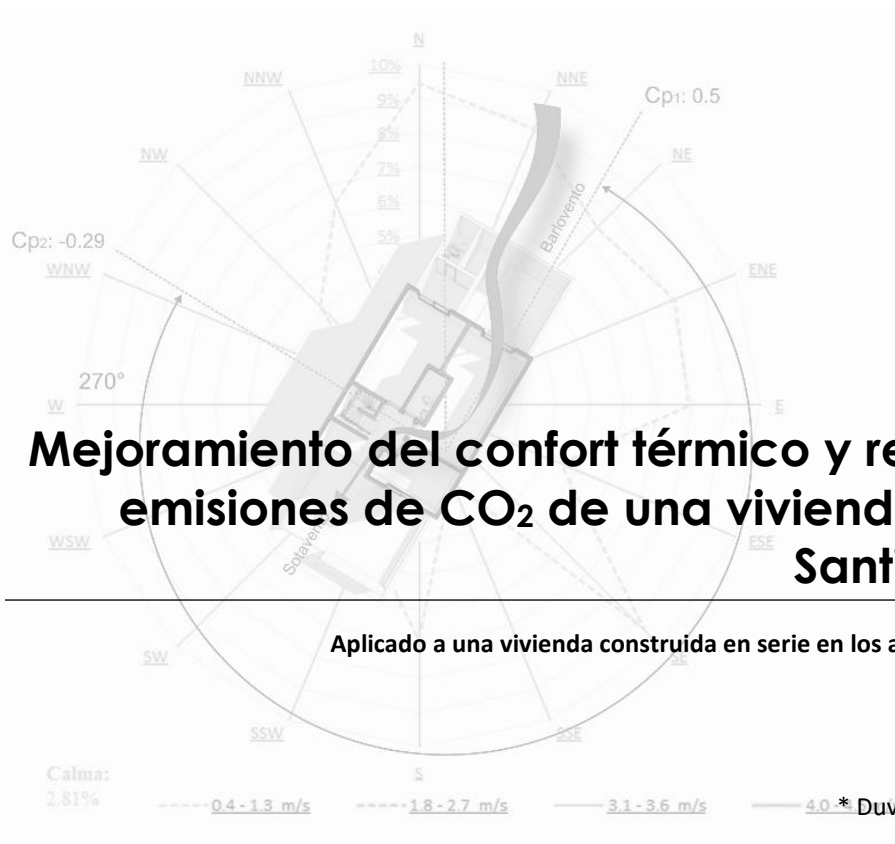




Mejoramiento del confort térmico y reducción de emisiones de CO₂ de una vivienda urbana en Santiago de Cali

Aplicado a una vivienda construida en serie en los años 70 en el norte de Cali

TESIS DE MAESTRÍA

Duver Andrés Alarcón Barrera

Arquitecto

Profesor horacatedra

Universidad del Valle

Cod. 20190 3619

PROGRAMA:

Maestría en Arquitectura y Urbanismo

[7576-00-DIU]

SEDE:

Meléndez [00 CALI]

Palabras clave:

Confort térmico, Dióxido de Carbono [CO₂], vivienda, energía, eficiencia

Año:

2023

Mejoramiento del confort térmico y reducción de emisiones de CO₂ de una vivienda urbana en Santiago de Cali

Aplicado a una vivienda construida en serie en los años 70 en el norte de Cali

TESIS DE MAESTRÍA

* Duver Andrés Alarcón Barrera

Cod. 20190 3619

Director de tesis:
Ing. Ph.D. CARLOS HERRERA

Modalidad:
Profundización

Línea de trabajo:
Arquitectura Bioclimática

Palabras clave:
Confort térmico, Dióxido de Carbono [CO₂], vivienda, energía, eficiencia.

Entrega Final:
Julio de 2023

CONTENIDO

LISTADO DE TABLAS	6
LISTADO DE GRÁFICOS	7
LISTADO DE IMÁGENES	9
ABREVIATURAS Y CONVENCIONES	9
FASE 1:	10
1. RESUMEN DEL PROYECTO	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. OBJETIVOS	15
4.1. Árbol de problemas	15
4.2. Objetivos, fines, medios y estrategias	16
4.3. Procedimientos y productos	17
4.4. Hipótesis de trabajo	17
5. MARCO TEÓRICO	18
5.1. Ergonomía del ambiente térmico	18
5.2. Operación y metabolismo de la vivienda	22
5.3. Estructura del documento	24
5.4. Estado del arte	25
6. MARCO METODOLÓGICO	29
6.1. Mecanismo de control	30
6.2. Metodología línea de análisis No. 1	31
6.3. Metodología línea de análisis No. 2	32
6.4. Esquema general (diagrama) del diseño metodológico:	34
7. RESULTADOS	35
7.1. CAPITULO I	35
Cálculo y evaluación del confort térmico de una vivienda urbana	35
7.1.1. Caracterización general de la vivienda y del volumen de control	36
a. Datos de geolocalización	37
b. Organización espacial y volumétrica	39
c. Identificación y localización de elementos estructurales y de cerramiento en el volumen	40
d. Posicionamiento ortográfico	41
FASE 2:	42
7.1.2. Generación de data y cálculo de línea base del volumen de control	42
a. Día, hora y mes para el cálculo de la irradiancia solar	42
b. Posición del sol	43

c.	Irradiancia solar sobre la vivienda.....	44
d.	Datos meteorológicos anuales para la hora de diseño.....	51
e.	Pérdida de calor de los elementos que componen el objeto de estudio. [temperaturas de diseño y TMR]	54
f.	Determinar el volumen de control	58
7.1.3.	Estado de confort en el volumen de control – LINEA BASE	58
a.	Cálculo de la Temperatura media radiante [TMR] Línea Base	58
b.	Estado de confort del volumen de control – Línea Base.....	60
7.1.4.	Flujo de aire en el volumen de control - LINEA BASE.....	63
a.	Flujo de aire disponible en el volumen Original	63
b.	Flujo de aire para obtener confort y calidad del aire interior – Línea Base [Calcular los recambios de aire por hora [ACH] requeridos].....	68
c.	Información de resultados – Línea Base.....	69
7.2.	CAPITULO II	70
	Confort térmico en el volumen de control MODIFICADO	70
7.2.1.	Diseño de estrategias y operaciones volumétricas para modificar el estado inicial	70
a.	Diseño de estrategias para mejorar las condiciones térmicas iniciales	70
b.	Operaciones arquitectónicas para el confort térmico del volumen de control	73
	FASE 3:	75
7.2.2.	Implementación de estrategias pasivas con operaciones arquitectónicas.....	75
a.	Adecuación física: Ejecución obra civil para adecuar el volumen de control.....	75
7.2.3.	Estado de confort en el volumen de control – ESCENARIO MODIFICADO.....	77
a.	Modelado térmico de los elementos - Volumen modificado	77
b.	Cálculo de la temperatura media radiante [TMR] - Volumen modificado	78
c.	Estimación del estado de confort del volumen de control MODIFICADO.....	79
7.2.4.	Flujo de aire en el volumen de control - VOLUMEN MODIFICADO.....	82
a.	Flujo de aire disponible en el volumen estado modificado	82
b.	Estimación del flujo de aire para obtener confort y calidad del aire interior Vol ₁ y Vol ₂ [Calcular los recambios de aire por hora [ACH] requeridos].....	87
7.2.5.	Análisis de información y análisis de resultados.....	89
a.	Consolidación de resultados y Análisis comparativo	89
b.	Registro de datos higrotérmicos del volumen de control MODIFICADO	90
7.2.6.	Conclusiones sobre el confort térmico interior alcanzado	91
	Fase 4:.....	92
7.3.	CAPITULO III	92
	Caracterización de las emisiones de CO ₂ en la vivienda urbana	92
7.3.1.	Emisiones de CO ₂ debidas a la construcción.....	94
7.3.1.1.	Listado de materiales principales utilizados en la construcción de la vivienda.....	94

7.3.1.2.	Banco de Indicadores de emisiones de CO ₂ por Kg de material utilizado en la construcción	97
A.	Cemento	97
B.	Arena y grava de río	99
C.	Acero de refuerzo	100
D.	Ladrillo sólido de Arcilla cocido - Tolete	101
E.	Asbesto – cemento	103
F.	Energía eléctrica	104
G.	Banco de indicadores de emisiones de CO₂ por material de construcción	105
7.3.1.3.	Cálculo de emisiones de CO ₂ por cantidad de materiales principales utilizados	106
7.3.1.4.	Datos consolidados de emisiones de CO ₂ por material y participación en el total	111
7.3.2.	Emisiones de CO ₂ debidas a la operación	111
7.3.2.1.	Matrices de consumo de energía eléctrica.....	112
7.3.2.2.	Cálculo de emisiones de CO ₂ generadas por el consumo de energía eléctrica	115
7.3.3.	Emisiones de CO ₂ debidas al mejoramiento del confort térmico	116
7.3.3.1.	Estrategias para controlar y disminuir las emisiones de CO ₂	116
7.3.3.2.	Estimación de emisiones de CO ₂ generadas por las trasformaciones físicas a la vivienda	116
7.3.4.	Estrategias para reducir las emisiones de CO ₂ producidas por la vivienda.....	118
8.	CONCLUSIONES GENERALES	123
9.	ANEXOS I	130
10.	ANEXOS II	136
11.	ANEXO III	148
12.	BIBLIOGRAFÍA	157

LISTADO DE TABLAS

Tabla No.1	Arbol de problemas
Tabla No.2	Objetivos, fines, medios y estrategias
Tabla No.3	Procedimientos y productos
Tabla No.4	Escala de sensación térmica de siete puntos
Tabla No.5	Esquema general (diagrama) del diseño metodológico
Tabla No.6	Cuadro de Areas Vivienda
Tabla No.7	Tabla datos diagrama solar para cálculo de la posición del sol
Tabla No.8	Irradiancia Pared NNE 10:00 Horas
Tabla No.9	Irradiancia Pared ESE 10:00 Horas
Tabla No.10	Irradiancia Pared SSW 10:00 Horas
Tabla No.11	Irradiancia Pared WNW 10:00 Horas
Tabla No.12	Irradiancia Cubierta NNE 10:00 Horas
Tabla No.13	Irradiancia Cubierta SSW 10:00 Horas
Tabla No.14	Irradiancia Pared NNE 13:00 Horas
Tabla No.15	Irradiancia Pared ESE 13:00 Horas
Tabla No.16	Irradiancia Pared SSW 13:00 Horas
Tabla No.17	Irradiancia Pared WNW 13:00 Horas
Tabla No.18	Irradiancia Cubierta NNE 13:00 Horas
Tabla No.19	Irradiancia Cubierta SSW 13:00 Horas
Tabla No.20	Comparación promedios de irradiancia mensual [W/m ²]
Tabla No.21	Irradiancia sobre superficies exteriores para el 21 de marzo y porcentaje de incidencia total
Tabla No.22	Irradiancia Pared NNE 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 8:00 Horas
Tabla No.23	Irradiancia Pared ESE 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 8:00 Horas
Tabla No.24	Irradiancia Pared WNW 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 16:00 Horas
Tabla No.25	Irradiancia Pared SSW 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 15:00 Horas
Tabla No.26	Irradiancia Cubierta NNE 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 00:00 Horas
Tabla No.27	Irradiancia Cubierta SSW 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 00:00 Horas
Tabla No.28	Rosa de los vientos
Tabla No.29	Valores para el cálculo de la carga térmica – Línea base
Tabla No.30	Datos base para calcular la pérdida de calor de la cubierta
Tabla No.31	Datos de resistencias de la cubierta
Tabla No.32	Datos base para calcular la perdida de calor pared NNE
Tabla No.33	Datos de resistencias pared NNE
Tabla No.34	Datos base para calcular la perdida de calor Pared SSW
Tabla No.35	Datos de resistencias pared SSW
Tabla No.36	Resultados del modelado térmico de los elementos – Línea base
Tabla No.37	Datos para el cálculo de la TMR – Línea base
Tabla No.38	Método NORMA - Cross ventilation – Línea Base
Tabla No.39	Método NORMA [de los 35 pasos] Para calcular la ventilación natural – Línea Base
Tabla No.40	Resultados del cálculo de la ventilación natural del volumen de control – Línea base
Tabla No.41	Estrategias para mejorar las condiciones térmicas iniciales
Tabla No.42	Datos base para calcular la perdida de calor – CUBIERTA MODIFICADA
Tabla No.43	Datos de resistencias - CUBIERTA MODIFICADA
Tabla No.44	Datos base para calcular la perdida de calor – PARED VOLUMEN MODIFICADO
Tabla No.45	Datos de resistencias - PARED VOLUMEN MODIFICADO

Tabla No.46	Resultados del modelado térmico de los elementos – Estado Modificado
Tabla No.47	Datos para el cálculo de la TMR – Estado modificado
Tabla No.49	Método Norma [35 pasos] para el Sub – volumen de control No.1 [Vol ₁]: Ventilación cruzada
Tabla No.50	Método Norma [35 pasos] para el Sub – volumen de control No.2 [Vol ₂]: Efecto chimenea
Tabla No.51	Consolidación de resultados y análisis comparativo entre estado inicial y Volumen de MODIFICADO
Tabla No.52	Resultados de la comparación entre la temperatura calculada y la temperatura registrada
Tabla No.53	Listado de materiales principales usados en la vivienda
Tabla No.54	Listado de materiales complementarios usados en la vivienda
Tabla No.55	Método de fabricación del acero
Tabla No.56	Registro de la producción ladrillera en Colombia
Tabla No.57	Emisiones Ladrilleras
Tabla No.58	Banco de indicadores de emisiones de CO ₂ por material de construcción
Tabla No.59	Emisiones de CO ₂ generadas por las vigas de cimentación y aéreas, y losas primero y entresuelo
Tabla No.60	Memoria de la Tabla No.59
Tabla No.61	Emisiones de CO ₂ generadas por los muros en mampostería
Tabla No.62	Memoria de la Tabla No.61
Tabla No.63	Emisiones de CO ₂ generadas por la cubierta
Tabla No.64	Memoria Tabla No.63
Tabla No.65	Emisiones de CO ₂ generadas por el piso en baldosa de concreto y el mortero de nivelación
Tabla No.66	Memoria Tabla No.65
Tabla No.67	Datos consolidados de emisiones de CO ₂ por material y participación en el total
Tabla No.68	Matriz de consumo de energía eléctrica años 1970 - 1996
Tabla No.69	Matriz de consumo de energía eléctrica años 1996 - 2004
Tabla No.70	Matriz de consumo de energía eléctrica años 2004 - 2010
Tabla No.71	Matriz de consumo de energía eléctrica años 2010 - 2020
Tabla No.72	Acumulado matrices de consumo de energía eléctrica años 1970 - 2020
Tabla No.73	Emisiones de CO ₂ debidas a la operación
Tabla No.74	Tabla de emisiones de CO ₂ debidas a la implementación de estrategias para mejorar el confort térmico
Tabla No.75	Datos consolidados de emisiones de CO ₂ producidas por la vivienda
Tabla No.76	Fuentes alternativas de generación de energía
Tabla No.77	Emisiones generadas por 1 M ² de panel fotovoltaico policristalino para diferentes países
Tabla No.78	Tablas de rendimiento y capacidad objetivo del sistema de paneles solares
Tabla No.79	Emisiones [kg CO ₂] debidas a la producción, generación y reciclaje del sistema de paneles solares

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico No.1	Porcentaje de personas insatisfechas - PPD – como función del Voto medio promedio - PMV
Gráfico No.2	Registro anualizado de temperatura del aire exterior e interior de la vivienda
Gráfico No.3	Distribución espacial arquitectónica
Gráfico No.4	Modelo 3D de la vivienda - explosionado
Gráfico No.5	Corte longitudinal de la vivienda
Gráfico No.6	Posicionamiento ortográfico sobre isometría de la vivienda
Gráfico No.7	Diagrama solar estereoscópico de Cali para el 21 de marzo a las 10:00 AM
Gráfico No.8	Comparación promedios mensuales de irradiancia solar para las 10:00 y 13:00 horas
Gráfico No.9	Irradiancia solar mensual a las 10:00 y 13:00 horas por cada superficie en el año

Gráfico No.10	Diagrama solar para superficies verticales
Gráfico No.11	Curvas de comportamiento de la irradiancia horaria
Gráfico No.12	Curvas de temperatura anualizada para Cali
Gráfico No.13	Curvas de humedad relativa anualizada para Cali
Gráfico No.14	Carta psicométrica de estrategias bioclimáticas sugeridas
Gráfico No.15	Rosa de los vientos Estación Univalle
Gráfico No.16	Áreas y volúmenes de los espacios de la vivienda e irradiancia en superficies
Gráfico No.17	Composición de la cubierta
Gráfico No.18	Resistencias de los elementos de la cubierta
Gráfico No.19	Localización Pared NNE
Gráfico No.20	Composición pared original
Gráfico No.21	Resistencias de los elementos de la pared original
Gráfico No.22	Localización Pared SSW
Gráfico No.23	Composición pared original
Gráfico No.24	Localización Ventana Habitación No.1 y Habitación No.2, y Habitación No.3
Gráfico No.25	Localización Volumen de Control
Gráfico No.26	Calor [Q], Temperaturas [°C], áreas y volúmenes – Línea Base
Gráfico No.27	Resultado TMR estado inicial, por CBE - Thermal Comfort Tools
Gráfico No.28	Confort térmico Línea Base – carta psicométrica PMV – ASHRAE 5
Gráfico No.29	Confort térmico Línea Base – carta psicométrica MÉTODO ADAPTATIVO – ASHRAE 55
Gráfico No.30	Superposición del Volumen de control sobre la Rosa de los vientos
Gráfico No.31	Orientación cardinal de la edificación respecto al flujo del viento
Gráfico No.32	Efecto del flujo del viento en la edificación - Corte
Gráfico No.33	Cálculo de la ventilación natural Método NORMA. Debido solo al viento
Gráfico No.34	Corte longitudinal de la vivienda localizando el volumen de control
Gráfico No.35	Localización sub – volúmenes de control No.1 y No.2
Gráfico No.36	Localización de estrategias para mejorar las condiciones térmicas iniciales
Gráfico No.37	Modelo con intervención en el volumen Efectos de las estrategias frente al asoleamiento y a la ventilación natural en el volumen modificado
Gráfico No.38	Resistencias de los elementos de la cubierta modificada
Gráfico No.39	Localización Pared NNE - Modificada
Gráfico No.40	Composición pared modificada
Gráfico No.41	Resistencias de los elementos de la pared modificada
Gráfico No.42	Temperaturas interiores de los elementos, la altura de los espacios y la carga térmica [Q]
Gráfico No.43	Resultado TMR - Volumen Modificado, por CBE-Thermal Comfort Tools
Gráfico No.44	Confort térmico Volumen Modificado – Carta psicométrica PMV - ASHRAE 55
Gráfico No.45	Confort térmico Volumen Modificado – Carta psicométrica MÉTOD ADAPTATIVO ASHRAE 55
Gráfico No.46	Localización de las estrategias aplicadas a los volúmenes de control No. 1 y No.2
Gráfico No.47	Cálculo de la ventilación natural para el Vol₁ Método NORMA. Debido solo al viento – Volumen Modificado
Gráfico No.48	Cálculo de la ventilación natural para el Vol₂ Método NORMA. Debido solo al viento – Volumen Modificado
Gráfico No.49	Análisis comparativo de resultados
Gráfico No.50	Localización de materiales en la vivienda
Gráfico No.51	Emisiones de la producción mundial de cemento
Gráfico No.52	Emisión global de cemento - Emisiones Colombia
Gráfico No.53	Localización espacial de las estrategias [Ver capítulo II - Gráfico No.35]
Gráfico No.54	Comparación de emisiones totales de CO ₂
Gráfico No.55	Emisiones de CO ₂ vs Peso de materiales
Gráfico No.56	Porcentajes totales de emisiones de CO ₂ vs Porcentajes totales de peso
Gráfico No.57	Emisiones acumuladas de CO ₂ en 50 años de operación

LISTADO DE IMÁGENES

Imagen No.1	Concentración de la población urbana alrededor del Mundo
Imagen No.2	Localización general de la vivienda [Departamento, Ciudad, barrio]
Imagen No.3	Fachada exterior de la vivienda
Imagen No.4	Unidad de resistencia térmica (R – Value) de componentes comunes usados en edificaciones
Imagen No.5	Coefficiente de conductividad térmica [k] de materiales
Imagen No.6	Coefficiente de conductividad térmica [k] de materiales
Imagen No.7	Reflectividad y absorptividad de superficies exteriores comunes para radiación solar
Imagen No.8	Coefficiente de emisividad de la superficie de materiales
Imagen No.9	Coefficiente de conductividad térmica [k] de materiales
Imagen No.10	Tasa metabólica durante varias actividades – Durmiendo y quieto
Imagen No.11	Estado inicial: Arriba (Cubierta), abajo (Volumen cielo en machimbre), altura de salida H: 2m
Imagen No.12	Estado final [Volumen Modificado]
Imagen No.13	Unidad de resistencia térmica [R- Value] aislamiento Fibra de vidrio
Imagen No.14	Resistencia térmica de la lámina de fibra de vidrio
Imagen No.15	Reflectividad y absorptividad en superficies claras
Imagen No.16	Unidad de resistencia térmica [R- Value] del estuco
Imagen No.17	K Factor de corrección Efecto chimenea por lado único
Imagen No.18	Temperatura interna de la cubierta
Imagen No.19	Temperatura interna del aire
Imagen No.20	Temperatura interna pared Norte
	Un esquema de los principales factores que influyen en las emisiones de gases de efecto
Imagen No.21	invernadero en los embalses
Imagen No.22	Factura de servicios públicos domiciliarios de la vivienda de estudio – consumo de energía

ABREVIATURAS Y CONVENCIONES

IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> Panel intergubernamental sobre el cambio climático
GEI	Gases Efecto invernadero
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> Organización Mundial Meteorológica
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
ONU	Organización de naciones unidas
CDM	<i>Clean Development Mechanism</i>
MDL	Mecanismos de desarrollo limpio
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
LCA	<i>Life cycle assessment</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

FASE 1:

1. RESUMEN DEL PROYECTO

Tomando como caso de estudio una vivienda urbana construida en serie en los años 70, siendo una solución de interés social para familias de clase media al norte de Cali, este trabajo registra su situación de confort térmico y la cantidad de emisiones de CO₂, con el objetivo de diseñar, calcular, evaluar y, en el caso del confort térmico implementar, una propuesta para mejorar las condiciones encontradas. De esta manera, se configuran dos líneas de análisis que se desarrollan en el documento: Confort térmico y emisiones de CO₂.

Se trata de impactar a la vivienda con la implementación de operaciones arquitectónicas, que introduzcan estrategias de climatización pasiva y que, de manera articulada, con la utilización de fuentes alternativas de energía aporten condiciones para mejorar la línea base definida.

Finalmente, este trabajo entrega para la línea de análisis “Confort Térmico”, una propuesta calculada, implementada y evaluada que cambia positivamente la situación inicial. Implementando el método de Fanger para calcular el estado de confort térmico, fue determinado un “*voto medio estimado*” [PMV] de 1.59 y un “*porcentaje de personas insatisfechas*” [PPD] igual al 56%, que se enfrenta a una sensación térmica: “*caliente*”, indicando que el estado inicial de las personas al interior es **no comfortable**.

En consecuencia, se llevaron a cabo operaciones arquitectónicas cuyo desempeño fue monitoreado y registrado validando el mejoramiento de las condiciones térmicas en su interior. Como parte de las conclusiones de este trabajo, los ocupantes encontraron una situación **comfortable**, con una sensación térmica “*ligeramente caliente*” [Slightly Warm], según la clasificación de la norma ISO 7730. La intervención diseñada logra un estado aceptable de confort.

De la misma manera, en el desarrollo de la línea de análisis “Emisiones de CO₂”, estas fueron calculadas para la vivienda en tres escenarios: debidas a su construcción, debidas a la intervención física para el mejoramiento de su confort térmico y debidas a su operación – estimadas para un umbral de 50 años. Se encontró que “la operación” es la responsable de la mayor cantidad de emisiones producidas en función del consumo de energía, por tanto, este trabajo realiza una comparación simulada de la operación de la vivienda en el mismo marco de tiempo utilizando una fuente alternativa de generación, con la cual, frente a una línea base calculada de 61.02 Ton de CO₂ emitidas en el período, la propuesta logra un retorno de emisiones del 97%, por tanto, puede considerarse una propuesta de “Energía Net – Cero”. Con las estrategias propuestas en este trabajo se concluye que es posible disminuir las emisiones de CO₂ producidas por la vivienda.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Puesto en contexto, el problema se centra en el dis - confort térmico y en la producción no controlada de CO₂ de una vivienda localizada en la Urbanización La Merced, al norte de Santiago de Cali en Colombia.

Como antecedente del problema, se debe entender el origen de la vivienda. De acuerdo al Plan de desarrollo Estratégico de la comuna 2 de Cali [periodo 2004 – 2008], el barrio Urbanización La Merced localizado al norte de la ciudad, fue proyectado como un conjunto de viviendas en serie conformado por 1.050 casas de interés social para familias de clase media, divididas en 43 manzanas [bloques de vivienda], que se construyó por etapas entre 1.969 y 1973 (DAPM, 2003).

Parte de la financiación del proyecto se cubrió con recursos del programa “AID - Alianza para el Progreso”, que resultó de un tratado firmado por países de Latinoamérica con Estados Unidos durante el gobierno del presidente JHON F. KENNEDY, para recibir ayuda económica que se destinó parcialmente para proyectos de vivienda. Se localizó sobre el predio de la antigua hacienda La Merced, terrenos que fueron comprados a la sociedad Miguel Bueno Plaza y CIA.E e Inversiones Tomas Bueno Plaza y CIA, por la firma “Research Construction”, de Puerto Rico, quienes lideraron el proyecto urbanístico y arquitectónico y representaban el capital estadounidense y con quienes, el Instituto de Crédito Territorial – ICT, por parte de Colombia, conformaron la sociedad “Viviendas Panamericanas S.A”. [Vipasa] (DAPM, 2003).

Posteriormente, tal como lo mencionan las escrituras de la vivienda de estudio, "la sociedad Cuellar Serrano Gómez y Salazar Limitada de Cali, adquirió el terreno de mayor extensión a Viviendas Panamericanas Colombianas [VIPASA]" y desarrollaron la etapa V en donde se localizó la Urbanización La Merced.

El conjunto de viviendas VIPASA – de una planta, y luego La Urbanización La Merced – de dos plantas, fueron pioneros como proyectos de vivienda de interés social para clase media, adicionalmente auditado por la firma puertorriqueña para lograr calidad y bajos costos en la construcción, que reprodujeron un modelo de vivienda similar construido en Miami. De acuerdo a la información consultada, el costo de la vivienda fue distribuido de siguiente forma:

- Research Construction: 65%
- Instituto de Crédito Territorial [ICT]: 20%
- Cliente adjudicado: 15%

Este trabajo de tesis toma como caso de estudio una de las viviendas de la Urbanización La Merced construida en la década de los años 70.

Debido a las características de su origen, es una vivienda diseñada para ser parte de un conjunto de casas de bajo costo, cuya construcción implementó una técnica de repetición continua de elementos, solidaria y compartida, por tanto, su sistema estructural está fundamentado en muros de ladrillo portantes que se comparten para dos casas, fachadas aparejadas, y un solo tendido de cubierta para el conjunto de viviendas que conforman la manzana, en tejas de fibro - cemento sin recubrimiento, ni pintura. Los materiales utilizados, en su mayoría ladrillo tolete, cemento, acero y tejas de fibro – cemento, aún hoy en día, son materiales regulares de bajo costo.

Para confirmar la existencia del problema asociado al confort térmico, en el techo de la vivienda se localizó una micro-estación meteorológica análoga que permitió tener lecturas de la temperatura del aire en el exterior y en espacios al interior simultáneamente, información que fue usada para generar gráficos comparativos con la ayuda de un dashboard. Como parte de este trabajo, de acuerdo con los datos obtenidos durante un año, midiendo la temperatura del aire en las habitaciones del segundo piso de la vivienda de

estudio¹: a la una de la tarde la temperatura interior [13:00 T_i 32.9°C], es regularmente superior a la del exterior [13:00 T_o 32.2°C] – Ver Gráfico No.1. La sensación de calor al interior hace insatisfactoria su habitabilidad cuando se presenta una situación de mayor calor al exterior (Y. A. Cengel, 2009).

Por otra parte, siendo un tema de esta investigación, las emisiones de CO₂ en la vivienda no se encuentran debidamente registradas, por tanto, no se es posible implementar estrategias para monitorear, evaluar, controlar y reducir su producción.

Bajo esta incertidumbre, Inicialmente se plantea una metodología para identificar y cuantificar el origen de las emisiones de las CO₂ de la vivienda, estableciendo así, una línea base. Se evaluaron tres escenarios de emisiones y se determinó que la mayor carga está asociada al consumo de energía, lo que equivale para la vivienda en 50 años, a un total de 61.02 Ton de CO₂ emitidas. Este es el escenario dispuesto para ser impactado de manera positiva.

3. JUSTIFICACIÓN

La producción de vivienda social en Colombia, ha respondido a criterios fundamentalmente económicos y en ese sentido, la eficiencia de los procesos se ha focalizado en lograr el mayor número de unidades de vivienda al menor costo. La producción de vivienda social en serie ha impulsado la prefabricación de elementos para la construcción de edificaciones desde los años 40 y la elaboración de normas mínimas de habitabilidad (Torres, 2009). El confort térmico no ha sido una prioridad en la producción de la vivienda social en Colombia. (Rosillo & Herrera, 2019)

El resultado de esto, son viviendas inconfortables, construidas sin considerar las emisiones de CO₂ que se producirán en su ciclo de vida y sin estrategias de eficiencia energética que impacten durante su operación.

La arquitectura, en cuanto es una disciplina de carácter social, es la encargada naturalmente de resolver, a través del manejo del espacio, el problema de habitar, lo cual le atribuye como responsabilidad inherente lograr su estado de confort, entre ellos el térmico.

En consecuencia, está justificado que este trabajo se centre en lograr dos propósitos, el primero, conseguir con un diseño, su cálculo y la implementación del mismo, mejorar las condiciones térmicas al interior de una vivienda existente a través de estrategias de climatización pasivas [que involucre el menor consumo de energía], para lograr su estado de confort, y el segundo, implementar estrategias para reducir sus emisiones de CO₂, adicionalmente evaluado la implementación de un sistema alternativo de energía renovable no convencional para lograr la menor huella ecológica posible.

Este problema encuentra explicación adicionalmente en la escala global, considerando pertinente la intervención local propuesta.

En una escala más amplia, uno de los temas más relevantes para la década 2010 – 2020, ha sido la crisis por el consumo de la energía debido al crecimiento acelerado de la población en el mundo y su localización en las zonas urbanas (DESA UN, 2018). Dado que la producción de dióxido de carbono [CO₂] está asociada al consumo de energía, esta también se ha elevado a niveles críticos. En consecuencia, la implementación de estrategias de eficiencia energética y la utilización de fuentes no convencionales de energía, para la reducción de las emisiones de CO₂ se vuelve una necesidad de escala global con incidencia concreta en las ciudades.

¹ Datos obtenidos estación meteorológica. 18 de Julio de 2017 [Time:13:30] T_i 32.9 / T_o 32.2

De esta manera, el aumento de la población tiene como efecto la transformación de la atmósfera y la aparición de eventos como la variabilidad climática y el incremento de la temperatura entre otros (DESA UN, 2018).

En consideración al aumento de población, de acuerdo con el informe del 16 de mayo de 2018 del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, el 55% de la población ya vive en áreas urbanas y se prevé que para el 2050 lo haga el 68%. *“Las ciudades irán en aumento sobre todo en países en desarrollo”*, (DESA UN, 2018).

En Colombia, este fenómeno es visible y su problemática se concentra en las ciudades principales y secundarias. La conurbación es uno de sus efectos (Alarcón, 2016). Igualmente el impacto del crecimiento demográfico, el cambio climático y la utilización del suelo agrícola o de reserva forestal para la expansión de la urbanización, llevan progresivamente al agotamiento de los recursos naturales y a la pérdida del suelo cultivable y es considerada una de las diez amenazas para la Gestión del Suelo Saludable (GSS) según la FAO en su Carta Mundial del Suelo 2015, (FAO, 2016).

De acuerdo con el “Efecto rebote” de Greening, en su estudio sobre la eficiencia energética y el consumo, el impacto negativo para la atmósfera es creciente, debido al aumento intensificado de CO₂ que se genera, entre otros “rebotes”, producto de la necesidad de viviendas en el mundo (Greening et al., 2000).

Imagen No. 1

Concentración de la población urbana alrededor del Mundo



Fuente: UNDESA. 2018

Es pertinente este tema para la arquitectura. La Unión Internacional de Arquitectos – (*Union internationale des Architectes* – UIA, siglas en francés), soportada por la organización *“Architecture 2030”*, en su congreso mundial celebrado en Durban, Suráfrica, en 2014, emitió la *“Declaration 2050 Imperative”*, como un mensaje a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (*United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC, siglas en inglés), que reconoce principalmente a las edificaciones en las áreas urbanas como responsables del 70% del consumo mundial de energía y de emisiones de CO₂, y afirma adicionalmente, que en los próximos veinte años se construirán y reconstruirán el 60% del inventario total de edificios que habrá en el mundo, lo cual es una oportunidad para que el sector de la construcción sea responsable en la reducción del CO₂ para 2050. La UIA, también reconoce que este es un problema y el reto se centra en el diseño planificado y sostenible, en la creación de entornos resilientes, neutrales en carbono, saludables y protectores de los recursos naturales y de los hábitats de vida silvestre, implementando

generación de energía renovable, y proporcionando aire y agua limpia para mejorar el hábitat de las comunidades. (UN-Habitat, 2015).

En Colombia, la concentración de la población urbana coincide con los mayores registros de contaminación por emisiones de Gases efecto invernadero – GEI [GHG – siglas en ingles] asociados a las edificaciones, transporte e industria, (Alarcón, 2016).

Dado que el sector de la construcción es el mayor aportante de CO₂ a la atmósfera en las áreas urbanas, y que el confort térmico, uno de los componentes que demanda atención por sus efectos en la habitabilidad de los espacios y el consumo de energía, es ese el problema que se busca resolver a través de este trabajo.

Los efectos en las condiciones del clima y el cambio de la temperatura de la atmósfera, exige considerar soluciones innovadoras para mejorar el confort térmico de las edificaciones y la fabricación de insumos para la construcción, sin embargo, las emisiones de CO₂ generadas por el consumo de energía continúan en ascenso debido a producción de Vivienda que exige la población en aumento, configurándose así, un problema de relaciones circulares (UN-Habitat, 2015). Lo anterior, pone en relieve esta, como una condición para mejorar en los proyectos de vivienda.

Como estrategia política, en Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT, aprobó en 2014 una Ley para estimular el uso de fuentes de energía renovable no convencionales y permitir su integración al sistema de generación nacional, abriendo una opción para el manejo de fuentes de baja emisión de CO₂ a la atmósfera por Kwh generado (MAVDT, 2014).

De acuerdo con Cengel, fundamentalmente, el problema del aumento de CO₂, radica en la cantidad de energía que se requiere para producir y consumir las cosas en el mundo (Y. A. Cengel, 2009). Por lo tanto, se vuelven relevantes su fuente, su obtención, el transporte, la distribución y las maneras en que se consumen.

Según información del Departamento de Energía de los Estados Unidos – DOE (siglas en inglés), la mitad del consumo de energía en el mundo está concentrado en las edificaciones y lo siguen la industria y el transporte, (DOE, 2016). De los formatos de edificaciones, la vivienda es la que mayor consumo registra. Para el DOE, el componente más representativo en el consumo de energía de una vivienda en USA y Europa es el acondicionamiento térmico de los espacios (DOE, 2016).

Localmente, según la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG en Colombia, el consumo residencial de energía equivale al 42.2% del total nacional. En el rango de uso doméstico, las demandas de consumo se particularizan de acuerdo al nivel - estrato en que se encuentren. En viviendas de nivel 1 al 3, el consumo está relacionado con la utilización de aparatos eléctricos para la operación de la vivienda. El consumo de energía con equipos activos para mejorar las condiciones de confort térmico en las viviendas, regularmente están asociados a los niveles 4, 5 y 6, y se incrementa con el tiempo.

Dado que el problema general es el aporte de CO₂ a la atmosfera, que se vuelve critico por el incremento de población urbana como lo registra UNDESA en 2018, y que en gran medida se considera a las edificaciones y entre ellas a la vivienda responsable de la mayor producción CO₂, la investigación se debe centrar en la vivienda.

Debido al incremento de la población mundial, a la crisis por el consumo de energía y al cambio de las condiciones de temperatura del aire por la variabilidad climática, el reto global para la sustentabilidad de la vida urbana en esta década se centra en lograr el confort pasivo de las edificaciones y en la reducción de las emisiones de CO₂ antropogénicas al ambiente. En consecuencia, se encuentra plenamente justificado este trabajo de tesis.

4. OBJETIVOS

De acuerdo con el problema planteado, el objetivo general del proyecto de investigación es:

- MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO INTERIOR Y MINIMIZAR LAS EMISIONES DE CO₂ ANTROPOGÉNICAS DE LA VIVIENDA OBJETO DE ESTUDIO.

4.1. Árbol de problemas

Tabla No. 1

ARBOL DE PROBLEMAS		
LÍNEAS DE ANÁLISIS	Línea 1: DISCONFORT TÉRMICO AL INTERIOR DE LA VIVIENDA	Línea 2: EMISIONES NO CONTROLADAS DE CO ₂
CAUSAS	No hay interés en las condiciones térmicas internas	Desconocimiento de las emisiones de CO ₂ producidas por la vivienda en su construcción, durante su operación y por la fabricación de sus materiales
	Envoltente con materiales de baja resistencia térmica	No hay medición domestica de emisiones de CO ₂
PROBLEMA PRINCIPAL	DISCONFORT TÉRMICO y EMISIONES NO CONTROLADAS DE CO ₂	
EFECTOS	Dificultad para implementar estrategias bioclimáticas	Utilización indiscriminada de materiales y de consumo de Energía
	Exceso de carga térmica interna	Insensibilidad frente a las emisiones de CO ₂ producidas
PERSISTENCIA DEL PROBLEMA		
	Transformación de la vivienda	Aporte significativo de CO ₂ a la atmósfera
	Implementación de equipos de climatización activa [aire acondicionado]	Posibles afectaciones por contaminación

Fuente: Elaboración propia

4.2. Objetivos, fines, medios y estrategias

Tabla No. 2

OBJETIVOS, FINES, MEDIOS Y ESTRATEGIAS		
LÍNEAS DE ANÁLISIS	Línea 1: DISCONFORT TERMICO AL INTERIOR DE LA VIVIENDA	Línea 2: EMISIONES NO CONTROLADAS DE CO ₂
FINES	Lograr un estado de confort térmico aceptable con estrategias de climatización pasiva	Controlar y minimizar las emisiones de CO ₂ producidas por la vivienda
OBJETIVO PRINCIPAL	MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO INTERIOR Y DISMINUIR EMISIONES DE CO ₂	
MEDIOS / Recursos	* Simulación: [Bibliografía digital, papel + Digitalización + procesamiento de datos + Tiempo] 4 meses * Intervención: [Inversión posible: \$5.000.000 = Instrumentalización para mediciones análoga + adecuaciones físicas + Tiempo 6 meses]	* Documentación: [Bibliografía digital, papel + Almacenamiento y procesamiento de información] * Simulación: [Modelación de datos + Tiempo 4 meses]
TÁCTICAS	* Simulación: [Cálculos y diseño en medios digitales para conducir la intervención a la vivienda] * Intervención: [Intervención a la vivienda original para lograr condiciones de confort térmico interior, medición análoga]	* Simulación: [Calcular el CO₂ generado por la construcción original de la vivienda, por las modificaciones para lograr el confort térmico y por la operación en su horizonte de 50 años]
OBJETIVOS ESPECIFICOS	Línea 1: OBTENER CONFORT TERMICO INTERIOR	Línea 2: CONTROLAR Y DISMINUIR EMISIONES DE CO ₂
ESTRATEGIAS	Utilizar las condiciones del entorno en la solución de climatización pasiva - bioclimática [evitar incremento del consumo de energía]	Identificar la fuente de mayor generación de emisiones de CO ₂ para reducir su producción [Visibilizar las emisiones para controlarlas]

Fuente: Elaboración propia

4.3. Procedimientos y productos

Tabla No. 3

PROCEDIMIENTOS Y PRODUCTOS		
	Línea 1: OBTENER CONFORT TERMICO INTERIOR	Línea 2: CONTROLAR Y DISMINUIR EMISIONES DE CO ₂
PROCESOS	Diseñar e implementar una solución constructiva con pocas operaciones espaciales y calcular mediante métodos avalados internacionalmente el comportamiento térmico de la vivienda después de su implementación	Calcular las emisiones de CO ₂ en tres escenarios: 1. Debidas a la construcción 2. Debidas a la intervención para lograr confort térmico 3. Debidas a la operación.
TECNICAS PARA LA RECOLECCION DE DATOS	* Consulta bases de datos * Experimentación del caso de estudio * Mediciones térmicas con instrumentos * Cálculo de cantidades	* Consulta bases de datos * Cálculo de cantidades * Definición de indicadores de emisiones de CO₂ * Entrevistas a usuarios * Cálculo de emisiones
TECNICAS DE REGISTRO DE INFORMACION	* Matrices dinámicas * Tablas de registro de información * Fotografías * Elaboración de bases de datos	* Tablas de registro de información * Matrices para cruce de información * Tablas de comparación y resultados
PROCESAMIENTO ANALISIS E INTERPRETACION	Análisis comparativo - cuantitativo [Resultados del cálculo del comportamiento térmico comparados entre la línea base y las mediciones térmicas después de la intervención]	Análisis comparativo - cuantitativo [Cálculo de emisiones en tres escenarios: a. Debidas a la construcción b. Debidas al mejoramiento térmico c. Debidas a la operación en un escenario convencional de 50 años. Definición de un escenario alternativo que muestre una disminución cuantitativa verificable]
PRODUCTOS	UN (1) DISEÑO DE UNA SOLUCIÓN ARQUITECTÓNICA: Que permita obtener el estado de confort térmico interior a la vivienda.	UNA (1) PROPUESTA ALTERNATIVA PARA DISMINUIR EMISIONES DE CO₂: Para implementarse en uno de los tres escenarios determinados.

Fuente: Elaboración propia

4.4. Hipótesis de trabajo

Dado que, el problema de este trabajo de maestría se centra en el dis - confort térmico interior y en las incontroladas emisiones de CO₂ producidas por una vivienda urbana en Santiago de Cali, por tanto, ubicada dentro de un entorno climático dominado por alta radiación solar y humedad relativa, derivado de su localización geográfica y altimétrica, la pregunta general que plantea este trabajo es:

¿Como aprovechar las condiciones del entorno climático de la vivienda para lograr su confort térmico interno y disminuir sus emisiones de CO₂?

Por lo tanto, siendo coherente con el objetivo general planteado, se propone como hipótesis general la siguiente:

La radiación solar considerada una condición adversa para una vivienda urbana existente puede ser aprovechada para lograr confort térmico interior y ser una fuente de energía de baja emisiones de CO₂.

En consecuencia, las hipótesis que se plantean por cada línea de análisis serán las siguientes:

- Línea de trabajo 1

La radiación solar, considerada una condición desfavorable para una vivienda urbana existente puede aprovecharse para lograr su confort térmico interior.

- Línea de trabajo 2.

La radiación solar puede ser considerarse como mecanismo para la reducción de emisiones de CO₂ en una vivienda urbana.

5. MARCO TEÓRICO

Las dos líneas temáticas: confort térmico y emisiones de CO₂, propuestas en este trabajo de maestría como materia de análisis, se han entendido de manera independiente dentro de dos marcos teóricos y conceptuales que le dan soporte a su desarrollo en el documento y que se han denominado:

Ergonomía del ambiente térmico, en el caso del confort térmico, y
Operación y metabolismo de la vivienda, en relación con las emisiones de CO₂.

5.1. Ergonomía del ambiente térmico

En tanto que el problema planteado trata del confort y este está profundamente relacionado con el manejo del calor, su tratamiento se enmarca dentro de la rama de la física que se define como termodinámica. La especialidad que se ocupa de la termodinámica es la ingeniería mecánica, por tanto, el desarrollo de este trabajo se apoyará en teoría, literatura, procedimientos y metodologías asociadas a ella.

El confort entendido de manera general, es el estado de bienestar que un ser humano encuentra con su ambiente en una situación específica. De acuerdo con Coch y Serra, existen dos tipos de factores que lo configuran, unos parámetros ambientales de naturaleza visual, auditiva y térmica que afectan los sentidos del sujeto y que se expresan por medio de la iluminación, la calidad del aire, la acústica, las variables higrotérmicas: temperatura del aire, humedad, velocidad del aire, radiación térmica, y otros factores propios del estado físico, fisiológico y psicológico del sujeto (Coch & Serra, 1995).

Este trabajo se concentrará en el confort térmico (higrotérmico) cuya noción será entendida como “la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es valorada mediante evaluación subjetiva”, definición incluida en la norma de la *International Organization for Standardization* - ISO 7730 de 2005 llamada “Ergonomía del ambiente térmico” y el Standard 55 de la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* – ASHRAE 2017 – denominado “Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana” (ISO, 2005) (ASHRAE, 2017a).

Para Coch y Serra, la individualidad biológica del confort térmico se explica en el comportamiento térmico individual de cada ser humano, sumado a la sensación y la percepción subjetiva del ambiente. Cada factor del entorno que afecta al sujeto lo sensibiliza física, fisiológica y psicológicamente de forma encadenada a través de cuatro fases: la aparición del estímulo, la captación de información a través de receptores [los sentidos], la comunicación interna por fibras transmisoras y la respuesta del sistema nervioso central. El estímulo afecta los sentidos de acuerdo a su especificidad, limitación, adaptación y excitabilidad. (Coch & Serra, 1995).

Se puede aceptar que el confort es un “sistema térmico” individualizado según (Rosillo & Herrera, 2019), que opera en un estado balanceado de energía, por lo cual, como lo explica ASHRAE 55, el desequilibrio causado por el enfriamiento o el calentamiento no deseado del cuerpo puede causar disconfort térmico. Las situaciones más comunes son la asimetría de la temperatura radiante, las ráfagas de aire, la diferencia de temperatura del aire vertical y los pisos fríos o calientes (ISO, 2005).

A pesar de haber registros de un número amplio de indicadores para determinar el confort y stress térmico, como se menciona en Rosillo & Herrera, para analizar el confort térmico interior sobresalen el método PPD/PMV desarrollado por Fanger en 1970 y el Método Adaptativo propuesto por Humphreys & Nico en los años 70 y refrendado por deDear y Brager en el paper “*Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*” publicado en “ASHRAE Transactions 1998, Vol 104, Part I”. Ambos métodos incluidos en el standard ASHRAE 55 (Rosillo & Herrera, 2019) (de Dear & Brager, 1998).

En el estándar ISO 7730 y ASHRAE 55, se desarrollan los métodos para estimar la sensación térmica general y el grado de insatisfacción de la gente en un ambiente térmico moderado, a través de la interpretación analítica del confort calculando el “voto medio estimado” [predicted Mean Vote] y el “porcentaje de personas insatisfechas” [predicted percentage dissatisfied] (ISO, 2005).

Según describe Rosillo & Herrera, “el método PMV/PPD es el único procedimiento reconocido por el ANSI/ASHRAE Standard 55 para la evaluación de confort en edificios climatizados con sistemas mecánicos e híbridos. Para edificios con exclusivamente ventilación natural el estándar solo reconoce como procedimiento de evaluación de confort el Método Adaptativo”.

Según el estándar ISO 7730, la sensación térmica de un ser humano está relacionada fundamentalmente con el equilibrio de las temperaturas de la piel y del interior del cuerpo como un conjunto. Los factores humanos que influyen en el balance térmico son la actividad física [tasa metabólica] y la vestimenta [aislamiento de la ropa], así como por los parámetros ambientales: temperatura del aire [°C], humedad [%], velocidad del aire [m/s] y temperatura media radiante [°C] (Rosillo & Herrera, 2019).

Metodológicamente, cuando estos factores han sido determinados o medidos, la sensación térmica para un sujeto puede ser considerada a través del cálculo del “voto medio estimado” (PMV por sus siglas en Ingles) y del índice del “porcentaje de personas insatisfechas” (PPD – por sus siglas en ingles), (ISO, 2005).

Como lo define el estándar ISO 7730 y ASHRAE 55, el PMV es un índice que estima el valor medio de un gran grupo de personas en una escala de sensación térmica de 7 puntos basada en el balance de calor del cuerpo humano, que se consigue cuando la producción de calor interna del cuerpo es igual a la perdida de calor del ambiente. En el afán de conseguir el balance térmico, el cuerpo tratará de regular la temperatura de la piel y la secreción de sudor, activando su sistema de termorregulación (ISO, 2005).

Tabla No. 4:

Escala de la sensación térmica de siete puntos

+ 3	Caliente
+ 2	Cáluroso
+ 1	Ligeramente Caluroso

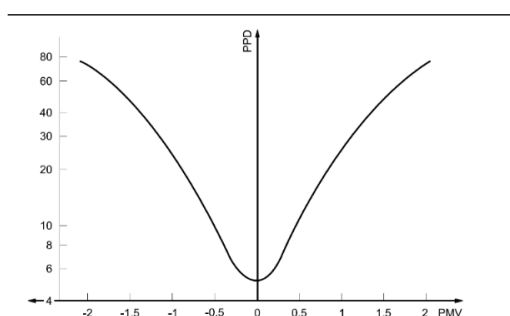
- 0 Neutro
- 1 Ligeramente fresco
- 2 Fresco
- 3 Frio

Fuente: (ISO, 2005)

El PPD permitirá estimar el porcentaje de personas que probablemente sentirán malestar térmico por estar demasiado calientes o demasiado frías en el entorno definido, el resto estarían ligeramente calientes o ligeramente frescos. El grafico muestra los valores en función del PMV.

Gráfico No. 1

“Porcentaje de personas insatisfechas” - PPD – como función del “Voto medio promedio” - PMV



Fuente: (ISO, 2005)

Se considera como aceptable un PMV de entre - 0.5 y + 0.5 que corresponde con el 10% de PPD, aunque el menor valor aceptado es 5% que equivale a un PMV de cero, posición que describiría una situación neutralidad térmica. Un PPD del 5% significa que en las mejores condiciones de la situación térmica al menos un 5% puede no estar conforme (Diego-Mas & Antonio, 2015).

En el standard ASHRAE 55, el Modelo Adaptativo es llamado, método para la “Determinación de condiciones térmicas aceptables en espacios acondicionados naturalmente controlados por ocupantes”. Básicamente son espacios en los cuales las condiciones térmicas se regulan por el control que se tiene sobre las ventanas de la envolvente. Estos espacios están en función del clima exterior principalmente, por tanto, los cambios en las condiciones ambientales no deben ser extremas, además, dependen en gran medida de la vestimenta y la actividad de sus ocupantes (ASHRAE, 2017a).

La universidad de California Berkeley en Estados Unidos ha desarrollado un software de uso libre llamado “CBE Thermal Comfort Tool”, para el cálculo de confort térmico interior en edificaciones. El software permite visualizar gráficamente los rangos en que las condiciones térmicas al interior de un espacio son aceptadas como confortables, es así, como además se puede evidenciar que el método adaptativo considera una amplia zona térmica dentro de la cual un espacio encuentra confort, lo que se hace mas preciso y exigente en el método de Fanger. En ambos casos, se debe calcular previamente la temperatura interior de las superficies y para eso, este trabajo de maestría se apoyará fundamentalmente en el análisis crítico y no en la simulación asistida como herramienta del cálculo de la temperatura existente y proyectada.

De esta manera, para la evaluación del confort térmico se recurrirá a la utilización del Método Fanger. El objetivo es lograr un estado aceptable de confort sin el uso de quipos mecánicos de acondicionamiento térmico.

Serán utilizados modelos de cálculo propios del campo de la ingeniería mecánica para obtener datos que permitan sustentar las propuestas de reconfiguración arquitectónica de la vivienda que lleven a lograr con estrategias de climatización pasivas su confort interior, enfatizando en el manejo de las resistencias térmicas de la envolvente y de la ventilación natural.

En consecuencia, se entiende que la información que arroja el índice PMV/PPD en el método de Fanger, permite no solamente calcular el confort térmico en un ambiente determinado, sino también establecer una línea base para modificarlo. Se vuelve pertinente para lograr un adecuado equilibrio entre espacio y confort, la integración de los campos de la Ingeniería mecánica y de la arquitectura (Giraldo & Herrera, 2017).

Procedimentalmente, se ejecutarán una secuencia de pasos y ecuaciones dirigidas por el Ing Mec. PHD. Carlos Herrera, director de este trabajo de maestría, con el fin de obtener factores desconocidos como la temperatura interior de las superficies y la carga térmica interna de la vivienda, para calcular la temperatura media radiante y finalmente los índices PMV/ PPD con los cuales se validará el estado de confort existente y proyectado.

Para los modelos de cálculo, se utilizarán ecuaciones de diferentes fuentes como sigue:

- Para la información base sobre la posición del sol, se recurre al “Diagrama solar estereoscópico” obtenido del Software libre online “2D Sun-Path” consultado en www.andrewmarsh.com.
- Para el cálculo de la irradiancia solar, las ecuaciones “Clear sky irradiance calculator” incluidas en el Fundamentals ASHRAE Handbook (ASHRAE, 2017b); y las encontradas en la tesis de maestría en Ingeniería Mecánica del Ing. Alejandro Masías, Universidad del Valle - 2012, quien referencia a “ASHRAE 2017, Fundamentals Chapter 15, Fenestration, Solar Heat Gain And Visible Transmittance” (Rosillo & Herrera, 2019), ASHRAE Handbool – Fundamentals. Capítulo 14. Información de diseño climático (ASHRAE, 2017b), cálculo del ángulo de incidencia solar en (Olgyay, 1968).
- Para la pérdida de calor de los elementos se utilizan las ecuaciones principales extraídas según Herrera & Rosillo de “A Heat Transfer Textbook” (Lienhard & Lienhard, 2020) (Rosillo & Herrera, 2019) y las ecuaciones de Calculo de Calor de “Heat and Mass, Chapter 21” (Y. Cengel & Ghajar, 2011).
- Para la temperatura media radiante, el software libre Online “CBE Thermal Comfort Tool”, del Center for the Built Environment, University of California Berkeley, consultado en <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>.
- Las tablas de valores: Para la Tasa Metabólica: “Table 5.2.1.2 Metabolic Rates for Typical Tasks” y Aislamiento de la ropa: “Table 5.2.2.2A Clothing Insulation Icl Values for Typical Ensembles” (ASHRAE, 2017a)
- Para obtener el índice PMV/PPD se utilizará el software libre Online “CBE Thermal Comfort Tool”, del Center for the Built Environment, University of California Berkeley, consultado en <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>.

Para el análisis de la ventilación natural y la evaluación correspondiente, se recurrirá a las siguientes:

- Para el cálculo de ventilación natural se utilizará el Método NORMA descrito por Asimakopoulos y Santamouris en “Passive cooling of building” (Asimakopoulos & Santamouris, 2013).
- Para la validación del cumplimiento de los requerimientos mínimos para una adecuada ventilación natural en las situaciones determinadas por la propuesta final, se utilizará el software desarrollado en la tesis de maestría en Ingeniería Mecánica del Ing. Alejandro Masías, Universidad del Valle -2012 (Rosillo & Herrera, 2019).

5.2. Operación y metabolismo de la vivienda

Según la ONU para 2015, las transformaciones del suelo como efecto de la urbanización, han provocado en el mundo de manera general un impacto desfavorable en los sistemas ecológicos originales situando al desarrollo ambiental sostenible como un objetivo prioritario en las agendas públicas de los países miembros. En el mismo orden lógico, el consumo de energía debido a la producción de insumos para la construcción ocupa el primer lugar en emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas – [IPCC por sus siglas en inglés] (Da Costa, 2012). Como ejemplo, en la Unión europea, las edificaciones son responsables del 40% del consumo de energía y del 36% de emisiones de CO₂. (Isasa et al., 2014)

Conceptualmente, la noción de *desarrollo sostenible* surge en la década de los 70 con una naciente preocupación por la relación entre desarrollo y conservación del ambiente. Aparece el informe *“The Limits of growth”*, que el MIT por solicitud del Club de Roma elabora y que se difunde en la primera *“Convención de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano”* realizada en Estocolmo el 16 de Junio en 1972, en el cual se afirma, a través del uso de proyecciones estadísticas, que conservar el ritmo de producción de la industria de ese momento y las dinámicas de consumo y de habitar asociadas, llevaría al colapso del planeta en un horizonte cercano a los 100 años, por tanto, el crecimiento debería tener un límite. Su enfoque pesimista resaltaba que el desarrollo económico solamente se daría a través del agotamiento de los recursos naturales y por tanto debían trabajar en controlar los procesos destructivos. (Hissong, 2000).

En 1987, las Naciones Unidas emiten el documento llamado *“Our Common Future”*, como reporte de la *“World Commission on Environment and Development”* liderada por la primera Ministra Británica Gro Harlem Brundtland. Esta vez, el enfoque se dirige al cambio de las actitudes, se orienta hacia los valores sociales y a la educación, el debate y la participación pública. Por su naturaleza, el documento propone que la escala de participación se irrigara a la población en general (Visser & Brundtland, 2013).

En 1988, la Organización Mundial Meteorológica [WMO, por sus siglas en inglés] y el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [UNEP, siglas en inglés], dieron forma al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC], con el objetivo de proveer a los gobiernos y en general, a todos los niveles, información científica que ellos puedan utilizar para desarrollar políticas climáticas. Es el organismo de las Naciones Unidas para evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático. Los reportes del IPCC son además claves en las negociaciones internacionales de cambio climático (IPCC, 2013).

La búsqueda de estrategias para reducir los GEI, han llevado a que cada vez más países se comprometan en tareas de escala local para generar impactos globales con enfoques de sostenibilidad ambiental. En 1992 se llevó a cabo la cumbre *“Rio Earth Summit”*, celebrada en Río de Janeiro - Brasil, en donde se asentó la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - CMNUCC, aprobada en Nueva York el 9 de mayo de 1992, con vigencia desde 1994 y adoptada por 195 países. A partir de esta convención las iniciativas intergubernamentales de países en el mundo, se han concentrado en adoptar políticas dirigidas a la transformación de actividades para contrarrestar las causas del cambio climático, una de ellas, la de mayor impacto, la reducción de emisiones de CO₂ en los procesos de fabricación de productos para la construcción.

La CMNUCC da reconocimiento a la existencia del cambio climático como problema y establece como objetivo común *“lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera con el fin de impedir interferencias antropogénicas (causadas por el ser humano) peligrosas en el sistema climático...”*. Define adicionalmente que las acciones deben lograrse en un término adecuado que permita que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, con el fin de detener la amenaza a la producción de alimentos y asumiendo procesos economicistas con enfoque de desarrollo sostenible (ONU, 1992).

Con el mismo propósito, la firma del “*Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*” en 1998, replantea la dimensión del problema y define estrategias económicas para compensar los compromisos asumidos por la industria en relación a las emisiones de CO₂ a la atmósfera, proponiendo como estrategia la implementación de mecanismos de desarrollo limpio [*Clean Development Mechanism* - CDM]. Los CDM [o MDL en español] son un programa de compensación de carbono administrado por la ONU, que permite a las industrias de los países miembros, financiar proyectos de disminución de emisiones de GEI en otros países y aportar el volumen de las emisiones reducidas, como parte de sus compromisos para cumplir los objetivos internacionales asumidos (ONU, 1998).

El enfoque primario del desarrollo ambiental sostenible es evitar el agotamiento de los recursos naturales, la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y el consumo de energía, principalmente provocados por la industria de la construcción (Da Costa, 2012). A partir de este objetivo, diferentes iniciativas y metodologías han sido desarrolladas por organizaciones y gobiernos de países como Francia, Suiza, España, Alemania, China y Japón, para evaluar el comportamiento de actividades dentro del sector de la industria frente a las emisiones de CO₂ y generar políticas públicas y normatividad al respecto, el “Protocolo de Gases Efecto Invernadero [GHG protocol – en inglés] es uno de sus resultados (Daviet & Ranganathan, 2005).

En 2015, el mismo año que la ONU declaró que la mitad de la población del mundo reside en áreas urbanas, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático reunida en Francia en la COP21, firmó el “Acuerdo de París” con los objetivos de “mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C, aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos; y situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero” (ONU, 2015).

Consecuentemente con las nociones establecidas en el marco teórico, este trabajo toma como unidad de análisis una vivienda urbana, con el fin de identificar un modo de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera y aportar de esta manera, a los objetivos mundiales de reducción de GEI desde la escala local.

Siguiendo el “*estudios del metabolismo urbano y sus aplicaciones en la planificación y diseño urbano*” (Kennedy et al., 2011), entender el rol de la vivienda en el contexto urbano es fundamental en la configuración del desarrollo de ciudad y comunidad sostenibles, dado que “la suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, resultando en crecimiento, producción de energía y eliminación de desechos”, le dan forma al metabolismo urbano. Es por tanto responsable, que la arquitectura de una vivienda, presente mecanismos que sean coherentes con las necesidades de hábitat globales.

Se entenderá, de manera general, el metabolismo urbano como la estimación de las “*entradas, salidas y acumulación de energía, agua, materiales y desechos para una región urbana*” (Kennedy et al., 2011). De esta manera, se tendrá como referencia para la evaluación de las emisiones de CO₂ de la vivienda, el método del análisis del ciclo de vida - AVC.

Una metodología globalmente utilizada para medir las emisiones de CO₂ y su impacto, es el análisis del Ciclo de Vida (ACV). Esta es una de las técnicas desarrolladas para valorar el impacto sobre el medio ambiente asociado a la extracción, producción y consumo de materiales y productos. En Colombia el Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, asumió la norma internacional ISO 14040 del 2006: “*Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guide lines*” para tratar los “aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales, como la utilización de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones y vertimientos, desde la adquisición de la materia prima hasta su disposición final, es decir, de la cuna a la tumba” (ICONTEC, 2007).

Asumiendo la orientación del ACV, este trabajo entiende que la energía y los recursos para la extracción de materia prima son limitados en la naturaleza y que su restauración demora más que el tiempo en que se usan o que se desarrollan alternativas. Según las prácticas propuestas por la norma, “la conservación de los recursos privilegia la cantidad de residuos generados y, por tanto, plantea dar un manejo sustentable a los mismos, para minimizar su impacto ambiental” (Venegas, 2018)

Teniendo de referente la metodología del Análisis del Ciclo de Vida - ACV, este trabajo se enfocará particularmente en el problema de las emisiones de CO₂ a la atmósfera generadas por una vivienda urbana, en tres escenarios: Debidas a su construcción, debidas a las adecuaciones resultantes del mejoramiento del confort térmico y debidas a su operación en una ventana de 50 años, desde su entrega en 1970 hasta 2020.

Finalmente, este trabajo entiende que la producción de las emisiones de CO₂ de la vivienda urbana, es el resultado de su metabolismo operacional.

5.3. Estructura del documento

El contenido de este documento está organizado en dos partes que se desarrollan en cuatro Fases. Una primera parte que reúne los numerales del 1 al 6, en la que se caracteriza el proyecto de trabajo y se enmarca teórica y metodológicamente, y una segunda parte, en la que se recogen los numerales del 7 al 9 que comprende el proceso de investigación, la obtención de resultados, las conclusiones y la bibliografía. La Fase 1, acopia la información preliminar, caracterización y diagnóstico del problema. La Fase 2, inicia la producción de información y los primeros cálculos para estimar la línea base. La Fase 3, comprende la transformación de las condiciones originales para terminar en la estimación de nuevos cálculos para estimar los resultados con las modificaciones realizadas. La Fase 4, se enfoca en la línea de análisis No.2, genera información de línea base, caracteriza el problema y estima los resultados de la implementación de estrategias para afectarla positivamente.

Consecuentemente con las líneas de análisis, la segunda parte del documento contiene tres capítulos, los dos primeros dedicados a la línea de análisis No.1 referida a Confort térmico y el capítulo 3 a la línea de análisis No. 2 que se relaciona con Emisiones de CO₂.

Finalmente, la información del primer capítulo alimenta los procesos desarrollados en los otros dos. Los resultados que se obtienen en cada capítulo van sustentando la comprobación de la hipótesis.

Los capítulos se organizan de la siguiente manera:

- El capítulo I, tiene por objetivo el cálculo de la carga térmica de la edificación y la evaluación de confort – Línea base
- El capítulo II, gira en torno a una propuesta arquitectónica para mejorar el confort a niveles satisfactorios, calcular el confort y analizar los resultados.
- El capítulo III, tiene como objetivo identificar, evaluar y proponer una alternativa para disminuir las emisiones de dióxido de carbono [CO₂] producidas por la vivienda. Se consolida un banco de indicadores para determinar línea base y la aplicación del ACV en función de las emisiones de CO₂. Para esto, se evalúan tres escenarios: a. Construcción: Materiales en estado primario, b: Modificación: Implementación de estrategias para mejorar el confort térmico, c: Operación: funcionalidad de la vivienda en un horizonte de tiempo de 50 años [1.970- 2.020].
- Finalmente se encuentran las conclusiones generales y la bibliografía.

5.4. Estado del arte

Línea de análisis No.1: DISCONFORT TERMICO AL INTERIOR DE LA VIVIENDA

Para el caso del confort térmico en edificaciones, la institución avalada internacionalmente como asociación de expertos es la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado – ASHRAE [*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*]. Sus publicaciones son periódicas sobre temas de actualidad y registran investigaciones, desarrollos tecnológicos y estándares que sirven de regulación a nivel global. Recientemente, en el *Journal* de Mayo 2020, dedicado a la COVID 19 – operación de edificios, se presentó la posición científica y técnica de la ASHRAE sobre la pandemia a la vez que proponía líneas guía para su manejo desde el enfoque de la ingeniería mecánica, como el manejo de sistemas de ventilación y la implementación de Luz Ultra Violeta – UV. En la publicación de Junio 2020 apareció una primera edificación, la *Colony Square* en Atlanta, USA, dotada con mecanismos de iluminación UVC implementando el método de limpieza “*Ultraviolet Germicidal Irradiation*” (UVGI). Sobre confort térmico, ASHRAE publica información de última generación continuamente, a través de sus *journals*, en los que se muestran desarrollos tecnológicos aplicados, algunos en estado de prueba.

Softwares dedicados a la simulación como túneles de viento y el cálculo de confort con metodología PMV/PPD también están disponibles, sin embargo, por la trascendencia de la fuente, se ha escogido el software libre Online “*CBE Thermal Comfort Tool*”, del Center for the Built Environment, University of California Berkeley, al cual se accede consultando en <https://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>. y el método NORMA para el cálculo de Ventilación Natural y recambio de aire por hora, incluido en *Passive Cooling of Buildings*.

Debido al enfoque y la metodología, se llevó a cabo la revisión de artículos, en su mayoría publicados en Elsevier, scopus y Science Direct, y libros de termodinámica en donde se desarrollan temas como la calefacción y el enfriamiento de edificaciones, dentro de los que se cuentan:

Libros

Para ecuaciones de cálculo:

- Fundamentals - ASHRAE® Handbook (2017)
- Passive Cooling of Buildings. Asimakopoulos, D., & Santamouris, M. (2013).
- Clima y arquitectura en Colombia. Victory Olgyay. (1963)
- Heat & Mass Transfer. Cengel & Ghaja
- A Heat Transfer Textbook, Cambridge, Massachusetts, USA. Lienhard, J. H. I., & Lienhard, J. H. V. Quinta edición. (2020).

Conceptualización y estrategias:

- Confort y eficiencia energética en el diseño de edificaciones. Rosillo, M., & Herrera, C. (2019).
- Arquitectura y energía natural. Coch, H., & Serra, R. Universitat Politècnica de Catalunya. (1995).

Publicaciones abiertas de la California Digital Library de la Universidad de California. USA:

- Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, de Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998).
- A better way to predict thermal comfort. ASHRAE Journal, Olesen, Bjarne W., Brager, G. S. (2004).

Artículos y tesis:

- Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. Giraldo & Herrera. (2017)
- Proyecto mejoramiento bioclimático vivienda urbana. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Macías, A. (2017).

- A Unified Adaptive Fanger's Model for Thermal Comfort in Tropical Countries. Pau and Pao. Univesiti Teknologi PETRONAS, Malasia. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.393.799
- Fanger's model of thermal comfort: a model suitable just for men?. Schaudiensta, Vogdta. TU Belin (2017)
- Evaluación del confort térmico con el método de Fanger. Diego-Mas, & Antonio, J. Universidad Politécnica de Valencia (2015).

Normatividad internacional vigente:

- ISO 7730. Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. (2005).
- Standard 55 - 2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, (2017)
- Standard 62.2 – ASHRAE. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (2019)

Línea de análisis No.2: EMISIONES NO CONTROLADAS DE CO₂

Respecto al componente “emisiones de CO₂” a la atmósfera, en el marco del cambio climático, el tema es vigente, de trascendencia y pertinencia a escala global. Esta condición hace que exista el interés de investigadores en todo el mundo proveyendo recursos de conocimiento que suman al análisis del problema y a la búsqueda de alternativas de solución, por tanto, es posible acceder a información actualizada disponible en diferentes bases de datos.

En materia de información, el punto de referencia es el IPCC [*Intergovernmental Panel on Climate Change*], quienes emiten reportes periódicamente sobre el análisis de datos respecto a la emisión de gases efecto invernadero en el mundo. Recoge, analiza, valida y consolida información de la industria por sectores, identifica y genera indicadores que aportan a los gobiernos criterios para la elaboración de políticas y proyectos.

El IPCC trabaja en tres grupos: el grupo de trabajo I, se encarga de las bases científicas del cambio climático, el grupo de trabajo II, sobre impactos, adaptación y vulnerabilidad y el grupo de trabajo III, se ocupa de la mitigación del cambio climático. Adicionalmente, el IPCC cuenta con un grupo de trabajo sobre inventarios de gases de efecto invernadero -GEI, que desarrolla metodologías para medir emisiones y absorciones (IPCC, 2013).

La información sobre indicadores de emisiones más actualizada, vigente y validada, es la información que se encuentra en las “Directrices sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero – 2006” elaborada por la Fuerza de Trabajo del IPCC publicadas y de acceso libre que pueden consultarse en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. En mayo de 2019 fueron refrendadas con una actualización de la metodología utilizada por los gobiernos para estimar sus emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2021).

Para la identificación de los indicadores de emisiones de CO₂ fueron consultados artículos enfocados en la producción de materiales de construcción, encontrados con fechas recientes:

- Andrew, R. M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018. Earth System Science Data, 11(4), 1675–1710. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- CAEM. (2015). Validate inventory of the brick sector in Colombia. Climate & Clean Air Coalition, 134. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/inventory-and-assessment-tool-colombia-black-carbon-and-other-pollutant-emissions-brick>

- Dan Gavriletea, M. (2017). Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of sand market. Sustainability (Switzerland), 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071118>
- Harnisch, J., Wing, I. S., Jacoby, H., & Prinn, R. (1998). Primary aluminum production: Climate policy, emissions and costs. Policy Analysis. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/3603>
- IISI. (2002). World Steel Life Cycle Inventory Methodology Report 1999/2000 - International Iron and Steel Institute. Methodology, October 2002, 96.
- Jerry Marks, Lubetsky, J., Steiner, B. A., Faerden, T., Lubetsky, J. S., Lindstad, T., Olsen, S. E., Tranell, G., Marks, J., Agyemang-Bonsu, W. K., Born, M. F., Green, L., Kvande, H., Martchek, K., Rand, S., Tranell, G., Tripp, T., Lubetsky, J. S., Marks, J., & Lubetsky, J. S. (2006). Metal Industry Emissions. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3: Industrial Process and Product Use, 85.
http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf
- Kemenes, A., Forsberg, B. R., & Melack, J. M. (2011). CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 116(3), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2010JG001465>
- MAVDT, & PNUD. (2013). Residuos de Asbestos y productos que los contengan. Guía técnica para la gestión ambiental sobre residuos.
- Moedinger, F. (2005). Sustainable Clay Brick Production– A CASE STUDY. World Sustainable Building Conference, 2005(September), 3–4.
- Ruiz, M., Way, A., & Ca, B. (2008). Represas sucias. Las represas y las emisiones de gases efecto invernadero. International Rivers, 4. http://www.internationalrivers.org/files/attached-files/represassuciasrevisada_2.pdf
- Swisscontact, & CCAC. (2015). Portafolio de Tecnologías en America Latina de Sector Ladrillero. http://www.redladrilleras.net/apps/manual_ccac/pdf/es/Portafolio-Tecnologias-America-Latina_b.pdf
- Venegas, A. O. (2018). Evaluación de la energía contenida, emisiones de CO₂ y material particulado en la fabricación del ladrillo semi-mecanizado tocho en Cuenca, a través del análisis de ciclo de vida (ACV). 62.
- Fukurozaki, S. H., Zilles, R., & Sauer, I. L. (2013). Energy Payback Time and CO₂ Emissions of 1.2 kWp Photovoltaic Roof-Top System in Brazil. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2(2), 164–169. <https://doi.org/10.12720/sgce.2.2.164-169>
- Yıldız, G., Çalış, B., Gürel, A. E., & Ceylan, İ. (2020). Investigation of life cycle CO₂ emissions of the polycrystalline and cadmium telluride PV panels. Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management, 14(June). <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100343>
- Varun, Bhat, I. K., & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems- A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(5), 1067–1073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.004>

Marco normativo y standards técnicos:

- ICONTEC. (2007). NTC - ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Icontec, 2(571), 1–24. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>
- MAVDT. (2014). Ley 1715 de 2014. Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. May, 2014.
- ONU. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Aprobación Del Acuerdo de París, 20489, 4.
- ONU. (1998). Protocolo de KYOTO. Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático, 24, 24. <https://doi.org/10.1145/115790.115803>
- ONU. (2015). COP21 - Acuerdo de París. Convencion Marco de Las Naciones Unidas Para El Cambio Climático, 1(12 de diciembre), 27. <https://doi.org/10.16925/co.v25i111.1874>
- Daviet, F., & Ranganathan, J. (2005). The Greenhouse Gas Protocol: The GHG Protocol for Project Accounting. The Project Protocol, 144. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4584.9043>

- Fu, W., Turner, J. C., Zhao, J., & Du, G. (2015). Ecological footprint (EF): An expanded role in calculating resource productivity (RP) using China and the G20 member countries as examples. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.023>
- Wackernagel, M., & Rees, W. (2003). Nuestra huella ecológica: Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra. *Open Edition Journals*, 1. <http://journals.openedition.org/polis/7216>
- Mithraratne, N., & Vale, B. (2004). Life cycle analysis model for New Zealand houses. *Building and Environment*, 39(4), 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.09.008>
- Kennedy, C., Pincetl, S., & Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 1965–1973. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>
- Isasa, M., Gazulla, C., I., Z., Oregi, X., P., P., & Duclos, L. (2014). EnerBuiLCA: life cycle assessment for energy efficiency in buildings. *World SB 2014, July 2015*, 1–32.

De la misma manera, fueron revisados artículos relacionados con la evaluación y el análisis de emisiones de CO₂ en edificaciones, con similar enfoque al de este trabajo de maestría. Se enlistan los siguientes:

- González, M. J., & García Navarro, J. (2006). Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, 41(7), 902–909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- Seo, M. S., Kim, T., Hong, G., & Kim, H. (2016). On-Site measurements of CO₂ emissions during the construction phase of a building complex. *Energies*, 9(8), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en9080599>

Mediciones in situ de emisiones de CO₂ durante la fase de construcción de un complejo de edificios: Este trabajo realizó un monitoreo en tiempo real durante un periodo de 12 meses de construcción de una edificación compleja de 1.935 m², conformada por apartamentos y oficinas en Corea.

- Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., & Cuchí, A. (2012). Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile. *Revista de La Construcción*, 11(3), 125–145. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2012000300011>

Este trabajo analiza el consumo de energía y la producción de CO₂ de una vivienda tipo de un conjunto de 255 viviendas sociales apareadas construidas en la región de Bio Bio – Chile. Fue utilizada una metodología de Análisis del ciclo de vida (ACV) para determinar el impacto generado utilizando como indicador base un (1) m² de construcción.

- Mercader, M. P., de Arellano, A. R., & Olivares, M. (2012). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. *Informes de La Construcción*, 64(527), 401–414. <https://doi.org/10.3989/ic.10.082>

Este artículo realizado por investigadores de la Universidad de Sevilla - España, toma una muestra representativa de una vivienda a la llama “Modelo Constructivo Habitual – MCH”, y la cuantifica utilizando como indicador una unidad de kg por m² construido de acuerdo a los componentes básicos / materiales utilizados. Identifica las emisiones de CO₂ expresadas en Kg CO₂ / Kg, producido en la fabricación de cada Componente Básico de Material – CBM y define un valor de emisiones de CO₂ producidas por m² de superficie construida.

- de Lasso, J. G. G., & Haddad, A. N. (2016). Life cycle assessment of building construction materials: Case study for a housing complex. *Revista de La Construcción*, 15(2), 69–77. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2016000200007>

Análisis del ciclo de vida de los materiales de construcción: Caso de estudio para una vivienda Este artículo publicado por la Universidad Católica de Chile, toma como caso de estudio cinco unidades familiares de vivienda de clase media, cada una de dos pisos, ubicadas en São Gonçalo, estado de Rio de Janeiro, Brasil. A través del uso de tres metodologías: IMPACT2002+, Eco Indicator99, CML 2000 and IPCC, para el análisis del ciclo de vida, se enfoca en los impactos que están frecuentemente asociados a las actividades construcción, como el calentamiento global, el consumo de recursos naturales, el consumo de energía no renovable, y la toxicidad para la salud humana.

- Da Costa, B. (2012). Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil (Universidade Federal do Rio de Janeiro). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Cálculo de emisiones de CO₂ generadas en la producción de materiales utilizados en la construcción civil de Brasil: Esta tesis utilizando información secundaria, construye una base de datos por material en la que identifica su factor de emisión de CO₂ por Kg de material estudiado, que luego cruza con su caso de estudio. toma como caso de estudio una vivienda unifamiliar en el centro de la ciudad de Río de Janeiro.

- Mazzocco, M. P., Filippín, C., Sulaiman, H., & Larsen, S. F. (2018). Performance energética de una vivienda social en Argentina y su rehabilitación basada en simulación térmica. *Ambiente Construido*, 18(4), 215–235. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400302>

Soportado en el uso de softwares de simulación SIMEDIF y ECOTEC, este artículo busca a través de una simulación, mejorar el comportamiento térmico de una vivienda medianera construida en los años 60, ubicada en Santa Rosa, capital de la provincia de La Pampa, en la región central de la provincia – Argentina.

Existen en el mercado softwares de medición de emisiones de CO₂ diseñados por un numero amplio de empresas. Algunos más complejos, dirigidos a la industria y a la producción de materiales, incluyen la posibilidad de evaluar el ciclo de vida bajo el estándar ISO 14040 del 2006 con métodos paramétricos de información como el software “*Umberto LCA+ Analyze and optimize the environmental impact of your products*” del Instituto de Informática Ambiental con sede en Hamburg, Alemania. Sin embargo, por la metodología que se utilizará en el desarrollo de este trabajo, no se requieren simuladores de huella de carbono. El autor elaborará tablas para calcular los datos requeridos.

6. MARCO METODOLÓGICO

Debido a que los objetivos definidos en este trabajo son de naturaleza contable, la investigación que se adelantará es de tipo **cuantitativo** (GROAT, WNAG, 2013). Este trabajo se aborda desde el paradigma conceptual de la **teoría de sistemas**, como marco fundamental para el desarrollo de las hipótesis, puesto que los datos resultantes de las evaluaciones y de los análisis de la información dependen fuertemente de una estructura relacional de dependencias e influencias que los afectan (Bertalanffy, 1968).

Para llevar a cabo los fines propuestos en este trabajo se requiere dar cuenta de algunas dinámicas que operan en la cotidianidad de la vivienda, por tanto, se establecerán como técnicas de trabajo, estrategias de investigación **Experimental y de simulación**.

Siguiendo la “*tradición de las investigaciones en el contexto arquitectónico*”, de acuerdo con Groat y Wnag, teniendo en cuenta que este trabajo podrá ser medido y que “*estas mediciones pueden suponer que reflejan*

la realidad”, buscan entenderla y proponen mecanismos para mejorarla, el sistema de exploración implementado es de carácter **positivista**. (GROAT, WNAG, 2013).

Finalmente, se pretende encontrar los valores de línea base de confort y emisiones de CO₂, asociados a la configuración arquitectónica original de la vivienda, e iniciar operaciones físicas, de adición, sustracción, ensamble, entre otras, que lleven a transformar la energía y valores de emisiones calculados en el estado original, a otro en el que se logre una mejoría de su condición inicial, tanto de confort térmico interno apoyándose de igual manera del manejo de la ventilación natural, como de las emisiones de CO₂, por tanto, este es un ejercicio de **análisis comparativo – cuantitativo**.

No obstante, dado que el confort es un criterio de naturaleza subjetiva, cuya noción más aceptada globalmente considera que es una “condición de la mente” (ASHRAE, 2018), calcularlo debe entenderse en el plano de las técnicas cuasi – experimentales, lo cual, lleva en algunos aspectos a que el trabajo se sitúe en el campo de la investigación **pospositivista**.

Procedimentalmente, se encuentra definido el marco teórico general, el estado del arte asociado a las líneas de análisis y un alcance precisado en el árbol de problemas y objetivos, incluyendo los recursos disponibles, económicos, en tiempo y técnicos para lograr el objetivo general.

6.1. Mecanismo de control

Teniendo en cuenta que el objetivo general de este trabajo es lograr para la vivienda de estudio, una condición térmica que esté dentro de parámetros de confort aceptables y minimizar sus emisiones de CO₂, y que, para esto los productos finales de este trabajo de investigación son:

- Línea de análisis No.1: **UN (1) DISEÑO DE UNA SOLUCIÓN ARQUITECTÓNICA**: Que permita obtener el estado de confort térmico interior a la vivienda.
- Línea de análisis No.2: **UNA (1) PROPUESTA ALTERNATIVA PARA DISMINUIR EMISIONES DE CO₂**: Para implementarse en uno de los tres escenarios determinados

El mecanismo de control que se propone es la división de su alcance en fases dentro de las cuales se desarrollen los componentes de los capítulos correspondientes.

La elaboración de este trabajo se formula en cuatro (4) Fases transversales, progresivas y dependientes. Así, el desarrollo de cada capítulo depende del avance en la ejecución de las Fases previas, como lo muestra el diseño metodológico en la Tabla No. 4.

- La Fase 1, acopia la información preliminar, caracterización y diagnóstico del problema.
- La Fase 2, inicia la producción de información y los primeros cálculos para estimar la línea base.
- La Fase 3, comprende la transformación de las condiciones originales para terminar en la estimación de nuevos cálculos para estimar los resultados con las modificaciones realizadas.
- La Fase 4, se enfoca en la línea de análisis No.2.

Correspondientemente con lo anterior, se ha definido una metodología para cada una de las líneas de análisis que se inserta en la organización de las fases como se muestra en adelante:

- Línea de análisis No.1: DISCONFORT TERMICO AL INTERIOR DE LA VIVIENDA
- Línea de análisis No.2: EMISIONES NO CONTROLADAS DE CO₂

6.2. Metodología línea de análisis No. 1

La línea de análisis No.1 se encuentra dentro de la Fase 1.

FASE 1: Acopio de información preliminar, caracterización y diagnóstico del problema.

Capítulo 1: Cálculo y evaluación del confort térmico de una vivienda urbana – Línea Base

Inicialmente se definirán las nociones que alberga el “FIN” de la **línea de análisis No.1**.

El **FIN** definido es: “lograr un **estado de confort** térmico **aceptable** con **estrategias de climatización pasiva**”.

Por lo tanto, se requiere configurar las siguientes nociones:

- **Estado de confort térmico:** Definición conceptos
- **Niveles de Confort térmico:** Indicadores y parámetros de medición del confort, límites aceptables.
- **Climatización pasiva:** Definición de conceptos y diseño arquitectónico de estrategias.

Se continua con la,

Caracterización del volumen de control

- a. Datos de geolocalización
- b. Organización espacial y volumétrica
- c. Identificación y localización de elementos estructurales y de cerramiento en el volumen
- d. Posicionamiento ortográfico

FASE 2: Inicia la producción de información y los primeros cálculos para estimar la línea base

En esta fase y momento del trabajo, se empiezan a generar valores para el análisis comparativo de datos así:

Generar data y cálculo de línea base

- e. Se define el día para el cálculo de la irradiancia solar
- f. Se obtienen datos meteorológicos de la hora de diseño estimados anuales
- g. Se determina la posición del sol
- h. Determinar la Irradiancia solar sobre la vivienda
- i. Definir los datos meteorológicos de la hora de diseño estimados anuales
- j. Calcular la pérdida de calor de los elementos que componen el volumen de control [temperaturas de diseño y TMR]
- k. Determinar el volumen de control

Determinar el estado de confort en el volumen de control – LINEA BASE

- l. Calcular la temperatura media radiante – Línea base
- m. Determinar el estado de confort del volumen de control – Línea base

Determinar el flujo de aire en el volumen de control - LINEA BASE

- n. Calcular el flujo de aire disponible en el volumen – Línea base
- o. Determinar el flujo de aire para obtener confort y calidad del aire interior – Línea base [Calcular los recambios de aire por hora [ACH] requeridos]

Análisis de información y de resultados de LINEA BASE

FASE 3: Transformación de las condiciones originales y cálculo de resultados

Capítulo 2: Confort térmico del volumen de control MODIFICADO

Diseño de estrategias y operaciones arquitectónicas al estado inicial

- p. Diseño de estrategias para mejorar las condiciones térmicas INICIALES
- q. Determinar operaciones arquitectónicas
- r. Detalles arquitectónicos, especificaciones de materiales y presupuesto
- s. Determinar la capacidad de transformación
 - i. Adecuaciones físicas
 - ii. Simulaciones

Implementación de estrategias pasivas con operaciones arquitectónicas – VOLUMEN MODIFICADO

- a. Adecuación física: Ejecución obra civil para adecuar el volumen de control
- b. Simulación: Diseño de operaciones que no se construirán

Evaluación de confort en el volumen de control – VOLUMEN MODIFICADO

- a. Modelado de elementos – Volumen Modificado
- b. Cálculo de la temperatura media radiante - Volumen Modificado
- c. Determinar el estado de confort - Volumen Modificado

Determinar el flujo de aire en el volumen de control – VOLUMEN MODIFICADO

- t. Calcular el flujo de aire disponible - Volumen Modificado
- u. Estimación del flujo de aire para obtener confort y calidad del aire - Volumen Modificado
[Calcular los recambios de aire por hora [ACH] requeridos]

Análisis de información y de resultados – VOLUMEN MODIFICADO

- v. Análisis de información y análisis comparativo
- w. Toma de datos higrotérmicos del volumen de control MODIFICADO
- x. Consolidación de resultados

FASE 4: Estimación de emisiones CO₂ – Línea Base e implementación de estrategias para su reducción

6.3. Metodología línea de análisis No. 2

Para iniciar, se determinan las nociones en torno al “FIN” de la **línea de análisis No.2**.

El **FIN** definido es: “**Controlar y minimizar** las **emisiones de CO₂ producidas por la vivienda**”

Por lo tanto, se requiere establecer las siguientes nociones:

- **Emisión de CO₂:** Definición concepto
- **CO₂ emitido por la vivienda:** Indicadores y parámetros de medición de emisiones de CO₂.
- **Reducción de línea base:** Definición de concepto, línea base y objetivos de reducción.

Metodológicamente, tanto la línea base como el estado modificado, trabajaran sobre las emisiones de CO₂ debidas a tres situaciones en la vida de la vivienda:

A. Emisiones de CO₂ debidas a la construcción: [Se procede con los siguientes pasos]

1. Identificar los materiales que componen la vivienda objeto de estudio. [Solamente se tomarán datos de los materiales que se encuentran a la vista y se pueden confirmar].
2. Establecer los indicadores de emisiones por material utilizando fuentes verificables a nivel global. [La unidad de medida utilizada para establecer las emisiones por material utilizado es el Kilogramo [Kg]].
3. Realizar el cálculo aritmético para totalizar el valor de emisiones por cantidad de material utilizado y establecer un valor de emisiones totales.
4. Establecer un banco de indicadores de emisiones de CO₂.

B. Emisiones de CO₂ debidas a la operación:

5. Identificar fuentes de emisiones de CO₂ durante la operación de la vivienda.
6. Calcular la cantidad de emisiones durante un periodo operacional de 50 años.
7. Realizar el cálculo aritmético para totalizar el valor de emisiones.

C. Emisiones de CO₂ debidas a la implementación de estrategias para mejorar el confort térmico interno:

8. Se calcularán las emisiones de CO₂ generadas por las transformaciones físicas y las adiciones realizadas a la vivienda para lograr el mejoramiento del confort térmico establecidas en la línea de análisis No. 1.

Finalmente, se realizará a evaluación de la data obtenida y se plantearán alternativas viables para lograr el fin de la línea de análisis.

Con las estrategias para controlar y disminuir las emisiones de CO₂ se dará por finalizado el alcance de este trabajo de investigación.

6.4. Esquema general (diagrama) del diseño metodológico:

Tabla No. 5

DISEÑO METODOLÓGICO										Componente I.										Componente II.										III.									
CUADRO DE PLANIFICACIÓN DE METAS										Preparación Marco general de la investigación										Desarrollo del contenido																			
CAPÍTULO	MEDIOS		ESTRATEGIA	TÁCTICA	OBJETIVO	FASES DEL PROYECTO				FASE I				FASE II				FASE III				FASE V																	
						A/S	O/N	D/E	F/M	A/M	I/J	A/S	O/N	D/E	F/M	A/M	I/J	A/S	O/N	D/E																			
						1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4										
I. Resumen del proyecto																																							
2. Planteamiento del problema																																							
3. Justificación																																							
4. Objetivos: Arbol de problemas																																							
5. Marco Teórico: Estado del Arte																																							
5. Marco Metodológico																																							
7. Resultados																																							
FIN No.1 Línea de análisis No.1	Lograr un estado de confort térmico aceptable con estrategias de climatización pasiva	7.1. Capítulo I	Cálculo y evaluación del confort térmico - Línea Base	Apoyo técnico + Bibliografía digital, papel + Tiempo 4 meses	Utilizar las condiciones del entorno en la solución de climatización pasiva - bioclimática [evitar incremento del consumo de energía]	* [Simulación]: Cálculos y diseño en medios digitales	Caracterización del volumen de control																																
		7.2. Capítulo II	Operaciones arquitectónicas para el confort térmico del volumen de control	Inversión posible: \$5.000.000 = Instrumentalización para mediciones análoga + adecuaciones físicas Tiempo 6 meses	Identificar la fuente de mayor generación de emisiones de CO2 para reducir su producción [Visibilizar las emisiones para controlaría]	* [Simulación]: Cálculos y diseño en medios digitales	Generación de data y cálculo de línea base	Implementación de estrategias para mejoramiento del confort térmico																															
FIN No.2 Línea de análisis No.2	Controlar y minimizar las emisiones de CO2 producidas por la vivienda	7.3. Capítulo III	Cálculo de emisiones de CO2 debido a: A. la construcción original de la vivienda; B. a las modificaciones para lograr el confort térmico C. a la operación en un horizonte de 50 años	Apoyo técnico + Bibliografía digital, papel + Tiempo 7 meses			Planteamiento problema + Diagnóstico	Análisis de información y análisis de resultados																															
								Generación de data y cálculo de línea base	Análisis de información y análisis de resultados																														
8. Conclusiones																																							
9. Bibliografía																																							

7. RESULTADOS

7.1. CAPITULO I

Cálculo y evaluación del confort térmico de una vivienda urbana

Noción de confort térmico

Este trabajo de tesis entiende que la vivienda es un producto antropogénico cuya función principal, es brindar condiciones artificiales apoyado en las situaciones naturales del contexto, para habitar, por lo tanto, el confort térmico interior es fundamental para el ser humano. Entendiendo que la noción de confort tiene diferentes dimensiones como la lumínica y la acústica, este trabajo solamente se enfocará en el confort térmico.

La transferencia de conocimiento nativo, la herencia de las tradiciones constructivas, el dominio de las tecnologías vernáculas, han tenido especial importancia en los procesos de construcción, así, el conocimiento del entorno ambiental y cultural en el que se propone edificar una vivienda es esencial para generar un ambiente aceptable por sus habitantes. Según Serra y Coch, las *“reacciones específicas de oposición o valoración frente al confort”*, que se entienden asociadas al hábitat cultural y genético de una comunidad son determinantes en las apreciaciones que ellas hacen del entorno, y es a su vez necesario incluirlas en el proceso de diseño *“y especialmente en el diseño ambiental”*. Como lo afirman: *“estas reacciones se han reflejado, no solo en la propia forma física de los asentamientos, sino también en la misma estructura social, que a su vez vuelve a influir indirectamente en dicha forma física. Al mismo tiempo que los factores más agresivos del entorno, climáticos o no, condicionan la elección de las defensas, la opción entre un tipo u otro de sistema (barreras fijas, energías artificiales, etc.) depende de la tradición cultural de los constructores”*. (Serra. Coch, 1991).

Por tanto, lograr el confort térmico de una vivienda debería ser inherente a su diseño arquitectónico. Y es aún más necesario cuando las condiciones climáticas de su localización geográfica, están dominadas por una exposición solar permanente como en latitudes cercanas a los 0° - línea ecuatorial, no estacionarias. Sin embargo, aspectos como la eficiencia, en el marco del desarrollo sostenible en términos economicistas, no lo privilegian (Hissong, 2000).

Según la definición encontrada en *Standard 55* de ASHRAE -, El confort térmico humano es *“esa condición de la mente que expresa satisfacción de una persona con el ambiente térmico y se evalúa de manera subjetiva”* (ASHRAE, 2017a). Adicionalmente, como lo expresan Bjarne y Brager, *“Si bien puede estar parcialmente influenciado por una variedad de factores contextuales y culturales, la sensación de confort térmico de una persona es principalmente el resultado del Intercambio de calor del cuerpo con el medio ambiente. Esto está influenciado por cuatro parámetros que constituyen el ambiente térmico (aire temperatura, temperatura radiante, humedad y velocidad del aire), y dos parámetros personales (vestimenta y nivel de actividad, o tasa metabólica)”* (Olesen, Bjarne W., Brager, 2004).

Por otra parte, se entiende que el *dis - confort* está asociado a la desvinculación entre las condiciones del clima y los materiales seleccionados para construir una vivienda. Otros factores inciden, la disposición de los materiales, su orientación, el color, las características mecánicas del elemento, entre otras (Giraldo & Herrera, 2017).

El objetivo de este capítulo es calcular la carga térmica de una vivienda y valorar el estado de confort térmico humano al interior de ella. Para esto, se ha seleccionado una vivienda urbana en la ciudad de Santiago de Cali – Colombia.

7.1.1. Caracterización general de la vivienda y del volumen de control

Como se definió metodológicamente, enmarcada en la FASE 1, esta sección contiene la caracterización del volumen de control.

El “volumen de control” se define como el espacio de la vivienda [edificación] seleccionado para realizar la evaluación y el análisis de la información obtenida. Fundamentalmente, el criterio utilizado para la selección de este espacio es la mayor carga térmica calculada.

Es necesario entonces, descomponer el volumen de la vivienda y obtener su información inherente:

- a. Datos de geolocalización
- b. Organización espacial y volumétrica
- c. Identificación y localización de elementos estructurales y de cerramiento en el volumen
- d. Posicionamiento ortográfico

Descripción y consideraciones del caso de estudio vivienda urbana en Santiago de Cali

- La vivienda objeto de estudio, es medianera, es decir, se encuentra en medio de otras viviendas de las mismas especificaciones en cuanto a área de lote y configuración arquitectónica, altura, áreas no construidas. Tiene antejardín y patio posterior.
- Las viviendas contiguas respetan la línea de paramento, es decir que la fachada principal se encuentra alineada con los vecinos.
- De esta manera, se entiende que los dos lados laterales de la envolvente en el sentido más largo de la vivienda siempre estarán en sombra por tratarse de muros medianeros.
- Los lados más cortos y la cubierta están expuestos al asoleamiento:
 - Los lados cortos son Noreste [Patio trasero] y Sur – oeste [Entrada principal].
- La cubierta es a dos aguas, dirigidas al Nor - este y sur - oeste.
- De acuerdo a su orientación, el asoleamiento la afecta de la siguiente manera:
 - Noviembre – diciembre – enero – febrero: el lado Sur – oeste [Entrada principal], recibe asoleamiento del solsticio de invierno.
 - Marzo – abril: asoleamiento perpendicular.
 - Mayo - junio - julio – agosto: el lado Noreste [Patio trasero] recibe asoleamiento del solsticio de verano.
 - Septiembre – Octubre: asoleamiento perpendicular
- Se presume que la parte de la cubierta que recibe mayor carga térmica es la orientada al nor – este.
- Hacia el lado Noreste – Patio posterior, tiene ventanas pequeñas que se pueden abrir.
- Es una vivienda unifamiliar de dos pisos, ocupada por 3 personas.

Condiciones problema

- La sensación de calor al interior hace insatisfactoria su habitabilidad.
- Hay una percepción de calma permanente en el viento, lo cual no favorece la evacuación de calor.
- La vivienda en general tiene dificultad para propiciar ventilación cruzada.
- Presenta mayor discomfort térmico en el segundo piso, durante el día. Probablemente por el aporte de carga térmica de la cubierta.
- Por ser vivienda medianera no presenta asoleamiento sobre las paredes lados este y oeste.

- Según registros obtenidos en la vivienda, tomando una muestra representativa, en las horas de mayor asoleamiento la temperatura interior de la vivienda [13:00 T_i 32.9°C], es regularmente superior a la del exterior [13:00 T_o 32.2°C] – Ver gráfico 2.

Gráfico No.2

Registro anualizado de temperatura del aire exterior e interior de la vivienda

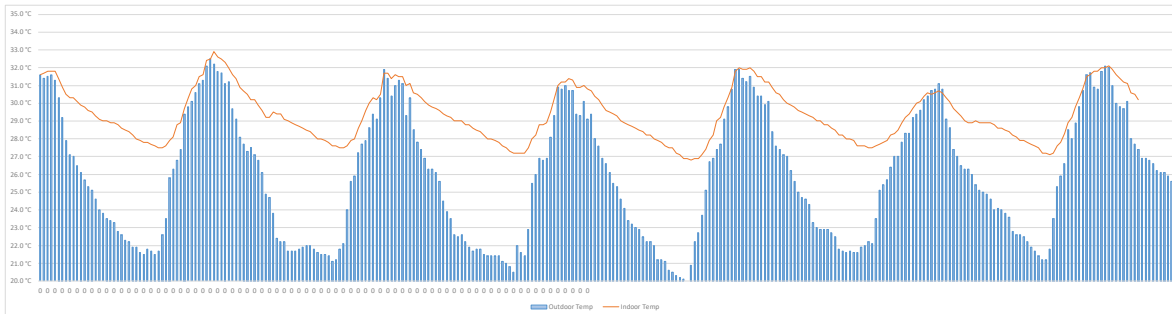


Gráfico elaborado por el autor. Datos para interpolación tomados de la micro estación meteorológica La Merced - Ambient Weather SP-4000, ubicada en el techo de la vivienda de estudio.

Fuente: Elaboración propia

- El gráfico abajo muestra el comportamiento de la temperatura del aire exterior [Azul] e interior [Naranja] registrado durante un año.
- La lectura permite observar una baja oscilación térmica, La temperatura interior se conserva alta, aunque la temperatura del aire externa haya bajado a niveles promedio de 18°C.

a. Datos de geolocalización

- Localización: Urbana, zona norte, Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- Dirección: Calle 46 norte # 2 CN 32
- Longitud: 76° 34' 37" W
- Latitud: 3° 47' 81" N
- Altura sobre el nivel del mar: 923 msnm
- Tipo de edificación: Vivienda con propósito residencial
- Número de niveles: Dos (2) niveles
- Uso predominante en la zona: Residencial
- Número de ocupantes: 3 personas
- Fuente de energía: Energía eléctrica / Gas red urbana
- Tiempo de vida útil: 50 Años

Imagen No.2: Localización general de la vivienda [Departamento, Ciudad, barrio]

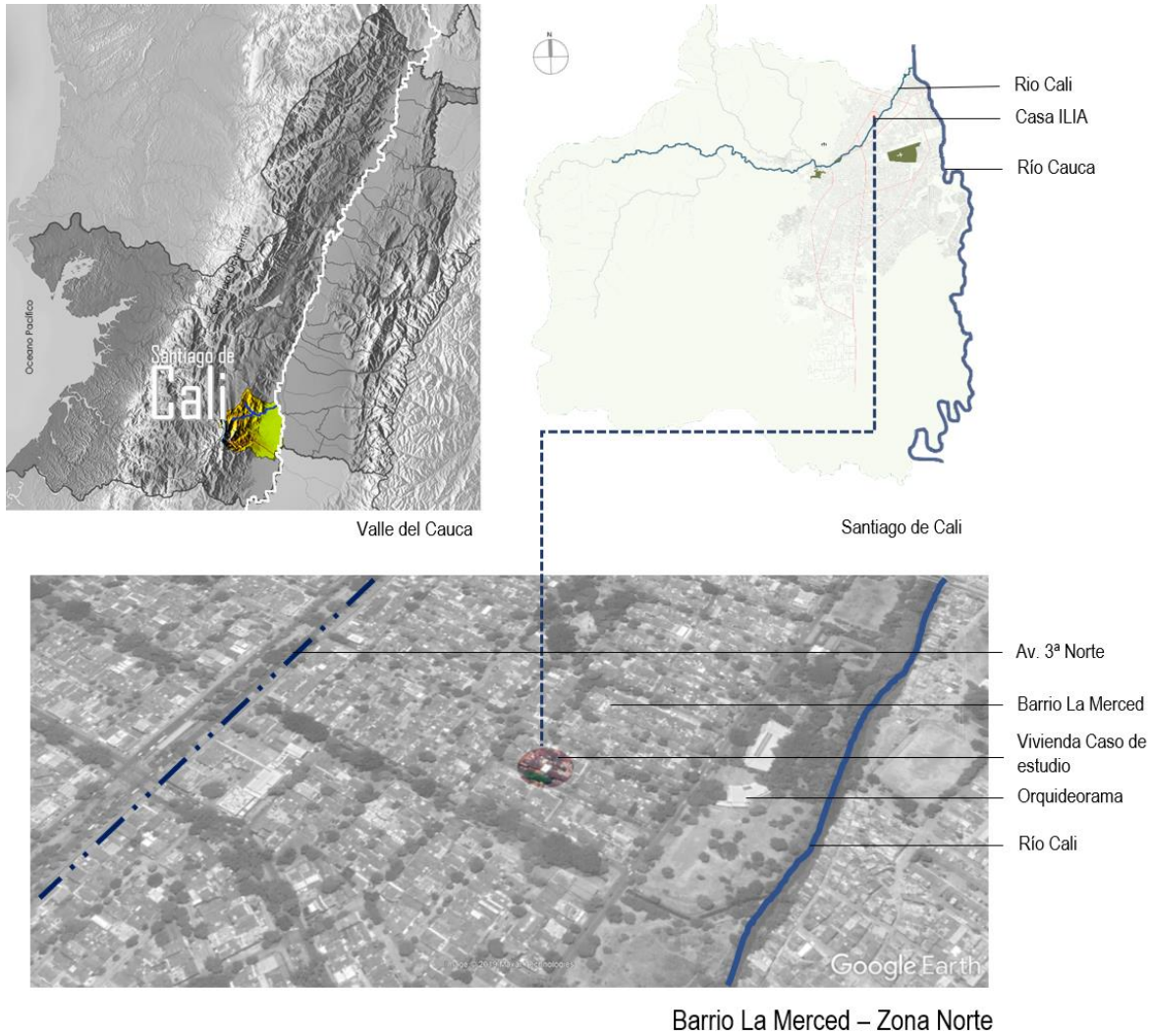
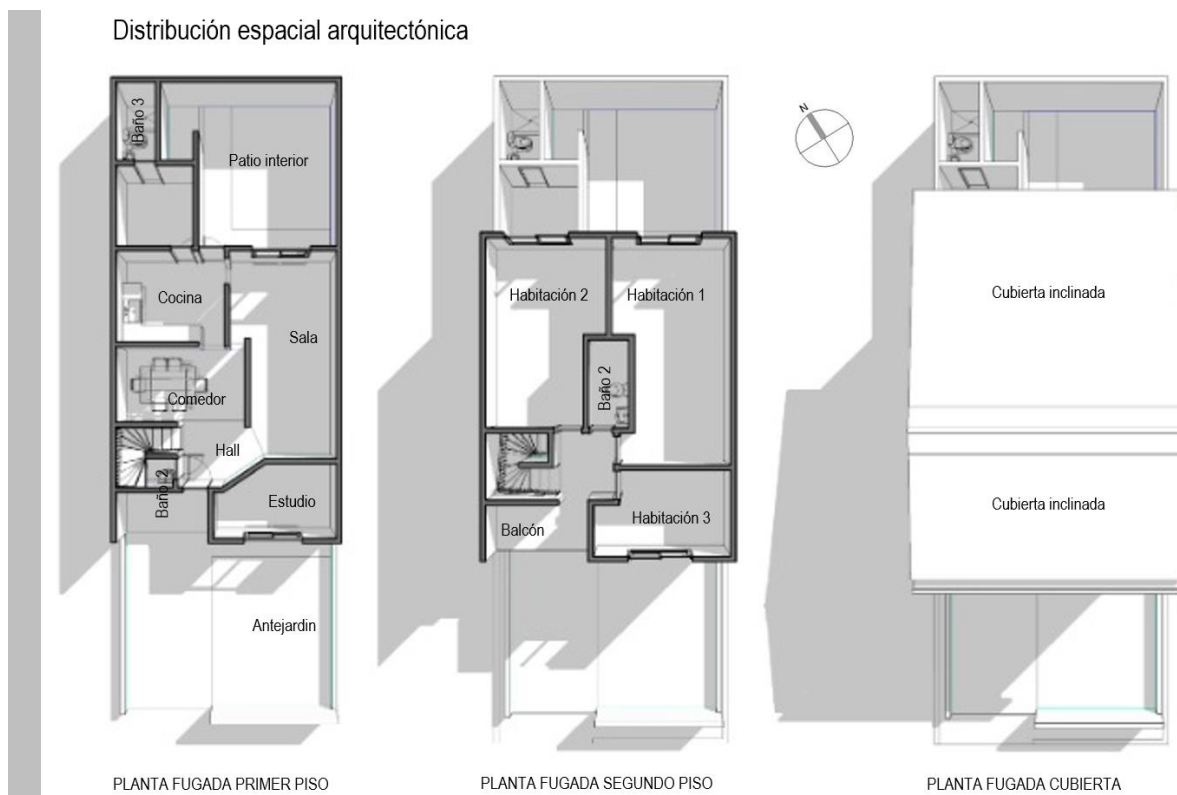


Imagen No.3:
Fachada exterior de la vivienda

b. Organización espacial y volumétrica

Gráfico No.3:



Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 6:

CUADRO DE AREAS DE LA VIVIENDA					
Piso 1	Sala	18.6	Piso 2	Habitación 1	18.7
	Comedor	9.1		Habitación 2	15.9
	Cocina	9.0		Habitación 3	8.5
	Antesala	4.4		Balcón	4.4
	Baño 1	1.6		Baño 3	2.7
	Hall Entrada	4.5		Antesala Piso 2	3.0
	Estudio	7.6		Punto fijo	3.4
	Habitarción Aux	5.9		Planta Muros internos	6.3
	Area ropas	2.6			
	Antesala	4.4			
	Planta Muros internos	8.7			
		Área construida segundo piso [M²]		62.9	
Área construida Primer piso [M²]		76.3	AREA TOTAL CONSTRUIDA [M²]		139.2

Elaboración propia

c. Identificación y localización de elementos estructurales y de cerramiento en el volumen

Gráfico No. 4:

Modelo 3D de la vivienda - explosionado



Gráfico No. 5:

Corte longitudinal de la vivienda

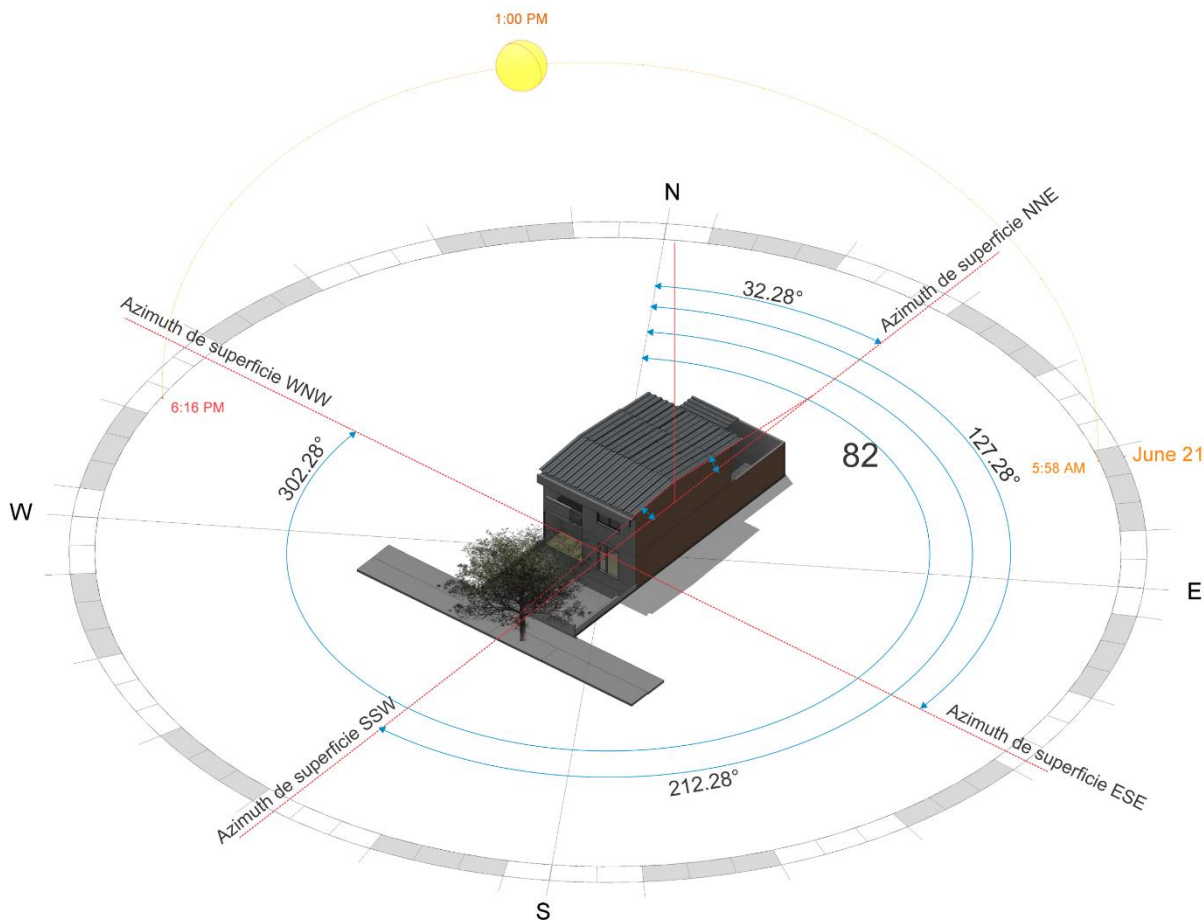


Fuente: Elaboración propia

d. Posicionamiento ortográfico

Gráfico No. 6:

Posicionamiento ortográfico sobre isometría de la vivienda



Fuente: Elaboración propia

- | | | |
|----------------------------|-----------------------------|---------|
| • Azimut de superficie NNE | [Normal respecto al norte]: | 32.28° |
| • Azimut de superficie ESE | [Normal respecto al norte]: | 127.28° |
| • Azimut de superficie SSW | [Normal respecto al norte]: | 212.28° |
| • Azimut de superficie WNW | [Normal respecto al norte]: | 302.28° |

Notas:

- El alzado posterior de la vivienda está dirigido al Norte Nor – Este [NNE]
- El alzado principal está dirigido al Sur Sur – Oeste [SSW]

FASE 2:

7.1.2. Generación de data y cálculo de línea base del volumen de control

Línea base

Este proyecto gira en torno al manejo adecuado de la energía. La forma de energía en la que nos enfocaremos será el calor.

En términos de Cengel, la definición compleja de la energía se puede resumir en “la capacidad de producir cambio” (Y. A. Cengel, 2009). Así que, la búsqueda de fondo de esta sección está concentrada en el cálculo del calor que se incorpora a la vivienda en el día y la hora de diseño seleccionadas.

Con esta sección se inicia la Fase 2.

Para obtener la línea base se utilizarán el “*Standard 55*” definido por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* – ASHRAE (Olesen, Bjarne W., Brager, 2004).

Procedimentalmente se obtendrá la siguiente información:

- a. Definir el día para el cálculo de la irradiancia solar
- b. Determinar la posición del sol
- c. Determinar la Irradiancia solar sobre la vivienda
- d. Obtener datos meteorológicos de la hora de diseño estimados anuales
- e. Calcular la pérdida de calor de los elementos que componen el volumen de control [temperaturas de diseño y TMR]
- f. Determinar el volumen de control

Cálculos de carga térmica

- a. Día, hora y mes para el cálculo de la irradiancia solar

Se tomó como criterio base para la selección del día, que el sol estuviera en su posición más crítica. Se seleccionó el día 21 del mes, por ser el día en que, durante los solsticios de verano y de invierno, el sol está más inclinado y distante del observador, y los equinoccios de primavera y otoño, en los cuales, por la latitud cercana a 0°, el sol está casi perpendicular.

Una vez definido el día se procedió a identificar el mes en el que la vivienda obtiene la mayor irradiancia.

Es necesario precisar que la *irradiancia* de la edificación dependerá de la configuración del volumen, de la exposición de sus superficies y de su orientación. No así para la ganancia térmica, pues esta dependerá de otros factores como la absorptividad de las superficies.

Definido el día, la hora es el segundo factor a determinar. Para la selección, se toman dos hitos, las 10:00 y las 13:00 horas. Para obtener la información de la localización del sol en estas dos posiciones se recurre al software *2D Sun-Path* de Andrew Marsh, que opera online desde el enlace <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html>.

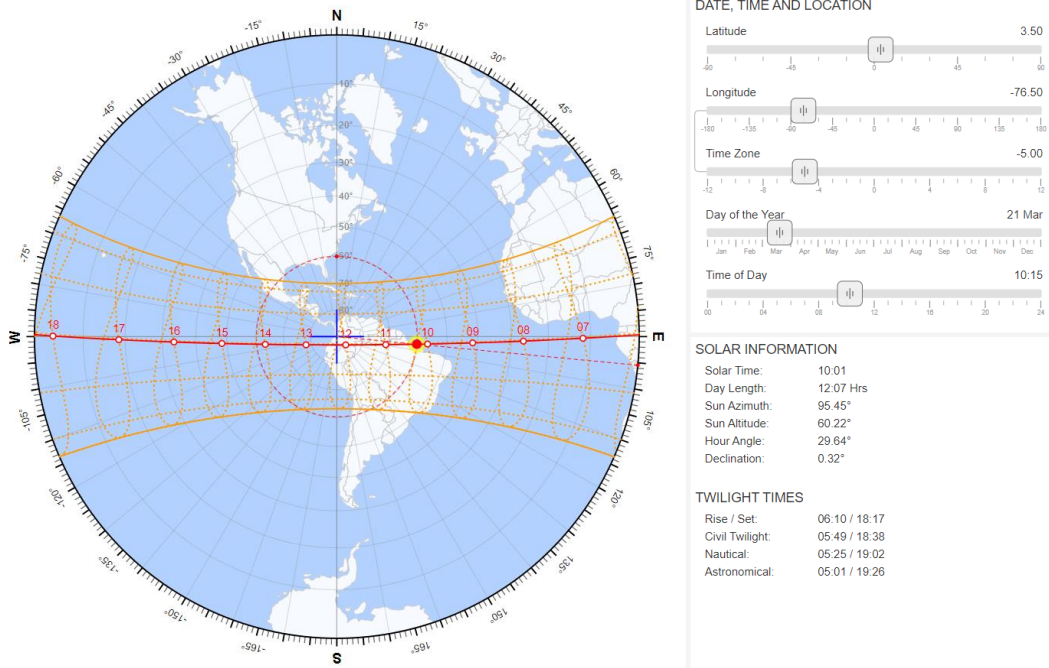
De la página online se obtiene el diagrama solar estereoscópico de Cali. Suministrando la información de latitud, zona horaria, longitud, que pueden introducirse manualmente o apoyándose en el mapa del software, el día del mes y la hora.

Diagrama solar estereoscópico

El gráfico No. 7 es uno de los 24 diagramas base obtenidos:

Gráfico No. 7:

Diagrama solar estereoscópico de Cali para el 21 de marzo a las 10:00 horas



Tomado de: Software 2D Sun-Path andrewmarsh.com

Datos para Cali el 21 de marzo a las 10:00 horas

La información que se obtiene del diagrama para cada hora del día es la siguiente:

- Hora solar [Solar time]
- Duración del día [Day length]
- Azimut solar [Sun Azimuth]
- Sun Altitude [Altitud solar]
- Angulo horario [hour angle]
- Declinación [Declination]

b. Posición del sol

Lo siguiente es calcular la posición del sol en cada uno de los meses. Para esto, se utilizaron las ecuaciones para el "cálculo de la posición solar" en el "método del cálculo de la radiación" encontradas en el capítulo XIII, Efectos de la Radiación en "Clima y arquitectura en Colombia" de Victor Olgyay [Ecuación No.1] y [Ecuación No.2] tomadas a su vez de Spencer J.W. "Calculation of solar position for building purposes", Division of

Building Research, Technical Paper No.14, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, 1965.(Olgyay, 1968).

Para obtener la posición del sol respecto a una superficie de la vivienda se necesitan los datos iniciales de posicionamiento ortográfico de la vivienda: los ángulos de azimut de superficie de acuerdo a la normal y la inclinación de la superficie en grados con respecto a la horizontal. Por tanto, una superficie más perpendicular a la posición del sol, obtendrá mayor irradiancia.

Para el proceso de la información, se elaboró un macro en Excel (ver imagen No.4), que opera introduciendo la data del software 2D Sun-Path. Hace parte de los anexos de esta tesis.

Tabla No.7:

TABLA DATOS DIAGRAMA SOLAR PARA CALCULO DE LA POSICIÓN DL SOL [CAMBIAR UNO A UNO]													
Día 21	Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
10:00 AM	Solar time	10:02	10:00	10:01	10:00	10:03	10:02	10:02	10:01	10:01	10:00	9:59	10:01
	Day length	11:57	12:01	12:07	12:13	12:17	12:19	12:18	12:13	12:07	12:01	11:57	11:55
	Sun Azimuth	130.38	115.9	95.45	72.39	57.3	52.34	57.04	72.15	94.83	115.88	129.42	134.36
	Sun Altitude	52.76	56.8	60.22	59.2	56.85	55.23	56.7	59.26	60.18	56.94	52.13	50.45
	hour angle	29.4	30.11	29.64	29.93	29.37	29.48	29.45	29.84	29.71	29.98	30.31	29.76
	Declination	-20.07	-10.84	0.32	11.93	20.23	23.43	20.42	12.04	0.62	-10.77	-19.95	-23.43
13:00 pm	Solar time	13:02	13:00	13:01	13:00	13:03	13:02	13:02	13:01	13:01	13:00	12:59	13:01
	Day length	11:57	12:01	12:07	12:13	12:17	12:19	12:18	12:13	12:07	12:01	11:57	11:55
	Sun Azimuth	-147.56	-134.18	-101.3	-59.64	-41.05	-35.57	-40.57	-59.46	-100.26	-133.8	-148.94	-151.84
	Sun Altitude	61.92	69.4	74.33	72.86	67.37	65.04	67.28	72.73	74.46	69.36	62.49	59.27
	hour angle	-15.6	-14.89	-15.36	-15.07	-15.63	-15.52	-15.55	-15.16	-15.29	-15.02	-14.69	-15.24
	Declination	-20.07	-10.84	0.32	11.93	20.23	23.43	20.42	12.04	0.62	-10.77	-19.95	-23.43

Fuente: Elaboración propia

La siguiente información se obtiene del diagrama solar y de la orto- posición de la edificación:

- δ: Declinación solar + 23.5° o solsticio de invierno - 23.5°
- Φ: Latitud del lugar; Positiva para el hemisferio Norte. Negativa en el hemisferio sur.
- h: Altitud del sol en grados
- A: Azimut solar en grados
- t: Angulo horario del sol, medido contrario a las manecillas
- α: Rumbo verdadero de la perpendicular a la superficie. Azimut de superficie.
- B = Angulo entre el plano horizontal y la perpendicular a la superficie. 0° superficie vertical, 90° para una horizontal.
- i: Angulo de incidencia del rayo solar.
- i_H: Angulo de incidencia solar sobre super. horizontal
- i_V: Angulo de incidencia solar sobre super. vertical.

Las siguientes ecuaciones permiten calcular la posición del sol [θ]:

- [Ecuación No.1] **Superficies inclinadas [cubiertas]**

$$\cos i_v = \cos h \sin A \sin \alpha + \cos h \cos A \cos \alpha$$
- [Ecuación No.2] **Cuando la superficie es B= 0° [Paredes verticales]**

$$\cos i_H = \cos h \sin A \sin \alpha \cos B + \cos h \cos A \cos \alpha \cos B + \sin h \sin B$$

c. Irradiancia solar sobre la vivienda

Con la posición del sol [θ], lo siguiente es encontrar la irradiancia solar.

En este punto, se utilizaron las ecuaciones elaboradas por el Ing. Alejandro Macias en su trabajo "Proyecto de Mejoramiento Bioclimático para vivienda urbana", estudiante de Maestría en Ingeniería – Énfasis Ingeniería

Mecánica de la Universidad del Valle. 2018, quien refiere su Modelo de cálculo a ASHRAE 2005, Fundamentals Chapter 31, Fenestration, Solar Heat Gain And Visible Transmittance.

Para obtener la irradiancia solar se deben calcular los siguientes:

- [Ecuación No.3] Razón de Radiación Difusa del Cielo $Y = 0,55 + 0,437 \cos \theta + 0,313 \cos^2 \theta$
- [Ecuación No.4] Radiación Solar Directa $E_{DN} = \frac{A}{e \frac{B}{\sin \beta}} \frac{W}{m^2}$
- [Ecuación No.5] Radiación Solar Difusa $E_d = CYE_{DN} \frac{W}{m^2}$
- [Ecuación No.6] Radiación Solar Reflejada $E_r = E_{DN}(C + \sin \beta)\rho_g \frac{1 - \cos \sigma}{2} \frac{W}{m^2}$
- [Ecuación No.7] Radiación Solar total $E_t = E_{DN} \cos \theta + E_d + E_r$

Procedimentalmente, las ecuaciones se organizaron en el macro de Cálculo de irradiancia solar elaborado como parte de esta tesis. Se muestra a continuación (Tabla No.7)

Se calculó, de esta manera, la irradiancia solar para cada una de las superficies de la vivienda:

- Pared NNE *[North North-East]*
 - Pared ESE *[East South – East]*
 - Pared SSW *[South South – West]*
 - Pared WNW *[West North-West]*
 - Cubierta NNE *[North North-East]*
 - Cubierta SSW *[South South-West]*
- A continuación, únicamente se muestran los cálculos de las Tabla No. 13 y la Tabla No.19, para comparar las superficies de Cubierta a las 10:00 y a las 13:00 horas, pero el desarrollo de las tablas con el cálculo de irradiancia para cada superficie se encuentra en el ANEXO I [Tablas de la No.8 – 12, No. 14 - 18 y Tablas No.22 – 26].

De acuerdo a la Tabla No.13:

- Para las 10:00 horas, la tabla permite visualizar en *VERDE OSCURO* que los meses en que hay más irradiancia solar sobre las superficies de estudio son abril y agosto.
- La mayor cantidad de irradiancia solar es recibida por la cubierta en ambos sentidos, le sigue la pared NNE, que es la que más expuesta a la hora de estudio [Cubierta SSW: 908.48 W/m², Cubierta NNE 928.50 en el mes de agosto].

Tabla No.13: Irradiancia de la Cubierta SSW 10:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR													
Irradiación Terrestre	A	1164 W/m²											
Razón adimensional	B	0,149											
Razón adimensional	C	0,109											
Superficie		CUBIERTA SSW											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hora Standard		10:02	10:00	10:01	10:00	10:03	10:02	10:02	10:01	10:01	10:00	9:59	10:01
Azimuth Solar	ϕ	130,38	115,90	95,45	72,39	57,30	52,34	57,04	72,15	94,83	115,88	129,42	134,36
Altitud Solar	β	52,76	56,80	60,22	59,20	56,85	55,23	56,70	59,26	60,18	56,94	52,13	50,45
Azimuth Superficie	ψ	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28
Azimuth Solar Superficie	γ	-81,9	-96,38	-116,83	-139,89	-154,98	-159,94	-155,24	-140,13	-117,45	-96,4	-82,86	-77,92
Angulo de Inclination	σ	96,3	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30
Angulo de Insidencia Solar	cosθ	0,6963	0,7483	0,7939	0,8043	0,7965	0,7869	0,7955	0,8049	0,7941	0,7495	0,6913	0,6688
Razon de Radiacion Difusa del Cielo	Y	1,0060	1,0523	1,0942	1,1040	1,0966	1,0877	1,0957	1,1045	1,0944	1,0534	1,0017	0,9823
Radiacion Solar Directa	EDN	965,3174	974,1358	980,3862	978,6284	974,2348	970,9069	973,9372	978,7342	980,3189	974,4123	963,7848	959,4684
Radiacion Solar Difusa	Ed	0,0294	0,0308	0,0320	0,0323	0,0321	0,0318	0,0321	0,0323	0,0320	0,0308	0,0293	0,0287
Radiacion Solar Reflejada	Er	106,6552	112,4641	116,9166	115,6343	112,5323	110,2760	112,3274	115,7108	116,8670	112,6549	105,6973	103,0763
CUBIERTA SSW		778,80	841,47	895,26	902,78	888,50	874,28	887,14	903,48	895,40	843,02	772,00	744,80
CUBIERTA NNE		795,45	861,31	918,26	927,78	914,22	900,05	912,86	928,50	918,46	862,90	788,57	760,08
PARED WNW		-400,77	-344,30	-241,41	-129,09	-32,98	0,53	-31,84	-126,79	-239,54	-342,18	-410,83	-424,78
PARED SSW		279,77	139,23	-21,33	-190,88	-296,29	-337,14	-299,41	-191,51	-26,50	139,51	269,22	322,93
PARED ESE		811,01	766,39	669,01	547,34	439,12	398,46	437,39	545,16	666,89	764,64	819,20	826,96
PARED NNE		107,31	263,42	439,15	612,12	715,20	752,61	717,96	612,99	444,34	263,66	115,14	55,04
[X] IRRADIACIÓN 10:00Am		395,26	421,25	443,16	445,01	437,96	431,46	437,35	445,30	443,18	421,92	392,22	380,84

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.19: Irradiancia de la Cubierta SSW 13:00 Horas

Superficie		CUBIERTA SSW											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hora Standard		13:02	13:00	13:01	13:00	13:03	13:02	13:02	13:01	13:01	13:00	12:59	13:01
Azimuth Solar	ϕ	-147,56	-134,18	-101,30	-59,64	-41,05	-35,57	-40,57	-59,46	-100,26	-133,80	-148,94	-151,84
Altitud Solar	β	61,92	69,40	74,33	72,86	67,37	65,04	67,28	72,73	74,46	69,36	62,49	59,27
Azimuth Superficie	ψ	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28
Azimuth Solar Superficie	γ	-359,84	-346,46	-313,58	-271,92	-253,33	-247,85	-252,85	-271,74	-312,54	-346,08	-361,22	-364,12
Angulo de Inclination	σ	96,3	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30	96,30
Angulo de Insidencia Solar	$\cos\theta$	0,7304	0,7921	0,8330	0,8459	0,8302	0,8210	0,8301	0,8454	0,8341	0,7919	0,7354	0,7060
Radiacion Difusa del Cielo	Y	1,0361	1,0926	1,1312	1,1436	1,1285	1,1198	1,1284	1,1431	1,1322	1,0923	1,0407	1,0145
Radiacion Solar Directa	EDN	983,1278	992,7111	997,1149	995,9456	990,4794	987,5901	990,3744	995,8364	997,2127	992,6696	983,9966	978,7518
Radiacion Solar Difusa	Ed	0,0303	0,0320	0,0331	0,0335	0,0330	0,0328	0,0330	0,0335	0,0331	0,0320	0,0305	0,0297
Radiacion Solar Reflejada	Er	118,9660	126,6413	130,4620	129,4281	124,7787	122,4368	124,6923	129,3323	130,5491	126,6062	119,6283	115,7236
CUBIERTA SSW		837,03	913,03	961,05	971,92	947,12	933,29	946,79	971,23	962,32	912,73	843,33	806,71
CUBIERTA NNE		850,99	930,32	981,29	994,38	970,24	956,59	969,95	993,68	982,64	930,02	857,55	819,49
PARED WNW		211,35	306,22	431,12	534,32	604,90	624,20	605,22	536,49	433,10	308,70	200,76	168,02
PARED SSW		702,23	580,02	421,11	234,35	103,70	50,91	99,97	233,33	415,90	580,05	694,10	736,90
PARED ESE		702,23	580,02	421,11	234,35	103,70	50,91	99,97	233,33	415,90	580,05	694,10	736,90
PARED NNE		-267,38	-131,47	32,11	213,75	332,76	380,14	336,31	214,52	37,43	-131,58	-258,00	-308,31
[X] IRRADIACIÓN 13:00PM		423,81	455,50	474,84	478,07	466,44	460,09	466,27	477,76	475,34	455,37	426,46	411,02

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Tabla No.19:

- Para las 13:00 horas, la tabla permite visualizar en *VERDE OSCURO* que los meses en que hay más irradiancia solar sobre las superficies son abril y agosto.
- De acuerdo a lo calculado, la mayor potencia solar es recibida por la cubierta tanto en sentido NNE como en SSW [Cubierta SSW: 971.92 W/m², Cubierta NNE 994.38 en el mes de abril], le seguirá la pared WNW, que es la que más expuesta a la hora de estudio, sin embargo, en la realidad esta pared al igual que la ESE no están expuestas porque la vivienda es medianera.

Tabla No.20:

Comparación promedios de irradiancia solar mensual [W/m²]

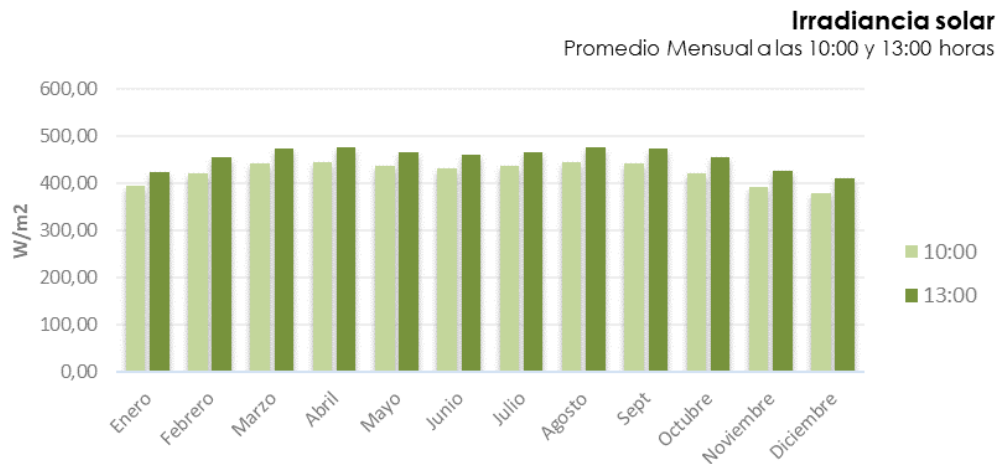
10:00	395,26	421,25	443,16	445,01	437,96	431,46	437,35	445,30	443,18	421,92	392,22	380,84
13:00	423,81	455,50	474,84	478,07	466,44	460,09	466,27	477,76	475,34	455,37	426,46	411,02

Fuente: Elaboración propia

- Por la orientación de la vivienda objeto de estudio, los mayores valores de irradiancia mensual se presentan en los meses de abril y agosto cercanos los equinoccios de primavera y otoño.

Gráfico No. 8:

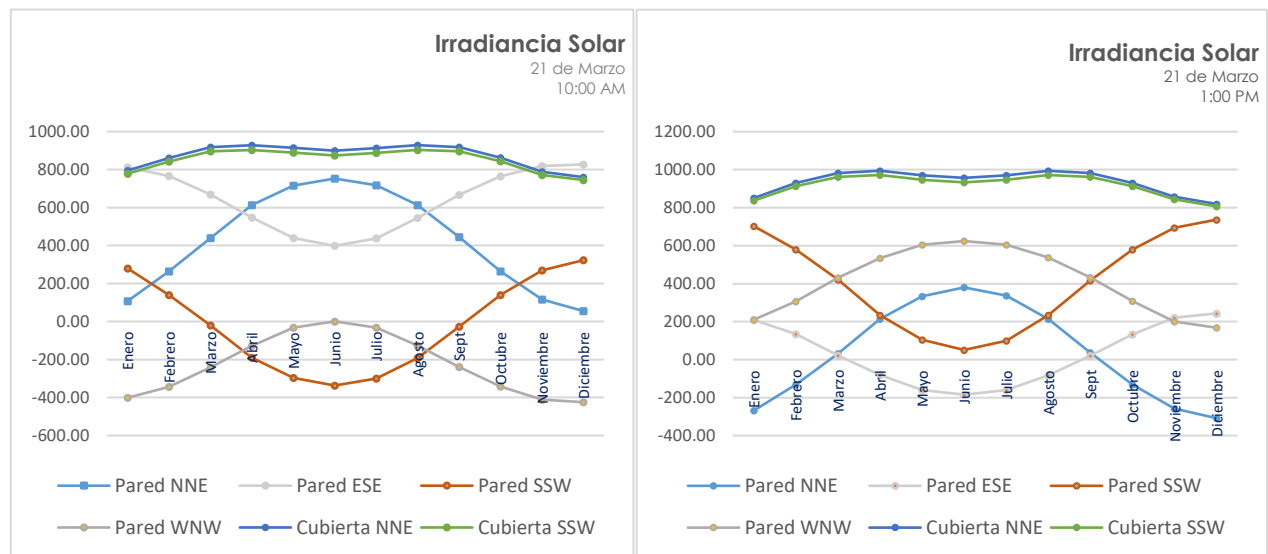
Comparación promedios mensuales de irradiancia solar para las 10:00 y 13:00 horas



Fuente: Elaboración propia

Gráfico No. 9:

Incidencia de la Irradiancia solar mensual a las 10:00 y 13:00 horas por cada superficie en el año



Fuente: Elaboración propia

Del cálculo de irradiancia se puede concluir lo siguiente:

- Dado que la vivienda es medianera, las superficies Pared ESE y Pared WNW están en sombra permanentemente, por tanto, para los cálculos de pérdida de calor, se despreciarán las cargas laterales [Superficies ESE – WNW]
- De acuerdo a los resultados obtenidos para el día 21 de cada mes, el mayor promedio de irradiancia solar sobre las superficies de la vivienda se tiene para el mes de abril a las 13:00 horas [478.07 W]
- La diferencia en los promedios, entre los meses de abril y marzo a las 13:00 horas es de 3.23 W/m².
- Para facilitar el manejo de datos, se decide utilizar el mes de marzo como mes de diseño.
- La mayor irradiancia solar se presenta en las superficies de cubierta con un 41% al norte y 40% al sur.
- Una lectura podría concluir que cerca del 81% de la irradiancia solar es obtenida por la cubierta.

Considerando que, de los dos horarios calculados, la mayor irradiancia se obtiene a las 13:00 horas, se define como hora de diseño solar las 13:00 horas, por tanto, se trabajará dentro de la franja de ventilación de 12:30 am a 5:30 pm, lo cual permitirá evacuar el calor que logre introducirse al interior del espacio, por convección en las horas en que haya mayor ventilación.

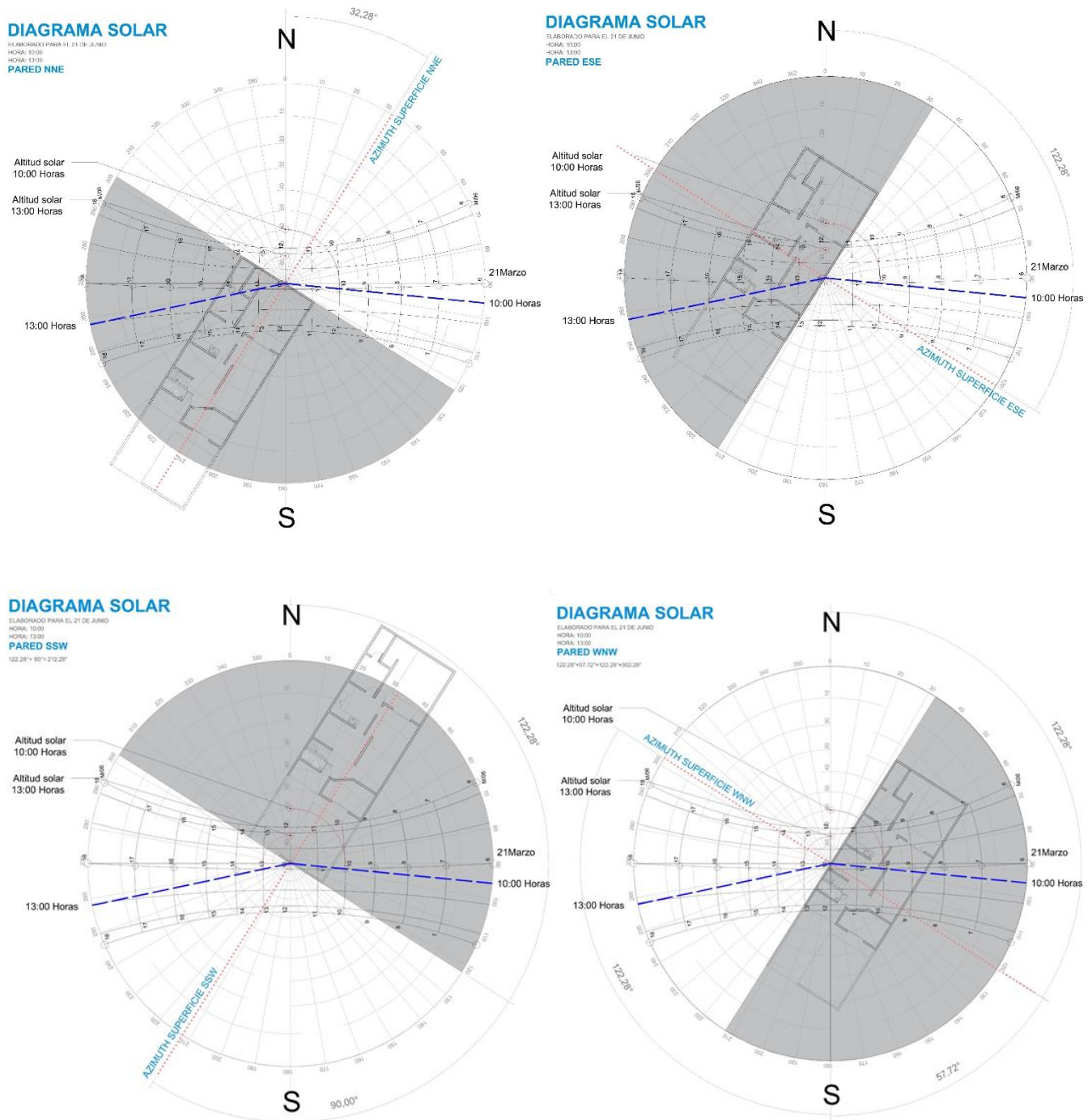
Los valores de irradiancia solar sobre las superficies de la casa calculados para el 21 de marzo se muestran a continuación:

Tabla No.21:

Irradiación sobre superficies exteriores para el 21 de Marzo y porcentaje de incidencia total					
Superficie	Unidad	Hora de estudio		Porcentaje parcial	Vivienda medianera
		10:00	13:00		
PARED NNE	(W/m ²)	439,15	32,11	1%	No recibe
PARED ESE	(W/m ²)	669,01	22,34	0%	
PARED SSW	(W/m ²)	-21,33	421,11	18%	No recibe
PARED WNW	(W/m ²)	-241,41	431,12	0%	
CUBIERTA NNE	(W/m ²)	918,26	981,29	41%	
CUBIERTA SSW	(W/m ²)	895,26	961,05	40%	
Σ IRRADACIÓN			2.395,57	100%	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico No.10:
Diagrama solar para superficies verticales



Fuente: Elaboración propia

- Los gráficos anteriores muestran el diagrama solar con diferentes posiciones sobre las superficies verticales permitiendo corroborar la incidencia solar que se describe en la Tabla No.21.

Para verificar que la hora escogida es la hora con mayor ganancia térmica y por tanto, adecuada para el estudio, se elaboró el cálculo de irradiancia solar hora a hora del día 21 de marzo, como sigue:

- La Tabla No. 27, muestra el desarrollo del cálculo para la superficie de cubierta y registra en la parte inferior, el resultado de cada una de las superficies. El cálculo para las demás superficies puede verse en ANEXO I.

Tabla No.27:

Irradiancia Cubierta SSW 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 00:00 Horas

Superficie		CUBIERTA SSW													
		Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo
Hora Standard		6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	0:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	
Azimuth Solar	ϕ	89,70	90,62	91,66	93,06	95,45	101,87	-173,49	-101,30	-98,29	-92,98	-91,61	-90,58	-89,66	
Altitud Solar	β	0,81	15,41	30,35	45,30	60,22	75,04	86,82	74,33	59,51	44,58	29,63	14,69	0,19	
Azimuth Superficie	ψ	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	212,28	
Azimuth Solar Superficie	γ	-122,58	-121,66	-120,62	-119,22	-116,83	-110,41	-385,77	-313,58	-310,57	-305,26	-303,89	-302,86	-301,94	
Angulo de Inclinacion	σ	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	96,3	
Angulo de Insidencia Solar	$\cos\theta$	-0,2602	0,2910	0,4961	0,6677	0,7939	0,8662	0,8795	0,8330	0,7276	0,5770	0,3850	0,1672	-0,0551	
Razon de Radiacion Difusa del Cielo	γ	0,4575	0,7037	0,8438	0,9813	1,0942	1,1633	1,1764	1,1312	1,0336	0,9064	0,7646	0,6318	0,5269	
Radiacion Solar Directa	EDN	0,0308	664,4012	866,7340	943,8757	980,3862	997,6378	1002,6360	997,1149	979,1718	941,3716	861,1256	646,8102	0,0000	
Radiacion Solar Difusa	Ed	0,0015	0,0206	0,0247	0,0287	0,0320	0,0340	0,0344	0,0331	0,0302	0,0265	0,0224	0,0185	0,0154	
Radiacion Solar Reflejada	Er	0,0007	30,3916	64,9927	94,4570	116,9166	130,9290	135,5448	130,4620	116,0282	93,1842	63,4280	28,6288	0,0000	
CUBIERTA SSW		-0,01	223,78	494,99	724,70	895,26	995,09	1017,39	961,05	828,46	636,38	395,00	136,78	0,02	
CUBIERTA NNE		0,00	231,32	509,54	744,45	918,26	1019,25	1040,58	981,29	843,75	646,01	398,16	134,65	0,04	
PARED WNW - NO APORTA		-0,02	-477,48	-523,53	-418,38	-241,41	-24,82	206,90	431,12	606,36	759,20	798,41	640,29	0,00	
PARED SSW		0,03	-267,98	-258,91	-159,22	-21,33	132,24	284,78	421,11	548,18	585,70	576,32	436,86	0,00	
PARED ESE - NO APORTA		0,00	664,85	825,11	795,69	669,01	480,91	257,57	22,34	-184,38	-387,96	-503,49	-460,90	0,00	
PARED NNE		0,02	436,43	539,31	519,86	439,15	320,42	179,83	32,11	-128,84	-225,33	-298,19	-274,44	0,00	
HORAS		6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	0:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	
[X] IRRADIACIÓN HORARIA		0,00	155,89	321,23	457,45	557,84	616,75	630,64	598,89	522,89	410,69	267,82	108,46	0,01	

Fuente: Elaboración propia

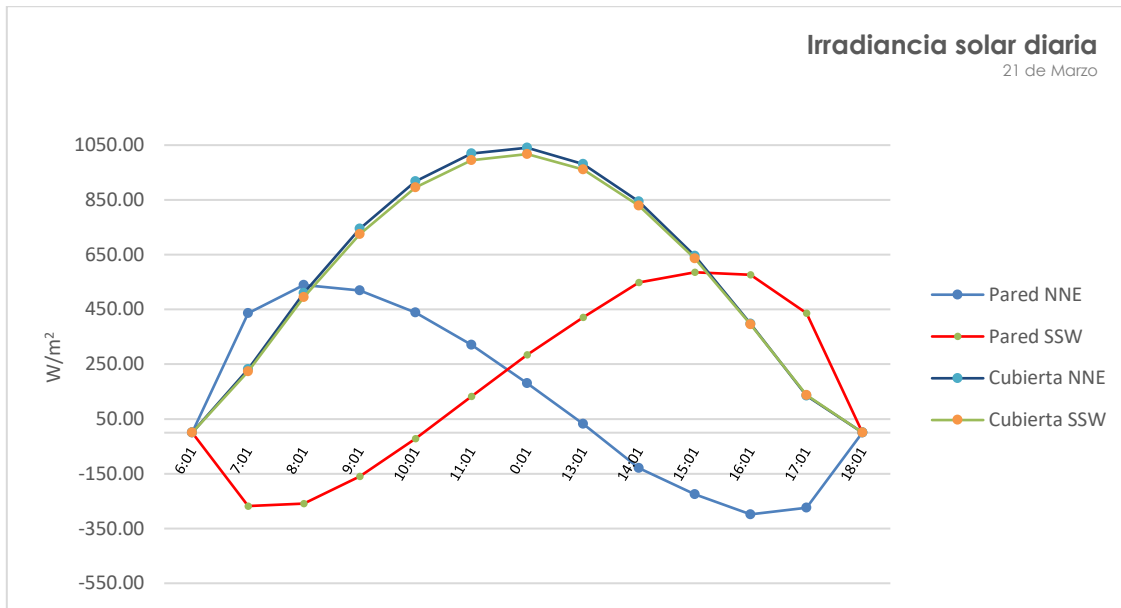
- De acuerdo al cálculo horario para el 21 de marzo, la mayor irradiancia se obtiene a las 12:00 horas y se concentra en la cubierta. [Ver gráfico No. 11 - Curvas de comportamiento de la irradiancia horaria].
- Sin embargo, para efectos de este trabajo, la hora de diseño se conservará en las 13:00 horas.

El gráfico No.11, muestra el comportamiento de la irradiancia solar sobre las superficies del objeto de estudio:

- Se sustraen las paredes que no reciben radiación solar [casa medianera]

Gráfico No. 11:

Curvas de comportamiento de la irradiancia horaria



Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la irradiancia solar horaria permite tomar las primeras decisiones de diseño.

1. Se debe controlar la ganancia térmica producida en la cubierta de la vivienda.
2. Las paredes no aportan sustancialmente a la carga térmica. Así que el enfoque de diseño para disminuir la carga térmica se concentrará en la cubierta.
3. A pasar que, la mayor irradiancia en superficies verticales proviene del Este y el Oeste, estas superficies no aportan carga porque la casa es medianera.

d. Datos meteorológicos anuales para la hora de diseño

Definida la fecha y la hora de diseño [21 de marzo, 13:00 horas], se consultan los datos meteorológicos correspondientes.

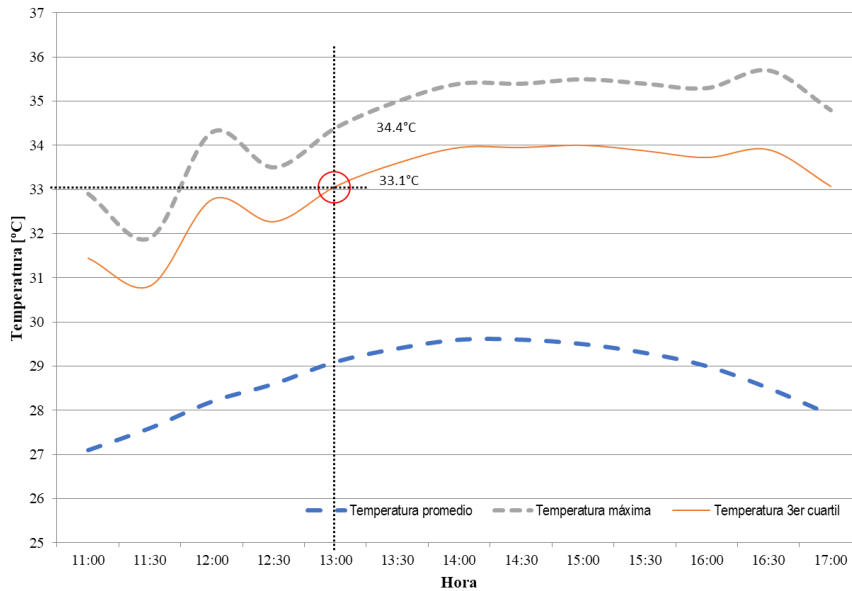
Para tal fin, se toman como fuente. los datos procesados de la Estación Meteorológica Univalle, administrada por el Departamento de Proyectos de la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle.

- De acuerdo a los datos registrados, se selecciona el promedio de temperatura en el 3er cuartil, dado que es la temperatura estimada más elevada – Ver Gráfico No. 12.
- Se selecciona el promedio de humedad relativa en el 2do cuartil, porque permite tener un límite por lo bajo, como insumo de diseño para estrategias de climatización – Ver Gráfico No. 13.
- La localización del punto de intersección en la carta psicométrica de estrategias bioclimáticas sugeridas – Ver Gráfico 14, muestra que la estrategia adecuada para la temperatura del bulbo seco y la humedad relativa definida, es “ventilación o evaporativa”.

- **Temperatura de diseño:**

Gráfico No. 12:

Curvas de temperatura anualizada para Cali



Tprom - Tmáx - HR vs tiempo

 11:00 am - 17:00 pm

 Estación meteorológica Univalle

 9 Mayo 2013 - 6 Marzo 2017

Temperatura de diseño:

Temp. 3er cuartil

33.1°C

Temp. Max

34.4°C

Temp. Min

La hora de diseño seleccionada

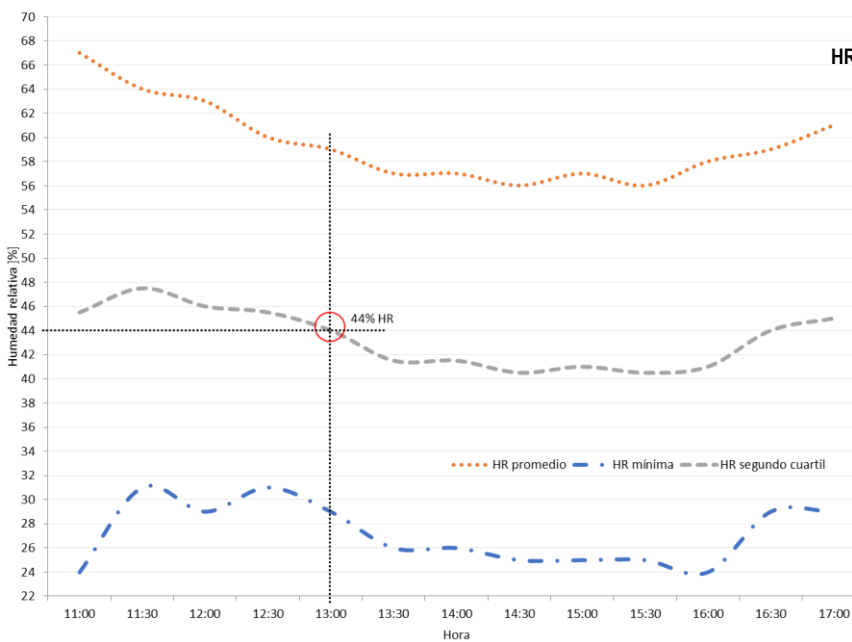
 es la 1:00 PM

Tomado de: Departamento de Proyectos. Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle. Cali.

- **Humedad relativa de diseño:**

Gráfico No. 13:

Curvas de humedad relativa anualizada para Cali



HRprom - HRmín - HR 2do cuartil vs tiempo

 11:00 am - 17:00 pm

 Estación meteorológica Univalle

 9 Mayo 2013 - 6 Marzo 2017

Humedad relativa 2do Cuartil:

44%

Humedad Absoluta

14.38 g H₂O/Kg dry air

Presión de Vapor

[Barometric pressure]

1.300kPa

1.301

La hora de diseño seleccionada

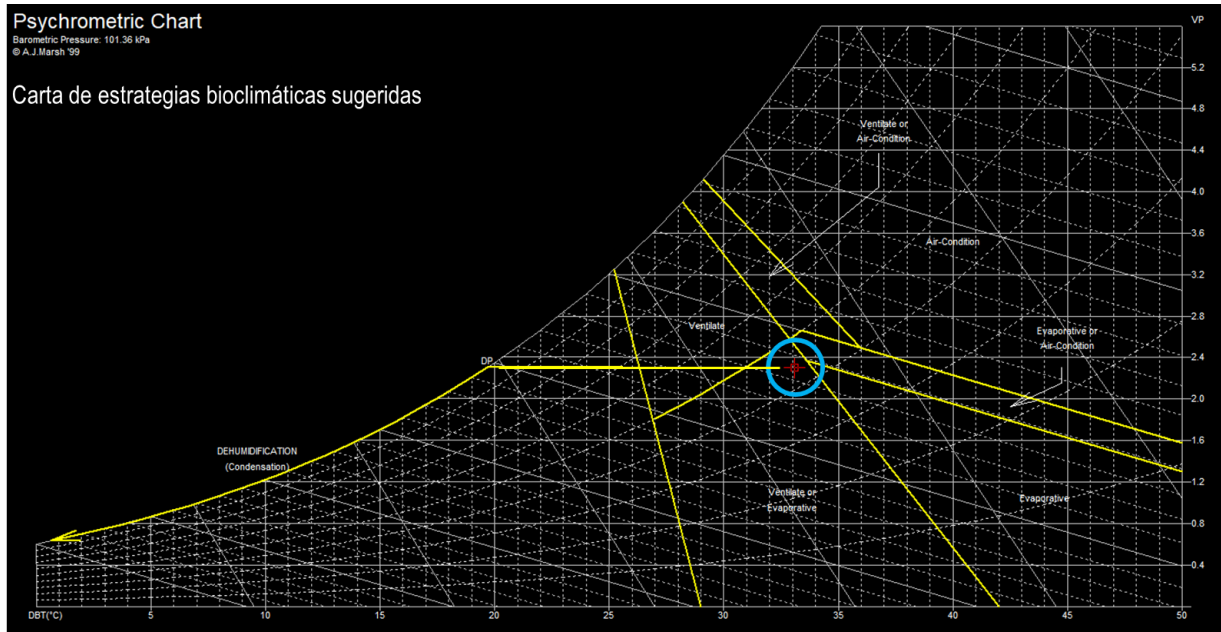
 es la 1:00 PM

Tomado de: Departamento de Proyectos. Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle. Cali.

- **Carta psicométrica:**

Gráfico No. 14:

Carta psicométrica de estrategias bioclimáticas sugeridas

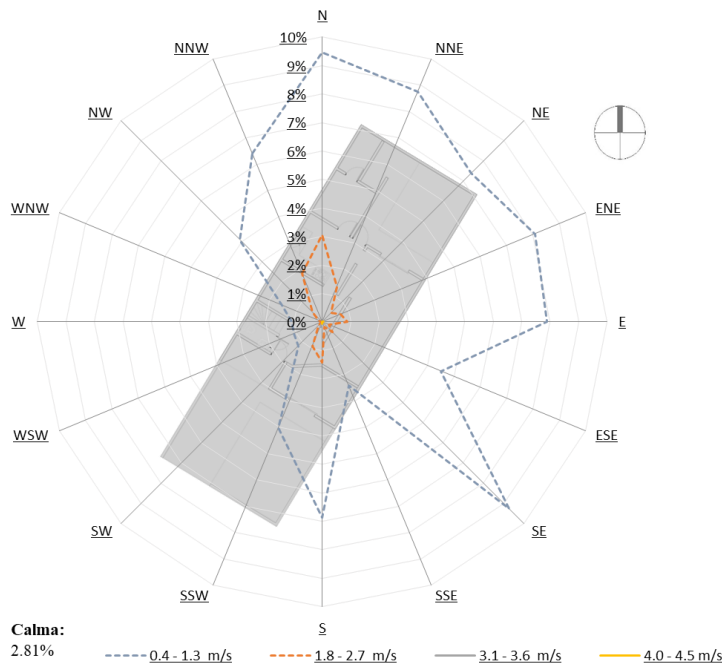


Fuente: Software *The psychTool*. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle.

- **Determinantes para ventilación**

Gráfico No. 15:

Rosa de los vientos Estación Universidad del Valle



Estación meteorológica Univalle
 9 Mayo 2013 – 6 marzo 2017
 12:30 pm – 18:00 pm

Tomado de:
 Departamento de Proyectos
 Universidad del Valle.

Superposición elaboración
 propia.

- **Datos Rosa de los vientos**

Tabla No.28:

Datos Rosa de los vientos

Franja de registro horaria			12:30 pm -18:00 pm	
Velocidad (m/s)	0.4-1.3	1.8-2.7	3.1-3.6	4.0-4.5
Dir	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
N	9,46%	3,06%	0,01%	0,00%
NNE	8,75%	1,35%	0,01%	0,00%
NE	7,38%	0,45%	0,04%	0,00%
ENE	8,08%	0,69%	0,09%	0,02%
E	7,89%	0,88%	0,02%	0,01%
ESE	4,50%	0,24%	0,01%	0,00%
SE	9,28%	0,50%	0,01%	0,00%
SSE	2,41%	0,18%	0,02%	0,00%
S	6,88%	1,43%	0,08%	0,03%
SSW	4,04%	0,91%	0,18%	0,04%
SW	1,19%	0,20%	0,01%	0,00%
WSW	1,07%	0,07%	0,01%	0,01%
W	1,07%	0,06%	0,01%	0,00%
WNW	1,53%	0,15%	0,00%	0,00%
NW	4,08%	0,50%	0,02%	0,01%
NNW	6,41%	1,85%	0,01%	0,00%
Calma	2,81%			

Fuente: Departamento de proyectos. Escuela de Arquitectura. Universidad del Valle. Cali

- La hora de diseño seleccionada [13:00], se encuentra en la franja entre 12:30 pm y 18:00 pm [Ver Tabla No.28]
- La dirección del viento con mayor velocidad promedio viene del N [Norte]
- La mayor velocidad promedio está entre 0.4 – 1.3 m/s
- Adicionalmente, la franja horaria seleccionada [12:00 – 18:00] es la franja horaria en donde se presenta la mayor dinámica de ventilación.
- El periodo de calma es solamente el 2.81% del tiempo.

e. Pérdida de calor de los elementos que componen el objeto de estudio.
[temperaturas de diseño y TMR]

Áreas y volúmenes

Se modela la vivienda objeto de estudio en REVIT 2020 para visualizar su volumetría, la localización de los espacios y los elementos estructurales que la componen.

El objetivo es definir el espacio, que se llamará “*volumen de control*”, sobre el cual se evaluará y diseñará la propuesta para mejorar las condiciones de confort térmico al interior de la vivienda.

Gráfico No. 16:

Áreas y volúmenes de los espacios de la vivienda e irradiancia en superficies externas

21 de Marzo 13:00 h

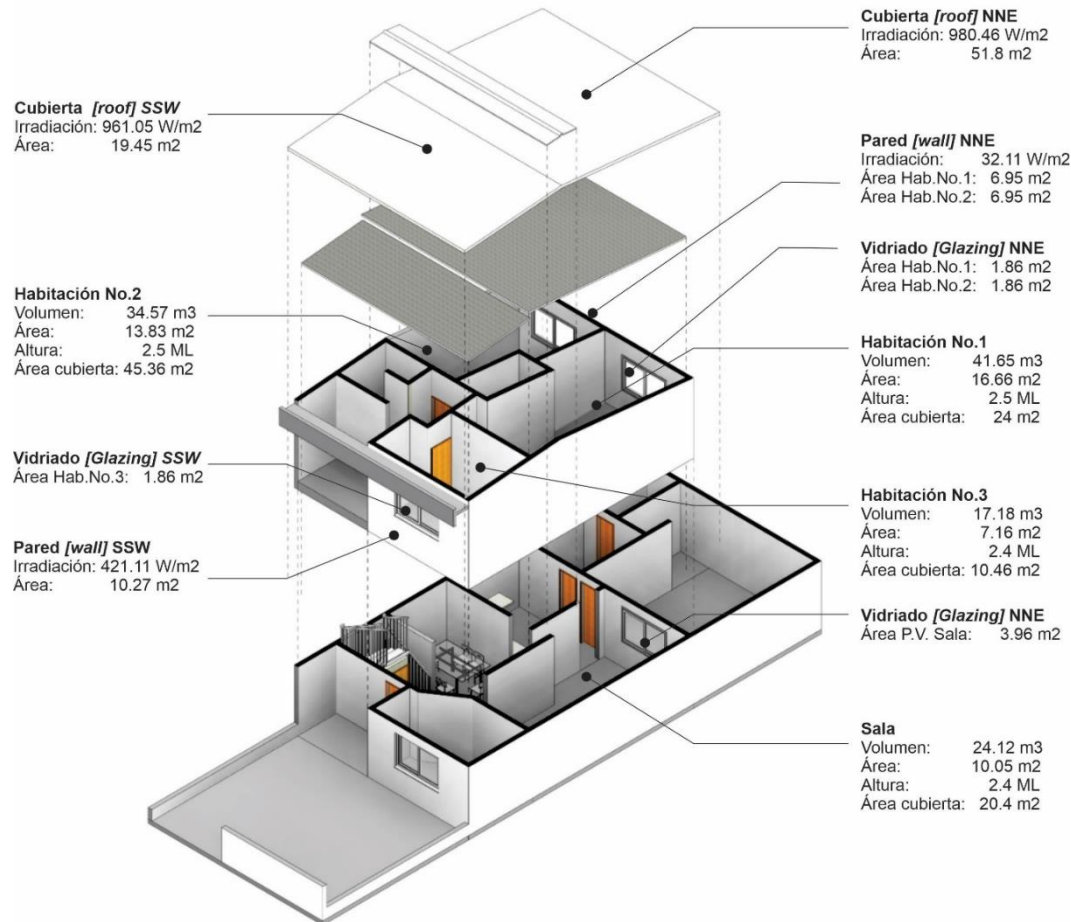


Tabla No. 29

Valores para el cálculo de la carga térmica - Línea base

	Irradiancia [w/m ²]	Volumen [m ³]	Area [m ²]	Altura [ml]	Area cubierta [m ²]
Cubierta NNE	981,29		51,8		
Pared NNE	32,11		13,9		
Habitación No.1			6,95		
Habitación No.2			6,95		
Vidriado NNE			7,68		
Habitación No.1			1,86		
Habitación No.2			1,86		
Sala			3,96		
Cubierta SSW	961,05		19,45		
Vidriado SSW			1,86		
Pared SSW	421,11		10,27		
Habitación No.1		41,65	16,66	2,5	24
Habitación No.2		34,57	18,83	2,5	45,36
Habitación No.3		17,18	7,16	2,4	10,46
Sala		24,12	10,05	2,4	20,4

Fuente: Elaboración propia.

La cubierta recibe la mayor irradiancia solar, en consecuencia, las habitaciones del segundo piso son los volúmenes que concentran la mayor carga térmica.

El volumen de control será pues, una de las habitaciones del segundo piso. Este será definido de acuerdo al cálculo de pérdida de calor de los elementos de la vivienda.

Modelado térmico de los elementos: envolvente, ocupantes y equipos

Esta sección está enfocada en calcular la transferencia de calor en la vivienda.

Conocer la carga térmica y la temperatura de las superficies internas de la vivienda, generadas por la transferencia de calor permitirá contar con una línea base sobre la cual se determinarán las estrategias que conducirán a lograr el objetivo de confort.

Las estrategias definirán las transformaciones físicas que deberán implementarse en la vivienda.

El modelado térmico de los elementos de la envolvente, tiene como objetivo realizar el cálculo de calor $[\dot{Q}_{total}]$. Para este fin se utilizarán las ecuaciones encontradas en Cengel, "Heating and Cooling of building" Cap. 21. (Y. Cengel & Ghajar, 2011) y los procedimientos correspondientes [Ecuaciones No.11 a la No. 14]

Metodológicamente, lo primero será despiezar el elemento de la envolvente para determinar los materiales que lo componen y enseguida realizar el cálculo de pérdida de calor del mismo. De ASHRAE *Handbook Fundamentals*, se obtienen los coeficientes e índices, procediendo de la siguiente manera:

1. [Ecuación No.8] Cálculo de resistencia térmica: $R_i = \frac{L_i}{k_i}$
2. [Ecuación No.9] Valor total $[\Sigma]$ de las resistencias térmicas: $R_{total-roof} = \sum_i R_i$
3. [Ecuación No.10] Cálculo del coeficiente de la transferencia de calor: $U_{roof} = \frac{1}{R_{total-roof}}$
- Cálculo de pérdida de calor:
 4. [Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056T_{DP} + 7.3 * 10^{-5}T_{DP}^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$
 5. [Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_{solar}}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$
 6. [Ecuación No.13] $Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = U_{roof} A (T_{sol-air} - T_{inside})$
 7. [Ecuación No.14] $\dot{q}_{roof} = Q_{roof} \frac{W}{A m^2}$
 8. [Ecuación No.15] $T_{r-roof} = \frac{\dot{Q}_{roof} h_i}{A} + T_{inside}$
 9. [Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{roof}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$
- Modelado ventanas:
 10. [Ecuación No.17] $\dot{Q}_{solar-gain} = SHGC * A_{glazing} * \dot{q}_{solar-incident}$

11. [Ecuación No.18] $T_{r-window-room} = \frac{\dot{Q}_{wall} h_i}{A} + T_{inside}$

- Modelado personas y equipos

12. [Ecuación No.19] $A_b = 0.202 * m^{0.425} * H^{0.725}$ $A_T = A_b * 1.5$

13. [Ecuación No.20] $\dot{Q}_{people-space} = people * metabolic\ rate * AT$

14. [Ecuación No.21] $\dot{Q}_{total} = \sum_i \dot{Q}_i$
 $\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{Sunroof-NE} + \dot{Q}_{Sunwall} + \dot{Q}_{window-room} + \dot{Q}_{people}$

El procesamiento de los datos e información adicional se puede revisar en ANEXOS II [Gráficos del No. 17 – 24, Tablas de No. 30 – 35, Imágenes de la No. 4 - 10].

Tabla No. 36:

Resultados del modelado térmico de los elementos – Línea Base

PASOS	ECUACIONES	CUBIERTA NNE	CUBIERTA SSW	PARED NNE	PARED SSW	Habitación No.1	Habitación No.2	Habitación No.3	Und
1	[Ecuación No.8] Cálculo de resistencia térmica: $R_i = \frac{L_i}{k_i}$								
2	[Ecuación No.9] $R_{total-xxx} = \sum_i R_i$ Valor total [Σ] de las resistencias térmicas:	0,970	0,970	0,364	0,364				m2 °C /W
3	[Ecuación No.10] Coeficiente de la transferencia de calor:	1,026	1,026	2,747	2,747				W/m² k
Cálculo de pérdida de calor									
4	[Ecuación No.11] $T_{sol-atr}$	21,84	21,84	30	30				°C
5	[Ecuación No.12]: T_{sky} Temperatura del aire externa	98,48	97,01	33,05	50,56				°C
6	[Ecuación No.13]: Q_{roof} Calor total	3.798,6	1.396,8	115,28	664,68				W
7	[Ecuación No.14]: $\dot{q}_{roof}$ Calor parcial	73	72	17	65				W/m²
8	[Ecuación No.15]: T_{r-roof} Temperatura de la superficie interna	35,80	35,62	29,00	34,77				°C
9	[Ecuación No.16] $Fraction_{solar}$	7,47	7,47	51,79	15,37				%
Modelado ventanas									
10	[Ecuación No.17] $\dot{Q}_{solar-gain}$					52,0	52,0	681,4	W
11	[Ecuación No.18] $T_{r-window-room}$					34,5	34,5	68,9	°C
Modelado personas y equipos									
12	[Ecuación No.19] A_b					1,9	1,9	1,9	M2
13	[Ecuación No.20] $\dot{Q}_{people-space}$					152,4	152,4	152,4	W
Resultado final									
14	[Ecuación No.21] $\dot{Q}_{total}$					4.120,3		2.897,1	W

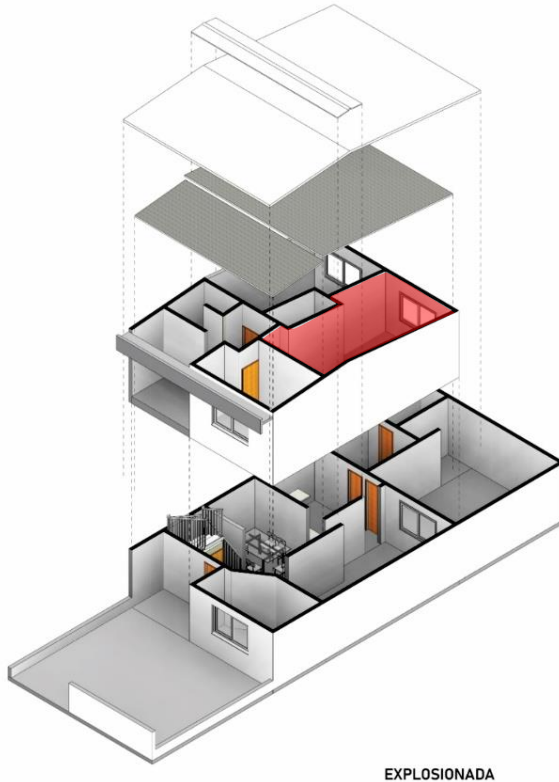
Elaboración propia

La carga térmica total de la habitación No.1, a la hora de diseño, es de 4.120 W [Ver tabla No. 36 - verde]. Este dato servirá como línea base que deberá ser disminuido con la intervención del volumen de control.

f. Determinar el volumen de control

Gráfico No. 25:

Localización Volumen de Control



- Por estar en contacto directo con la cubierta, los volúmenes probables para ser considerados “*de control*”, son las habitaciones del segundo piso de la vivienda.

- Las habitaciones No.1 y No.2, tiene la misma carga térmica. Por esa razón se consideraron las Habitaciones No.1 y No.3, dado que la No.3 está orientada hacia el costado SSW que se encuentra soleado a la hora de estudio.

- De acuerdo a los resultados obtenidos del cálculo final de carga térmica, la habitación No.1 es la más alta.

- En consecuencia, el **volumen de control** determinado, es la habitación No.1. [marca en rojo]

Fuente: Elaboración propia

7.1.3. Estado de confort en el volumen de control – LINEA BASE

a. Cálculo de la Temperatura media radiante [TMR] Línea Base

En el siguiente gráfico se consolidan las temperaturas interiores de los elementos, la altura de los espacios y la carga térmica calculada [Q].

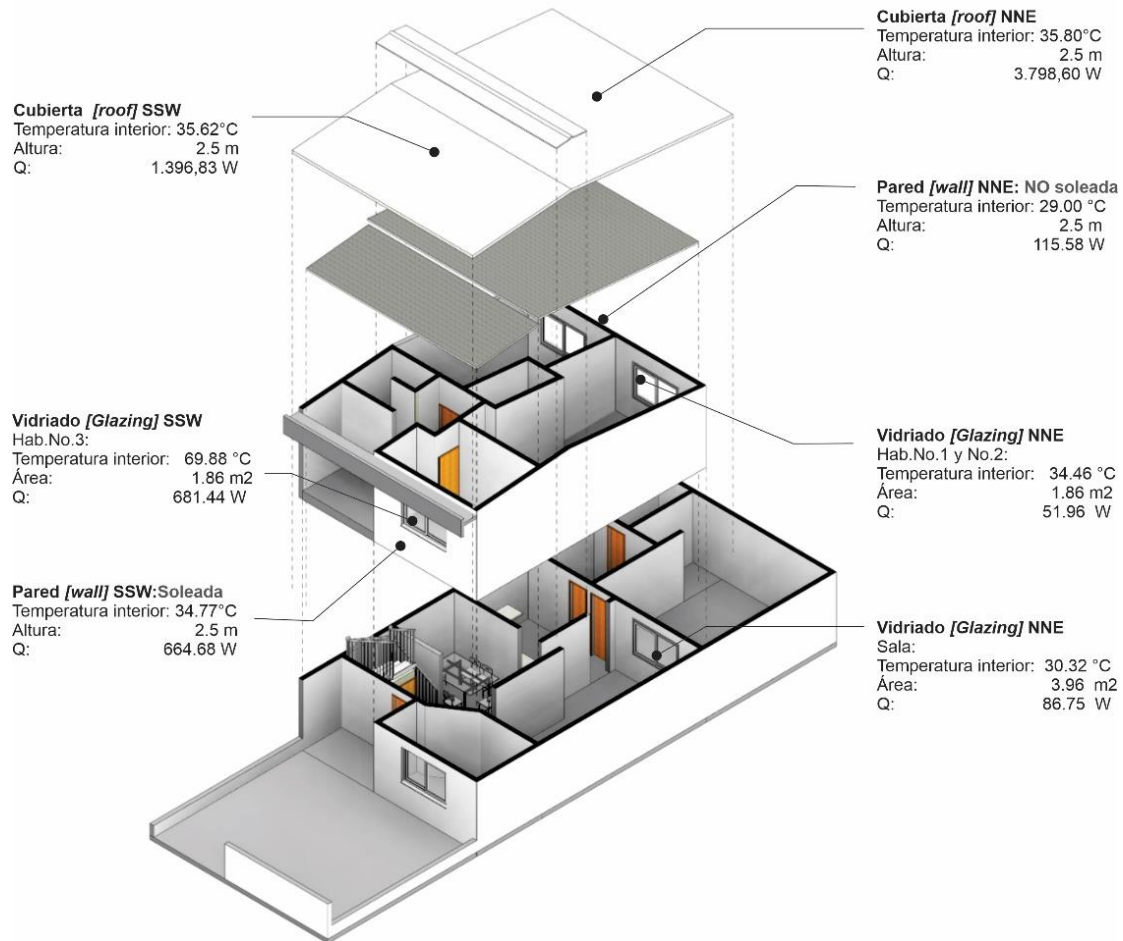
Para el cálculo de la **temperatura media radiante** - TMR [*Mean Radian Temperature*], será utilizada la aplicación:

- CBE 3D Mean Radiant Temperature Tool

Tomado del software Online del “*Center for the Built Environment (CBE), University of California Berkeley*”: **CBE – Thermal Comfort Tools**.

Gráfico No.26:

Calor (Carga térmica) [Q], Temperaturas de la superficie interna [°C], áreas y volúmenes – Línea Base



Fuente: Elaboración propia

Tabla No. 37

Datos para el cálculo de la TMR – Línea base

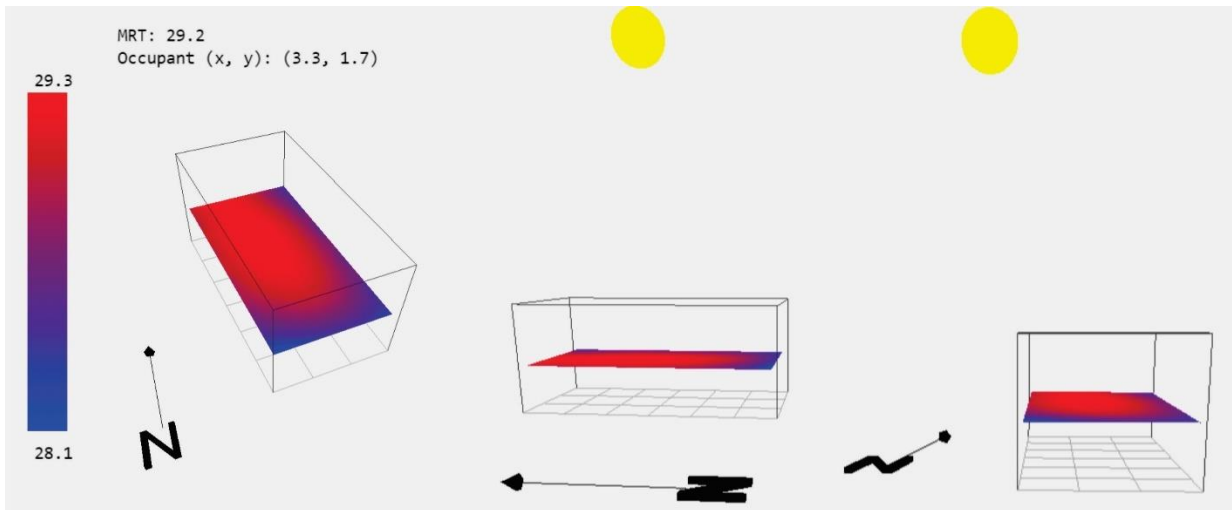
Las temperaturas de las superficies internas de los muros medianeros y del piso se tomaron en sitio.

Room	Ancho	Profundidad	Altura	Altitud	Azimuth	Fraccion del cuerpo expuesta al sol	Direct Beam [W/m ²]	absortividad
Habitación No.1	6,2	2,6	2,5	74	259	50	981,29	0,73

Superficie	Temperatura de la superficie	Und
Cubierta [Ceiling]	35,80	°C
Pared Norte	29	°C
Pared Este	27	°C
Pared Sur	27	°C
Pared Oeste	28	°C
Piso [Losa Entrepiso]	27	°C
Posición ocupante	Acostado	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico No. 27:
Resultado TMR estado inicial, por CBE - Thermal Comfort Tools



Fuente: Gráfico obtenido con el CBE – Thermal Comfort Tools.
 Elaboración propia.

La **TMR** obtenida para el estado inicial del *Volumen de Control* es de **29.3 °C**

b. Estado de confort del volumen de control – Línea Base

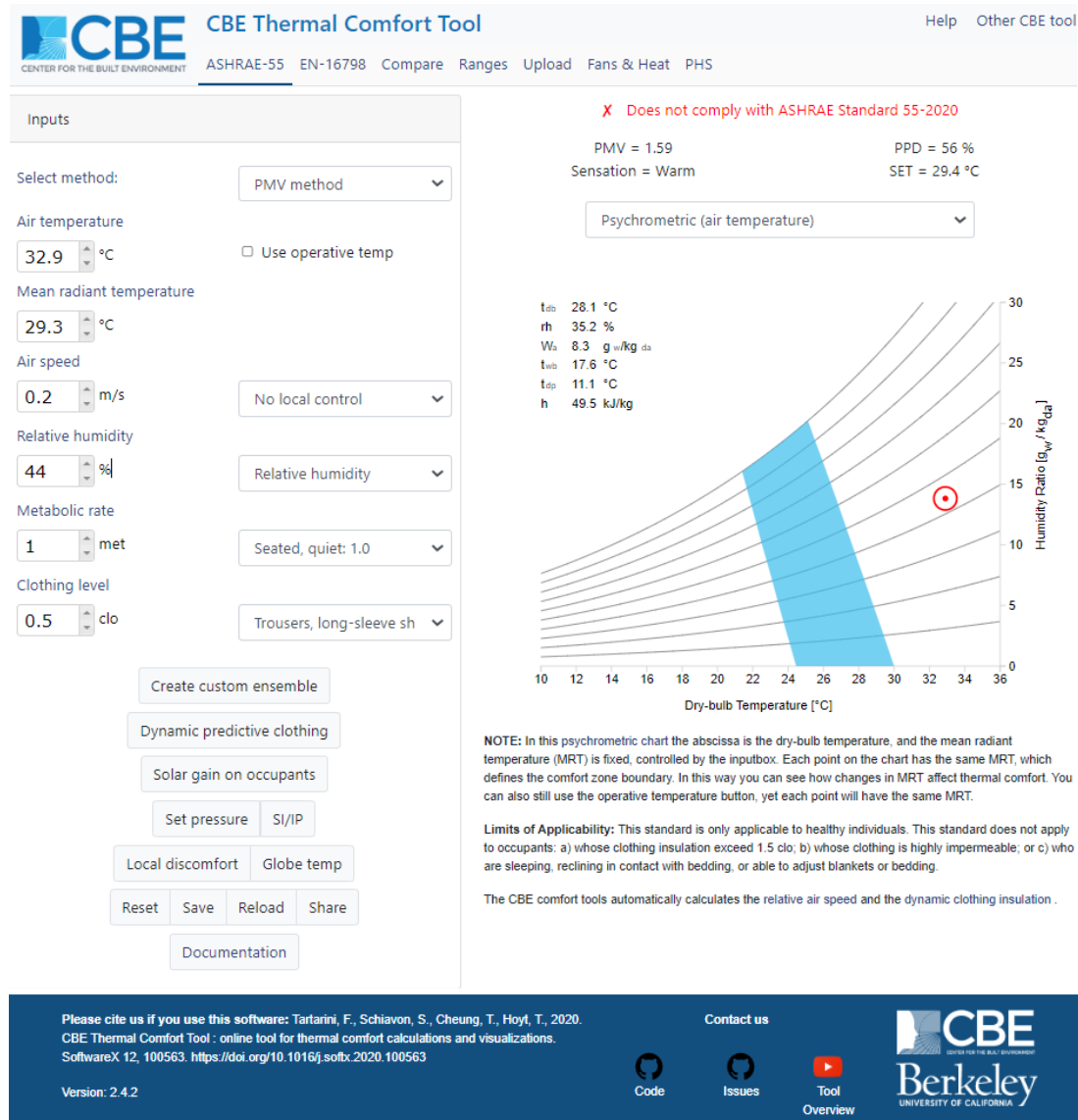
Para determinar el confort térmico en las habitaciones, se tomarán los índices de *Valor Medio Predicho - PMV (predicted Mean Value)* y del Porcentaje de Insatisfacción Predicha - PPD (*Predicted Percent Dissatisfied*) definidos en el método de **Fanger**.

Para obtener la carta psicométrica de confort, se utilizó el sitio web “**CBE - Thermal Comfort Tool**” del “*Center of Built Environment – CBE*” on-line de propiedad de la *Berkeley University*, como se muestra en el gráfico No. 28, obteniendo como resultado lo siguiente:

- El PMV determinado es de 1.59, de acuerdo al PPD el **56%** de las personas ocupantes estarán **no confortables**, con una sensación térmica de “caliente” [Warm].
- La modelación y el cálculo fue elaborado tomando como temperatura **Indoor** del aire **32°C**, la temperatura promedio anual **outdoor** es **33.1°C**. Se asume que la *T* del aire externo, como flujo másico, disminuye por diferentes efectos, convección, fricción. Si la ventilación natural no puede evacuar la carga térmica que aporta la cubierta y las paredes y ventanas, los espacios se calentarán más de lo calculado.
- Es imposible que la temperatura de la alcoba sea inferior a **32 °C**, si no se cuenta con estrategias de climatización para alcanzarlo.

Gráfico No.28:

Confort térmico Línea Base - Carta psicrométrica método PMV – ASHRAE 55



Tomado de CBE – Termal Comfort Tools.
Elaboración propia.

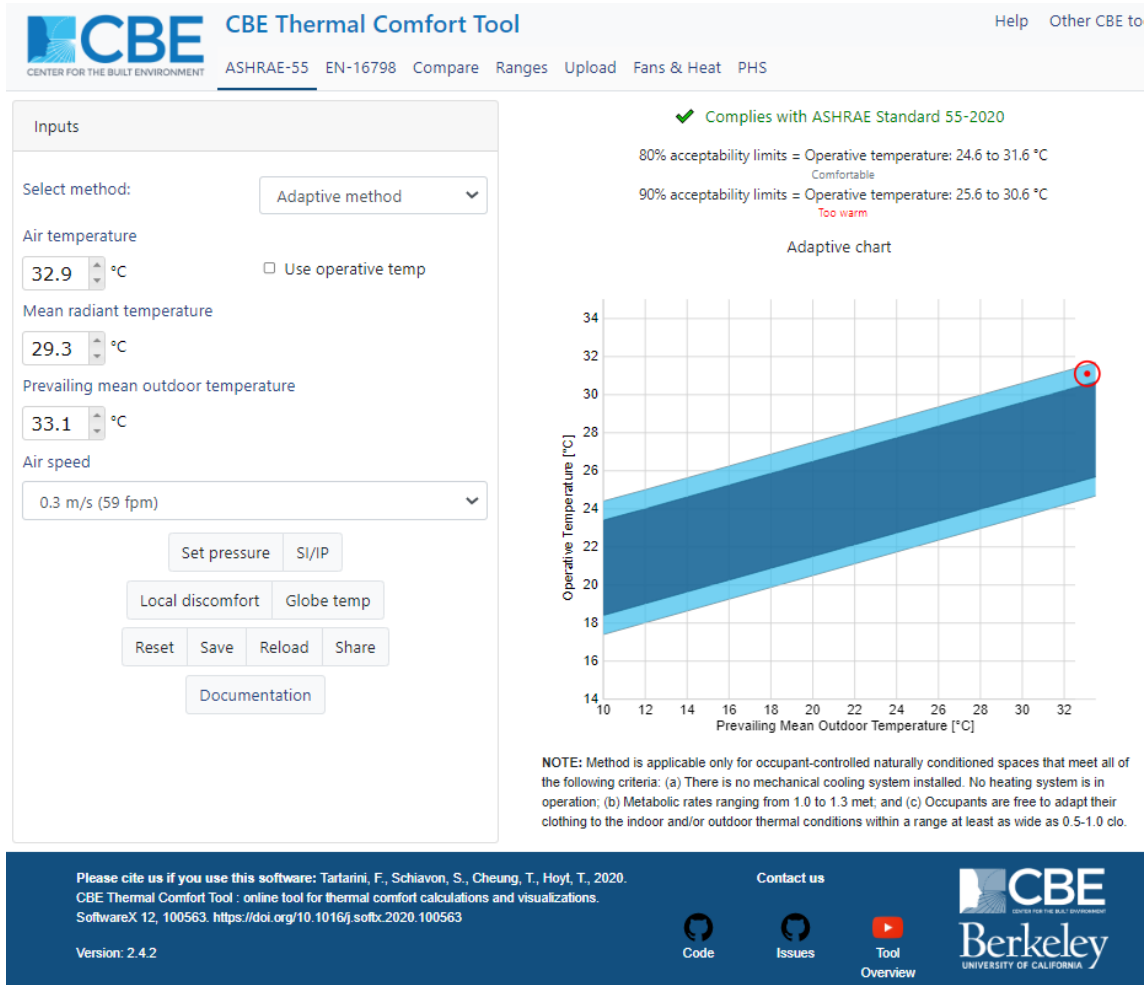
De acuerdo a los resultados utilizando el método Fanger del “Voto medio estimado”:

- Las condiciones iniciales del volumen de control – línea base - **no cumplen** con el Standard ASHRAE 55 – 2000.
- La carta psicrométrica muestra un Voto medio estimado [PMV] de 1.59 y un Porcentaje de personas insatisfechas [PPD] del 56%.
- La sensación térmica es Caliente [Warm]

Gráfico No.29:

Confort térmico Línea Base - Carta psicométrica método ADAPTATIVO – ASHRAE 55

Este trabajo **NO** establece el método adaptativo como su indicador de confort. El gráfico solamente se muestra como referencia para comparar su comportamiento frente al método PMV.



Tomado de CBE – Thermal Comfort Tools.

Elaboración propia.

Para el método Adaptativo, de acuerdo a los resultados:

- Las condiciones iniciales del volumen de control – línea base - **cumplen** con el Standard ASHRAE 55 – 2000.
- Permanece dentro de los límites de aceptabilidad.
- La sensación térmica es Demasiado Caliente [*Too warm*]

7.1.4. Flujo de aire en el volumen de control - LINEA BASE

a. Flujo de aire disponible en el volumen Original

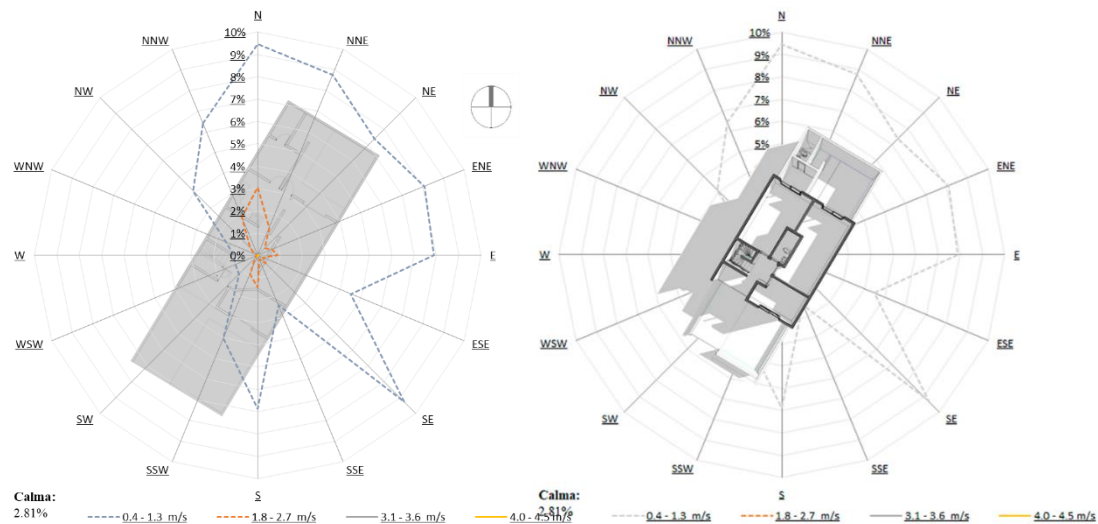
En esta sección se calculará el flujo de aire disponible y requerido para lograr un nivel de calidad del aire adecuado al interior de la vivienda, por el número de cambios de aire por hora $[ACH]$ y la capacidad que el mismo flujo de aire tiene para evacuar el calor acumulado en el volumen de control.

El cálculo del flujo de aire disponible, se ha realizado tomando las siguientes consideraciones:

- La ventilación natural [pasiva], permite controlar la calidad del aire y obtener confort térmico.
- El movimiento del aire al interior de la edificación influye en el confort térmico a pesar de tener condiciones inadecuadas de temperatura y humedad relativa. Adicionalmente, permite la expulsión de gases contaminantes.
- Para este proyecto, utilizaremos ventilación natural. La vivienda no cuenta con medios mecánicos de ventilación. Las condiciones climáticas del lugar son favorables para implementar estrategias de climatización pasivas con ventilación natural.
- De esta manera, se entenderá que el manejo del aire entrante y saliente será resultado de la diferencia de presiones que se producen naturalmente por el cruce del viento entre aperturas, y al efecto chimenea.
- La dirección de procedencia del viento a Barlovento, será la definida en la Rosa de Vientos. Mas o menos Norte.
- El coeficiente de presión del viento $[C_p]$ se define de acuerdo a la tabla de Santamouris (Asimakopoulos & Santamouris, 2013).

Gráfico No. 30:

Superposición del Volumen de control sobre la Rosa de los vientos



Fuente: Base Rosa de los vientos estación meteorológica Universidad del Valle.

 Superposición: Elaboración propia.

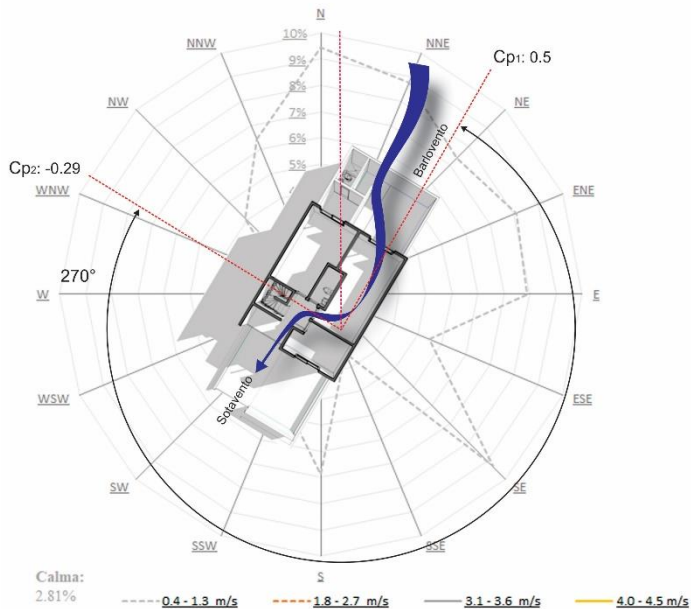
- Para el cálculo de ventilación natural, el **VOLUMEN DE CONTROL** es el espacio con la condición más crítica.
- El espacio más crítico es la habitación No.1 ubicada en el 2° piso.
- El coeficiente presión $[C_{p1}]$: Barlovento. Se toma la media aproximada de la dirección del viento

- 8% frecuencia. $Cp1: 0^\circ = 0.5$
- El coeficiente presión $[Cp2]$: Sotavento. La salida interna del aire respecto a la entrada.
 - Salida a $Cp2: 270^\circ = -0.29$
- Velocidad del aire: $V = 0.2 \text{ m/s}$

Comportamiento del flujo de aire en el volumen de control [Línea azul].

Gráfico No. 31:

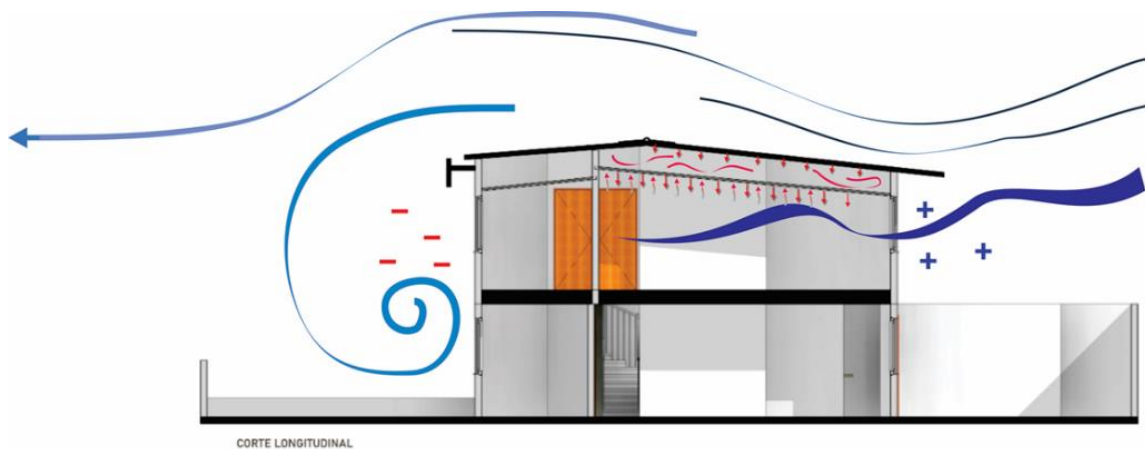
Orientación cardinal de la edificación respecto al flujo del viento



Fuente: Base Rosa de los vientos estación meteorológica Universidad del Valle.
 Elaboración propia.

Gráfico No. 32:

Efecto del flujo del viento en la edificación - Corte



Fuente: Elaboración propia.

Por las condiciones del volumen en el estado inicial se encuentran las siguientes situaciones:

- El espacio entre la cubierta [techo] y el cielo falso genera una **bolsa de aire caliente**.
- No hay recambio de aire en la bolsa de aire, lo cual hace que la temperatura se mantenga caliente y se eleve con el tiempo.
- El volumen de aire de la habitación se calienta por la radiación del cielo falso.
- La fachada de la habitación tiene una relación de ancho – altura de **2:1**
- La apertura más grande de la habitación, una ventana con celosía, se enfrenta a Barlovento.
- La apertura más pequeña de la habitación, la puerta de entrada, está ubicada a sotavento.
- Se considera que el movimiento del aire se da por efecto del cambio de presiones.
- El efecto de ventilación natural que opera es la **ventilación cruzada**.
- **No hay efecto chimenea.**

Por tanto, para lograr el confort y la calidad del aire se requiere:

1. Calcular la cantidad de **aire disponible** de acuerdo al volumen de la habitación
2. Calcular la cantidad de recambios de aire por hora - **ACH** [*Air Change per Hour*] posibles.
3. Calcular la cantidad de **aire requerida** para evacuar el aire caliente contenido en la habitación.
4. Consideraciones:
 - La carga térmica del volumen de control puede bajar.
 - Si se adecúa el volumen de control para disminuir la carga térmica, bajan los requerimientos de aire.
 - La condición es no implementar dispositivos de ventilación mecánica.
 - La velocidad de aire real es muy poca.
 - Se deberán implementar estrategias que ayuden a mover el aire.
 - Utilizando la diferencia de presiones, se deberán implementar estrategias como el efecto chimenea.

Para calcular la cantidad de **aire disponible** de acuerdo al volumen de la habitación se utilizará **el METODO NORMA**, descrito por Santamouris y Asimakopoulou en "*Passive cooling for buildings*".

El efecto encontrado para el movimiento de aire es **Ventilación Cruzada**. Para la predicción del flujo de aire debido al viento [Q_w] en metros cúbicos por hora, se implementarán las siguientes ecuaciones:

- Ventilación natural:

17. [Ecuación No.23]

Para $0 < \text{Apertura interna/ apertura externa} \leq 1$

$$Q_w = 1620 B^{-1.02} V \sqrt{\Delta C_p}$$

18. [Ecuación No.24]

Para $1 < \text{Apertura interna/ apertura externa} \leq 2$

$$Q_w = 1512 B^{-1.07} V \sqrt{\Delta C_p}$$

19. [Ecuación No.24]

$$B = 1 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$$

Tabla No.38:

MÉTODO NORMA - Cross ventilation

Flujo del aire debido al viento	Cálculo con Método NORMA		
Ecuación	Area apertura a barlovento	A1	1.86 m2
	Area apertura a sotavento	A2	1.60 m2
	Suma de areas de aperturas	A _t	3.46 m2
$Q_w = 1620 B^{-1.02} V \sqrt{\Delta C_p}$	Velocidad del viento	V	0.20 m/s
$Q_w = 1512 B^{-1.07} V \sqrt{\Delta C_p}$	CP Barlovento	Cp1	0.50
	CP sotavento	Cp2	(0.29)
	Diferencia coeficiente presión	ΔC_p	0.79
$B = 1 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$	B	B	0.41
	Qw	Qw	702 m3/h

Fuente: Método Norma. Asimakopoulos, D., & Santamouris, M.

Elaboración propia

- En rojo se enmarca la ecuación seleccionada dado que el caso de estudio tiene una apertura interna y una externa
- De acuerdo al método Norma, la cantidad de aire disponible en la habitación No.1 es de **702 m³/h**
- Se realizará la comprobación mediante el método de 35 pasos

Tabla No.39:

Método Norma [de los 35 pasos] para calcular la ventilación natural - Línea Base

MÉTODO NORMA - 35 Pasos, AppendixB3:G30					
No. Paso	Descripción del Paso	Modelo del cálculo	Abrev.	Valor	Unidad
1	Mes de diseño			March	
2	Velocidad del aire y dirección	WS = Wind speed WD = Wind Direction	WS WD	0.2 NNE	m/h
3	Temperatura ambiente mensual media	DTA	DTA	33.1	°C
4	Temperatura del aire interna - de Diseño	TA	TA	27	°C
5	Determinar la diferencia de temperatura media	DT = TA - DTA, si TA es < DT, entonces DT = DTA - TA. [(Step 4 - Step 3, si DT < 0, entonces DT = Step 3 - Step 4)]	DT	6.1	°C
6	Determinar la temperatura media	MT = (DTA + TA)/2. [(Step 4) - (Step 3)/2]	MT	30.05	°C
7	Determinar la relación de Temperatura	RT = DT/MT. [(Step 5) / (Step 6)]	RT	0.20	°C
8	Determinar SRT: Raíz cuadrada de RT	SRT = (RT) ^{0.5} [(Step 7) ^{0.5}]	SRT	0.45	
9	Angulo incidencia f sobre el muro barlovento	f	f	0.000	°
10	Coefficiente de presion del viento Cp1 sobre la fachada a barlovento	Cp1	Cp1	0.50	
11	Coefficiente de presion del viento Cp2 sobre la fachada a sotavento	Cp2	Cp2	-0.29	
12	Determinar el coeficiente de la diferencia de presion del viento	DCP = Cp1 - Cp2	DCP	0.790	
13	Determinar SDCP: la raíz cuadrada de DCP	SDCP = DCP ^{0.5} [(Step 12)] ^{0.5}	SDCP	0.889	
14	Volumen del espacio ventilado	V	V	41.60	m ³
15	Area de la apertura a barlovento		A ₁	1.86	m ²
16	Area de la apertura a sotavento		A ₂	1.60	m ²
17	Distancia vertical entre las aperturas sotavento y barlovento		H	0.00	
18	Area total de las aperturas	AC = A ₁ + A ₂ [(Step 15) + (Step 16)]	AC	3.46	m ²
19	Determinar A ₁	(A ₁) ² [(Step 15) ²]	A ₁ ²	3.46	m ²
20	Determinar A ₂	(A ₂) ² [(Step 15) ²]	A ₂ ²	2.56	m ²
21	Determinar A = sumatoria de A	A = A ₁ ² + A ₂ ² [(Step 19) + (Step 20)]	A	6.02	m ²
22	Determinar B = Raíz cuadrada de A	B = (A) ^{0.5} [(Step 20)0.5]	B	2.45	m ²
23	Determinar C	C = 1/ B [1/(Step 22)]	C	0.41	m ²
24	Determinar la relación D	D = A ₁ / A ₂	D	1.1625	
25	Determinar h	h = H ^{0.5} [(Step 17) ^{0.5}]	h	0.00	
26	Desde el valor D determinar el coeficiente K ₁ y K ₂	Para 0 < D ≤ 1 K ₁ = 0.45, K ₂ = -1.02. Para 1 < D ≤ 2 K ₁ = 0.42, K ₂ = -1.07	K ₁ K ₂	0.42 -1.07	
27	Determinar E	E = C ^{K₂} [(Step 23) ^{(step26(b))}]	E	2.61	
28	Determinar el flujo de aire debido al viento Q _w	Q _w = K ₁ *E*SDCP*WS*3600 [(Step 26(a))* (Step 27)* (Step 13)* (Step 2)* 3600]	Q _w	702.21	m ³ /h
29	Determinar K : factor de corrección	De la figura 9.9 determinar K	K	0.61	
30	Determinar el flujo de aire debido al efecto chimenea Q _s	Q _s = 1590*K*AC*SRT*h [1590*(Step 29)*(Step 18)*(Step 8)*(Step 25)]	Q _s	0	m ³ /h
31	Determinar Q _{w1}	Q _{w1} = Q _w ² [(Step 28) ²]	Q _{w1}	493,092	
32	Determinar Q _{s1}	Q _{s1} = Q _s ² [(Step 30) ²]	Q _{s1}	-	
33	Determinar Q _{t1}	Q _{t1} = Q _{s1} + Q _{w1} [(Step 32)+(Step 31)]	Q _{t1}	493,092	
34	Determine flujo de aire total QT [Flujo Disponible]	QT = Q _{t1} ^{0.5} [(Step 33) ^{0.5}]	QT	702	m ³ /h
35	Determine Cambio de aire por hora	ACH = QT / V [(Step 34)/(Step 14)]	ACH	17	

- Se confirma que el flujo de aire total disponible en el volumen de control, a una velocidad de V: 0.2 m/s, es de 702 M³/h.
- No hay efecto chimenea – EN EL VOLUMEN ORIGINAL – Línea base.**
- De acuerdo a “The Engineering Tolbox”, los recambios de aire por hora [Air change per hour – ACH] necesarios para mantener la calidad del aire para una habitación se encuentran entre 10 y 18.

- Los recambios calculados por el Método NORMA obtenidos fueron **ACH = 17**
- **Con el flujo natural de aire debido a la ventilación cruzada se obtiene la cantidad de aire disponible para efectuar los recambios de aire requeridos por hora. Por tanto, CUMPLE.**
- No obstante, el método NORMA no incluye la cantidad de calor que se requiere retirar, ni los efectos de la presión atmosférica producida por la altura sobre el nivel del mar, como tampoco la caracterización del terreno y sus obstrucciones a la ventilación natural.
- De esta manera, puede concluirse que el método NORMA, aun puede ser inexacto.

b. Flujo de aire para obtener confort y calidad del aire interior – Línea Base
[Calcular los recambios de aire por hora [ACH] requeridos]

Para calcular la cantidad de aire requerida para evacuar la carga de aire caliente, se utilizará el Macro de Excel diseñado por el ing. Alejandro Macías, Master en Ingeniería– Énfasis Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, 2018, como se muestra a continuación:

Parámetros:

Método NORMA

Tipo de efecto: Ventilación cruzada

Tipo de flujo: Debido al viento con área de entrada > área de salida.

Gráfico No. 40:

Cálculo de la ventilación natural Método NORMA. Debido solo al viento

CALCULO DE EVENTILACION NATURAL

Método NORMA Entrada/Salida en un Solo Lado por Diferencias de Temperatura | Método NORMA Ventilación Cruzada

Debido solo al viento con área de salida > área de entrada | Debido solo al viento con área de entrada > área de salida | Solo efecto chimenea | Efectos de viento y chimenea combinados

¡CUIDADO! Verifique cual es el separador decimal en su máquina, este puede ser la coma o el punto.

Configuración del viento

Velocidad del viento predominante reportada por la estación meteorológica local (m/s): **0.2**

Seleccione el tipo de terreno de ubicación de la edificación.

☐ Centro de ciudades grandes con el 50% de edificios mas altos de 21 m

☐ Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones cerradas

☒ Terreno abierto con obstrucciones aisladas que generalmente tienen menos de 10 m de altura. Incluye terreno plano de campo abierto.

☐ Áreas planas sin obstrucciones, expuestas al viento.

Carga térmica en el volumen de control (kW): **4.12**

Altura sobre el nivel del mar (m): **923**

Volumen del espacio (m³): **41.65**

Alto de la entrada (m): **1.2**

Ancho de la entrada (m): **1.55**

Cantidad de entradas al espacio: **1**

Alto de la salida (m): **2**

Ancho de la salida (m): **0.8**

Cantidad de salidas del espacio: **1**

Temperatura exterior (°C): **33.1**

Altura de la entrada referente al piso 1 (m): **0.9**

Coefficiente de presión Cp1 Sotavento: **0,5** | Mostrar valores Cp1

Coefficiente de presión Cp2 Barlovento: **-0,29** | Mostrar valores Cp2

Flujo de aire requerido para retirar la carga térmica del volumen de control (m³/h): **4574,663**

Flujo de aire disponible a la Temperatura exterior (m³/h): **3288,394**

Cambios de aire por hora disponibles a la Temperatura exterior (ACHa): **79**

Flujo de aire adicional requerido en forma mecánica: **1286,268**

CALCULAR | **BORRAR** | **SALIR**

Fuente: Macro elaborada por el Mg. Ing. Alejandro Macías. Universidad del Valle.
Elaboración propia.

- Los resultados obtenidos en la Macro no coinciden con los encontrados a través del METODO NORMA de 35 pasos.
- De acuerdo al cálculo de ventilación natural del Macro, para evacuar la cantidad de aire caliente en el Volumen de Control, se requiere un flujo de aire adicional al disponible de **1286 m³/h, por tanto, NO CUMPLE.**

c. Información de resultados – Línea Base

La información obtenida como línea base que permite realizar análisis de las condiciones iniciales a partir de las cuales se establecerán las estrategias de diseño son las siguientes:

Tabla No.40:

Resultados del cálculo de la ventilación natural del volumen de control – LÍNEA BASE

Especificación	Cantidad	Unidades
Carga térmica interna:	4.120,31	W/m ²
Temperatura media radiante:	29.3	°C
Temperatura interior de la cubierta:	35.8	°C
Resultados Método NORMA - 35 Pasos - Asimakopoulos, D., & Santamouris, M.		
Flujo de aire debido al efecto chimenea Qs	0	m ³ /h
Flujo de aire total QT [Flujo Disponible]	702	m ³ /h
Cambios de aire por hora disponibles debido al flujo natural del aire [ACH]	17	ACH
Resultados Método NORMA - Macro Ing. Alejandro Macías		
Flujo de aire requerido para retirar la carga térmica del volumen de control:	4.574,663	m ³ /h
Flujo de aire disponible a la temperatura exterior	3.288,39	m ³ /h
Cambios de aire por hora disponibles a la temperatura exterior [ACHa]	79	ACH
Flujo de aire adicional requerido en forma mecánica	1.286 ,26	m ³ /h

Fuente: Elaboración propia

7.2. CAPITULO II

Confort térmico en el volumen de control MODIFICADO

Este capítulo está dirigido al mejoramiento de las condiciones de confort del volumen de control, obtenidas como línea base.

El objetivo será el diseño, la implementación de estrategias, la medición, el análisis y la comparación de resultados, entre la línea base y los datos obtenidos para el volumen de control MODIFICADO.

7.2.1. Diseño de estrategias y operaciones volumétricas para modificar el estado inicial

a. Diseño de estrategias para mejorar las condiciones térmicas iniciales

Consecuentemente con la producción de resultados de la línea base en el capítulo I, se desarrollarán dos variables generales de trabajo que se evaluarán de manera independiente, pero estarán relacionadas de manera coherente para lograr finalmente efectos integrados frente al mejoramiento de las condiciones de confort.

Como consideración primaria se define que las estrategias a implementar serán de naturaleza pasiva.

Las variables a analizar serán:

- El análisis de la carga térmica interior
- El comportamiento del flujo natural de aire debido a la ventilación cruzada

Los objetivos a lograr serán:

- Reducir la carga térmica interior
- Evacuar carga térmica interior remanente aumentando el flujo de aire sin apoyo mecánico.

Las estrategias se someterán al cálculo de carga térmica correspondiente para validar el resultado efectivo de su implementación. Si cumple al estar dentro de los límites aceptables, habrá logrado la hipótesis de la línea de análisis No. 1 de esta tesis.

Caracterización de estrategias para mejorar el confort térmico interno

Para encontrar las estrategias adecuadas, se elaborará una tabla en la que se identifican los efectos adversos encontrados en el capítulo I y se definirá una estrategia para controlarlo y mejorar su consecuencia.

En el estado original, el volumen de control que se ha definido en este trabajo, se encuentra localizado en el segundo piso de la vivienda y se configura verticalmente desde la cubierta expuesta al asoleamiento hasta el piso en la superficie de la losa.

Es decir, que el volumen de control [Habitación No.1], lo conforman en la parte superior una cubierta cuya composición está definida por un tendido de tejas de asbesto – cemento, sostenidas por una estructura de madera y cerchas metálicas en varillas de acero y finalmente cerrado hacia el interior de la habitación un

tendido de machimbre de madera de pino inmunizado, y en la parte inferior o interna, un volumen de paredes pintadas con vinilo color blanco un piso en baldosa de cemento color negro, una puerta en madera y ventanas convencionales con celosías de vidrio convencionales.

Gráfico No. 34:

Corte longitudinal de la vivienda localizando el volumen de control



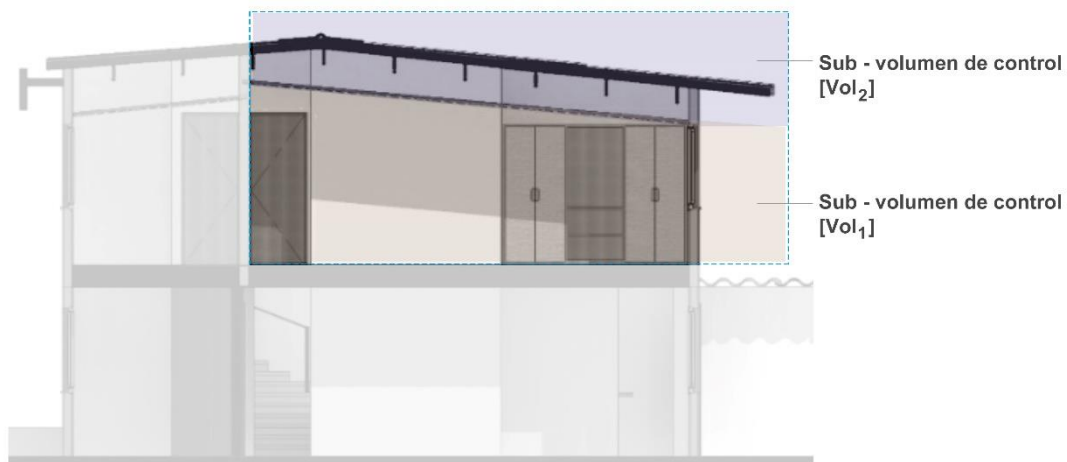
Fuente: Elaboración propia

La primer estrategia de configuración espacial será dividir el **volumen de control** en **dos sub - volúmenes de control** que puedan trabajar de manera articulada pero con efectos independientes. El objetivo principal es permitir el manejo individualizado de la ventilación natural. Se configura de la siguiente forma:

- Se llamará Sub - volumen de control No.1 [VOL No.1], al sub – volumen que se localiza en la habitación propia ente, ubicado entre el cielo falso, las paredes, puerta, ventana y el piso de la losa.
- Se llamará Sub - volumen de control No.2 [VOL No.2], al sub – volumen que se localiza en la cubierta, es decir, el que se encuentra conformado por la cubierta expuesta al sol, su estructura de soporte y el cielo falso.

Gráfico No. 35:

Localización sub – volúmenes de control No.1 y No.2



Fuente: Elaboración propia

En consecuencia se plantean las siguientes estrategias para lograr los objetivos:

Las operaciones volumétricas en la configuración física de la edificación como adiciones, sustracciones, o adecuaciones en las superficies, buscarán el mejoramiento de las condiciones de confort interno a través de obtener una disminución en la carga térmica del volumen de control.

Tabla No. 41:

Estrategias para mejorar las condiciones térmicas iniciales

	EFFECTO ADVERSO A CONTROLAR	OBJETIVO ESTRATEGICO	LUGAR DE IMPLEMENTACION	ACCIÓN	ACTIVIDAD
No.1	El color de la superficie del material de la cubierta absorbe nivel alto de radiación solar	Disminuir la absorptividad	[Vol ₂] Cubierta	Tratamiento de superficie.	Pintura blanca sobre teja de fibrocemento
No.2	Los elementos que conforman cubierta hasta el cielo no generar suficiente resistencia térmica	Aumentar resistencia	[Vol ₂] Cielo segundo piso	Adición de elemento.	Instalación de lámina en lana mineral [Fiberglass]
No.3	Los elementos que conforman cubierta hasta el cielo no generar suficiente resistencia térmica	Aumentar resistencia	[Vol ₂] Cielo segundo piso	Reemplazo de elemento.	Instalación de lámina drywall - reemplaza machimbre de pino
No.4	El aire que se almacena en la cubierta permanece estanco	Evacuar aire caliente retenido	[Vol ₂] Cumbre de la cubierta	Elevar la temperatura del aire en la salida para acelerar el movimiento ascendente del aire caliente.	Instalación de lámina de vidrio crudo de 4 mm y pintarla de negro.
No.5	La cubierta retiene el aire caliente	Generar área de salida	[Vol ₂] Cumbre de la cubierta	Apertura en la parte superior del techo.	Eliminación elemento cumbre y retroceso de tejas superiores
No.6	Las aperturas para entrada del aire son pequeñas	Generar área de entrada	[Vol ₁] Muro alzada Nor-Este	Apertura en la parte superior del Muro	Demolición muro y Adecuación apertura con malla Adecuación vano [Acabado con estuco mortero y estuco listo]
No.7	Las aperturas para salida del aire son pequeñas	Aumentar área de salida	[Vol ₁] Habitaciones segundo piso	Apertura en la parte superior de las puertas	Demolición muro superior puertas Adecuación vano a H = 2.4m [estuco mortero y estuco listo]

Fuente: Elaboración propia

Las estrategias que se aplicará al Vol2 tienen efecto tanto en la reducción de la carga térmica como en la evacuación del aire caliente retenido en la cubierta.

Las estrategias en el Vol1 se dirigen fundamentalmente a la evacuación del aire caliente.

Algunas de las estrategias serán aplicadas de forma real a la vivienda y serán objeto de medición posterior para verificar los resultados y validar los efectos positivos proyectados frente al confort térmico interior.

Estrategias implementadas: No.1, No.2, No.3, No.7.

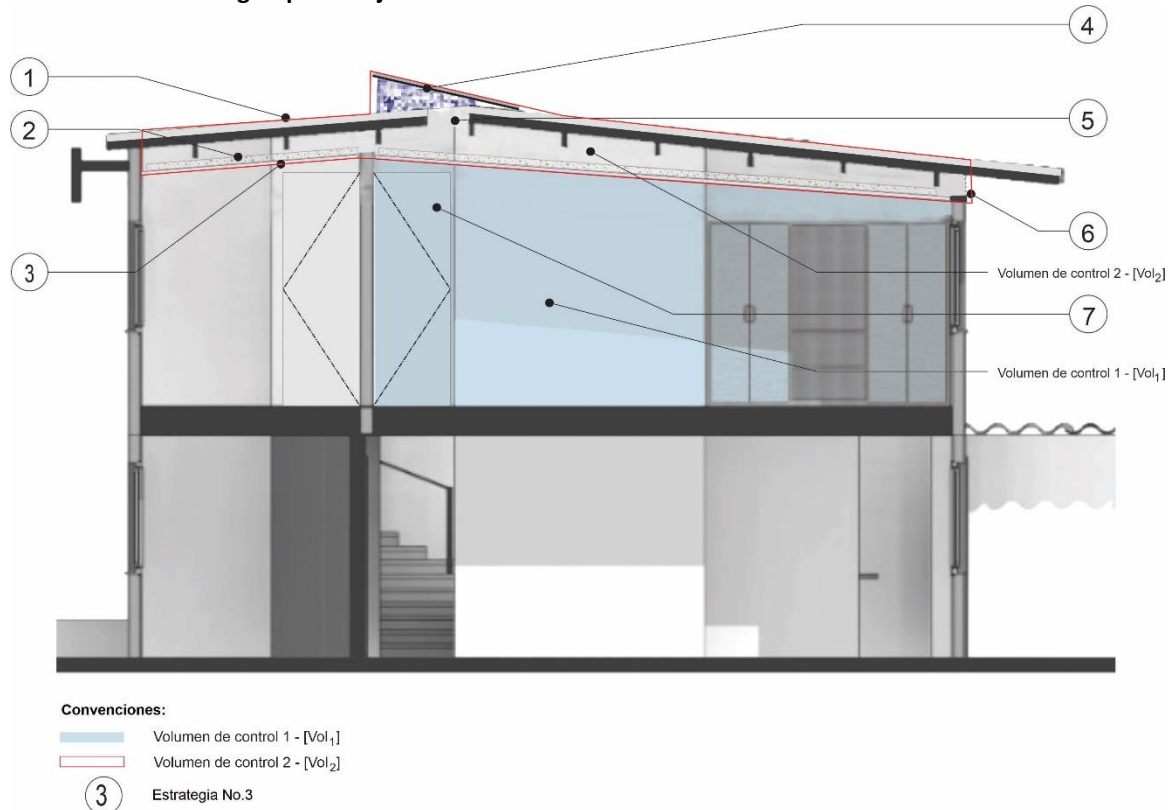
Estrategias no implementadas [estas serán sujeto de simulación]: No. 4, No.5, No.6.

Las simulaciones se utilizan dado que hay limitaciones en el presupuesto de obra para llevar a cabo las intervenciones físicas propuestas. Las simulaciones están asociadas a las estrategias para evacuar la carga térmica aumentando el flujo de aire.

b. Operaciones arquitectónicas para el confort térmico del volumen de control

Gráfico No. 36:

Localización de estrategias para mejorar las condiciones térmicas iniciales



Fuente: Elaboración propia

Operaciones

- Con la aplicación de la pintura blanca, se espera que disminuya la absortividad de la superficie de la cubierta.
- El aumento de la resistencia térmica con la instalación de lámina de fibra y el drywall aportarán a disminuir la carga de calor interna en la habitación No.1.
- Romper la cubierta para permitir el desfogue de aire caliente que se encontraba almacenado en el estado inicial y
- abrir el muro de fachada para liberar la ventilación cruzada, aportará a evacuar por conexión el aire caliente que alcance a almacenarse en la cubierta.
- Instalar la superficie de vidrio sobre la apertura en la parte superior de la cubierta, acelerará el aire caliente para contribuir a una evacuación más rápida.
- La apertura hacia sotavento, generará un efecto de vena contracta que facilitará la salida del aire al exterior.
- La ampliación de los vanos de las puertas de la habitación aumentará la cantidad de aire en la salida facilitando la evacuación de aire caliente al interior de la habitación.

Gráfico No. 37:

Modelo con intervención en el volumen

Estrategia: Evacuar aire caliente retenido
Acción: Adición de elemento.
Actividad: Instalación de laminas de vidrio crudo de 6 mm. Pintada de negro mate.
 Elevar la temperatura del aire en la salida para acelerar el ascenso del aire caliente del interior

Estrategia: Disminuir la absorbtividad
Acción: Tratamiento de superficie
Actividad: Pintura blanca sobre teja de fibrocemento

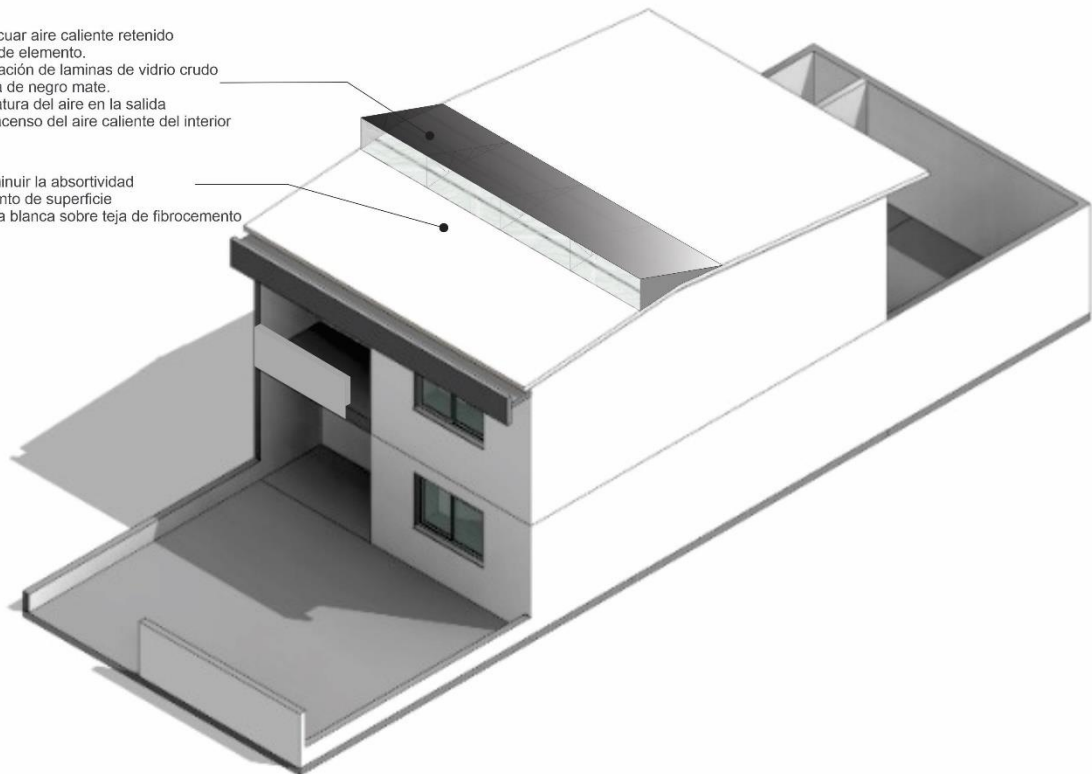
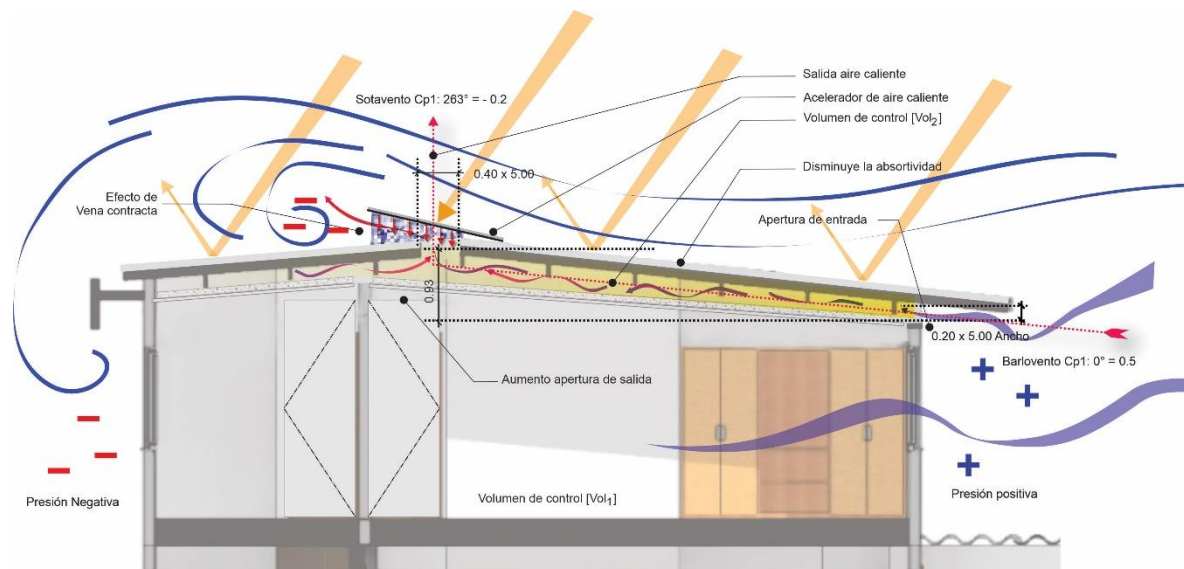


Gráfico No.38:

Corte longitudinal: Con operaciones arquitectónicas

Efectos de las estrategias frente al asoleamiento y a la ventilación natural en el volumen modificado



Fuente: Elaboración propia

FASE 3:

7.2.2. Implementación de estrategias pasivas con operaciones arquitectónicas

Intervención física del volumen de control

a. Adecuación física: Ejecución obra civil para adecuar el volumen de control

Imagen No. 11:

Estado inicial: Arriba (Cubierta), abajo (Volumen cielo en machimbre), altura de salida H: 2m



Fuente: Elaboración propia

Consideraciones

- En esta Fase de la tesis, se implementan en la vivienda las estrategias formuladas en la Tabla No. 41.
- Debido a la falta de presupuesto para la intervención en la cubierta solamente se imprimó la superficie con pintura blanca mezclada con acronal para mejorar la adherencia sobre la teja de fibro – cemento.

Imagen No. 12:

Estado final [Volumen Modificado]

Intervención interior

- Izquierda: Volumen de control intervenido [Vol₁]

 Cambio cielo + Cambio piso + Estuco paredes

 Derecha: Ampliación altura de salida [Cp₂]



Intervención exterior

- Izquierda: Cubierta del Sub - volumen de control intervenido [Vol₂]

 Disminución de la absorptividad: Pintura blanca en superficie de cubierta

 Al fondo las cubiertas oscuras de las viviendas adyacentes.

 Derecha: Especificaciones micro – estación meteorológica.



Fuente: Elaboración propia

7.2.3. Estado de confort en el volumen de control – ESCENARIO MODIFICADO

a. Modelado térmico de los elementos - Volumen modificado

Para obtener la temperatura interna de las superficies del volumen de control se debe realizar el modelado de los elementos que fueron modificados y calcular su carga térmica nuevamente.

Con los resultados de este procedimiento, se calcula el estado de confort y se resuelve el objetivo de la Línea de análisis no.1.

El procesamiento de los datos se puede revisar en ANEXOS III [Tablas de la No.42 – 45, Gráficos del No. 39 – 42, Imágenes de la No. 13 - 16].

Tabla No. 46

Resultados del modelado térmico de los elementos – Estado Modificado

PASOS	ECUACIONES	CUBIERTA NNE	CUBIERTA SSW	PARED NNE	PARED SSW	Habitación No.1	Habitación No.2	Habitación No.3	Und
1	[Ecuación No.8] <i>Cálculo de resistencia térmica:</i> $R_i = \frac{L_i}{k_i}$								
2	[Ecuación No.9] $R_{total-xxx} = \sum_i R_i$ <i>Valor total [Σ] de las resistencias térmicas:</i>	1,780	0,970	0,440	0,364				m ² °C /W
3	[Ecuación No.10] <i>Coeficiente de la transferencia de calor:</i>	0,563	1,026	2,280	2,747				W/m ² k
<i>Cálculo de pérdida de calor</i>									
4	[Ecuación No.11] T_{sky}	21,84	21,84	30	30				°C
5	[Ecuación No.12]: $T_{sol-atr}$ <i>Temperatura del aire externa</i>	66,10	65,30	33,05	50,56				°C
6	[Ecuación No.13]: Q_{roof} <i>Calor total</i>	1.141,18	419,6	96,05	552,38				W
7	[Ecuación No.14]: $\dot{q}_{roof}$ <i>Calor parcial</i>	22	22	14	54				W/m ²
8	[Ecuación No.15]: T_{r-roof} <i>Temperatura de la superficie interna</i>	29,64	29,59	28,66	33,45				°C
9	[Ecuación No.16] $Fraccion_{solar}$	2,25	2,25	43,04	12,77				%
<i>Modelado ventanas</i>									
10	[Ecuación No.17] $\dot{Q}_{solar-gain}$					52,0	52,0	681,4	W
11	[Ecuación No.18] $T_{r-window-room}$					34,5	34,5	68,9	°C
<i>Modelado personas y equipos</i>									
12	[Ecuación No.19] A_b					1,9	1,9	1,9	M2
13	[Ecuación No.20] $\dot{Q}_{people-space}$					152,4	152,4	152,4	W
<i>Resultado final</i>									
14	[Ecuación No.21] $\dot{Q}_{total}$					1.443,4		1.804,6	W

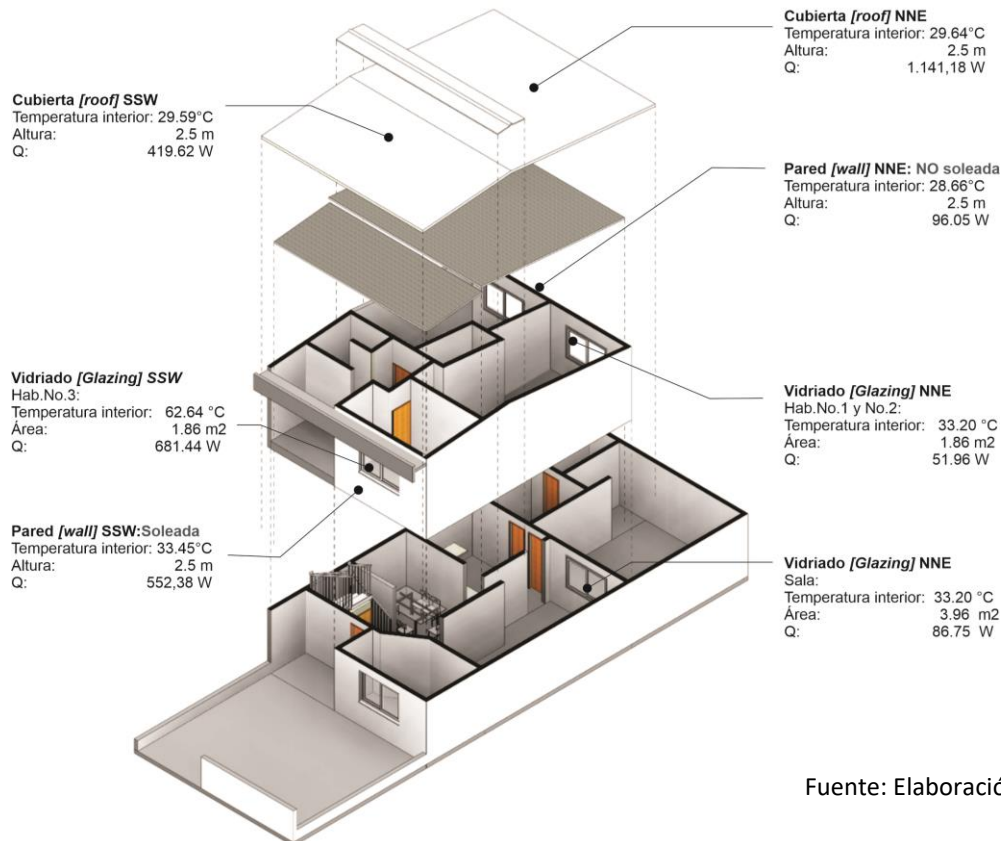
Fuente: Elaborada por el autor

b. Cálculo de la temperatura media radiante [TMR] - Volumen modificado

En el siguiente gráfico se consolidan las temperaturas de las superficies interiores de los elementos, la altura de los espacios y la carga térmica (calor) $[Q]$, calculadas a través de la metodología Standard 55 de ASHRAE.

Gráfico No. 43:

Temperaturas de las superficies internas de los elementos, la altura de los espacios y la carga térmica $[Q]$



Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas de las superficies internas de los muros medianeras y del piso se tomaron in situ, después de la intervención.

Tabla No. 47

Datos para el cálculo de la TMR – estado modificado

Room	Ancho	Profundidad	Altura	Altitud	Azimuth	Fraccion del cuerpo expuesta al sol	Direct Beam [W/m ²]	absortividad
Habitación No.1	6,2	2,6	2,5	74	259	50	981,29	0,4

Superficie	Temperatura de la superficie	Und
Cubierta [Ceiling]	29,64	°C
Pared Norte	28,66	°C
Pared Este	27	°C
Pared Sur	27	°C
Pared Oeste	27	°C
Piso [Losa Entrepiso]	26	°C
Posición ocupante	Acostado	

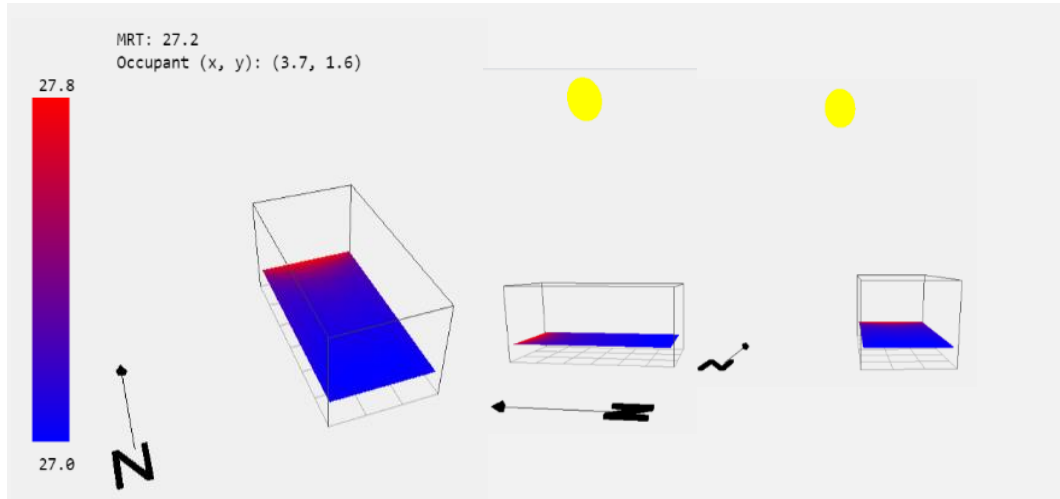
Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la **temperatura media radiante** - TMR [*Mean Radian Temperature*], será utilizada la aplicación:

- CBE 3D Mean Radiant Temperature Tool, tomado del software Online del “*Center for the Built Environment (CBE), University of California Berkeley*”: **CBE – Thermal Comfort Tools**.

Gráfico No. 44:

Resultado TMR - Volumen Modificado, por CBE - Thermal Comfort Tools



Tomado de CBE – Thermal Comfort Tools.

Elaboración propia

La **TMR** para el volumen modificado es de **27.8 °C**

c. Estimación del estado de confort del volumen de control MODIFICADO

Con el valor calculado como TMR, se procederá a calcular el confort del volumen de control Modificado, utilizando el software libre CBE - Thermal Comfort Tools, como lo muestra el gráfico No. 44.

De acuerdo a los resultados del método del “Voto medio estimado”:

- Para alimentar la carta psicométrica, la temperatura del aire es obtenida de forma empírica al interior del volumen de control, con instrumentos propios.
- La temperatura del aire **indoor**, después de la intervención en la vivienda es de 29 °C promedio.
- El PMV obtenido con el volumen modificado es de 0.55, mientras que el porcentaje de personas insatisfechas [PPD] alcanza el 11%
- La sensación térmica lograda sigue siendo “**ligeramente caliente**” [*Slightly Warm*].
- Las condiciones modificadas del volumen de control – Volumen Modificado – se aproximan a la zona de confort, pero **no cumplen** con el Standard ASHRAE 55 – 2000.

- La carta psicrométrica muestra un Voto medio estimado [PMV] pasó de 1.59 a 0.55 y de un Porcentaje de personas insatisfechas [PPD] del 56% al 11%.
- Aunque es aceptable un PPD del 10% y se alcanza solo el 11%, se espera evacuar el calor de la diferencia con una estrategia de ventilación natural – efecto chimenea.

Gráfico No. 45:

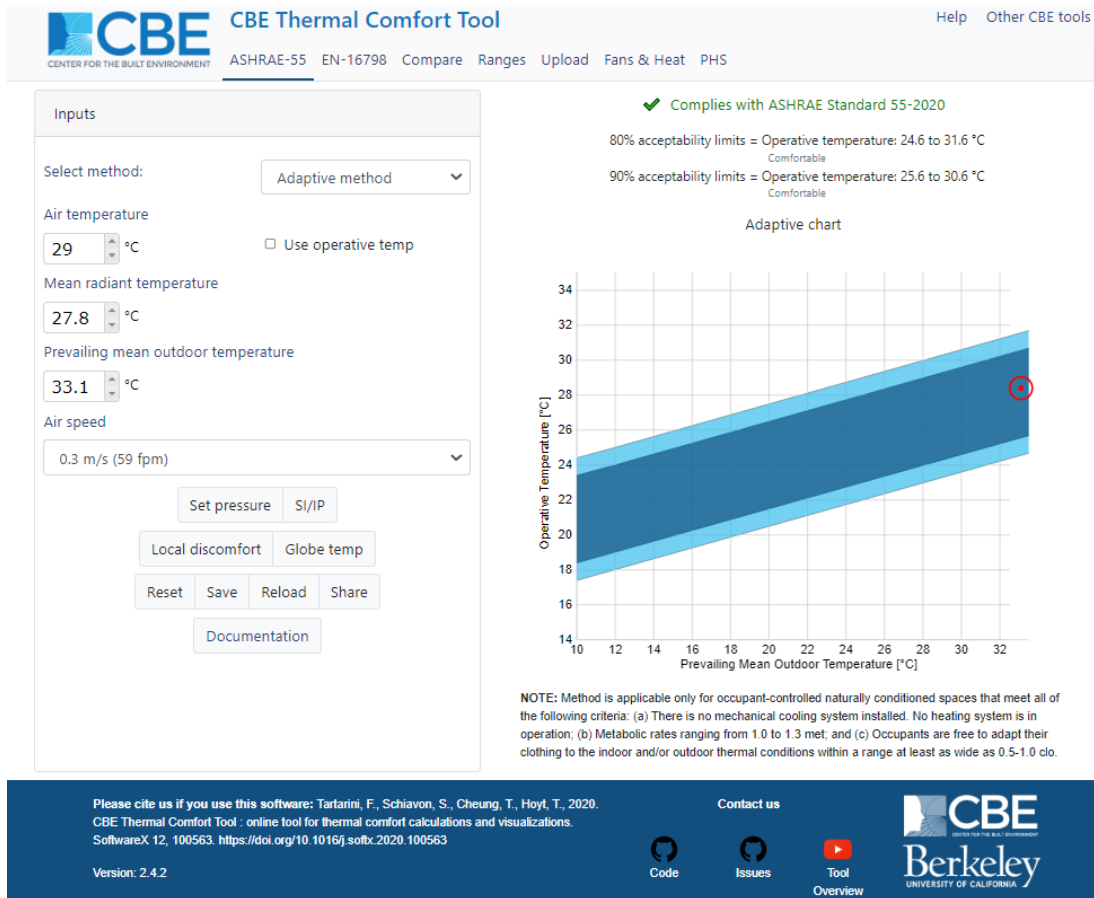
Confort térmico Volumen Modificado - Carta psicrométrica método PMV – ASHRAE 55



Tomado de CBE – Termal Comfort Tools
 Elaboración propia.

Gráfico No.46:

Confort térmico Volumen Modificado - Carta psicométrica método ADAPTATIVO – ASHRAE 55



Tomado de CBE – Thermal Comfort Tools.
Elaboración propia.

Este trabajo no establece el método adaptativo como su indicador de confort. El gráfico solamente se muestra como referencia para comparar su comportamiento frente al método PMV.

Para el método Adaptativo, de acuerdo a los resultados:

- Las condiciones modificadas del volumen de control – Volumen Modificado - **cumplen** con el Standard ASHRAE 55 – 2000.
- Permanece dentro de los límites del 90% de aceptabilidad.
- La sensación térmica es confortable.

7.2.4. Flujo de aire en el volumen de control - VOLUMEN MODIFICADO

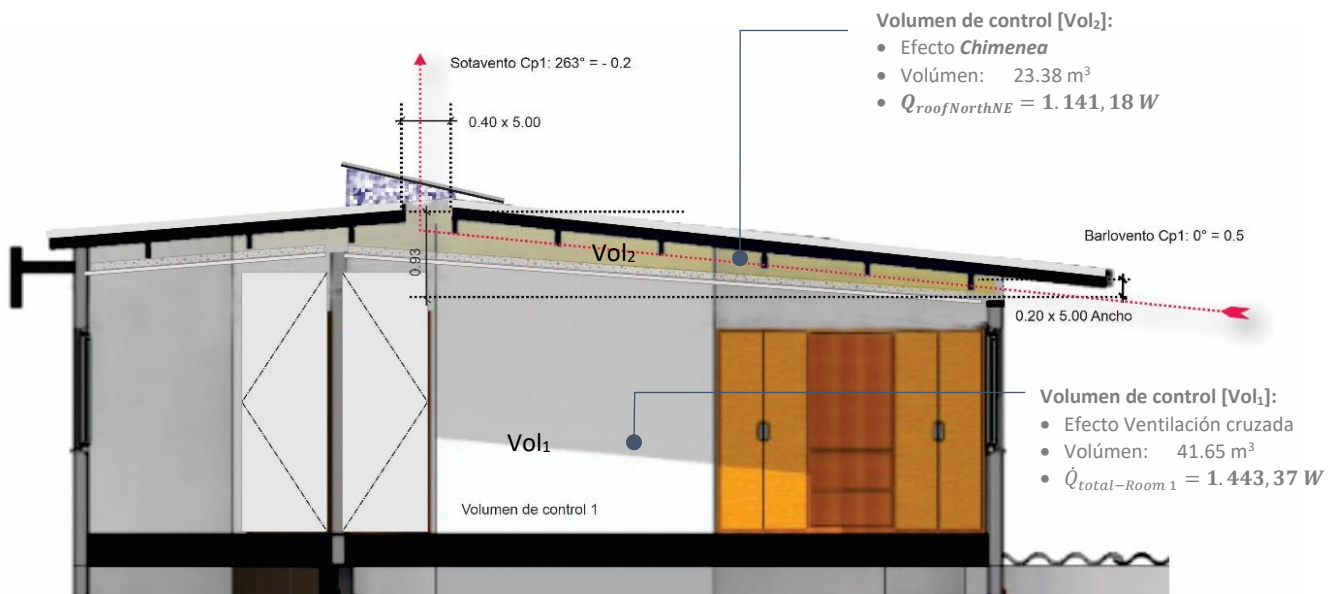
a. Flujo de aire disponible en el volumen estado modificado

El cálculo del flujo de aire disponible para el escenario No.2, se ha realizado tomando las siguientes consideraciones:

- Se evaluarán dos volúmenes de control VOL₁ y VOL₂
- Siguiendo los métodos encontrados en *"Passive cooling for buildings"* (Asimakopoulou & Santamouris, 2013), se simulará la implementación de estrategias de ventilación natural en dos [2] sub - volúmenes de control. Como lo muestra el Gráfico No. 47.

Gráfico No. 47:

Localización de las estrategias aplicadas a los Sub - volúmenes de control No. 1 [Vol₁] y No.2 [Vol₂]



Fuente: Elaboración propia

- Los efectos que se calcularán por separado, pues los efectos son de naturaleza distinta. Los efectos son:
 1. Sub - Volumen de control No. 1: Ventilación cruzada
 2. Sub - Volumen de control No. 2: Efecto chimenea

Sub - Volumen de control [Vol₁]: Ventilación cruzada

Las transformaciones físicas de la vivienda que influyen en el mejoramiento de las dinámicas del flujo de viento son:

- Ampliación del área de salida: pasó de 2.00m x 0.80m a 2.40m x 0.80m
- En la versión modificada, el área de la entrada es < que el área de salida

Tabla No.48:

MÉTODO NORMA - Cross ventilation

Flujo del aire debido al viento	Cálculo con Método NORMA		
Ecuación	Area apertura a barlovento	A1	1.86 m2
	Area apertura a sotavento	A2	1.92 m2
	Suma de areas de aperturas	A _t	3.78 m2
	Velocidad del viento	V	0.20 m/s
	CP Barlovento	Cp1	0.50
	CP sotavento	Cp2	(0.29)
	Diferencia coeficiente presión	ΔCp	0.79
	B	B	0.37
		Qw	770 m3/h

$$Q_w = 1620 B^{-1.02} V \sqrt{\Delta C_p}$$

$$Q_w = 1512 B^{-1.07} V \sqrt{\Delta C_p}$$

$$B = 1 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$$

- De acuerdo al método NORMA, la cantidad de aire disponible en el volumen de control No.1 Modificado es de 770 m3/h
- En rojo se enmarca la ecuación seleccionada dado que el caso de estudio tiene una apertura interna y una externa

Se realizará la comprobación mediante el método de 35 pasos, como sigue en la Tabla No.44: **Método Norma [de los 35 pasos] para el Sub – volumen de control No.1 [Vol₁]: Ventilación cruzada**

De acuerdo a los resultados de la Tabla No.49:

- Se confirma que el flujo de aire total disponible en el volumen de control, a una velocidad de V: 2 m/s, es de 770 M³/h.
- El efecto chimenea del Vol.2 se calcula en otra tabla No. 50.**
- De acuerdo a “The Engineering Toolbox”, los ACH necesarios para mantener la calidad del aire para una habitación se encuentran entre 10 y 18.
- Los recambios de aire por hora calculados por el Método NORMA obtenidos fueron **ACH = 19**

Para calcular el efecto de la ventilación en el Sub – volumen de control No. 2, se construye la Tabla No. 45: **Método Norma [de los 35 pasos] para el Sub – volumen de control No.2 [Vol₂]: Efecto chimenea**

- El flujo de aire disponible en el volumen de control [Vol₂], debido al efecto chimenea una velocidad de V: 0.2 m/s, es de **1.593 M³/h**.
- De acuerdo a “The Engineering Toolbox”, los ACH necesarios para mantener la calidad del aire para una habitación se encuentran entre 10 y 18.
- Los recambios calculados por el Método NORMA obtenidos fueron **ACH = 76**

Tabla No.49:

Método Norma [35 pasos] para el Sub – volumen de control No.1 [Vol₁]: Ventilación cruzada

MÉTODO NORMA - 35 Pasos, AppendixB3:G30					
No. Paso	Descripción del Paso	Modelo del cálculo	Abrev.	Valor	Unidad
1	Mes de diseño			March	
2	Velocidad del aire y dirección	WS = Wind speed WD = Wind Direction	WS WD	0.2 NNE	m/h
3	Temperatura ambiente mensual media	DTA	DTA	33.1	°C
4	Temperatura del aire interna - de Diseño	TA	TA	27	°C
5	Determinar la diferencia de temperatura media	DT = TA - DTA, si TA es < DT, entonces DT = DTA - TA. [(Step 4 - Step 3), si DT < 0, entonces DT = Step 3 - Step 4]	DT	6.1	°C
6	Determinar la temperatura media	MT = (DTA + TA)/2. [(Step 4) - (Step 3)/2]	MT	30.05	°C
7	Determinar la relación de Temperatura	RT = DT/MT. [(Step 5) / (Step 6)]	RT	0.20	°C
8	Determinar SRT: Raíz cuadrada de RT	SRT = (RT) ^{0.5} [(Step 7) ^{0.5}	SRT	0.45	
9	Angulo incidencia f sobre el muro barlovento	f	f	0.000	°
10	Coefficiente de presion del viento Cp1 sobre la fachada a barlovento	Cp1	Cp1	0.50	
11	Coefficiente de presion del viento Cp2 sobre la fachada a sotavento	Cp2	Cp2	-0.29	
12	Determinar el coeficiente de la diferencia de presion del viento	DCP = Cp1 - Cp2	DCP	0.790	
13	Determinar SDCP: la raíz cuadrada de DCP	SDCP = DCP ^{0.5} [(Step 12)] ^{0.5}	SDCP	0.889	
14	Volumen del espacio ventilado	V	V	41.60	m ³
15	Area de la apertura a barlovento	A ₁	A ₁	1.86	m ²
16	Area de la apertura a sotavento	A ₂	A ₂	1.92	m ²
17	Distancia vertical entre las aperturas sotavento y barlovento	H	H	0.00	
18	Area total de las aperturas	AC = A ₁ + A ₂ [(Step 15) + (Step 16)]	AC	3.78	m ²
19	Determinar A ₁	(A ₁) ² [(Step 15)] ²	A ₁ ²	3.46	m ²
20	Determinar A ₂	(A ₂) ² [(Step 15)] ²	A ₂ ²	3.69	m ²
21	Determinar A = sumatoria de A	A = A ₁ ² + A ₂ ² [(Step 19) + (Step 20)]	A	7.15	m ²
22	Determinar B = Raíz cuadrada de A	B = (A) ^{0.5} [(Step 20)0.5]	B	2.67	m ²
23	Determinar C	C = 1/ B [1/(Step 22)]	C	0.37	m ²
24	Determinar la relación D	D = A ₁ / A ₂	D	0.96875	
25	Determinar h	h = H ^{0.5} [(Step 17)] ^{0.5}	h	0.00	
26	Desde el valor D determinar el coeficiente K ₁ y K ₂	Para 0 < D ≤ 1 K ₁ = 0.45, K ₂ = -1.02. Para 1 < D ≤ 2 K ₁ = 0.42, K ₂ = -1.07	K ₁ K ₂	0.42 -1.07	
27	Determinar E	E = C ^{K₂} [(Step 23) (Step 26(b))]	E	2.86	
28	Determinar el flujo de aire debido al viento Q _w	Q _w = K ₁ *E*SDCP*WS*3600 [(Step 26(a))*(Step 27)*(Step 13)*(Step 2)*3600	Q _w	769.70	m ³ /h
29	Determinar K : factor de corrección	De la figura 9.9 determinar K	K	0.61	
30	Determinar el flujo de aire debido al efecto chimenea Q _s	Q _s = 1590*K*AC*SRT*h [1590*(Step 29)*(Step 18)*(Step 8)*(Step 25)]	Q _s	0	m ³ /h
31	Determinar Q _{w1}	Q _{w1} = Q _w ² [(Step 28)] ²	Q _{w1}	592,431	
32	Determinar Q _{s1}	Q _{s1} = Q _s ² [(Step 30)] ²	Q _{s1}	-	
33	Determinar Q _{t1}	Q _{t1} = Q _{s1} + Q _{w1} [(Step 32)+(Step 31)]	Q _{t1}	592,431	
34	Determine flujo de aire total QT [Flujo Disponible]	QT = Q _{t1} ^{0.5} [(Step 33)] ^{0.5}	QT	770	m ³ /h
35	Determine Cambio de aire por hora	ACH = QT / V [(Step 34)/(Step 14)]	ACH	19	

Tomado de “Passive cooling for buildings” (Asimakopoulous & Santamouris, 2013)

Fuente: Digitalización y cálculo elaborado por el autor

Tabla No.50:

Método Norma [35 pasos] para el Sub – Volumen de control No.2 [Vol₂]: Efecto chimenea

MÉTODO NORMA - 35 Pasos, AppendixB3:G30					
No. Paso	Descripción del Paso	Modelo del cálculo	Abrev.	Valor	Unidad
1	Mes de diseño			March	
2	Velocidad del aire y dirección	WS = Wind speed WD = Wind Direction	WS WD	0.2 NNE	m/h
3	Temperatura ambiente mensual media	DTA	DTA	33.1	°C
4	Temperatura del aire interna - de Diseño	TA	TA	27	°C
5	Determinar la diferencia de temperatura media	DT = TA - DTA, si TA es < DT, entonces DT = DTA - TA. [(Step 4 - Step 3, si DT < 0, entonces DT = Step 3 - Step 4)]	DT	6.1	°C
6	Determinar la temperatura media	MT = (DTA + TA)/2. [(Step 4) - (Step 3)/2]	MT	30.05	°C
7	Determinar la relación de Temperatura	RT = DT/MT. [(Step 5) / (Step 6)]	RT	0.20	°C
8	Determinar SRT: Raíz cuadrada de RT	SRT = (RT) ^{0.5} [(Step 7) ^{0.5}]	SRT	0.45	
9	Angulo incidencia f sobre el muro barlovento	f	f	0.000	°
10	Coefficiente de presion del viento Cp1 sobre la fachada a barlovento	Cp1	Cp1	0.50	
11	Coefficiente de presion del viento Cp2 sobre la fachada a sotavento	Cp2	Cp2	-0.29	
12	Determinar el coefieicnte de la diferencia de presion del viento	DCP = Cp1 - Cp2	DCp	0.790	
13	Determinar SDCP: la raíz cuadrada de DCP	SDCP = DCP ^{0.5} [(Step 12)] ^{0.5}	SDCP	0.889	
14	Volumen del espacio ventilado	V	V	23.38	m ³
15	Area de la apertura a barlovento	A ₁	A ₁	1.86	m ²
16	Area de la apertura a sotavento	A ₂	A ₂	1.92	m ²
17	Distancia vertical entre las aperturas sotavento y barlovento		H	0.93	
18	Area total de las aperturas	AC = A ₁ + A ₂ [(Step 15) + (Step 16)]	AC	3.78	m ²
19	Determinar A ₁	(A ₁) ² [(Step 15)] ²	A ₁ ²	3.46	m ²
20	Determinar A ₂	(A ₂) ² [(Step 15)] ²	A ₂ ²	3.69	m ²
21	Determinar A = sumatoria de A	A = A ₁ ² +A ₂ ² [(Step 19) + (Step 20)]	A	7.15	m ²
22	Determinar B = Raíz cuadrada de A	B = (A) ^{0.5} [(Step 20)0.5]	B	2.67	m ²
23	Determinar C	C = 1/ B [1/(Step 22)]	C	0.37	m ²
24	Determinar la relación D	D = A ₁ / A ₂	D	0.96875	
25	Determinar h	h = H ^{0.5} [(Step 17) ^{0.5}]	h	0.96	
26	Desde el valor D determinar el coeficiente K ₁ y K ₂	Para 0 < D ≤ 1 K ₁ = 0.45, K ₂ = -1.02. Para 1 < D ≤ 2 K ₁ = 0.42, K ₂ = -1.07	K ₁ K ₂	0.42 -1.07	
27	Determinar E	E = C ^{K₂} [(Step 23) ^{(step26(b))}]	E	2.86	
28	Determinar el flujo de aire debido al viento Q _w	Q _w = K ₁ *E*SDCP*WS*3600 [(Step 26(a))*(Step 27)*(Step 13)*(Step 2)*3600]	Q _w	769.70	m ³ /h
29	Determinar K : factor de corrección	De la figura 9.9 determinar K	K	0.61	
30	Determinar el flujo de aire debido al efecto chimenea Q _s	Q _s = 1590*K*AC*SRT*h [1590*(Step 29)*(Step 18)*(Step 8)*(Step 25)]	Q _s	1593	m ³ /h
31	Determinar Q _{w1}	Q _{w1} = Q _w ² [(Step 28)] ²	Q _{w1}	592,431	
32	Determinar Q _{s1}	Q _{s1} = Q _s ² [(Step 30)] ²	Q _{s1}	2,537,499	
33	Determinar Q _{t1}	Q _{t1} = Q _{s1} + Q _{w1} [(Step 32)+(Step 31)]	Q _{t1}	3,129,930	
34	Determine flujo de aire total QT [Flujo Disponible]	QT = Q _{t1} ^{0.5} [(Step 33)] ^{0.5}	QT	1769	m ³ /h
35	Determine Cambio de aire por hora	ACH = QT / V [(Step 34)/(Step 14)]	ACH	76	

Tomado de “Passive cooling for buildings” (Asimakopoulous & Santamouris, 2013)

Fuente: Digitalización y cálculo elaborado por el autor

Se realizará la comprobación de los resultados anteriores con la implementación de la siguiente ecuación:

$$[Ecuación No.21] \quad Q_s = 1590 K (A_1 + A_2) \sqrt{DT/MT} \sqrt{H}$$

Imagen No. 17:

“K” Factor de corrección Efecto Chimenea por lado único

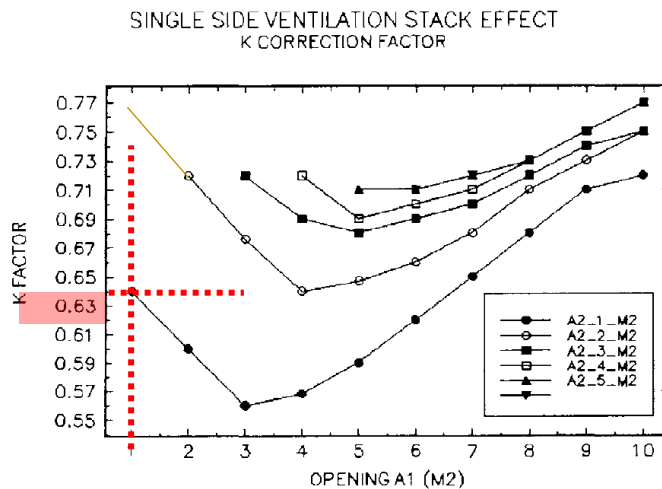


Figure 9.19 Ventilation due to temperature difference with openings at different heights: The correction factor K as a function of A_1 and A_2

- Para calcular el flujo de aire debido al efecto chimenea, es necesario calcular el “factor de corrección K”, como aparece en la tabla adjunta encontrada en “Passive cooling for buildings” (Asimakopoulou & Santamouris, 2013).

- El factor encontrado, de acuerdo al área de las aperturas es **K=0.63**.

$$[Ecuación No.21] \quad Q_s = 1590 K (A_1 + A_2) \sqrt{DT/MT} \sqrt{H}$$

$$Q_s = 1590 * 0.63 (1.86 + 1.92) \sqrt{6.01/30.05} \sqrt{0.93}$$

$$Q_s = 1.593,95 \text{ m}^3/\text{h}$$

- El flujo de aire disponible en el Volumen de control [Vol₂], debido al efecto chimenea es de **1.592,95 M³/h**
- El modelo se encuentra comprobado y cumple.

- b. Estimación del flujo de aire para obtener confort y calidad del aire interior Vol₁ y Vol₂
 [Calcular los recambios de aire por hora [ACH] requeridos]

Volumen de control [Vol₁]: Ventilación cruzada

Para conocer si el flujo de aire disponible puede evacuar la carga térmica resultante después de la adecuación propuesta, se utiliza el Macro desarrollado por el Ing. Macías (Macías, 2012), que incluye este cálculo, en la situación: *Para área de salida > área de entrada*

Gráfico No. 48:

Cálculo de la ventilación natural para el Vol₁ Método NORMA. Debido solo al viento – Volumen Modificado

CALCULO DE EVENTILACION NATURAL
 X

Método NORMA Entrada/Salida en un Solo Lado por Diferencias de Temperatura Método NORMA Ventilación Cruzada

Debido solo al viento con área de salida > área de entrada Debido solo al viento con área de entrada > área de salida Solo efecto chimenea Efectos de viento y chimenea combinados

¡CUIDADO! Verifique cual es el separador decimal en su máquina, este puede ser la coma o el punto.

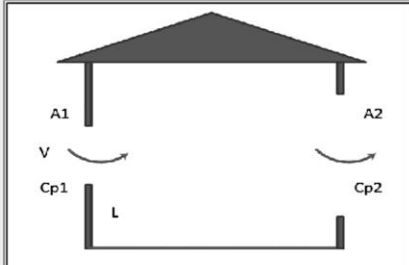
Carga térmica en el volumen de control (kW)	1.443
Altura sobre el nivel del mar (m)	923
Volumen del espacio (m ³)	41.65
Alto de la entrada (m)	1.2
Ancho de la entrada (m)	1.55
Cantidad de entradas al espacio	1
Alto de la salida (m)	2.4
Ancho de la salida (m)	0.8
Cantidad de salidas del espacio	1
Temperatura exterior (°C)	33.1

Configuración del viento
 Velocidad del viento predominante reportada por la estación meteorológica local (m/s) 0.2
 Seleccione el tipo de terreno de ubicación de la edificación.

Altura de la entrada referente al piso L (m) 0.9

Coeficiente de presión Cp1 Sotavento 0,5 Mostrar valores Cp1

Coeficiente de presión Cp2 Barlovento -0,29 Mostrar valores Cp2



Flujo de aire requerido para retirar la carga térmica del volumen de control (m³/h) 1602,242

Flujo de aire disponible a la Temperatura exterior (m³/h) 3676,635

Cambios de aire por hora disponibles a la Temperatura exterior (ACHa) 88

Flujo de aire adicional requerido en forma mecánica Not Required

CALCULAR
BORRAR
SALIR

Fuente: Macro elaborada por el Mg. Ing. Alejandro Macías. Universidad del Valle.
 Elaboración propia.

El Volumen de Control [Vol₁]: **No requiere flujo de aire adicional para evacuar la carga térmica**

Volumen de control [Vol₂]: Efecto chimenea

Para conocer si el flujo de aire disponible puede evacuar la carga térmica resultante después de la adecuación propuesta, se utiliza el Macro desarrollado por el Ing. Macías (Macías, 2012), que incluye este cálculo, en la situación: *Efecto chimenea – flujo por diferencia de presiones*.

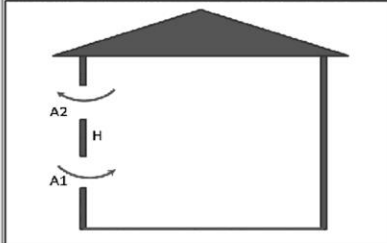
Gráfico No. 48:

Cálculo de la ventilación natural para el Vol₂ Método NORMA. Debido solo al viento – Volumen Modificado

CALCULO DE EVENTILACION NATURAL

Método NORMA Entrada/Salida en un Solo Lado por Diferencias de Temperatura Método NORMA Ventilación Cruzada

Debido solo al viento con área de salida > área de entrada Debido solo al viento con área de entrada > área de salida Solo efecto chimenea Efectos de viento y chimenea combinados

Carga térmica en el volumen de control (kW)	1.141	Coefficiente K	0.63	¡CUIDADO! Verifique cual es el separador decimal en su máquina, este puede ser la coma o el punto.	
Altura sobre el nivel del mar (m)	923	Mostrar r coeficientes K			
Volumen del espacio (m3)	23.38	Temperatura exterior (°C)	33.1	Flujo de aire requerido para retirar la carga térmica del volumen de control (m3/h)	1266.915
Alto de la entrada inferior (m)	0.2	Temperatura interior, de diseño o deseada al interior del espacio (°C)	27	Flujo de aire disponible a la Temperatura exterior (m3/h)	1305.699
Ancho de la entrada inferior (m)	5			Cambios de aire por hora disponibles a la Temperatura exterior (ACHa)	56
				Flujo de aire adicional requerido en forma mecánica (m3/h)	Not Required
Alto de la salida superior (m)	0.4			BORRAR SALIR	
Ancho de la salida superior (m)	5				
Distancia vertical H entre entrada y salida (m)	0.93				
		CALCULAR			

El Volumen de Control [Vol₂]: **No requiere flujo de aire adicional para evacuar la carga térmica.**

7.2.5. Análisis de información y análisis de resultados

Enmarcada en la FASE 4, una vez se obtienen los resultados del cálculo de confort y ventilación natural con la implementación de las estrategias para mejorar su condición inicial, se procede a realizar la consolidación de la información y a realizar el respectivo análisis de los resultados.

a. Consolidación de resultados y Análisis comparativo

Tabla No.51:

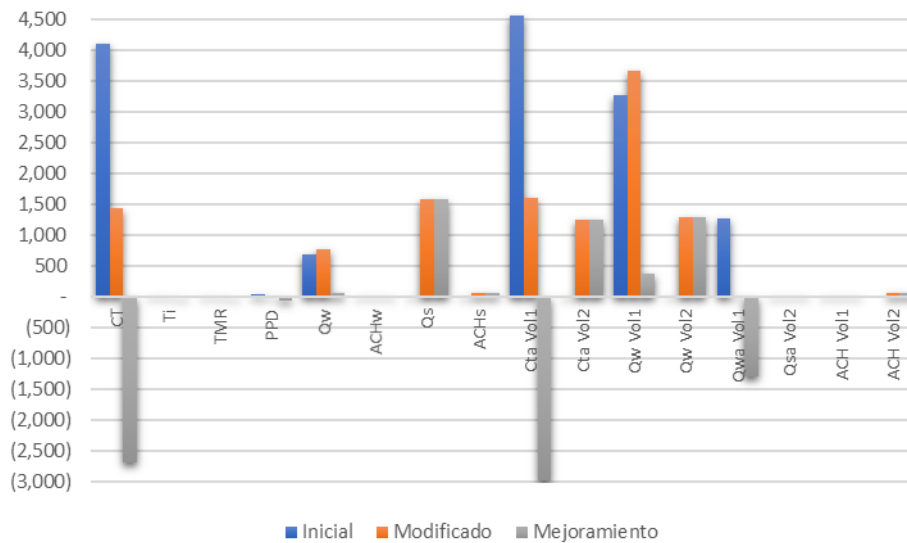
Consolidación de resultados y análisis comparativo entre estado inicial y Volumen de MODIFICADO

Componente	Abrev.	Estado confort Condición Inicial	Estado confort Modificado	Mejoramiento
Carga térmica				
Carga térmica interna [W]:	CT	4,120.31	1,443.37	(2,676.94)
Temperatura interior de la cubierta NNE [°C]:	Ti	35.80	29.64	(6.16)
Temperatura media radiante [°C]:	TMR	29.30	27.80	(1.50)
Confort - PPD [%]	PPD	56.00	11.00	(45.00)
Flujo de aire				
Método NORMA - 35 Pasos - Asimakopoulou, D., & Santamouris, M.				
Disponible debido al efecto Ventilación cruzada [M³/h] - Vol ₁	QT	702.00	770.00	68.00
Disponible debido al efecto Ventilación cruzada [M³/h] - Vol ₂	QT	-	1,796.00	1,796.00
ACH (Método 35 pasos): [Vol ₁]	ACH Vol ₁	17.00	19.00	2.00
ACH (Método 35 pasos): [Vol ₂]	ACH Vol ₂	-	76.00	76.00
Debido al efecto Chimenea Vol ₁ [M³/h]	Qs	-	-	-
Debido al efecto Chimenea Vol ₂ [M³/h]	Qs	-	1,592.95	1,592.95
Método NORMA - Macro Ing. Alejandro Macías				
Requerido para retirar la carga térmica del volumen de control [Vol ₁] [M³/h]	Cta Vol ₁	4,574.66	1,602.24	(2,972.42)
Requerido para retirar la carga térmica del volumen de control [Vol ₂] [M³/h]	Cta Vol ₂	-	1,266.91	1,266.91
Flujo de aire disponible a la Temperatura Exterior [Vol ₁] [M³/h]	Qw Vol ₁	3,288.39	3,676.63	388.24
Flujo de aire disponible a la Temperatura Exterior [Vol ₂] [M³/h]	Qw Vol ₂	-	1,305.69	1,305.69
Cambios de aire por hora disponibles a la temperatura exterior [Vol ₁] [ACHa]	ACH Vol ₁	79	88	9
Cambios de aire por hora disponibles a la temperatura exterior [Vol ₂] [ACHa]	ACH Vol ₂	-	56	56
Adicional requerido en forma mecánica [Vol ₁] [M³/h]	Qwa Vol ₁	1,286.26	No requerido	1,286.26
Adicional requerido en forma mecánica [Vol ₂] [M³/h]	Qsa Vol ₂	No requerido	No requerido	No requerido

Fuente: Elaboración propia

Gráfico No. 50:

Análisis comparativo de resultados



Fuente: elaboración propia

b. Registro de datos higrotérmicos del volumen de control MODIFICADO

- Registro de las temperaturas radiantes de las superficies internas Volumen de Control No.1



Imagen No. 18: [Izquierda]

Temperatura interna de la cubierta

- $T_{r-roofNorthNE} = 29.59^{\circ}C$
- $Tr - registro = 30.5^{\circ}C$

Fuente: Elaboración propia.

Imagen No. 19: [Derecha]

Temperatura interna del aire

- $T_i - diseño = 27^{\circ}C$
- $T_i - registro = 26.7^{\circ}C$

Fuente: Elaboración propia.

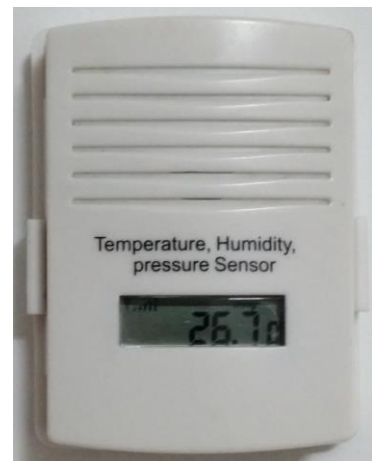




Imagen No. 20: [Izquierda]
Temperatura interna pared Norte

- $T_{r-wallNorthNE} = 28.66\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $Tr - registro = 28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fuente: Elaboración propia.

7.2.6. Conclusiones sobre el confort térmico interior alcanzado

Se deben integrar los resultados tanto del cálculo de confort térmico, logrado con el uso del CBE – Thermal Comfort tool, con la proyección del efecto de la ventilación natural obtenido con las estrategias para mejorar la evacuación del aire caliente.

Los resultados [1. Confort por disminución de la carga térmica y 2. Ventilación natural] fueron obtenidos de manera independiente y en ambos los valores son adecuados para el confort térmico interno, no obstante, la integración de los dos resultados en la práctica, podría mejorar aún más las condiciones de confort calculadas.

Las estrategias de evacuación del aire caliente no fueron implementadas, por tanto, la medición de calor sobre las superficies puede impactarse aún más de forma positiva, si estas son construidas.

El confort térmico interno logrado es ligeramente caliente. No obstante, con la estrategia de evacuación del aire caliente, esta sensación térmica debe cambiar de manera positiva. Sin embargo, no hay manera de calcularla de manera integrada. Los métodos utilizados para carga térmica y ventilación natural funcionan de manera independiente y aunque los resultados de uno afectan al otro, no hay un logaritmo en este trabajo que logre recoger las mejoras progresivas que se producirían con el mejoramiento de una de las variables.

Como lo muestran las imágenes 18, 19 y 20, se validan los resultados calculados a través de una medición real sobre las superficies afectadas con la implementación de las estrategias, logrando evidenciar mediante la utilización de un termómetro infra - rojo digital unas temperaturas muy similares:

Tabla No. 52:

Resultados de la comparación entre la temperatura calculada y la temperatura registrada

Objetivo	Temperatura calculada	Temperatura registrada	Diferencia
Temperatura interna de la Cubierta	$T_{r-roofNorthNE} = 29.59\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Tr - registro = 30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.91 °C
Temperatura del Aire interno	$T_i - diseño = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_i - registro = 26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.3 °C
Temperatura de la pared norte	$T_{r-wallNorthNE} = 28.66\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Tr - registro = 28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.16 °C

Fase 4:

7.3. CAPITULO III

Caracterización de las emisiones de CO₂ en la vivienda urbana

La línea de análisis No.2 - **Controlar y disminuir emisiones de CO₂**, tiene definido como **Fin**: “Minimizar las emisiones de CO₂ producidas por la vivienda”.

Huella ecológica: El Análisis del ciclo de vida de los materiales, concepto y metodología

Según Mathis Wackernagel, el director de la Fundación Redefining Progress: “*hemos usado más del 120 por ciento de la capacidad ecológica del planeta*” (Wackernagel & Rees, 2003). La degradación de los ecosistemas en el mundo, tiene entre otras razones, la necesidad de albergue para las personas en el planeta de manera general. Conocer la capacidad de carga de los ecosistemas, es la manera en que de manera consiente, la humanidad puede hacer reflexiones claras sobre que hace o deja de hacer en función de conservar de manera adecuada y sin poner en crisis la supervivencia como especie. El costo ecológico de las actividades cotidianas asociadas a las dinámicas de consumo se conoce como Huella Ecológica.

La Huella Ecológica es el sistema de medición que permite calcular “el peso o demanda de recursos que hacemos a los ecosistemas a través de nuestro consumo”, lo cual, representa la cantidad de CO₂ que se desprende a la atmosfera por cuenta de una actividad precisa o la sumatoria de un sistema de actividades, (Wackernagel & Rees, 2003).

La huella ecológica tiene valor como capital natural, por lo tanto, puede medirse y controlarse. Todos sus recursos tanto los biofísicos que le dan forma como los residuos que resultan de la operación del uso de los materiales cualquiera que estos sean, conforman la base que soporta la totalidad de la economía mundial. (Fu et al., 2015).

Para entender la noción de material, como lo hace la norma internacional se acogerá la definición de “producto”.

Para analizar el desempeño ambiental de los productos, sus impactos y su producción misma, la Organización Internacional de Normalización [International Standard Organization - ISO - por sus siglas en ingles], ha establecido como metodología la “Evaluación del Ciclo de Vida”, reglamentada mediante la norma internacional ISO 140400:2006 [Environmental management — Life cycle assessment], que fue definida por el Comité Técnico ISO/TC/207, del cual Colombia hace parte. (ICONTEC, 2007).

El Comité Técnico ISO/TC/207, se encarga de la normalización en el campo de los sistemas de gestión ambiental y las herramientas de soporte para el desarrollo sustentable, fue creado en 1993 y al 2020 ha publicado 32 normas. De esta manera, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, ha asumido para Colombia la norma internacional ISO 14040, traducida al español de manera idéntica y estandarizada para los países hispanos, a través de la norma NTC – ISO 14040, Gestión Ambiental, Análisis del Ciclo de Vida, principios y marco de referencia (ICONTEC, 2007).

Para este trabajo, se hará énfasis en los materiales utilizados en la industria de la construcción particularmente.

Los recursos biofísicos obtenidos por extracción, como el agua, la madera, la arena y la grava de río, se consideran materias primas. Los materiales obtenidos como resultado del proceso de materias primas, se definen como productos en “estado primario”, entre ellos están, el cemento, el acero, el vidrio, la cerámica, el ladrillo, el aluminio, entre otros. Los procesos de producción de los materiales primarios, en los cuales, es importante el uso de la energía térmica y reacciones químicas para su transformación, las emisiones de CO₂ al igual que de otros gases efecto invernadero son igualmente significativas (Andrew, 2019).

La oxidación de combustibles fósiles, la deforestación y transformaciones del uso de la tierra, y la descomposición de carbonatos, son las tres fuentes principales de emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera. En relación con los materiales de construcción, la mayor fuente de emisiones por descomposición de carbonatos, es la producción de cemento (Andrew, 2019).

Sin embargo, “cuanto menor es el uso de materias primas primarias, menor es el impacto en la huella ambiental de un proceso de producción”. Según Fritz Moedinger, en una investigación sobre la producción sostenible de ladrillo de arcilla, la mezcla de desechos de subproductos sólidos con la materia prima que consigue reemplazar exitosamente la misma materia prima, tiene un efecto positivo en el descenso de las emisiones de CO₂ durante el proceso de la producción de los materiales. (Moedinger, 2005).

De esta manera, los materiales que se logran obtener con la reutilización sus propios desechos de producción o del reciclaje del mismo, generan menores emisiones. Estos son materiales en estado secundario como el vidrio, el aluminio, el acero (en menor grado), maderas compuestas, algunos plásticos, entre otros.

Este capítulo conduce a identificar la cantidad de emisiones de CO₂ de la vivienda en tres estados.

El primero, definirá las emisiones de CO₂ debidas a la construcción de la vivienda, y para eso se procederá metodológicamente con las siguientes actividades:

1. Identificar los materiales principales utilizados, permitirá definir el valor de emisiones que aportó la vivienda debido a su construcción.
2. Establecer un banco de indicadores de emisiones por material utilizando [fuentes verificables de nivel global].
3. Calcular el valor de emisiones por cantidad de material utilizado y establecer un valor de emisiones totales debido a la construcción de la vivienda.

El segundo, definirá las emisiones de CO₂ debidas a la operación de la vivienda, y para eso se procederá metodológicamente con las siguientes actividades:

4. Identificar fuentes de emisiones de CO₂ durante la operación de la vivienda.
5. Calcular la cantidad de emisiones durante un periodo operacional de 50 años: 1970 – 2020.

El tercero, establecerá estrategias para controlar y disminuir las emisiones de CO₂ de la vivienda, y para eso se procederá metodológicamente con las siguientes actividades:

6. Se calcularán las emisiones de CO₂ generadas por las transformaciones físicas y las adiciones realizadas a la vivienda para lograr el mejoramiento del confort térmico establecidas en la línea de análisis No. 1.
7. Se definirán estrategias para controlar y reducir emisiones durante la operación de la vivienda.
8. Se llevará a cabo el análisis de rendimiento para definir si se logra la reducción de emisiones de CO₂ sobre el valor establecido en los puntos A y B.

7.3.1. Emisiones de CO₂ debidas a la construcción

7.3.1.1. Listado de materiales principales utilizados en la construcción de la vivienda

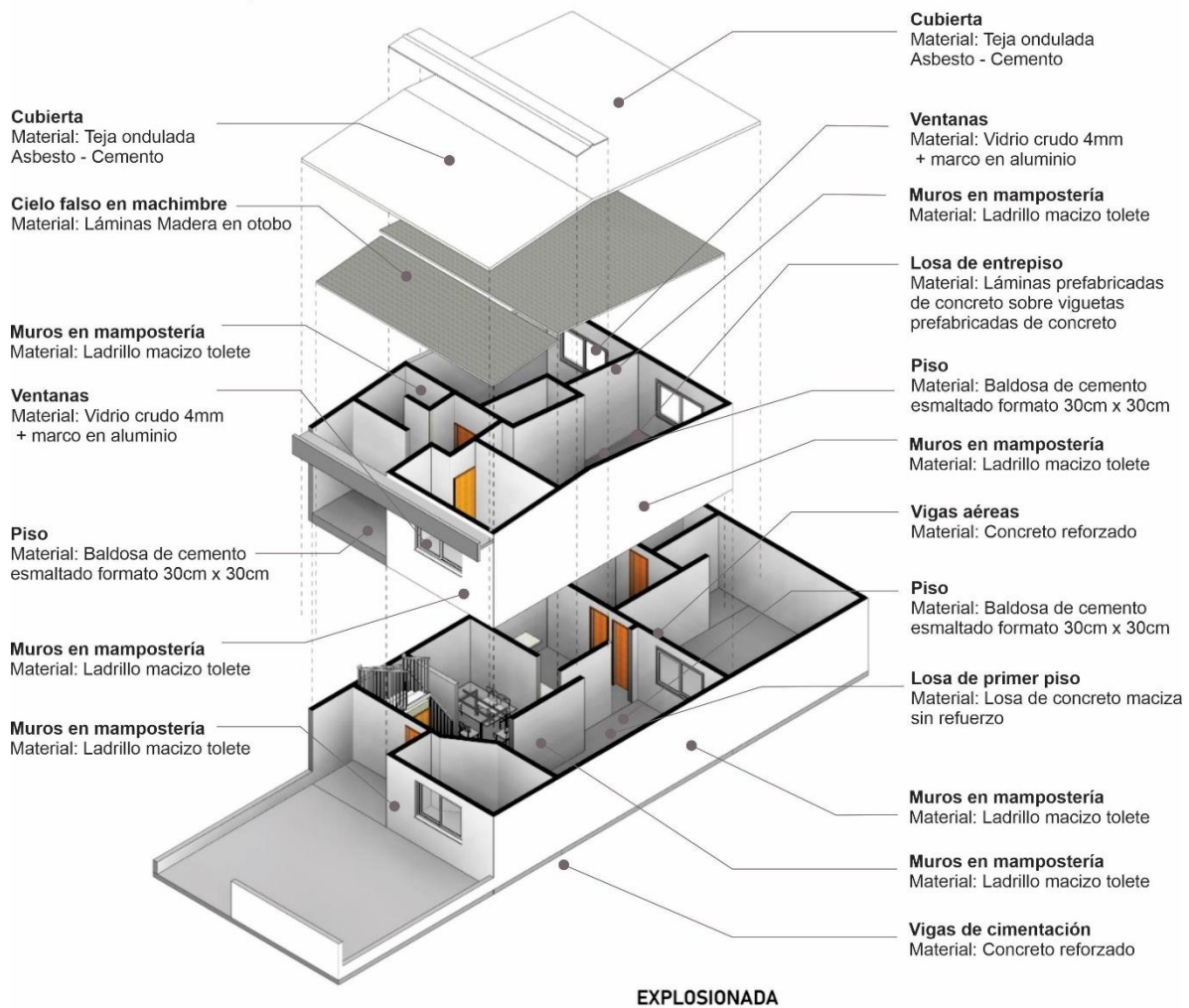
Este trabajo se concentrará en los materiales de construcción que se identificarán como principales por considerarse fundamentales para la configuración estructural de la vivienda de estudio.

Gráfico No. 51:

Localización de materiales en la vivienda

Materiales constructivos

Identificación de materiales predominantes



Fuente: Elaboración propia

Tabla No.53:

Listado de materiales principales usados en la vivienda

CAPITULO	ACTIVIDAD	PRODUCTO DEL MERCADO	MATERIALES CONSTRUCTIVOS
CIMENTACION	Vigas de Cimentación	Concreto 3000 PSI	Cemento Portland
			Arena
			Grava
			Agua potable
		Acero de refuerzo 60.000 PSI	Acero
	Losa maciza de primer piso	Concreto 3000 PSI	Ver Concreto *
		Malla electrosoldada	Malla electrosoldada
ESTRUCTURA VERTICAL	Muros portantes en mampostería	Ladrillo de arcilla cocido - tolete	Ladrillo tolete
		Mortero de pega 1:4 / E:2cm	Cemento Portland
			Arena
			Agua
ENTREPISO	Losa de entrepiso	Viguetas prefabricadas de concreto en V	Ver Concreto *
		Láminas prefabricadas de concreto	Ver Concreto *
	Vigas aéreas segundo piso	Concreto 3000 PSI	Ver Concreto *
		Acero de refuerzo	Acero
CUBIERTA	Cubierta	Teja ondulada [Asbesto -cemento]	Asbesto - cemento
	Estructura	Vigas cerchas en acero figurado armado y soldado tipo Warren sección triangular	Acero
		Vigas de madera maciza 4" x 2"	Madera
		Viguetas en Lisones de Pino	Madera de Pino
	Cielo	Machimbire de pino inmunizado capa de barniz	Madera de Pino
PISOS	Piso en baldosa	Baldosa de cemento esmaltado	Cemento Portland
			Arena
			Agua
	Mortero de nivelación	Mortero de nivelación	Ver mortero*

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 54:

Listado de materiales complementarios usados en la vivienda

CAPITULO	ACTIVIDAD	PRODUCTO DEL MERCADO	MATERIALES CONSTRUCTIVOS
CERRAMIENTOS	Ventanas [Cielos]	Láminas de vidrio crudo 4mm con Marco de Aluminio	Vidrio crudo
			Aluminio perfilado
	Puertas	Puerta lámina metálica	Lámina Cold roled
		Puertas de madera	Madera de Pino
ACABADOS Y ACCESORIOS	Cocina	Mesón en acero inoxidable	Lámina Acero inoxidable
		Lavaplatos en acero inoxidable	Acero inoxidable
		Mueble gabinete en madera presada - MDF	Lámina MDF
		Enchape ceramica cocina	Cerámica pared
	Recubrimiento exterior	Pintura vinilo blanca	Pintura
		Repello en mortero 1, 2, 2	Ver Mortero *
	Recubrimiento interior	Pintura vinilo blanca	Pintura
		Repello en mortero 1, 2, 2	Ver Mortero *
INSTALACIONES ELECTRICAS	Tubería eléctrica	Tuberia electrica PVC flexible negra	PVC
	Cableado	Alambre eléctrico de cobre #14 - recubrimiento de Nylon	Alambre de Cobre
	Tablero eléctrico	Lámina Cold roled	Lámina Cold roled
	Breakers	Breakers General Electrics Negros 15W	N/A
	Polo a tierra	Varilla Coperwel - 2 metros	Cobre + Acero
	Medidor	Medidor [Emcali] 120 Voltios disco - Monofásico	N/A
	Acometida eléctrica	Alambre eléctrico de aluminio #4 - recubrimiento de Nylon - varios colores	Alambre de Aluminio
		Capacete y tubos en acero galvanizado	Acero galvanizado
	Accesorios electricos	Tomas eléctricos Normal blanco	N/A
		Tapas para tomas blancas	N/A
		Switches iluminación Sencillos	N/A
	Iluminación	Plafones sobreponer en ceramica dialéctrica	Cerámica
		Bombillas Incandescentes de vidrio y filamento	Vidrio
INSTALACIONES HIDRÁULICAS	Tubería hidráulica	Tuberia presion blanca PVC 1/2"	PVC
		Tuberia presion negra PVC 1/2"	PVC
	Aparatos hidráulicos	Grifos lavamanos y lavaplatos	Acero
		Llaves de paso	Bronce
		Medidor de agua	N/A

INSTALACIONES SANITARIAS	Tubería sanitaria	Tubería sanitaria	Tubos de Gress
		Rejillas drenaje	Aluminio
	Aparatos sanitarios	Taza inodoro	Cerámica
		Lavamanos	Cerámica

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al listado anterior, los materiales con mayor presencia [Listado de materiales principales] en la construcción de la vivienda, de los cuales se establecerán indicadores de emisiones por unidad de medida de material utilizado son:

- A. Cemento
- B. Arena y la grava de río
- C. Acero de refuerzo
- D. Ladrillo sólido de arcilla cocido – tolete
- E. Asbesto – cemento
- F. Energía eléctrica

7.3.1.2. Banco de Indicadores de emisiones de CO₂ por Kg de material utilizado en la construcción

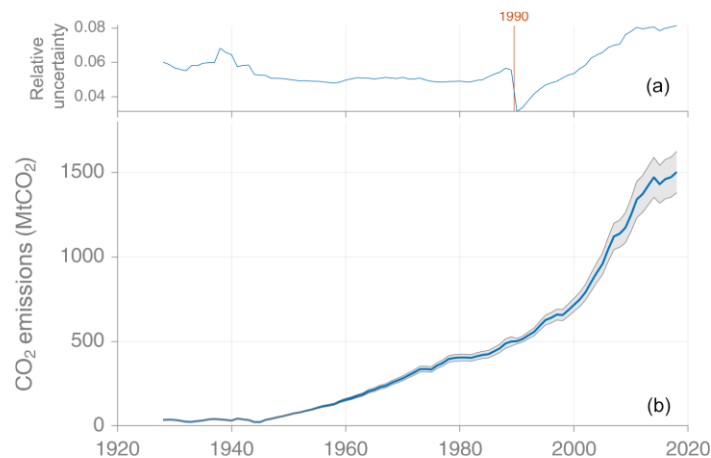
A. Cemento

De acuerdo a la base de datos “*Earth System science data - ESSD*”, en el artículo “Emisiones globales de CO₂ de la producción de cemento – 1928 - 2018”, Volumen 11 - número 4, escrito por Robbie M. Andrews del “*Center for International Climate Research – CICERO*”, ubicado en Oslo, Noruega, las emisiones totales de la industria del cemento podrían representar el 8% del total de CO₂ emitido a la atmósfera (Andrew, 2019).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), reconoce globalmente que la producción de cemento a escala mundial se ha incrementado aceleradamente desde 1990, convirtiéndose en la tercera fuente más importante en emisiones antropogénicas de dióxido de carbono. Sin embargo, ella misma reconoce que estimar las emisiones de CO₂ en esta industria es complejo debido a la poca disponibilidad de datos. El artículo de R.M. Andrew recoge diferentes fuentes incluida la data que los países miembros de las Naciones Unidas envían de forma bienal a la UNFCCC y las estimaciones de China e India, lo cual plantea un panorama global cercano a la realidad, teniendo en cuenta que China para 2018 representaba el 60% de la producción mundial de cemento, aunque los datos fueron posibles desde 1990, explicando un poco la elevación de la curva a partir de este año, e India el 7% del total mundial, de quienes se obtuvo información a partir del 2009. Según R.M. Andrew, “las emisiones acumuladas desde 1928 a 2018 fueron de $38.3 \pm 2,4$ Gt CO₂, de las cuales el 71% se han producido desde 1990”, como lo muestra el gráfico siguiente.

Gráfico No. 52:

Emisiones de la producción mundial de cemento



Fuente: R. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production 1928-2018", ESSD.

Toda la información utilizada por R. M. Andrew y los resultados del mismo cálculo de data está disponible en la página web de ZENODO (doi:10.5281/zenodo.831454; Andrew, 2019) y en <https://essd.copernicus.org/articles/11/1675/2019/>.

Según Andrew El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD por sus siglas en inglés), por medio de su programa "Getting the Numbers Right", se ha recogido datos de la producción de cemento, incluida la data de la producción de Clinker, directamente de las empresas, sin embargo, la metodología basada en encuestas sigue siendo deficiente en muchas partes del mundo. Igualmente es objeto de consulta en su propio sitio web.

Para obtener la estimación de la relación de emisiones de CO₂ por unidad de cemento producida, Andrew recoge en su artículo diferentes estudios cronológicos, que se basan en el trabajo que realizó Baxter y Walton presentado en 1970, quienes definieron estimaciones de "Emisiones de CO₂ de la producción de cemento y combustibles fósiles entre 1860-1969", en las que variables como el porcentaje de arcilla y óxido de calcio contenido en el cemento afectaban su eficiencia. Así, obtuvieron que, para la fabricación de una tonelada de cemento, se producen 4.71×10^5 g de CO₂, siendo el mismo resultado reportado en 2016 por la "United States Geological Survey – USGS". La "Carbon Dioxide Information Analysis Center – CDIAC" asumió una relación de 0.5 tCO₂ / 1t Cemento, que fue adoptada por el "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC), en sus directrices de 2016, (Andrew, 2019).

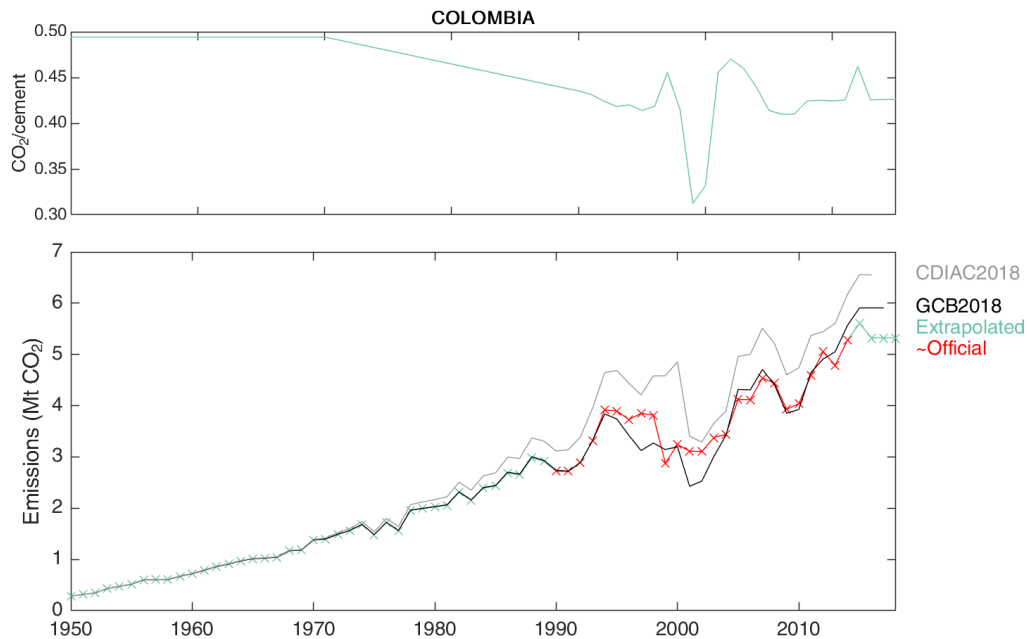
Por lo tanto, este trabajo asumirá una relación de 0.5 Kg CO₂ / 1 Kg Cemento

La "Emissions Database for Global Atmospheric Research" (EDGAR por sus siglas en inglés), es la encargada de presentar las estimaciones oficiales de CO₂ y otros gases que afectan el clima, por país. Dado que la mezcla de Clinker en la producción del cemento es relevante en las emisiones de CO₂ a la atmósfera, EDGAR que inicialmente para 1984, había estimado una relación de 0.5 t CO₂ / 1 t Cemento, en 2010 en su versión 4.1 modificó el factor en función de la disminución del Clinker en la mezcla como resultado del trabajo del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD). Sin embargo, en su versión 4.3.2, EDGAR ya utiliza las bases de datos del UNFCCC a quien reportan los países miembros desde 2003 en informes bianuales (Biennial Update Reports – BUR) (Andrew, 2019).

Para el caso de Colombia, miembro de las Naciones Unidas, se encuentra el segundo informe bienal de actualización (BUR), que incluye un informe del “inventario nacional que presenta emisiones de cemento entre los años 1990-2014”. Para el cálculo se utilizó el factor de emisión por defecto definido por Andrew en 0.5 tCO₂ / 1t Cemento. (Andrew, 2019)

Gráfico No. 53:

Emisión global de cemento - Emisiones Colombia



Fuente: R. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production 1928-2018", ESSD.

Para este trabajo se determina el uso de los valores de emisiones de CO₂ como material en su estado primario.

B. Arena y grava de río

En la industria de la construcción, la arena, al igual que la grava se utilizan como materia prima para la preparación de hormigón, morteros, bases y rellenos. También se usa en la fabricación de vidrio y piezas electrónicas, en la industria de la fundición, en pinturas, revestimientos, en la industria química, entre otros. (Dan Gavrilletea, 2017).

Según el “Global Environmental Alert Service” [GEAS por sus siglas en inglés], que hace parte del Programa para el Medio Ambiente de las Naciones Unidas – UNEP, “la arena y la grava representan el volumen más alto de materia prima extraída en el mundo aparte del agua”, y anuncian de manera alarmante que su uso supera la velocidad con la que se regenera este recurso. Cada año se extraen a nivel mundial entre 47 y 59 mil millones de toneladas de materiales, de los cuales, la arena y la grava representan entre el 68% y 85%, una cifra que se estimó para 2012, entre 25,9 mil millones a 29,6 mil millones de toneladas por año, “un volumen equivalente al doble de la cantidad anual de sedimentos arrastrados por todos los ríos del mundo”. A pesar de tener evidencia física del impacto por los efectos sobre ríos y ecosistemas costeros, la ausencia de datos globales y fuentes confiables sobre la extracción de áridos hace imposible su evaluación ambiental. (UNEP, 2014).

Existe a escala global, un mercado alrededor de la arena y la grava de río. Siguiendo las declaraciones del Fondo Monetario Internacional - FMI, el principal consumidor de arena y grava es la industria del cemento. A nivel mundial, coherentemente con el crecimiento económico, China siendo el noveno importador más grande de arena, utilizó más concreto entre 2011 – 2013 que USA en todo el siglo XX. Singapur, Holanda, Bélgica y Japón ocupan el primero, segundo, tercero y cuarto lugar. (Dan Gavriltea, 2017).

Debido a que la arena y la grava de río son materias primas que no requieren procesos de combustión para su producción, los datos encontrados sobre la relación de emisiones de CO₂, hacen referencia a las emisiones originadas por la maquinaria utilizada en el proceso de extracción, tamizaje y transporte. Por lo tanto, no se tomará ningún dato equivalente, es decir:

Para este trabajo asumirá una relación de 0 Kg CO₂ / 1 Kg Arena o Grava

C. Acero de refuerzo

El acero es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción. El proceso de producción del acero hace un aporte significativo de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

El Instituto Internacional del Hierro y el Acero – IISI, como una de las entidades calificadas a nivel global para generar información sobre la industria del acero, realizó un estudio de inventario del Ciclo de Vida [ICV], bajo el estándar ISO 14040 - Análisis del ciclo de vida, para identificar la cantidad de recursos, de energía y de emisiones de CO₂ a la atmósfera, que estaban vinculados a la producción del acero de “la cuna a la puerta”, es decir desde la extracción de la materia prima hasta la puerta de la fábrica. Esta información fue base para las directrices postuladas por el “*Intergovernmental Panel on Climate Change*” (IPCC) sobre las emisiones de la industria del metal, (IISI, 2002).

El acero se puede obtener tanto en estado primario como en estado secundario.

Para obtener el acero en estado primario se utiliza generalmente lo que se conoce como “Instalación integrada”, compuesta por altos hornos y hornos de oxígeno básico (BOF – por sus siglas en ingles). Este proceso se conoce regularmente como la “ruta de proceso integrado”, utiliza principalmente mineral de hierro y entre el 25% y el 30% de acero reciclado. La fabricación del acero en estado secundario, ocurre generalmente en hornos de arco eléctrico (EAF – por sus siglas en ingles), en los cuales se usa un 95% de chatarra de acero reciclado, genera menor huella en el ciclo de vida y reduce las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Jerry Marks et al., 2006).

De acuerdo con el volumen 3 de las directrices del “*Intergovernmental Panel on Climate Change*” (IPCC), para los Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero publicadas en 2006, dedicado a los procesos industriales y al uso del producto, en 2003, el 63% de la producción mundial de acero se realizó mediante el uso de BOF y el 33% a través de EAF, (Jerry Marks et al., 2006).

Los indicadores sobre emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del acero, obtenidos del IPCC recogidos en el capítulo 4: Emisiones de la Industria del metal, publicada en las directrices del 2006, son los siguientes:

Tabla No.55:

Método de fabricación del acero		
Horno de oxígeno básico (BOF) (tonelada de CO ₂ per tonelada de acero producida)	1.46	Producción de acero: conceso de expertos y IISI Indicadores ambientales de rendimiento del acero 2003 (International Iron and Steel Institute, 2004)

Horno de acero eléctrico (EAF) (tonelada de CO ₂ per tonelada de acero producida)	0.08	Producción de acero: conceso de expertos y IISI Indicadores ambientales de rendimiento del acero 2003 (International Iron and Steel Institute, 2004)
Horno de chimenea abierta (OHF) (tonelada de CO ₂ per tonelada de acero producida)	1.72	Producción de acero: conceso de expertos y IISI Indicadores ambientales de rendimiento del acero 2003 (International Iron and Steel Institute, 2004)
Factor promedio global (65% BOF, 30% EAF, 5% OHF) (tonelada de CO ₂ per tonelada de acero producida)	1.06	Producción de acero: conceso de expertos y IISI Indicadores ambientales de rendimiento del acero 2003 (International Iron and Steel Institute, 2004)

Fuente Tabla: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume3, Chapter 4: Metal Industry Emissions, Pg. 4.25

Traducción: Propia

Debido a la incertidumbre sobre la naturaleza del acero utilizado en la vivienda, para este trabajo de maestría se utilizará como relación de CO₂ / unidad de material, el factor promedio global de la tabla “método de fabricación del acero” de las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático - IPCC.

Relación 1.06 Kg CO₂ / 1 Kg Acero

D. Ladrillo sólido de Arcilla cocido - Tolete

En el sur, el sur – este de Asia y Latinoamérica, el ladrillo de arcilla cocido es uno de los materiales más usados y representa para la industria de la construcción el producto artesanal más extenso en estas regiones. (Swisscontact & CCAC, 2015).

Para la fabricación del ladrillo cocido se utiliza como materia prima arcillas extraídas de la tierra. Por sus propiedades físicas, las arcillas para la preparación de ladrillos se dividen en grasas y magras. Las propiedades plásticas de las primeras le permiten ser moldeadas mientras que las segundas no. La preparación requiere arcillas grasas y en casos mejorados agregados de arena silícica. (Wilches & Suarez, 2016).

Puesto que esta industria es representativamente artesanal, la información formal verificable a nivel global había sido escasa e inexacta. Sin embargo, por su misma condición de artesanal, el impacto social ha focalizado la atención de agencias internacionales que en las últimas dos décadas han dedicado recursos principalmente a recoger información de línea base sobre las tecnologías utilizadas, la eficiencia energética, la contaminación por partículas emitidas al aire (PM) y gases efecto invernadero (GEI), con lo cual, se puedan establecer metas para mejorar los procesos de producción, la tecnificación y la capacitación de las comunidades (Swisscontact & CCAC, 2015).

En ese sentido, la ONG Fundación Suiza para la Cooperación Técnica – “Swisscontact”, por iniciativa de la “Climate and Clean Air Coalition – CCAC”, ha realizado la evaluación del sector ladrillero artesanal en América Latina para los países Honduras, Nicaragua, Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia, México y Brasil, en cuyo reporte Colombia es el tercer productor de ladrillo y el séptimo en tamaño de productores de la región (CCAC, 2016).

Colombia, a través del Ministerio de Ambiente, realiza periódicamente el “Inventario nacional del sector ladrillero colombiano”, que para el 2015 reportó una producción de 1.380.000 de toneladas / mes, en 2435 hornos registrados, de los cuales 1387 son artesanales, funcionan en base a carbón y no cumplen las normas nacionales sobre emisiones. En este mismo reporte, se muestra un crecimiento en el número de hornos asociados a la pequeña industria y una disminución en el número de hornos de la producción artesanal entre 2013 y 2015 (Minambiente, 2018).

El registro de la producción ladrillera en Colombia, de acuerdo a la evaluación realizada por la Corporación Ambiental Empresarial – CAEM en 2015, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla No.56:

Registro de la producción ladrillera en Colombia

TIPO DE EMPRESA	TIPO DE HORNO	PRODUCCIÓN PROMEDIO (TON/AÑO)	TIPO PRODUCTO	NIVEL TECNOLÓGICO DE LA PRODUCCIÓN
Microempresa: Chircales artesanales y chircales mecanizados	Fuego dormido	<600	Tolete, tejas	Artesanial
	Pampa, colmena	600-2500	Tolete, tejas	Artesanial
Pequeña empresa: pequeña y mediana industria	Baúl, colmenas (menos de 5)	2500-5000	Adoquín, tabletas, tejas, bloques	Semi-mecanizado
	Hoffman, colmenas (más de 5), zig-zag	5000-10000	Bloques, rejillas, adoquín y productos de gran formato	Semi-mecanizado a mecanizado, 7-10 t/hora
Mediana y gran empresa: gran industria	Hoffman, Cámaras, continuas Túnel, Rodillos (ladrilleras con más de 20 colmenas)	20000-120000	Bloques, ladrillos de fachada, divisorios, prensados y productos de gran formato	Mecanizado <10 t/hora o Prensa hidráulica automatizada

Fuente: (CAEM, 2013)

Este trabajo de maestría, se centrará en el ladrillo artesanal cocido – Tolete, dado que este es el utilizado en la vivienda objeto de estudio.

Debido a que la vivienda objeto de estudio se encuentra localizada dentro del Valle del Cauca, de acuerdo al CAEM, por el tipo de horno que predomina en la región, se asumirán las emisiones registradas en la tabla siguiente:

Tabla No. 57:

Emisiones Ladrilleras

DEPARTAMENTO	INFORMACION LINEA BASE 2013	INFORMACION LINEA BASE 2015			
VALLE DEL CAUCA	NUMERO REGISTROS	NUMERO LADRILLERAS CON INFORMACION	NUMERO DE HORNOS	TIPO HORNO	EMISIONES POR TIPO DE HORNO KG / KG CO ₂
	156	216	280	PAMPA / DOWN DRAUGHT KILN	0.282
	PRODUCCIÓN TON/MES 2013	PRODUCCIÓN TON/MES 2015			
	29,401	109,405			

Fuente: (CAEM, 2015)

De esta manera la relación de emisiones por kilogramo de material que se asumirá en este trabajo será:

Relación 0.282 Kg CO₂ / 1 Kg Ladrillo Tolete

E. Asbesto – cemento

El término Asbesto reconocido de la misma manera en inglés, de acuerdo al diccionario Oxford de Ingles, es una palabra griega antigua olvidada “ἀσβεστος”, que significa “unquenchable, inextinguishable”, cuya traducción para el español es Indestructible o inextinguible, noción que retoma a “Guía técnica para la gestión ambiental sobre residuos de asbestos y productos que los contengan” elaborado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia y el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD, en 2013(MAVDT & PNUD, 2013).

De acuerdo a la “Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de EEUU – ATSDR, por sus siglas en inglés”, en un informe publicado en 2001, el nombre asbesto “ha sido atribuido a un grupo de seis materiales fibrosos: amosita, crisotilo, crocidolita y las formas fibrosas de tremolita, actinolita, y antofilita. Es un mineral de origen natural. El crisotilo, también conocido como asbesto blanco, pertenece a la familia de minerales serpentinos, los otros son anfíboles. Todos los asbestos son catalogados como peligrosos para la salud. Los minerales de asbesto consisten de fibras delgadas dispuestas en forma paralela y que se pueden separar una de otra, sin embargo, las fibras de asbesto anfíbol son generalmente quebradizas mientras que las de asbesto crisotilo son flexibles y curvas, por lo que representa la principal forma comercial de asbesto. No se disuelve en agua ni se evapora, es resistente a altas temperaturas, al fuego directo y a la degradación de productos químicos y biológicos, por lo que es utilizado como parte constitutiva principalmente de materiales de construcción, productos de fricción como frenos de automóviles y textiles termorresistentes. La EPA ha prohibido todo nuevo uso del asbesto en Estados Unidos”.

Según el MAVDT, se estima que el 90% del asbesto se utiliza en la industria de la construcción como elemento de refuerzo en la producción de materiales de asbesto-cemento conocidos comercialmente como productos de fibrocemento con crisotilo, tales como tejas, tanques, tuberías, canaletas, entre otros. En Colombia, la Resolución 007 de 2011 del Ministerio de Salud y Protección Social, los agrupa en dos clases: los de alta y los de baja densidad. Son de alta densidad los productos que contienen más del 1% de fibra de asbesto encapsulada o aglutinada en un componente natural o artificial, como el cemento, asegurando que durante su manipulación no se desprendan fibras que puedan ser inhaladas. Son de baja densidad (friable), los materiales con mas del 1% de asbesto crisotilo y pueden ser pulverizables. La resolución 007 de 2011 prohibió su uso y fabricación y limitó su manejo permitiendo únicamente el crisotilo o asbesto blanco para uso industrial o comercial(MAVDT & PNUD, 2013).

La fabricación de productos de asbesto - cemento se realiza en Colombia desde 1942 con la instalación de la planta de Eternit en Muña, Cundinamarca. Según el MAVDT, “encuentran instalados alrededor de 300 millones de metros cuadrados de techos y 40 mil kilómetros lineales de tuberías de acueductos y alcantarillados en materiales de fibrocemento con crisotilo en donde el contenido de asbesto es en promedio de 10%”.

La cubierta del caso de estudio está construida originalmente en tejas de asbesto – cemento. Nunca han sido removidas o cortadas.

Teniendo en consideración que no fue posible obtener información sobre las emisiones de CO₂ en la producción de Asbesto cemento, se tomará de referencia el porcentaje de cemento utilizado en la fabricación de tejas según la guía del MAVDT, por tanto, las emisiones equivalentes serán el 90% del total de emisiones de CO₂ por Kg de las de producidas en la fabricación del cemento, de la siguiente manera:

Si,

Este trabajo asumirá una relación de 0.5 Kg CO₂ / 1 Kg Cemento

Entonces, para el material “asbesto cemento” se asumirá el 90% de 0.5, es decir:

una relación de 0.45 Kg CO₂ / 1 Kg Asbesto - cemento

F. Energía eléctrica

Las superficies de los embalses para la generación de energía hidroeléctrica en el mundo, liberan a la atmósfera el 4% del total de las emisiones de CO₂ producidas por fuentes antropogénicas (Kemenes et al., 2011).

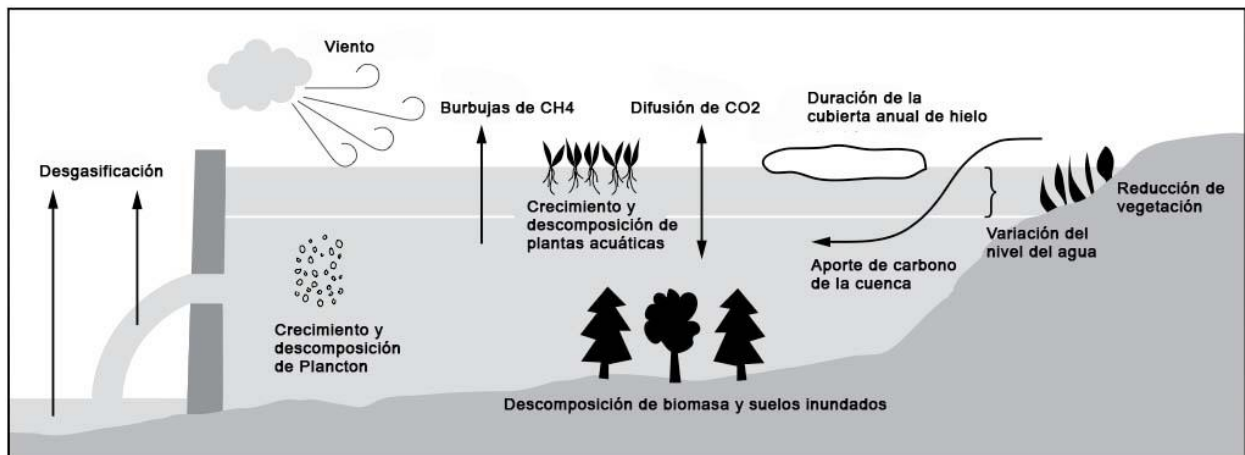
En 2011, un artículo del “Journal Of Geophysical Research” escrito por Alexandre Kemenes, Bruce R. Forsberg y John M. Melack, demuestra que los embalses para hidroeléctricas han contribuido desde el siglo XX, al incremento de la concentración de CO₂ y de gases efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, debido a la transformación de los ecosistemas terrestres embalsados y de la materia orgánica terrestre y acuática arrastrada desde las cuencas altas de los ríos, en emisiones biogénicas de gas.

De acuerdo a Kemenes, este fenómeno se produce por la “liberación de gas por ebullición inmediatamente debajo de las turbinas hidroeléctricas, debido a la rápida despresurización de las aguas del embalse, adicionalmente en los flujos de difusión aguas abajo de los embalses tropicales, por la descomposición de materia orgánica preexistente y de la proveniente del arrastre de la materia orgánica de la cuenca alta”, produciendo dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (Kemenes et al., 2011).

Considerando como unidad equivalente de comparación de emisiones, 1 kg de CO₂ de acuerdo al IPCC, el Potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) en 100 años es de 23 kg CO₂ por 1 kgCH₄, por tanto, el metano (CH₄) contribuye 23 veces más que el dióxido de carbono (CO₂) al calentamiento global, debido a su potencial térmico. (Ramaswamy et al., 2001). De esta manera, el impacto de los embalses tropicales podría superar al de las plantas eléctricas de combustibles fósiles y carbón.

Imagen No. 21:

“Un esquema de los principales factores que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero en los embalses”.



Fuente: 2008. Represas sucias. Las represas y las emisiones de gases efecto invernadero. (Ruiz et al., 2008).

La investigación citada, se llevó a cabo entre septiembre de 2004 y febrero de 2006 en la represa Balbina ubicada en la región central de la amazonía brasileña, una de las más grandes de la región tropical de Suramérica, caracterizada por su bajo rendimiento de generación de energía por unidad de área inundada ($\sim 0.14 \text{ W/m}^2$), (Kemenes et al., 2011). Ubicada en selva húmeda tropical lluviosa, ocupa 1.170 km^2 inundados y tiene una profundidad promedio de 10 m. Una descarga de $570 \text{ m}^3/\text{s}$ y una capacidad instalada de 250 MW. Kemenes precisa que los resultados encontrados pueden ser diferentes a otros casos de estudio de acuerdo a variables como la profundidad del embalse, las características del bosque preexistente, el viento, el tamaño

de la represa por km² de bosque embalsado, la temporada de toma de muestras seca o lluviosa, la cantidad de agua embalsada al momento de la muestra, entre otros (Kemenes et al., 2011).

De acuerdo a información documentada por la ONG “International Rivers” con sede en California - USA, “Wohlensee, es un pequeño embalse en el centro de Suiza, que emite 780 toneladas métricas de metano al año, según el Instituto Federal Suizo de Ciencia Acuática y Tecnología (Eawag)”. (Ruiz et al., 2008).

De acuerdo con Kemeses, si las represa Balbina trabajara al 50% de su potencia nominal, es decir la media de su capacidad instalada, emitiría 2.9 toneladas de CO₂ carbono equivalente (C) por 1 Megavatio-hora (Mwh) de energía generada, mientras que una central termoeléctrica de carbón emite nominalmente 0.3 Ton CO₂/Mwh (Kemenes et al., 2011). Sin embargo, “un estudio de ocho embalses de hidroeléctricas ubicados en sabanas tropicales del centro de Brasil registró emisiones de solo 0.01 a 0.55 toneladas de CO₂ carbono equivalente por Mwh de energía generada”. Los estudios realizados para lograr los resultados de la investigación no fueron posibles, sino hasta hace 20 años debido al desarrollo de la tecnología para las mediciones en las condiciones metodológicas y su alto costo. (Kemenes et al., 2011).

Para este trabajo, se considerará que la energía consumida durante el periodo 1970 – 2020 provino de la central hidroeléctrica del Alto Anchicayá en el Valle del Cauca, cuya operación inició en 1955, tiene una capacidad instalada es de 429 MV, utiliza 7 unidades de generación de acuerdo a información reportada públicamente por CELSIA [antigua Empresa de Energía del Pacífico S.A - EPSA]. El área cubierta por su embalse es de 1.198 Km², se encuentra ubicada en selva húmeda tropical lluviosa, siendo estas condiciones similares a las de la represa de Balbina en Brasil (Mora, 2013).

Aunque las condiciones del contexto y las características de las plantas son similares entre la central hidroeléctrica de Balbina y las del Alto Anchicayá, se determina que el indicador de emisiones de CO₂ por Kwh generado que se utilizará en este trabajo, no corresponderá a 2.9 Kg CO₂. Se utilizará para este fin el registro más alto del estudio realizado sobre los ocho embalses de la región. De esta manera, la relación de emisiones de CO₂ por Kwh generado será de 0.55.

La relación de emisiones por Kilovatio (Kw) de energía eléctrica producida será:

Relación 0.55 Kg CO₂ / 1 Kw energía consumida

G. Banco de indicadores de emisiones de CO₂ por material de construcción

Tabla No.58:

Banco de indicadores de emisiones de CO₂ por material de construcción

Material	Indicador [Emisiones Kg de CO ₂ / Kg de Material]
Cemento	0.5 Kg CO ₂ / 1 Kg Cemento
Arena y la grava de río	0 Kg CO ₂ / 1 Kg Arena o Grava
Acero de refuerzo	1.06 Kg CO ₂ / 1 Kg Acero
Ladrillo tolete	0.282 Kg CO ₂ / 1 Kg Ladrillo Tolete
Asbesto – cemento	0.45 Kg CO ₂ / 1 Kg Asbesto - cemento
Energía eléctrica	0.55 Kg CO ₂ / 1 Kw energía consumida

Fuente: Elaboración propia

7.3.1.3. Cálculo de emisiones de CO₂ por cantidad de materiales principales utilizados

Para calcular la cantidad de CO₂ emitido durante la construcción, se utilizará el listado actividades principales y se realizará el cálculo de emisiones de acuerdo a la cantidad de material utilizado en cada actividad.

Las actividades sobre las cuales se realizará el cálculo son las siguientes:

- Vigas de Cimentación
- Losa maciza de primer piso
- Losa de entrepiso
- Vigas aéreas segundo piso
- Muros portantes en mampostería
- Cubierta
- Piso en baldosa
- Mortero de nivelación

En adelante se elaborará el cálculo de emisiones de CO₂ por cantidad de materiales utilizados en cada una de las actividades enlistadas:

- Vigas de Cimentación + Losa maciza de primer piso
- Losa de entrepiso + Vigas aéreas segundo piso

Tabla No.59:

Emisiones de CO₂ generadas en las vigas de cimentación y aéreas, y losas primero y entrepiso

				PESO [KG/UNIDAD]	UNIDAD	CANTIDAD	PESO TOTAL [KG]	INDICADOR [Kg CO ₂ / Kg]	EMISIONES TOTALES [Kg CO ₂]
CIMENTACION	Vigas de Cimentación	Concreto 1:2:3	Cemento Portland	350	M³	2.17	758.2	0.5	379.1
			Arena						
			Grava						
			Agua potable						
		Acero de refuerzo varillas 4 #5 [5/8]	Acero	1.56	ML	216.64	338.0	1.06	358.2
	Losa maciza de primer piso	Concreto 1:2:3	Ver Concreto *	350	M³	6.31	2209.9	0.5	1105.0
		Malla electrosoldada	Malla electrosoldada	1.3	M²	73.94	98.6	1.06	104.6
ENTREPISO	Losa de entrepiso	Concreto 1:2:3	Ver Concreto *	350	M³	6.31	2209.9	0.5	1105.0
		Malla electrosoldada	Malla electrosoldada	1.3	M²	73.94	98.6	1.06	104.6
	Vigas aéreas Piso 1 + Piso 2	Concreto	Ver Concreto *	350	M³	3.16	1106.3	0.5	553.1
		Acero de refuerzo	Acero	1.56	ML	421.44	657.4	1.06	696.9
		EMISIONES TOTALES DE Kg CO ₂ EN CIMENTACIÓN + ENTREPISO							

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.60:
Memoria de la Tabla No.59

	LOCALIZACIÓN	LONGITUD (ML)	ALTURA [ML]	ANCHO (ML)	VOLUMEN CONCRETO (M³)
CONCRETO	VIGAS CIMENTACION	54.16	0.20	0.20	2.17
	LOSA MACIZA PRIMER PISO	9.02	7.0	0.10	6.31
	TOTAL VOLUMEN M³				8.48

	LOCALIZACIÓN	ESPECIFICACION	LONGITUD (ML)	CANTIDAD	CANTIDAD [ML]
ACERO	VIGAS CIMENTACION	Acero de refuerzo varillas 4 #5 [5/8]	54.2	4	216.64
	TOTAL LONGITUD ML				216.64

	LOCALIZACIÓN	LONGITUD (ML)	ANCHO (ML)	ALTURA [ML]	VOLUMEN CONCRETO (M³)
CONCRETO	LOSA MACIZA SEGUNDO PISO	9.02	7.0	0.10	6.31
	VIGAS AEREAS PISO 1	52.68	0.15	0.2	1.58
	VIGAS AEREAS PISO 2	52.68	0.15	0.2	1.58
	TOTAL VOLUMEN M³				9.47

	LOCALIZACIÓN	LONGITUD (ML)	ALTURA [ML]	ANCHO (ML)	VOLUMEN CONCRETO (M³)
ACERO	VIGAS AEREAS PISO 1	Acero de refuerzo varillas 4 #5 [5/8]	52.68	4	210.72
	VIGAS AEREAS PISO 2	Acero de refuerzo varillas 4 #5 [5/8]	52.68	4	210.72
	TOTAL LONGITUD ML				421.44

	LOCALIZACIÓN	LONGITUD (ML)	ANCHO (ML)	TRASLAPO [3 x 3.6] M²	AREA TOTAL [M²]
MALLA REFUERZO	LOSA PRIMER PISO	9.02	7.0	10.80	73.94
	LOSA SEGUNDO PISO	9.02	7.0	10.80	73.94
	TOTAL AREA M²				569.32

ESPECIFICACION	RESISTENCIA [PSI]	CEMENTO [KG]	ARENA [m3]	GRAVA [m3]	AGUA [Lt]
1:2:2	3500	420	0.67	0.67	220
1:2:3	3000	350	0.56	0.84	180
1:2:4	2500	300	0.48	0.96	170

ESPECIFICACION	PESO KG/M
Varilla #4 [1/2]	0.996
Varilla #5 [5/8]	1.56

ESPECIFICACION	Longitudinal	Transversal	Area M²	Peso Total Malla [KG]	Peso Malla [KG/ m²]
M-084	6	2.35	14.1	18.81	1.33

- **Muros portantes en mampostería**

Tabla No.61:
Emisiones de CO₂ generadas por los muros en mampostería

				PESO [KG/UNIDAD]	UNIDAD	CANTIDAD	PESO TOTAL [KG]	INDICADOR [Kg CO ₂ / Kg]	EMISIONES TOTALES [Kg CO ₂]
ESTRUCTURA VERTICAL	Muros portantes en mampostería	Ladrillo de arcilla cocido - tolete	Ladrillo tolete	2.3	UND	13,024	29,955	0.282	8,447
		Mortero de pega 1:4 E:2cm	Cemento Portland	419	M ³	8.00	3,352	0.5	1,676
			Arena						
			Agua						
		EMISIONES TOTALES DE Kg CO ₂							10123.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No.62:
Memoria de la Tabla No.61

UNIDADES TOTALES DE LADRILO DE ARCILLA (CLAY BRICK)				
Dv (Altura ladrillo)	0.07	CL =	$\frac{1}{(Jh + Dh) \times (Jv + Dv)}$	
Dh (longitud ladrillo)	0.24			
Jh (Altura de junta)	0.015	CL =	$\frac{1}{0.021675}$	46.136
Jv (ancho de junta)	0.015			
UNIDADES DE LADRILLO (CL)/M ²	46.136	UND/M ²		
CANTIDAD TOTAL DE M ²	282.3	M ²		
TOTAL UNIDADES DE LADRILLOS	13,024	UND		

PESO TOTAL MUROS DE LADRILO DE ARCILLA COCIDO (CLAY BRICK)					
ESPECIFICACION	DIMENSION (ML)	UNIDAD	PESO UNIDAD	CANTIDAD	PESO TOTAL [Kg]
LADRILLO TOLETE	0.24 X 0.12 X 0.07	KG	2.3	13,024	29,955

MORTERO DE PEGA RELACION 1:4 / AREA TOTAL D MURO					
Vol . Mort 1	Area Muro x Ancho ladrillo	33.88	M ³	FACTOR DESPERDICIO	
Vol. Mort 2	Número de Ladrillos x Largo Ladrillo x Alto Ladrillo x Ancho Ladrillo	26.26	M ³	1.05	
CANTIDAD TOTAL MORTERO (M³)		7.62	M³	8.00	

PROPORCION O MEZCLA	CEMENTO		ARENA M ³	AGUA LITROS		RESISTENCIA A LA COMPRESION		
	KILOS	SACOS [50kg]		ARENA SEC.	ARENA HUM.	KG/CM ²	Lbs./In ²	
1 : 3	454	9	1.09	220	185	280	3980	
1 : 4	364	7.25	1.16	185	170	240	3400	MORTERO DE PEGA

- **Cubierta**

Tabla No.63:

Emisiones de CO₂ generadas por la cubierta

				PESO [KG/UNIDAD]	UNIDAD	CANTIDAD	PESO TOTAL [KG]	INDICADOR [Kg CO ₂ / Kg]	EMISIONES TOTALES [Kg CO ₂]
CUBIERTA	Cubierta	Teja ondulada [Asbesto -cemento]	Asbesto - cemento	16.12	M ²	69.37	1118.1	0.45	503.2
	Estructura	Vigas cerchas en acero figurado armado y soldado tipo Warren sección triangular	Acero						
		Vigas de madera maciza 4" x 2"	Madera						
		Viguetas en Lisonos de Pino	Madera de Pino						
	Cielo	Machimbres de pino inmunizado capa de barniz	Madera de Pino						
EMISIONES TOTALES DE CO₂									503.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No.64:

Memoria Tabla No.63.

TEJA	LONG		ANCHO		SUPERFICIE		TRASLAPO			PESO	UTIL / M²	
No.	TOTAL	UTIL	TOTAL	UTIL	TOTAL	UTIL	LONG	LATERAL	NOMINAL	TOTAL / M²		
3	0.91	0.77	1.053	1.1	0.96	0.85	0.77	0.14	0.05	13.62	14.21	17.69
6	1.83	1.69	1.053	1.1	1.93	1.86	1.69	0.14	0.05	27.24	14.14	16.12
12	3.66	3.52	1.053	1.1	3.85	3.87	3.52	0.14	0.05	54.48	14.14	15.48

Fuente: ETERNIT. Teja Ondulada Perfil 10.

- **Piso en baldosa de concreto + Mortero de nivelación**

Tabla No.65:

Emisiones de CO₂ generadas por el piso en baldosa de concreto y el mortero de nivelación

				PESO [KG/UNIDAD]	UNIDAD	CANTIDAD	PESO TOTAL [KG]	INDICADOR [Kg CO ₂ / Kg]	EMISIONES TOTALES [Kg CO ₂]
PISOS	Piso en baldosa	Baldosa de cemento esmalado	Cemento Portland	454	M ³	2.08	946.4	0.50	473.2
			Arena						
			Agua						
	Mortero de nivelación	Mortero de nivelación	Ver mortero*	260	M ³	4.17	1084.0	0.50	542.0
EMISIONES TOTALES DE CO₂									1015.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No.66:

Memoria Tabla No.65

PROPORCION O MEZCLA	CEMENTO		ARENA M ³	AGUA LITROS		RESISTENCIA A LA COMPRESION		
	KILOS	SACOS [50kg]		ARENA SEC.	ARENA HUM.	KG/CM ²	Lbs./In ²	
1 : 2	610	12.5	0.97	250	220	310	4400	
1 : 3	454	9	1.09	220	185	280	3980	BALDOSAS CEMENTO
1 : 4	364	7.25	1.16	185	170	240	3400	
1 : 5	302	6	1.18	170	150	200	2850	
1 : 6	260	5.25	1.2	150	140	160	2280	MORTERO NIVELACION

Fuente: SENA-FAD. Formación Abierta y a Distancia. Obra Negra No.4. Mezclas. Autoconstrucción.

7.3.1.4. Datos consolidados de emisiones de CO₂ por material y participación en el total

Resumen del cálculo de emisiones de CO₂ por cantidad de materiales principales utilizados en la construcción de la vivienda objeto de estudio:

Tabla No.67:

Datos consolidados de emisiones de CO₂ por material y participación en el total

Material	Indicador [Emisiones Kg CO ₂ / Kg de Material]	PESO TOTAL [KG]	INDICADOR [Kg CO ₂ / Kg]	EMISIONES TOTALES [Kg CO ₂]	PORCENTAJE del peso total	PORCENTAJE EMISIONES TOTALES
Cemento	0.5 Kg CO ₂ / 1 Kg Cemento	11,667	0.50	5,833	48%	56%
Arena y la grava de río	0 Kg CO ₂ / 1 Kg Arena o Grava			-		
Acero de refuerzo	1.06 Kg CO ₂ / 1 Kg Acero	1,193	1.06	1,264	4.9%	12%
Ladrillo tolete	0.282 Kg CO ₂ / 1 Kg Ladrillo Tolete	10,123	0.28	2,855	42%	27%
Asbesto – cemento	0.45 Kg CO ₂ / 1 Kg Asbesto - cemento	1,118	0.45	503	4.6%	4.8%
TOTALES		24,101		10,456		100%
Total de emisiones debidas a la construcción [kg CO ₂]				10,456		
Emisiones totales [Ton CO₂]				10.46		

Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. Emisiones de CO₂ debidas a la operación

La “operación” se refiere a la suma de las actividades cotidianas que se llevan a cabo para hacer uso normal de la vivienda y que requieren consumo de energía eléctrica.

En consideración de lo anterior, para el desarrollo de este trabajo se define que el indicador con el que se calcularán las emisiones de CO₂ debidas a la operación de la vivienda, estará en función del consumo y será el mismo determinado como indicador de la producción de la energía eléctrica [Ver literal F. numeral 2. del 7.3.1. Emisiones de CO₂ debidas a la construcción], despreciando pérdidas en el transporte, la distribución y otros factores intermedios. De esta manera, el indicador a utilizar será 0.55 Kg CO₂ / 1 Kwh de energía eléctrica consumida.

Debido a que se suponen cero modificaciones en la estructura física de la vivienda, que generen aumento en el cálculo de emisiones de CO₂ producidas por los materiales que podrían haber sido utilizados, el origen de las emisiones de CO₂ que han ocurrido durante 50 años, solamente serán los atribuibles a su operación.

Identificar las emisiones de CO₂ durante la operación, permitirá visibilizar el aporte que una vivienda urbana [de condiciones similares en Santiago de Cali] libera a la atmosfera.

Para llevar a cabo el cálculo de emisiones de CO₂ debidas a la operación de la vivienda, se estableció un marco temporal de 50 años que inicia en el año en que la vivienda fue utilizada por primera vez, 1970 y finaliza en 2020.

Por la distancia del tiempo, no se conocen las referencias exactas y el total de los dispositivos eléctricos que fueron utilizados en los primeros años, por tanto, este trabajo recurrió a la recolección de información a través de entrevistas a personas del vecindario que han ocupado viviendas cercanas desde ese año y a los actuales residentes de la vivienda.

Para calcular los datos se elaborará una matriz que permita relacionar una ventana de tiempo, las características de los dispositivos utilizados y su consumo.

Para los dispositivos se tiene en consideración que, de acuerdo a su temporalidad, fueron remplazados por otros con el objetivo de actualizar su tecnología, mejorar su eficiencia y rendimiento.

7.3.2.1. Matrices de consumo de energía eléctrica

- 1970 – 1996: 26 años. Comprende el inicio de la operación de la vivienda y un cambio político – económico del país derivado de la implementación de la constitución de 1991. La apertura económica y sus efectos en la introducción de tecnologías y dispositivos al país.

Tabla No.68:

Matriz de consumo de energía eléctrica años 1970 - 1996

AÑO	Detalle	Cantidad	Potencia - consumo	Horas Uso	Consumo mes	Horas AÑO	AÑOS	Consumo total	Observaciones
1970		UND	Watts - hora (wh)	mes (H)	Kilovatios (Kwh)	12		Kilovatios (Kwh)	
	TELEVISOR	1	80	210	16.8	2520	26	5,242	TV 19" MARCA SHARP TUBOS [19F70]
	BOMBILLO INCANDESCENTE	9	60	150	9	1800	26	25,272	PHILIPS [FILAMENTO]
	BOMBILLO INCANDESCENTE	2	100	150	15	1800	26	9,360	PHILIPS [FILAMENTO]
	NEVERA	1	75	720	54	8640	26	16,848	HACEB 234 LITROS
	LAVADORA	0	0	0	0	0	26	-	NO HAY
	PLANCHA	1	1000	6	6	72	26	1,872	OSTER
	LICUADORA	1	450	1.5	0.675	18	26	211	OSTER
	EQUIPO DE SONIDO [RADIO]	1	40	120	4.8	1440	26	1,498	RADIO PEQUEÑA
	ESTUFA [ELECTRICA]	1	1000	60	60	720	26	18,720	HACEB 4 PUESTOS
	MIRCOONDAS	0	0	0	0	0	26	-	NO HAY
TOTAL CONSUMO [Kwh - mes]					166.28	CONSUMO [Kwh - año]	3,039.30	79,022	CONSUMO [Kwh - Total años]

Fuente: Elaboración propia

- 1996 – 2004: 8 años. Se decide tomar este año de referencia dado que se da inicio a la operación del gas domiciliario. La estufa eléctrica es reemplazada. Los bombillos incandescentes de filamento, son reemplazados por ahorradores de gas argón.

Tabla No.69

Matriz de consumo de energía eléctrica años 1996 - 2004

AÑO	Detalle	Cantidad	Potencia - consumo	HORAS USO	Consumo mes	HORAS AÑO	AÑOS	Consumo total	Observaciones
1996		UND	Watts - hora (wh)	mes (H)	Kilovatios (Kwh)	12		Kilovatios (Kwh)	
	TELEVISOR	1	80	210	16.8	2520	8	1,612.80	TV 19" MARCA SHARP TUBOS [19F70]
	BOMBILLO AHORRADOR	9	15	150	2.25	1800	8	1,944.0	SILVANIA ESPIRAL [COMO DE 60w]
	BOMBILLO AHORRADOR	2	20	150	3	1800	8	576.0	SILVANIA ESPIRAL [COMO DE 100w]
	NEVERA	1	83	720	60	8640	8	5,760	HACEB 234 LITROS
	LAVADORA	1	600	8.4	5.04	100.8	1	60	WIRLPOOL 16 KG CARGA SUPERIOR
	PLANCHA	1	1000	6	6	72	8	576	OSTER
	LICUADORA	1	600	1.5	0.9	18	8	86.4	OSTER
	EQUIPO DE SONIDO	1	60	120	7.2	1440	8	691.2	EQUIPO SONY
	ESTUFA [ELECTRICA]	1	0	0	0	0	8	-	INICIO OPERACION GASES DE OCCIDENTE
	MIRCOONDAS	1	1050	1	1.05	12	8	101	GENERAL ELECTRIC 0.7 ft
TOTAL CONSUMO [Kwh - mes]					102.24	CONSUMO [Kwh - año]	1,425.96	11,408	CONSUMO [Kwh - Total años]

ACTUALIZACIÓN
 INCORPORACION
 SUSTRACCIÓN

Fuente: Elaboración propia

- 2004 – 2010: 6 años. En este periodo fue remplazado el TV por uno de mayor tamaño.

Tabla No.70:

Matriz de consumo de energía eléctrica años 2004 - 2010

AÑO	Detalle	Cantidad	Potencia - consumo	HORAS USO	Consumo mes	HORAS AÑO	AÑOS	Consumo total	Observaciones
2004		UND	Watts - hora (wh)	mes (H)	Kilovatios (Kwh)	12		Kilovatios (Kwh)	
	TELEVISOR	1	180	210	37.8	2520	6	2,721.6	TV 29" MARCA SONY TRINITON PLANO [KV-29FS120]
	BOMBILLO AHORRADOR	9	15	150	2.25	1800	6	1,458.0	SILVANIA ESPIRAL [COMO DE 60w]
	BOMBILLO AHORRADOR	2	20	150	3	1800	6	432.0	SILVANIA ESPIRAL [COMO DE 100w]
	NEVERA HACEB	1	83	720	60	8640	6	4,320.0	HACEB 234 LITROS
	LAVADORA	1	600	8.4	5.04	100.8	8	483.8	WIRLPOOL 16 KG CARGA SUPERIOR
	PLANCHA	1	1000	6	6	72	6	432.0	OSTER
	LICUADORA	1	600	1.5	0.9	18	6	64.8	OSTER
	EQUIPO DE SONIDO	1	60	120	7.2	1440	6	518.4	EQUIPO SONY
	ESTUFA [GAS]	1	0	0	0	0	6	-	NO HAY
	MIRCOONDAS	1	1050	1	1.05	12	6	76	GENERAL ELECTRIC 0.7 ft
TOTAL CONSUMO [Kwh - mes]					123.24	CONSUMO [Kwh - año]	1,751.04	10,506	CONSUMO [Kwh - Total años]

Fuente: Elaboración propia

- 2010 – 2020: 10 años. Durante este periodo se incorpora un TV adicional a la vivienda, y se remplace el existente por uno de mayor tamaño con tecnología Smart. La nevera se remplace por una de mayor capacidad inverter. La lavadora se reduce de capacidad. Se remplace el equipo de sonido por uno de menor potencia.

Tabla No.71:

Matriz de consumo de energía eléctrica años 2010 - 2020

AÑO	Detalle	Cantidad	Potencia - consumo	HORAS USO	Consumo mes	HORAS AÑO	AÑOS	Consumo total	Observaciones
2010		UND	Watts - hora (wh)	mes (H)	Kilovatios (Kwh)	12		Kilovatios (Kwh)	
	TELEVISOR	1.5	180	210	37.8	2520	6	4,082.4	TV 50" MARCA SAMSUNG LED FHD
	BOMBILLO AHORRADOR	9	15	150	2.25	1800	6	1,458.0	SILVANIA ESPIRAL [COMO DE 60w]
	BOMBILLO AHORRADOR	2	20	150	3	1800	6	432.0	SILVANIA ESPIRAL [COMO DE 100w]
	NEVERA	1	51	720	36.6	8640	6	2,635.2	HACEB 432 LITROS - RL4363SBAS8 CONGERADOR INFERIOR CON MULTI FLOW 432 L
	LAVADORA	1	480	8.4	4.032	100.8	8	387.1	WIRLPOOL 13 KG CARGA SUPERIOR
	PLANCHA	1	1500	6	9	72	6	648.0	OSTER
	LICUADORA	1	600	1.5	0.9	18	6	64.8	OSTER
	EQUIPO DE SONIDO	1	26	120	3.12	1440	6	224.6	EQUIPO PANASONIC MICROCOMPONENTE
	ESTUFA [GAS]	1	0	0	0	0	6	-	NO HAY
	MIRCOONDAS	1	1050	1	1.05	12	6	76	GENERAL ELECTRIC 0.7 ft
TOTAL CONSUMO [Kwh - mes]					97.75	CONSUMO [Kwh - año]	1,667.95	10,008	CONSUMO [Kwh - Total años]

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.72:

Acumulado matrices de consumo de energía eléctrica años 1970 - 2020

RESUMEN - ACUMULADO CONSUMO ENERGIA ELÉCTRICA						
AÑO	CONSUMO [Kwh - mes]	CONSUMO [Kwh - año]	AÑOS	CONSUMO [Kwh - Total años]	ACUMULADO [AÑOS]	ACUMULADO [Kwh]
1970	166	3,039	26	79,022	26	79,022
1996	102	1,426	8	11,408	34	90,429
2004	123	1,751	6	10,506	40	100,936
2010	98	1,668	10	10,008	50	110,943

Fuente: Elaboración propia

Tomando la medición real de la vivienda en 2020 [Imagen No.], y comparándola con el cálculo de consumo estimado para el mismo año, se encuentra una diferencia de 4 Watts.

- Consumo real: 102 Kwh – mes [Ver imagen No.]
- Consumo estimado: 98 Kwh – mes [Ver Tabla No.]

Imagen No. 22:

Factura de servicios públicos domiciliarios de la vivienda de estudio – consumo de energía

EMPRESAS MUNICIPALES DE CALI E.I.C.E. E.S.P. Nit: 890.399.003-4		Esta es tu factura	
	CL 46 NORTE AV 2 C-32 CALI		CONTRATO
	Ruta 40003 3300 Ciclo 40 Mes Cuenta Agosto, 2020 Periodo Facturacion JUN 14 a JUL 13 Dias Facturados 30 Estado de Cuenta No. Nro. Predial Nal.		No. Pago Electronico
	TOTAL A PAGAR		FECHA DE VENCIMIENTO
	FECHA DE EXPEDICION		Agosto 19 - 2020 Agosto 08 - 2020
		R 2700 1/1	

ENERGIA			
Dir Instalación Uso Estrato	CL 46 NORTE AV 2 C-32 Residencial 4	CONCEPTOS Consumo De Energia Activa Valor Consumo Energia Interes de Mora (0.50%) Ajuste al Precio	Cantidad 102.00
Consumo de energia activa No. Medidor M1 Lectura Actual Lectura Anterior Diferencia Consumo Actual	D3CF_102006027 12.824 12.722 102 102 KWH	Consumos Anteriores (kWh) 	Valor Unitario Valor Total Subsid/Contrib Total a Pagar
			566.72 \$7,805.41 \$57,845.81

Fuente: Emcali.

7.3.2.2. Cálculo de emisiones de CO₂ generadas por el consumo de energía eléctrica

Para el desarrollo de este trabajo no se determinarán las emisiones de CO₂ generadas por la utilización de los dispositivos. Para identificar las emisiones de CO₂ debidas a la operación de la vivienda, se utilizará el cálculo de la energía eléctrica consumida y se afectará por el indicador correspondiente.

- El consumo de energía acumulado durante 50 años se ha calculado en 110.943 Kwh.

En la siguiente tabla se calcularán las emisiones de CO₂ en relación a los consumos realizados en las ventanas de tiempo definidas:

Tabla No.73:

Emisiones de CO ₂ debidas a la operación									
AÑO	CONSUMO [Kwh - mes]	EMISIONES MES [Kg CO ₂]	CONSUMO [Kwh - año]	EMISIONES AÑO [Kg CO ₂]	AÑOS	CONSUMO [Kwh - Total años]	ACUMULADO [Kwh]	INDICADOR [Kg CO ₂ / Kg]	EMISIONES TOTALES [Kg CO ₂]
1970	166	91	3,039	1,672	26	79,022	79,022	0.55	43,462
1996	102	56	1,426	784	8	11,408	90,429	0.55	6,274
2004	123	68	1,751	963	6	10,506	100,936	0.55	5,778
2010	98	54	1,668	917	10	10,008	110,943	0.55	5,504
Total de emisiones de CO ₂ en 50 años de operación [kg CO ₂]									61,019
Total de emisiones [Ton CO ₂]									61.0

Fuente: Elaboración propia

El total de emisiones de CO₂ a la atmosfera debida a la operación de la vivienda en **50 años**, es de **61 Toneladas**.

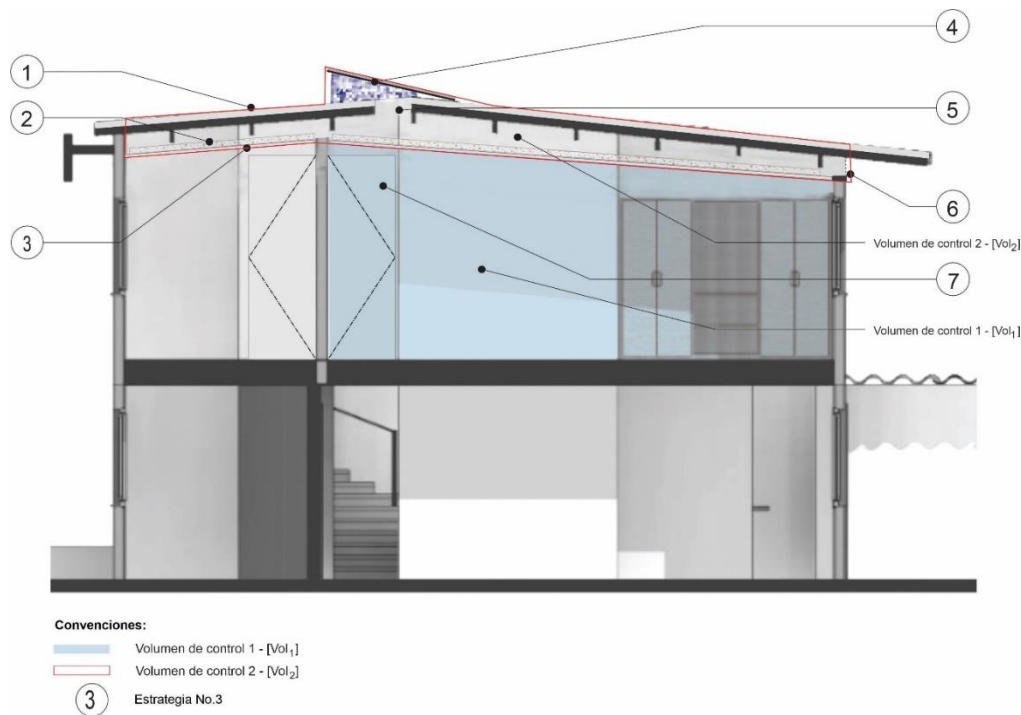
7.3.3. Emisiones de CO₂ debidas al mejoramiento del confort térmico

7.3.3.1. Estrategias para controlar y disminuir las emisiones de CO₂

En el segundo capítulo de este trabajo, que trata sobre el mejoramiento del confort térmico de la vivienda, se definieron dos grupos de estrategias, unas que influyen sobre la resistencia de los elementos y disminuyen finalmente la carga térmica al interior del volumen de control, y otras que operan debido al movimiento del aire por medio de la ventilación natural. En ambos casos, se deben realizar transformaciones y adiciones al volumen original, lo cual requiere la utilización de materiales y del consumo de energía eléctrica, así, se determinarán las emisiones de CO₂ debidas a la implementación de las estrategias para mejorar el confort térmico al interior del volumen de control definido dentro de la vivienda.

Gráfico No.54:

Localización espacial de las estrategias [Ver capítulo II – Gráfico No.35]



Fuente: Elaboración propia

7.3.3.2. Estimación de emisiones de CO₂ generadas por las transformaciones físicas a la vivienda

Teniendo como base las siete (7) estrategias establecidas en la línea de análisis No. 1. para lograr el mejoramiento del confort térmico, se calcularán las emisiones de CO₂ generadas por las transformaciones y las adiciones físicas realizadas a la vivienda para su implementación.

Debido a la escasez de fuentes de información verificables, se recurre a utilizar una fuente encontrada en el artículo “Evaluación de la disminución de emisiones de CO₂ en el campo de la construcción a través de la selección de materiales: Estudio de caso práctico de tres casas de bajo impacto ambiental” realizado en Valladolid – España, publicado en 2006 en ELSEVIER en el número “Building and Environment 41 (2006) 902–909 (González & García Navarro, 2006). La fuente es europea y no latinoamericana, por tanto, los valores de las emisiones pueden ser distintos a las locales debido a la tecnología utilizada para la producción de los materiales. Los datos sobre indicadores de emisiones de materiales, fueron tomados del artículo “Life cycle analysis model for New Zealand houses” producido por la Escuela de Arquitectura de la University of Auckland en New Zealand (Mithraratne & Vale, 2004).

La siguiente tabla determina el valor de las emisiones generadas para lograr el mejoramiento del confort térmico desarrollado en el Capítulo II de este trabajo:

Tabla No.74:

Tabla de emisiones de CO₂ debidas a la implementación de estrategias para mejorar el confort térmico

ESTRATEGIA		LUGAR DE IMPLEMENTACION	ACCIÓN	ACTIVIDAD	UNID	CANT	INDICADOR [Kg CO ₂ / UND]	EMISIONES [Kg CO ₂]
No.1	Disminuir la absortividad	[Vol ₂] Cubierta	Tratamiento de superficie.	Pintura blanca sobre teja de fibrocemento	M ²	69.37	0	0
No.2	Aumentar resistencia	[Vol ₂] Cielo segundo piso	Adición de elemento.	Instalación de lámina en lana mineral [Fiberglass]	M ²	69.37	0	0
No.3	Aumentar resistencia	[Vol ₂] Cielo segundo piso	Remplazo de elemento.	* Instalación de lámina drywall - reemplaza machimbre de pino	Kg	381	0.099	37.5
No.4	Evacuar aire caliente retenido	[Vol ₂] Cumbre de la cubierta	Elevar la temperatura del aire en la salida para acelerar el movimiento ascendente del aire caliente.	* Instalación de lámina de vidrio crudo de 4 mm y pintarla de negro.	Kg	112	0.26	28.76
No.5	Generar área de salida	[Vol ₂] Cumbre de la cubierta	Apertura en la parte superior del techo.	Eliminación elemento cumbre y retroceso de tejas superiores	ML	7	0	0
No.6	Generar área de entrada	[Vol ₁] Muro alzada Nor-Este	Apertura en la parte superior del Muro	Demolición muro y Adecuación apertura con malla	Kwh	1.95	0.55	1.07
				* Adecuación vano [Acabado con estuco mortero y estuco listo]	Kg	94	0.073	6.82
No.7	Aumentar área de salida	[Vol ₁] Habitaciones segundo piso	Apertura en la parte superior de las puertas	Demolición muro superior puertas	Kwh	1.43	0.55	1.01
				* Adecuación vano a H = 2.4m [estuco mortero y estuco listo]	Kg	40	0.073	2.91
TOTAL [Kg CO ₂]								78.07

CONVENCIONES

Vol₁. Volumen de control 1
Vol₂. Volumen de control 2

FUENTE

DESCRIPCION BASE	UND	RELACIÓN
ESTRATEGIA No.3	M ²	Kg/M ²
Plasterboard partitions	56	6.8

ESTRATEGIA No.4	M ²	Kg/M ²
-----------------	----------------	-------------------

* Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact

Factor peso del vidrio [Tecniglass]	11.2	10
Peso aprox. = Área [M ²] x Espesor [mm] x 2,531		

ESTRATEGIA No.6 y 7	Lts	Kg
Gypsum plastering:	56.25	93.75
Rendimiento 25Kg /15Lts	24	40

Fuente: Elaboración propia

ESTRATEGIA No.6 y 7	Watts	Hr
Demoliciones realizadas con Rotomartillo Makita HR2470	780	2.5
		1.8

7.3.4. Estrategias para reducir las emisiones de CO₂ producidas por la vivienda

Como uno de los resultados de este trabajo de investigación se concluye, que el total de emisiones de CO₂ producidas por la vivienda se describe como lo muestra la siguiente tabla:

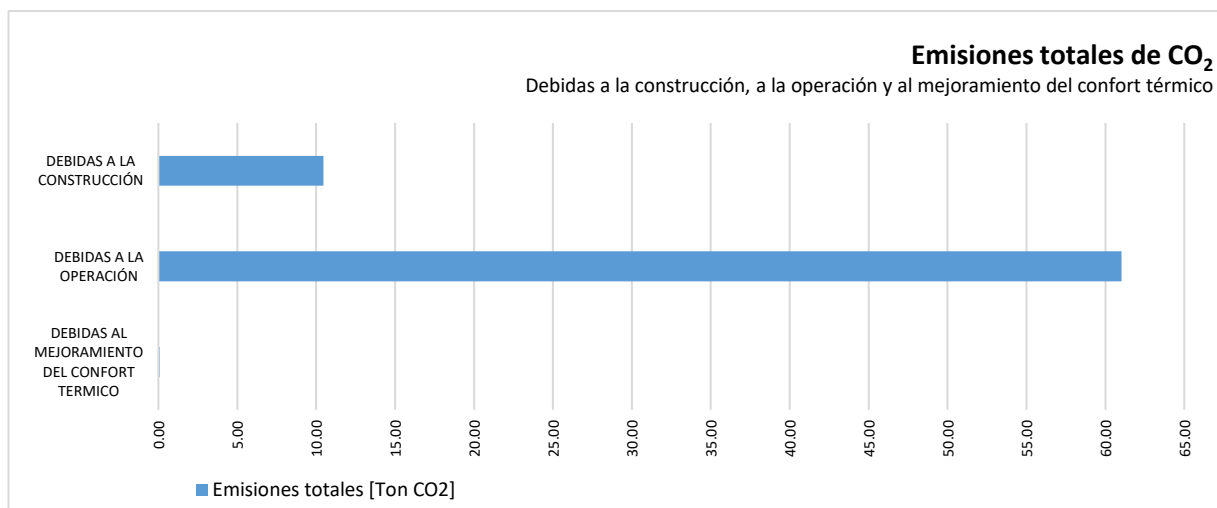
Tabla No.75:

Datos consolidados de emisiones de co ₂ producidas por la vivienda	Emisiones [Ton CO ₂]
DEBIDAS A LA CONSTRUCCIÓN	10.46
DEBIDAS A LA OPERACIÓN	61.02
DEBIDAS AL MEJORAMIENTO DEL CONFORT TERMICO	0.08

Elaboración: propia

Gráfico No. 55:

Comparación de emisiones totales de CO₂



Elaboración: Propia.

La mayor carga de emisiones de CO₂ corresponden a la operación de la vivienda, por tanto, las estrategias para reducirlas deben centrarse en este escenario.

El cálculo de emisiones de CO₂ debidas a la operación de la vivienda fue estimado en función del consumo de energía eléctrica, utilizando el indicador determinado para este caso [Ver literal F. numeral 2. del 7.3.1. Emisiones de CO₂ debidas a la construcción].

Como el indicador está en función de la fuente de generación de la energía, la principal estrategia deberá ser el remplazo parcial o total de la fuente utilizada.

Como fuentes para la generación de energía eléctrica domiciliaria disponibles en el mercado, viables para ser instaladas como remplazo de la fuente actual se encontraron:

Tabla No.76:

Fuentes alternativas de generación de energía	Dispositivos
Solar	Paneles Solares policristalinos [PV Panel - [Si]
Eólica	Micro - generadores turbinas de viento

Fuente: Elaboración propia

Se define como fuente de generación de energía para remplazar la utilizada convencionalmente, la generación solar.

Los dispositivos para la generación de energía solar son Paneles solares policristalinos.

Rendimiento y capacidad de Paneles solares a instalar

A pesar de lo generalmente conocido, los paneles solares generan emisiones de CO₂ a la atmósfera en tres momentos, debidos a su producción, durante su utilización para la generación de energía eléctrica y en el proceso de reciclaje (Yıldız et al., 2020).

Cuatro artículos referidos al análisis del ciclo de vida [LCA – Life Cycle Analysis] de la cuna a la tumba, de un panel solar, fueron revisados. El objetivo, consolidar un indicador de generación de CO₂ por 1m² de panel solar utilizado.

En “Investigation of life cycle CO₂ emissions of the polycrystalline and cadmium telluride PV panels”, se muestra información sobre los tres momentos del LCA comparando la generación de emisiones de CO₂ entre paneles solares policristalinos de Silicio [Si] y fabricados con Cadmium Telluride [CdTe] que funciona como semiconductor en la estructura del panel.

Para caracterizar el rendimiento de los paneles solares se deben hacer las siguientes consideraciones:

- La producción de un panel solar atraviesa diferentes estados. La mayor carga de emisiones se produce en el proceso de purificación del silicio [Si], debido al alto consumo de energía que esto requiere.
- Dado que el consumo de energía es significativo en la fabricación de paneles solares, la fuente de la generación de energía es relevante. Por lo tanto, esta investigación recoge información sobre la producción de paneles solares en cinco países con fuentes de energía y regímenes de asoleamiento diferentes:

Alemania, Brasil, Estados Unidos, China y Japón.

- La tecnología de los semiconductores utilizados en los paneles solares condiciona su rendimiento.
- La producción de CO₂ en la producción de paneles solares está condicionada por la tecnología del panel y la naturaleza de la fuente de energía que se utiliza para su fabricación.
- El país con menor número de emisiones de CO₂ en la fabricación de paneles solares es Brasil, debido a que su fuente de energía es hidroeléctrica.
- La obsolescencia de un panel solar está calculada para 25 años, sin embargo, el rendimiento adecuado se obtiene hasta un periodo de 17 años.
- De acuerdo a la revisión de Yildiz, las emisiones en el ciclo de vida del panel policristalino y del panel CdTe se determinaron en 201,4 y 115,04 kg CO₂, respectivamente (Yildiz et al., 2020).
- A pesar que las emisiones de CO₂ producidas por el panel de CdTe son menores, este presenta una baja eficiencia y contiene sustancias nocivas para la salud.
- La energía invertida en la producción del panel solar de Silicio es 9.5 veces más alta que la requerida en su reciclaje, lo cual valida la necesidad de reciclarlos.
- Según Yildiz, el CO₂ emitido por 1M² de panel solar con una potencia de 150W durante 17 años es en promedio 201.4 Kg CO₂, lo cual significa 1,72 toneladas de emisiones de CO₂ menos comparándose con una central de energía térmica durante el mismo tiempo.

Tabla No.77:

Emisiones generadas por 1 M² de panel fotovoltaico policristalino para diferentes países (Yildiz et al., 2020)

	CONDICIONES			EMISIONES [kg CO ₂]				
	IRRADIACION SOLAR [kWh/ m2-year]	POTENCIA GENERADA [kWh / M ²]	RENDIMIENTO	DEBIDAS A LA PRODUCCIÓN	DEBIDAS A LA GENERACIÓN (17 years)	DEBIDAS AL RECICLAJE	RETORNO DE LA ENERGÍA (year)	TOTAL EMISIONES
Alemania	1228	154.73	12.60%	125.42	60.35		1.35	185.77
Brasil	2096	297.28	14.18%	16.85	115.77	2	0.7	134.62
US	1996	251.88	12.62%	102.96	98.09		0.83	201.05
China	1834	231.09	12.60%	181.58	89.93	20.47	0.9	291.98
Japón	1552	195.55	12.60%	82.37	76.16		1.07	158.53

Fuente: Datos (Yildiz et al., 2020)

Elaboración: Propia.

En “LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review”, se define a través de la revisión de varios artículos, que, dependiendo de la localización de los paneles respecto a la edificación, la capacidad instalada y la irradiación solar, la generación de energía en el tiempo produce diferentes emisiones de CO₂. Las emisiones calculadas fueron diferenciales, algunos datos como los obtenidos del NREL en USA son 29 – 31 kg CO₂/m², mientras que en Singapur la producción de 1Kwh de AC sería de 165 g CO₂/kWh en 4.5 años (Varun et al., 2009).

En “Energy Payback Time and CO₂ Emissions of 1.2 kWp Photovoltaic Roof-Top System in Brazil”, artículo escrito por profesores del Instituto de Investigaciones sobre Energía y Energía Nuclear de la Universidad de São Paulo, se determina la generación de CO₂ durante la producción y la vida útil de los paneles solares para producir 1.2Kwhp montado en la terraza de un edificio. El ejercicio se realiza en varias ciudades de Brasil (Fukurozaki et al., 2013).

Este artículo, es de interés para la tesis dada la cercanía geográfica con Colombia y que la fuente de energía eléctrica de Brasil también es hidroeléctrica.

El artículo toma como determinante que las emisiones de CO₂ producidas por el BOS [Balance of System] en la fabricación de los paneles para la producción de 1.2Kwp es 159 Kg CO₂

En “Carbon footprint of the photovoltaic power supply chain in China”, artículo escrito por profesores del Laboratorio de Nuevas Energías y Desarrollo Bajo en Carbono de la Universidad de Energía Eléctrica del Norte de China en Baijing, se concluye que un sistema de generación de energía doméstica típico de China de 1 Kw bajo una iluminación de 3000h en toda su vida produce 47.584,23 kwh, reduciendo frente a los sistemas convencionales 23.684 ton de CO₂ liberado a la atmósfera.

En consecuencia, esta investigación, asumirá como fuente alternativa de generación de energía para reducir las emisiones de CO₂, un sistema conformado por paneles fotovoltaicos policristalinos de 150w de potencia por 1m², localizados en la cubierta de la vivienda.

Las condiciones del entorno se tomarán como el estándar proporcionado por la ficha técnica de un panel solar en el mercado colombiano. Condiciones de prueba estándar: Irradiancia: 1000 W / m² • Temperatura de la celda: 25 ° C • AM: 1,5 (Eco Green energy, 2018).

Tabla No.78:

TABLAS DE RENDIMIENTO Y CAPACIDAD OBJETIVO DEL SISTEMA DE PANELES SOLARES

TIPO PV PANEL	OBSOLECENCIA [AÑOS]	UTILIDAD [AÑOS]	RENDIMIENTO PORCENTAJE [%]	POTENCIA SALIDA [Wh]	DIMENSIONES [mm]
Panel fotovoltaico policristalino	25	12	15.13% [Ficha técnica]	150	1480 x 670 x 30

CAPACIDAD OBJETIVO [Wh]

DISPOSITIVOS	Watt	CAPACIDAD OBJETIVO [W]	CANTIDAD REQUERIDA [m ²]	GENERACION ELECTRICIDAD (Wh)	ELECTRICIDAD GENERADA - mes (Kwh-mes)
TV 50" MARCA SAMSUNG LED FHD	180	241	2	300	108
BOMBILLO AHORRADOR 15W	15				
BOMBILLO AHORRADOR 20W	20				
EQUIPO DE SONIDO	26				
TOTAL CAPACIDAD OBJETIVO [Wh]	241				

Elaboración: Propia

En consideración:

- El consumo de energía de la vivienda en estudio se calculó en 98 Kwh – mes, lo cual significa que con 2 paneles solares de 150W cubriendo 2 m², teóricamente estaría cubierto el requerimiento de energía eléctrica. Sin embargo, eso no es cierto de forma absoluta, debido a que la dinámica de consumo de energía en la operación de una vivienda, está afectada por picos de potencia que son requeridos por algunos dispositivos como la nevera. Por tanto, este dispositivo, aunque es uno de los que generan mayor consumo, no entraría en el sistema de generación.
- A pesar de ser Brasil un productor de paneles solares cercano, se utilizarán los valores determinados para un panel solar con origen China, de la misma forma, los valores asociados a las emisiones debidas a su producción, utilización y reciclaje.
- El cálculo de emisiones de CO₂ con el uso de sistema de paneles solares, se proyectará para 50 años tomando como línea base las 61.02 Ton CO₂ calculadas en la operación de la vivienda.

- Se asumirá como vida útil de los paneles 15 años, por tanto, se suponen 3 cambios de la dupla de paneles en un periodo de 50 años.

En consecuencia, con el uso del sistema alternativo de generación de energía, las emisiones de CO₂ obtenidas son las siguientes:

Tabla No.79:

EMISIONES [Kg CO₂] DEBIDAS A LA PRODUCCIÓN, GENERACION Y RECICLAJE DEL SISTEMA DE PANELES SOLARES

ORIGEN PV PANEL	PRODUCCION 1 PANEL/M ²	TOTAL PRODUCCIÓN	GENERACIÓN [17 AÑOS]	RECICLAJE [17 AÑOS]	EMISIONES TOTALES	RENOVACION [50/15 Años]	TOTAL EMISIONES 50 AÑOS
China	181.58	363.16	179.86	40.94	583.96	3	1,947

Elaboración: Propia.

Resultados obtenidos:

- Las emisiones de CO₂ calculadas para una operación de 50 años, basadas en el consumo de la vivienda en ese periodo de tiempo serían de 1.947 Kg CO₂. [1.9 Ton CO₂]
- Frente a la cantidad de emisiones producidas por la fuente de energía hidroeléctrica como sistema convencional, la utilización de paneles solares **reduciría 59.12 Ton de CO₂** liberadas a la atmósfera en 50 años de operación.
- En consecuencia, queda plenamente confirmada la hipótesis inicial del trabajo. Si es posible la reducción de emisiones de CO₂ de una vivienda urbana en Santiago de Cali.

8. CONCLUSIONES GENERALES

El documento de tesis confirma finalmente las hipótesis de trabajo planteadas.

CAPÍTULO 1

Del capítulo I, dedicado a obtener línea base para el mejoramiento del confort térmico interior, se concluye lo siguiente:

- Comparando la cantidad de irradiancia solar obtenida por las superficies expuestas al asoleamiento entre las 10:00 horas y las 13:00 horas, la mayor carga se da a las 13:00 horas. Un acumulado total de 32.826 W/m².
- Como lo muestra el gráfico No.9, la mayor irradiancia es ganada por la cubierta con dirección al NNE con el 41% del total.
- La hora de mayor irradiancia en la fecha de diseño 21 de marzo se calculó a las 12:00 horas, igualmente la cubierta fue la superficie que mayor ganancia obtuvo, como lo muestra el gráfico No.11.
- Modelados los elementos expuestos al asoleamiento en su estado original, se determinó que siendo la cubierta el elemento que más aporta carga térmica al interior, el volumen de control debe estar en el segundo piso.
- De la misma manera, dadas las condiciones de uso y cargas registradas se definió que el espacio de mayor concentración de calor en el segundo piso es la habitación No.1. Por tanto, esta se tomó como volumen de control.
- En consecuencia, se determinó que el volumen de control sometido al cálculo térmico con el CBE – Thermal Comfort Tools, no se encuentra en estado de confort.
- Frente a la ventilación, no es usado ningún equipo mecánico para dinamizar la ventilación interna ni de refrigeración.
- La ventilación natural no es suficiente para arrastrar la carga térmica calculada en el interior del volumen de control. Adicionalmente, la cubierta funciona como un retenedor de calor que se traslada al interior del volumen de control por inercia térmica debido a que se concentra, se calienta y va perdiendo calor en la medida en que la cubierta deja de recibir radiación, es decir en las horas de la noche.
- Los métodos NORMA utilizados para el cálculo de la ventilación natural, a pesar de introducir factores que hacen preciso su modelo, no vinculan la carga térmica como una de sus variables. Por tanto, el objetivo, aparentemente está dirigido a la calidad del aire interna de la edificación y no al confort térmico debido al uso de la ventilación natural.
- El resultado del método NORMA registra que se producen los recambios de aire por hora suficientes para lograr la calidad del aire adecuada. Sin embargo, el Macro del Ing. Macias define que no se alcanza a arrastrar la carga térmica interna.
- De esta manera, queda en el criterio del arquitecto diseñador la implementación de estrategias de ventilación natural que trabajen en función de permitir la calidad del aire interior, al mismo tiempo que conduzcan a configurar espacios térmicamente confortables.

CAPÍTULO 2

Del capítulo II, dedicado a transformar las condiciones del volumen de control para logra el mejoramiento del confort térmico interior determinado en la línea base, se concluye lo siguiente:

- Fueron identificados 7 efectos adversos frente a los cuales se plantean operaciones arquitectónicas para impactarlos en función del mejoramiento del confort térmico interior.
- De las 7 estrategias se pueden implementar de manera real 4, lo cual permite realizar mediciones del comportamiento térmico en sitio que validan los resultados obtenidos por el cálculo de las temperaturas internas.
- Los resultados finales son positivos. Se logra el mejoramiento del confort térmico interno del volumen del control, y de esta manera, se impacta la vivienda de manera integral.
- Los resultados más relevantes son los siguientes:
 - La carga térmica interna decreció 2.677 W
 - La temperatura de la cubierta se redujo 6.16°C
 - La TMR bajó 1.5°C
 - EL PPD - porcentaje de personas insatisfechas, disminuyó 45 por ciento.
 - Se incrementó el flujo del aire debido a la ventilación cruzada en el Vol₁ 68 M³/h, mientras que en el Vol₂ una vez realizadas las modificaciones en el volumen se incrementó 1.796 68 M³/h de acuerdo al método Norma de los 35 pasos.
 - Los ACH en el Vol₁ aumentaron en 2 mientras que, en el Vol₂, volumen modificado, aparecen 76 ACH nuevas.
 - El efecto chimenea no aplica en el Vol₁ en ninguno de los casos, pero con la modificación del Volumen de control el Vol₂ incorpora 1.593M³/h
 - Según el Macro del Ing. Macias, que incorpora la carga térmica y la presión atmosférica en sus variables, la línea base requiere un flujo de aire de 1.287 M³/h para retirar la carga original. Una vez realizadas las modificaciones al volumen no se requiere flujo de aire adicional para retirar la carga térmica interna calculada.
- Las mediciones de temperatura realizadas con termómetro infrarojo digital posteriormente a la implementación física de las estrategias, validan los datos calculados en los modelos.
- En consecuencia, las operaciones arquitectónicas definidas para transformar los datos de la línea base son positivas y se confirma la hipótesis No.1 de esta tesis.

CAPÍTULO 3

Emisiones de CO₂ debidas a la construcción

El sector de la construcción es responsable de una cantidad significativa de emisiones de CO₂ a la atmósfera. De acuerdo a la información encontrada, el origen de los resultados procede de tres vertientes, por una parte, de las evaluaciones realizadas por el sector privado para generar sus propios reportes que se suministran a los gobiernos quienes la trasladan al IPCC y, por otra parte, la procesada por organismos no gubernamentales, que regularmente es más acertada y crítica que la primera. Y la tercera obedece a ejercicios de investigación académica como proyectos de tesis.

Esto hace posible acceder a datos muy recientes sobre el análisis de emisiones en la producción de materiales para la construcción como el cemento, la fabricación de ladrillos y la producción de acero.

Por una parte, es posible acceder a datos recientes de la producción de materiales, dado que las agremiaciones de los sectores asociados a la construcción, como el cementero y el ladrillero, tienen interés en generar información sobre el crecimiento de la industria, pero estos informes de crecimiento de la producción, rara vez evalúan al impacto al ambiente en emisiones de CO₂. Por otra parte, se encuentran las investigaciones sobre la fabricación de materiales de construcción, que enfocan su interés en la producción de gases contaminantes, pero no asocian el crecimiento del sector estudiado con los impactos encontrados en sus conclusiones.

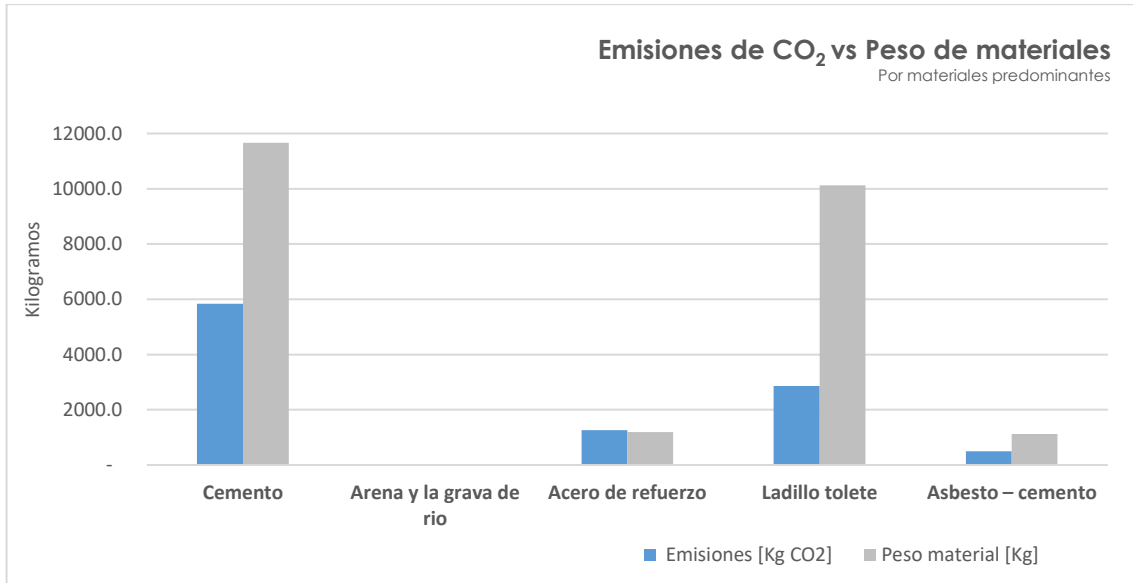
- Para el cálculo de la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera durante la construcción de la vivienda objeto de estudio, es necesario precisar que la investigación asume los materiales utilizados como totalmente acabados, prefabricados y suministrados de manera individual para ser instalados, excepto el concreto y el mortero que se preparan en la obra.
- Por lo anterior, las únicas emisiones de CO₂ que se producen durante la construcción de la vivienda se asocian al consumo de energía durante la operación de los equipos de construcción y al transporte de los insumos requeridos para la obra.
- No se conocen los equipos utilizados, tampoco el tiempo de uso de los mismos; por lo tanto, en este trabajo no se estiman las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera ocasionadas por la operación de equipos durante la construcción de la vivienda.
- Debido a lo anterior, se encuentra que los únicos elementos medibles que se conocen son los materiales de construcción con los cuales se ha fabricado la vivienda.
- Así que, este trabajo de investigación define entonces calcular las emisiones de CO₂ de los materiales utilizados en la construcción de la vivienda.
- Adicionalmente, esta investigación permitirá conocer la huella de carbono producida por la construcción de la vivienda objeto de estudio.
- El cálculo se realizó para los materiales predominantes en la construcción de la vivienda. Se identificaron materiales en estado comercial, se enlistaron, se descompusieron para obtener los materiales en estado primario y se llevó a cabo la investigación correspondiente para conocer las emisiones correspondientes por cada uno.
- La información sobre emisiones de CO₂ generadas por en la producción de materiales de construcción no se encuentra concentrada.

- La investigación, permitió identificar al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático – [Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC], como una fuente verificable de orden global.
- El IPCC, es un organismo de las Naciones Unidas autorizado a nivel mundial por los países miembros para registrar e informar sobre la emisión de gases efecto invernadero dentro de los se encuentra el CO₂, debidos a la fabricación de materiales para la construcción como el cemento y el acero.
- Las fuentes encontradas registran información de los últimos 10 años aproximadamente, por tanto, se encuentra afectada por las estrategias para la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera que han asumido los países miembros de la ONU y de convenios internacionales como el Protocolo de Kioto.
- Es posible que, al momento de la fabricación de los materiales analizados, es decir, en torno a 1970, las emisiones de CO₂ producidas en su fabricación hayan sido mayores.
- El peso total de la vivienda obtenido a partir de los materiales predominantes enlistados en este capítulo es **24 Toneladas**.
- Si el área construida de la vivienda objeto de estudio son 139.2 M², entonces, el peso equivale a **173 Kg / M²**.
- El total de emisiones de CO₂ a la atmósfera generados por la producción de los materiales utilizados para la construcción de la vivienda fueron **10.5 Toneladas**.
- Si el área construida de la vivienda objeto de estudio son 139.2 M², entonces, las emisiones producidas equivalen a **75.5 Kg CO₂ / M²**.
- Según la relación de emisiones de CO₂ en relación al peso de los materiales predominantes utilizados en la vivienda [ver gráfico No.56]:
 - a. El material que mayor peso aporta a la vivienda es el cemento [11.667 Kg].
 - b. El material que representa la mayor cantidad de emisiones de CO₂ es el cemento [5.833 Kg CO₂]
 - c. El acero de refuerzo genera más emisiones de kg CO₂ que su peso total en la vivienda. [1.264 Kg CO₂ Vs. 1.193 Kg].
 - d. Para la vivienda objeto de estudio, el peso aportado por el acero de refuerzo es similar al de la cubierta [1.193 Kg Vs. 1.118 Kg].
 - e. El ladrillo macizo de arcilla cocido - tolete es el material que genera el menor número de emisiones de Kg CO₂ por Kg de material producido [relación 1: ± 4]
 - f. El ladrillo representa el segundo material con mayor contribución de peso a la vivienda [10.123 Kg].
 - g. El Asbesto – cemento es el material que menor número de emisiones aporta en la vivienda [503 Kg CO₂].
 - h. El cemento equivale al 48.8% del peso total de la vivienda y genera el 55.8% del total de emisiones de CO₂.
 - i. El cemento aporta aproximadamente la mitad del peso total de la vivienda y la mitad de las emisiones de CO₂ totales.
 - j. El asbesto - cemento representa el menor peso en la vivienda con solo el 4.6% del total.
 - k. El Asbesto - cemento aporta el 4.8% del total de emisiones de CO₂.
 - l. En la vivienda objeto de estudio, con una configuración definida por dos pisos, un entrepiso en losa maciza reforzada con malla electrosoldada y varillas de acero en las vigas de la estructura, el peso del acero de refuerzo es muy cercano al peso total de la cubierta.
 - m. No obstante, el aporte del acero es superior al de Asbesto Cemento, representa un 12% del total de CO₂.

- n. El ladrillo tolete respecto al peso total de la vivienda, aporta un valor cercano al del cemento [42% del total del peso].

Gráfico No. 56:

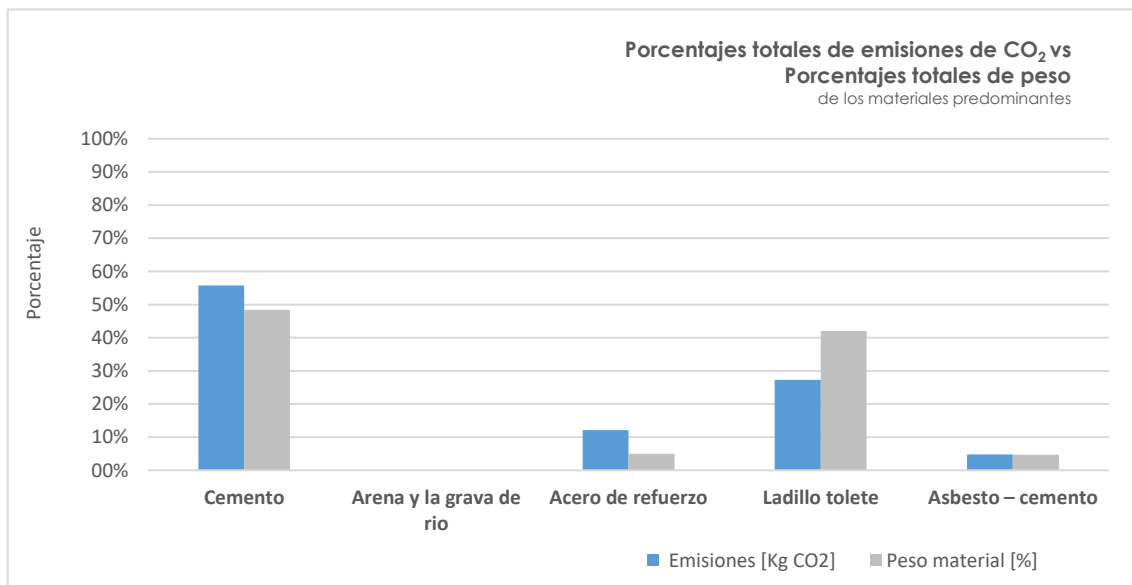
Emisiones de CO₂ Vs Peso de materiales



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico No. 57:

Porcentajes totales de emisiones de CO₂ Vs Porcentajes totales de peso



Fuente: Elaboración propia.

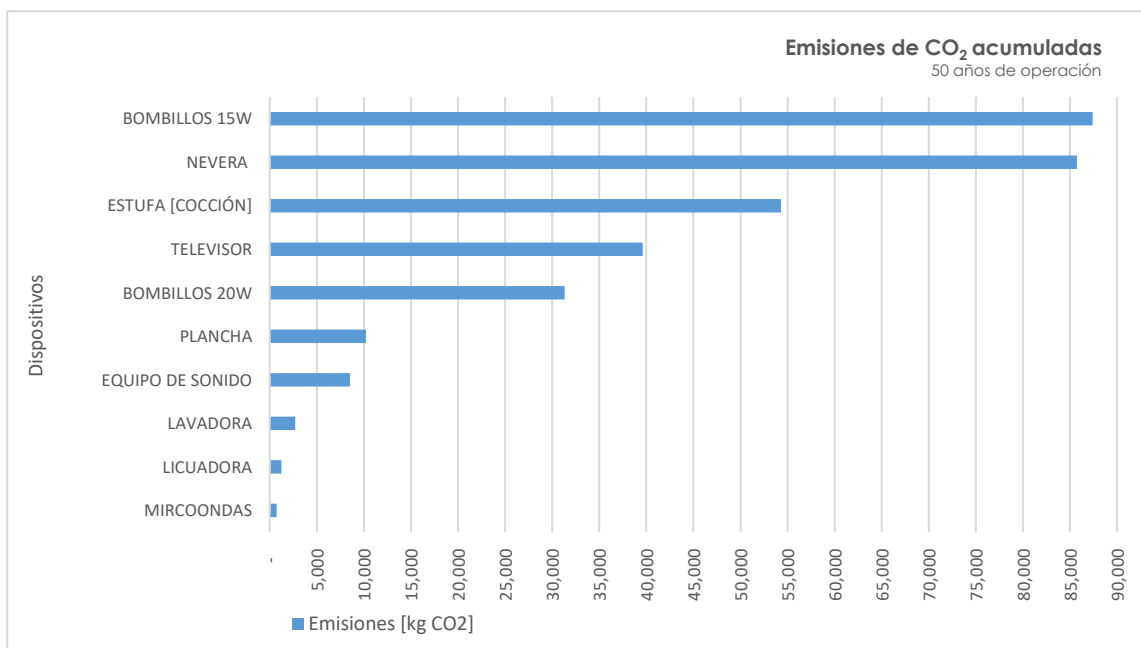
- o. Respecto al porcentaje de emisiones de CO₂, el ladrillo tolete es el único que genera un porcentaje [42% del total del peso] menor que el aporte de su peso al peso total de la vivienda [27% del total de emisiones CO₂].
- p. El Asbesto - cemento de la cubierta es el material que menos aporta al peso total de la vivienda [4.6% del total del peso].
- q. El Asbesto - cemento de la cubierta es el material que menos aporta a las emisiones totales de CO₂ de la vivienda [4.8 % del total de emisiones producidas por los materiales].

Emisiones de CO₂ debidas a la operación [Gráfico No.58]

- El consumo de energía eléctrica acumulado requerido para la operación de la vivienda durante 50 años, calculado con el uso de los dispositivos enlistados en este capítulo es **110.943 Kwh**.
- El total de emisiones de CO₂ a la atmósfera acumuladas, debidas a la operación de la vivienda calculadas para un periodo de 50 años, bajo el uso de los dispositivos enlistados en este capítulo equivalen a **321.7 Toneladas**.
- En promedio se generaron **6.4 Toneladas** de CO₂ anualmente debidas a la operación de la vivienda.
- Los dispositivos que mayor cantidad de emisiones de CO₂ produjeron son los bombillos ahorradores, la nevera y la estufa eléctrica.
- La estufa eléctrica es el dispositivo que ocupa el tercer lugar en generación de emisiones, solamente se calculó en un periodo de 26 años, lo cual supone que en un periodo de 50 años habría sido el dispositivo que representase la mayor generación de CO₂. [36 Toneladas aproximadamente].

Gráfico No. 58:

Emisiones acumuladas de CO₂ en 50 años de operación



Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de CO₂ debidas a la transformación del volumen de control para mejorar el confort térmico

- La implementación de las 7 estrategias para mejorar el confort térmico de la vivienda genera emisiones de CO₂.
- No fue posible obtener información sobre la emisión de CO₂ producidas por la fabricación de la pintura blanca, ni tampoco por la fabricación de la lámina de lana mineral [fiberglass], por tanto, estas emisiones no serán tenidas en cuenta.
- La relocalización de las tejas de asbesto-cemento no genera emisiones por tanto no aplica.
- La estrategia que mayor cantidad de emisiones de CO₂ produce es la No.3, corresponde a la utilización de placas de drywall en el cielo.
- La segunda estrategia en orden de emisiones es la No.4 que corresponde a la utilización de vidrio crudo de 4mm.
- La actividad que menos emisiones produce es la demolición de los muros, pues se calcula con base en la utilización de energía eléctrica y el tiempo de uso es corto.
- Las emisiones totales de CO₂ producidas por las operaciones arquitectónicas en función del mejoramiento del confort térmico al interior del volumen de control son de **78.08 Kg CO₂**.

Conclusiones generales del capítulo 3:

- Con la utilización de paneles solares, es posible reducir la generación de emisiones de CO₂ producidas por la operación de la vivienda.
- En una proyección de 50 años, como horizonte de tiempo para comparar frente a las emisiones generadas desde 1970 cuando se dio inicio al funcionamiento de la vivienda, se reducirían 59.2 Ton CO₂.
- Las emisiones debidas a la operación se calcularon en 61.02 toneladas. El ahorro de emisiones logrado con la implementación del sistema fotovoltaico equivaldría a una recuperación casi cercana al 100%, es decir, 59.2 Ton CO₂ ahorro proyectado / 61.02 Ton CO₂ producidas = 97% de retorno de las emisiones.
- Podría concluirse que la implementación de un sistema fotovoltaico en la vivienda conduciría, en un periodo de 50 años, al objetivo energía NETA CERO.
- De acuerdo a Kemenes, la generación de energía de origen hidroeléctrica es responsable, por la operación de propio sistema, de una cantidad importante de emisiones de CO₂ a la atmósfera (Kemenes et al., 2011), convirtiéndose en una fuente de energía renovable pero no totalmente limpia.
- Finalmente, se confirma la hipótesis No.2, si es posible *la reducción de emisiones de CO₂ con la implementación de tecnología no convencional y una manera controlada de habitar la vivienda*.
- Las tesis de este trabajo de investigación se encuentran debidamente confirmadas.

9. ANEXOS I

En esta aparte, se muestran la información complementaria de los capítulos desarrollados.

Capítulo I

7.1.2. Generación de data y cálculo de línea base del volumen de control

c. Irradiancia solar sobre la vivienda

Tabla No.8: Irradiancia Pared NNE 10:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR													
Irradiación Terrestre A	1164	W/m ²											
Razón adimensional B	0.149												
Razón adimensional C	0.109												
Superficie	PARED NNE												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Hora Standard	10:02	10:00	10:01	10:00	10:03	10:02	10:02	10:01	10:01	10:00	9:59	10:01	
Azimuth Solar ϕ	130.38	115.90	95.45	72.39	57.30	52.34	57.04	72.15	94.83	115.88	129.42	134.36	
Altitud Solar β	52.76	56.80	60.22	59.20	56.85	55.23	56.70	59.26	60.18	56.94	52.13	50.45	
Azimuth Superficie ψ	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	
Azimuth Solar Superficie γ	98.10	83.62	63.17	40.11	25.02	20.06	24.76	39.87	62.55	83.60	97.14	102.08	
Angulo de Inclinación σ	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	-0.0853	0.0608	0.2242	0.3916	0.4955	0.5357	0.4986	0.3923	0.2292	0.0608	-0.0763	-0.1333	
Razon de Radiación Difusa del Cielo Y	0.5150	0.5777	0.6637	0.7691	0.8434	0.8739	0.8457	0.7696	0.6666	0.5777	0.5185	0.4973	
Radiación Solar Directa E_{DN}	965.3174	974.1358	980.3862	978.6284	974.2348	970.9069	973.9372	978.7342	980.3189	974.4123	963.7848	959.4684	
Radiación Solar Difusa E_d	54.1896	61.3458	70.9234	82.0444	89.5615	92.4853	89.7750	82.1033	71.2317	61.3613	54.4675	52.0112	
Radiación Solar Reflejada E_r	135.4259	142.8019	148.4554	146.8273	142.8885	140.0236	142.6283	146.9244	148.3925	143.0441	134.2097	130.8817	
SUBTOTAL	107.31	263.42	439.15	612.12	715.20	752.61	717.96	612.99	444.34	263.66	115.14	55.04	

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.9: Irradiancia Pared ESE 10:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR													
Irradiación Terrestre A	1164	W/m ²											
Razón adimensional B	0.149												
Razón adimensional C	0.109												
Superficie	PARED ESE												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Hora Standard	10:02	10:00	10:01	10:00	10:03	10:02	10:02	10:01	10:01	10:00	9:59	10:01	
Azimuth Solar ϕ	130.38	115.90	95.45	72.39	57.30	52.34	57.04	72.15	94.83	115.88	129.42	134.36	
Altitud Solar β	52.76	56.80	60.22	59.20	56.85	55.23	56.70	59.26	60.18	56.94	52.13	50.45	
Azimuth Superficie ψ	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	
Azimuth Solar Superficie γ	8.10	-6.38	-26.83	-49.89	-64.98	-69.94	-65.24	-50.13	-27.45	-6.40	7.14	12.08	
Angulo de Inclinación σ	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	0.5991	0.5442	0.4432	0.3299	0.2313	0.1956	0.2299	0.3277	0.4413	0.5421	0.6091	0.6227	
Razon de Radiación Difusa del Cielo Y	0.9242	0.8805	0.8052	0.7282	0.6678	0.6475	0.6670	0.7268	0.8038	0.8789	0.9323	0.9434	
Radiación Solar Directa E_{DN}	965.3174	974.1358	980.3862	978.6284	974.2348	970.9069	973.9372	978.7342	980.3189	974.4123	963.7848	959.4684	
Radiación Solar Difusa E_d	97.2401	93.4911	86.0414	77.6799	70.9157	68.5197	70.8117	77.5361	85.8895	93.3481	97.9416	98.6677	
Radiación Solar Reflejada E_r	135.4259	142.8019	148.4554	146.8273	142.8885	140.0236	142.6283	146.9244	148.3925	143.0441	134.2097	130.8817	
SUBTOTAL	811.01	766.39	669.01	547.34	439.12	398.46	437.39	545.16	666.89	764.64	819.20	826.96	

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.10: Irradiancia Pared SSW 10:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
Irradiación Terrestre A	1164	W/m ²										
Razón adimensional B	0.149											
Razón adimensional C	0.109											
Superficie	PARED SSW											
Hora Standard	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Azimuth Solar ϕ	10:02	10:00	10:01	10:00	10:03	10:02	10:02	10:01	10:01	10:00	9:59	10:01
Altitud Solar β	130.38	115.90	95.45	72.39	57.30	52.34	57.04	72.15	94.83	115.88	129.42	134.36
Azimuth Superficie ψ	52.76	56.80	60.22	59.20	56.85	55.23	56.70	59.26	60.18	56.94	52.13	50.45
Azimuth Solar Superficie γ	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28
Angulo de Inclinación σ	-81.90	-96.38	-116.83	-139.89	-154.98	-159.94	-155.24	-140.13	-117.45	-96.40	-82.86	-77.92
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.0853	-0.0608	-0.2242	-0.3916	-0.4955	-0.5357	-0.4986	-0.3923	-0.2292	-0.0608	0.0763	0.1333
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.5895	0.5246	0.4678	0.4269	0.4103	0.4057	0.4099	0.4267	0.4663	0.5246	0.5852	0.6138
Radiacion Solar Directa E_{DN}	965.3174	974.1358	980.3862	978.6284	974.2348	970.9069	973.9372	978.7342	980.3189	974.4123	963.7848	959.4684
Radiacion Solar Difusa E_d	62.0309	55.6992	49.9865	45.5341	43.5717	42.9372	43.5179	45.5249	49.8235	55.7166	61.4731	64.1916
Radiacion Solar Reflejada E_r	135.4259	142.8019	148.4554	146.8273	142.8885	140.0236	142.6283	146.9244	148.3925	143.0441	134.2097	130.8817
SUBTOTAL	279.77	139.23	-21.33	-190.88	-296.29	-337.14	-299.41	-191.51	-26.50	139.51	269.22	322.93

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.11: Irradiancia Pared WNW 10:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
Irradiación Terrestre A	1164	W/m ²										
Razón adimensional B	0.149											
Razón adimensional C	0.109											
Superficie	PARED WNW											
Hora Standard	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Azimuth Solar ϕ	10:02	10:00	10:01	10:00	10:03	10:02	10:02	10:01	10:01	10:00	9:59	10:01
Altitud Solar β	130.38	115.90	95.45	72.39	57.30	52.34	57.04	72.15	94.83	115.88	129.42	134.36
Azimuth Superficie ψ	52.76	56.80	60.22	59.20	56.85	55.23	56.70	59.26	60.18	56.94	52.13	50.45
Azimuth Solar Superficie γ	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28
Angulo de Inclinación σ	-171.90	-186.38	-206.83	-229.89	-244.98	-249.94	-245.24	-230.13	-207.45	-186.40	-172.86	-167.92
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	-0.5991	-0.5442	-0.4432	-0.3299	-0.2313	-0.1956	-0.2299	-0.3277	-0.4413	-0.5421	-0.6091	-0.6227
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.4005	0.4049	0.4178	0.4399	0.4657	0.4765	0.4661	0.4404	0.4181	0.4051	0.3999	0.3992
Radiacion Solar Directa E_{DN}	965.3174	974.1358	980.3862	978.6284	974.2348	970.9069	973.9372	978.7342	980.3189	974.4123	963.7848	959.4684
Radiacion Solar Difusa E_d	42.1441	42.9908	44.6472	46.9245	49.4507	50.4269	49.4771	46.9843	44.6769	43.0242	42.0154	41.7544
Radiacion Solar Reflejada E_r	135.4259	142.8019	148.4554	146.8273	142.8885	140.0236	142.6283	146.9244	148.3925	143.0441	134.2097	130.8817
SUBTOTAL	-400.77	-344.30	-241.41	-129.09	-32.98	0.53	-31.84	-126.79	-239.54	-342.18	-410.83	-424.78

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.12: Irradiancia Cubierta NNE 10:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
Irradiación Terrestre A	1164	W/m ²										
Razón adimensional B	0.149											
Razón adimensional C	0.109											
Superficie	CUBIERTA NNE											
Hora Standard	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Azimuth Solar ϕ	10:02	10:00	10:01	10:00	10:03	10:02	10:02	10:01	10:01	10:00	9:59	10:01
Altitud Solar β	130.38	115.90	95.45	72.39	57.30	52.34	57.04	72.15	94.83	115.88	129.42	134.36
Azimuth Superficie ψ	52.76	56.80	60.22	59.20	56.85	55.23	56.70	59.26	60.18	56.94	52.13	50.45
Azimuth Solar Superficie γ	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28
Angulo de Inclinación σ	98.10	83.62	63.17	40.11	25.02	20.06	24.76	39.87	62.55	83.60	97.14	102.08
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.7367	0.7929	0.8424	0.8546	0.8471	0.8372	0.8461	0.8552	0.8427	0.7942	0.7315	0.7073
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	1.0418	1.0933	1.1402	1.1521	1.1448	1.1353	1.1438	1.1527	1.1405	1.0945	1.0372	1.0156
Radiacion Solar Directa E_{DN}	965.3174	974.1358	980.3862	978.6284	974.2348	970.9069	973.9372	978.7342	980.3189	974.4123	963.7848	959.4684
Radiacion Solar Difusa E_d	0.0764	0.0801	0.0836	0.0844	0.0839	0.0832	0.0838	0.0845	0.0836	0.0802	0.0760	0.0744
Radiacion Solar Reflejada E_r	84.2296	88.8171	92.3334	91.3207	88.8710	87.0891	88.7091	91.3811	92.2942	88.9677	83.4731	81.4032
SUBTOTAL	795.45	861.31	918.26	927.78	914.22	900.05	912.86	928.50	918.46	862.90	788.57	760.08

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.14: Irradiancia Pared NNE 13:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
Superficie	PARED NNE											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hora Standard	13:02	13:00	13:01	13:00	13:03	13:02	13:02	13:01	13:01	13:00	12:59	13:01
Azimuth Solar ϕ	-147.56	-134.18	-101.30	-59.64	-41.05	-35.57	-40.57	-59.46	-100.26	-133.80	-148.94	-151.84
Altitud Solar β	61.92	69.40	74.33	72.86	67.37	65.04	67.28	72.73	74.46	69.36	62.49	59.27
Azimuth Superficie ψ	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28
Azimuth Solar Superficie γ	-179.84	-166.46	-133.58	-91.92	-73.33	-67.85	-72.85	-91.74	-132.54	-166.08	-181.22	-184.12
Angulo de inclinacion α	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	-0.4707	-0.3421	-0.1862	-0.0099	0.1104	0.1591	0.1139	-0.0090	-0.1811	-0.3421	-0.4618	-0.5097
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.4137	0.4371	0.4795	0.5457	0.6020	0.6275	0.6038	0.5461	0.4811	0.4371	0.4149	0.4086
Radiacion Solar Directa E_{DN}	983.1278	992.7111	997.1149	995.9456	990.4794	987.5901	990.3744	995.8364	997.2127	992.6696	983.9966	978.7518
Radiacion Solar Difusa E_d	44.3273	47.3011	52.1130	59.2418	64.9985	67.5434	65.1839	59.2756	52.2952	47.2972	44.5050	43.5889
Radiacion Solar Reflejada E_r	151.0577	160.8035	165.6548	164.3420	158.4384	155.4648	158.3286	164.2204	165.7654	160.7589	151.8987	146.9406
SUBTOTAL	-267.38	-131.47	32.11	213.75	332.76	380.14	336.31	214.52	37.43	-131.58	-258.00	-308.31

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.15: Irradiancia Pared ESE 13:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
Superficie	PARED ESE											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hora Standard	13:02	13:00	13:01	13:00	13:03	13:02	13:02	13:01	13:01	13:00	12:59	13:01
Azimuth Solar ϕ	-147.56	-134.18	-101.30	-59.64	-41.05	-35.57	-40.57	-59.46	-100.26	-133.80	-148.94	-151.84
Altitud Solar β	61.92	69.40	74.33	72.86	67.37	65.04	67.28	72.73	74.46	69.36	62.49	59.27
Azimuth Superficie ψ	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28
Azimuth Solar Superficie γ	-269.84	-256.46	-223.58	-181.92	-163.33	-157.85	-162.85	-181.74	-222.54	-256.08	-271.22	-274.12
Angulo de inclinacion α	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	-0.0013	-0.0824	-0.1957	-0.2945	-0.3686	-0.3908	-0.3691	-0.2967	-0.1974	-0.0848	0.0098	0.0367
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.5494	0.5161	0.4765	0.4484	0.4314	0.4270	0.4314	0.4479	0.4759	0.5152	0.5543	0.5665
Radiacion Solar Directa E_{DN}	983.1278	992.7111	997.1149	995.9456	990.4794	987.5901	990.3744	995.8364	997.2127	992.6696	983.9966	978.7518
Radiacion Solar Difusa E_d	58.8770	55.8477	51.7863	48.6817	46.5799	45.9670	46.5650	48.6163	51.7321	55.7445	59.4548	60.4327
Radiacion Solar Reflejada E_r	151.0577	160.8035	165.6548	164.3420	158.4384	155.4648	158.3286	164.2204	165.7654	160.7589	151.8987	146.9406
SUBTOTAL	208.64	134.88	22.34	-80.32	-160.08	-184.56	-160.61	-82.67	20.65	132.33	221.03	243.31

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.16: Irradiancia Pared SSW 13:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
Superficie	PARED SSW											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hora Standard	13:02	13:00	13:01	13:00	13:03	13:02	13:02	13:01	13:01	13:00	12:59	13:01
Azimuth Solar ϕ	-147.56	-134.18	-101.30	-59.64	-41.05	-35.57	-40.57	-59.46	-100.26	-133.80	-148.94	-151.84
Altitud Solar β	61.92	69.40	74.33	72.86	67.37	65.04	67.28	72.73	74.46	69.36	62.49	59.27
Azimuth Superficie ψ	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28
Azimuth Solar Superficie γ	-359.84	-346.46	-313.58	-271.92	-253.33	-247.85	-252.85	-271.74	-312.54	-346.08	-361.22	-364.12
Angulo de inclinacion α	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	0.4707	0.3421	0.1862	0.0099	-0.1104	-0.1591	-0.1139	0.0090	0.1811	0.3421	0.4618	0.5097
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.8250	0.7361	0.6422	0.5543	0.5056	0.4884	0.5043	0.5540	0.6394	0.7362	0.8186	0.8540
Radiacion Solar Directa E_{DN}	983.1278	992.7111	997.1149	995.9456	990.4794	987.5901	990.3744	995.8364	997.2127	992.6696	983.9966	978.7518
Radiacion Solar Difusa E_d	88.4126	79.6506	69.7999	60.1787	54.5834	52.5744	54.4385	60.1307	69.5032	79.6529	87.7947	91.1117
Radiacion Solar Reflejada E_r	151.0577	160.8035	165.6548	164.3420	158.4384	155.4648	158.3286	164.2204	165.7654	160.7589	151.8987	146.9406
SUBTOTAL	702.23	580.02	421.11	234.35	103.70	50.91	99.97	233.33	415.90	580.05	694.10	736.90

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.17: Irradiancia Pared WNW 13:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
PARED WNW												
Superficie	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hora Standard	13:02	13:00	13:01	13:00	13:03	13:02	13:02	13:01	13:01	13:00	12:59	13:01
Azimuth Solar ϕ	-147.56	-134.18	-101.30	-59.64	-41.05	-35.57	-40.57	-59.46	-100.26	-133.80	-148.94	-151.84
Altitud Solar β	61.92	69.40	74.33	72.86	67.37	65.04	67.28	72.73	74.46	69.36	62.49	59.27
Azimuth Superficie ψ	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28
Azimuth Solar Superficie γ	-449.84	-436.46	-403.58	-361.92	-343.33	-337.85	-342.85	-361.74	-402.54	-436.08	-451.22	-454.12
Angulo de Inclination σ	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	0.0013	0.0824	0.1957	0.2945	0.3686	0.3908	0.3691	0.2967	0.1974	0.0848	-0.0098	-0.0367
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.5506	0.5881	0.6475	0.7059	0.7536	0.7686	0.7539	0.7072	0.6485	0.5893	0.5457	0.5344
Radiacion Solar Directa E_{DN}	983.1278	992.7111	997.1149	995.9456	990.4794	987.5901	990.3744	995.8364	997.2127	992.6696	983.9966	978.7518
Radiacion Solar Difusa E_d	59.0002	63.6380	70.3724	76.6278	81.3614	82.7390	81.3850	76.7677	70.4851	63.7637	58.5329	57.0096
Radiacion Solar Reflejada E_r	151.0577	160.8035	165.6548	164.3420	158.4384	155.4648	158.3286	164.2204	165.7654	160.7589	151.8987	146.9406
SUBTOTAL	211.35	306.22	431.12	534.32	604.90	624.20	605.22	536.49	433.10	308.70	200.76	168.02

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.18: Irradiancia Cubierta NNE 13:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR												
CUBIERTA NNE												
Superficie	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Hora Standard	13:02	13:00	13:01	13:00	13:03	13:02	13:02	13:01	13:01	13:00	12:59	13:01
Azimuth Solar ϕ	-147.56	-134.18	-101.30	-59.64	-41.05	-35.57	-40.57	-59.46	-100.26	-133.80	-148.94	-151.84
Altitud Solar β	61.92	69.40	74.33	72.86	67.37	65.04	67.28	72.73	74.46	69.36	62.49	59.27
Azimuth Superficie ψ	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28
Azimuth Solar Superficie γ	-179.84	-166.46	-133.58	-91.92	-73.33	-67.85	-72.85	-91.74	-132.54	-166.08	-181.22	-184.12
Angulo de Inclination σ	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	0.7700	0.8363	0.8807	0.8957	0.8800	0.8706	0.8799	0.8952	0.8819	0.8361	0.7754	0.7438
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	1.0720	1.1344	1.1777	1.1925	1.1769	1.1677	1.1768	1.1920	1.1788	1.1342	1.0770	1.0482
Radiacion Solar Directa E_{DN}	983.1278	992.7111	997.1149	995.9456	990.4794	987.5901	990.3744	995.8364	997.2127	992.6696	983.9966	978.7518
Radiacion Solar Difusa E_d	0.0786	0.0832	0.0863	0.0874	0.0863	0.0856	0.0863	0.0874	0.0864	0.0831	0.0789	0.0768
Radiacion Solar Reflejada E_r	93.9519	100.0134	103.0307	102.2142	98.5424	96.6929	98.4741	102.1385	103.0995	99.9857	94.4749	91.3912
SUBTOTAL	850.99	930.32	981.29	994.38	970.24	956.59	969.95	993.68	982.64	930.02	857.55	819.49

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.22: Irradiancia Pared NNE 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 8:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR DIARIA														
PARED NNE														
Superficie	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo
Hora Standard	6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	0:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	
Azimuth Solar ϕ	89.70	90.62	91.66	93.06	95.45	101.87	-173.49	-101.30	-98.29	-92.98	-91.61	-90.58	-89.66	
Altitud Solar β	0.81	15.41	30.35	45.30	60.22	75.04	86.82	74.33	59.51	44.58	29.63	14.69	0.19	
Azimuth Superficie ψ	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	
Azimuth Solar Superficie γ	57.42	58.34	59.38	60.78	63.17	69.59	-205.77	-133.58	-130.57	-125.26	-123.89	-122.86	-121.94	
Angulo de Inclination σ	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	0.5384	0.5060	0.4395	0.3434	0.2242	0.0900	-0.0500	-0.1862	-0.3300	-0.4112	-0.4847	-0.5249	-0.5290	
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.8760	0.8513	0.8025	0.7370	0.6637	0.5919	0.5290	0.4795	0.4399	0.4232	0.4117	0.4069	0.4064	
Radiacion Solar Directa E_{DN}	0.0308	664.4012	866.7340	943.8757	980.3862	997.6378	1002.6360	997.1149	979.1718	941.3716	861.1256	646.8102	0.0000	
Radiacion Solar Difusa E_d	0.0029	61.6485	75.8200	75.8200	70.9234	64.3622	57.8076	52.1130	46.9480	43.4276	38.6454	28.6847	0.0000	
Radiacion Solar Reflejada E_r	0.0006	38.5899	82.5248	119.9372	148.4554	166.2478	172.1088	165.6548	147.3274	118.3211	80.5381	36.3516	0.0000	
SUBTOTAL	0.02	436.43	539.31	519.86	439.15	320.42	179.83	32.11	-128.84	-225.33	-298.19	-274.44	0.00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.23: Irradiancia Pared ESE 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 8:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR DIARIA														
Superficie	PARED ESE													
	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo
Hora Standard	6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	0:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	
Azimuth Solar ϕ	89.70	90.62	91.66	93.06	95.45	101.87	-173.49	-101.30	-98.29	-92.98	-91.61	-90.58	-89.66	
Altitud Solar β	0.81	15.41	30.35	45.30	60.22	75.04	86.82	74.33	59.51	44.58	29.63	14.69	0.19	
Azimuth Superficie ψ	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	122.28	
Azimuth Solar Superficie γ	-32.58	-31.66	-30.62	-29.22	-26.83	-20.41	-295.77	-223.58	-220.57	-215.26	-213.89	-212.86	-211.94	
Angulo de Inclinacion σ	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	-0.1151	0.8206	0.7426	0.6139	0.4432	0.2419	0.0241	-0.1957	-0.3854	-0.5816	-0.7216	-0.8125	-0.8486	
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.5038	1.1193	1.0471	0.9362	0.8052	0.6740	0.5607	0.4765	0.4281	0.4017	0.3976	0.4016	0.4046	
Radiacion Solar Directa E_{DN}	0.0308	664.4012	866.7340	943.8757	980.3862	997.6378	1002.6360	997.1149	979.1718	941.3716	861.1256	646.8102	0.0000	
Radiacion Solar Difusa E_d	0.0017	81.0630	98.9282	96.3213	86.0414	73.2977	61.2797	51.7863	45.6875	41.2199	37.3237	28.3116	0.0000	
Radiacion Solar Reflejada E_r	0.0006	38.5899	82.5248	119.9372	148.4554	166.2478	172.1088	165.6548	147.3274	118.3211	80.5381	36.3516	0.0000	
SUBTOTAL	0.00	664.85	825.11	795.69	669.01	480.91	257.57	22.34	-184.38	-387.96	-503.49	-460.90	0.00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.24: Irradiancia Pared WNW 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 16:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR DIARIA														
Superficie	PARED WNW													
	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo
Hora Standard	6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	0:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	
Azimuth Solar ϕ	89.70	90.62	91.66	93.06	95.45	101.87	-173.49	-101.30	-98.29	-92.98	-91.61	-90.58	-89.66	
Altitud Solar β	0.81	15.41	30.35	45.30	60.22	75.04	86.82	74.33	59.51	44.58	29.63	14.69	0.19	
Azimuth Superficie ψ	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	302.28	
Azimuth Solar Superficie γ	-212.58	-211.66	-210.62	-209.22	-206.83	-200.41	-475.77	-403.58	-400.57	-395.26	-393.89	-392.86	-391.94	
Angulo de Inclinacion σ	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	-0.7124	-0.8206	-0.7426	-0.6139	-0.4432	-0.2419	-0.0241	0.1957	0.3854	0.5816	0.7216	0.8125	0.8486	
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	0.40	0.40	0.40	0.40	0.42	0.46	0.54	0.65	0.76	0.91	1.03	1.11	1.15	
Radiacion Solar Directa E_{DN}	0.03	664.40	866.73	943.88	980.39	997.64	1002.64	997.11	979.17	941.37	861.13	646.81	0.00	
Radiacion Solar Difusa E_d	0.00	29.12	37.61	41.12	44.65	50.30	58.98	70.37	81.64	93.38	96.52	78.38	0.00	
Radiacion Solar Reflejada E_r	0.00	38.59	82.52	119.94	148.46	166.25	172.11	165.65	147.33	118.32	80.54	36.35	0.00	
SUBTOTAL	-0.02	-477.48	-523.53	-418.38	-241.41	-24.82	206.90	431.12	606.36	759.20	798.41	640.29	0.00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.25: Irradiancia Pared SSW 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 15:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR DIARIA														
Superficie	PARED SSW													
	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo
Hora Standard	6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	0:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01	
Azimuth Solar ϕ	89.70	90.62	91.66	93.06	95.45	101.87	-173.49	-101.30	-98.29	-92.98	-91.61	-90.58	-89.66	
Altitud Solar β	0.81	15.41	30.35	45.30	60.22	75.04	86.82	74.33	59.51	44.58	29.63	14.69	0.19	
Azimuth Superficie ψ	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	212.28	
Azimuth Solar Superficie γ	-122.58	-121.66	-120.62	-119.22	-116.83	-110.41	-385.77	-313.58	-310.57	-305.26	-303.89	-302.86	-301.94	
Angulo de Inclinacion σ	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	
Angulo de Insidencia Solar $\cos\theta$	0.9234	-0.5060	-0.4395	-0.3434	-0.2242	-0.0900	0.0500	0.1862	0.3300	0.4112	0.4847	0.5249	0.5290	
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y	1.22	0.41	0.42	0.44	0.47	0.51	0.57	0.64	0.73	0.78	0.84	0.87	0.87	
Radiacion Solar Directa E_{DN}	0.03	664.40	866.73	943.88	980.39	997.64	1002.64	997.11	979.17	941.37	861.13	646.81	0.00	
Radiacion Solar Difusa E_d	0.00	29.62	39.53	44.94	49.99	55.81	62.58	69.80	77.73	80.30	78.41	61.03	0.00	
Radiacion Solar Reflejada E_r	0.00	38.59	82.52	119.94	148.46	166.25	172.11	165.65	147.33	118.32	80.54	36.35	0.00	
SUBTOTAL	0.03	-267.98	-258.91	-159.22	-21.33	132.24	284.78	421.11	548.18	585.70	576.32	436.86	0.00	

Fuente: Elaboración propia

Tabla No.26: Irradiancia Cubierta NNE 6:00 – 18:00 Horas = Mayor irradiancia 00:00 Horas

CALCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR DIARIA														
Superficie														
		Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo	Marzo
Hora Standard		6:01	7:01	8:01	9:01	10:01	11:01	0:01	13:01	14:01	15:01	16:01	17:01	18:01
Azimuth Solar ϕ		89.70	90.62	91.66	93.06	95.45	101.87	-173.49	-101.30	-98.29	-92.98	-91.61	-90.58	-89.66
Altitud Solar β		0.81	15.41	30.35	45.30	60.22	75.04	86.82	74.33	59.51	44.58	29.63	14.69	0.19
Azimuth Superficie ψ		32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28	32.28
Azimuth Solar Superficie γ		57.42	58.34	59.38	60.78	63.17	69.59	-205.77	-133.58	-130.57	-125.26	-123.89	-122.86	-121.94
Angulo de Inclinacion σ		82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90	82.90
Angulo de Incidencia Solar $\cos\theta$		-0.1057	0.3120	0.5286	0.7096	0.8424	0.9179	0.9310	0.8807	0.7680	0.6080	0.4041	0.1731	-0.0623
Razon de Radiacion Difusa del Cielo Y		0.51	0.72	0.87	1.02	1.14	1.21	1.23	1.18	1.07	0.93	0.78	0.64	0.52
Radiacion Solar Directa E_{DN}		0.03	664.40	866.73	943.88	980.39	997.64	1002.64	997.11	979.17	941.37	861.13	646.81	0.00
Radiacion Solar Difusa E_d		0.00	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
Radiacion Solar Reflejada E_r		0.00	24.00	51.33	74.60	92.33	103.40	107.04	103.03	91.63	73.59	50.09	22.61	0.00
SUBTOTAL		0.00	231.32	509.54	744.45	918.26	1019.25	1040.58	981.29	843.75	646.01	398.16	134.65	0.04

Fuente: Elaboración propia

10. ANEXOS II

7.1.2. Generación de data y cálculo de línea base del volumen de control

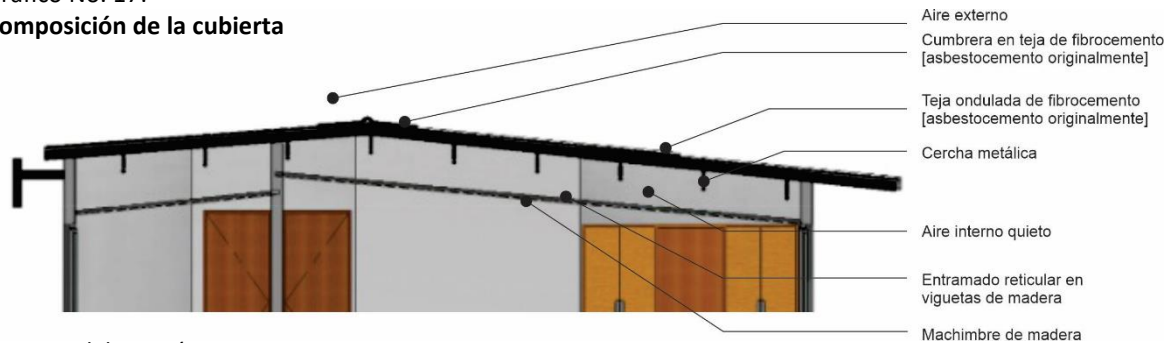
e. Pérdida de calor de los elementos que componen el objeto de estudio.
[temperaturas de diseño y TMR]

Modelado térmico de los elementos: envolvente, ocupantes y equipos

Modelado de la cubierta

Gráfico No. 17:

Composición de la cubierta



Fuente: Elaboración propia.

Tabla No.30:

Datos base para calcular la perdida de calor de la cubierta

Convención	Descripción	Valor	Unidad
T_o	Temperatura ambiente – [Outside]	33.1	°C
T_i	Temperatura objetivo de diseño – [Inside]	27	°C
α_s	Absortividad solar	0.73	Superficies oscuras
Q_s	Radiación solar incidente sobre la superficie	981.29	W/m2 para pared con la normal hacia el NNE
		961.05	W/m2 para pared con la normal hacia el SSW
ε	Emisividad de la superficie	0.9	(superficies comunes)
σ	Constante de Stephan – Boltzmann	5.67×10^{-8}	$W/m^2 K^4$
h_o	coeficiente combinado de convección y radiación	10	W/m2 K (valor conservador verano vientos moderados)
T_{DP}	Temperatura de rocío	19.7	°C [Según carta psicométrica para Cali]
t	hora del día en formato 24 horas	13:00	
T_{surr}	Temperatura alrededores, en este caso temperatura del cielo		
$T_{sol-air}$	Temperatura solair (ver definición en la referencia)		

Fuente: Elaboración propia.

1. [Ecuación No.8] Cálculo de resistencia térmica:

$$R_i = \frac{L_i}{k_i}$$

Para valores de R , se tomará la *Tabla 21 – 20 del Capítulo 21 del libro “Heat and Mass Transfer” de Cengel.* y otras fuentes.

Composición del elemento



Gráfico No. 18:

Resistencias de los elementos de la cubierta

Fuente: Elaboración propia.

Datos resistencias [se toman de las fuentes que aparecen en las imágenes]

Izquierda Imagen No.4:

Unidad de resistencia térmica (R – Value) de componentes comunes usados en edificaciones

Derecha arriba Imagen No.5:

Coefficiente de conductividad térmica [k] de materiales

Derecha abajo Imagen No.6:

Coefficiente de conductividad térmica [k] de materiales

TABLE 21-10
Unit thermal resistance (the R -value) of common components used in buildings

R -value			R -value		
Component	$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$	$\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F/Btu}$	Component	$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$	$\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F/Btu}$
Outside surface (winter)	0.030	0.17	Wood stud, nominal 2 in. x 6 in. (5.5 in. or 140 mm wide)	0.98	5.56
Outside surface (summer)	0.014	0.25	Clay tile, 100 mm (4 in.)	0.18	1.01
Inside surface, still air	0.12	0.68	Acoustic tile	0.32	1.79
Plane air space, vertical, ordinary surfaces ($c_{as} = 0.82$):			Asphalt shingle roofing	0.077	0.44
13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.16	0.90	Building paper	0.011	0.06
20 mm ($\frac{3}{4}$ in.)	0.17	0.94	Concrete block, 100 mm (4 in.):		
40 mm (1.5 in.)	0.16	0.90	Lightweight	0.27	1.51
90 mm (3.5 in.)	0.16	0.91	Heavyweight	0.13	0.71
Insulation, 25 mm (1 in.)			Plaster or gypsum board, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.079	0.45
Glass fiber	0.70	4.00	Wood fiberboard, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.23	1.31
Mineral fiber batt	0.66	3.73	Plywood, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.11	0.62
Urethane rigid foam	0.98	5.56	Concrete, 200 mm (8 in.):		
Stucco, 25 mm (1 in.)	0.037	0.21	Lightweight	1.17	6.67
Face brick, 100 mm (4 in.)	0.075	0.43	Heavyweight	0.12	0.67
Common brick, 100 mm (4 in.)	0.12	0.79	Cement mortar, 13 mm (1/2 in.)	0.018	0.10
Steel siding	0.00	0.00	Wood bevel lapped siding, 13 mm x 200 mm (1/2 in. x 8 in.)	0.14	0.81
Slag, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.067	0.38			
Wood, 25 mm (1 in.)	0.22	1.25			
Wood stud, nominal 2 in. x 4 in. (3.5 in. or 90 mm wide)	0.63	3.58			

Eternit®
Especificaciones Técnicas

Hoja Técnica
Teja Ondulada 1000

Peso promedio por unidad de superficie: 13.6 kg/m²
Coeficiente de conductividad térmica: $k = 4.76 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
Tolerancias en el largo (± 10 mm).

The Engineering ToolBox
www.EngineeringToolBox.com

Thermal Conductivity - k - W/(m.K)

Wood, oak	0.17		
-----------	------	--	--

Datos:

- $K_1 = 4.76 \text{ kcal/h m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 5,536 \text{ W/m}^2$ [Teja fibrocemento]
- $K_2 = 79.5 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ [Cercha metálica]
- $k_5 = 0.17 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ [Wood – Machimbre]

2. [Ecuación No.9] Valor total [Σ] de las resistencias térmicas:

$$R_{total-roof} = \sum_i R_i$$

TablaNo.31:

DATOS DE RESISTENCIAS								
Ingresar valores de resistencias	CUBIERTAS							
	No. de Resistencia	Material	Valor de K W/m ² °C	No. de Longitud	Espesor m	Valor de R m ² °C/W	factor	Valor de R m ² °C/W
	R0	Aire externo		L ₀	0	0.044	1	0.04 m ² °C/W
	R1	Teja fibrocemento	5.536	L ₁	0.01	0.0018	1	0.0018 m ² °C/W
	R2	Estructura cerchas acero	47	L ₂	0.01	0.0002	1	0.00021 m ² °C/W
	R3	Aire intermedio		L ₃	300	0.12	1	0.12 m ² °C/W
	R4	Estructura entramado madera		L ₄	0.01	0.63	1	0.63 m ² °C/W
	R5	Machimbre de madera	0.17	L ₅	0.01	0.059	1	0.059 m ² °C/W
	R6	Aire interno		L ₆	2400	0.12	1	0.12 m ² °C/W
Rtotal							0.97	m² °C/W

Elaboración propia

3. [Ecuación No.10] Cálculo del coeficiente de la transferencia de calor: $U_{roof} = \frac{1}{R_{total-roof}}$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR		
Uroof	1.026	W/m² K

Cálculo de pérdida de calor:

Cubierta Nor - Noreste – [NNE] 21 marzo

4. [Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056T_{DP} + 7.3 * 10^{-5}T_{DP}^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$

$$T_{sky} = (33.1 + 273) \left[0.711 + 0.0056 * 19.7 + 7.3 * 10^{-5}(19.7)^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi 13}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{sky} = 294.99 K = 21.84^{\circ}C$$

5. [Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s q_{solar}}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$

$$T_{sol-air} = 33.1 + \frac{0.73 * 981.29}{10} - \frac{0.9 * 5.67 * 10^{-8}(306.25^4 - 294.99^4)}{10}$$

$$T_{sol-air} = 98.48^{\circ}C$$

6. [Ecuación No.13] $Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = U_{roof} A (T_{sol-air} - T_{inside})$

$$Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = 1.026 \frac{W}{m^2 K} * 51.8 m^2 (98.48 - 27) K$$

$$Q_{roofNorthNE} = 3.798,60 W$$

7. [Ecuación No.14] $\dot{q}_{roof} = Q_{roof} \frac{W}{A m^2}$

$$\dot{q}_{roofNorthNE} = 73 \frac{W}{m^2}$$

8. [Ecuación No.15] $T_{r-roof} = \frac{\dot{Q}_{roof} h_i}{A} + T_{inside}$

$$T_{r-roofNorthNE} = \frac{3.798,60 * 0.12}{51.8} + 27 = 35.80 ^\circ C$$

9. [Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{roof}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$

$$Fraccion_{solar} = \frac{3.798,60}{981.29 * 51.8} * 100 = 7.47\%$$

Cálculo de pérdida de calor:

Cubierta Sur-Suroeste – [SSW] 21 marzo

4. [Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056 T_{DP} + 7.3 * 10^{-5} T_{DP}^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$

$$T_{sky} = (33.1 + 273) \left[0.711 + 0.0056 * 19.7 + 7.3 * 10^{-5} (19.7)^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi 13}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{sky} = 294.99 K = 21.84 ^\circ C$$

5. [Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_{solar}}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$

$$T_{sol-air} = 33.1 + \frac{0.73 * 961.05}{10} - \frac{0.9 * 5.67 * 10^{-8} (306.25^4 - 294.99^4)}{10}$$

$$T_{sol-air} = 97.01 ^\circ C$$

6. [Ecuación No.13] $Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = U_{roof} A (T_{sol-air} - T_{inside})$

$$Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = 1.026 \frac{W}{m^2 K} * 19.45 m^2 (97.01 - 27) K$$

$$Q_{roofNorthNE} = 1.396,83 W$$

7. [Ecuación No.14] $\dot{q}_{roof} = Q_{roof} \frac{W}{A m^2}$

$$\dot{q}_{roofNorthNE} = 72 \frac{W}{m^2}$$

8. [Ecuación No.15] $T_{r-roof} = \frac{\dot{Q}_{roof} h_i}{A} + T_{inside}$

$$T_{r-roofSouthSW} = \frac{1.396,83 * 0.12}{19.45} + 27 = 35.62^{\circ}\text{C}$$

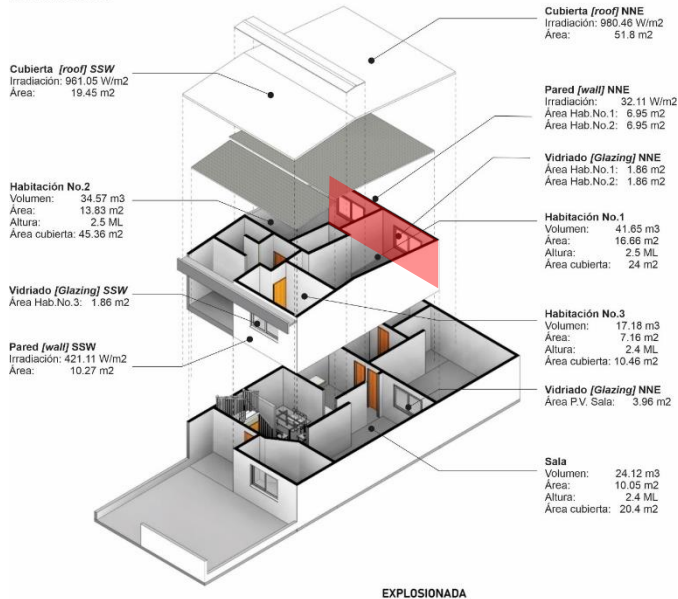
9. [Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{roof}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$

$$Fraccion_{solar} = \frac{1.396,83}{961.05 * 19.45} * 100 = 7.47\%$$

Modelado Pared NNE [No soleada]

Áreas y volúmenes

21 de Marzo 13:00 h



EXPLOSIONADA

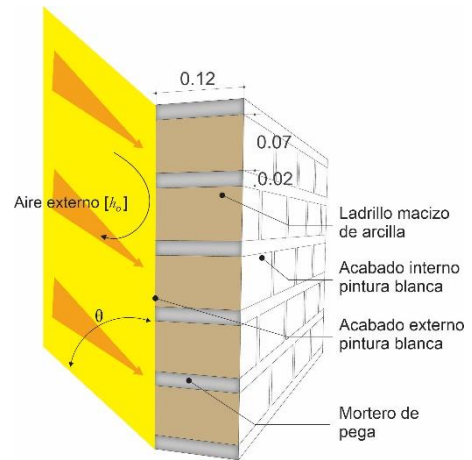


Gráfico No. 19: Localización Pared NNE
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico No. 20: Composición pared original
Fuente: Elaboración propia.

Tabla No.32:

Datos base para calcular la perdida de calor pared NNE

Convención	Descripción	Valor	Unidad
T_o	Temperatura ambiente – [Outside]	33.1	$^{\circ}\text{C}$
T_i	Temperatura objetivo de diseño – [Inside]	27	$^{\circ}\text{C}$
α_s	Absortividad solar	0.45	Superficies claras [Pintura Blanca]
Q_s	Radiación solar incidente sobre la superficie	32.11	W/m2 para pared con la normal hacia el NNE
		421.11	W/m2 para pared con la normal hacia el SSW
ε	Emisividad de la superficie	0.75	(superficies ladrillo)
σ	Constante de Stephan – Boltzmann	5.67E-08	$\text{W/m}^2 \text{K}^4$
h_o	coeficiente combinado de convección y radiación	10	W/m2 K (valor conservador verano vientos moderados)
T_{DP}	Temperatura de rocío	19.7	$^{\circ}\text{C}$ [Según carta psicométrica para Cali]
t	hora del día en formato 24 horas	13:00	
T_{surr}	Temperatura alrededores, en este caso temperatura del cielo	30	
$T_{sol-air}$	Temperatura solair (ver definición en la referencia)		

La temperatura estimada de las superficies de los alrededores llega a igualar la temperatura ambiente de **30°C = 303.15 K**, se tomará como $[T_{surr.}]$.

1. [Ecuación No.8] Cálculo de resistencia térmica:

$$R_i = \frac{L_i}{k_i}$$

Para valores de R , se tomará la *Tabla 21 – 20 del Capítulo 21 del libro “Heat and Mass Transfer” de Cengel.* y otras fuentes.

Composición del elemento

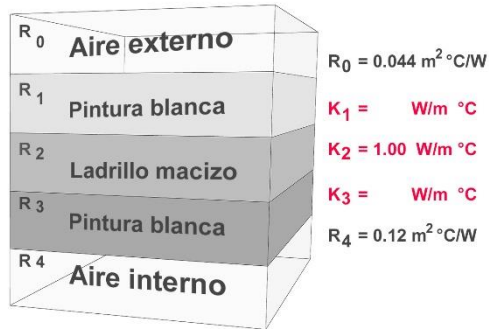


Gráfico No. 21:

Resistencias de los elementos de la pared original

Fuente: Elaboración propia.

Datos resistencias [se toman de las fuentes que aparecen en las imágenes]

Izquierda Imagen No. 7:

Reflectividad y absorptividad de superficies exteriores comunes para radiación solar

Derecha arriba Imagen No. 8:

Coefficiente de emisividad de la superficie de materiales

Derecha abajo Imagen No. 9:

Coefficiente de conductividad térmica $[k]$ de materiales.

TABLE 21-6

The reflectivity ρ_s and absorptivity α_s of common exterior surfaces for solar radiation (from Kreider and Rabl, Ref. 3, Table 6.1)

Surface	ρ_s	α_s
Dark building surfaces (red brick, dark paints, etc.)	0.27	0.73
Light building surfaces (light brick, light paints, etc.)	0.60	0.40
New concrete	0.35	0.65


The Engineering ToolBox

 www.EngineeringToolBox.com

Surface Material	Emissivity Coefficient • ϵ •
Brass Oxidized 600°C	0.6
Brick, red, rough	0.93
Brick, fireclay	0.75
Cadmium	0.02
Carbon, not oxidized	0.81
Carbon, oxidized	0.78

Material/Substance	Thermal Conductivity • k • W/(m K) (Btu/(ft h F))	
	25 °C (77 °F)	125 °C (257 °F)
Aluminum	204	204
Brick, fire	0.47	0.47
Brick, insulating	0.15	0.15
Brickwork, common (Building Brick)	0.6 - 1.0	0.6 - 1.0
Brickwork, dense	1.0	1.0
Bromine (gas)	0.004	0.004

2. [Ecuación No.9] Valor total $[\Sigma]$ de las resistencias térmicas:

$$R_{total-wall} = \sum_i R_i$$

8. [Ecuación No.15] $T_{r-wall} = \frac{\dot{Q}_{wall} h_i}{A} + T_{inside}$

$$T_{r-wallNorthNE} = \frac{115.28 * 0.12}{6.95} + 27 = 29^{\circ}C$$

9. [Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{wall}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$

$$Fraccion_{solar} = \frac{115.28}{32.11 * 6.95} * 100 = 51.79\%$$

Modelado Pared SSW [Soleada]

Áreas y volúmenes

21 de Marzo 13:00 h

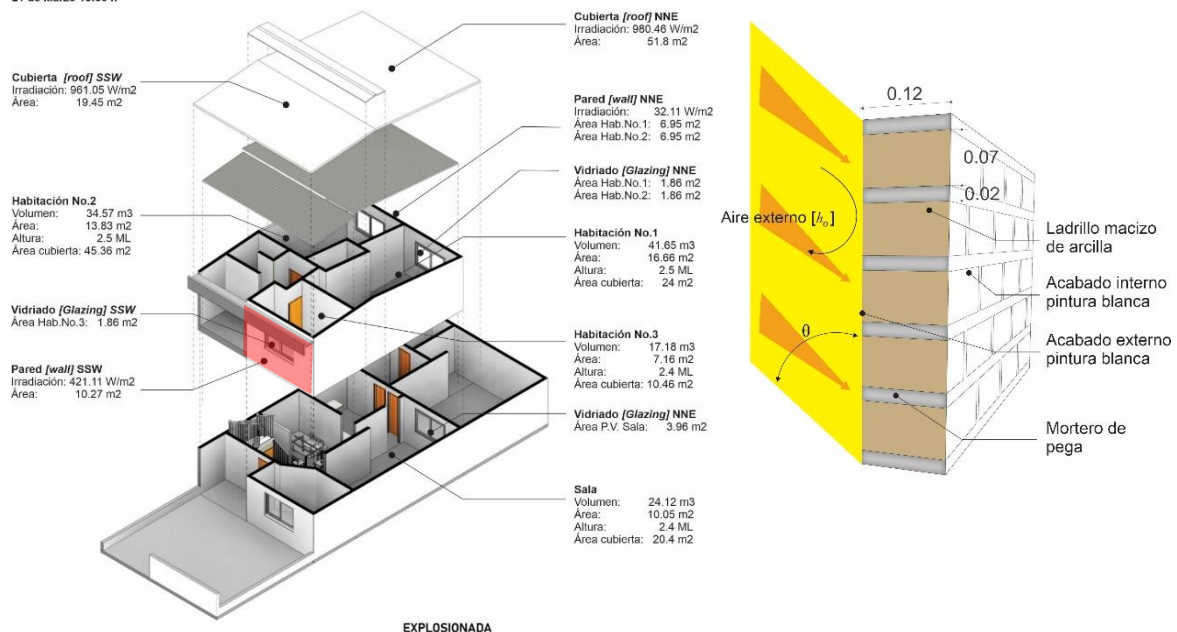


Gráfico No. 22: Localización Pared SSW

 Fuente: Elaboración propia.

Gráfico No. 23: Composición pared original

 Fuente: Elaboración propia.

Tabla No.34:

Datos base para calcular la perdida de calor pared SSW

Convención	Descripción	Valor	Unidad
T_o	Temperatura ambiente – [Outside]	33.1	°C
T_i	Temperatura objetivo de diseño – [Inside]	27	°C
α_s	Absortividad solar	0.45	Superficies claras [Pintura Blanca]
Q_s	Radiación solar incidente sobre la superficie	32.11	W/m2 para pared con la normal hacia el NNE
		421.11	W/m2 para pared con la normal hacia el SSW
ε	Emisividad de la superficie	0.75	(superficies ladrillo)
σ	Constante de Stephan – Boltzmann	5.67E-08	W/m ² K ⁴
h_o	coeficiente combinado de convección y radiación	10	W/m2 K (valor conservador verano vientos moderados)
T_{DP}	Temperatura de rocío	19.7	°C [Según carta psicométrica para Cali]
t	hora del día en formato 24 horas	13:00	
T_{surr}	Temperatura alrededores, en este caso temperatura del cielo	30	
$T_{sol-air}$	Temperatura sol-air (ver definición en la referencia)		

Fuente: Elaboración propia

La composición de la pared SSW es similar a la de la pared NNE. Se tomarán los mismos datos base.

2. [Ecuación No.9] Valor total $[\Sigma]$ de las resistencias térmicas:

$$R_{total-wall} = \sum_i R_i$$

Tabla No.35:

DATOS DE RESISTENCIAS

Ingresar valores de resistencias	PARED NNE							
	No. de Resistencia	Material	Valor de K W/m2 °C	No. de Longitud	Espesor m	Valor de R m2 °C/W	factor	Valor de R m2 °C/W
	R0	Aire externo		L_0	0	0.044	1	0.044
	R1	Pintura Blanca	0	L_1	0	0.0	1	0.0
	R2	Ladrillo Macizo	0.6	L_2	0.12	0.2	1	0.20
	R3	Pintura Blanca	0	L_3	0	0.00	1	0.00
	R4	Aire Interno	0.12	L_4	0	0.00	1	0.12

R_{total}	0.364	m ² °C/W
-------------	-------	---------------------

3. [Ecuación No.10] Cálculo del coeficiente de la transferencia de calor: $U_{wall} = \frac{1}{R_{total-wall}}$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

U_{roof}	2.747	W/m2 K
------------	-------	--------

Cálculo de pérdida de calor:

Pared Sur-Suroeste – [SSW] SOLEADA 21 marzo

4. [Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056T_{DP} + 7.3 * 10^{-5}T_{DP}^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$

$T_{surr} = 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 303.15\text{ K}$

5. [Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_{solar}}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$

$T_{sol-air} = 33.1 + \frac{0.45 * 421.11}{10} - \frac{0.75 * 5.67 * 10^{-8} (306.25^4 - 303.15^4)}{10}$

$T_{sol-air} = 50.56\text{ }^{\circ}\text{C}$

6. [Ecuación No.13] $Q_{wall} = U_{wallSSW} A \Delta T = U_{wallSSW} A (T_{sol-air} - T_{inside})$

$Q_{wallSSW} = U_{wallSSW} A \Delta T = 2.75 \frac{W}{m^2 K} * 10.27 m^2 (50.56 - 27) K$

$Q_{wallSouthSW} = 664.68\text{ W}$

7. [Ecuación No.14] $\dot{q}_{wall} = Q_{wall} \frac{W}{A m^2}$

$\dot{q}_{wallSouthSW} = 65 \frac{W}{m^2}$

8. [Ecuación No.15] $T_{r-wall} = \frac{\dot{q}_{wall} h_i}{A} + T_{inside}$

$T_{r-wallSouthSW} = \frac{\dot{Q}_{wallSouthSW} h_i}{A} + T_{inside} = \frac{664.68 * 0.12}{10.27} + 27 = 34.77\text{ }^{\circ}\text{C}$

9. [Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{wall}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$

$Fraccion_{solar} = \frac{664.68}{421.11 * 10.27} * 100 = 15.37\%$

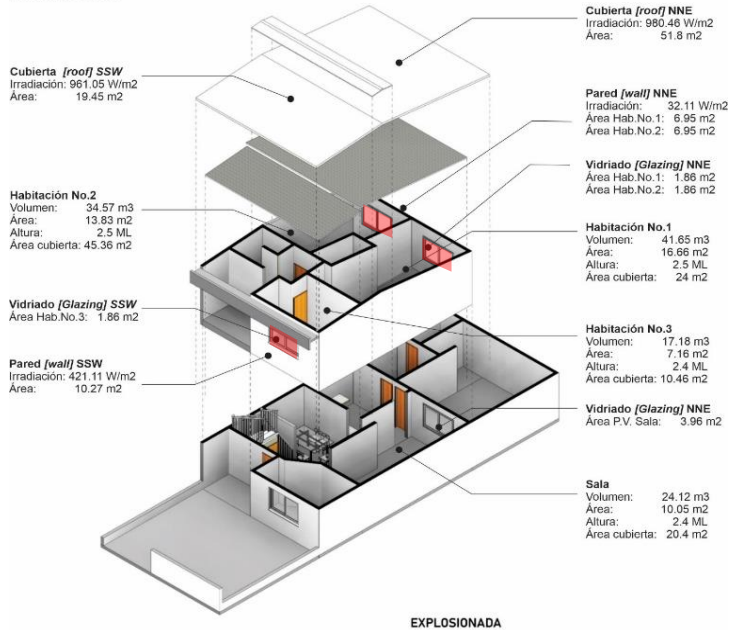
Modelado Ventanas NNE y SSW

Gráfico No. 24:

Localización Ventana Habitación No.1 y Habitación No.2, y Habitación No.3

Áreas y volúmenes

21 de Marzo 13:00 h



Fuente: Elaboración propia.

- Las ventanas de estudio **NO** están siendo radiadas por el sol a la hora seleccionada.
- El vidrio es crudo con un espesor de 4 mm, por lo tanto, el valor **SHGC** (*Solar Heat Gain Coefficient*) que se usará es **0.87**.
- El q_{solar} para Pared NNE es de **32.11 W/m²**
- El q_{solar} para Pared SSW es de **421.11 W/m²**
- El área de cada una de las ventanas de las habitaciones es **1.86 m²**
- Para el cálculo de la carga térmica de superficies vidriadas se utilizará la siguiente ecuación:

$$15. \text{ [Ecuación No.17]} \quad \dot{Q}_{solar-gain} = SHGC * A_{glazing} * \dot{q}_{solar-incident}$$

Habitación [room] No.1 y No.2:

$$\dot{Q}_{window-room1} = 0.87 * 1.86 * 32.11 = 51.96 \text{ W}$$

La temperatura T_r al interior de la habitación No.1 es la siguiente:

$$16. \text{ [Ecuación No.18]} \quad T_{r-window-room} = \frac{\dot{Q}_{wall} h_i}{A} + T_{inside}$$

$$T_{r-window-room1} = \frac{\dot{Q}_{wallNNE} h_i}{A} + T_{inside} = \frac{115.58 * 0.12}{1.86} + 27 = 34.46^\circ\text{C}$$

Habitación No.3:

$$16. \text{ [Ecuación No.17]} \quad \dot{Q}_{solar-gain} = SHGC * A_{glazing} * \dot{q}_{solar-incident}$$

$$\dot{Q}_{window-room3} = 0.87 * 1.86 * 421.11 = \mathbf{681.44 \text{ W}}$$

17. [Ecuación No.18] $T_{r-window-room} = \frac{\dot{Q}_{wall}h_i}{A} + T_{inside}$

$$T_{r-window-room} = \frac{\dot{Q}_{wallSSW}h_i}{A} + T_{inside} = \frac{664.68 * 0.12}{1.86} + 27 = \mathbf{69.88^{\circ}\text{C}}$$

Modelado de personas y equipos

Se determinará el área corporal de una persona, de acuerdo a su masa corporal y su altura.

Para este caso se han definido:

Personas [people]:

- Altura [H]: 1.72 m
- Peso [m]: 80 Kg
- La actividad de las personas en la habitación se define como durmiendo [Sleeping]. La tasa metabólica para esta actividad es 40 W/m²

Tasa metabólica [se toman de las fuentes que aparecen en las imágenes]

Derecha Imagen No. 10:

Tasa metabólica durante varias actividades – Durmiendo y quieto

TABLE 21-1

Metabolic rates during various activities (from ASHRAE Handbook of Fundamentals, Ref. 1, Chap. 8, Table 4).

Activity	Metabolic rate*
	W/m ²
Resting:	
Sleeping	40
Reclining	45
Seated, quiet	60
Standing, relaxed	70

18. [Ecuación No.19] $A_b = 0.202 * m^{0.425} * H^{0.725}$ $A_T = A_b * 1.5$

- Se considera que la ropa incrementa el área corporal hasta en un 50%, por tanto, $A_T = A_b * 1.5$. Sin embargo, para la actividad definida se conservará A_b

$$A_b = 0.202 * 80^{0.425} * 1.72^{0.725} = \mathbf{1.92 \text{ m}^2} \quad A_T = 1.92 * 1.5 = \mathbf{2.89 \text{ m}^2}$$

Para el cálculo de calor de las personas y equipos se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Lugar: Segundo piso
- Cantidad de personas: 2
- Actividad: Durmiendo [Sleeping]
- Tasa metabólica: 40 W/m²

En las habitaciones no hay equipos que generen calor adicional, Por tanto,

19. [Ecuación No.20] $\dot{Q}_{people-space} = people * metabolic \text{ rate} * AT$

$$\dot{Q}_{people-room} = 2 * 40 * 1.93 = \mathbf{152.4 \text{ W}}$$

Con la información obtenida se calcula la carga térmica total de cada una de las habitaciones.

$$20. \text{ [Ecuación No.21]} \quad \dot{Q}_{total} = \sum_i \dot{Q}_i$$

$$\dot{Q}_{total-room1} = \dot{Q}_{Sunroof-NNE} + \dot{Q}_{sunwallNNE} + \dot{Q}_{window-room1} + \dot{Q}_{people}$$

$$\dot{Q}_{total-room1} = 3.798,60 + 115,58 + 51.96 + 154.17 = \mathbf{4.120,31 \text{ W}}$$

$$\dot{Q}_{total-room3} = \dot{Q}_{Sunroof-SSW} + \dot{Q}_{sunwallSSW} + \dot{Q}_{window-room3} + \dot{Q}_{people}$$

$$\dot{Q}_{total-room1} = 1.396,83 + 664.68 + 681.44 + 154.17 = \mathbf{2.897,14 \text{ W}}$$

11. ANEXO III

7.2.3. Estado de confort en el volumen de control – ESCENARIO MODIFICADO

a. Modelado térmico de los elementos - Volumen modificado

Modelado de la cubierta MODIFICADA

La cubierta se intervino disminuyendo la absorptividad inicial por pintando de blanco la superficie externa y aumentando la resistencia con la integración de una lámina de fibra de vidrio que funciona como aislante térmico en el interior, dentro del volumen de control Vol₂, y el cambio del material del cielo a drywall.

Tabla No.42:

Datos base para calcular la perdida de calor – CUBIERTA MODIFICADA

Convención	Descripción	Valor	Unidad
T_o	Temperatura ambiente – [Outside]	33.1	°C
T_i	Temperatura objetivo de diseño – [Inside]	27	°C
α_s	Absortividad solar	0.4	Superficies claras [Pintura Blanca]
q_s	Radiación solar incidente sobre la superficie	981.29	W/m2 para pared con la normal hacia el NNE
		961.05	W/m2 para pared con la normal hacia el SSW
ε	Emisividad de la superficie	0.9	(superficies comunes)
σ	Constante de Stephan – Boltzmann	5.67×10^{-8}	W/m ² K ⁴
h_o	coeficiente combinado de convección y radiación	10	W/m2 K (valor conservador verano vientos moderados)
T_{DP}	Temperatura de rocío	19.7	°C [Según carta psicométrica para Cali]
t	hora del día en formato 24 horas	13:00	
T_{surr}	Temperatura alrededores, en este caso temperatura del cielo		
$T_{sol-air}$	Temperatura solair (ver definición en la referencia)		

[Ecuación No.8] Cálculo de resistencia térmica:

$$R_i = \frac{L_i}{k_i}$$

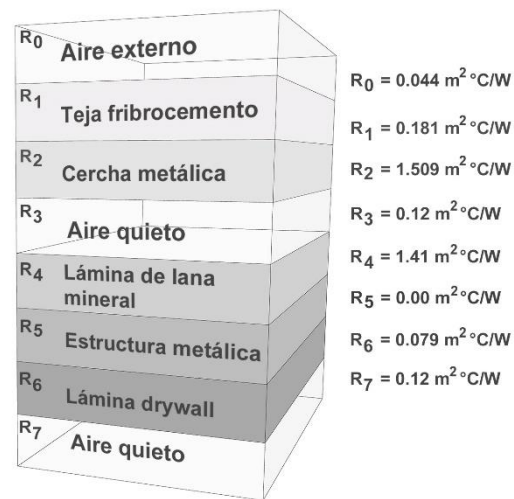
Para valores de R , se tomará la *Tabla 21 – 20 del Capítulo 21 del libro “Heat and Mass Transfer” de Cengel.* y otras fuentes.

Composición del elemento

Gráfico No. 39:

Resistencias de los elementos de la cubierta modificada

Fuente: Elaboración propia



Datos resistencias [se toman de las fuentes que aparecen en las imágenes]

Izquierda arriba Imagen No. 13:

Unidad de resistencia térmica [R- Value] aislamiento Fibra de vidrio, Placa de yeso

Izquierda abajo Imagen No. 14:

Resistencia térmica de la lámina de fibra de vidrio

Derecha Imagen No. 15:

Reflectividad y absorptividad en superficies claras

TABLE 21-10

Unit thermal resistance (the R-value) of common components used in buildings

Component	R-value		Component	R-value	
	m² · °C/W	ft² · h · °F/Btu		m² · °C/W	ft² · h · °F/Btu
Outside surface (winter)	0.030	0.17	Wood stud, nominal 2 in. × 6 in. (5.5 in. or 140 mm wide)	0.98	5.56
Outside surface (summer)	0.044	0.25	Clay tile, 100 mm (4 in.)	0.18	1.01
Inside surface, still air	0.12	0.68	Acoustic tile	0.32	1.79
Plane air space, vertical, ordinary surfaces (α _{sp} = 0.82):			Asphalt shingle roofing	0.077	0.44
13 mm (½ in.)	0.16	0.90	Building paper	0.011	0.06
20 mm (¾ in.)	0.17	0.94	Concrete block, 100 mm (4 in.):		
40 mm (1.5 in.)	0.16	0.90	Lightweight	0.27	1.51
90 mm (3.5 in.)	0.16	0.91	Heavyweight	0.13	0.71
Insulation, 25 mm (1 in.)			Plaster or gypsum board, 13 mm (½ in.)	0.079	0.45
Glass fiber	0.70	4.00	Wood fiberboard, 13 mm (½ in.)	0.23	1.31
Mineral fiber batt	0.66	3.73	Plywood, 13 mm (½ in.)	0.11	0.62
Urethane rigid foam	0.98	5.56	Concrete, 200 mm (8 in.):		
Stucco, 25 mm (1 in.)	0.037	0.21	Lightweight	1.17	6.67
Face brick, 100 mm (4 in.)	0.075	0.43	Heavyweight	0.12	0.67
Common brick, 100 mm (4 in.)	0.12	0.79	Cement mortar, 13 mm (½ in.)	0.018	0.10
Steel siding	0.00	0.00	Wood bevel lapped siding, 13 mm × 200 mm (1/2 in. × 8 in.)	0.14	0.81
Slag, 13 mm (½ in.)	0.067	0.38			
Wood, 25 mm (1 in.)	0.22	1.25			
Wood stud, nominal 2 in. × 4 in. (3.5 in. or 90 mm wide)	0.63	3.58			

FIBERGLASS ISOVER
SAINT-GOBAIN

PROPIEDADES FÍSICAS Y ESPECIFICACIONES

PRODUCTO	LONGITUD m	ANCHO mm	ESPESOR (1) mm	NRC (2) Montaje A/E-405	RESISTENCIA TÉRMICA (3) Hr.º.F/BTU (R100 m².°C/W)
FRESCASA ECO 600" x 48" x 2.5"	15.24 ± 150mm	1219 + 13mm	63.5 ± 3mm	0.85/0.9	8 (141)

TABLE 21-6

The reflectivity ρ_s and absorptivity α_s of common exterior surfaces for solar radiation (from Kreider and Rabl, Ref. 3, Table 6.1)

Surface	ρ _s	α _s
Natural Surfaces		
Fresh snow	0.75	0.25
Soils (clay, loam, etc.)	0.14	0.86
Water	0.07	0.93
Artificial Surfaces		
Bituminous and gravel roof	0.13	0.87
Blacktop, old	0.10	0.90
Dark building surfaces (red brick, dark paints, etc.)	0.27	0.73
Light building surfaces (light brick, light paints, etc.)	0.60	0.40
New concrete	0.35	0.65
Old concrete	0.25	0.75
Crushed rock surface	0.20	0.80
Earth roads	0.04	0.96
Vegetation		
Coniferous forest (winter)	0.07	0.93
Dead leaves	0.30	0.70
Forests in autumn, ripe field crops, plants, green grass	0.26	0.74
Dry grass	0.20	0.80

[Ecuación No.9] Valor total [Σ] de las resistencias térmicas:

$$R_{total-roof} = \sum_i R_i$$

Tabla No.43:

DATOS DE RESISTENCIAS								
Ingresar valores de resistencias	CUBIERTAS							
	No. de Resistencia	Material	Valor de K W/m2 °C	No. de Longitud	Espesor m	Valor de R m2 °C/W	factor de Reducción	Valor de R m2 °C/W
	R0	Aire externo		L ₀	0	0.044	1	0.04 m ² °C/W
	R1	Teja fibrocemento	5.536	L ₁	0.01	0.0018	1	0.0018 m ² °C/W
	R2	Estructura cerchas acero	47	L ₂	0.01	0.0002	1	0.00021 m ² °C/W
	R3	Aire intermedio		L ₃	300	0.12	1	0.12 m ² °C/W
	R4	Lámina de lana minera		L ₄	0.064	1.41	1	1.41 m ² °C/W
	R5	Estructura metálica		L ₅			1	0.000 m ² °C/W
	R6	Lámina Drywall	6.077	L ₆	0.013	0.079	1	0.079 m ² °C/W
	R7	Aire interno		L ₇	0.013	0.079	1	0.12 m ² °C/W
Rtotal							1.78	m² °C/W

Fuente: Elaboración propia

[Ecuación No.10] Cálculo del coeficiente de la transferencia de calor: $U_{roof} = \frac{1}{R_{total-roof}}$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Uroof	0.563	W/m2 K
--------------	--------------	---------------

Cálculo de pérdida de calor:

Cubierta Nor - Noreste – [NNE] 21 marzo

[Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056T_{DP} + 7.3 * 10^{-5}T_{DP}^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$

$$T_{sky} = (33.1 + 273) \left[0.711 + 0.0056 * 19.7 + 7.3 * 10^{-5}(19.7)^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi 13}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{sky} = 294.99 K = 21.84^{\circ}C$$

[Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_{solar}}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$

$$T_{sol-air} = 33.1 + \frac{0.40 * 981.29}{10} - \frac{0.9 * 5.67 * 10^{-8}(306.25^4 - 294.99^4)}{10}$$

$$T_{sol-air} = 66.10^{\circ}C$$

[Ecuación No.13] $Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = U_{roof} A (T_{sol-air} - T_{inside})$

$$Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = 0.563 \frac{W}{m^2 K} * 51.8 m^2 (66.10 - 27) K$$

$$Q_{roofNorthNE} = 1.141,18 W$$

[Ecuación No.14] $\dot{q}_{roof} = Q_{roof} \frac{W}{A m^2}$

$$\dot{q}_{roofNorthNE} = 22 \frac{W}{m^2}$$

[Ecuación No.15] $T_{r-roof} = \frac{\dot{Q}_{roof} h_i}{A} + T_{inside}$

$$T_{r-roofNorthNE} = \frac{1.141,18 * 0.12}{51.8} + 27 = 29.64 ^\circ C$$

[Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{roof}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$

$$Fraccion_{solar} = \frac{1.141,18}{981.29 * 51.8} * 100 = 2.25\%$$

- La reducción en temperatura se refleja de la siguiente manera:

$$35.80 ^\circ C - 29.64 ^\circ C = 6.16 ^\circ C$$

Cálculo de pérdida de calor:

Cubierta Sur-Suroeste – [SSW] 21 marzo

[Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056 T_{DP} + 7.3 * 10^{-5} T_{DP}^2 + 0.013 \cos \left(\frac{2\pi t}{24} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$

$$T_{sky} = (33.1 + 273) \left[0.711 + 0.0056 * 19.7 + 7.3 * 10^{-5} (19.7)^2 + 0.013 \cos \left(\frac{2\pi 13}{24} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{sky} = 294.99 K = 21.84 ^\circ C$$

[Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_{solar}}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$

$$T_{sol-air} = 33.1 + \frac{0.40 * 961.05}{10} - \frac{0.9 * 5.67 * 10^{-8} (306.25^4 - 294.99^4)}{10}$$

$$T_{sol-air} = 65.30 ^\circ C$$

[Ecuación No.13] $Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = U_{roof} A (T_{sol-air} - T_{inside})$

$$Q_{roof} = U_{roof} A \Delta T = 0.563 \frac{W}{m^2 K} * 51.8 m^2 (65.30 - 27) K$$

$$Q_{roofNorthNE} = 419,62 W$$

[Ecuación No.14] $\dot{q}_{roof} = Q_{roof} \frac{W}{A m^2}$

$$\dot{q}_{roofNorthNE} = 22 \frac{W}{m^2}$$

[Ecuación No.15]
$$T_{r-roof} = \frac{\dot{Q}_{roof} h_i}{A} + T_{inside}$$

$$T_{r-roofNorthNE} = \frac{419.62 * 0.12}{51.8} + 27 = 29.59^{\circ}C$$

[Ecuación No.16]
$$Fraccion_{solar} = \frac{Q_{roof}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$$

$$Fraccion_{solar} = \frac{419.62}{981.29 * 51.8} * 100 = 2.25\%$$

- La reducción en temperatura se refleja de la siguiente manera:

$$35.62^{\circ}C - 29.59^{\circ}C = 6.03^{\circ}C$$

Modelado Pared NNE [No soleada] MODIFICADA

Áreas y volúmenes

21 de Marzo 13:00 h

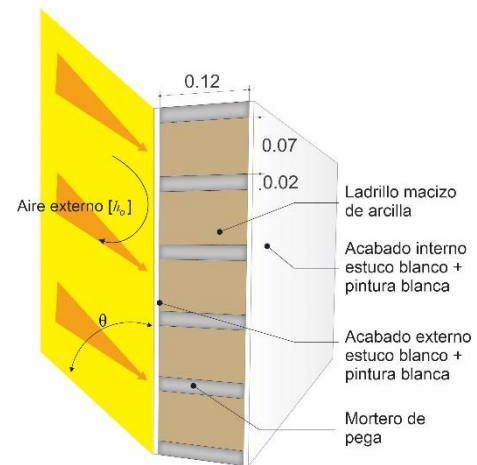
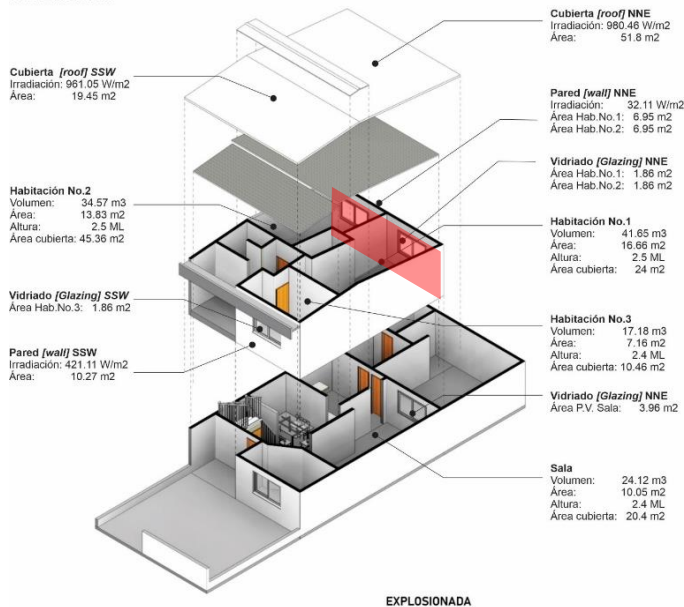


Gráfico No. 40: Localización Pared NNE
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico No. 41: Composición pared modificada
Fuente: Elaboración propia.

Tabla No.44:

Datos base para calcular la perdida de calor – PARED VOLUMEN MODIFICADO

Convención	Descripción	Valor	Unidad
T_o	Temperatura ambiente – [Outside]	33.1	°C
T_i	Temperatura objetivo de diseño – [Inside]	27	°C
α_s	Absortividad solar	0.45	Superficies claras [Pintura Blanca]
Q_s	Radiación solar incidente sobre la superficie	32.11	W/m2 para pared con la normal hacia el NNE
		421.11	W/m2 para pared con la normal hacia el SSW
ε	Emisividad de la superficie	0.75	(superficies ladrillo)
σ	Constante de Stephan – Boltzmann	5.67E-08	W/m ² K ⁴
h_o	coeficiente combinado de convección y radiación	10	W/m2 K (valor conservador verano vientos moderados)
T_{DP}	Temperatura de rocío	19.7	°C [Según carta psicométrica para Cali]
t	hora del día en formato 24 horas	13:00	
T_{surr}	Temperatura alrededores, en este caso temperatura del cielo	30	
$T_{sol-air}$	Temperatura solair (ver definición en la referencia)		

Fuente: Elaboración propia

La temperatura estimada de las superficies de los alrededores llega a igualar la temperatura ambiente de **30°C** = **303.15 K**, se tomará como $[T_{surr}]$.

[Ecuación No.8] Cálculo de resistencia térmica:

$$R_i = \frac{L_i}{k_i}$$

Para valores de **R**, se tomará la *Tabla 21 – 20 del Capítulo 21 del libro “Heat and Mass Transfer” de Cengel.* y otras fuentes.

Composición del elemento

Gráfico No. 42:

Resistencias de los elementos de la pared modificada

Fuente: Elaboración propia.

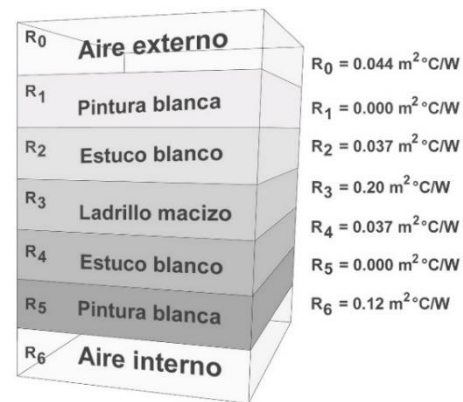


TABLE 21-10

Unit thermal resistance (the *R*-value) of common components used in buildings

Component	<i>R</i> -value		Component	<i>R</i> -value	
	m ² · °C/W	ft ² · h · °F/Btu		m ² · °C/W	ft ² · h · °F/Btu
Outside surface (winter)	0.030	0.17	Wood stud, nominal 2 in. × 6 in. (5.5 in. or 140 mm wide)	0.98	5.56
Outside surface (summer)	0.044	0.25	Clay tile, 100 mm (4 in.)	0.18	1.01
Inside surface, still air	0.12	0.68	Acoustic tile	0.32	1.79
Plane air space, vertical, ordinary surfaces ($e_{\text{eff}} = 0.82$):			Asphalt shingle roofing	0.077	0.44
13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.16	0.90	Building paper	0.011	0.06
20 mm ($\frac{3}{4}$ in.)	0.17	0.94	Concrete block, 100 mm (4 in.):		
40 mm (1.5 in.)	0.16	0.90	Lightweight	0.27	1.51
90 mm (3.5 in.)	0.16	0.91	Heavyweight	0.13	0.71
Insulation, 25 mm (1 in.)			Plaster or gypsum board, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.079	0.45
Glass fiber	0.70	4.00	Wood fiberboard, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.23	1.31
Mineral fiber batt	0.66	3.73	Plywood, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in.)	0.11	0.62
Urethane rigid foam	0.06	0.33	Concrete, 200 mm (8 in.):		
Stucco, 25 mm (1 in.)	0.037	0.21	Lightweight	1.17	6.67
Face brick, 100 mm (4 in.)	0.075	0.43	Heavyweight	0.12	0.67
Common brick, 100 mm (4 in.)	0.12	0.79	Cement mortar, 13 mm (1/2 in.)	0.018	0.10

Datos resistencias

Imagen No. 16:

Unidad de resistencia térmica [R- Value] del estuco

[Ecuación No.9] Valor total $[\Sigma]$ de las resistencias térmicas:

$$R_{total-wall} = \sum_i R_i$$

Tabla No.45:

DATOS DE RESISTENCIAS								
Ingresar valores de resistencias	PAREDES NNE							
	No. de Resistencia	Material	Valor de K W/m ² °C	No. de Longitud	Espesor m	Valor de R m ² °C/W	factor de Reducción	Valor de R m ² °C/W
	R0	Aire externo		L ₀	0	0.044	1	0.04 m ² °C/W
	R1	Pintura Blanca		L ₁	0.01	0.044	1	0.00 m ² °C/W
	R2	Estuco blanco		L ₂	0.01	0.044	1	0.04 m ² °C/W
	R3	Ladrillo Macizo		L ₃	300	0.044	1	0.20 m ² °C/W
	R4	Estuco blanco		L ₄	0.064	0.044	1	0.04 m ² °C/W
	R5	Pintura Blanca		L ₅		0.044	1	0.00 m ² °C/W
	R6	Aire interno		L ₆	0.013	0.044	1	0.12 m ² °C/W

Rtotal	0.44	m² °C/W
---------------	-------------	---------------------------

[Ecuación No.10] Cálculo del coeficiente de la transferencia de calor: $U_{wall} = \frac{1}{R_{total-wall}}$

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Uroof	2.28	W/m² K
--------------	-------------	--------------------------

Cálculo de pérdida de calor:

Pared Nor-Noreste – [NNE] 21 marzo NO SOLEADA

[Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056T_{DP} + 7.3 * 10^{-5}T_{DP}^2 + 0.013 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \right]^{\frac{1}{4}}$

$$T_{surr} = 30\text{ °C} = 303.15\text{ K}$$

[Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s q_{solar}}{h_o} - \frac{\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$

$$T_{sol-air} = 33.1 + \frac{0.45 * 32.11}{10} - \frac{0.75 * 5.67 * 10^{-8} (306.25^4 - 303.15^4)}{10}$$

$$T_{sol-air} = 33.05\text{ °C}$$

[Ecuación No.13] $Q_{wall} = U_{wall} A \Delta T = U_{wall} A (T_{sol-air} - T_{inside})$

$$Q_{wallNNE} = U_{roof} A \Delta T = 2.28 \frac{W}{m^2 K} * 6.95 m^2 (33.05 - 27) K$$

$$Q_{wallNNE} = 96.05\text{ W}$$

[Ecuación No.14] $\dot{q}_{wallNE} = Q_{wallNE} \frac{W}{A m^2}$

$$\dot{q}_{wallNE} = 14 \frac{W}{m^2}$$

[Ecuación No.15] $T_{r-wall} = \frac{\dot{Q}_{wall} h_i}{A} + T_{inside}$

$$T_{r-wallNorthNE} = \frac{96.05 * 0.12}{6.95} + 27 = 28.66 ^\circ C$$

[Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{wall}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$

$$Fraccion_{solar} = \frac{96.05}{32.11 * 6.95} * 100 = 43.04 \%$$

- La reducción en temperatura se refleja de la siguiente manera:

$$29 ^\circ C - 28.66 ^\circ C = 0.34 ^\circ C$$

Modelado Pared SSW [Soleada] MODIFICADA

Cálculo de pérdida de calor:

Pared Sur - SurOeste – [SSW] 21 marzo SOLEADA

[Ecuación No.11] $T_{sky} = (T_o + 273) \left[0.711 + 0.0056 T_{DP} + 7.3 * 10^{-5} T_{DP}^2 + 0.013 \cos \left(\frac{2\pi t}{24} \right) \right]^{\frac{1}{4}}$

$$T_{surr} = 30 ^\circ C = 303.15 K$$

[Ecuación No.12] $T_{sol-air} = T_o + \frac{\alpha_s \dot{q}_{solar}}{h_o} - \frac{\epsilon \sigma (T_o^4 - T_{surr}^4)}{h_o}$

$$T_{sol-air} = 33.1 + \frac{0.45 * 421.11}{10} - \frac{0.75 * 5.67 * 10^{-8} (306.25^4 - 303.15^4)}{10}$$

$$T_{sol-air} = 50.56 ^\circ C$$

[Ecuación No.13] $Q_{wall} = U_{wall} A \Delta T = U_{wall} A (T_{sol-air} - T_{inside})$

$$Q_{wallNE} = U_{roof} A \Delta T = 2.28 \frac{W}{m^2 K} * 10.27 m^2 (50.56 - 27) K$$

$$Q_{wallNE} = 552.38 W$$

[Ecuación No.14] $\dot{q}_{wallNE} = Q_{wallNE} \frac{W}{A m^2}$

$$\dot{q}_{wallNE} = 54 \frac{W}{m^2}$$

[Ecuación No.15] $T_{r-wall} = \frac{\dot{Q}_{wall} h_i}{A} + T_{inside}$

$$T_{r-wallNorthNE} = \frac{552.38 * 0.12}{10.27} + 27 = \mathbf{33.45^{\circ}C}$$

[Ecuación No.16] $Fraccion_{solar} = \frac{Q_{wall}}{\dot{q}_{solar} A} * 100$

$$Fraccion_{solar} = \frac{552.38}{421.11 * 10.27} * 100 = 12.77 \%$$

- La reducción en temperatura se refleja de la siguiente manera:

$$\mathbf{34.77^{\circ}C - 33.45^{\circ}C = 0.32^{\circ}C}$$

Las ecuaciones No. 17, No. 18, No.19, conservan los mismos valores, es decir, no se implementó ninguna estrategia para reducir la carga térmica de las ventanas, ni tampoco cambió la cantidad de personas, ni la tasa metabólica.

Por tanto, se procede con la siguiente ecuación y se toman los valores ya encontrados de las ecuaciones citadas.

[Ecuación No.20] $\dot{Q}_{people-space} = people * metabolic\ rate * AT$

$$\dot{Q}_{people-room} = 2 * 40 * 1.93 = \mathbf{152.4\ W}$$

Con la información obtenida se calcula la carga térmica total de cada una de las habitaciones.

[Ecuación No.21] $\dot{Q}_{total} = \sum_i \dot{Q}_i$

$$\dot{Q}_{total-room1} = \dot{Q}_{Sunroof-NNE} + \dot{Q}_{sunwallNNE} + \dot{Q}_{window-room1} + \dot{Q}_{people}$$

$$\dot{Q}_{total-room1} = 1.141,18 + 96.05 + 51.96 + 154.17 = \mathbf{1.443,37\ W}$$

$$\dot{Q}_{total-room3} = \dot{Q}_{Sunroof-SSW} + \dot{Q}_{sunwallSSW} + \dot{Q}_{window-room3} + \dot{Q}_{people}$$

$$\dot{Q}_{total-room3} = 419,62 + 552.38 + 681.44 + 154.17 = \mathbf{1.804,63\ W}$$

12. BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, D. (2016). *La conurbación como escenario de ordenamiento en la región metropolitana de Santiago de Cali* [Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá]. <http://bdigital.unal.edu.co/53046/>
- Andrew, R. M. (2019). Global CO2 emissions from cement production, 1928-2018. *Earth System Science Data*, 11(4), 1675–1710. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- ASHRAE. (2017a). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE Inc.*, 2017, 66.
- ASHRAE. (2017b). FUNDAMENTALS. In C. © 2017 ASHRAE. (Ed.), *ASHRAE® HANDBOOK* (2017th ed., Issue SI Edition).
- ASHRAE. (2018). Chapter 9. Thermal comfort. In *Fundamentals Handbook SI Edition* (Issue Fanger 1967, pp. 134–137).
- Asimakopoulous, D., & Santamouris, M. (2013). Passive Cooling of Buildings. In Earthscan (Ed.), *Passive Cooling of Buildings*. Earthscan. <https://doi.org/10.4324/9781315073668>
- Bertalanffy, L. von. (1968). *General System Theory* (First Editi). https://monoskop.org/images/7/77/Von_Bertalanffy_Ludwig_General_System_Theory_1968.pdf
- CAEM. (2015). Validate inventory of the brick sector in Colombia. *Climate & Clean Air Coalition*, 134. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/inventory-and-assessment-tool-colombia-black-carbon-and-other-pollutant-emissions-brick>
- CCAC. (2016). Training Manual Brick Sector in Latin America. *Climate and Clean Air Coalition*, 56.
- Cengel, Y. A. (2009). *Termodinamica*. 1041.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). Heating and Cooling of Buildings. In *Heat & Mass Transfer: Fundamentals & Applications* (Fifth Edit, p. 902). McGraw-Hill Education.
- Coch, H., & Serra, R. (1995). *Arquitectura y energía natural* (Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya (ed.); Primera Ed). Servei de Publicacions de la UPC y CBS – Impressió digital Pintor Fortuny 151, 08224 Terrassa.
- Da Costa, B. (2012). Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil [Universidade Federal do Rio de Janeiro]. In *Universidade Federal do Rio de Janeiro*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Dan Gavrilletea, M. (2017). Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of sand market. *Sustainability (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071118>
- DAPM. (2003). Plan de desarrollo estratégico Comuna Dos 2004-2008. In *Alcaldía de Santiago de Cali. Plan de Desarrollo Municipal*. (pp. 1–37). <http://www.cali.gov.co/publico2/documentos/planeacion/planterritorial/com19.pdf>
- Daviet, F., & Ranganathan, J. (2005). The Greenhouse Gas Protocol: The GHG Protocol for Project Accounting. *The Project Protocol*, 144. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4584.9043>
- de Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *UC Berkeley: Center for the Built Environment.*, 104(Pt 1A), 145–167. <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- DESA UN. (2018). The speed of urbanization around the world. *Population Facts*, N°. 2018/1, 1–2. https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-PopFacts_2018-1.pdf
- Diego-Mas, & Antonio, J. (2015). Evaluación del confort térmico con el método de Fanger. *Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia, consulta 0*, 1–12. <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/fanger/fanger-ayuda.php>
- Eco Green energy. (2018). *Ficha técnica Panel Solar. Building a Greener World EGE-100P-36*.
- FAO. (2016). *Estado mundial del recurso suelo*. FAO. Food and agriculture organization.
- Fu, W., Turner, J. C., Zhao, J., & Du, G. (2015). Ecological footprint (EF): An expanded role in calculating resource productivity (RP) using China and the G20 member countries as examples. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.023>
- Fukurozaki, S. H., Zilles, R., & Sauer, I. L. (2013). Energy Payback Time and CO2 Emissions of 1.2 kWp Photovoltaic Roof-Top System in Brazil. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2(2),

- 164–169. <https://doi.org/10.12720/sgce.2.2.164-169>
- Giraldo, W., & Herrera, C. A. (2017). *Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial*. 35(1).
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/8030/8944>
- González, M. J., & García Navarro, J. (2006). Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, 41(7), 902–909.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- Greening, L. A., Greene, D. L., & Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey. *Energy Policy*, 28(6–7), 389–401. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5)
- GROAT, WNAG, L. (2013). ARCHITECTURAL RESEARCH METHODS. In 2013 (Vol. 2, Issue 2).
- Hissong, R. I. (2000). *Las teorías y las prácticas de desarrollo desde la perspectiva de la modernidad*. 32.
<http://www.bivipas.unal.edu.co/handle/10720/262>
- ICONTEC. (2007). NTC - ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. *Icontec*, 2(571), 1–24. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>
- IISI. (2002). World Steel Life Cycle Inventory Methodology Report 1999/2000 - International Iron and Steel Institute. *Methodology, October 2002*, 96.
- IPCC. (2013). Ficha informativa del IPCC: ¿Qué es el IPCC? *Livestock Research for Rural Development*, 2.
https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- IPCC. (2021). Borrador del Sexto Informe de Evaluación del Grupo de Trabajo III. *Comunicado de Prensa*, 1, 3.
- Isasa, M., Gazulla, C., I., Z., Oregi, X., P., P., & Duclos, L. (2014). EnerBuilCA: life cycle assessment for energy efficiency in buildings. *World SB 2014, July 2015*, 1–32.
- ISO. (2005). ISO 7730. *Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, Third Edition*.
- Jerry Marks, Lubetsky, J., Steiner, B. A., Faerden, T., Lubetsky, J. S., Lindstad, T., Olsen, S. E., Tranell, G., Marks, J., Agyemang-Bonsu, W. K., Born, M. F., Green, L., Kvande, H., Martchek, K., Rand, S., Tranell, G., Tripp, T., Lubetsky, J. S., Marks, J., & Lubetsky, J. S. (2006). Metal Industry Emissions. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3: Industrial Process and Product Use, 85.
http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf
- Kemenes, A., Forsberg, B. R., & Melack, J. M. (2011). CO2 emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(3), 1–11.
<https://doi.org/10.1029/2010JG001465>
- Kennedy, C., Pincetl, S., & Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 1965–1973.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>
- Lienhard, J. H. I., & Lienhard, J. H. V. (2020). *A Heat Transfer Textbook*, (Fifth edit). Phlogiston Press. Cambridge, Massachusetts, USA.
- Macías, A. (2012). *Proyecto mejoramiento bioclimático vivienda urbana*. Universidad del Valle.
- MAVDT. (2014). *Ley 1715 de 2014. Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. May, 2014.
- MAVDT, & PNUD. (2013). Residuos de Asbestos y productos que los contengan. In OCADE (Ed.), *Guía técnica para la gestión Ambiental sobre Residuos* (1st ed.). Ministerio a Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2019-03/GUIA_RESIDUOS_DE_ASBESTO_FINAL.pdf
- Minambiente. (2018). *Retos al 2030 de la gestión de la calidad del Aire. Diálogo constructivo con el sector ladrillero Nacional*.
- Mithraratne, N., & Vale, B. (2004). Life cycle analysis model for New Zealand houses. *Building and Environment*, 39(4), 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.09.008>
- Moedinger, F. (2005). Sustainable Clay Brick Production– A CASE STUDY. *World Sustainable Building Conference, 2005(September)*, 3–4.
- Mora, J. G. (2013). Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. *Resolución 822, 3382*, 65.

- Olesen, Bjarne W., Brager, G. S. (2004). A better way to predict thermal comfort. *ASHRAE Journal*, August, 20–26.
https://escholarship.org/uc/item/2m34683k%0Ahttp://repositories.cdlib.org/cedr/cbe/ieq/OlesenBrager2004_comfort/
- Olgyay, V. (1968). *Clima y arquitectura en Colombia* (Carvajal (ed.); Primera ed). Universidad del Valle.
- ONU. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. *Aprobación Del Acuerdo de Paris*, 20489, 4.
- ONU. (1998). Protocolo de KYOTO. *Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*, 24, 24. <https://doi.org/10.1145/115790.115803>
- ONU. (2015). COP21 - Acuerdo de París. *Convencion Marco de Las Naciones Unidas Para El Cambio Climático*, 1(12 de diciembre), 27. <https://doi.org/10.16925/co.v25i111.1874>
- Ramaswamy, V., Shine, K., Leovy, C., Wang, W.-C., Rodhe, H., Wuebbles, D., Ding, M., Lelieveld, J., Edmonds, J. A., McCormick, M. P., Fraser, P., Oort, A., Grant, K., Schwarzkopf, M. D., Johnson, C., Suter, A., Lashof, D., Warrilow, D. A., Leggett, J., & Wigley, T. (2001). Radiative Forcing of Climate. *Climatic Change*, 349, 7.1-1.26.
- Rosillo, M., & Herrera, C. (2019). *Confort y eficiencia energética en el diseño de edificaciones. Un enfoque práctico* (E. U. del Valle (ed.); Primera Ed).
- Ruiz, M., Way, A., & Ca, B. (2008). Represas sucias. Las represas y las emisiones de gases efecto invernadero. *International Rivers*, 4. http://www.internationalrivers.org/files/attached-files/represassuciasrevisada_2.pdf
- Serra, Coch. (1991). *Arquitectura y energía natural*.
- Swisscontact, & CCAC. (2015). *Portafolio de Tecnologías en America Latina de Sector Ladrillero*.
http://www.redladrilleras.net/apps/manual_ccac/pdf/es/Portafolio-Tecnologias-America-Latina_b.pdf
- Torres, C. (2009). Ciudad informal colombiana: barrios construidos por la gente. In *Santa Fe de Bogotá. Editorial Unal*. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2017.09.017>
- UN-Habitat. (2015). *UIA World Congress, Durban 2014. June 1993*, 2014–2015.
- UNEP. (2014). Sand, rarer and one thinks. *Global Environmental Alert Service - GEAS*, 2012(March), 1–15.
- Varun, Bhat, I. K., & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1067–1073.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.004>
- Venegas, A. O. (2018). *Evaluación de la energía contenida, emisiones de co2 y material particulado en la fabricación del ladrillo semi-mecanizado tocharo en Cuenca, a través del análisis de ciclo de vida (ACV)*. 62.
- Visser, W., & Brundtland, G. H. (2013). Our Common Future ('The Brundtland Report'): World Commission on Environment and Development. *The Top 50 Sustainability Books*, 52–55.
https://doi.org/10.9774/gleaf.978-1-907643-44-6_12
- Wackernagel, M., & Rees, W. (2003). Nuestra huella ecológica : Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra. *Open Edition Journals*, 1. <http://journals.openedition.org/polis/7216>
- Wilches, F., & Suarez, C. (2016). *Evaluación de la huella de carbono en la producción de bloque de arcilla en ladrillera "los Cristales"* (Vol. 3, Issue 1) [Universidad Libre de Colombia].
<https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666>
- Yıldız, G., Çalış, B., Gürel, A. E., & Ceylan, İ. (2020). Investigation of life cycle CO2 emissions of the polycrystalline and cadmium telluride PV panels. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 14(June). <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100343>