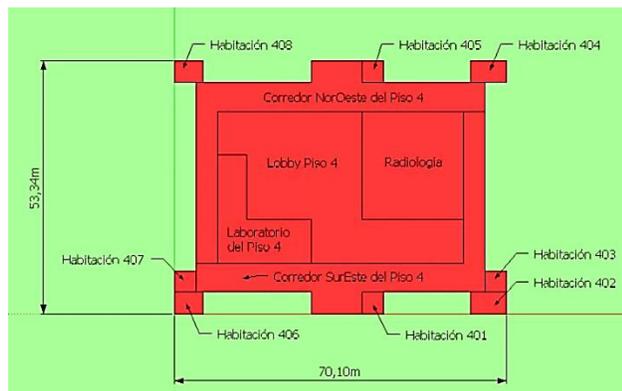
En la tercera planta se encuentran las zonas térmicas de Fisioterapia, Lobby piso 3, laboratorio del piso 3, corredor sureste del piso 3, corredor noroeste del piso 3, habitación 301, habitación 302, habitación 303, habitación 304, habitación 305, habitación 306, habitación 307, habitación 308, como se observa en la *Figura 19*.

Figura 19. Zonas en la tercera planta del edificio hospital. Fuente: El Autor



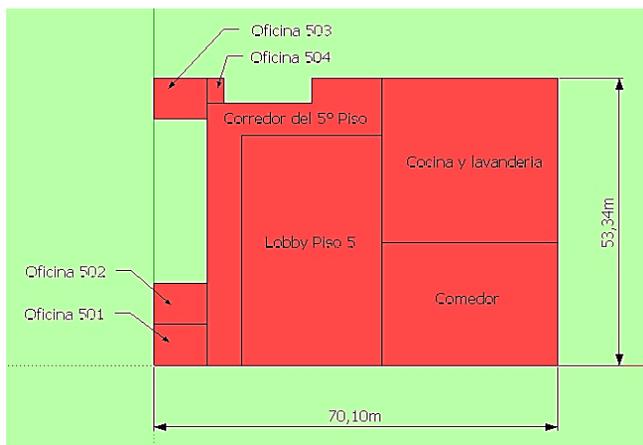
En la cuarta planta se encuentran las zonas térmicas de radiología, Lobby piso 4, laboratorio del piso 4, corredor sureste del piso 4, corredor noroeste del piso 4, habitación 401, habitación 402, habitación 403, habitación 404, habitación 405, habitación 406, habitación 407, habitación 408, como se observa en la *Figura 20*.

Figura 20. Zonas en la cuarta planta del edificio hospital. Fuente: El Autor



En la quinta planta se encuentran las zonas térmicas de comedor, cocina y lavandería, lobby piso 5, corredor del 5° piso, oficina 501, oficina 502, oficina 503, oficina 504, como se observa en la *Figura 21*.

Figura 21. Zonas en la quinta planta del edificio hospital. Fuente: El Autor



8.2.3. Introducción de datos para la simulación con EnergyPlus®

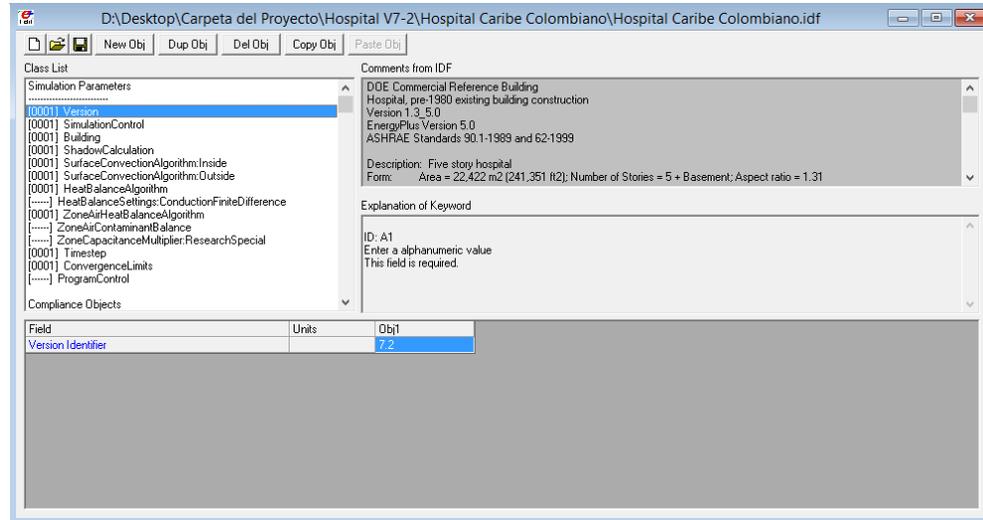
En esta sección se someterá el edificio de hospital a la simulación por un periodo de un año (8760 horas) con el programa de cálculo *EnergyPlus V7-2*, lo cual utiliza el método de balance de calor para el cálculo de cargas térmicas en los diferentes modelos de hospital.

Se mostrará cómo se realizó la introducción de los diferentes datos recolectados previos a la simulación.

8.2.3.1. Editor idf

EnergyPlus® presenta un editor IDF (Instrument Definition) para los datos de entrada, *Figura 22*. El editor IDF es simple, “inteligente” este editor lee el Data Dictionary (IDD) de EnergyPlus y permite la creación y revisión de archivos de entrada (IDF). Se puede ejecutar desde un acceso directo en el directorio principal *EnergyPlus®* (creado como parte de la instalación) o directamente desde EP-Launch.

Figura 22. Editor IDF de EnergyPlus® V7-2. Fuente: El Autor



8.2.3.2. Parámetros de simulación

- Simulación de control

Se introducen los tipos de simulación que va a realizar el programa a partir de los datos, como se observa en la *Figura 23*, las cuales son:

- ❖ Cálculo del dimensionamiento de la zona: **(Yes)**
- ❖ Cálculo del dimensionamiento del sistema: se refiere al cálculo de accesorios del sistema **(Yes)**
- ❖ Cálculo del dimensionamiento de la planta: **(Yes)**
- ❖ Simulación para un día de diseño: **(No)**, referido para condiciones y características especiales para un día cualquiera que se define posteriormente.

- ❖ Simulación para un archivo climático: (**Yes**), significa realizar la simulación para un período de tiempo previamente cargado por el usuario con valores históricos climatológicos.

Figura 23. Simulación de control. Fuente: El Autor.

Field	Units	Obj1
Do Zone Sizing Calculation		YES
Do System Sizing Calculation		YES
Do Plant Sizing Calculation		YES
Run Simulation for Sizing Periods		NO
Run Simulation for Weather File Run Periods		YES

- Edificación

Se introducen los datos de orientación del edificio, como se observa en la *Figura 24*

- ❖ Nombre: Hospital de Barranquilla
- ❖ Eje norte: Especifica un valor en grados que representa el desfase del frente del edificio con relación al norte real.
- ❖ Terreno: Especifica el tipo de terreno en que se encuentra el edificio y las posibilidades pueden ser: campo, ciudad, suburbio, zona industrial, océano.
- ❖ Distribución solar: Determina como EnergyPlus® maneja la radiación solar y su incidencia sobre las superficies exteriores, las posibles variantes son: sombra mínima, exterior expuesto al sol, exterior e interior expuesto al sol.

Figura 24. Datos de orientación de la edificación. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1
Name		HOSPITAL
North Axis	deg	0
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value		0,04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,2
Solar Distribution		FullInteriorAndExteri
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		6

8.2.3.3. Localización y clima

- Localización

Se introduce el nombre de la localidad, coordenadas globales, altura y zona horaria, establecidos en el ítem 8:1.1., como se observa en la *Figura 25*.

Figura 25. Localización. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1
Name		Barranquilla
Latitude	deg	10,88
Longitude	deg	-74,78
Time Zone	hr	-5
Elevation	m	30

- Periodo de simulación

Se introduce el periodo de simulación comenzando desde el 1° de enero hasta el 31 de diciembre, utilizando el archivo climático, como se observa en la *Figura 26*.

Figura 26. Periodo de simulación. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1
Name		Hospital del Caribe Colombiano
Begin Month		1
Begin Day of Month		1
End Month		12
End Day of Month		31
Day of Week for Start Day		UseWeatherFile
Use Weather File Holidays and Special Days		No
Use Weather File Daylight Saving Period		No
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated		1
Increment Day of Week on repeat		

- Temperatura terrestre

Se introduce la temperatura terrestre que se encuentra externa a la edificación para todos los meses del año como se observa en la *Figura 27*.

Figura 27. Temperatura terrestre mensual. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1
January Ground Temperature	C	27,7
February Ground Temperature	C	28
March Ground Temperature	C	28
April Ground Temperature	C	28,5
May Ground Temperature	C	29,3
June Ground Temperature	C	29,3
July Ground Temperature	C	28,9
August Ground Temperature	C	29,2
September Ground Temperature	C	29
October Ground Temperature	C	28
November Ground Temperature	C	27,9
December Ground Temperature	C	28

8.2.3.4. Elementos de construcción

En EnergyPlus®, primero hay que especificar y nombrar todos los materiales que hacen parte de la envolvente del edificio, luego, a partir de esta información se procede a definir las “Construcciones” (construcciones) combinando Layers (Capas) de los distintos materiales en un orden que va desde el exterior hacia el interior de la zona.

- Materiales

Se introducen los nombres y las propiedades de los materiales que hacen parte de la envolvente del edificio según la *Tabla 4*, como se observa en la *Figura 28*.

Figura 28. *Propiedades de los materiales. Fuente: El Autor*

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Madera	Enlucido de Yeso	Ladrillo Ceramico Hueco	Lana Mineral Ecovent	Hormigon Armado 120mm
Roughness		MediumSmooth	MediumRough	Rough	MediumRough	Rough
Thickness	m	0,15	0,015	0,07	0,05	0,12
Conductivity	W/m-K	0,12	0,3	0,4375	0,038	1,63
Density	kg/m3	540	800	930	80	2400
Specific Heat	J/kg-K	1210	880	1000	800	805
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,7	0,1	0,7	0,7	0,7
Visible Absorptance		0,7	0,92	0,7	0,7	0,7

- Construcciones

Se introducen las capas de materiales que conforman la fachada, la cubierta, el techo, el suelo, las paredes y las ventanas del edificio, según la *Tabla 5*, como se observa en la *Figura 29*.

Figura 29. Capas de materiales en la envolvente del edificio. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		Fachada	Cubierta	Suelo del Cimiento	Pared Interna	Suelo Interno	Techo Interno	Pared del Cimiento	Ventana No Fija
Outside Layer		Enlucido de Y	Mortero 30m	Hormigon Armado 1	Yeso Laminado	Yeso Laminado	Acabado Cerámico	Hormigon Armado 1	Montaje de Ventana
Layer 2		Ladrillo Cerámico	Manto Priedo	Lana Fiberglass 20n	Lana Fiberglass	Lana Fiberglass	Mortero 50mm	Lana Fiberglass 50n	
Layer 3		Lana Mineral	Impermeabilizante	Mortero 50mm	Cámara de Aire	Hormigon Armado	Lana Fiberglass 2	Yeso Laminado	
Layer 4		Hormigon Armado	Lana Fiberglass	Acabado Cerámico	Lana Fiberglass	Lana Fiberglass	Hormigon Armado		
Layer 5		Enlucido de Y	Mortero 30m		Yeso Laminado	Mortero 50mm	Lana Fiberglass 5		
Layer 6			Hormigon Armado			Acabado Cerámico	Yeso Laminado		
Layer 7									

8.2.3.5. Zonas térmicas y superficies

- Zonas térmicas

Se introduce el nombre de 55 Zonas Térmicas que conforman el hospital, según la *Tabla 6*, como se observa en la *Figura 30*.

Figura 30. Zonas térmicas del edificio. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Cimientos del Hospital	Corredor del 1° Piso	Corredor del 2° Piso	Corredor del 5° Piso	Corredor NorOeste del Piso 3
Direction of Relative North	deg	0	0	0	0	0
X Origin	m	0	0	0	0	0
Y Origin	m	0	0	0	0	0
Z Origin	m	0	0	0	0	0
Type		1	1	1	1	1
Multiplier		1	1	1	1	1
Ceiling Height	m					
Volume	m3					
Floor Area	m2	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Zone Inside Convection Algorithm						
Zone Outside Convection Algorithm		AdaptiveConvectionAlgorithm	AdaptiveConvectionAlgorithm	AdaptiveConvectionAlgorithm	AdaptiveConvectionAlgorithm	AdaptiveConvectionAlgorithm
Part of Total Floor Area		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

- Dimensionamiento de las superficies del edificio

El dimensionamiento de las superficies del edificio es posible debido a la compatibilidad de algunos programas arquitectónicos capaces de exportar mediante plugin cada una de las coordenadas de la edificación, asumiendo cualquier especificación técnica, el software más común y utilizado con este fin es el Google SketchUp. Editando el modelo en Google SketchUp se definen las características de las superficies del edificio tales como nombre, tipo de superficie, condiciones de frontera, exposición al sol y al viento, número de vértices, coordenadas de los vértices, etc., como se observa en la *Figura 31*.

Figura 31. Dimensionamiento de las superficies del edificio. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Cimiento Techo	Cimiento Suelo	Cimiento Pared Este	Cimiento Pared Nort	Cimiento Pared Sur	Cimiento Pared Des
Surface Type		Ceiling	Floor	Wall	Wall	Wall	Wall
Construction Name		Techo Interno	Suelo del Cimiento	Pared del Cimiento	Pared del Cimiento	Pared del Cimiento	Pared del Cimiento
Zone Name		Cimientos del Hospit					
Outside Boundary Condition		Surface	Ground	Ground	Ground	Ground	Ground
Outside Boundary Condition Object		Sala de Registros d					
Sun Exposure		NoSun	NoSun	NoSun	NoSun	NoSun	NoSun
Wind Exposure		NoWind	NoWind	NoWind	NoWind	NoWind	NoWind
View Factor to Ground		0	0	0	0	0	0
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0	70,104	70,104	70,104	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	53,34	53,34	0	53,34	0	53,34
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	-2,439	0	0	0	0
Vertex 2 X-coordinate	m	0	70,104	70,104	70,104	0	0
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	0	53,34	0	53,34
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	-2,439	-2,439	-2,439	-2,439	-2,439

- Dimensionamiento de las ventanas del edificio

Editando el modelo en Google SketchUp se definen las características de las ventanas del edificio tales como nombre, tipo de superficie, condiciones de frontera, número de vértices, coordenadas de los vértices, etc., como se observa en la *Figura 32*.

Figura 32. Dimensionamiento de las ventanas del edificio. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Comedor Ventana Sur	Lobby Sala de Urgencias Ventana Este	Unidad de Cuidados Intensivos Ventana Oeste	Habitación UCI 1 Ventana
Surface Type		Window	Window	Window	Window
Construction Name		Ventana Fija	Ventana Fija	Ventana Fija	Ventana Fija
Building Surface Name		Comedor Pared Sur	Lobby Sala de Urgencias Pared Este 1	Unidad de Cuidados Intensivos Pared Oeste	Habitación UCI 1 Pared
Outside Boundary Condition Object					
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Shading Control Name					
Frame and Divider Name					
Multiplier		1	1	1	1
Number of Vertices		4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	40,195	70,104	0	28,682
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	14,202	20,936	53,34
Vertex 1 Z-coordinate	m	19,202	2,134	6,401	6,401
Vertex 2 X-coordinate	m	40,195	70,104	0	28,682
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	14,202	20,936	53,34
Vertex 2 Z-coordinate	m	17,983	0,914	5,182	5,182
Vertex 3 X-coordinate	m	69,533	70,104	0	24,658
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	39,138	0,4	53,34
Vertex 3 Z-coordinate	m	17,983	0,914	5,182	5,182

8.2.3.6. Ganancias internas

Ese introduce información sobre el número de personas para las diferentes zonas térmicas del hospital, como se observa en la *Figura 33*. Los subparámetros que se ocupan para las entradas de datos son los siguientes:

- ❖ Nombre: Se especifica el nombre de la zona de donde se está definiendo el número de personas, se deberá seleccionar coherentemente con todas las zonas térmicas definidas anteriormente.
- ❖ Horario para el número de personas: Se ingresa el horario que describa el número de personas para esa zona térmica previamente definido.
- ❖ Método de cálculo del número de personas: Se ingresa la forma de calcular el número de personas
- ❖ Área de zona por número de personas: Se ingresa la fracción conociendo el área de cada zona.
- ❖ Fracción de radiación: Fracción de la energía liberada por las personas que se considera como de onda larga o radiante. Por lo general se utiliza el valor de 0.3

- ❖ **Horario de actividad:** Se refiere al horario de generación de calor por la actividad de las personas. Una idea conveniente para usos en edificios es construir un horario de actividad general que identifique el trabajo que realizan las personas.

Figura 33. Ganancias internas de personas por zona térmica. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Personas Cimientos	Personas Corredor 1° Piso	Personas Corredor 2° Piso	Personas Corredor 5° Piso	Personas Corredor NorOeste 1
Zone or ZoneList Name		Cimientos del Hospil	Corredor del 1° Piso	Corredor del 2° Piso	Corredor del 5° Piso	Corredor NorOeste del Piso 3
Number of People Schedule Name		ADMINISTRATIVO	ADMINISTRATIVO	ADMINISTRATIVO	ADMINISTRATIVO	ADMINISTRATIVO
Number of People Calculation Method		Area/Person	Area/Person	Area/Person	Area/Person	Area/Person
Number of People						
People per Zone Floor Area	person/m2					
Zone Floor Area per Person	m2/person	37,1747	92,5926	92,5926	92,5926	92,5926
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		ACTIVITY_SCH	ACTIVITY_SCH	ACTIVITY_SCH	ACTIVITY_SCH	ACTIVITY_SCH

8.2.4. Resultados de la simulación

8.2.4.1. Reporte de salidas

La obtención de los resultados y la definición de las variables a resolver en EnergyPlus® no requieren de una gran complicidad técnica comparado con la introducción de datos en el *software*, aunque el programa posee un amplio volumen de variables de resultados, se recomienda enfocarse sólo en lo que se quiere obtener, debido a que las amplias posibilidades que éste ofrece pueden llegar a confundir. En la *Figura 34* se observa el tipo de información que se requiere en el reporte, donde se especifica, además del reporte completo, resumen de los componentes de demanda y uso de energía y un resumen de la envolvente del hospital.

Figura 34. Tipo de información en el reporte de salidas. Fuente: El Autor

Field	Units	Obj1
Report 1 Name		AllSummary
Report 2 Name		DemandEndUseComponentsSummary
Report 3 Name		SourceEnergyEndUseComponentsSummary
Report 4 Name		EnvelopeSummary
Report 5 Name		

En la *Figura 35* se observa el estilo de reporte (HTML) y las unidades (KWH) en que se requieren los valores de energía.

Figura 35. *Estilo y unidades en el reporte de salidas. Fuente: El Autor*

Field	Units	Obj1
Column Separator		HTML
Unit Conversion		JtoKWH <input type="text"/>

8.2.4.2. Resultados de energía primaria y energía final

Como se observa en la *Figura 36*, el reporte de salida muestra valores de Energía Final (Site Energy) y Energía Primaria (Source Energy) en KWh y KWh/m² para el modelo 1 de hospital durante un periodo de 8760 horas (1 año).

Figura 36. *Resultados de energía primaria y energía final en el modelo 1. Fuente: El Autor*

Program Version:EnergyPlus-Windows-OMP-64 7.2.0.006, YMD=2017.05.11 18:18

Tabular Output Report in Format: HTML

Building: HOSPITAL

Environment: HOSPITAL DEL CARIBE COLOMBIANO MODELO 1 ** Barranquilla COLOMBIA - TMY2-251 WMO#=#

Simulation Timestamp: 2017-05-11 18:19:01

Report: Annual Building Utility Performance Summary

For: Entire Facility

Timestamp: 2017-05-11 18:19:01

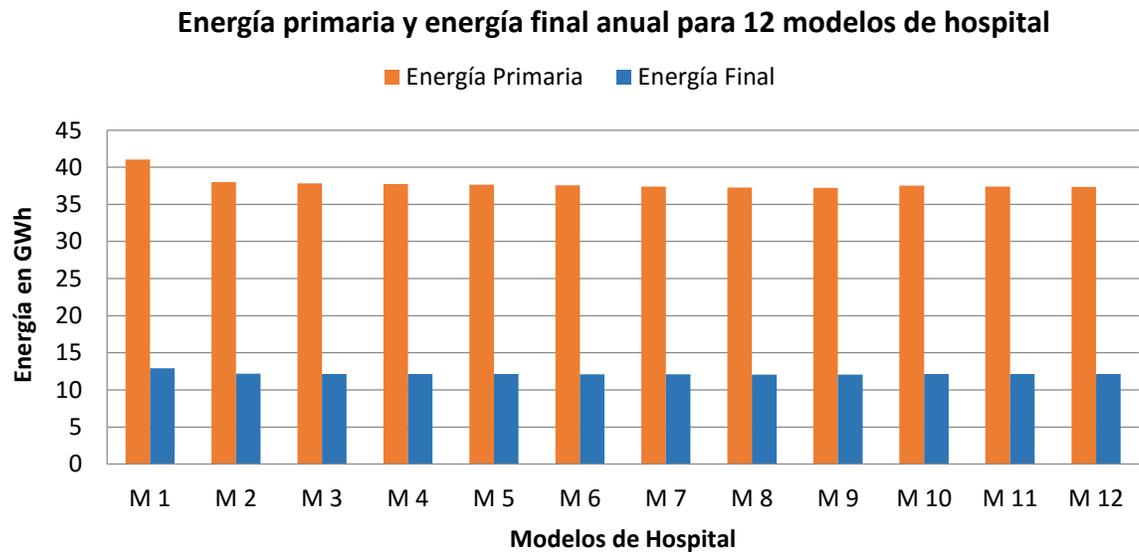
Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	12897573.34	575.57	575.57
Net Site Energy	12897573.34	575.57	575.57
Total Source Energy	41038785.55	1831.42	1831.42
Net Source Energy	41038785.55	1831.42	1831.42

En las *Figura 37* se observa un diagrama de barras con los resultados de energía primaria y energía final arrojados por la simulación de 12 modelos de Hospital. En el *Anexo A* se encuentran tabulados los valores.

Figura 37. Resultados de energía primaria y energía final anual para 12 modelos de hospital. Fuente: El Autor



El reporte de salida de resumen de los componentes de demanda y uso de la energía muestra valores de Energía Final anual por unidad de área expresada en consumo de energía eléctrica (Lighting y HVAC) y consumo de gas natural (Heating) para calentamiento de agua, como se muestra en la *Figura 38*.

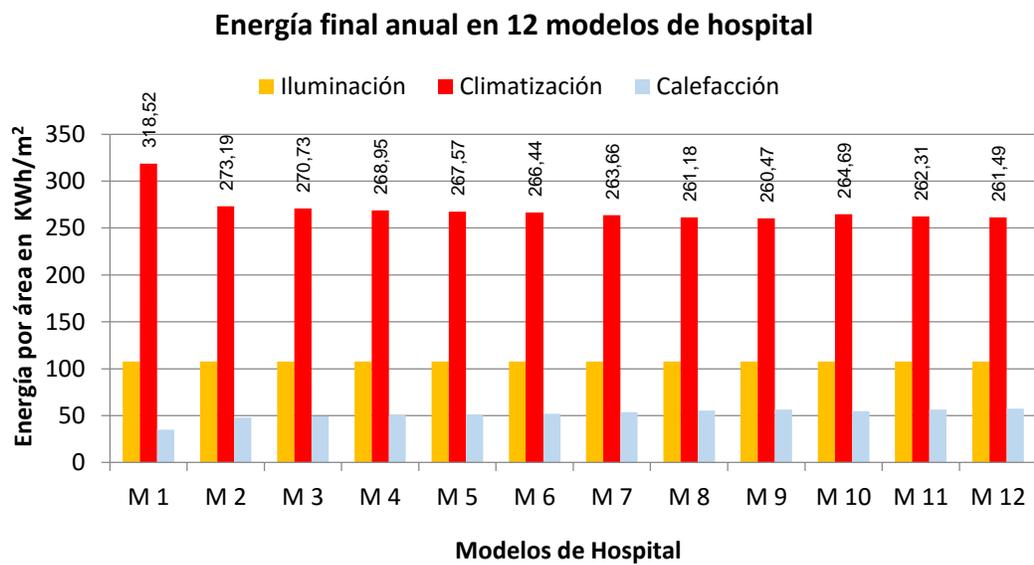
Figura 38. Resultados de energía final anual por unidad de área. Fuente: El Autor

Utility Use Per Total Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m ²]	Natural Gas Intensity [kWh/m ²]	Other Fuel Intensity [kWh/m ²]	District Cooling Intensity [kWh/m ²]	District Heating Intensity [kWh/m ²]	Water Intensity [m ³ /m ²]
Lighting	107.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	318.52	18.11	0.00	0.00	0.00	2.12
Other	114.51	16.84	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	540.63	34.95	0.00	0.00	0.00	2.12

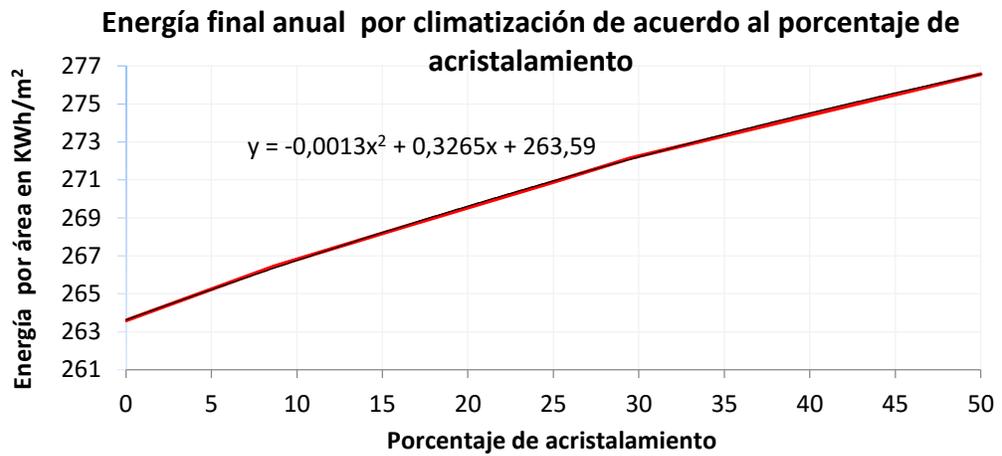
En las *Figura 39* se observa diagrama de barras con los resultados de energía final por iluminación, climatización y calefacción arrojados por la simulación de 12 modelos de Hospital. En el *Anexo A* se encuentran tabulados los valores.

Figura 39. Resultados de energía final anual de climatización, iluminación y calefacción en los 12 modelos de hospital. Fuente: El Autor



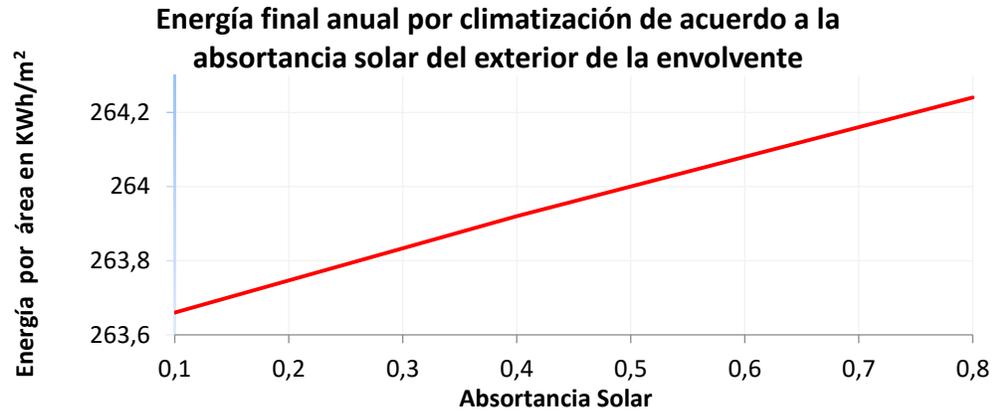
En la *Figura 40* se observa un diagrama con los resultados de energía final por climatización de acuerdo al porcentaje de acristalamiento del edificio. En el *Anexo C* se encuentran tabulados los valores. Para elaborar este diagrama se utilizó el modelo 6, con aislamiento térmico en la envolvente de 30 mm, al cual se le varió la relación de acristalamiento.

Figura 40. Resultados de energía final anual por climatización contra porcentaje de acristalamiento del edificio. Fuente: El Autor



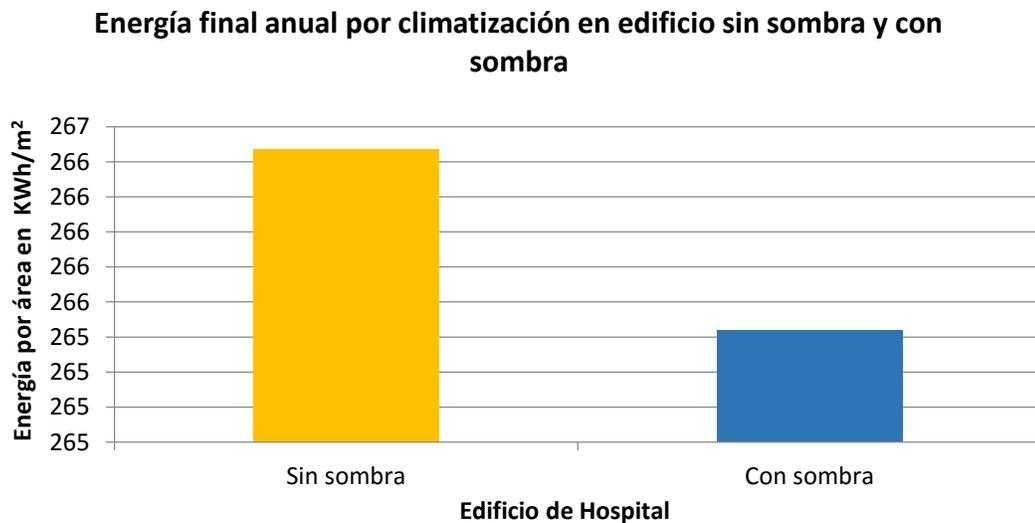
En la *Figura 41* se observa un diagrama con los resultados de energía final anual por climatización de acuerdo a la absorción solar de la capa externa de la envolvente. Para elaborar este diagrama se utilizó el modelo 6, con aislamiento térmico en la envolvente de 50 mm. En el *Anexo D* se encuentran tabulados los valores.

Figura 41. Resultados de energía final anual por climatización contra absorción solar de la capa externa de la envolvente del edificio. Fuente: El Autor



En la *Figura 42* se observa un diagrama con los resultados de energía final anual por climatización para el edificio sin sombra y con sombra por las cuatro fachadas. Para elaborar este diagrama se utilizó el modelo 6, con aislamiento térmico en la envolvente de 30 mm. En el *Anexo E* se encuentran tabulados los valores.

Figura 42. Resultados de energía final anual por climatización para el edificio sin sombreado y con sombreado general. Fuente: El Autor



8.2.4.3. Resultados de transmitancia térmica en fachada, cubierta y ventanas

La *Figura 43* muestra el reporte de salida resumen de la envolvente que muestra el nombre de las zona térmica, las superficies de las áreas térmicas (construction), el valor de reflectancia, los valores de transmitancia térmica en fachada, cubierta y ventanas, el área que ocupa la zona térmica en m², el ángulo azimut en grados y la orientación cardinal de la zona térmica.

Figura 43. Resultados de transmitancia térmica en fachada, cubierta y ventanas. Fuente: El Autor

Report: Envelope Summary

For: Entire Facility

Timestamp: 2017-05-11 18:19:01

Opaque Exterior

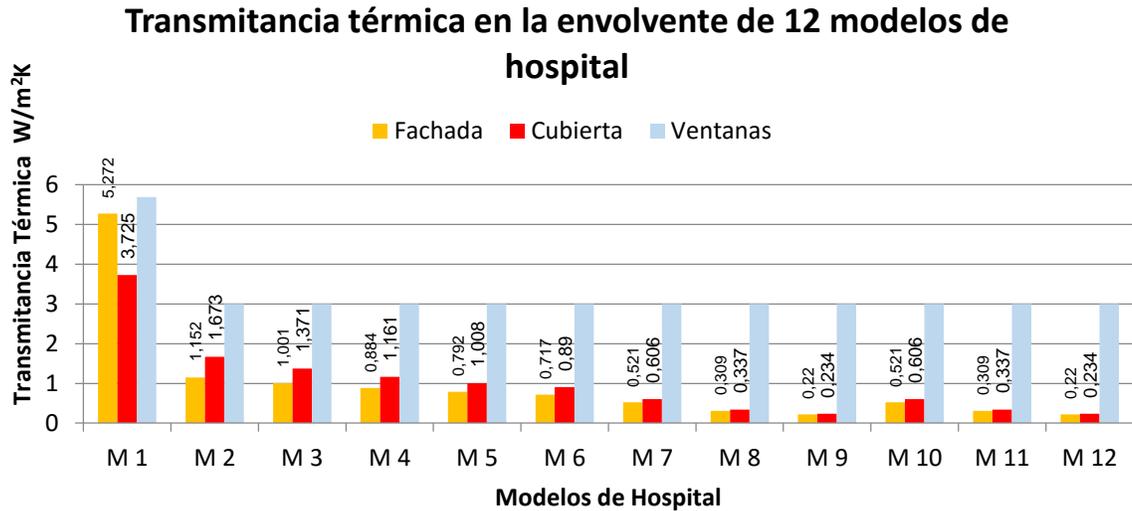
	Construction	Reflectance	U-Factor with Film [W/m2-K]	U-Factor no Film [W/m2-K]	Gross Area [m2]	Azimuth [deg]	Tilt [deg]	Cardinal Direction
CIMIENTO PARED ESTE	PARED DEL CIMENTO	0.30	5.272	25.000	130.10	90.00	90.00	E
CIMIENTO PARED NORTE	PARED DEL CIMENTO	0.30	5.272	25.000	170.98	0.00	90.00	N
CIMIENTO PARED SUR	PARED DEL CIMENTO	0.30	5.272	25.000	170.98	180.00	90.00	S
CIMIENTO PARED OESTE	PARED DEL CIMENTO	0.30	5.272	25.000	130.10	270.00	90.00	W
CIMIENTO SUELO	SUELO DEL CIMENTO	0.30	3.533	25.000	3739.35	0.00	180.00	
CORREDOR DEL 1° PISO PARED NORTE	FACHADA	0.30	5.272	25.000	45.53	0.00	90.00	N
CORREDOR DEL 1° PISO PARED SUR	FACHADA	0.30	5.272	25.000	45.53	180.00	90.00	S
CORREDOR DEL 2° PISO PARED NORTE	FACHADA	0.30	5.272	25.000	45.53	0.00	90.00	N
CORREDOR DEL 2° PISO PARED SUR	FACHADA	0.30	5.272	25.000	45.53	180.00	90.00	S
CORREDOR DEL 5° PISO PARED NORTE 1	FACHADA	0.30	5.272	25.000	52.04	0.00	90.00	N
CORREDOR DEL 5° PISO PARED SUR 2	FACHADA	0.30	5.272	25.000	26.02	180.00	90.00	S
CORREDOR DEL 5° PISO PARED OESTE 2	FACHADA	0.30	5.272	25.000	19.51	270.00	90.00	W
CORREDOR DEL 5° PISO TECHO	CUBIERTA	0.30	3.725	12.500	501.68	180.00	0.00	
CORREDOR NOROESTE DEL PISO 3 PARED NORTE 1	FACHADA	0.30	5.272	25.000	45.53	0.00	90.00	N

Exterior Fenestration

	Construction	Glass Area [m2]	Frame Area [m2]	Divider Area [m2]	Area of One Opening [m2]	Area of Multiplied Openings [m2]	Glass U-Factor [W/m2-K]	Glass SHGC	Glass Visible Transmittance	Frame Conductance [W/m2-K]	Divider Conductance [W/m2-K]	Shade Control	Parent Surface	Azimuth [deg]	Tilt [deg]	Cardinal Direction
COMEDOR VENTANA SUR	VENTANA FIJA	35.76	0.00	0.00	35.76	35.76	5.689	0.830	0.804			No	COMEDOR PARED SUR	180.00	90.00	S
LOBBY SALA DE URGENCIAS VENTANA ESTE	VENTANA FIJA	30.42	0.00	0.00	30.42	30.42	5.689	0.850	0.804			No	LOBBY SALA DE URGENCIAS PARED ESTE 1	90.00	90.00	E
UNIDAD DE CUIDADOS INTENSIVOS VENTANA OESTE	VENTANA FIJA	25.03	0.00	0.00	25.03	25.03	5.689	0.850	0.804			No	UNIDAD DE CUIDADOS INTENSIVOS PARED OESTE	270.00	90.00	W

En las *Figura 44* se observa diagrama de barras con los resultados de transmitancia térmica U de la fachada, cubierta y ventanas arrojados por la simulación para 12 modelos de Hospital. En el *Anexo A* se encuentran tabulados los valores.

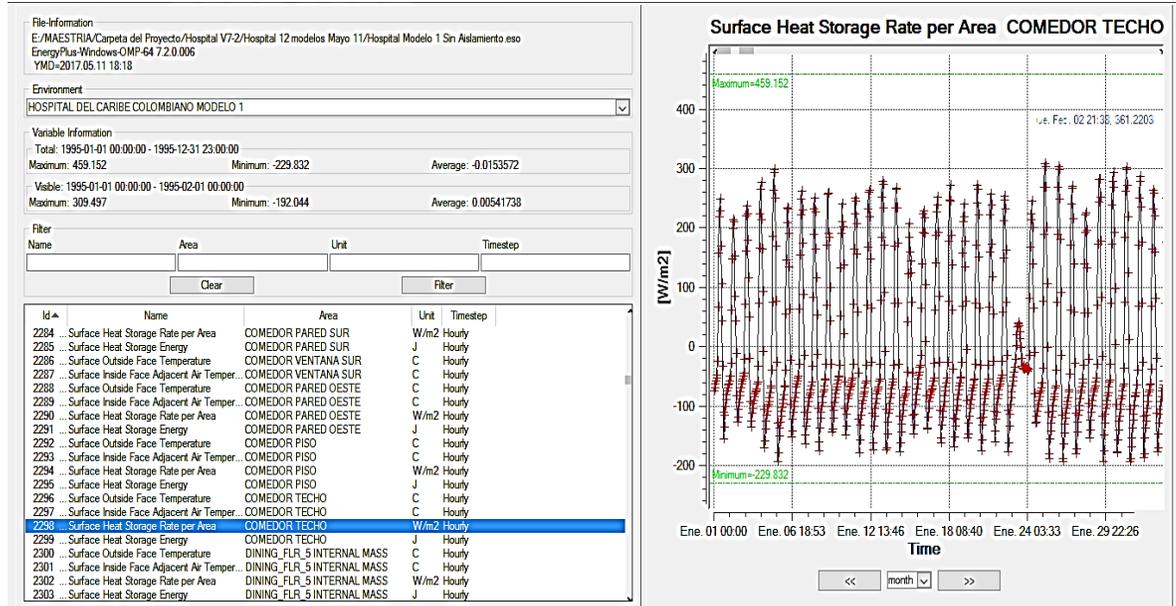
Figura 44. Resultados de transmitancia térmica para fachada, cubierta y ventanas en los 12 modelos de hospital.
Fuente: El Autor.



8.2.4.4. Resultados de calor superficial almacenado por unidad de área (OTTV)

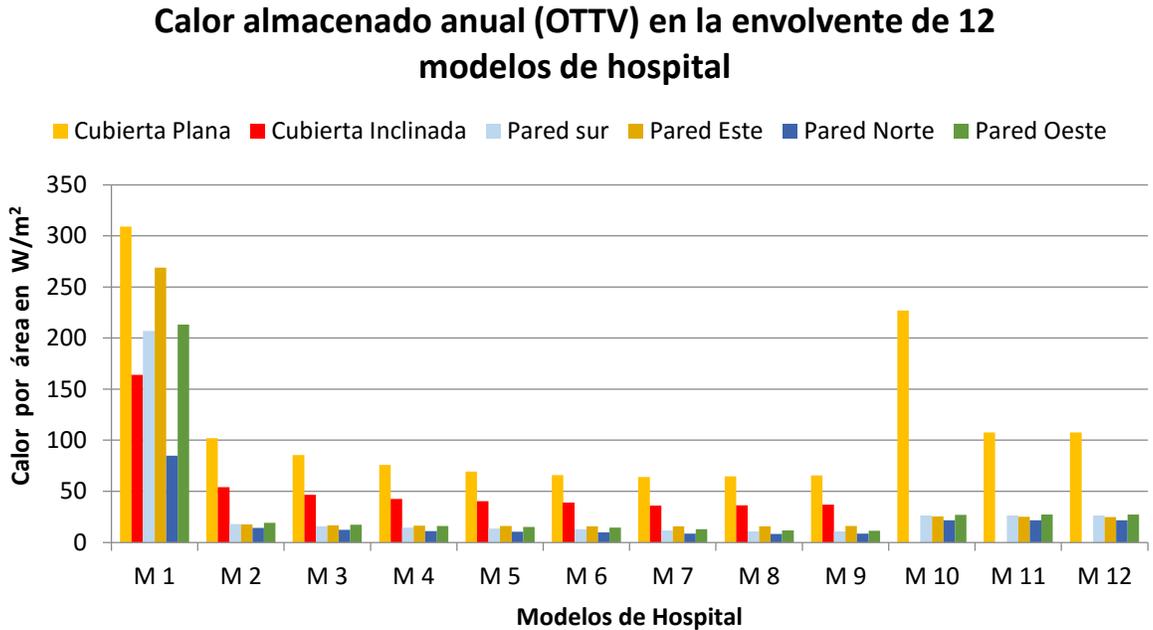
El comportamiento del calor superficial almacenado en la envolvente del edificio puede analizarse mediante un *plug* compatible con EnergyPlus denominado *xEsoView*, demostrando de esta forma el uso de diversos métodos gráficos que ayudan al usuario a interpretar los resultados. En la *Figura 45* muestra, en *xEsoView*, los valores máximos, mínimos y promedio de calor superficial almacenado por unidad de área (OTTV) para el techo del comedor del modelo 1 de hospital.

Figura 45. Resultados de calor superficial almacenado por unidad de área. Fuente: El Autor



En la *Figura 46* se observa un diagrama de barras con los resultados de calor almacenado por unidad de área $[W/m^2]$ para la cubierta plana, cubierta inclinada hacia el norte, pared sur, pared este, pared norte y pared oeste arrojados por la simulación en las zonas térmicas más críticas (comedor y la oficina 503) para los 12 modelos de Hospital. En el *Anexo B* se encuentran tabulados los valores.

Figura 46. Resultados de calor almacenado por unidad de área en W/m^2 en la cubierta plana, cubierta inclinada, pared sur, pared este, pared norte y pared oeste para los 12 modelos de hospital. Fuente: El Autor.



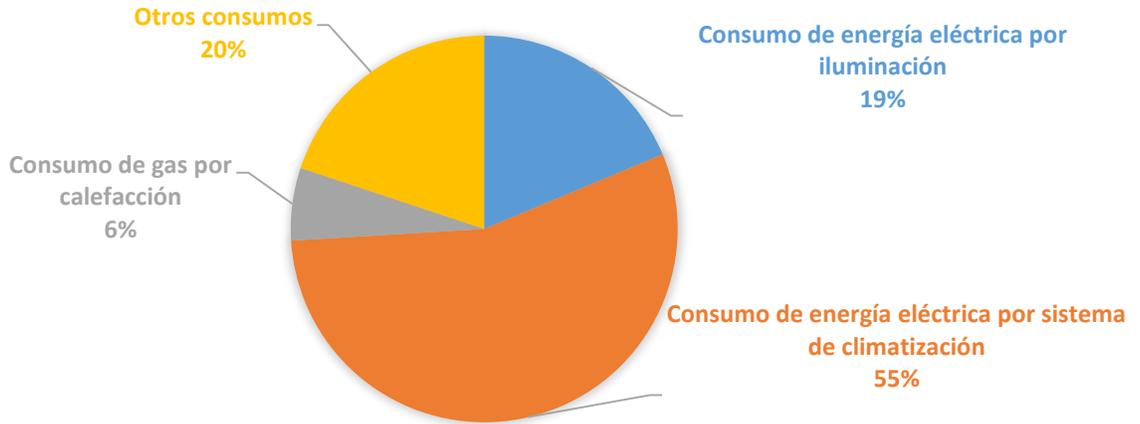
8.2.5. Análisis de resultados

8.2.5.1. Análisis de resultados de energía final

La *Figura 47* muestra los resultados en porcentaje de consumo energético final para el edificio de hospital sin aislamiento en su envolvente, evidenciando que el consumo de energía eléctrica por sistema de climatización es mayor (55%) que los otros tipos de consumo.

Figura 47. Porcentaje de consumo energético final en el edificio de hospital sin aislamiento térmico en su envolvente. Fuente: El Autor

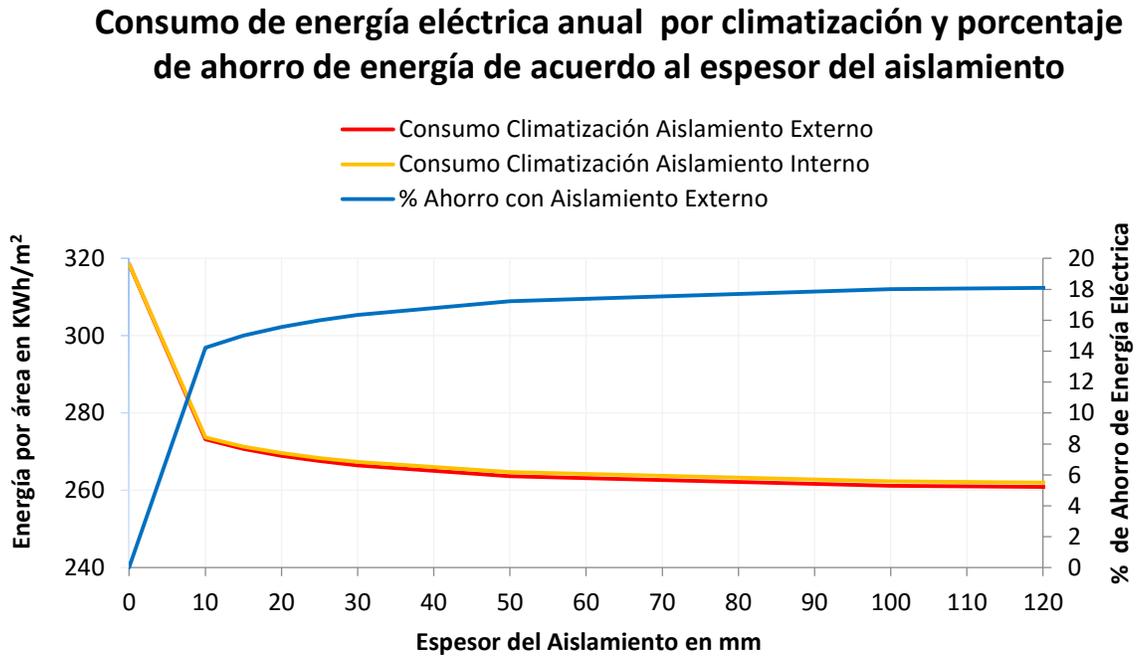
Porcentajes de consumo de energía final en el edificio de hospital



La *Figura 48* muestra que el uso de materiales aislantes térmicos en su envolvente, como lana mineral, yeso y ladrillo cerámico hueco, suministran hasta un 18% de ahorro en el consumo de energía eléctrica por sistema de climatización, mientras los consumos por iluminación y calefacción se mantienen constantes, además el aislamiento térmico por el exterior ofrece menor consumo de energía eléctrica que el aislamiento por el interior

Este análisis evidencia que existe un potencial de ahorro de energía en la climatización del edificio, ya que, como se observa en la *Figura 40*, los consumos de energía por iluminación y calefacción permanecen prácticamente constantes con la variación de materiales en la envolvente.

Figura 48. Consumo anual y porcentaje de ahorro de energía eléctrica por sistema de climatización de acuerdo al espesor del aislamiento térmico interno y externo. Fuente: El Autor

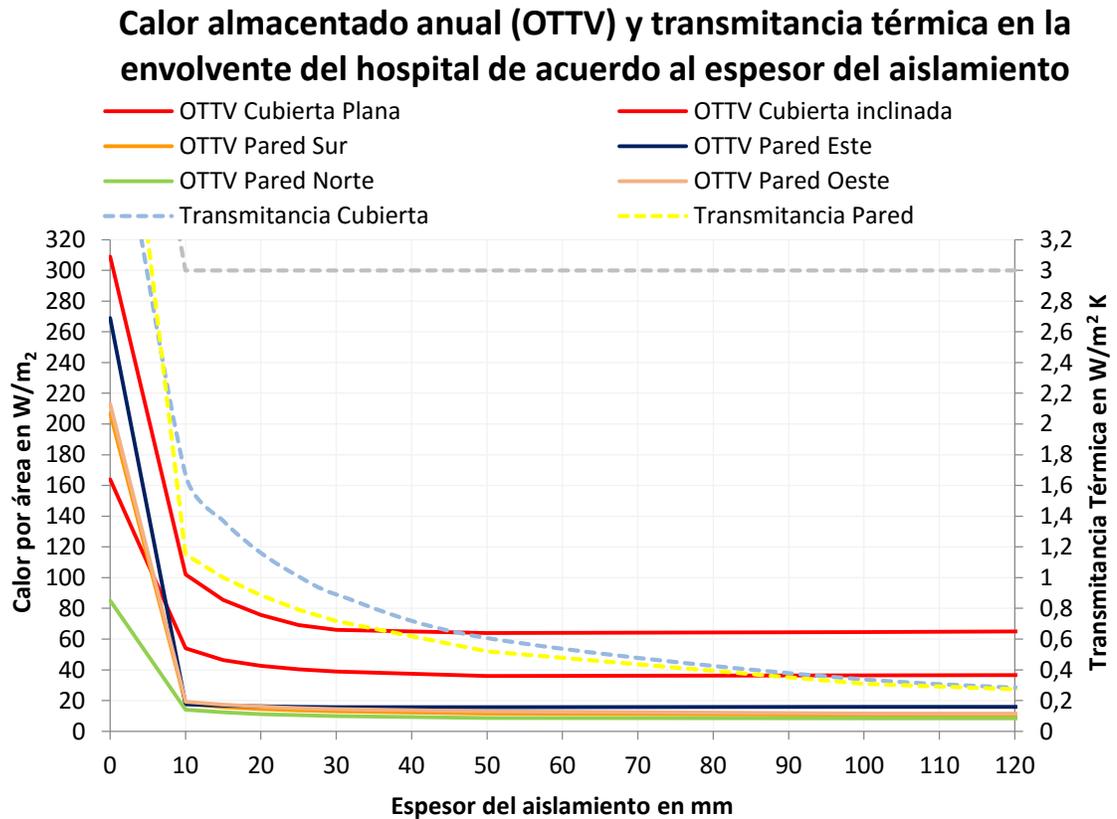


8.2.5.1. Análisis de resultados de transmitancia térmica en la envolvente

A fin de que una fachada sea adecuada para un clima cálido el valor de U máximo no debe sobrepasar de 1,1 W/m² K [1].

La *Figura 49* muestra los resultados de transmitancia térmica de acuerdo al espesor del aislamiento externo para la cubierta, pared y ventana del edificio de hospital evidenciando que el espesor de aislamiento térmico mínimo requerido, para lograr una transmitancia térmica máxima de 1,1 W/m² K en la fachada, debe ser de 30 mm.

Figura 49. OTTV y transmitancia térmica para cubierta, paredes y ventana del edificio de hospital de acuerdo al espesor del aislamiento térmico externo. Fuente: El Autor



Análisis de resultados de OTTV en la envolvente

OTTV significa "Valor total de transferencia térmica". Es un valor que indica la tasa media de transferencia de calor en un edificio a través de la envolvente del edificio. Para el caso de fachada de edificios la OTTV no debe exceder de 35 W/m2 [22].

La *Figura 49* muestra los valores de OTTV obtenidos para cubierta, paredes en diferentes orientaciones. En ella se observa que, para cubierta plana sin aislamiento

térmico el valor obtenido es de 300 W/m², mientras que la pared este sin aislamiento térmico es la que presenta mayor valor de 270 W/m² y la pared norte menor valor de 80 W/m².

Para cubierta plana y paredes con aislamiento térmico externo de 10 mm se logra reducir los valores de OTTV en 100 W/m² y 20 W/m² respectivamente

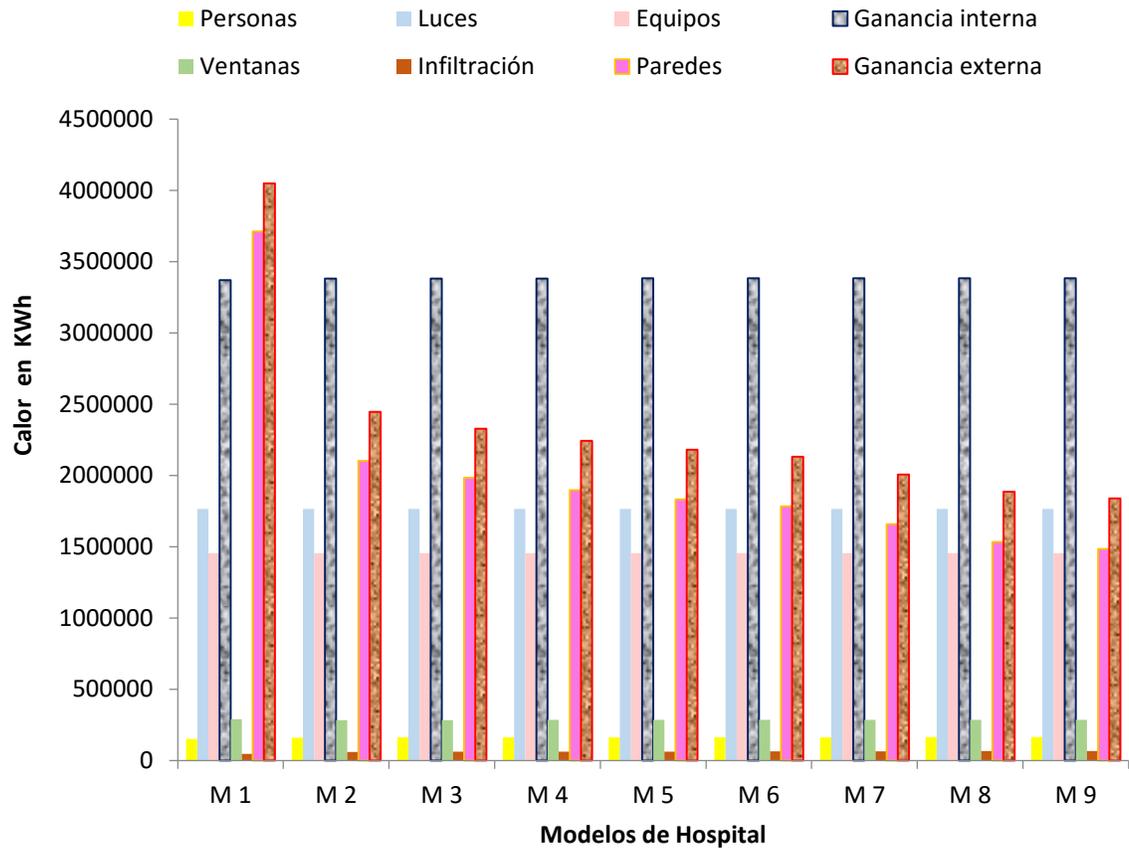
Para cubierta plana y pared norte con aislamiento térmico externo de 30 mm se logra reducir los valores de OTTV en 65 W/m² y 10 W/m² respectivamente y se mantiene constante aunque aumente el espesor del aislamiento

Estos resultados evidencian que la fachada norte del edificio de hospital presenta anualmente menor transferencia de calor, por lo que inclinando la cubierta con aislamiento térmico externo de 30 mm con orientación norte (45°) se logra reducir su OTTV aún más, en 40 W/m²

La *Figura 50* muestra la ganancia de calor interna y externa para 9 modelos de hospital. El modelo 2 al 9 presenta aislamiento externo en su envolvente. Se observa que para el Modelo 1 sin aislamiento la ganancia de calor por conducción a través de las paredes es mucho mayor que por los otros factores y afecta considerablemente la ganancia externa. Gracias al uso de materiales aislantes en la envolvente se logra reducir la ganancia de calor anual interna hasta un 60% y por lo tanto reduce el consumo eléctrico por climatización como se observa en la *Figura 48*. En el *Anexo F* se encuentran tabulados los valores.

Figura 50. *Ganancias de calor interna y externa anual en 9 modelos de hospital. Fuente: El Autor*

Ganancia de calor anual interna y externa en 9 modelos de hospital



En la *Tabla 7* se muestra información comparativa sobre los resultados obtenidos en diferentes investigaciones y los resultados obtenidos en esta investigación.

Tabla 7. Comparación de resultados con investigaciones anteriores. Fuente: El Autor.

Ítem	Parámetro	Título de Artículo	Autor – País	Valor obtenido por el autor	Resultado de Investigación	
1	Consumo de energía eléctrica por sistema de climatización en el edificio	Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China	Jinghua Yu China, 2008	Es menor con aislamiento externo en la envolvente que con aislamiento interno	Es menor con aislamiento externo en la envolvente que con aislamiento interno	
2	Consumo de energía eléctrica por sistema de climatización en el edificio	Study on Daylighting and Energy Conservation Design of Transparent Envelope for office building in Hot Summer and Cold Winter Zone	Jinghua Yu China, 2015	52% del consumo total	55% del consumo total	
3	Ahorro de energía eléctrica por climatización en el edificio	Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China	Jinghua Yu China, 2008	11,55%	18%	
4	Transmitancia Térmica en la envolvente para clima cálido húmedo	Materiales Bioclimáticos	Cedeño Valdiviezo México, 2010	1,1 W/m ² °C	Pared	0,9 (20 mm)
					Cubierta	0,7 (30 mm)
5	OTTV en la envolvente	Overall thermal transfer value (OTTV) : how improve its control in Honk Kong	Sam C.M. Hui Hong Kong, 1997	35 W/m ² promedio en pared y cubierta	Pared	1,1 (20 mm)
					Cubierta	0,9 (30 mm)
6	Espesor óptimo de aislamiento en la envolvente	Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China	Jinghua Yu China, 2008	25 mm	30 mm	
		Determination of optimum insulation thickness for different building walls in Turkey	Ahmet Fertelli Turkia, 2013	10 mm		
7	Relación de Acristalamiento en el edificio donde el consumo de energía es mínimo	Study on Daylighting and Energy Conservation Design of Transparent Envelope for office building in Hot Summer and Cold Winter Zone	Jinghua Yu China, 2015	40%	30%	
8	Absortancia Solar en la pared externa de la envolvente	Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China	Jinghua Yu China, 2008	Hacia 0,2 disminuye el consumo de energía eléctrica por climatización	Hacia 0,2 disminuye el consumo de energía eléctrica por climatización	
9	Orientación del edificio	Study on Daylighting and Energy Conservation Design of Transparent Envelope for office building in Hot Summer and Cold Winter Zone	Jinghua Yu China, 2015	Consumo de energía más bajo en la fachada suroeste	Consumo de energía más bajo en la fachada norte	

8.3. RESULTADOS DE ACTIVIDADES PARA ESTABLECER MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO ASOCIADAS AL DISEÑO CONSTRUCTIVO DE LA ENVOLVENTE DE UN HOSPITAL.

De acuerdo al análisis de los resultados de energía consumida, transmitancia térmica y OTTV que se obtuvieron en la simulación de los modelos de hospital se proponen las siguientes estrategias de ahorro energético asociadas al diseño constructivo de la envolvente de un hospital y se diferencian de las conclusiones establecidas posteriormente.

8.3.5. Estrategias en las propiedades termo físicas de los materiales de la envolvente

- El suelo y techo interno de un hospital debe proporcionar una mínima resistencia acústica de 50 dBA, resistencia al fuego, resistencia a la humedad y aislamiento térmico [20] por lo tanto se recomienda el uso de materiales que tengan estas propiedades como son el yeso laminado, el ladrillo cerámico y la lana mineral, además, se debe controlar el uso de cavidades de aire para evitar la condensación de humedad causante de bacterias.
- Se recomienda el uso de materiales con propiedades de aislamiento térmico en la envolvente, ya que reducen la ganancia externa de calor por conducción a través de las paredes hasta en un 60%.
- Para edificios en clima cálido se recomienda el uso de aislamiento térmico externo en la envolvente por encima del aislamiento térmico interno, debido a que el consumo de energía eléctrica por climatización del edificio es menor.

- Para envolvente con aislamiento externo se recomienda aislamiento con lana mineral de 30 mm, debido a que con este espesor se logra reducir la transmitancia térmica en paredes y cubierta hasta 1 W/m²K, valor recomendado en investigaciones de otros países para envolvente de edificios en clima cálido.
- El uso de aislamiento térmico externo, mínimo con un espesor de 30 mm, en comparación con el no uso, genera hasta 18% de ahorro de energía eléctrica por sistema de climatización y, si se aumenta su espesor hasta 150 mm, sólo se logra una reducción en el consumo de energía eléctrica por climatización del 2%.
- Se recomienda fachada con colores claros como el blanco ya que, entre menos absorción solar presente, menor será el consumo de energía eléctrica por climatización.

8.3.6. Estrategias de acristalamiento en la envolvente

- Se recomienda el uso vidrios reflectantes o de baja radiación de 6 mm en las ventanas por encima de vidrio simple, debido a que ellos poseen un film o imprimación que logra reducir la transmitancia térmica en 50%.
- La función de relación de acristalamiento $Y = 263,62 + 0,326X - 0,0013X$ expresa que, reduciendo 50% la relación de acristalamiento en la envolvente del edificio, obtenemos un ahorro de energía por climatización de 5%. Esto debido a que la disminución de ganancia de calor externa a través del

acristalamiento se traduce en una disminución del consumo energético por climatización.

- El uso de acristalamiento es más favorable por la fachada norte, que es la que presenta menor transferencia de calor por conducción.

8.3.7. Estrategias de orientación del edificio

- La fachada norte del edificio presenta menor tasa media de transferencia de calor anual por lo que se recomienda que la fachada con mayor área se ubique en esta dirección y las de menor área en la dirección Este-Oeste.
- Se recomienda ubicar las zonas térmicas que exigen mayor confort, como las habitaciones y el comedor del hospital, hacia la fachada norte debido a que presenta menor tasa de transferencia de calor anual.
- La inclinación de la cubierta con orientación hacia el norte reduce hasta en un 40% la tasa media de transferencia de calor (OTTV) en la cubierta.
- Debido a que la OTTV en la cubierta duplica la OTTV en la fachada, se recomienda un diseño de edificio con alta compacidad

8.3.8. Estrategias de sombreado en la envolvente

- Se recomienda reducir el factor de sombra a 0,3 con el uso de alerones de sombreado o persianas que suministren sombra horizontal y vertical primordialmente por la fachada este (paredes y ventanas), debido a que presenta mayor tasa de transferencia térmica que las otras fachadas.
- El edificio con sombra por las cuatro fachadas reduce el consumo de energía por climatización en 0,4%

9. CONCLUSIONES

a. Al evaluar el comportamiento energético de una edificación son múltiples los factores que intervienen en los procesos de intercambio de calor entre este y su entorno, pudiéndose categorizar como variables dependientes e independientes en estos procesos. Dentro de las variables independientes se encuentra el clima externo, cuya severidad incide en el comportamiento dinámico del edificio; por su parte, dentro de las variables en las cuales se puede incidir se encuentra el coeficiente de transmitancia térmica - U, el cual ha sido el elemento determinante en la limitación de la demanda energética por parte de los códigos técnicos y normas para el diseño de edificaciones racionales con el consumo energético.

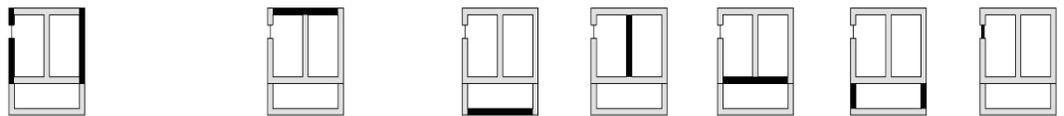
b. Los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía de un edificio de hospital son los mostrados en la *Tabla 8*, siendo los más relevantes lo de la transmitancia térmica y la conductividad térmica del material de la envolvente y son los tenidos en cuenta en los códigos de construcción de otros países para regular la demanda térmica en edificaciones.

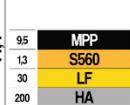
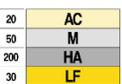
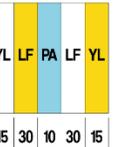
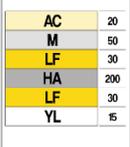
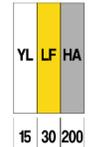
Tabla 8. *Parámetros de mayor impacto en el consumo de energía. Fuente: El Autor.*

Parámetros Físico-Ambientales	Parámetros de Diseño	
Ubicación del edificio	Propiedades termo-físicas de materiales	Transmitancia Térmica
Temperatura exterior del edificio		Conductividad térmica
Radiación solar		Resistencia térmica
Dirección y velocidad del viento		Densidad
		Calor específico
		Absortancia solar
	Relación de acristalamiento	Espesor del material

c. Del análisis del consumo de energía, transmitancia térmica y OTTV, obtenido por la simulación de diferentes modelos de un hospital y considerando los materiales disponibles en el mercado, la configuración de envolvente recomendada para racionalizar los consumos de energía es la mostrada en la *Figura 51*. Los nombres y propiedades de los materiales utilizados se observan en la *Tabla 4*. En la configuración recomendada se establecieron los valores límites de transmitancia térmica y OTTV para regular la ganancia externa de calor de un edificio de hospital en la ciudad de Barranquilla, y esta debe presentar valores de transmitancia térmica de 0,717 W/m²K en la fachada y 0,89 W/m²K en la cubierta y valores de OTTV entre 9,8 y 15,7 W/m² en la fachada y de 38,8 W/m² en la cubierta inclinada hacia el norte.

Figura 51. Configuración de envolvente recomendada para edificios de hospital en ciudad de Barranquilla. Fuente: El Autor.



FACHADA				CUBIERTA			SUELO CIMENTO	PARED INTERNA	SUELO INTERNO - TECHO INTERNO	PARED CIMENTO	VENTANA					
Configuración (medida en mm)	Transmitancia Térmica w/m ² k	OTTV w/m ²		Configuración (medida en mm)	Transmitancia Térmica w/m ² k	OTTV w/m ²		Configuración (medida en mm)	Configuración (medida en mm)	Configuración (medida en mm)	Configuración (medida en mm)					
		Pared Norte	Pared Sur			Pared Este	Pared Oeste					Plana	Inclinada			
	0,717	9,8	13	15,7	14,4	95	13		0,89	66	38,8					

Los resultados de consumo de energía, transmitancia térmica y OTTV son semejantes a los consultados en otras investigaciones y en códigos de construcción

de otros países y se pueden tomar como referencia para otros estudios relacionados con el ahorro energético asociado a la envolvente de edificaciones en la ciudad de Barranquilla.

Actualmente la envolvente utilizada en los edificios de la ciudad de Barranquilla presenta una transmitancia térmica alta, de aproximadamente $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ [44], que no cumple con los valores mínimos establecidos para la tipología estudiada en Barranquilla, afectando considerablemente el consumo de energía en la edificación y en el sistema energético de mayor impacto final en el consumo de energía (climatización).

d. Las medidas de ahorro energético asociadas al diseño constructivo de la envolvente de un hospital están relacionadas con:

- Las propiedades termo físicas de los materiales de la envolvente
- El acristalamiento del edificio
- La orientación del edificio
- El sombreado del edificio

Estas medidas recomiendan el uso de materiales aislantes por la parte externa de la envolvente incluyendo lana mineral de 30 mm de espesor, lo cual reducen hasta en un 60% la ganancia externa de calor a través de las paredes y suministran hasta un 18% de ahorro de energía eléctrica por climatización y un 6% de ahorro en el consumo total.

Otras medidas que suministran ahorro es el uso de colores claros en la capa externa de la fachada, el uso de vidrios refractantes logra reducir la transmitancia térmica en 50%, la reducción de la relación de acristalamiento en un 50% suministra un ahorro del consumo por climatización del 5%, construir la fachada con mayor área

en dirección norte-sur, la inclinación de la cubierta hacia el norte reduce hasta en un 40% la OTTV y el uso de dispositivos de sombra suministran un ahorro de energía por climatización de hasta 0,4%.

10. RECOMENDACIONES

- a. La metodología propuesta puede aplicarse para evaluar la influencia de otros factores que afectan el consumo energético en un edificio como puede ser: la iluminación y los equipos de climatización.

- b. Realizar el estudio desarrollado con la inclusión de edificios de otra tipología como puede ser del sector hotelero o comercial.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. d. Vivienda, *Guía de Construcción Sostenible para el Ahorro de Agua y Energía en Edificaciones en Colombia*, Bogotá, julio, 2015.
- [2] Congreso De Colombia, “Ley 1715 13 de mayo 2014”, Bogotá, 2014
- [3] Ciudad y Territorio Ministerio de Vivienda, *Resolución 0549*.pp. 1–10.
- [4] J.V.Stein, « The International Law and Politics of Climate Change, » *Jornal of Conflict Resolution*, vol. 52, n° 2, pp. 243-268, April 2008.
- [5] M. Macias y J. García Navarro, « Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios,» *Informes de la Construcción*, vol. 62, n° 517, pp. 87-100, enero-marzo 2010.
- [6] ASHRAE, “ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010,” p. 273, 2012.
- [7] J. P. Campos Rivas, “Manual De Diseño Pasivo Y Eficiencia Energética en Edificios Públicos,” *Universidad de Bio Bio, Chile*. pp. 13–28, 2012.
- [8] W. B. (Universidad C. de C. Alan Pino Araya (Universidad Católica de Chile), “Análisis de Comportamiento Térmico de Edificios de Oficina en Comunas de la Región Metropolitana de Chile”, *IV Conf. Latinoam. energía Sol.*, 2010.
- [9] A. Nastia, V. Reyes, C. Quirós, and A. Luzardo, “Hacia una normativa sobre la calidad térmica de las Edificaciones en Maracaibo,” *Tecnol. y Construcción*, vol. 2, pp. 19–29, 2005.

- [10] R. M. Briceño, “Estudio y Simulación Energética del Edificio de la FIEC con Energy Plus,” 2013.
- [11] S. Devgan, A. K. Jain, and B. Bhattacharjee, “Predetermined overall thermal transfer value coefficients for Composite , Hot-Dry and Warm-Humid climates,” *Energy and Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1841–1861, 2010.
- [12] C. De La República, “Ley 697 De 2001,” *Cámara Represent.*, vol. 2001, no. octubre 3, p. 1, 2001.
- [13] Ministerio de Minas y Energía, «PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 2017 - 2022,» UPME, Bogotá, Diciembre 2016.
- [14] C. centro de investigación y desarrollo tecnológico – CIDET, “Normatividad sobre eficiencia energética y edificaciones verdes.” Medellín, 2012.
- [15] L. P. Bolívar Hernández y M. A. Martínez Gómez, “Estudio de Eficiencia Energética de Equipos y Sistemas de Aire Acondicionado en la Edificación del Bloque G de la Universidad Autónoma del Caribe”, Barranquilla, 2014.
- [16] F. Amaya, A. Bula y M. Moreno, “Eficiencia Energética En Edificaciones del Caribe”, Universidad del Norte, Barranquilla, 2016.
- [17] EnergyPlusExampleFileGenerator.
http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/interfaces_tools.html
- [18] G. K. Oral y Z. Yilmaz, «The limit U values for building envelope related to building form,» *Building and Environment*, pp. 1173-1180, 2002.
- [19] B. B. Ekici y U. T. Aksoy, «Prediction of building energy needs in early stage of design by using ANFIS,» *Expert Systems with Applications*, vol. 38, p. 5352–5358, 2011.

- [20] G. Manioğlu. y Z. Yılmaz, «Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort,» *Energy and Building*, vol. 38, n° 3, pp. 266-272, 2006.
- [21] J. Vijayalaxmi, «Concept of Overall Thermal Transfer Value (OTTV) in Design of Building Envelope to Achieve Energy Efficiency,» *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, vol. 1, n° 2, pp. 75-80, 2010.
- [22] S. C. M. Hui, «Overall Thermal Transfer Value (OTTV): How to,» *Energy and Environment*, pp. pp. 12-1 to 12-11, 1997.
- [23] J. Yu, C. Yang y L. Tian, «Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China,» *Energy and Buildings*, vol. 40, n° 8, pp. 1536-1546, 2008.
- [24] K. Çomaklı y B. Yüksel, «Optimum insulation thickness of external walls for energy saving,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, n° 4, pp. 473-479, 2003.
- [25] Y. Chen, J. Liu, J. Pei, X. Cao, Q. Chen y Y. Jiang, «Experimental and simulation study on the performance of daylighting,» *Energy and Buildings*, vol. 73, p. 184–191, 2014.
- [26] Z. Yang, X. Li y Y. Hu, «Study on solar radiation and energy efficiency of building glass system,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 956-961, 2006.
- [27] J. Yu, Y. Liu, C. Xiong y J. c. Huang, «Study on Daylighting and Energy Conservation Design of Transparent Envelope for office building in Hot Summer and Cold,» *Procedia Engineering*, vol. 121, pp. 1642-1649, 2015.
- [28] A. Tzempelikos y A. Athienitis, «The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand,» *Solar Energy*, vol. 81, n° 3, pp. 369-382, 2007.
- [29] D. Chwieduk y B. Bogdanska. , «Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions,» *Renewable Energy*, vol. 29, n° 9, pp. 1569-1581, 2004.

- [30] C. Ghiaus, «Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load,» *Energy*, vol. 50, pp. 292-301, 2013.
- [31] I. p. I. D. y. A. d. E. (IDAE), «<http://www.idae.es/>,» Ministeriode Energía y Turismo de España, 20 junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.idae.es/>. [Último acceso: 22 junio 2017].
- [32] T. Kalema, . G. Johannesson, P. Pylsy y . P. Hagengran, «Accuracy of Energy Analysis of Buildings: A Comparison of a Monthly Energy Balance Method and Simulation Methods in Calculating the Energy Consumption and the Effect of Thermal Mass,» *Journal of Building Physics*, vol. 32, p. 101 , 2008.
- [33] M. F. & V. B. Tobias Maile, «Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective,» *CENTER FOR INTEGRATED FACILITY ENGINEERING* , vol. WP107, 2007.
- [34] C. a. L. Government, A Technical Manual for SBEM, Reino Unido: Government, Communities and Local, 2015.
- [35] W. B. Technologies, «<http://weather.whiteboxtechnologies.com/>,» 2017. [En línea]. [Último acceso: 27 junio 2017].
- [36] IDEAM, «<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual>,» IDEAM, junio 2017. [En línea]. [Último acceso: 27 junio 2017].
- [37] IDEAM, «<http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/colombia/SKBQ.txt>,» IDEAM, junio 2017. [En línea]. [Último acceso: 29 junio 2017].
- [38] I. E. T. d. C. d. I. Construcción, Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, España: Ministerio de Vivienda, 2010.
- [39] Isover, Soluciones de Aislamiento Hospitalario, Mosquera, Cundinamarca: FiberGlass Colombia S.A, 2016.
- [40] EnergyStar. <https://www.energystar.gov/buildings/facility-owners-and-managers/existing-buildings/use-portfolio-manager/understand-metrics/difference>.
- [41] A. C. Valdiviezo, «Materiales Bioclimáticos,» *Revista de Arquitectura*, vol. 12, nº 1657-0308, pp. 104,105, 2010.

- [42] M. d. A. y. D. Sostenible, «El Acuerdo de París, así actuará Colombia frente al cambio climático,» WWF-Colombia, Bogotá, 2016.
- [43] M. Blender, «El valor U, la transmitancia térmica en edificación,» *Arquitectura y Energía*, marzo, 2015.
- [44] J. B. Estrada y E. D. Comas Vega, Determinación de la carga térmica adecuada para la correcta climatización del local Donk@n.com ubicado en la ciudad de Barranquilla, Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe, 2014.
- [45] M. d. I. P. p. I. A. Territoriales, «Documento Básico DB-HE "Ahorro de Energía", del Código Técnico de la Edificación,» BOE, número 219, Madrid, España, 2013.

ANEXOS

Anexo A. Valores de energía final, energía primaria, transmitancia térmica y energía final anual por iluminación, climatización y calefacción para los 12 modelos de hospital. Fuente: El Autor.

Modelo	Descripción de la Envoltente	Energía Final año [KWh]	Energía Primaria año [KWh]	U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ Fachada	U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ Cubierta	U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ Ventanas	% Acristalamiento	Energía Final anual por unidad de área $\left[\frac{KWh}{m^2}\right]$			
								Iluminación Eléctrica	Climatización Eléctrica	Calefacción Natural Gas	Otros
1	Envoltente sin aislamiento, Hormigón armado y ventana con vidrio simple	12897573	41038785	5.272	3.725	5.689	8,66	107.60	318.52	34.95	114.51
2	Envoltente con aislamiento 10 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12171272	37983663	1.152	1.673	3.004	8,66	107.60	273.19	47.90	114.47
3	Envoltente con aislamiento 15 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12150151	37837645	1.001	1.371	3.004	8,66	107.60	270.73	49.43	114.47
4	Envoltente con aislamiento 20 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12134688	37731779	0.884	1.161	3.004	8,66	107.60	268.95	50.52	114.46
5	Envoltente con aislamiento 25 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12121997	37649105	0.792	1.008	3.004	8,66	107.60	267.57	51.34	114.46
6	Envoltente con aislamiento 30 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12110420	37580108	0.717	0.890	3.004	8,66	107.60	266.44	51.95	114.47
7	Envoltente con aislamiento 50 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12083251	37411293	0.521	0.606	3.004	8,66	107.60	263.66	53.53	114.45
8	Envoltente con aislamiento 100 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12071129	37274155	0.309	0.337	3.004	8,66	107.60	261.18	55.47	114.44
9	Envoltente con aislamiento 150 mm por el exterior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12073863	37241256	0.220	0.234	3.004	8,66	107.60	260.47	56.31	114.43
10	Envoltente con aislamiento 50 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12130143	37514276	0.521	0.606	3.004	8,66	107.60	264.69	54.58	114.45
11	Envoltente con aislamiento 100 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12120706	37384497	0.309	0.337	3.004	8,66	107.60	262.31	56.56	114.44
12	Envoltente con aislamiento 150 mm por el interior, ladrillo cerámico hueco y ventana con vidrio aislante	12122126	37345033	0.220	0.234	3.004	8,66	107.60	261.49	57.44	114.44

Anexo B. Valores de calor almacenado por unidad de área en W/m² en la cubierta plana, cubierta inclinada, pared sur, pared este, pared norte y pared oeste para los 12 modelos de hospital. Fuente: El Autor

Modelo	Cubierta Plana Comedor		Cubierta inclinada 45° Comedor		Pared sur Comedor		Pared Este Comedor		Cubierta Plana Oficina 503		Pared Norte Oficina 503		Pared Oeste Oficina 503	
	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo
1	309	-192	164	-71	207	-192	269	-85	309	-192	85	-65	213	-220
2	102	-52	54	-20	17,9	-10,9	17,5	-10,0	101	-53	14,1	-9,2	19,2	-9,8
3	85,5	-46,9	46,4	-21	15,7	-9,7	16,8	-9,1	84,9	-48,7	12,4	-8,4	17,3	-8,9
4	75,7	-44,3	42,5	-20,3	14,5	-8,8	16,2	-8,4	75	-46,3	11,2	-7,9	16,1	-8,6
5	69,2	-43,1	40,3	-19,8	13,7	-8,3	15,9	-7,9	68,6	-45	10,4	-7,5	15,1	-8,5
6	66	-42	38,8	-19,6	13,0	-7,9	15,7	-7,5	66	-44,2	9,8	-7,1	14,4	-8,4
7	64	-41	36	-19,5	11,6	-7	15,6	-6,8	63,9	-43,4	8,6	-6,5	12,9	-8,6
8	64,6	-44,6	36,3	-20,7	10,7	-6,3	15,8	-6,1	63,9	-44,7	8,4	-5,8	11,6	-9,3
9	65,5	-46,48	36,9	-21,6	10,8	-6,4	15,9	-6,06	64,8	-46,2	8,5	-5,6	11,3	-9,6
10	226,8	-103,6			26,3	-15,1	25,5	-13,5	226,6	-103,4	21,6	-13,2	27,0	-15,7
11	226,4	-102,3			26,2	-14,8	25,0	-13,5	226,3	-102,0	21,7	-13,4	27,2	-15,0
12	226,3	-101,6			26,2	-14,8	24,8	-13,5	226,2	-101,5	21,7	-13,5	27,3	-14,9

Anexo C. Valores de energía final de acuerdo al porcentaje de acristalamiento del hospital. Fuente: El Autor

Porcentaje de Acristalamiento	Energía Final KWh	Energía final $\left[\frac{KWh}{m^2}\right]$		
		climatización	Iluminación	calefacción
0	12357167	263,59	107,6	48,98
8,66	12110420	266,44	107,6	35,11
16,11	12012024	268,49	107,6	28,66
25	11956526	270,89	107,6	23,77
29,5	11946979	272,14	107,6	22,05
50	11904148	276,57	107,6	21,78

Anexo D. Valores de energía final de climatización anual de acuerdo a la absorción solar de la capa externa de la envolvente del hospital. Fuente: El Autor.

Absorción Solar	Energía final de climatización KWh/m ²
0,1	263,66
0,4	263,92
0,8	264,24

Anexo E. Valores de Energía final de climatización para edificio sin sombreado y con sombreado general. Fuente: El Autor.

Energía final de climatización KWh/m ²	
Edificio sin sombreado	266,47
Edificio con sombreado general	265,44

Anexo F. Valores de ganancia interna y externa en KWh para 9 modelos de hospital. Fuente: El Autor.

	Personas	Luces	Equipos	Ganancia interna	Ventanas	Infiltración	Paredes	Ganancia externa
M 1	150567,60	1765141,20	1455116,40	3370825,2	290301,00	46670,40	3712241,40	4049212,80
M 2	160846,20	1765141,20	1455116,40	3381103,8	283356,00	60560,40	2102946,00	2446862,40
M 3	161401,80	1765141,20	1455116,40	3381659,4	283911,60	61393,80	1982658,60	2327964,00
M 4	161679,60	1765141,20	1455116,40	3381937,2	284189,40	62227,20	1897374,00	2243790,60
M 5	162235,20	1765141,20	1455116,40	3382492,8	284467,20	62782,80	1832924,40	2180174,40
M 6	162235,20	1765141,20	1455116,40	3382492,8	284606,10	63060,60	1782364,80	2130031,50
M 7	162790,80	1765141,20	1455116,40	3383048,4	285022,80	64449,60	1656799,20	2006271,60
M 8	163540,86	1765141,20	1455116,40	3383798,46	285772,86	66116,40	1532900,40	1884789,66
M 9	163902,00	1765141,20	1455116,40	3384159,6	286161,78	66949,80	1484563,20	1837674,78